

ISSN 1672-3708

CN 33-1306/Z

# 台州学院学报

JOURNAL OF TAIZHOU UNIVERSITY

总第257期 | VOL.48 NO.3



**3 · 2026**

TAIZHOU XUEYUAN XUEBAO

# 台州学院·药学院

## 学院简介

台州学院药学院成立于2022年6月，现设有生物制药和药学2个本科专业。学院紧扣台州市委市政府重大决策部署，成功申报烹饪与营养教育专业。

学院拥有一支以资深专家、中青年教授和博士为骨干的学科科研队伍。现有教职工65人，其中正高级职称8人、副高级职称11人，44名青年教师均具有博士学位。学院实行“PI科研团队+教学组织”的新型运行模式，现有以全国优秀

教师、国家高层次人才特殊支持计划领军人才、教育部新世纪优秀人才等国家级人才为学科带头人的7个高水平PI科研团队。2人入选2023年度全球前2%顶尖科学家榜单（其中1人入选终身科学影响力排行榜），1人入选台州市高层次人才特殊人才支持计划，1人入选“三台学者”。



药学院大楼规划效果图

## 教研平台

学院办学条件优良，仪器设备先进。现有教学科研实验室面积3 315.05 m<sup>2</sup>，仪器设备1 164台，仪器设备原值近2 154万元。拥有浙江省高端医药全链智造协同创新中心、台州市濒危植物可持续利用重点实验室（2022年12月—2024年11月期满考核获评优秀等级）等省市级科研平台，并与浙江海正药业股份有限公司共建“全省特色抗感染药物生物制造重点实验室”。聘任产业教授11名（其中国家级人才2名、省部级人才3名、省级产业教授1名）、科技副总3名。承接企业合作项目30项，到账经费1 400余万元，授权专利9项，科研成果转化12项。



本科教学实验室掠影



产教融合校企合作签约仪式

03  
Vol.48 No.3

# 台州学院学报

JOURNAL OF TAIZHOU  
UNIVERSITY (总第257期)

中国人文社会科学引文数据库(CISSCD)来源期刊

万方数据——数字化期刊群全文收录期刊

维普中文期刊全文数据库收录期刊

中国知网全文数据库收录期刊

主管单位 台州学院  
Authority Taizhou University

主办单位 台州学院  
Sponsor Taizhou University

主编 韩得满  
Editor-in-chief Han Deman

副主编 邵凯云  
Deputy Editor Shao Kaiyun

编辑出版 台州学院学报编辑部  
Edited by Editorial Board of Journal of Taizhou University

地址 浙江省临海市东方大道605号  
Address No. 605, Dongfang Avenue, Linhai, Zhejiang Province

邮编 317000  
Postcode

网址 <https://journal.tzc.edu.cn>  
The URL

印刷单位 台州印刷厂(有限公司)  
Printed by Taizhou Printing House (Co., Ltd.)

国内发行 台州学院学报编辑部  
Domestic Distributor Editorial Board of Journal of Taizhou University

国外发行 中国出版对外贸易总公司(北京782信箱 邮编:100011)  
Overseas Distributor China National Publishing Industry Trading Corporation (P. O. Box 782, Beijing 100011, China)

电子邮箱 xbb@tzc.edu.cn  
E-mail

电话 0576-85137169  
Tel.

# 目次

## 数学与建模

碳化硅外延层厚度的测量模型

..... 杨 阳, 李梁琪, 李金柱, 李韶伟 | 01

多烟幕干扰弹的协同投放策略

..... 赵晓垒, 王厚硕, 李冰聪, 李纪伟 | 09

## 珍稀濒危植物生态与保护

珍稀植物伯乐树褐斑病病原菌的分离与鉴定

..... 蒋 明, 周梦亚, 王军峰, 鲍洪华, 张慧娟 | 19

濒危植物夏蜡梅幼苗群落草本层生态位及种间联结

..... 王晓燕, 秦 娇, 余 臻, 陈格格, 陈桂彬, 郭佳婧, 陈雅利 | 28

## 生物学

茶山溪底栖动物群落结构特征及其生物多样性研究

..... 吴国强, 葛 勇, 顾羽婷, 许 娜, 郭可心, 齐 鑫 | 38

## 医学

NEDD8 结合酶 UBE2M 调控疾病进展的研究现状

..... 程 凯, 杨舒涵, 王兴意, 孙东升, 韦俊东, 周丽莎 | 45

小分子天然产物醉茄素 A 抗肿瘤活性及机制研究进展

..... 金 楠, 卢顾然, 朱佳怡, 陈 曦 | 54

## 应用统计

我国制造业城市技术创新策源能力演进及特征分析

——以地级制造业城市为例..... 王香莲 | 63

社区老年人跌倒调查及其危险因素研究

——以浙江省台州市黄岩区为例..... 郑 媚, 舒幼平, 郑超男 | 73

## 教育·教学

学科竞赛视域下地方应用型本科院校生物科学专业人才培养的探索和实践

——以台州学院为例..... 王晓华, 程瑾莹, 程子良, 李月灵 | 81

档案袋评价法在“房屋建筑学”课程中的应用 ..... 俞 静 | 86

# CONTENTS

Measurement Model for the Thickness of Silicon Carbide Epitaxial Layers .....Yang Yang, Li Liangqi, Li Jinzhu, Li Shaowei	01
Research on the Coordinated Deployment Strategy of Multiple Smoke Jamming Projectiles .....Zhao Xiaolei, Wang Houshuo, Li Bingcong, Li Jiwei	09
Isolation and Identification of the Pathogen Causing Brown Spot Disease in the Rare Plant <i>Bretschneidera sinensis</i> .....Jiang Ming, Zhou Mengya, Wang Junfeng, Bao Honghua, Zhang Huijuan	19
Niche and Interspecific Associations of the Herb Layer in Endangered Plant <i>Calycanthus chinensis</i> Communities .....Wang Xiaoyan, Qin Jiao, Yu Zhen, Chen Gege, Chen Guibin, Guo Jiajing, Chen Yali	28
Analysis of the Community Structure and Biodiversity of Benthic Animals in Chashan Stream .....Wu Guoqiang, Ge Yong, Gu Yuting, Xu Na, Guo Kexin, Qi Xin	38
Research Status of NEDD8-Conjugating Enzyme UBE2M Regulating Disease Progression .....Cheng Kai, Yang Shuhan, Wang Xingyi, Sun Dongsheng, Wei Jundong, Zhou Lisha	45
Research Advances on Antitumor Activity and Mechanism of Small Molecule Natural Products Withaferin A .....Jin Nan, Lu Guran, Zhu Jiayi, Chen Xi	54
Analysis on the Evolution and Characteristics of Technological Innovation Source Capability of Advanced Manufacturing Cities in China —Taking Prefecture-Level Manufacturing Cities as an Example .....Wang Xianglian	63
Investigation on Falls among the Elderly in the Community and Research on Its Risk Factors —Taking Huangyan District, Taizhou City, Zhejiang Province as an example .....Zheng Mei, Shu Youping, Jia Chaonan	73
Exploration and Practice of Talent Cultivation in Biological Science Major of Local Application-Oriented Undergraduate Universities from the Perspective of Disciplinary Competitions —Taking Taizhou University as an example .....Wang Xiaohua, Cheng Cuiying, Cheng Ziliang, Li Yueling	81
A Study on the Application of the Portfolio Assessment Method in the Building Architecture Course .....Yu Jing	86

# 碳化硅外延层厚度的测量模型

杨 阳, 李梁琪, 李金柱, 李韶伟  
(台州学院 人工智能学院, 浙江 台州 318000)

**摘要:**本文基于 2025 年全国大学生数学建模竞赛 B 题数据, 依据光干涉原理与斯涅耳定律, 构建了多光束干涉数学模型。在数据处理与计算优化方面, 提出一种将峰值间距法与快速傅里叶变换相结合的迭代优化算法, 通过多轮迭代有效降低计算误差, 实现了对碳化硅外延层厚度的精确反演。

**关键词:**碳化硅; 斯涅耳定律; 多光束干涉; 峰值间距法; 傅里叶变换

DOI:10.13853/j.cnki.issn.1672-3708.2026.03.001

## 0 引言

碳化硅(SiC)是第三代半导体材料的典型代表, 在高温、高频、高功率密度场景中具备传统半导体无法比拟的宽禁带、高临界击穿场强、高电子漂移速度和优异热导率等优势<sup>[1]</sup>。外延层厚度是决定碳化硅器件性能的核心参数, 其精度直接影响器件的导通特性。因此, 建立科学、准确的外延层厚度测试标准, 是推进碳化硅器件产业化的关键前提。

针对碳化硅外延层厚度测量问题, 已有学者研发了多种方法, 如: 光谱椭圆偏振法(SE)通过建立复杂光学模型进行拟合, 可同时解析厚度与光学常数<sup>[2]</sup>; 共聚焦拉曼光谱法通过纵向扫描获取外延层与衬底界面的信号拐点来计算厚度<sup>[3]</sup>; X 射线反射法(XRR)结合遗传算法对反射数据进行拟合, 实现了对厚度、密度和粗糙度等多参数的高精度提取<sup>[4]</sup>。尽管这些方法精度较高, 但存在设备昂贵或测试周期较长等问题。

相比之下, 红外反射光谱法(FTIR)因具有快速、无损、易在线监测等优势, 已成为微米级外延层工业化量产中的主流手段<sup>[5-6]</sup>。然而, 碳化硅的折射率随掺杂载流子浓度的变化而改变, 导致由传统红外反射谱直接计算厚度存在较大误差。因此, 如何建立折射率与载流子浓度等可测参量之间的定量关系, 是提升该方法测量精度的关键难点。

本文利用 2025 年全国大学生数学建模竞赛 B 题<sup>[7]</sup>的附件数据及相关假设(图 1), 建立基于红外干涉法的厚度测量模型, 并通过迭代优化降低系统误差。针对折射率受载流子浓度影响的问题, 提出一种结合干涉条纹分析与色散效应的厚度反演方法, 实现了碳化硅外延层厚度的高精度测量。

## 1 外延层厚度测量模型

为建立碳化硅外延层厚度的精确测量模型, 本节基于多光束干涉原理, 结合斯涅耳定律与菲涅耳公式, 推导红外反射光谱与外延层厚度之间的定量关系。该模型建立在 4 个基本假设基础之上: (1) 空气折射率为真空折射率  $n_0 = 1$ ; (2) 外延层厚度均匀, 内部载流子浓度恒定, 折射率均匀; (3) 入射红外光为单

收稿日期: 2026-03-05

作者简介: 杨 阳(2004— ), 女, 浙江台州人, 2023 级数学与应用数学(师范)专业本科生; 李韶伟(通信作者)(1979— ), 男, 浙江仙居人, 讲师, 博士, 主要从事数学建模等研究。

色平面波,且在界面处满足能量守恒,无吸收损耗;(4)外延层与衬底界面光学性质突变,且衬底厚度远大于外延层,忽略衬底背面反射的影响。

### 1.1 单界面反射与透射系数

如图1所示,红外光以入射角 $\alpha$ 从空气射向碳化硅外延层,在空气-外延层界面发生反射和折射。

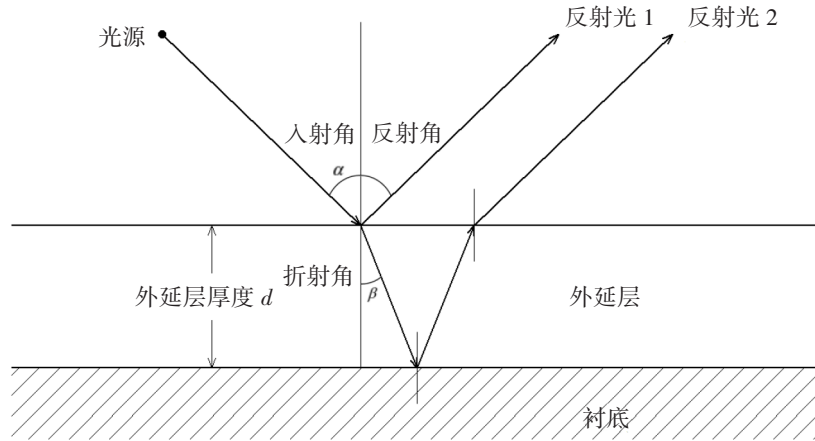


图1 外延层厚度测量原理示意图

设外延层折射率为 $n_1$ ,折射角为 $\beta$ ,空气折射率 $n_0 = 1$ 。由斯涅耳定律<sup>[8]</sup>得

$$n_0 \sin \alpha = n_1 \sin \beta, \text{ 即 } \cos \beta = \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n_1} \sin \alpha\right)^2}。 \quad (1)$$

光在界面上的振幅反射系数和透射系数由菲涅耳公式<sup>[9]</sup>给出。对于 $s$ 偏振(垂直于入射面)和 $p$ 偏振(平行于入射面),其反射系数 $r$ 和透射系数 $t$ 的计算公式分别为

$$r_s = \frac{\cos \alpha - n_1 \cos \beta}{\cos \alpha + n_1 \cos \beta}, \quad t_s = \frac{2 \cos \alpha}{\cos \alpha + n_1 \cos \beta}, \quad (2)$$

$$r_p = \frac{n_1 \cos \alpha - \cos \beta}{n_1 \cos \alpha + \cos \beta}, \quad t_p = \frac{2 \cos \alpha}{n_1 \cos \alpha + \cos \beta}。 \quad (3)$$

类似地,对于外延层-衬底界面,设衬底折射率为 $n_2$ ,入射角为 $\beta$ ,衬底内折射角为 $\gamma$ ,由斯涅耳定律可得出 $n_1 \sin \beta = n_2 \sin \gamma$ ,以及该界面的反射系数 $r_{12,s}$ 、 $r_{12,p}$ 和透射系数(在后续多光束干涉模型中,仅需反射系数即可)。

### 1.2 多光束干涉模型

在实际测量中,红外光在外延层上下界面间将发生多次反射与透射,形成一系列反射光束。这些光束具有固定的相位差,叠加后产生干涉。设相邻两束反射光之间的相位差为

$$\delta = \frac{4\pi n_1 d \cos \beta}{\lambda}, \quad (4)$$

其中: $d$ 为外延层厚度; $\lambda$ 为真空中光的波长。

考虑到无穷多束反射光的叠加,总反射系数可表示为几何级数求和。以空气-外延层界面为参考,第一束反射光(未经外延层内往返)的反射系数为 $r_{01}$ (对应偏振取相应值)。第二束光在外延层内往返一次后透射回空气,其贡献值为 $t_{01}r_{12}t_{10}e^{i\delta}$ ,其中 $t_{01}$ 为空气到外延层的透射系数, $t_{10}$ 为外延层到空气的透射系数(反向透射系数), $r_{12}$ 为外延层-衬底界面的反射系数。后续各束光每多往返一次,就会增加因子 $r_{10}r_{12}e^{i\delta}$ 。利用斯托克斯<sup>[8]</sup>倒逆关系( $t_{01}t_{10} = 1 - r_{01}^2$ , $r_{10} = -r_{01}$ ),可对无穷级数求和,得到总反射系数

$$r_{\text{all}} = \frac{r_{01} + r_{12}e^{-i\delta}}{1 + r_{01}r_{12}e^{-i\delta}}, \quad (5)$$

对应偏振的反射率  $R = |r_{\text{all}}|^2$ 。分别计算  $s$  偏振和  $p$  偏振的反射率  $R_s$  和  $R_p$ , 取平均值得出总反射率

$$R = \frac{1}{2}(R_s + R_p)。 \quad (6)$$

将式(5)代入式(6), 可得反射率关于波长  $\lambda$ 、厚度  $d$ 、入射角  $\alpha$  及折射率  $n_1, n_2$  的函数关系。该表达式是多光束干涉的严格解, 记为

$$R(\lambda) = \frac{1}{2} \left( \left| \frac{r_{01,s} + r_{12,s}e^{-i\delta}}{1 + r_{01,s}r_{12,s}e^{-i\delta}} \right|^2 + \left| \frac{r_{01,p} + r_{12,p}e^{-i\delta}}{1 + r_{01,p}r_{12,p}e^{-i\delta}} \right|^2 \right), \quad (7)$$

其中各系数均依赖于偏振和角度。

由式(4)可知, 相位差  $\delta$  随波长的变化, 导致反射率随波长呈周期性振荡。干涉极大值出现在  $\delta=2m\pi$  处, 即

$$\delta = 2n_1d \cos\beta = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots; \quad (8)$$

而干涉极小值出现在  $\delta = (2m + 1)\pi$  处。因此, 通过分析反射光谱的周期(相邻极大或极小之间的波长或波数间隔), 可反推出厚度  $d$  的值。

值得注意的是, 若忽略外延层内的多次反射, 即仅考虑前两束反射光, 则总反射率近似为双光束干涉形式, 此时式(7)可简化为  $R \approx |r_{01} + (1 - r_{01}^2)r_{12}e^{i\delta}|^2$ , 但该近似值仅在反射率较小或厚度较大时成立。为保证精度, 本文采用严格的多光束干涉模型[式(7)]。

## 2 优化模型

严格的多光束干涉模型(简称基础模型)虽能描述红外反射光谱的基本特征, 但在实际应用中存在三方面局限:(1)折射率被假设为常数, 而碳化硅材料具有显著的色散效应;(2)反射光谱中的噪声干扰影响干涉周期的准确提取;(3)单次计算无法充分利用全光谱信息, 厚度反演精度受限。针对这些局限, 本节从3个层面构建优化模型: 首先引入 Sellmeier 方程描述折射率色散特性; 其次融合峰值间距法与傅里叶变换提取干涉周期; 最后采用牛顿迭代法对厚度进行全局优化。

### 2.1 基于 Sellmeier 方程的动态折射率建模

在基础模型中, 假设外延层折射率为常数。在实际应用中, 碳化硅材料的折射率会随入射光波长而变化(色散效应)。若忽略色散效应, 直接用恒定折射率值进行厚度反演, 将产生系统性误差。为此, 本节引入 Sellmeier 方程<sup>[8]</sup>建立折射率与波长的定量关系, 实现对动态折射率的精准描述。

Sellmeier 方程基于经典色散理论的经验公式, 能够准确描述透明介质在透明波段的折射率色散特性。对于碳化硅材料, 其折射率  $n_1$  与波长  $\lambda$  (单位:  $\mu\text{m}$ ) 的关系可表示为

$$n_1^2(\lambda) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E}, \quad (9)$$

其中,  $A, B, C, D, E$  为材料常数, 可通过拟合实验数据确定。本文后续将结合赛题提供的数据, 利用该色散关系建立完整的厚度反演模型。

在红外反射光谱测量中, 常采用波数  $\nu$  (单位:  $\text{cm}^{-1}$ ) 代替波长, 二者换算关系为  $\nu = 10^4/\lambda$ 。将式(9)转换为波数域表达, 并进行泰勒展开, 可得到折射率关于波数的多项式近似形式:

$$n_1(\nu) = A' + B'\nu^2 + C'\nu^4 + O(\nu^6) \quad (10)$$

由于折射率是波长的偶函数(即关于频率的偶函数),式(10)中仅保留偶次项。该近似形式在有限波数范围内具有足够精度,且便于后续数值计算。

参考碳化硅材料的光学常数研究文献[10],结合赛题提供的数据范围,确定式(10)中参数的初始估计范围:

$$A' \in [2.50, 2.60], B' \in [1 \times 10^{-8}, 5 \times 10^{-8}], C' \in [-5 \times 10^{-15}, 0],$$

其中: $A'$  对应长波极限下的折射率平方根; $B'$  和  $C'$  分别描述色散的阶和低阶修正项。负的  $C'$  取值范围反映了折射率随波数增加(波长减小)而增大的正常色散特性。

在后续的迭代优化过程中,为保障参数更新的稳定性,引入3项控制策略:(1)最大迭代次数限制。设为10次,防止算法陷入无限循环。(2)步长衰减因子。取值0.8,削弱波动幅度,使算法平稳收敛。(3)参数边界约束。在每次迭代后对参数进行越界检查,确保结果物理合理。

为直观展示碳化硅的折射率色散特性,基于初始参数范围的中值,绘制折射率随波长的变化曲线,如图2所示。从图2可以清晰地看出:(1)在短波区域( $\lambda < 5 \mu\text{m}$ ),折射率较高且变化较快,最大约为2.675;(2)随着波长增加,折射率单调递减,在波长  $8 \mu\text{m}$  附近降至约2.627;(3)当波长超过  $10 \mu\text{m}$  时,折射率衰减速率明显放缓,趋于平稳,在波长  $16 \mu\text{m}$  处约为2.624。

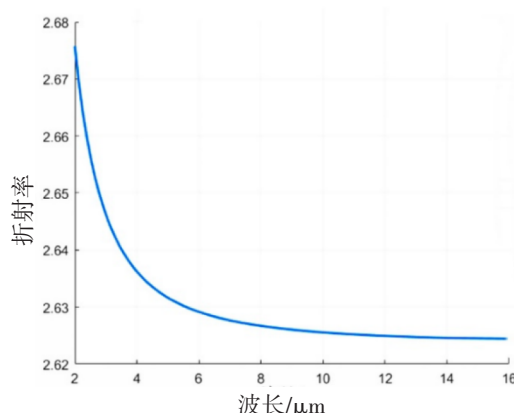


图2 碳化硅折射率变化曲线图

这一色散特性表明,在宽波段范围内采用恒定折射率将引入显著误差,尤其是在短波长区域。因此,在厚度反演模型中必须考虑折射率的动态变化,本节引入 Sellmeier 方程是必要的。

## 2.2 基于峰值间距法的干涉周期提取

峰值间距法利用红外干涉光谱的周期性特征估算外延层厚度,通过峰值检测与间距分析两个核心环节实现对干涉周期的精准提取。该方法具有直观、计算量小的优点,可为后续迭代优化提供良好的初始值。

### 2.2.1 峰值检测

峰值检测的目标是从反射光谱中准确识别干涉极大值对应的位置,具体操作分为三步:(1)局部极值识别。在反射率信号  $R(\nu)$  中识别所有局部极大值点。对于离散采样数据,通过比较相邻三点,确定候选峰值。若  $R(\nu_i) > R(\nu_{i-1})$  且  $R(\nu_i) > R(\nu_{i+1})$ , 则  $\nu_i$  为候选峰值位置。(2)自适应阈值筛选。为避免噪声干扰和基线漂移,本文采用三准则(最小峰值突出度,最小峰值间距,边缘排除)筛选有效峰值。(3)峰值位置精确定位。对检测到的峰值区域进行抛物线插值拟合,以亚像素精度确定峰值中心位置(个数记为  $M$ )。

### 2.2.2 间距分析

在获得峰值位置序列  $\{\nu_{p,1}, \nu_{p,2}, \dots, \nu_{p,M}\}$  后,进行间距分析:(1)计算相邻峰值间距。计算所有相邻峰值之间的波数差  $\Delta\nu_i$ 。(2)剔除异常间距值。计算间距平均值和标准差,再剔除偏离平均值2倍以上标准差的异常值。(3)确定平均间距。求有效间距的平均值,得到平均峰值间距  $\overline{\Delta\nu}$ 。

图(3~6)展示了入射角为  $10^\circ$  和  $15^\circ$  时的峰值检测结果及间距分布。从各图中可观察以下特征:(1)峰

值形态差异。不同入射角下,反射光谱的振荡幅度分布存在差异,这是由于入射角影响反射系数和有效光程所致。(2)平均间距变化。入射角  $10^\circ$  和  $15^\circ$  时的平均峰值间距分别为  $186.62 \text{ cm}^{-1}$  和  $175.25 \text{ cm}^{-1}$ ,表明入射角增大导致干涉周期减小。(3)离散性分析。峰值间距存在一定离散性,主要源于折射率色散和测量噪声的共同影响。

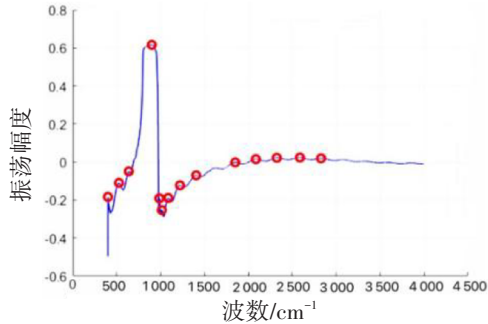


图3 入射角为  $10^\circ$  的峰值检测结果图

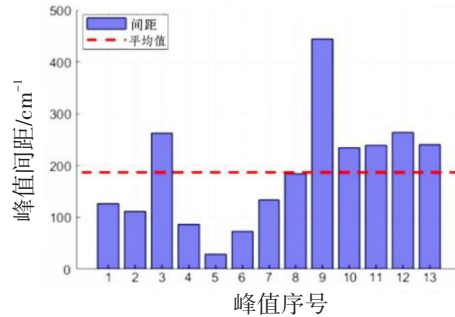


图4 入射角为  $10^\circ$  的峰值间距图

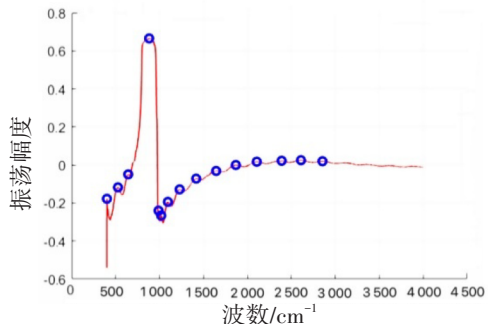


图5 入射角为  $15^\circ$  的峰值检测结果图

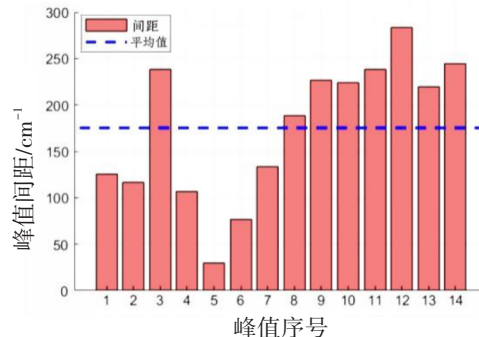


图6 入射角为  $15^\circ$  的峰值间距图

### 2.3 基于傅里叶变换的干涉周期验证

峰值间距法直接作用于光谱信号,易受噪声和局部畸变干扰。为验证周期提取的可靠性,引入傅里叶变换方法,将干涉信号从波数域转换至频域,实现主导周期性频率的全局识别。

红外反射光谱可视为多个频率成分的叠加。反射率可展开为傅里叶级数形式:

$$R(\nu) = R_0 + \sum_{k=1}^M A_k \cos(4\pi n_k d_k \nu \cos \alpha_k + \varphi_k), \quad (11)$$

其中: $R_0$  为背景反射率; $A_k$  为第  $k$  阶干涉项的振幅; $\varphi_k$  为初始相位。在实际测量中,高阶项振幅迅速衰减,主导成分为基频项 ( $k = 1$ )。

对式(11)进行傅里叶变换,得到频域表达式:

$$F\{R(\nu)\} = R_0 \delta(f) + \sum_{k=1}^M \frac{A_k}{2} [\delta(f - f_k) e^{i\varphi_k} + \delta(f + f_k) e^{-i\varphi_k}], \quad (12)$$

其中,特征频率

$$f_k = 2n_k d_k \cos \alpha_k. \quad (13)$$

对于均匀外延层,基频成分  $f_1$  对应厚度信息,高阶频率  $f_k = k f_1$ ,为倍频成分。

对实测反射光谱进行快速傅里叶变换(FFT),得到幅度谱  $|F(f)|$ 。在幅度谱中识别显著峰值,其对应的频率值即为  $f_1$ 。将  $f_1$  代入式(13)后,可得出厚度估计

$$d = \frac{f_1}{2n_1 \cos \alpha_1}. \quad (14)$$

与峰值间距法相比,FFT方法具有抗噪性强、全局性好和可自动倍频识别的优势。

#### 2.4 基于周期提取的厚度初值估计

本节融合峰值间距法与傅里叶变换的结果,建立厚度初值估计算法。由于折射率 $n_1$ 与波长相关,须计算当前波数范围内的平均折射率:

$$\bar{n}_1 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K n_1(v_i), \quad (15)$$

其中: $K$ 为波数区间内的数据点总数; $n_1(v_i)$ 由式(10)计算得出。

结合平均峰值间距 $\overline{\Delta\nu}$ 、平均折射率 $\bar{n}_1$ 及折射角 $\beta$ 得出的厚度初值 $d_0 = 1/(2\overline{\Delta\nu}\bar{n}_1\cos\beta)$ ;利用FFT方法得到的厚度初值 $d_0^{(\text{FFT})} = f_1/(2\bar{n}_1\cos\beta)$ 。本文采用加权平均得出迭代初始值

$$\tilde{d}_0 = 0.3d_0 + 0.7d_0^{(\text{FFT})}。 \quad (16)$$

#### 2.5 基于牛顿迭代法的厚度优化

为进一步提升测量精度,将厚度求解转化为非线性最小二乘优化问题,通过牛顿迭代法使理论反射率与实测反射率的残差平方和最小化。

定义目标函数为理论反射率 $R_t(d, v_i)$ 与实测反射率 $R_m(v_i)$ 的残差平方和:

$$F(d) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M [R_t(d, v_i) - R_m(v_i)]^2, \quad (17)$$

其中: $d$ 为待优化的外延层厚度; $v_i$ 为第 $i$ 个波数采样点; $M$ 为数据点总数。理论反射率 $R_t(d, v_i)$ 由多光束干涉模型[式(7)]结合Sellmeier色散[式(9)]计算所得,其中折射率随波长动态变化。

牛顿迭代法是一种高效的二阶优化方法<sup>[8]</sup>,其核心迭代公式为

$$d_{k+1} = d_k - \frac{F'(d_k)}{F''(d_k)}, \quad (18)$$

其中: $d_k$ 为第 $k$ 次迭代的厚度估计值; $F'(d_k)$ 与 $F''(d_k)$ 分别为目标函数在 $d_k$ 处的一阶和二阶导数。计算方法如下:

(1)计算一阶导数:

$$F'(d_k) = \sum_{i=1}^M [R_t(d, v_i) - R_m(v_i)] \frac{\partial R_t(d, v_i)}{\partial d}, \quad (19)$$

通过链式法则和反射率模型,可得 $\frac{\partial R_t(d, v_i)}{\partial d} = \frac{\partial R_t}{\partial \delta} \frac{\partial \delta}{\partial d}$ ,其中 $\frac{\partial \delta}{\partial d} = \frac{4\pi n_1 \cos\beta}{\lambda}$ 。

(2)计算二阶导数:

$$F''(d_k) = \sum_{i=1}^M \left\{ \left( \frac{\partial R_t(d, v_i)}{\partial d} \right)^2 + [R_t(d, v_i) - R_m(v_i)] \frac{\partial^2 R_t(d, v_i)}{\partial d^2} \right\}。 \quad (20)$$

牛顿迭代法优化的完整流程图如图7所示。



图7 牛顿迭代算法流程图

具体步骤如下:

步骤 1:初始化。以 2.4 节获得的  $\tilde{d}_0$  作为迭代初值  $d_0$ , 设置收敛容差  $\epsilon = 10^{-6}$  (无量纲, 对应厚度变化相对值), 最大迭代次数  $K_{\max} = 50$ 。

步骤 2:迭代优化。对  $k=0, 1, 2, \dots$  执行:(1)计算当前厚度  $d_k$  对应的目标函数值  $F(d_k)$ 。(2)由式(19~20), 计算一阶导数  $F'(d_k)$  和  $F''(d_k)$ 。(3)由式(18)计算  $d_{k+1}$ , 更新厚度估计。(4)检查收敛条件:当  $|d_{k+1} - d_k|/d_k < \epsilon$  或  $|F'(d_k)| < \epsilon$  时, 判定收敛并终止迭代; 当  $k = K_{\max}$  时, 输出警告并终止。

步骤 3:输出结果。通过计算, 得到收敛后的厚度估计  $d^*$ 。

经上述优化, 迭代算法在实测数据上表现出良好的收敛性和稳定性, 厚度反演精度显著提升。

### 3 模型求解与结果分析

针对入射角  $10^\circ$  和  $15^\circ$  两种测量条件, 在不同波数区间内对碳化硅样品进行厚度反演, 求解上述优化模型, 得到的厚度估计值如表(1~2)所示; 进一步对多个波数区间的结果进行加权平均, 得到最终的厚度测量结果, 如表 3 所示。

表 1 入射角为  $10^\circ$  时不同波数区间的厚度估计值与折射率表

波数区间/ $\text{cm}^{-1}$	厚度/ $\mu\text{m}$	折射率
[400~1 025)	6.11	2.625
[1 025~2 500)	9.19	2.630
[2 500~4 200]	7.57	2.646

表 2 入射角为  $15^\circ$  时不同波数区间的厚度估计值与折射率表

波数区间/ $\text{cm}^{-1}$	厚度/ $\mu\text{m}$	折射率
[400~1 025)	6.12	2.625
[1 025~2 500)	9.53	2.630
[2 500~4 200]	7.59	2.646

表 3 碳化硅外延层厚度计算结果表

入射角度数/ $^\circ$	厚度计算结果/ $\mu\text{m}$	平均厚度/ $\mu\text{m}$	相对误差
10	7.82	7.875	1.40%
15	7.93		

由表 1、表 2 可知, 不同波数区间下的厚度估计值存在一定差异, 这种差异主要源于两方面: 一是材料折射率随波数变化(色散效应), 二是各波段噪声水平不同。中波数区间 [ $1\ 025 \sim 2\ 500\ \text{cm}^{-1}$ ] 折射率相对稳定, 干涉信号清晰, 厚度估计值较大; 低波数区间 [ $400 \sim 1\ 025\ \text{cm}^{-1}$ ] 可能受散射噪声影响, 高波数区间 [ $2\ 500 \sim 4\ 200\ \text{cm}^{-1}$ ] 则可能因吸收增强而导致信噪比下降, 这两个区间对反演结果均会带来偏差。

入射角对厚度计算结果的影响主要体现在光程差的变化上。根据式(18), 干涉相位与  $\cos \beta$  项相关 ( $\beta$  为折射角), 入射角增大将导致  $\cos \beta$  减小, 进而影响干涉条纹的频率, 最终反映为厚度估计值的微小上升。从表 3 可以看出, 当入射角由  $10^\circ$  增至  $15^\circ$  时, 厚度由  $7.82\ \mu\text{m}$  增加到  $7.93\ \mu\text{m}$ , 变化趋势与理论模型一致。

通过牛顿迭代法对初始值进行优化后, 不同波数区间的厚度估计值得以协调并收敛至稳定结果, 最终加权平均后得到的厚度代表值约为  $7.875\ \mu\text{m}$ 。迭代过程有效降低了因波段选择或初值偏差引起的分散性, 提高了结果的可靠性。两入射角下所得厚度的相对误差(以平均值计)仅为 1.40%, 表明该方法具备较好的重复性与一致性, 可用于碳化硅外延层厚度的可靠测量。

## 4 结语

本文针对碳化硅外延层厚度的高精度测量问题,基于光干涉原理与斯涅耳定律构建了多光束干涉数学模型。在模型优化方面:首先引入 Sellmeier 方程描述折射率的色散特性,克服了传统常数折射率假设带来的系统误差;其次融合峰值间距法与傅里叶变换提取干涉周期,有效抑制了噪声干扰,为迭代优化提供了可靠的初始值;最后采用牛顿迭代法对厚度进行全局优化,充分利用全光谱信息,进一步提升了反演精度。

实验结果表明,所建模型在  $10^\circ$  和  $15^\circ$  入射角下得到的厚度结果高度吻合,平均厚度为  $7.87 \mu\text{m}$ ,相对偏差仅 1.40%,有效验证了方法的稳定性和可靠性。本文方法不仅实现了碳化硅外延层厚度的无损、快速测量,也为其他薄膜材料的类似测量问题提供了可借鉴的思路。将该方法推广至多层膜结构的厚度与光学常数同时反演,是今后值得深入研究的方向。

### 参考文献:

- [1]刘忠良. 碳化硅薄膜的外延生长、结构表征及石墨烯的制备[D]. 合肥:中国科学技术大学,2009.
- [2]SCHUBERT M, RHEINLÄNDER B, WOOLLAM J A, et al. Extension of rotating-analyzer ellipsometry to generalized ellipsometry: determination of the dielectric function tensor from uniaxial semiconductor crystals[J]. *Physical Review B*, 1996, 54(4):2676.
- [3]NAKASHIMA S, HARIMA H. Raman investigation of SiC polytypes[J]. *Physica Status Solidi(a)*, 1997, 162(1):39-64.
- [4]WORMINGTON M, PANACCIONE C, MATNEY K M, et al. Characterization of structures from X-ray scattering data using genetic algorithms [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1999, 357(1761):2827-2848.
- [5]KIMOTO T, COOPER J A. *Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices and applications* [M]. Singapore: John Wiley & Sons, 2014.
- [6]刘梓轩, 李辰阳, 王治钧. 基于红外干涉法与多光束干涉修正的碳化硅外延层厚度测量模型[J]. *天府数学*, 2025(10):5-9.
- [7]中国工业与应用数学学会. 2025 年高教社杯全国大学生数学建模竞赛赛题[EB/OL]. (2025-09-04)[2026-01-27]. [https://www.mcm.edu.cn/html\\_cn/node/03c91a444e62eee81a3740fa97a461a6.html](https://www.mcm.edu.cn/html_cn/node/03c91a444e62eee81a3740fa97a461a6.html).
- [8]程守洙, 江之永. *普通物理学* [M]. 北京:高等教育出版社, 2006: 108-109.
- [9]刘家兴, 刘高福, 陈德良. 菲涅尔公式讨论光波反射和折射时振幅的变化[J]. *物理通报*, 2021(7):23-26.
- [10]黄国俊, 陆益敏, 程勇等. 脉冲激光沉积法制备红外光学 SiC 薄膜特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(7):136-140.

## Measurement Model for the Thickness of Silicon Carbide Epitaxial Layers

Yang Yang, Li Liangqi, Li Jinzhu, Li Shaowei

(School of Artificial Intelligence, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

**Abstract:** Based on the data from Problem B of the 2025 National College Students Mathematical Modeling Competition (CUMCM), this paper presents a mathematical model of multi-beam interference based on the principle of optical interference and Snell's Law. For data processing and computational optimization, an iterative optimization algorithm combining the peak spacing method and the Fast Fourier Transform is proposed. Through multiple iterations, the calculation error is effectively reduced, enabling the precise inversion of the silicon carbide epitaxial layer thickness.

**Keywords:** silicon carbide; Snell's Law; multi-beam interference; peak spacing method; Fourier transform

# 多烟幕干扰弹的协同投放策略

赵晓垒<sup>a</sup>, 王厚硕<sup>a</sup>, 李冰聪<sup>a</sup>, 李纪伟<sup>b</sup>

(台州学院 a.人工智能学院; b.建筑工程学院, 浙江 台州 318000)

**摘要:**基于 2025 年全国大学生数学建模竞赛 A 题背景, 针对多架无人机协同投放烟幕干扰弹的防御任务, 利用几何分析理论与约束优化方法, 以对圆柱形物体的最大有效遮蔽时间为优化目标, 结合视觉遮蔽判定条件与多体运动约束, 建立了烟幕弹投放与起爆策略的时空协同优化模型。通过融合多智能体决策与遗传算法等混合优化策略, 对不同作战场景下无人机的飞行参数与干扰弹的投放、起爆参数等进行协同设计, 实现了对来袭导弹干扰效能的最大化。

**关键词:**视觉遮蔽; 多体运动建模; 最优投放策略; 混合优化算法; 烟幕干扰

DOI:10.13853/j.cnki.issn.1672-3708.2026.03.002

## 0 引言

为提升装备在战场环境下的生存能力, 有效防御导弹的探测与攻击, 烟幕干扰弹作为一种经济高效的对抗手段, 在现代军事领域中发挥了重要作用。烟幕干扰弹能够通过化学燃烧或爆炸形成气溶胶云团, 吸收和散射光线, 在目标前方空域形成遮蔽区, 干扰敌方导弹的探测与攻击路径<sup>[1]</sup>。特别是在多平台协同作战背景下, 刘林等<sup>[2]</sup>的研究表明, 在舰艇编队中, 烟幕的遮蔽效果不仅取决于单舰布放, 还与编队中各舰的相对位置及导弹来袭方向密切相关。这启示我们在无人机协同干扰场景中, 也须系统考虑多机协同与弹道规划的影响。罗瑞耀等<sup>[3]</sup>在进一步对无人机的防御研究中明确提出以最小耗弹量持续遮蔽目标, 并通过数值仿真验证了投放参数对耗弹量的显著影响, 为无人机平台烟幕干扰的动态策略设计提供了重要参考。因此, 对无人机投放烟幕干扰弹的策略进行数学建模与优化, 协同设计无人机的飞行参数与干扰弹的投放及起爆参数, 对于抵御多枚来袭空地导弹威胁、提升目标物战场生存与反击能力具有重要现实意义。本文基于 2025 年全国大学生数学建模竞赛 A 题<sup>[4]</sup>背景, 通过建立来袭空地导弹、无人机、干扰弹及烟幕云团的运动学模型, 结合烟幕对圆柱形保护目标的遮蔽判定条件, 以最大化有效遮蔽时间为目标, 对不同场景下烟幕干扰弹的最优投放策略进行设计与优化。

## 1 运动模型

搭载干扰弹的无人机可在速度范围内投放干扰弹(须满足最小间隔要求), 形成烟幕以干扰来袭导弹, 保护目标。干扰弹受重力作用运动, 可定时起爆形成球状云团, 云团以恒定速度下沉。无人机投放烟幕干扰弹干扰来袭导弹的过程, 核心目标是通过遮蔽真实目标, 最大限度干扰来袭导弹。为实现该目标, 须对无人机的飞行方向、飞行速度及干扰弹的投放点与起爆点进行协同优化。优化过程涉及真实目标、假目标、来袭导弹、无人机、干扰弹和烟幕云团 6 个关键对象, 其运动学参数及相互关联如图 1 所示。

收稿日期: 2026-01-13

作者简介: 赵晓垒(2004—), 男, 浙江台州人, 2023 级电子信息工程专业本科生; 李纪伟(通信作者)(1984—), 男, 山东菏泽人, 副教授, 博士, 主要从事数学建模及岩土力学基础理论研究。

为简化计算,假设来袭导弹、假目标及无人机为质点,以假目标为坐标原点,来袭导弹直指假目标且速度保持不变。 $xy$  平面为水平面, $z$  轴竖直向上。真目标是高度为  $h$ , 半径为  $r$  的圆柱体,其下底面的圆心位于  $y$  轴,轴线沿  $z$  轴正向。各对象在  $O-xyz$  坐标系中的相对位置关系如图 2 所示。

设来袭导弹  $M_i$  直指假目标(坐标原点), 则其在  $t$  时刻的位置

$$P_{M_i}(t) = P_{M_{i_0}} + \vec{v}_{M_i}t,$$

其中:  $\vec{v}_{M_i} = v_{M_i} \vec{e}_{M_i}$ ,  $\vec{e}_{M_i} = \frac{O - P_{M_{i_0}}}{\|O - P_{M_{i_0}}\|}$ ;  $v_{M_i}$  为来袭导弹的飞行速度大小;  $O$  为

坐标系原点;  $P_{M_{i_0}}$  为来袭导弹初始位置。

假设无人机  $FY_i$  匀速飞行, 那么其在  $t$  时刻的位置

$$P_{FY_i}(t) = P_{FY_{i_0}} + \vec{v}_{FY_i}t,$$

其中,  $\vec{v}_{FY_i} = v_{FY_i} \vec{e}_{FY_i}$ ,  $\vec{e}_{FY_i}$  为无人机飞行方向。

干扰弹  $S_i$  的运动分为 3 个阶段: 投放前(随无人机运动)、投放后至起爆前(抛物运动)、起爆后形成烟幕云团(匀速下沉)。

对于干扰弹投放点的位置  $P_{S_i}$  将进行分段讨论。  
 投放前  $0 < t < t_{drop}$ , 无人机还未投放干扰弹, 故干扰弹投放点的位置与  $t$  时刻无人机位置相同。投放后至起爆前  $t_{drop} \leq t < t_{bomb}$ , 忽略空气阻力影响, 干扰弹做抛物运动, 水平速度为无人机水平匀速直线飞行速度, 竖直方向受重力作用加速。干扰弹投放点的位置  $P_{S_i, drop}$  即为  $t_{drop}$  时刻无人机的位置, 结合式(2)可以得出:

$$P_{S_i}(t) = P_{FY_i}(t), \quad 0 < t < t_{drop} \quad (3)$$

而下落时间  $\Delta t_1 = t - t_{drop}$ ,  $P_{S_i, drop} = P_{FY_i}(t_{drop})$  那么干扰弹投放点的位置为

$$P_{S_i}(t) = P_{S_i, drop} + \Delta t_1 \cdot v_{FY_i} + \left(0, 0, -\frac{1}{2}g\Delta t_1^2\right)^T, \quad t_{drop} \leq t < t_{bomb} \quad (4)$$

其中:  $P_{S_i, drop, x}$ 、 $P_{S_i, drop, y}$ 、 $P_{S_i, drop, z}$  分别表示干扰弹投放点在  $xyz$  轴上的距离;  $\vec{v}_{FY_i, x}$ 、 $\vec{v}_{FY_i, y}$  表示无人机在  $xy$  轴上的速度向量;  $g$  为重力加速度。

起爆后  $t \geq t_{bomb}$ , 干扰弹起爆后会形成球状烟幕云团, 并以速度  $v_{cloud}$  匀速下沉。起爆点位置  $P_{bomb}$  为起爆时刻  $t_{bomb}$  干扰弹的位置, 即:

$$P_{bomb} = P_{S_i}(t_{bomb}) \quad (5)$$

而下沉时间  $\Delta t_2 = t - t_{bomb}$ , 结合式(3)可以得出:

$$P_{S_i}(t) = P_{bomb} + \left(0, 0, -v_{cloud}\Delta t_2\right)^T, \quad t \geq t_{bomb} \quad (6)$$

其中,  $P_{bomb, x}$ 、 $P_{bomb, y}$  与  $P_{bomb, z}$  分别表示起爆点位置在  $xyz$  轴上的距离。干扰弹投放烟幕过程示意如图 3 所示。

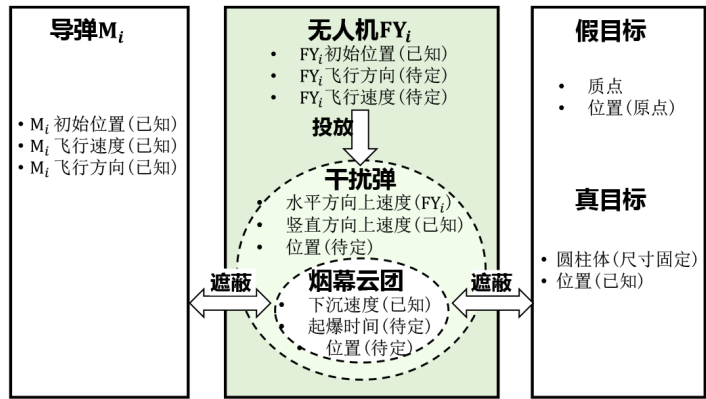


图 1 干扰系统各物体间的相互关联

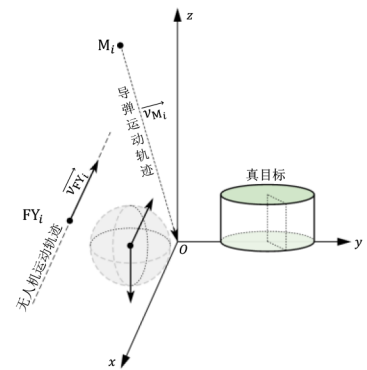


图 2 各对象的相对位置

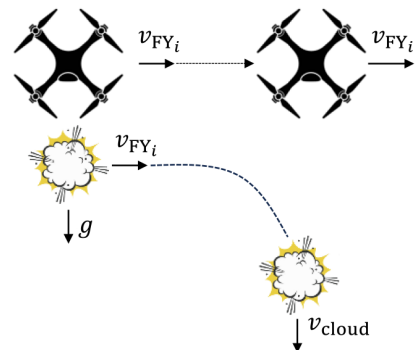


图 3 干扰弹抛投与起爆位置示意图

综上,得出干扰弹的位置  $P_{S_i}(t)$  如下:

$$P_{S_i}(t) = \begin{cases} P_{FY_i}(t), & 0 < t < t_{\text{drop}}, \\ P_{S_i}(t) = P_{S_{\text{drop}}} + \Delta t_1 \cdot v_{FY_i} + \left(0, 0, -\frac{1}{2}g\Delta t_1^2\right)^T, & t_{\text{drop}} \leq t < t_{\text{bomb}}, \\ P_{S_i}(t) = P_{\text{bomb}} + (0, 0, -v_{\text{cloud}}\Delta t_2)^T, & t \geq t_{\text{bomb}}. \end{cases} \quad (7)$$

## 2 圆柱体视觉遮蔽模型

### 2.1 圆柱体轮廓特征

以来袭导弹为观察者定义“遮蔽”条件:从观察者视点到圆柱体任意一点的射线都会先与球体相交(图4)。由于测试所有点不现实,就需要识别最可能不被遮挡的关键点。这一判断基于两方面原理:一是圆柱体的凸性特性;二是在给定视角观察时,物体的可见性完全由其视觉轮廓决定<sup>[5]</sup>。对于凸体而言,其视觉轮廓完全由外边缘定义。因此,如果球体能够完全遮挡圆柱体上下两个底面圆周上的所有关键点,那么它能够完全遮挡整个圆柱体。进一步而言,在上下底面圆周上均匀采样有限个点,只要球体能够遮挡所有采样点,且采样密度足够高,就可判定球体完全遮挡整个圆柱体。

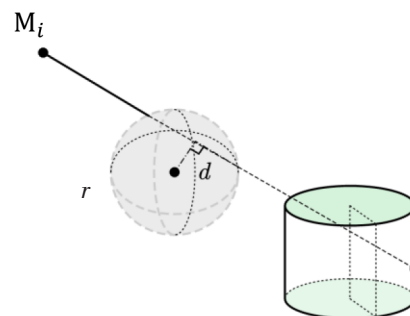


图4 物体遮蔽示意图

分别选取圆柱体上下底面4个轮廓特征点,具体选取过程如下:

来袭导弹到圆柱体上底面圆心  $P_{r1}$  的向量为

$$\overrightarrow{P_{M_i}P_{r1}} = P_{r1} - P_{M_i}(t); \quad (8)$$

来袭导弹到圆柱体下底面圆心  $P_{r0}$  的向量为

$$\overrightarrow{P_{M_i}P_{r0}} = P_{r0} - P_{M_i}(t). \quad (9)$$

来袭导弹位置、上底面圆心、下底面圆心三点构成平面的法向量为上面两个方向向量的叉乘:

$$\vec{n} = \overrightarrow{P_{M_i}P_{r1}} \times \overrightarrow{P_{M_i}P_{r0}}. \quad (10)$$

平面的法向量  $\vec{n}$  满足右手螺旋定则,可唯一确定来袭导弹与圆柱体上下底面圆心构成平面的空间取向。求解上底面内与  $\vec{n}$  垂直的单位方向向量  $\vec{m}$ ,满足  $\vec{n} \cdot \vec{m} = 0$  且  $\vec{m}$  位于上底面平面内。由于来袭导弹在朝向假目标不断运动,轮廓特征点持续变化,需要建立上底面的轨迹方程:

$$(x - P_{r1,x})^2 + (y - P_{r1,y})^2 = r^2. \quad (11)$$

过上底面圆心做该平面的法向量与上底面交于  $A, B$  两点,求  $A, B$  两点所在直线方程如下:

$$\vec{l} = P_{r1} + k\vec{n}, \quad (12)$$

其中,  $k \in \mathbf{R}$ , 表示沿  $\vec{n}$  方向的伸缩系数。将式(12)代入式(11)可以求得参数  $k$  的值,进而确定  $A, B$  两点的坐标。上底面的第3、4个轮廓特征点,即为直线  $\vec{l}$  与圆柱表面的交点(其中  $\vec{l} = P_{r1} + k\vec{m}$ , 表示与  $A, B$  两点所在直线垂直的方向向量)。下底面的4个轮廓特征点为上底面对应点关于上下底面中心连线(轴线)对称的点,轮廓特征点选取示意如图5所示。

### 2.2 球形烟幕对圆柱体目标的遮蔽模型

对于单一球形烟幕有效遮蔽圆柱形目标需同时满足空间位置和距离两个条件:烟幕位于来袭导弹与真目标之间;烟幕与来袭导弹至真目标连线的距离不超过烟幕云团的半径。

空间位置条件判定:针对任意时刻  $t$  和真目标的任一轮廓特征点  $P_r$ ,判断烟幕云团中心  $P_{S_i}(t)$  是否位于来袭导弹与真目标之间。来袭导弹指向真目标的向量为

$$\overrightarrow{MP_r} = P_r - P_{M_i}(t) ; \tag{13}$$

来袭导弹指向烟幕云团的向量为

$$\overrightarrow{MP_{S_i}} = P_{S_i}(t) - P_{M_i}(t) 。 \tag{14}$$

计算  $\overrightarrow{MP_{S_i}}$  在  $\overrightarrow{MP_r}$  上的投影长度  $l_p$ :

$$l_p = \frac{\overrightarrow{MP_{S_i}} \cdot \overrightarrow{MP_r}}{\|\overrightarrow{MP_r}\|} 。 \tag{15}$$

若  $0 \leq l_p \leq \|\overrightarrow{MP_r}\|$ ,则烟幕云团中心位于来袭导弹与真目标之间,满足位置条件。有效遮蔽位置与距离间的关系如图6所示。

距离条件判定:计算烟幕中心  $P_{S_i}(t)$  到线段  $\|P_{M_i}(t)P_r\|$  的最短距离  $d$ ,若  $d \leq$  云团半径,则满足距离条件。来袭导弹至真目标连线即为式(13)中的  $\overrightarrow{MP_r}$ ,长度  $L = \|\overrightarrow{MP_r}\|$ ,投影参数  $\lambda$  为

$$\lambda = \frac{\overrightarrow{MP_{S_i}} \cdot \overrightarrow{MP_r}}{L^2} 。 \tag{16}$$

若  $\lambda < 0$ ,距离为  $\|\overrightarrow{MP_{S_i}}\|$ ;若  $\lambda > 1$ ,距离为  $\|P_{S_i}(t) - P_r\|$ ;若  $0 \leq \lambda \leq 1$ ,则距离为  $\|\overrightarrow{MP_{S_i}} - \lambda \overrightarrow{MP_r}\|$ 。因此可得出距离条件判定如下:

$$d = \begin{cases} \|\overrightarrow{MP_{S_i}}\|, & \lambda < 0 , \\ \|\overrightarrow{MP_{S_i}} - \lambda \overrightarrow{MP_r}\|, & 0 \leq \lambda \leq 1 , \\ \|P_{S_i}(t) - P_r\|, & \lambda > 1 。 \end{cases} \tag{17}$$

综上所述,仅当烟幕同时满足空间位置与距离两个条件,且  $t \in [t_{\text{bomb}}, t_{\text{bomb}} + T_s]$  时,才能判定为有效遮蔽。其中,  $T_s$  为烟幕有效遮蔽时长。

在多枚干扰弹协同作用场景下存在如图7所示的情况:某一时刻,若目标点同时被烟幕云团1和烟幕云团2遮挡,则满足有效遮蔽条件;若该点仅被烟幕云团1遮挡而未受烟幕云团2遮挡,仍计入有效遮蔽时长。换言之,在圆柱体表面任意选取  $N$  个采样点,只要来袭导弹与某采样点的连线至少被一个烟幕云团遮挡,即认为该点处于有效遮蔽状态。计算总有效遮蔽时间如下:

$$T_{\text{total}} = \sum_{k=1}^M \int_0^{T_{\text{end}}} \Psi_k(t) dt , \tag{18}$$

其中:  $M$  为来袭导弹总数;  $T_{\text{end}}$  为整个时间跨度;  $\Psi_k(t)$  为有效遮蔽状态。

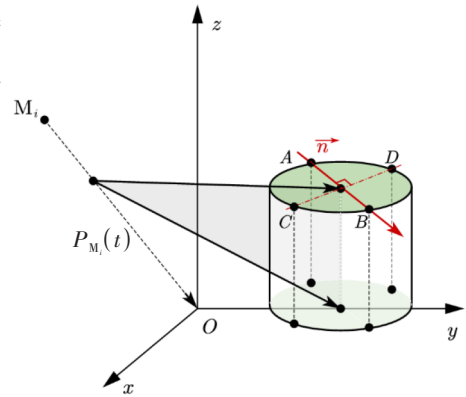


图5 圆柱体轮廓视觉特征点

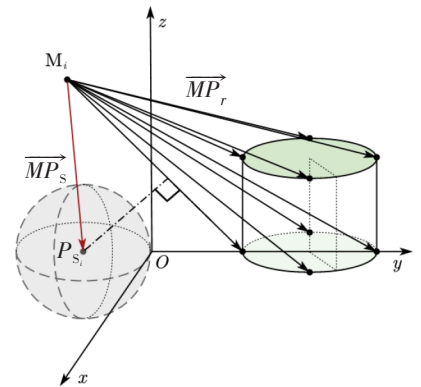


图6 有效遮蔽位置与距离间的关系

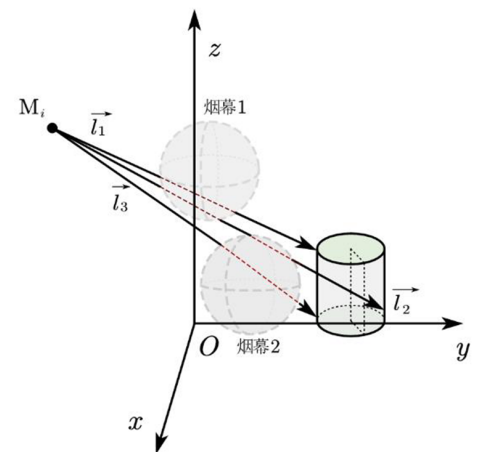


图7 多枚干扰弹有效遮蔽情况

### 3 有效遮蔽时间优化模型

#### 3.1 任务指派模型

在多架无人机分别投放多枚干扰弹、对抗多枚来袭导弹并为真实目标提供最长遮蔽时间的场景下,本文聚焦的遮蔽时长最大化协同干扰规划问题,可定义为以遮蔽时长最大化为目标的优化问题。其中涉及多种决策变量,包括无人机的飞行方向与速度、干扰弹的投放点、起爆点的空间位置及起爆时间等。由于变量间存在耦合关系,该问题本质上属于高维非线性优化问题。考虑到该优化问题求解复杂度较高,可首先对  $M$  枚来袭导弹进行无人机任务指派,以分解并简化原问题。实践表明,若直接对“多无人机-多干扰弹-多来袭导弹”协同干扰方案进行一体化优化,不仅计算耗时显著,还容易陷入局部最优解。因此,本文提出建立任务指派模型,优先确定每枚来袭导弹分别由哪些无人机负责干扰。

基于此,可构建效能矩阵,用于表示单架无人机对单枚来袭导弹的最大干扰效能,即当一架无人机投放多枚干扰弹时,通过优化其飞行轨迹与投放参数所能达到的最大有效遮蔽时间。效能矩阵设置如下:

$$\mathbf{E} = (e_{ij})_{m \times n}, \quad (19)$$

其中,  $e_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ ) 表示无人机  $i$  对来袭导弹  $j$  所能提供的最大遮蔽效能。

为解决无人机与来袭导弹数量不匹配的问题,需将原有的  $m \times n$  维效能矩阵转化为  $\max(m, n) \times \max(m, n)$  维的方阵。若无人机数量多于来袭导弹(即  $m > n$ ),则添加  $m - n$  个虚拟导弹;若来袭导弹数量多于无人机(即  $n > m$ ),则添加  $n - m$  架虚拟无人机。

为将最大化问题转化为标准指派问题,需进一步将效能矩阵转换为成本矩阵。首先,设实际效能矩阵中的最大值为  $E_{\max}$ 。多出的虚拟行或虚拟列的元素值均以  $E_{\max}$  填充,从而构建一个方阵。随后,通过成本映射关系  $c_{ij} = E_{\max} - e_{ij}$  构建成本矩阵  $\mathbf{C} = (c_{ij})$ 。在该成本矩阵中,原效能  $e_{ij}$  越高,其对应的成本  $c_{ij}$  就越低。最终,该问题转化为寻找一个指派矩阵  $\mathbf{X} = (x_{ij})_{N \times N}$ ,其中  $x_{ij} \in \{0, 1\}$ ,使得总成本最小化,即

$$\min Z = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M c_{ij} x_{ij}, \quad (20)$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} = 1, \sum_{j=1}^M x_{ij} = 1. \quad (21)$$

#### 3.2 优化模型

无人机飞行方向和速度直接决定投放点与起爆点的空间位置,而起爆点位置又决定烟幕的遮蔽范围,因此决策变量分别为无人机飞行角度  $\theta_{FY_i}$ 、飞行速度  $\vec{v}_{FY_i}$ 、第一枚干扰弹投放时间  $t_{01}$ 、起爆延迟时间  $t_{11}$ 、第  $j$  枚弹与第  $j - 1$  枚弹的投放间隔  $\alpha_{j-1,j}$ 、第  $j$  枚弹与第  $j - 1$  枚弹的起爆延迟  $\beta_{j-1,j}$ 。

设目标函数为

$$\max T_{\text{total}}(\theta, \vec{v}_{FY_i}, t_{01}, t_{11}, \alpha_{i,j}, \beta_{i,j}) = \sum_{i=1}^N T_{\text{cover}, i}, \quad (22)$$

其中:  $T_{\text{total}}$  为多枚干扰弹的有效遮蔽时长之和;  $N$  为干扰弹数量;  $T_{\text{cover}, i}$  为第  $i$  枚干扰弹的有效遮蔽时长。

设  $\tau$  时刻来袭导弹到达假目标位置,则当  $t \geq \tau$  时,  $P_{M_i}(t) = 0$ ,其中  $\tau$  为

$$\tau = \frac{\|P_{M_0}\|}{v_{M_i}}. \quad (23)$$

在多干扰弹与多导弹情况下,烟幕对来袭导弹的有效遮蔽可以满足以下任一条件:(1)来袭导弹视线至真目标轮廓的8个特征点的线段,至少被一个烟幕云团覆盖,即为遮住真目标策略;(2)来袭导弹视线至假目标的线段,至少被一个烟幕云团覆盖,作为沿途干扰策略。有效遮蔽时间定义为所有时刻中满足上述条件的的时间总和(不要求连续)。

对每一对无人机和来袭导弹,以最大化有效遮蔽时长作为目标函数。为确保干扰弹爆炸不影响无人机,无人机应在起爆时脱离烟幕的  $T_S$  范围内,各约束条件分别如下:

速度约束:假设无人机飞行速度限制在  $v_{\text{low}} \sim v_{\text{up}}$  之间,那么

$$v_{\text{low}} \leq v_{\text{FY}_i} \leq v_{\text{up}} \quad (24)$$

方向角约束:无人机朝向物体飞行,方向角约束为

$$0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (25)$$

时间约束:时间均非零,且起爆时间小于来袭导弹击中假目标的时间:

$$t_{01} \geq 0, t_{11} \geq 0, t_{01} + t_{11} \leq T_M \quad (26)$$

其中,  $T_M$  为来袭导弹击中假目标的时间,可通过导弹飞行速度与初始位置坐标计算得到。每枚干扰弹的最小投放时间间隔限制为

$$\Delta t_{\text{bomb}} \leq \alpha_{j-1,j} \quad (27)$$

其中,  $\Delta t_{\text{bomb}}$  为每枚干扰弹之间的最小投放时间间隔。起爆时间不超过导弹击中假目标的时间,即

$$\sum_{j=2}^N \beta_{j-1,j} \leq T_M \quad (28)$$

起爆点空间约束:确保干扰弹起爆点处于合理位置,避免超出范围。假设无人机  $\text{FY}_i$  的初始坐标为  $(P_{0,x}, P_{0,y}, P_{0,z})$ , 结合式(5)得出:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{bomb},x} \leq P_{0,x} , \\ 0 \leq P_{\text{bomb},y} \leq P_{0,y} , \\ 0 \leq P_{\text{bomb},z} \leq P_{0,z} \circ \end{cases} \quad (29)$$

在  $xy$  轴方向上,干扰弹的投放点与起爆点均为运动位移累加, $z$  轴方向上为自由落体,则得出:

$$P_{\text{bomb}} = P_0 + \left( v_{\text{FY}_i} \cos \theta (\alpha_{j-1,j} + \beta_{j-1,j}), v_{\text{FY}_i} \sin \theta (\alpha_{j-1,j} + \beta_{j-1,j}), -\frac{1}{2} g \beta_{j-1,j}^2 \right)^T \quad (30)$$

综上,得出以最大化有效遮蔽时长为目标的优化模型如下:

$$\begin{aligned} \max T_{\text{total}}(\theta, \vec{v}_{\text{FY}_i}, t_{01}, t_{11}, \alpha_{i,j}, \beta_{i,j}) &= \sum_{i=1}^N T_{\text{cover},i} \quad (31) \\ \text{s.t.} &\begin{cases} v_{\text{low}} \leq v_{\text{FY}_i} \leq v_{\text{up}} , \\ 0 \leq \theta \leq 2\pi , \\ t_{01} \geq 0, t_{11} \geq 0, t_{01} + t_{11} \leq T_M , \\ \alpha_{j-1,j} \geq \Delta t_{\text{bomb}} , \\ \sum_{j=2}^N \beta_{j-1,j} \leq T_M , \\ P_{\text{bomb}} = P_0 + \left( v_{\text{FY}_i} \cos \theta (\alpha_{j-1,j} + \beta_{j-1,j}), v_{\text{FY}_i} \sin \theta (\alpha_{j-1,j} + \beta_{j-1,j}), -\frac{1}{2} g \beta_{j-1,j}^2 \right)^T \circ \end{cases} \end{aligned}$$

## 4 MADDPG-遗传算法

与单智能体系统相比,多智能体深度确定性策略梯度(MADDPG)通过构建多智能体之间的协作机制<sup>[6]</sup>,以分布式协同方式高效完成多无人机分配任务。本文提出一种 MADDPG-遗传算法(GA)融合框架,综合利用两类算法的优势,在多无人机干扰多导弹的复杂任务场景下,对多任务指派模型进行全局优化,从而求解出最优干扰策略。

MADDPG 能够基于无人机  $FY_i$  和来袭导弹  $M_i$  的初始位置直接生成有效的启发式策略,这些策略可作为遗传算法中的精英初始种群,显著提升初始种群中优质个体的比例,有效缓解遗传算法因“初始种群随机性强”而导致的收敛速度慢等问题。遗传算法则凭借其强大的全局搜索能力,通过选择、交叉和变异等操作探索更广泛的策略空间,弥补 MADDPG 在训练过程中容易陷入局部最优解的不足,从而确保最终获得的干扰策略具有全局优化特性。MADDPG 的复杂度主要源于深度神经网络的训练,其整体时间复杂度为  $O(T \cdot m \cdot n^3)$ ,空间复杂度为  $O(n^2)$ 。遗传算法的复杂度则由迭代次数、种群规模和染色体长度共同决定,其时间复杂度为  $O(G \cdot N \cdot L)$ ,空间复杂度为  $O(N \cdot L)$ 。在融合框架中,MADDPG 仅需生成满足约束的启发式策略而无需完全收敛,导致其训练样本数  $m$  和迭代次数  $T$  可显著减少;同时,遗传算法因获得了优质的精英初始种群,其所需的种群规模  $N$  与迭代次数  $G$  也得以大幅降低。3 种算法的整体复杂度对比见表 1。

综上所述,本文所提出的融合框架将 MADDPG 的快速定向策略生成能力与遗传算法的鲁棒全局搜索能力相结合,在保证策略质量的前提下,有效提升了整体优化效率,为复杂协同的干扰决策问题提供了一种高效的解决方案。

表 1 整体复杂度对比

算法	时间复杂度	空间复杂度
MADDPG	$O(T \cdot m \cdot n^3)$	$O(n^2)$
遗传算法	$O(G \cdot N \cdot L)$	$O(N \cdot L)$
融合框架	$O(T' \cdot m' \cdot n^3 + G' \cdot N' \cdot L)$	$O(n^2 + N' \cdot L)$

## 5 算例

### 5.1 特征点选取

设定如下任务场景:5 架无人机的初始位置分别为  $FY_1(17\ 800, 0, 1\ 800)$ 、 $FY_2(12\ 000, 1\ 400, 1\ 400)$ 、 $FY_3(6\ 000, -3\ 000, 700)$ 、 $FY_4(11\ 000, 2\ 000, 1\ 800)$ 、 $FY_5(13\ 000, -2\ 000, 1\ 300)$ ,每架无人机最多可投放 3 枚烟幕干扰弹。需干扰的 3 枚导弹  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  的位置分别为  $(20\ 000, 0, 2\ 000)$ 、 $(19\ 000, 600, 2\ 100)$ 、 $(18\ 000, -600, 1\ 900)$ 。导弹飞行速度为 300 m/s,云团扩散速度为 3 m/s。真目标为下底面圆心位于  $(0, 200, 0)$ 、半径 7 m、高 10 m 的圆柱体。

为探究轮廓特征点数量对有效遮蔽时长的影响,并验证所选特征点策略在遮蔽判断中的合理性,本文以无人机  $FY_1$  对来袭导弹  $M_1$  的干扰任务为例展开分析: $FY_1$  以 120 m/s 的速度朝向假目标方向飞行,于受领任务后 1.50 s 投放一枚烟幕干扰弹,该干扰弹在投放后 3.60 s 起爆。通过改变从圆柱体上下底面均匀选取的特征点数量(1~32),重新进行有效遮蔽条件判断,分析特征点数量对  $M_1$  有效遮蔽时长的影响,结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,当特征点数量达到 8 时,有效遮蔽时长稳定值约为 1.36 s;少于 8 时,所估计的遮蔽时间均高于该稳定值。因此,选取 8 个轮廓特征点即可充分判断有效遮蔽状态,该方法在保证精度的前提下可降低计算复杂度。

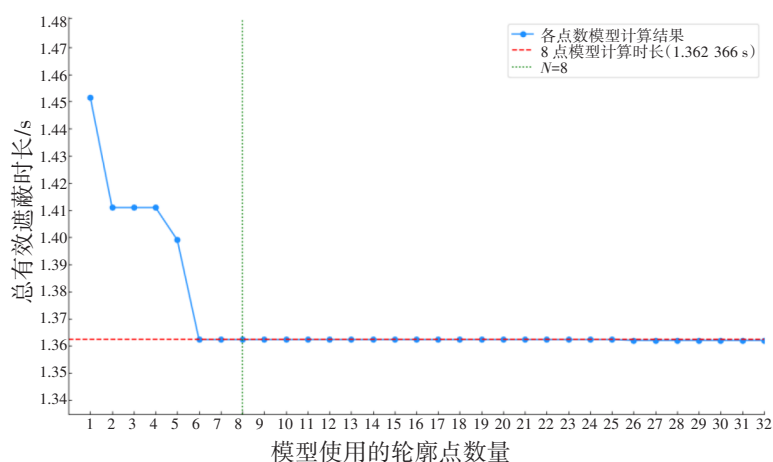


图8 特征点数量与有效遮蔽的关系

## 5.2 多无人机投放烟幕干扰弹干扰多枚来袭导弹

针对 5.1 所述任务场景,采用匈牙利算法求解无人机-导弹任务指派问题。构建  $5 \times 5$  成本矩阵并进行求解,得到初始指派方案,即每架无人机被指派干扰一枚来袭导弹。

由于实际来袭导弹仅 3 枚,而无人机有 5 架,因此引入 2 列虚拟导弹以匹配矩阵维度,求解后筛选出针对真实导弹的指派结果;对未成功指派的无人机,采用贪心算法将其分配给自身干扰效能最大的来袭导弹,最终形成完整的任务指派方案,结果如表 2 所示。

表 2 来袭导弹指派无人机的结果

来袭导弹	无人机
$M_1$	FY <sub>1</sub> 、FY <sub>4</sub>
$M_2$	FY <sub>2</sub> 、FY <sub>5</sub>
$M_3$	FY <sub>3</sub>

效能矩阵求解结果为:

$$E = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 6.0 & 7.0 & 6.0 \\ 4.5 & 6.5 & 6.0 \\ 5.5 & 3.0 & 3.0 \\ 0 & 2.0 & 0 \end{pmatrix} \quad (32)$$

$M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  所获得的总干扰效能时长分别为 16.00 s、18.50 s 和 15.00 s。

超参数设置对 MADDPG-遗传算法融合框架的性能具有关键影响。为此,本文引入贝叶斯优化方法,通过构建概率代理模型和自适应采样策略,实现对遗传算法核心超参数的高效优化。该方法基于历史评估数据建立超参数与优化目标之间的概率映射关系,借助采集函数平衡“探索-利用”权衡,动态选择已有评估样本和未评估样本进行迭代更新,最终在有限评估次数内确定全局最优的超参数组合。针对本算例,优化得到的最佳超参数如表 3 所示,各超参数与有效遮蔽时长的关系如图 9 所示。

表 3 最佳超参数结果

种群大小	进化代数	交叉概率	变异概率	种子数	时间步长
235	157	0.678	0.106	39	0.258

图 10 展示了 MADDPG-遗传算法融合框架在迭代过程中最优解的变化情况。从图 10 可以看出,当迭代次数达到 100 时,有效遮蔽时长达到峰值,这表明将迭代次数设置为 100 是合理的。将所获得的最优超参数代入算法框架后,首先利用 MADDPG 根据无人机与来袭导弹的初始位置生成启发式策略,再通过遗传算法对该指派策略进行全局优化,算法整体流程如图 11 所示。依据上述求解过程,在本算例中计算出总有效遮蔽时长为 13.42 s,详细数据如表 4 所示。

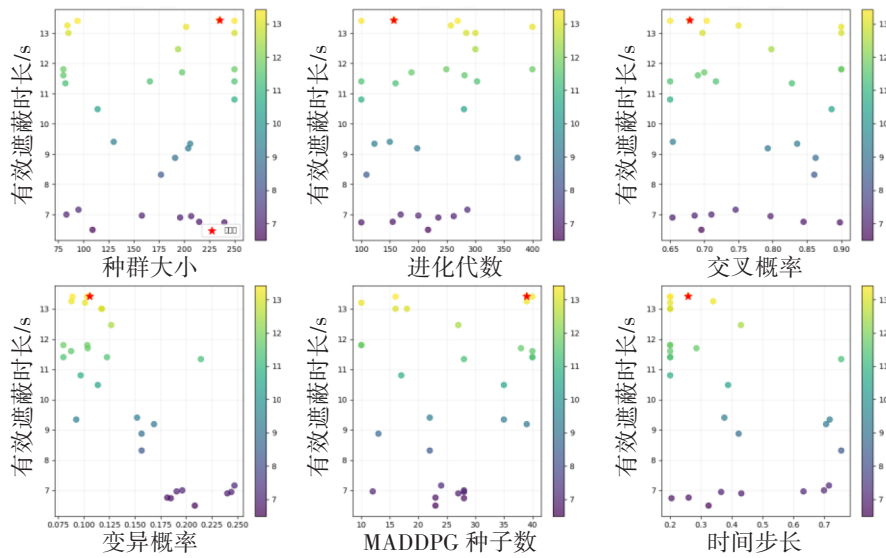


图9 各超参数与有效遮蔽时长的关系

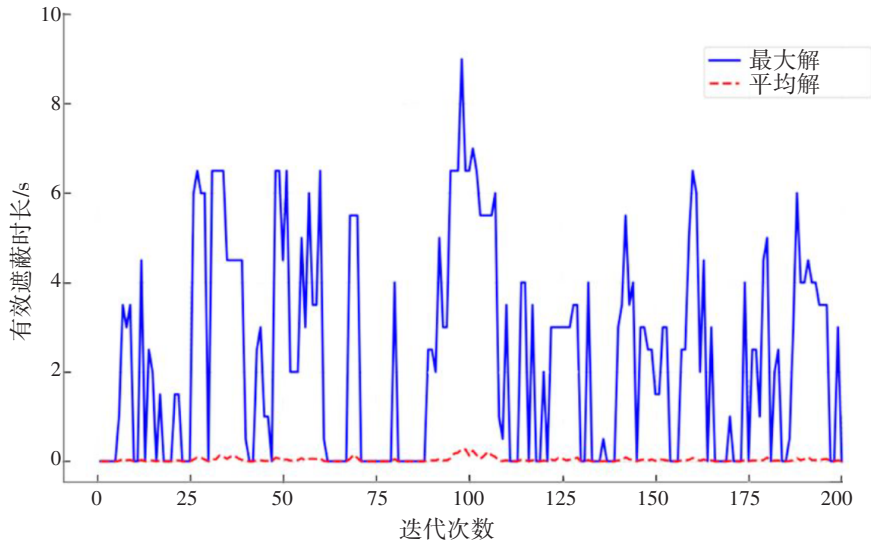


图10 MADDPG-遗传算法迭代过程最优解

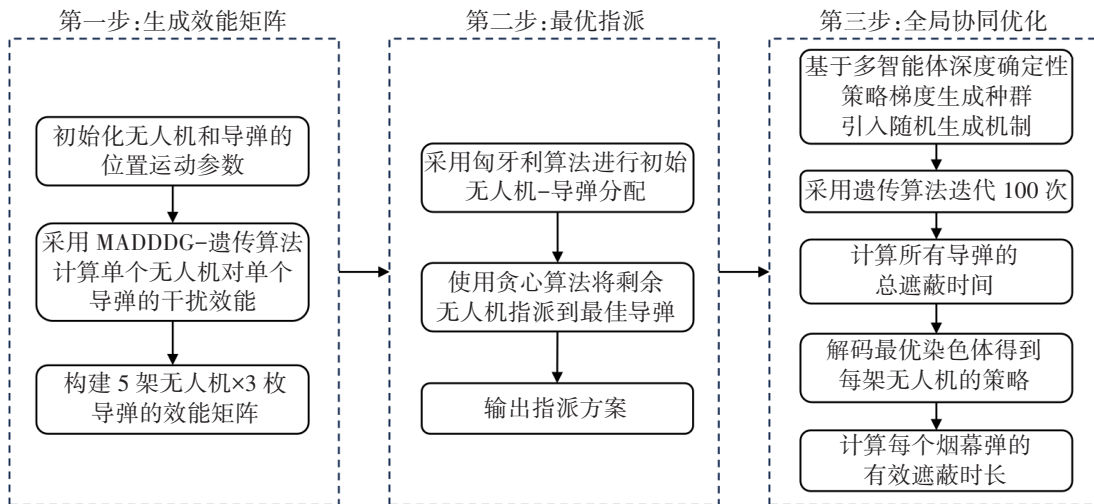


图11 MADDPG-遗传算法求解流程

表4 多无人机投放干扰弹干扰多枚来袭导弹策略

无人机	飞行方向 $\theta/(\circ)$	飞行速度 $v_{FY}/(m/s)$	干扰弹	投弹点坐标	来袭导弹
FY <sub>1</sub>	180.00	91.95	1	(17 513.47, 0, 1 800.00)	M <sub>1</sub>
			2	(17 187.10, 0, 1 800.00)	
			3	(16 522.76, 0, 1 800.00)	
FY <sub>2</sub>	222.52	135.63	1	(11 275.61, 735.67, 1 400.00)	M <sub>2</sub>
			2	(10 925.41, 414.51, 1 400.00)	
			3	(10 093.95, -348.01, 1 400.00)	
FY <sub>3</sub>	95.46	96.45	1	(5 959.61, -2 577.59, 700.00)	M <sub>3</sub>
			2	(5 941.16, -2 384.59, 700.00)	
			3	(5 908.04, -2 038.24, 700.00)	
FY <sub>4</sub>	59.18	82.49	1	(11 211.81, 2 355.09, 1 800.00)	M <sub>1</sub>
			2	(11 509.08, 2 853.45, 1 800.00)	
			3	(11 727.25, 3 219.22, 1 800.00)	
FY <sub>5</sub>	178.21	115.57	1	(12 064.94, -1 970.84, 1 300.00)	M <sub>2</sub>
			2	(11 034.08, -1 938.70, 1 300.00)	
			3	(10 274.02, -1 915.00, 1 300.00)	

## 6 结语

本文针对多无人机协同投放烟幕干扰弹以遮蔽保护目标、干扰来袭导弹的策略优化问题,系统地建立了涵盖运动学建模、遮蔽判定、任务指派和策略优化的完整数学模型体系。通过刻画无人机、来袭导弹及干扰弹在三维空间中的运动规律,构建了基于视线-球体相交关系的有效遮蔽判别模型,并提出了一种基于轮廓特征点选取的高效判定策略,在保证精度的同时显著降低了计算复杂度。

针对多无人机-多导弹场景下的协同决策问题,本文引入了任务指派模型,融合匈牙利算法与贪心算法,实现了无人机的合理任务分配。在此基础上,以系统总有效遮蔽时长最大化为优化目标,构建了包含无人机飞行参数、干扰弹投放点与起爆时间的协同优化模型。针对该模型的高度非线性与多峰特性,提出了多智能体深度确定性策略梯度(MADDPG)与遗传算法(GA)相融合的协同优化框架,有效避免局部最优,显著提升了解的质量和算法的收敛速度。

仿真结果验证了本文所提模型与算法对复杂对抗环境下干扰弹投放策略的有效求解能力,为智能化无人机协同干扰决策提供了可行的技术途径。本文的建模思想与求解框架不仅适用于所述的烟幕干扰场景,也为多智能体协同决策与优化问题提供了理论参考和实践依据。

### 参考文献:

- [1]陈浩,高欣宝,李天鹏,等.国外烟幕干扰弹发展及关键技术研究[J].飞航导弹,2017(12):71-74.
- [2]刘林,张东,朱亚飞.舰艇编队烟幕干扰运用方法研究[J].舰船电子工程,2013,33(8):47-49.
- [3]罗瑞耀,王得霖,罗威,等.烟幕弹应对察打一体无人机的投放策略研究[J].光电技术应用,2022,37(6):90-98.
- [4]中国工业与应用数学学会.2025年高教社杯全国大学生数学建模竞赛赛题[EB/OL].(2025-09-04)[2025-09-10].  
[https://www.mcm.edu.cn/html\\_cn/node/03c91a444e62eee81a3740fa97a461a6.html](https://www.mcm.edu.cn/html_cn/node/03c91a444e62eee81a3740fa97a461a6.html).
- [5]王子晨.Orlicz-Lorentz空间与Orlicz有限直和空间中的 $k$ -凸性[D].芜湖:安徽师范大学,2024.
- [6]杨先登.基于强化学习的机载基站路径规划研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2025.

# 珍稀植物伯乐树褐斑病病原菌的分离与鉴定

蒋明<sup>1</sup>, 周梦亚<sup>1</sup>, 王军峰<sup>2</sup>, 鲍洪华<sup>3</sup>, 张慧娟<sup>1</sup>

(1. 台州学院 生命科学学院, 浙江 台州 318000;

2. 华东药用植物园科研管理中心, 浙江 丽水 323000;

3. 台州市生态环境局 路桥分局, 浙江 台州 318050)

**摘要:**褐斑病是珍稀植物伯乐树(*Bretschneidera sinensis*)的一种常见真菌病害,具有发病率高、破坏性强的特点,该病害的发生会影响叶片正常生长与发育。目前,引起伯乐树褐斑病的病原菌种类尚不明确。本文以伯乐树褐斑病病叶为材料,采用组织分离法获得病原菌,经纯化后进行致病性测定,结合形态学特征观察与多基因联合鉴定明确病原菌的种类。结果表明:从伯乐树病叶中分离得到1株真菌,命名为BL,离体回接实验证实该菌株为致病菌;在PDA培养基上,BL的菌落初期呈白色,随后转为棕灰色,最后发展为灰黑色;菌丝细长、透明、表面粗糙,生长后期产生分生孢子链,分生孢子具喙,有横隔和纵隔,形态特征与链格孢菌(*Alternaria alternata*)一致。多基因联合分析结果显示,BL的ACT和CHS序列与链格孢菌相似性最高,在系统发育树上聚于同一分支,支持率分别为97%和100%。综合形态特征与多基因联合鉴定结果,确定引起伯乐树褐斑病的病原菌为链格孢菌,这一结论为后续开展该保护植物褐斑病的科学防治提供了理论基础。

**关键词:**多基因联合鉴定;链格孢菌;伯乐树;叶片病害

DOI:10.13853/j.cnki.issn.1672-3708.2026.03.003

## 0 引言

伯乐树(*Bretschneidera sinensis*)又名钟萼木、冬桃,为伯乐树科(Bretschneideraceae)伯乐树属木本植物,它是中国特有的、古老的单科单属单种落叶乔木,产于四川、云南、贵州、广西、广东、湖南、湖北、江西、福建和浙江等省区,零星间断分布在低海拔至中海拔山地林中<sup>[1]</sup>。在自然条件下,伯乐树生长速度缓慢、繁殖困难,加之生境破坏严重,伯乐树野外种群规模较小,植株数量也十分稀少,已被世界自然保护联盟(international union for conservation of nature, IUCN)列为濒危物种,并被国家林业和草原局、农业农村部列为国家I级重点保护野生植物<sup>[2-3]</sup>。伯乐树是第三纪古热带植物区系的孑遗物种,具有重要的保护与科研价值,对研究被子植物系统发育、古地理变迁及古气候演化等具有重要意义<sup>[4-6]</sup>。伯乐树植株高大、树形美观,花瓣呈粉红色或白色,蒴果木质,椭圆形或近球形,开裂后露出棕红色种子,该树种具有很好的园林绿化和观赏价值(图1)。伯乐树的幼嫩叶芽含多种维生素、氨基酸及矿物元素,营养丰富、风味独特,是一种具有高附加值的森林蔬菜资源<sup>[7]</sup>。近年来的野外调查发现,伯乐树褐斑病的发生十分严重,发病初期叶面出现褐色小斑点,后逐渐扩大成斑块状,在潮湿条件下有灰黑色霉状物产生,病情严重时病斑蔓延至整张叶片,最终造成叶片脱落(图2)。

褐斑病是一种发生较为普遍的疾病,不仅影响植物的生长和发育,还危及珍稀濒危植物的生存,对农业生产及森林生态造成重大损失,已成为相关产业发展的重要制约因素。褐斑病由多种病原菌引起,甜菜

收稿日期:2026-01-24

作者简介:蒋明(1973—),男,浙江嵊州人,教授,博士,主要从事植物分类及逆境分子生物学研究;张慧娟(通信作者)(1982—),女,浙江天台人,副教授,博士,主要从事植物分子生物学研究。

(*Beta vulgaris*)褐斑病的病原菌为甜菜生尾孢菌(*Cercospora beticola*),该真菌侵染甜菜的叶片、叶柄及花序,导致光合面积减少<sup>[8]</sup>。荔枝(*Litchi chinensis*)褐斑病的病原菌为嘴突凸脐蠕孢(*Exserohilum rostratum*),病害发生在树梢部位,初期叶片上出现褐色斑点,之后扩展至整个叶面<sup>[9]</sup>。塔宾曲霉(*Aspergillus tubingensis*)是柬埔寨龙血树(*Dracaena cambodiana*)褐斑病的病原菌,发病时表现为幼叶的叶尖、叶缘褪绿,后转变为灰褐色和暗褐色,并有叶片破裂和穿孔现象<sup>[10]</sup>。龙牙百合(*Lilium brownii* var. *viridulum*)褐斑病的发生,严重影响鳞茎产量与品质,该病害由枝状链格孢菌(*Alternaria arborescens*)引起<sup>[11]</sup>。目前,伯乐树褐斑病的病原菌种类尚不明确,使得针对性的防治策略难以制定。本文拟在伯乐树叶中分离病原菌的基础上,利用形态学和分子生物学方法对病原菌的种类进行鉴定,为后续开展伯乐树褐斑病的科学防治奠定基础。



图1 伯乐树



图2 伯乐树褐斑病症状

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

伯乐树病叶样品采集自台州学院椒江校区的珍稀濒危植物园,拍照记录症状后将病叶放入采样袋,标明采集时间、经纬度及生境等信息,带回实验室置于4℃冰箱内保存备用。

### 1.2 菌株的分离、纯化和保存

采用组织分离法进行病原菌的分离,选取新鲜、有典型病斑的叶片,在超净工作台上用75%的乙醇擦拭叶片表面2~3次,使用无菌手术刀片切取病斑边缘病健交界处的组织块。将组织块放入无菌烧杯中,先用75%的乙醇溶液浸泡30s,然后用无菌水漂洗10min,将组织块转移到0.1%的升汞溶液中,处理5min后用无菌水清洗2次,最后用无菌滤纸吸干组织块表面的水分。将组织块置于无菌滤纸上,使用无菌刀片切成大小为3mm×3mm的小块,用无菌镊子夹至马铃薯葡萄糖琼脂培养基(potato dextrose agar, PDA)中央。将培养皿置于28℃恒温培养箱中,5~7d时切取菌落边缘菌丝块,将其转接至新的空白PDA培养基上进行纯化培养,重复纯化操作3~4次以确保得到纯培养菌落。

### 1.3 致病性鉴定

选取健康的伯乐树叶片,根据科赫氏法则进行致病性检测。先用自来水冲洗叶片,再用无菌水洗涤

3~4次,晾干后放在铺设有湿润滤纸的灭菌培养皿内,用直径为6 mm的无菌打孔器在菌落边缘切取菌饼,菌丝面朝下贴合于离体叶片。以空白的PDA菌饼为对照,对照组和处理组各设5次重复。置于28℃恒温培养箱中培养,每天同一时间段观察发病情况并记录结果,待叶片出现明显病症后,再次分离病原真菌,并与初次分离所得的真菌特征进行对比。

#### 1.4 病原菌的形态学鉴定

将纯化后的菌株接种于PDA培养基上,用封口膜密封后倒置于28℃培养箱中,定期观察菌落正、反面的颜色、形状及气生菌丝的疏密程度等,测量菌落的直径并做记录。用无菌接种针挑取少量菌丝制作临时装片,在光学显微镜下观察菌丝和孢子的显微特征并拍照记录。用导电胶将干燥的伯乐树病叶及孢子固定至样品托中,再用离子溅射仪进行喷金处理,将它们转移至扫描电子显微镜上进行观察。

#### 1.5 病原菌的分子生物学鉴定

##### 1.5.1 病原菌 DNA 的提取

用灭菌的解剖刀刮取培养基表面的菌丝,放入1.5 mL的无菌离心管中,倒入液氮后迅速用无菌钻头研磨成粉末。按照基因组DNA小量抽提试剂盒(上海碧云天生物技术有限公司)的说明书提取DNA,经1%琼脂糖凝胶电泳检测后,将剩余DNA样品保存于-20℃冰箱中,用于后续的聚合酶链式反应(PCR)实验。

##### 1.5.2 基因片段的克隆

以病原菌基因组DNA为模板,利用内转录间隔区(ITS)、甘油醛-3-磷酸脱氢酶基因(*GAPDH*)、几丁质合成酶1基因(*CHS-1*)和肌动蛋白基因(*ACT*)序列的通用引物进行PCR实验。反应总体系为20 μL,经优化后的PCR反应体系如表1所示。PCR扩增程序为:95℃预变性5 min;95℃变性30 s,58℃退火45 s,72℃延伸90 s,循环32次;72℃最后延伸10 min。取5 μL产物用于1.0%凝胶电泳检测,电泳结束后置于凝胶成像仪中观察并记录。

表1 引物序列及PCR反应体系

名称	引物名称	引物序列(5'→3')	ddH <sub>2</sub> O	缓冲液	dNTPs	引物	模板DNA	Taq酶
ITS	ITS1	5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3'	16.0	2.0	0.5	0.2	0.6	0.5
	ITS4	5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3'						
<i>CHS-1</i>	79F	5'-TGGGGCAAGGATGCTTGAAGAAG-3'	15.6	2.0	0.5	0.2	1.0	0.5
	354R	5'-TGGAAGAACCATCTGTGAGAGTTG-3'						
<i>ACT</i>	512F	5'-ATGTGCAAGGCCGTTTCGC-3'	16.0	2.0	0.5	0.2	0.6	0.5
	783R	5'-TACGAGTCCTTCTGGCCCAT-3'						
<i>GAPDH</i>	GDF1	5'-CCGTCAACGACCCCTTCATTGA-3'	16.0	2.0	0.5	0.2	0.6	0.5
	GDR1	5'-GGGTGGAGTCGTACTIONTTCATG-3'						

注:试剂单位均为μL;DNA浓度为30 ng/μL;引物和dNTPs浓度分别为20 μmol/L和10 mmol/L;Taq酶为2 U/μL。

##### 1.5.3 PCR产物割胶回收

在紫外灯下用无菌刀片割取含目的片段的胶块,放入无菌离心管中。采用DNA快速回收试剂盒(北京鼎国昌盛生物技术有限责任公司)对PCR扩增产物进行回收,再用1.0%凝胶电泳检测后送生工生物工程(上海)股份有限公司测序。

##### 1.5.4 序列分析及系统发育树的构建

从美国国家生物技术信息中心(NCBI)下载BL菌株*CHS-1*的同源片段,分别为链格孢菌(*A. alternata*)

(登录号:XM\_018526402.1)、米拉格链格孢菌(*A. mirabibensis*)(MW173102.1)、根链格孢菌(*A. radicina*)(EU141977.1)、颈链格孢菌(*A. carotiincultae*)(EU141974.1)、玉米小斑病菌(*Bipolaris maydis*)(XM\_014224890.1)、贵妃核腔菌(*Pyrenophora nobleae*)(MK044657.1)和卡拉节纹菌(*Arthrographis kalrae*)(HG316571.1),用于构建基于 *CHS* 片段的系统发育树。同时,下载链格孢菌(MT260153.1)、小茴香链格孢菌(*A. cumini*)(MK940320.1)、人参链格孢菌(*A. panax*)(MK452002.1)、西番莲链格孢菌(*A. passiflorae*)(JQ671754.1)、葱链格孢菌(*A. porri*)(JQ671726.1)、普恩链格孢菌(*A. poonensis*)(JQ671749.1)和红花链格孢菌(*A. carthami*)(JQ671729.1)的 *ACT* 序列,用于构建基于 *ACT* 片段的系统发育树。利用 ClustalX 1.81 软件对序列进行多重比对,并采用 GeneDoc 2.7.0 软件制作比对图;在 MEGA 3.1 中选择邻接法(neighbor-joining,NJ)构建系统进化树,同时设置 1 000 次重复的自举检测,并计算遗传距离。

## 2 结果与讨论

### 2.1 病原菌的分离及特征

从伯乐树褐斑病病叶上分离、纯化得到 1 个真菌菌株,命名为 BL。如图 3 所示:BL 在 PDA 培养基上生长良好,菌落圆形且边缘整齐,表面呈绒毛状,正面初期为白色,培养后渐变为灰黑色;菌落平均生长速率为 0.92 cm/d,气生菌丝在培养过程中不断增厚;培养 9 d 时菌落可铺满整个培养皿。病原菌菌丝细长、透明、表面光滑,分枝较多,具明显隔膜;分生孢子梗直立或屈膝状弯曲;分生孢子褐色,倒棍棒状或卵形,具短喙,基部略微膨大,有多个横隔和纵隔,分割处有缢缩,生长后期会形成 3~8 个孢子长度的孢子链。BL 的形态特征与链格孢菌一致,初步将其鉴定为链格孢菌。

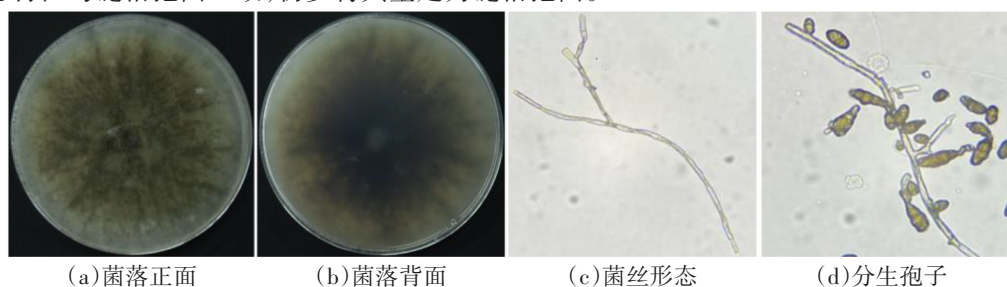


图 3 病原菌 BL 的形态特征

### 2.2 致病性测定结果

离体接种结果表明,5 d 时接种部位生成浅褐色小圆斑,9 d 时病斑正面中央呈现黑色,周围颜色较浅,为深褐色。再次进行分离纯化,均能获得与原分离菌株一致的病原菌。根据科赫氏法则,接种后发病症状与野外相一致,证明菌株 BL 为伯乐树褐斑病的致病菌。利用电子显微镜对病斑部位进行观察,可见细长菌丝紧贴于叶片表面,偶尔能观察到分生孢子链(图 4)。

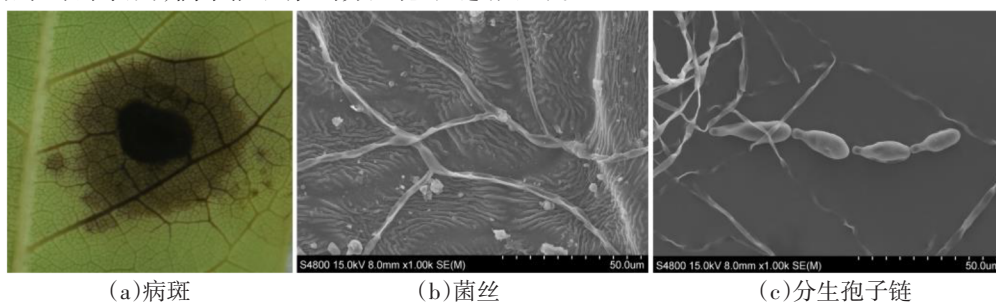


图 4 致病性鉴定及亚细胞观察

### 2.3 分子生物学鉴定

利用 PCR 方法对菌株 BL 的 ITS、*CHS-1*、*GAPDH* 和 *ACT* 基因片段进行扩增,经电泳检测后测序。结

果表明:BL的ITS序列与细极链格孢菌(*A. tenuissima*)、茄链格孢菌(*A. solani*)和狭卵链格孢菌(*A. angustiovoidea*)等序列完全一致,表明ITS序列对这些真菌的区分存在局限性,无法将菌株BL鉴定到种。*GAPDH*也类似,无法将BL与近缘种区分开。

多重比对结果表明,菌株BL的*ACT*序列与链格孢菌的同源性最高,它们的序列长度和组成完全一致,但与其他种类的链格孢属真菌存在一定的差异。与BL相比较,西番莲链格孢菌(JQ671754.1)、葱链格孢菌(JQ671726.1)、普恩链格孢菌(JQ671749.1)和红花链格孢菌(JQ671729.1)在+14、+17、+23、+41及+111位出现颠换现象,在+16、+24、+25、+92、+138和+166位发生了转换,而小茴香链格孢菌(MK940320.1)在+3、+41、+42、+107和+119等位点发生颠换,在+77、+80和+150等位点发生转换(图5)。

与*ACT*序列的比对结果类似,菌株BL的*CHS*序列与链格孢菌的序列完全一致,与其他真菌的序列之间则存在一定的差异。与BL的*CHS*序列相比,米拉格链格孢菌(MW173102.1)在+33、+99位分别发生A→G和G→A转换,在+90和+144位出现T→C转换;颈链格孢菌(EU141974.1)则在+57、+75、+120、+135和+159位出现转换现象。玉米小斑病菌(XM\_014224890.1)、贵妃核腔菌(MK044657.1)和卡拉节纹菌(HG316571.1)与BL之间的序列差异更大,出现转换、颠换现象更频繁(图6)。

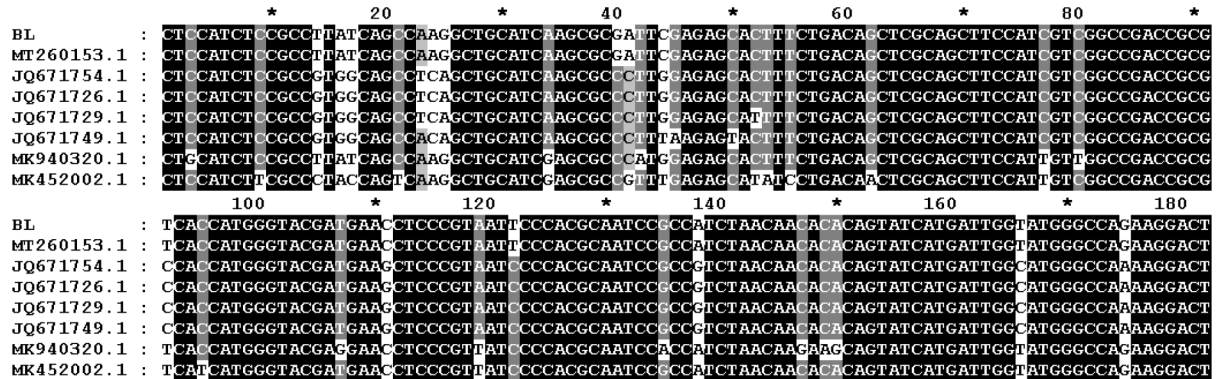


图5 BL菌株*ACT*序列及其同源序列的多重比对

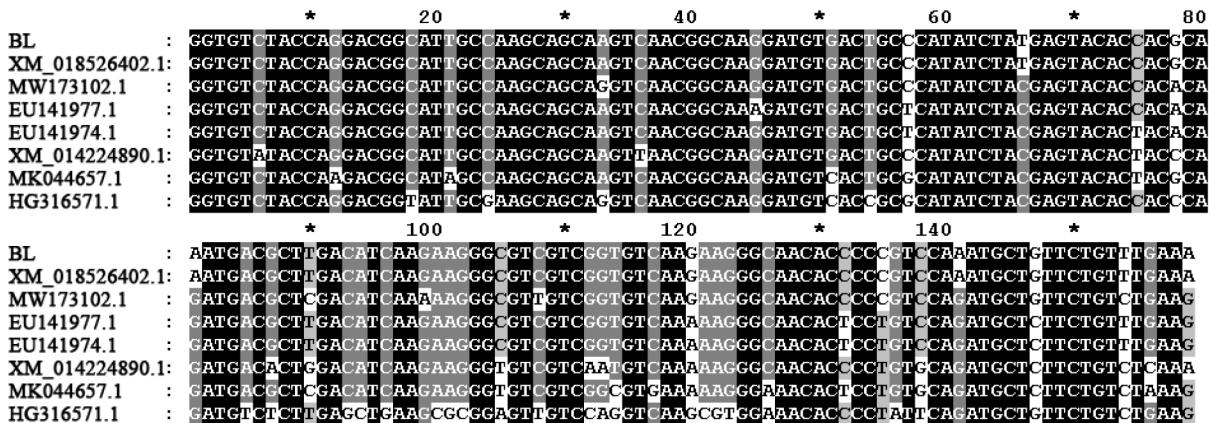


图6 BL菌株*CHS*序列及其同源序列的多重比对

### 2.4 系统发育树分析

利用MEGA软件计算基于*ACT*片段的遗传距离,结果表明:8条*ACT*序列的平均遗传距离为0.09。普恩链格孢菌与小茴香链格孢菌之间的遗传距离最大,为0.158;其次为红花链格孢菌和小茴香链格孢菌,它们的遗传距离为0.150。BL与红花链格孢菌(JQ671729.1)之间的遗传距离最大,为0.099;与普恩链格孢菌(JQ671749.1)的次之,为0.098;与链格孢菌(MT260153.1)的最小,为0。在系统发育树上,BL与链

格孢菌聚于一组,支持率达 97%;小茴香链格孢菌与人参链格孢菌聚于一组,支持率相对较小,仅 78%;其余 4 种链格孢菌聚于一组,支持率达 99%(图 7)。

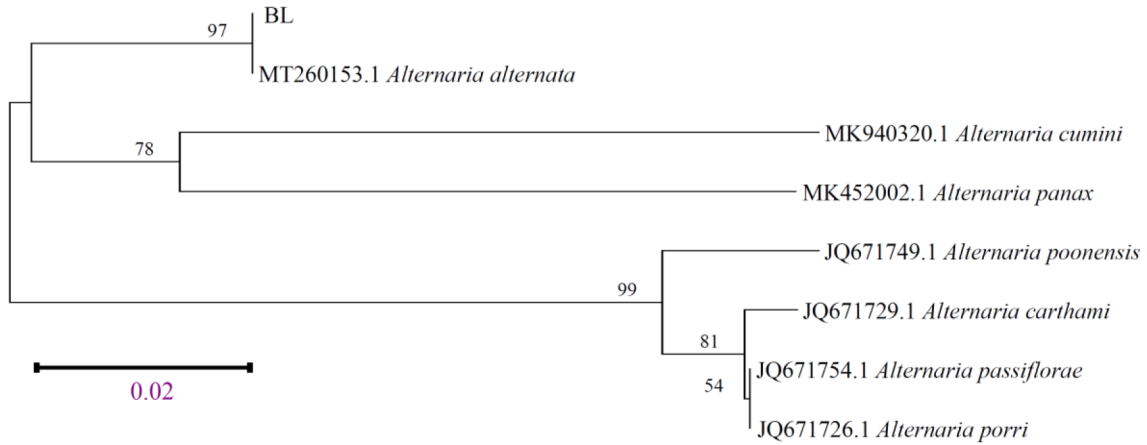


图 7 基于 ACT 基因片段构建的系统发育树

基于 *CHS-1* 序列的遗传距离计算结果表明,8 条序列的平均遗传距离为 0.13。玉米小斑病菌(XM\_014224890.1)与卡拉节纹菌(HG316571.1)之间的遗传距离最大,为 0.247;其次是贵妃核腔菌(MK044657.1)与卡拉节纹菌(HG316571.1)的遗传距离,为 0.244;最小的是 BL 与链格孢菌(XM\_018526402.1)之间的遗传距离,为 0。与其他物种相比,BL 与卡拉节纹菌的遗传距离最大,为 0.243,其次为与贵妃核腔菌的,为 0.146。系统发育分析结果表明:5 种链格孢属真菌聚于一组,BL 首先与链格孢菌聚为一支,支持率达 100%,再与米拉格链格孢菌(MW173102.1)汇聚,最后与根链格孢菌(EU141977.1)和颈链格孢菌(EU141974.1)聚于一组,但支持率较低,仅为 35%;玉米小斑病菌与贵妃核腔菌聚于一组,支持率为 47%;而卡拉节纹菌单独成组(图 8)。

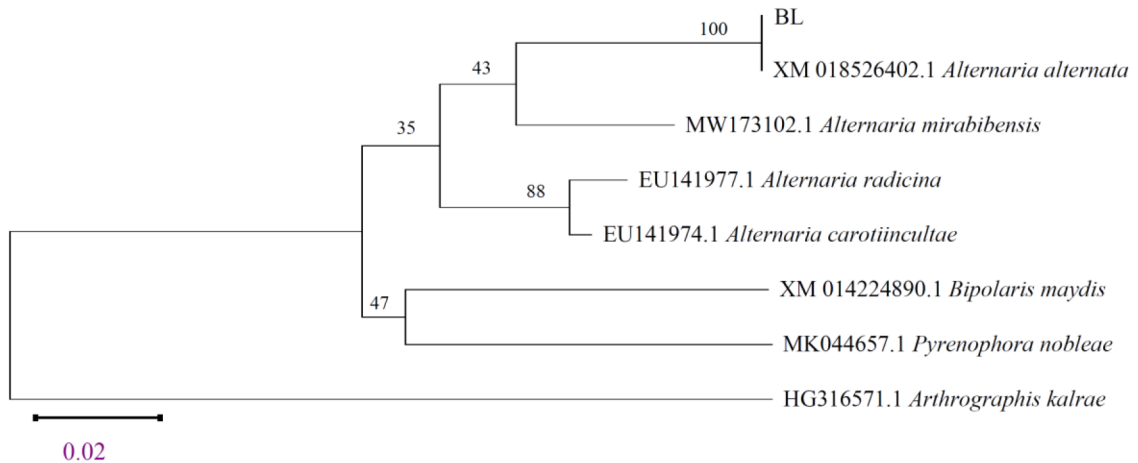


图 8 基于 *CHS-1* 基因片段构建的系统发育树

### 3 讨论

褐斑病是一种在农林业生产和园林绿化中发生较为普遍的疾病,其典型症状为叶片组织出现褐色坏死斑,直接影响植物的光合效率与生理机能,它对寄主植物生长发育造成一定的不良影响<sup>[12-14]</sup>。引起植物褐斑病的病原种类繁多,主要有尾孢霉属、突脐孢属、曲霉属、链格孢属和镰刀菌属(*Fusarium*)等,病原菌的分离和鉴定有一些相关的报道<sup>[8-11]</sup>。桑(*Morus alba*)褐斑病是一种世界性病害,张兴楠等<sup>[15]</sup>在分离病原

菌的基础上,利用形态学和分子生物学方法鉴定为桑新褐斑壳丰孢(*Neophloeospora maculans*)。滇重楼(*Paris polyphylla* var. *yunnanensis*)是一种重要的药用植物,种植区褐斑病的发病率较高,每年造成很大的经济损失,其病原菌为燕麦镰孢菌(*F. avenaceum*)<sup>[16]</sup>。褐斑病是佛手(*Citrus medica* var. *sarcodactylis*)的一种叶部病害,窦涛等<sup>[17]</sup>分离到1株病原菌CQACMM 22001,经鉴定该真菌为棉链格孢(*A. gossypina*)。卢文洁等<sup>[18]</sup>以荞麦(*Fagopyrum esculentum*)褐斑病病叶为材料,分离到S62R5菌株,经形态学和分子鉴定为稻黑孢菌(*Nigrospora oryzae*)。褐斑病病原菌的鉴定在珍稀植物上也有相关报道,覃茜等<sup>[19]</sup>以德保苏铁(*Cycas debaoensis*)、滇南苏铁(*C. diannanensis*)和叉孢苏铁(*C. segmentifida*)的褐斑病病叶为材料,在组织分离、纯化和致病性验证的基础上,利用形态学和分子手段鉴定为巴斯基链格孢(*A. burnsii*)。本研究以伯乐树褐斑病病叶为材料,在分离、纯化和致病性鉴定的基础上,结合形态学和分子生物学方法鉴定为链格孢菌。

链格孢属真菌是植物褐斑病的重要病原,它们侵染蔬菜、水果、花卉、林木及谷物,造成叶片受损、植株发育受阻和产量降低等,并且该属真菌产生的毒素对人类健康有着潜在的风险<sup>[20-21]</sup>。Park等<sup>[22]</sup>在马铃薯(*Solanum tuberosum*)种植区观察到褐斑病的发生,并以此为材料,共分离到68个菌株。经鉴定,其中80.9%为链格孢属真菌。Fu等<sup>[23]</sup>以华重楼(*P. polyphylla* var. *chinensis*)褐斑病病叶为材料,分离到1个真菌菌株,经致病性鉴定和多基因联合鉴定为细极链格孢菌(*A. tenuissima*)。Luo等<sup>[24]</sup>从续断菊(*Sonchus asper*)褐斑病病叶中分离到1株真菌,经形态学和分子生物学鉴定,该病原真菌为苦苣菜链格孢菌(*A. sonchi*)。杨敬之等<sup>[25]</sup>从花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)褐斑病病叶中分离到LUX 1202菌株,致病性测定结果表明该菌能使叶片发病,鉴定为细极链格孢菌。本文分离得到的伯乐树褐斑病病原菌为链格孢菌,该真菌在枣(*Ziziphus jujuba*)、玉竹(*Polygonatum odoratum*)和连翘(*Forsythia suspensa*)等植物的褐斑病病叶中亦有分离<sup>[26-28]</sup>。链格孢属真菌的形态特征易受培养条件和其他外部因素的影响而表现出不稳定,无法保证形态鉴定的准确性。随着分子生物学技术的迅速发展,核苷酸序列在链格孢菌鉴定中得到广泛应用<sup>[29-30]</sup>。ITS进化速度快,能够提供丰富的变异位点和信息位点,且不受环境的影响,是病原菌种属鉴定中重要的条形码<sup>[31-32]</sup>。但ITS存在一定局限性,无法完全区分链格孢属真菌<sup>[33]</sup>。本文研究也遇到类似问题,因此采用分辨率更高的*CHS-1*和*ACT*序列进行分子鉴定,并结合形态特征明确了病原菌的种类。

## 4 结语

本文从珍稀植物伯乐树褐斑病病叶上分离到1株真菌BL,根据科赫氏法则进行了致病性鉴定,确认BL为褐斑病的病原菌。在形态学观察的基础上,基于*CHS-1*和*ACT*基因片段进行多基因联合鉴定,明确引起伯乐树褐斑病的病原菌为链格孢菌。这一研究结果为伯乐树褐斑病的科学防控提供了病原学依据,也为后续相关科学防治技术的开展奠定了基础。

### 参考文献:

- [1]中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志:第34卷:第一分册[M]. 北京:科学出版社,1984.
- [2]乔琦,秦新生,邢福武,等. 珍稀植物伯乐树一年生更新幼苗的死亡原因和保育策略[J]. 生态学报,2011,31(16):4709-4716.
- [3]徐刚标,梁艳,蒋焱,等. 伯乐树种群遗传多样性及遗传结构[J]. 生物多样性,2013,21(6):723-731.
- [4]ZHONG L J, DONG H X, DENG Z J, et al. Physiological mechanisms of *Bretschneidera sinensis* Hemsl. seed dormancy release and germination[J]. Forests, 2023, 14(12):2430.
- [5]乔琦,邢福武,陈红锋,等. 国家一级重点保护野生植物伯乐树的迁地保护技术研究[J]. 中国野生植物资源,2016,35(5):63-66.

- [6]张莎,乔琦,王美娜,等.珍稀濒危植物伯乐树的研究进展[J].福建林业科技,2016,43(4):224-229.
- [7]张季,田华林,朱雁,等.珍贵木本蔬菜伯乐树幼嫩叶芽营养成分分析与评价[J].农学学报,2013,3(12):48-51.
- [8]孙丽,张冬梅,杨继峰,等.甜菜褐斑病病原菌鉴定及药剂毒力测定[J].中国糖料,2025,47(4):40-49.
- [9]丁晓,宋雨,习平根,等.荔枝褐斑病病原鉴定及生防菌筛选[J].华南农业大学学报,2025,46(2):186-193.
- [10]郭建伟,杨春莲,余泽云,等.柬埔寨龙血树褐斑病的病原鉴定及其培养条件分析[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(5):29-39.
- [11]李润根,于鑫,孙琴琴,等.龙牙百合褐斑病病原的鉴定、生物学特性及室内药剂筛选[J].核农学报,2024,38(8):1487-1495.
- [12]JAIN A, SARSAIYA S, WU Q, et al. A review of plant leaf fungal diseases and its environment speciation[J]. Bioengineered, 2019, 10(1):409-424.
- [13]VAN DER NEST A, WINGFIELD M J, JANOUŠEK J, et al. *Lecanosticta acicola*: a growing threat to expanding global pine forests and plantations[J].Molecular Plant Pathology, 2019, 20(10):1327-1364.
- [14]GARMENDIA A, FERRIOL M, BELTRÁN R, et al. Plant protection products to control *Alternaria* brown spot caused by *Alternaria alternata* in citrus: a systematic review[J].Agronomy, 2025, 15(6):1343.
- [15]张兴楠,罗龙辉,黄裕鑫,等.桑褐斑病病原菌的分离鉴定及高通量测序分析[J].蚕业科学,2024,50(1):9-16.
- [16]柳敏,王彩云,周茂嫦,等.贵州滇重楼褐斑病病原菌鉴定及10种杀菌剂的室内毒力测定[J].贵州农业科学,2024,52(1):58-65.
- [17]窦涛,范安阳,崔广林,等.佛手叶部褐斑病病原菌鉴定及防治药剂筛选[J].植物病理学报,2023,53(5):769-778.
- [18]卢文洁,王艳青,孙道旺,等.云南省荞麦褐斑病病原鉴定及其生物学特性分析[J].西南农业学报,2022,35(1):98-104.
- [19]覃茜,丁丽琼,池昭锦,等.苏铁羽叶褐斑病病原菌鉴定及其化学防治药剂的筛选[J].热带作物学报,2024,45(8):1677-1684.
- [20]VINOGRADOVA S A, KISELEV K V, SUPRUN A R. An overview of the *Alternaria* genus: ecology, pathogenicity and importance for agriculture and human health[J]. Journal of Fungi, 2026, 12(1):64.
- [21]LOGRIECO A, MORETTI A, SOLFRIZZO M. *Alternaria* toxins and plant diseases: an overview of origin, occurrence and risks[J]. World Mycotoxin Journal, 2009, 2(2):129-140.
- [22]PARK J, KIM S, JO M, et al. Isolation and identification of *Alternaria alternata* from potato plants affected by leaf spot disease in Korea: selection of effective fungicides[J]. Journal of Fungi, 2024, 10(1):53.
- [23]FU R T, CHEN C, WANG J, et al. Identification of *Alternaria tenuissima* causing brown leaf spot on *Paris polyphylla* var. *chinensis* in China[J]. Journal of Phytopathology, 2019, 167(7/8):440-444.
- [24]LUO H, PARK M S, YU J M. Morphology and molecular characteristics of *Alternaria sonchi* causing brown leaf spot on *Sonchus asper* in Korea: research in plant disease[J]. Korean Society of Plant Pathology, 2021, 27(3):107-114.
- [25]杨敬之,尹显慧,袁军,等.贵州花椒褐斑病病原鉴定及防治药剂筛选[J].植物病理学报,2023,53(6):1065-1071.
- [26]王建敏,白岩虎,张鹏迪,等.枣褐斑病拮抗菌的分离、鉴定、抑菌特性及复配生防效果[J].植物保护学报,2025,52(3):688-699.
- [27]陈臻,刘卫红,曾翠云,等.玉竹褐斑病病原菌的分离与鉴定[J].中国植保导刊,2022,42(1):12-17.
- [28]刘鹏,李钦,张维瑞,等.连翘褐斑病病原菌鉴定及其对杀菌剂敏感性研究[J].园艺学报,2022,49(8):1805-1814.
- [29]BLAGOJEVIĆ J, VUKOJEVIĆ J, IVANOVIĆ B, et al. Characterization of *Alternaria* species associated with leaf spot disease of *Armoracia rusticana* in Serbia[J].Plant Disease, 2020, 104(5):1378-1389.
- [30]RAJA H A, MILLER A N, PEARCE C J, et al. Fungal identification using molecular tools: a primer for the natural products research community[J].Journal of Natural Products, 2017, 80(3):756-770.
- [31]BADOTTI F, DE OLIVEIRA F S, GARCIA C F, et al. Effectiveness of ITS and sub-regions as DNA barcode markers for the identification of *Basidiomycota* (Fungi)[J].BMC Microbiology, 2017, 17(1):42.
- [32]BHUNJUN C S, PHILLIPS A J L, JAYAWARDENA R S, et al. Importance of molecular data to identify fungal plant pathogens and guidelines for pathogenicity testing based on Koch's postulates[J].Pathogens, 2021, 10(9):1096.
- [33]李永,岳志强,朴春根,等.链格孢属真菌的分子复核鉴定及系统发育研究[J].中国农学通报,2013,29(27):165-169.

## Isolation and Identification of the Pathogen Causing Brown Spot Disease in the Rare Plant *Bretschneidera sinensis*

Jiang Ming<sup>1</sup>, Zhou Mengya<sup>1</sup>, Wang Junfeng<sup>2</sup>, Bao Honghua<sup>3</sup>, Zhang Huijuan<sup>1</sup>

(1. School of Life Sciences, Taizhou University, Taizhou 318000, China;

2. Scientific Research Management Center of East China Medicinal Botanical Garden, Lishui 323000, China;

3. Luqiao Branch, Taizhou Municipal Ecology and Environment Bureau, Taizhou 318050, China)

**Abstract:** Brown spot disease is a common fungal disease of the rare plant *Bretschneidera sinensis*, characterized by high incidence and severe destructiveness. This disease affects the growth and development of leaves, however, the specific pathogen responsible for brown spot disease in *B. sinensis* remains unidentified. In this study, diseased leaves with brown spot symptoms were used as materials to isolate the pathogen through tissue isolation method. After pathogen purification, the pathogenicity was tested, and the species was identified by combining morphological characteristics with multi-gene sequence analysis. The results demonstrated that a fungal strain, designated as BL, was isolated from the diseased leaves of *B. sinensis*. Pathogenicity was confirmed through detached leaf inoculation experiments. On PDA medium, the BL colonies initially appeared white, later turned brownish-gray, and eventually became grayish-black. The hyphae were slender, transparent, and rough-surfaced, forming chains of conidia at later growth stages. The conidia exhibited beaks, along with transverse and longitudinal septa, consistent with the morphological features of *Alternaria alternata*. Multi-gene sequence analysis revealed that the *ACT* and *CHS* sequences of BL indicated the highest similarity to those of *A. alternata*, which were clustered together in the phylogenetic tree with bootstrap support values of 97% and 100%, respectively. Based on the integrated morphological and multi-gene joint identification results, the pathogen causing brown spot disease in *B. sinensis* was identified as *A. alternata*. This study provides a foundation for the scientific control of brown spot disease in this protected plant species

**Keywords:** multi-gene joint identification; *Alternaria alternata*; *Bretschneidera sinensis*; foliar disease

(上接第18页)

## Research on the Coordinated Deployment Strategy of Multiple Smoke Jamming Projectiles

Zhao Xiaolei<sup>a</sup>, Wang Houshuo<sup>a</sup>, Li Bingcong<sup>a</sup>, Li Jiwei<sup>b</sup>

(a. School of Artificial Intelligence; b. School of Architecture and Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

**Abstract:** Based on the data from Problem A of the 2025 National College Students Mathematical Modeling Competition(CUMCM), this study focuses on the defensive task of coordinated smoke screen interference rounds deployed by UAVs. Utilizing geometric analysis theory and constrained optimization methods, with the objective of maximizing the effective shielding time for cylindrical objects, a spatiotemporal collaborative optimization model for smoke screen round deployment and detonation strategies was established. By integrating multi-agent decision-making and hybrid optimization strategies such as genetic algorithms, the flight parameters of UAVs and the deployment and detonation parameters of interference rounds were collaboratively designed under various combat scenarios, achieving the maximization of missile interference effectiveness.

**Keywords:** visual masking; multi-body motion modeling; optimal deployment strategy; hybrid optimization algorithm; smoke jamming projectiles

# 濒危植物夏蜡梅幼苗群落草本层生态位及种间联结

王晓燕, 秦 娇, 余 臻, 陈格格, 陈桂彬, 郭佳婧, 陈雅利

(台州学院 生命科学学院, 浙江 台州 318000)

**摘要:** 幼苗存活率是限制濒危植物夏蜡梅种群更新的重要因子。以浙江省天台县大雷山夏蜡梅所处落叶常绿阔叶混交林、杉木林和毛竹林3种典型林型的草本群落为研究对象,采用 Levins 和 Shannon 生态位宽度指数、Pianka 生态位重叠指数,结合方差比率、联结系数、 $\chi^2$ 检验和 Spearman 秩相关检验,对各草本层重要值分别排名前20的优势物种进行生态位特征与种间联结分析,以期为夏蜡梅幼苗的保护和种群更新提供理论依据。结果表明:3种林型草本层共调查植物75种,隶属17科37属,其中落叶常绿阔叶混交林物种丰富度最高;夏蜡梅幼苗的生态位宽度在毛竹林中最大,杉木林次之,落叶常绿阔叶混交林最小。按落叶常绿阔叶混交林、杉木林、毛竹林顺序,3种林型草本层优势物种分别组成的190个种对中,存在明显生态位重叠的分别有80对、77对和96对;而夏蜡梅与其余19个优势物种组成的种对中,存在明显生态位重叠的分别仅为5对、0对和8对,生态位重叠程度整体较低。3种林型草本层总体呈显著或不显著负联结,表明其群落稳定性弱。 $\chi^2$ 检验和 Spearman 秩相关检验显示,各林型草本层大多数种对联结不显著,种间关联性较弱,大部分物种分布相对独立,仅毛竹林中的夏蜡梅幼苗与部分草本植物存在显著种间联结。综上,夏蜡梅幼苗在毛竹林中具有更强的适应性与资源利用能力,该林型生境更适合其生存。

**关键词:** 夏蜡梅;草本层;生态位宽度;生态位重叠;种间联结

DOI:10.13853/j.cnki.issn.1672-3708.2026.03.004

## 0 引言

生态位与种间联结是群落生态学研究热点之一,也是揭示物种共存机制、群落构建及演替规律的关键理论支撑。生态位理论旨在量化物种对环境资源的利用能力及其在群落中的功能地位,其中生态位宽度反映物种对环境资源的适应能力与利用广度,而生态位重叠则揭示了物种间对资源利用的相似程度与潜在竞争关系<sup>[1]</sup>。种间联结指不同物种在空间分布上的相互关联性,由群落生境异质性、物种资源需求差异及种间相互作用共同驱动<sup>[2]</sup>。探究濒危植物所在群落优势物种的生态位与种间联结,不仅能揭示濒危物种的资源利用效率和种间关系,更有助于深入理解其所处群落的结构特征、稳定性和演替动态,对于揭示濒危植物的致濒机理及科学地制定原位保护方案具有重要的参考价值<sup>[3]</sup>。

夏蜡梅(*Calycanthus chinensis*)为蜡梅科(Calycanthaceae)夏蜡梅属,是中国特有的第三纪孑遗落叶灌木、国家II级重点保护濒危植物<sup>[4]</sup>。夏蜡梅花期为5~6月,其花大而美丽,具有较高观赏与药用价值<sup>[5]</sup>。但其现存野生资源极度匮乏,仅分布于浙江临安、天台及安徽绩溪等狭窄区域<sup>[6]</sup>。研究表明,生境片段化导致夏蜡梅种群遗传多样性较低<sup>[7]</sup>,且生长发育强烈依赖荫蔽、湿润的特定生境,对强光、干旱及土壤瘠薄敏感<sup>[8]</sup>。目前,对夏蜡梅的研究已涵盖群落生态、遗传多样性、光合生理及繁育系统等多个层面,但现有工作多聚焦于成年植株,对于其幼苗阶段,尤其是幼苗与所处群落草本层其他植物物种间的相互作用关系

收稿日期:2026-01-24

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(LTY22C030004)

作者简介:王晓燕(1983—),女,山西文水人,教授,博士,硕士生导师,主要从事濒危植物与土壤微生物相关研究。

尚缺乏系统探讨。而草本层作为幼苗生长的直接生境,其物种组成、资源竞争强度对幼苗的存活与生长具有显著的调控作用。因此,系统地开展夏蜡梅幼苗所处群落草本层主要植物物种的生态位与种间联结研究,明确夏蜡梅幼苗与草本层优势物种的种间关系,对揭示夏蜡梅在不同林型中的生态位特征及差异,阐明夏蜡梅与其他优势物种间的竞争与共存格局具有重要意义。

本文以夏蜡梅所处落叶常绿阔叶混交林、杉木林和毛竹林3种典型林型为研究对象,探讨夏蜡梅幼苗所处群落草本层主要植物物种的生态位与种间联结,分别从夏蜡梅幼苗在不同林型草本层中的生态位特征及其差异,以及其与草本层优势物种的竞争和共存格局展开研究。研究结果将为准确识别夏蜡梅幼苗的适生生境及制定有针对性的群落恢复策略提供重要的理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域位于浙江省天台县龙溪乡黄水村和下辽坑村周边区域,地貌以低山丘陵为主,具有明显的亚热带季风气候特征,四季分明,年平均气温为17.0℃,年平均降水量为1411.7 mm,土壤类型以红壤和黄壤为主,土壤pH值为4.7~5.4<sup>[9-10]</sup>。除临安大明山之外,该区域是夏蜡梅在第四纪冰期的另一个避难所<sup>[11]</sup>。

### 1.2 样地选择与调查

以夏蜡梅所处落叶常绿阔叶混交林、杉木林和毛竹林3种林型为研究对象,每种林型各设置3个25 m × 20 m样方,每个样方划分为20个5 m × 5 m的草本样格。记录每个样方的经纬度及海拔,调查样方内所有草本植物的盖度、平均高度和个体数。

落叶常绿阔叶混交林和杉木林样方的郁闭度约为85%~90%,海拔均位于800~900 m;毛竹林样方的郁闭度(平均81.30%)和海拔(平均704 m)较低。落叶常绿阔叶混交林的优势物种主要有化香树(*Platycarya strobilacea*)、红脉钓樟(*Lindera rubronervia*)、中国绣球(*Hydrangea chinensis*)、夏蜡梅和山麦冬(*Liriope spicata*)等;杉木林和毛竹林的优势物种分别为杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和毛竹(*Phyllostachys edulis*)。

### 1.3 数据处理与统计分析

以样格为单位整理数据,区分林型以统计草本层所有物种所属的科、属和个体数。

#### 1.3.1 重要值

物种重要值的大小可以表征物种在群落中的重要程度<sup>[12]</sup>,其计算公式<sup>[13]</sup>为

$$I_v = (R_H + R_C) / 2,$$

其中: $I_v$ 为物种重要值; $R_H$ 为相对高度; $R_C$ 为相对盖度。

#### 1.3.2 生态位特征

(1)生态位宽度。物种对资源的利用程度,采用Levins指数( $B_L$ )<sup>[14]</sup>和Shannon指数( $B_S$ )来计算,计算公式<sup>[15]</sup>分别为

$$B_L = \frac{1}{\sum_{j=1}^r (P_{ij})^2},$$

$$B_S = -\sum_{j=1}^r P_{ij} \ln(P_{ij}),$$

其中: $P_{ij} = n_{ij} / N_i$ ,  $n_{ij}$ 为物种*i*在样方*j*上的重要值,  $N_i$ 为物种*i*在所有样方上的重要值总和;  $P_{ij}$ 代表物种*i*

在样方  $j$  上的重要值占该物种在所有样方上重要值总和的比例;  $r$  为样方总数<sup>[16]</sup>。 $B_L \in [1, r]$ ,  $B_S \in [0, \ln r]$ ;  $B_L$  和  $B_S$  值越大, 生态位越宽。

(2) Pianka 生态位重叠指数 ( $O_{ik}$ )。两个物种在资源利用上的相似性程度计算公式<sup>[17]</sup>为

$$O_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^r P_{ij} P_{kj}}{\sqrt{\sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \sum_{j=1}^r P_{kj}^2}},$$

其中:  $O_{ik}$  代表种  $i$  与种  $k$  的生态位重叠指数,  $O_{ik}$  值域为  $[0, 1]$ , 其值越大, 生态位重叠程度越高;  $P_{ij}$  和  $P_{kj}$  分别是物种  $i$  和  $k$  在样方  $j$  上的重要值。

### 1.3.3 总体联结性 $\delta^2$

根据 Schluter 提出的方差比率法分析夏蜡梅幼苗所处 3 种林型草本层的总体联结性, 并使用统计量  $W$  来检验总体联结性是否显著<sup>[18]</sup>, 计算公式分别为

$$\delta^2 T = \sum_{i=1}^S P_i (1 - P_i),$$

$$P_i = n_i / N,$$

$$S^2 T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_j - t)^2,$$

$$V_R = S^2 T / \delta^2 T,$$

$$W = V_R \times N,$$

其中:  $V_R$  为方差比率;  $S$  为物种总数;  $N$  为样格总数;  $n_i$  为物种  $i$  出现的样格数;  $T_j$  为样格  $j$  中出现的物种数;  $t$  为所有样格中出现的物种平均数。  $V_R$  同时作为总体联结系数, 当  $V_R > 1$  时, 正关联; 当  $V_R < 1$  时, 负关联; 当  $V_R = 1$  时, 无关联。利用统计量  $W$  检验  $V_R$  值是否显著偏离 1, 当  $W > \chi^2_{0.05}(N)$  或  $W < \chi^2_{0.95}(N)$  时, 总体联结显著; 当  $\chi^2_{0.95}(N) < W < \chi^2_{0.05}(N)$  时, 总体联结不显著。

### 1.3.4 种间联结分析

(1)  $\chi^2$  检验。

基于每种林型的草本层优势物种在 60 个样格中是否出现, 建立 0-1 二元矩阵和 2x2 列联表, 采用 Yates 的连续校正公式计算  $\chi^2$  值, 公式<sup>[19]</sup>为

$$\chi^2 = \frac{N \left[ \left| ad - bc \right| - \frac{1}{2} N \right]^2}{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)},$$

其中:  $N$  为总样格数;  $a$  表示两个种都存在的样格数;  $b$  和  $c$  分别表示两个种分别单独出现的样格数;  $d$  表示两个种都不存在的样格数。当  $\chi^2 < 3.841$  时, 不显著联结 ( $P > 0.05$ ); 当  $3.841 \leq \chi^2 < 6.635$  时, 显著联结 ( $0.01 \leq P < 0.05$ ); 当  $\chi^2 \geq 6.635$  时, 极显著联结 ( $P < 0.01$ )。

(2) 联结系数。

联结系数能进一步验证  $\chi^2$  检验的结果, 两者联合使用, 能准确分析种间联结, 计算公式<sup>[15]</sup>为

$$\text{当 } ad \geq bc \text{ 时, } A_c = \frac{ad - bc}{(a+b)(b+d)};$$

$$\text{当 } ad < bc \text{ 且 } d \geq a \text{ 时, } A_c = \frac{ad - bc}{(a+b)(a+c)};$$

$$\text{当 } ad < bc \text{ 且 } d < a \text{ 时, } A_c = \frac{ad - bc}{(c+d)(b+d)}。$$

其中: $A_C$ 为联结系数, $A_C \in [-1, 1]$ 。 $A_C$ 越趋近于1,正联结越强; $A_C$ 越趋近于-1;负联结越强; $A_C = 0$ ,无联结。

(3)Spearman 秩相关检验。

Spearman 秩相关检验属于定量检验,能准确地反映出种对间的显著性和相关性,计算公式<sup>[20]</sup>为

$$r(i, j) = 1 - \frac{6 \sum_{k=1}^N (x_{ik} - x_{jk})^2}{N^3 - N}$$

其中: $r(i, j) \in [-1, 1]$ 。当 $r(i, j) > 0$ 时,正相关;当 $r(i, j) < 0$ 时,负相关;当 $r(i, j) = 0$ 时,无联结。

物种重要值利用 Excel 2021 计算;生态位和种间联结分析采用 R 4.4.3 软件中的 spaa 程序包<sup>[19]</sup>计算;绘图采用 Origin 2021 和 R 4.4.3 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 夏蜡梅所处不同林型草本层优势物种重要值及生态位宽度

本次调查的草本层植物共计 75 种,隶属 17 科 37 属。其中,落叶常绿阔叶混交林 50 种,杉木林 39 种,毛竹林 41 种。对各林型重要值排名前 20 的优势物种进行生态位与种间联结性分析。

由表 1 可知,在落叶常绿阔叶混交林中,紫萁(*Osmunda japonica*)的生态位宽度最大,其 Levins( $B_L$ )和 Shannon 生态位宽度指数( $B_S$ )分别为 2.11 和 0.82;其次是山麦冬(*Liriope spicata*)(1.99 和 0.69);阔鳞鳞毛蕨(*Dryopteris championii*)居第 3 位(1.96 和 0.68);如意草(*Viola arcuata*)居第 4 位(1.53 和 0.53);夏蜡梅(*Calycanthus chinensis*)居第 5 位(1.47 和 0.61)。在杉木林中,乌菟莓(*Causonis japonica*)生态位宽度最大(2.40 和 0.95);其次是淡竹叶(*Lophatherum gracile*)(2.37 和 0.95);垂穗薹草(*Carex brachyathera*)排第 3 位(2.00 和 0.69);夏蜡梅的重要值排第 26 位( $I_V=0.20$ ),虽未进入前 20 位,但作为本文的目标物种,仍纳入分析,其生态位宽度  $B_L=1.60$ , $B_S=0.56$ 。在毛竹林中,金星蕨(*Parathelypteris glanduligera*)生态位宽度最大(2.48 和 0.97);其次是垂穗薹草(2.43 和 0.97),红盖鳞毛蕨(*Dryopteris erythrosora*)(1.97 和 0.69)、黑足鳞毛蕨(*Dryopteris fuscipes*)(1.91 和 0.67)和淡竹叶(1.87 和 0.66);夏蜡梅排第 6 位(1.76 和 0.66)。

表 1 夏蜡梅不同林型草本层优势物种重要值及生态位宽度

群落类型	编号	物种名	重要值 $I_V/\%$	生态位宽度	
				$B_L$	$B_S$
落叶常绿 阔叶混交林	A1	山麦冬 <i>Liriope spicata</i>	41.93	1.99	0.69
	A2	早熟禾 <i>Poa annua</i>	13.48	1.27	0.37
	A3	金星蕨 <i>Parathelypteris glanduligera</i>	8.33	1.09	0.17
	A4	蕨 <i>Pteridium aquilinum</i> var. <i>latiusculum</i>	5.69	1.00	0.00
	A5	黑足鳞毛蕨 <i>Dryopteris fuscipes</i>	5.13	1.08	0.16
	A6	如意草 <i>Viola arcuata</i>	4.27	1.53	0.53
	A7	垂穗薹草 <i>Carex brachyathera</i>	4.05	1.00	0.00
	A8	淡竹叶 <i>Lophatherum gracile</i>	2.01	1.26	0.36
	A9	香茶菜 <i>Isodon amethystoides</i>	1.79	1.32	0.40
	A10	蹄盖蕨 <i>Athyrium filix-femina</i>	1.61	1.00	0.00
	A11	虎耳草 <i>Saxifraga stolonifera</i>	1.60	1.00	0.00
	A12	牛尾菜 <i>Smilax riparia</i>	1.23	1.09	0.18
	A13	沿阶草 <i>Ophiopogon bodinieri</i>	1.07	1.00	0.00
	A14	韩信草 <i>Scutellaria indica</i>	0.91	1.00	0.00
	A15	夏蜡梅 <i>Calycanthus chinensis</i>	0.59	1.47	0.61
	A16	紫花前胡 <i>Angelica decursiva</i>	0.56	1.00	0.00

续表

群落类型	编号	物种名	重要值 $I_v/\%$	生态位宽度	
				$B_L$	$B_S$
杉木林	A17	阔鳞鳞毛蕨 <i>Dryopteris championii</i>	0.56	1.96	0.68
	A18	舌叶薹草 <i>Carex ligulata</i>	0.55	1.00	0.00
	A19	紫萁 <i>Osmunda japonica</i>	0.49	2.11	0.82
	A20	大叶唐松草 <i>Thalictrum faberi</i>	0.41	1.00	0.00
	B1	山麦冬 <i>Liriope spicata</i>	28.73	1.01	0.03
	B2	八角麻 <i>Boehmeria platanifolia</i>	9.92	1.01	0.04
	B3	垂穗薹草 <i>Carex brachyathera</i>	8.50	2.00	0.69
	B4	金星蕨 <i>Parathelypteris glanduligera</i>	8.37	1.49	0.58
	B5	大萼香茶菜 <i>Isodon macrocalyx</i>	6.57	1.00	0.00
	B6	淡竹叶 <i>Lophatherum gracile</i>	5.14	2.37	0.95
	B7	红盖鳞毛蕨 <i>Dryopteris erythrosora</i>	4.00	1.05	0.11
	B8	早熟禾 <i>Poa annua</i>	3.49	1.00	0.00
	B9	蹄盖蕨 <i>Athyrium filix-femina</i>	3.32	1.00	0.00
	B10	黑足鳞毛蕨 <i>Dryopteris fuscipes</i>	3.01	1.06	0.12
	B11	京鹤鳞毛蕨 <i>Dryopteris kinkiensis</i>	2.73	1.00	0.00
	B12	乌葭莓 <i>Causonis japonica</i>	2.72	2.40	0.95
	B13	阔鳞鳞毛蕨 <i>Dryopteris championii</i>	2.29	1.00	0.00
	B14	求米草 <i>Oplismenus undulatifolius</i>	1.68	1.69	0.60
	B15	如意草 <i>Viola arcuata</i>	1.46	1.74	0.62
	B16	日本薯蓣 <i>Dioscorea japonica</i>	1.39	1.19	0.35
B17	台湾赤廴 <i>Thladiantha punctata</i>	1.36	1.00	0.00	
B18	假升麻 <i>Aruncus sylvester</i>	0.91	1.00	0.00	
B19	薯蓣 <i>Dioscorea polystachya</i>	0.78	1.16	0.26	
B20	里白 <i>Diplazium glaucum</i>	0.61	1.00	0.00	
毛竹林	C1	垂穗薹草 <i>Carex brachyathera</i>	57.30	2.43	0.97
	C2	紫萁 <i>Osmunda japonica</i>	6.75	1.03	0.08
	C3	淡竹叶 <i>Lophatherum gracile</i>	5.07	1.87	0.66
	C4	狗脊 <i>Woodwardia japonica</i>	4.49	1.21	0.32
	C5	金星蕨 <i>Parathelypteris glanduligera</i>	3.78	2.48	0.97
	C6	夏蜡梅 <i>Calycanthus chinensis</i>	3.54	1.76	0.66
	C7	红盖鳞毛蕨 <i>Dryopteris erythrosora</i>	3.35	1.97	0.69
	C8	络石 <i>Trachelospermum jasminoides</i>	2.95	1.00	0.00
	C9	双蝴蝶 <i>Tripteris chinense</i>	2.03	1.00	0.00
	C10	黑足鳞毛蕨 <i>Dryopteris fuscipes</i>	1.40	1.91	0.67
	C11	日本薯蓣 <i>Dioscorea japonica</i>	1.14	1.36	0.44
	C12	乌葭莓 <i>Causonis japonica</i>	0.97	1.14	0.24
	C13	蕨 <i>Pteridium aquilinum</i> var. <i>latiusculum</i>	0.88	1.15	0.26
	C14	迷人鳞毛蕨 <i>Dryopteris decipiens</i>	0.83	1.00	0.00
	C15	薯蓣 <i>Dioscorea polystachya</i>	0.75	1.00	0.00
	C16	翠云草 <i>Selaginella uncinata</i>	0.70	1.00	0.00
	C17	求米草 <i>Oplismenus undulatifolius</i>	0.54	1.00	0.00
	C18	短葶山麦冬 <i>Liriope muscari</i>	0.46	1.00	0.00
	C19	麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i>	0.44	1.26	0.36
	C20	笔龙胆 <i>Gentiana zollingeri</i>	0.40	1.34	0.42

### 2.2 夏蜡梅所处不同林型草本层优势物种生态位重叠

落叶常绿阔叶混交林、杉木林和毛竹林的草本层优势物种分别组成了 190 个种对。由图 1 可知:存在生态位重叠( $O_{ik} > 0$ )的分别为 149 对(78.42%)、145 对(76.32%)和 149 对(78.42%);生态位重叠明显( $O_{ik} > 0.5$ )的分别有 80 对(42.11%)、77 对(40.53%)和 96 对(50.53%);无生态位重叠( $O_{ik} = 0$ )的分别有 41 对(21.58%)、45 对(23.68%)和 41 对(21.58%)。夏蜡梅在落叶常绿阔叶混交林存在明显生态位重叠的种对有 5 对,其重叠值介于 0.66~0.99 之间, $O_{ik}$  均值为 0.92;在毛竹林存在明显生态位重叠的种对有 8 对,其重叠值介于 0.51~0.97 之间, $O_{ik}$  均值为 0.83;在杉木林中无明显生态位重叠的种对。

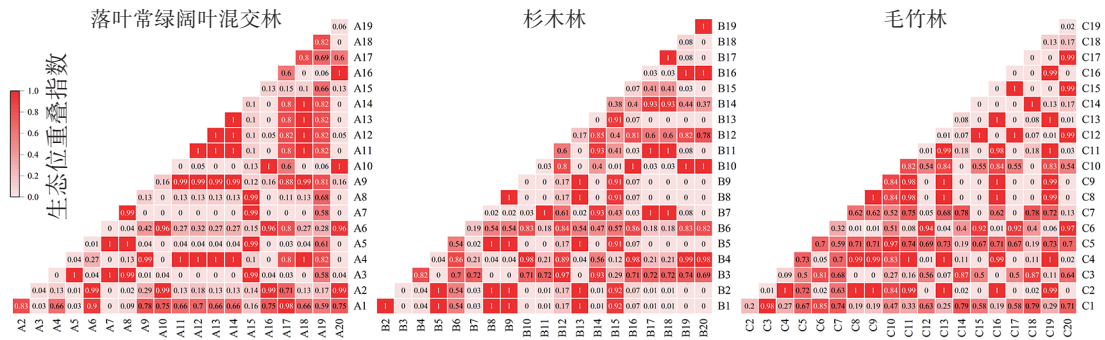


图 1 夏蜡梅 3 种林型草本层优势物种 Pianka 生态位重叠指数

### 2.3 夏蜡梅所处不同林型草本层优势物种的总体联结性

落叶常绿阔叶混交林总体联结性方差比率  $V_R$  小于 1(0.67), 统计量  $W \notin (\chi^2_{0.95}(N), \chi^2_{0.05}(N))$ , 表明其优势物种间总体联结性为显著负联结( $P < 0.05$ );杉木林( $V_R = 0.73, W = 44.03$ )和毛竹林( $V_R = 0.92, W = 54.93$ )的  $V_R$  均小于 1, 且  $\chi^2_{0.95}(N) < W < \chi^2_{0.05}(N)$ , 说明这两种林型优势物种间的总体联结性均为不显著负联结( $P > 0.05$ ), 如表 2 所示。

表 2 夏蜡梅不同林型草本层优势物种总体联结性

群落类型	方差比率 $V_R$	检验统计量 $W$	$\chi^2$ 临界值	检验结果
落叶常绿阔叶混交林	0.67	37.64	43.19, 79.08	显著负联结
杉木林	0.73	44.03	43.19, 79.08	不显著负联结
毛竹林	0.92	54.93	43.19, 79.08	不显著负联结

### 2.4 夏蜡梅所处不同林型草本层优势物种间联结性 $\chi^2$ 检验

$\chi^2$  检验结果显示(图 2), 由落叶常绿阔叶混交林、杉木林和毛竹林草本层主要植物分别组成的 190 个种对中, 呈正联结的种对分别有 63 对(33.16%)、80 对(42.11%)和 69 对(36.32%); 呈负联结的种对分别有 124 对(65.26%)、107 对(56.32%)和 120 对(63.16%); 呈不联结的种对分别有 3 对(1.58%)、3 对(1.58%)和 1 对(0.53%); 正负联结比分别为 0.51、0.75 和 0.58。其中落叶常绿阔叶混交林极显著、显著和不显著正联结种对分别有 11(5.79%)对、4 对(2.11%)和 48 对(25.26%); 极显著、显著、不显著负联结种对分别有 6 对(3.16%)、3 对(1.58%)和 115 对(60.53%)。杉木林极显著、显著、不显著正联结种对分别有 18 对(9.47%)、4 对(2.11%)和 58 对(30.53%); 极显著、显著、不显著负联结种对分别有 11 对(5.79%)、11 对(5.79%)和 85 对(44.74%)。毛竹林极显著、显著、不显著正联结种对分别有 9 对(4.74%)、4 对(2.11%)和 56 对(29.47%); 极显著、显著和不显著负联结种对分别有 2 对(1.05%)、3 对(1.58%)和 115 对(60.53%)。毛竹林中, 夏蜡梅与乌莓呈显著正联结, 与金星蕨呈显著负联结。

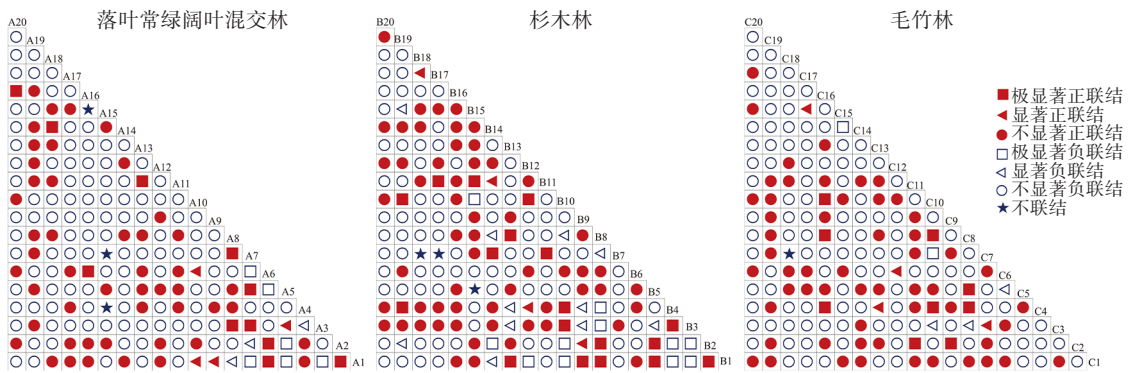
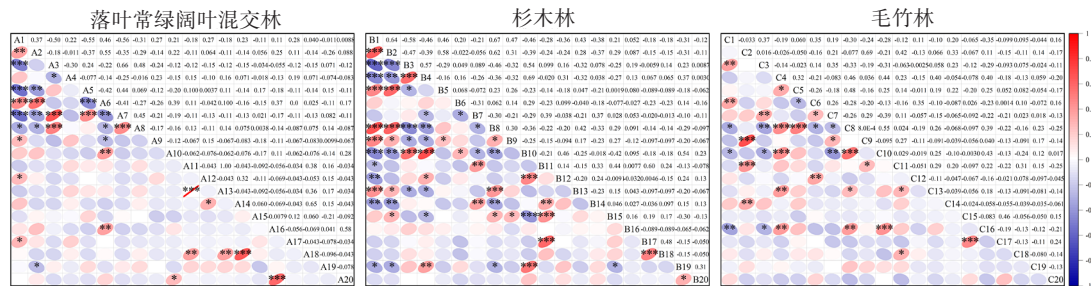


图2 夏蜡梅3种林型草本层优势物种 $\chi^2$ 检验半矩阵图

### 2.5 夏蜡梅所处不同林型草本层优势物种间 Spearman 秩相关检验

Spearman 秩相关系数检验结果显示(图3),由落叶常绿阔叶混交林、杉木林和毛竹林草本层主要植物分别组成的190个种对中,呈正联结的种对分别有68对、72对和70对;呈负联结的种对分别有121对、118对和120对;呈不联结的种对分别有1对、0对和0对;正负联结比分别为0.56、0.61和0.58。其中落叶常绿阔叶混交林极显著、显著和不显著正联结种对分别有14对、5对和49对;极显著、显著、不显著负联结种对分别有7对、6对和108对。杉木林极显著、显著、不显著正联结种对分别有20对、10对和42对;极显著、显著、不显著负联结种对分别有14对、15对和89对。毛竹林极显著、显著、不显著正联结种对分别有16对、7对和47对;极显著、显著和不显著负联结种对分别有3对、7对和110对。毛竹林中的夏蜡梅与乌荻莓、垂穗藁草和红盖鳞毛蕨呈极显著或显著正联结,与金星蕨和络石呈显著负联结。



说明: \*表示  $P \leq 0.05$ ; \*\*表示  $P \leq 0.01$ ; \*\*\*表示  $P \leq 0.001$ 。

图3 夏蜡梅3种林型草本层优势物种 Spearman 秩相关性半矩阵图

## 3 讨论

### 3.1 夏蜡梅在不同林型草本层中的生态位特征

林下植被是森林生态系统的重要组成部分,在促进养分循环、改善土壤结构及维持林分生产力方面具有重要作用<sup>[21]</sup>。生态位宽度是衡量物种资源利用能力和环境适应性的关键指标,生态位宽度值越大,表明物种对资源的利用能力越强,适应性越高,生存能力也越强<sup>[22-23]</sup>。3种林型草本层中,夏蜡梅幼苗在毛竹林中的生态位宽度最大( $B_L=1.76, B_S=0.66$ ),重要值排名第6,且幼苗数量最多,表明毛竹林生境更有利于夏蜡梅幼苗的存活与适应。这主要源于毛竹林郁闭度适中,林冠层既能有效遮荫,又不会导致林下光照过弱,从而减轻光抑制、降低土壤表面温度和减少水分蒸发,为幼苗萌发与生长提供有利条件<sup>[24]</sup>。此外,毛竹林作为人工经济林,周期性的人为疏伐形成林隙,以及增强林下光照与土壤资源异质性,均为夏蜡梅提供了更广的生态位空间。相关研究也指出,夏蜡梅果实与种子性状在灌丛生境中表现最佳,竹林生境次之,常绿阔叶林生境最差<sup>[25]</sup>,进一步支持竹林生境对其生长的促进作用。相比之下,杉木林中夏蜡梅

幼苗的生态位宽度( $B_L=1.60, B_S=0.56$ )虽高于落叶常绿阔叶混交林,但其重要值极低(第26位),表明其虽具备较广的资源利用潜力,但实际生态位可能受到杉木、乌蕨和淡竹叶等强竞争物种的压制。在落叶常绿阔叶混交林中,夏蜡梅幼苗的生态位宽度最小( $B_L=1.47, B_S=0.61$ ),重要值排名也较低(第15位),这可能与其在特定微生境中高效利用资源的策略有关<sup>[1]</sup>。落叶常绿阔叶混交林与杉木林均具有较高郁闭度,林下光照不足,虽夏蜡梅具有一定耐阴性,但过度荫蔽会抑制其生长<sup>[26]</sup>。

生态位重叠是指物种间对环境资源利用的相似性程度或竞争关系,生态位重叠越高,物种对生境资源的需求越相似,在资源越有限时越可能引发竞争<sup>[27-28]</sup>。夏蜡梅幼苗在落叶常绿阔叶混交林和毛竹林中,与部分伴生植物存在明显生态位重叠( $O_{ik}$ 均值分别达0.92和0.83),说明其与部分伴生种在资源需求上高度相似。有研究表明,夏蜡梅野生种群所在生境(如大雷山)土壤肥力较高、光照条件良好,资源可利用性较高,传粉者较为丰富<sup>[29]</sup>,这为物种在高重叠情况下仍能共存提供了基础。尽管3种林型中多数物种间生态位重叠较高,但高重叠并不一定导致竞争激烈和物种不能共存,夏蜡梅种群仍保持增长型或稳定型结构<sup>[30]</sup>,群体遗传多样性维持在较高水平,反映出其对环境较强的适应能力。这种共存机制可能源于“资源补偿”效应,即物种通过细微的生态位分化(如利用资源的时间、空间或形式差异)实现资源共享,从而缓解直接竞争。然而物种能否长期共存不仅取决于生态位重叠程度,还受到种间关系、环境波动(如气候变化、人为干扰)及群落演替阶段等因素的综合影响<sup>[21]</sup>。

### 3.2 不同林型草本层优势物种的种间联结特征

种间联结性与群落稳定性密切相关,常作为判断群落是否稳定的依据。一般而言,演替初期,物种间联结性较弱,正负关联比值较低,群落结构较不稳定。随着演替推进,物种间正联结比例逐渐增加,正负关联比值上升,群落稳定性增强并向顶级群落发展。当演替至顶级阶段时,物种间生态位高度分化,总体联结性呈现显著正联结,群落趋于稳定<sup>[21]</sup>。本文讨论的3种林型草本层的总体联结性均为负联结,其中落叶常绿阔叶混交林为显著负联结,杉木林与毛竹林为不显著负联结,表明3种林型的草本层群落均处于不稳定状态,尚未发展至成熟演替阶段,尤其是落叶常绿阔叶混交林种间的竞争或排斥作用较为明显。

综合 $\chi^2$ 检验、种间联结系数和 Spearman 秩相关检验结果发现,3种林型草本层中的不显著种对数均明显大于显著种对数,这说明群落物种间的联结性较弱,物种之间相对独立,总体均呈负联结,因此推断夏蜡梅幼苗所处的草本层群落不够稳定。李锦婷等<sup>[31]</sup>、李丘霖等<sup>[32]</sup>分别针对珍稀濒危植物小黄花茶(*Camellia luteoflora*)和桫欏(*Alsophila spinulosa*)群落生态位和种间联结性的研究也有类似结论。 $\chi^2$ 和 Spearman 秩相关检验结果显示,落叶常绿阔叶混交林、杉木林、毛竹林草本层主要植物间多呈不显著负联结,3种林型的正负联结比也基本一致( $\chi^2$ 检验:0.51、0.75和0.58; Spearman 秩相关检验:0.56、0.61和0.58)。张央等<sup>[33]</sup>对地宝兰(*Geodorum densiflorum*)群落的研究表明,大多数种对间呈不显著相关,与本文的研究结果一致。然而在毛竹林中,夏蜡梅幼苗与乌蕨、垂穗藁草和红盖鳞毛蕨呈显著正联结,说明其与部分伴生种在资源利用或生境需求上存在互补或协同关系<sup>[34]</sup>。毛竹林中显著正联结种对占比较高,且有部分物种与夏蜡梅呈显著正联结;结合夏蜡梅在该林型中具有较宽的生态位宽度和较高的重要值,可进一步说明毛竹林为夏蜡梅幼苗提供了相对适宜的生存环境。张忠钊等<sup>[24]</sup>对天台县大雷山夏蜡梅群落的研究也发现毛竹林下夏蜡梅种群数量最多。

## 4 结语

夏蜡梅所在群落草本层植物间多呈不显著联结,种间关联性较弱,各优势种相对独立,物种对环境资

源的利用未达到最佳状态。夏蜡梅幼苗仅在毛竹林中与少部分植物种间联结显著,表明夏蜡梅在群落中可能处于相对独立的地位。夏蜡梅幼苗在毛竹林的生态位宽度和重要值均偏高,与乌葭莓等物种呈现显著正联结,且群落中显著正联结的种对较多,表明其在该林型中具备较强的资源利用能力与适应性,该生境为夏蜡梅幼苗提供了较为有利的生存条件。综上,在就地保护的基础上,可优先考虑对毛竹林生境的维护与优化,通过适度人为干预,比如定期疏伐毛竹以保持林下光照,补植与夏蜡梅幼苗正关联较强的伴生种乌葭莓等,以提升夏蜡梅幼苗的存活率,促进其种群的更新壮大。

#### 参考文献:

- [1]刘倩,丁彦芬,宋杉杉,等.南京明城墙绿带草本层优势自生植物的生态位特征及种间联结关系[J].西北林学院学报,2024,39(6):257-264.
- [2]奇凯,张春雨,侯继华,等.赤峰市沙地油松林草本植物多样性及种间关联动态[J].生态学报,2010,30(18):5106-5112.
- [3]刘润红,陈乐,涂洪润,等.桂林岩溶石山青冈群落灌木层主要物种生态位与种间联结[J].生态学报,2020,40(6):2057-2071.
- [4]徐耀良,张若蕙,周骋.夏蜡梅的群落学研究[J].浙江林学院学报,1997,14(4):43-50.
- [5]马金娥.濒危植物夏蜡梅(*Sinocalycanthus chinensis*)生理生态特性研究[D].重庆:西南大学,2008.
- [6]金则新.夏蜡梅保护生物学[M].北京:科学出版社,2010.
- [7]赵宏波,周莉花,郝日明,等.中国特有濒危植物夏蜡梅的交配系统[J].生态学报,2011,31(3):602-610.
- [8]余臻,秦娇,金则新,等.濒危植物夏蜡梅3种林型的群落特征比较[J].森林与环境学报,2026,46(1):82-90.
- [9]邹奕巧,蔡人岳,姚任图,等.天台县公益林生态系统服务功能评估[J].防护林科技,2022(5):23-28.
- [10]邹奕巧,孙欧文,刘海英,等.浙江省天台县不同森林类型枯落物及土壤水文特性[J].水土保持通报,2020,40(3):170-174.
- [11]谈探.濒危植物夏蜡梅种群遗传多样性与分子系统地理学研究[D].北京:北京林业大学,2008.
- [12]李博.生态学[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [13]马克平,黄建辉,于顺利,等.北京东灵山地区植物群落多样性的研究:Ⅱ丰富度、均匀度和物种多样性指数[J].生态学报,1995,15(3):268-277.
- [14]LEVINS R. Evolution in changing environments: some theoretical explorations[M].Princeton, NJ:Princeton University Press,1968.
- [15]叶家桐,邓涛,岑华飞,等.广西银竹老山资源冷杉群落乔木优势树种生态位与种间联结[J].生态学报,2025,45(8):3921-3932.
- [16]高亮,周建广,丁晖,等.武夷山国家公园黄山松林海拔梯度生态位及种间联结性[J].生态学报,2024,44(21):9836-9847.
- [17]李晖,刘龙英,郭婉琪,等.广州城市中央湿地草本层生态位特征[J].生态学报,2025,45(5):2355-2363.
- [18]SCHLUTER D. A variance test for detecting species associations, with some example applications[J].Ecology,1984,65(3):998-1005.
- [19]雷德芳,王志杰.黔中喀斯特地区马尾松群落主要物种种间联结、生态位及群落稳定性特征[J].生态学报,2024,44(10):4353-4367.
- [20]阮梓臻,王斌,钟艺倩,等.淡黄金花茶伴生群落优势乔木的种间联结及群落稳定性分析[J].植物科学学报,2024,42(2):170-180.
- [21]郑晓阳.不同林分类型杉木人工林林下草本层物种多样性、生态位及种间联结研究[D].福州:福建农林大学,2018.
- [22]李雨晗,丁彦芬,张畅为.南京外秦淮河优势草本植物生态位和种间联结性研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(6):203-210.
- [23]邱婷,毕华兴,管凝,等.黄土高原刺槐林灌草优势种生态位及种间联结特征[J].生态学报,2025,45(20):10211-10223.
- [24]张忠钊,谢文远,张培林.天台县大雷山夏蜡梅群落学特征分析[J].浙江农林大学学报,2021,38(2):262-270.
- [25]张文标.濒危植物夏蜡梅(*Sinocalycanthus chinensis*)繁殖生态与遗传分化研究[D].重庆:西南大学,2007.
- [26]芦建国,孙姿,唐桂兰.珍稀树种夏蜡梅研究进展[J].林业科技开发,2015,29(4):1-6.
- [27]肖艳梅,解婧媛,姚义鹏,等.桂林岩溶石山常绿阔叶混交林乔木层优势物种生态位研究[J].生态学报,2021,41(20):8159-8170.
- [28]庞久帅,原阳晨,周苗苗,等.槭叶铁线莲(*Clematis acerifolia* Maxim.)群落物种生态位研究[J].生态学报,2022,42(8):

3449–3457.

- [29]金则新,顾婧婧,李钧敏.基于形态及分子标记的濒危植物夏蜡梅自然居群的遗传变异研究[J].生态学报,2012,32(12):3849–3858.
- [30]刘华红,周莉花,黄耀辉,等.群落演替对夏蜡梅种群分布和数量的影响[J].生态学报,2016,36(3):620–628.
- [31]李锦婷,穆君,申开平,等.小黄花茶群落优势木本植物生态位及种间联结性[J].生态学报,2024,44(1):283–294.
- [32]李丘霖,宗秀虹,邓洪平,等.赤水桫欏群落乔木层优势物种生态位与种间联结性研究[J].西北植物学报,2017,37(7):1422–1428.
- [33]张央,李志,安明态,等.极小种群野生植物贵州地宝兰群落生态位特征及种间关系[J].植物资源与环境学报,2022,31(3):1–10.
- [34]彭焱松,周赛霞,詹选怀,等.江西油岭山地花榈木群落特征及空间分布格局[J].中南林业科技大学学报(自然科学版),2018,38(11):81–88.

## Niche and Interspecific Associations of the Herb Layer in Endangered Plant *Calycanthus chinensis* Communities

Wang Xiaoyan, Qin Jiao, Yu Zhen, Chen Gege, Chen Guibin, Guo Jiajing, Chen Yali

(School of Life Sciences, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

**Abstract:** Seedling survival is a key factor limiting population regeneration of the endangered plant *Calycanthus chinensis*. In this study, herbaceous communities were investigated in three typical forest types: deciduous–evergreen broadleaved mixed forest, Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) forest, and moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) forest where *C. chinensis* seedlings grow in Dalei Mountain, Tiantai County, Zhejiang Province. Levins' and Shannon's niche breadth indices, Pianka's niche overlap index were applied, together with interspecific association analyses using the variance ratio method, association coefficient,  $\chi^2$  test, and Spearman's rank correlation test, to evaluate niche characteristics and interspecific associations among the top 20 dominant species in the herb layer in each forest type. The aim was to provide a theoretical basis for the conservation of *C. chinensis* seedlings and population regeneration. The results demonstrated that: A total of 75 plant species belonging to 37 genera and 17 families were recorded in the herb layer across the three forest types, with the highest species richness found in the deciduous–evergreen broadleaved mixed forest. The niche breadth of *C. chinensis* seedlings was greatest in the moso bamboo forest, followed by the Chinese fir forest, and smallest in the deciduous–evergreen broadleaved mixed forest. Among the 190 species pairs formed by the dominant herbaceous species in each forest type, significant niche overlap was observed in 80, 77, and 96 pairs in the mixed forest, Chinese fir forest, and moso bamboo forest, respectively. For the species pairs between *C. chinensis* and the other 19 dominant species, significant niche overlap was detected in 5, 0, and 8 pairs across the three forest types, indicating a relatively low degree of niche overlap. The overall interspecific association in the herb layer of all three forest types showed significant or non-significant negative associations, suggesting weak community stability.  $\chi^2$  test and Spearman's rank correlation test revealed that most species pairs in the herb layer of the three forest types had non-significant associations and weak interspecific relationships, with relatively independent species distributions. Significant interspecific associations between *C. chinensis* seedlings and other plants were only found in the moso bamboo forest. In conclusion, *C. chinensis* seedlings exhibit stronger adaptability and resource-use capacity in the moso bamboo forest, indicating that this forest type provides a more suitable habitat for their survival.

**Keywords:** *Calycanthus chinensis*; herb layer; niche breadths; niche overlap; interspecific associations

# 茶山溪底栖动物群落结构特征及其生物多样性研究

吴国强<sup>1</sup>, 葛勇<sup>2</sup>, 顾羽婷<sup>1</sup>, 许娜<sup>1</sup>, 郭可心<sup>1</sup>, 齐鑫<sup>1</sup>

(1. 台州学院 生命科学学院, 浙江 台州 318000; 2. 台州市生态环境局 黄岩分局, 浙江 台州 318020)

**摘要:**底栖动物是重要的水生生物类群之一,为水环境指示生物。为探明茶山溪底栖动物群落结构及其生物多样性特征,研究团队于2025年2月和5月在该溪设置9个样点采集底栖动物,并利用生物指数和Shannon-Wiener指数进行水质评价。经鉴定,共获得底栖动物129种,隶属于4门7纲15目45科96属。其中,纹沼螺(*Parafossarulus striatulus*)、雅丝扁蜉蛄(*Ecdyonurus yoshidae*)、四节蜉(*Baetis* sp.)、细蜉(*Caenis* sp.)、拟细裳蜉(*Paraleptophlebia* sp.)、纹石蛾(*Hydropsyche* sp.)、肉质特长足摇蚊(*Thienemannimyia carnea*)、壳粗腹摇蚊属1种(*Conchapelopia* sp.)、直长足摇蚊属1种(*Helopelopia* sp.)为优势种。利用冗余分析(RDA)分别对茶山溪底栖动物群落结构、样点与环境因子进行相关性分析,结果显示:溶解氧和pH值是影响底栖动物群落结构的主要因素;St4、St5、St6采样点与其他样点存在显著差异。不同污染程度下环境因子的单因素方差分析表明:除压强外,其余环境因子均与环境污染程度相关。生物指数评价结果显示,茶山溪水质处于“清洁-轻污染”状态,Shannon-Wiener指数评价为“轻污染-中污染”等级。二者结果虽有差异,但变化趋势一致。综合两项指数评价结果,茶山溪水质整体处于“清洁-轻污染”状态。

**关键词:**茶山溪;底栖动物;群落结构;环境因子;水质评价

DOI:10.13853/j.cnki.issn.1672-3708.2026.03.005

## 0 引言

底栖动物是重要的水生生物类群之一,在物质循环和能量流动中发挥着积极作用<sup>[1]</sup>。它是重要的水环境指示生物,常被用于水环境监测和水质健康评价<sup>[2]</sup>。茶山溪位于浙江省天台县街头镇,是始丰溪的一级支流,区域内山丘连绵,水网密布。本文以茶山溪的底栖动物为研究对象,开展其群落结构及生物多样性研究,并利用多种生物指标评价分析方法,首次对茶山溪水质进行评价。

## 1 材料与方法

### 1.1 站点设置与采样方法

为体现茶山溪底栖动物群落结构完整性和生物多样性特征,团队于2025年2月和5月,依据茶山溪的地理环境及溪水流向,沿溪流纵向设置9个采样点(下游St1~St3,中游St4~St6,上游St7~St9,见图1),确保采样点能覆盖流域内不同河段,为后续群落结构对比分析提供全面样本支撑。利用YSI水质检测仪测定并记录采集地的氨氮含量( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、电导率(Cond)、溶解氧(DO)、水温(T)和pH值



图1 茶山溪采样点分布

收稿日期:2026-02-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(32070481);浙江省自然科学基金资助项目(LMS26C040001);台州市科技计划项目(25sfa05);浙江省大学生创新创业训练计划项目(S202510350044)

作者简介:吴国强(2005—),男,浙江温州人,2023级科学教育专业本科生;齐鑫(通信作者)(1981—),山东济南人,教授,博士,硕士生导师,主要从事动物系统学研究。

等指标,严格操作以确保数据的准确性。标本处理参照毛佳平<sup>[3]</sup>的方法,物种鉴定则依据底栖动物分类学相关文献进行<sup>[4-16]</sup>。

## 1.2 数据处理与分析

### 1.2.1 底栖动物优势种与生物多样性分析

优势物种采用优势物种度( $Y$ )进行分析:定义  $Y = P_i \times f_i$ ,当  $Y \geq 0.02$  时,可判定该物种为优势种。生物多样性的分析选用生物指数(BI)、Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Pielou 均匀度指数( $J'$ )、Margalef 丰富度指数( $R$ )和 Simpson 多样性指数( $D$ );计算公式<sup>[17]</sup>分别为  $BI = \sum n_i t_i / N$ ,  $H' = -\sum P_i \ln P_i$ ,  $J' = H' / \ln S$ ,  $R = (S - 1) / \ln N$ ,  $D = 1 / \sum P_i^2$ 。以上公式中: $f_i$ 为第  $i$ 种在各采样点出现的频率; $N$ 为所有底栖动物个体的总数; $n_i$ 为第  $i$ 个分类单元的个体数; $P_i$ 为  $n_i$ 占  $N$ 的比例,即  $P_i = n_i / N$ ;  $S$ 为各采样点的物种数; $t_i$ 为第  $i$ 个分类单元的耐污值。

### 1.2.2 生物指标评价方法

利用生物指数(BI)和 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )对茶山溪水质进行评价,评价标准:(1)BI值:最清洁(0~3.04)、清洁(3.05~4.78)、轻污染(4.79~6.52)、中污染(6.53~8.26)、重污染(8.27~10)<sup>[18]</sup>。(2) $H'$ 值:清洁( $H' \geq 3$ )、轻污染(2~3)、中污染(1~2)、重污染(0~1)、极重污染(0)<sup>[19]</sup>。

### 1.2.3 多元分析

对 BI 值和  $H'$  值进行标准差分析,即利用标准差进行 2 月和 5 月的变化分析。基于距离的冗余分析(RDA)用于分析影响蜉蝣目、襁翅目和毛翅目(EPT)群落结构的主要环境因子<sup>[20]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 底栖生物群落结构

#### 2.1.1 种类组成

本研究共采集到底栖动物 5 020 头,经鉴定,隶属于 4 门 7 纲 15 目 45 科 96 属 129 种(表 1 和图 2)。

表 1 茶山溪各样点分月份底栖动物物种数、平均密度与平均生物量

采样点	2月物种数	5月物种数	去重物种数 (去除重复记录后)	平均密度/(ind/m <sup>2</sup> )	平均生物量/(g/m <sup>2</sup> )
St1	30	44	65	1 220±596	3.26±2.05
St2	25	25	42	800±264	31.68±16.52
St3	32	29	46	3 332±1 500	7.85±9.62
St4	34	47	61	4 076±1 268	49.09±35.46
St5	35	21	50	2 772±572	7.50±0.63
St6	23	35	46	2 312±560	50.91±42.66
St7	28	31	46	2 388±532	18.41±10.97
St8	26	36	45	1 636±508	4.27±0.42
St9	25	13	29	1 576±872	12.19±6.78

由表 1 可知,茶山溪底栖动物的物种数月份之间差异不明显,但不同样点间物种数存在差异,其中 St1 采样点去重后物种数最多,有 65 种;而 St9 采样点最少,仅 29 种。在采集到的底栖动物中,扁形动物门仅涡虫纲 1 种,占总种数的 1%;环节动物门 6 种,占总种数的 5%(寡毛纲 4 种,占总种数的 3%;蛭纲 2 种,占总种数的 2%);软体动物门 8 种,占总种数的 6%(腹足纲 7 种,占总种数的 5%;瓣鳃纲 1 种,占总种数的 1%);节肢动物门 114 种,占总物种数的 88%(软甲纲 1 种,占总种数的 1%;昆虫纲 113 种,占总

种数的 87%)。其中水生昆虫物种组成见图 3:双翅目 6 科 76 种;EPT(蜉蝣目、襀翅目、毛翅目)20 科 28 种;蜻蜓目 1 科 2 种;鞘翅目 4 科 4 种;广翅目 2 科 3 种。

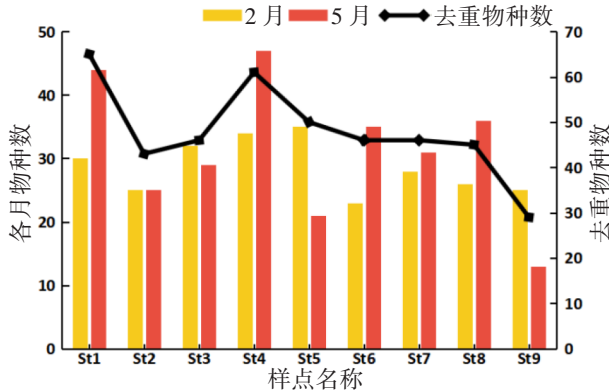


图 2 样点物种数

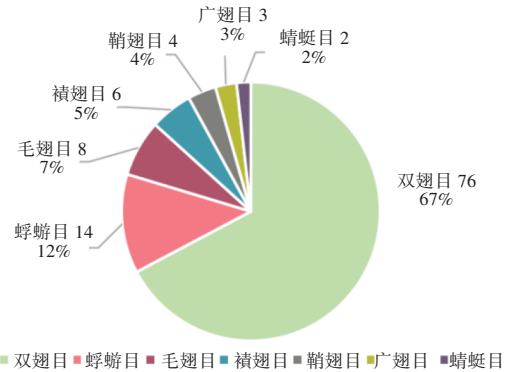


图 3 茶山溪水生昆虫物种组成

### 2.1.2 底栖动物优势种组成

茶山溪底栖动物优势种组成包括:纹沼螺(*Parafossarulus striatulus*),优势度为 0.021 4;雅丝扁蚴蜉(*Ecdyonurus yoshidae*),优势度为 0.020 5;四节蜉(*Baetis* sp.),优势度为 0.073 2;细蜉(*Caenis* sp.),优势度为 0.203 8;拟细裳蜉(*Paraleptophlebia* sp.),优势度为 0.113 8;纹石蛾(*Hydropsyche* sp.),优势度为 0.063 4;肉质特长足摇蚊(*Thienemannimyia carnea*),优势度为 0.138 4;壳粗腹摇蚊属 1 种(*Conchapelopia* sp.),优势度为 0.164 8;直长足摇蚊属 1 种(*Helopelopia* sp.),优势度为 0.098 4。

### 2.1.3 密度、生物量及生物多样性指数

茶山溪 2 个月底栖动物平均密度为(2 234.67±319.11)ind/m<sup>2</sup>,平均生物量为(19.09±12.25)g/m<sup>2</sup>。不同采样点之间底栖动物的平均密度和平均生物量有所不同(图 4)。从平均密度来看,St4 的平均密度最高,St2 的平均密度最低;从平均生物量来看,St6 的平均生物量最大,St1 的平均生物量最小。

利用 Shannon-Wiener 多样性指数(*H'*)、Pielou 均匀度指数(*J'*)、Margalef 丰富度指数(*R*)、Simpson 多样性指数(*D*)绘制各月的趋势变化图(图 5~6)。Pielou 均匀度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Simpson 多样性指数的变化范围分别为 0.66~0.79,1.74~2.47,2.66~4.70,0.54~0.63。

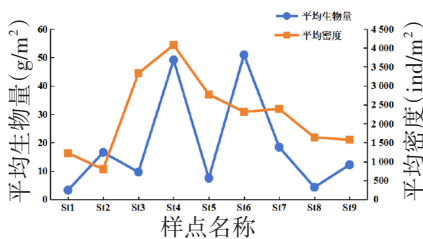


图 4 茶山溪各样点生物量与密度

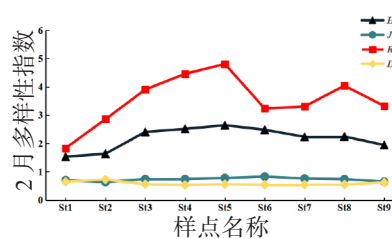


图 5 茶山溪 2 月多样性指数

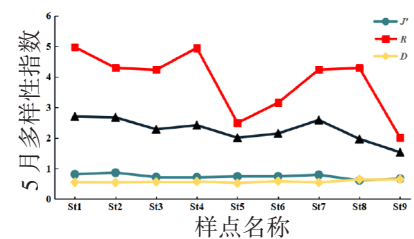


图 6 茶山溪 5 月多样性指数

## 2.2 底栖动物群落结构与环境因子的相关性

### 2.2.1 环境因子特征

为明确不同污染程度下环境因子的差异,研究团队对各环境因子进行单因素方差分析(图 7)。从图 7 可以看出,电导率、水温、溶解氧(DO)、pH 及氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)在不同污染程度区段间均存在差异。压强主要受外界气象影响,它和水体自身污染程度关联不大,其他主要环境因子均与环境污染程度相关。

### 2.2.2 群落结构与环境因子的相关性分析

为进一步分析底栖动物群落结构与环境因子之间的关系,我们对重要的水环境指示生物 EPT 与环境因子进行冗余分析(RDA),如图 8 所示(sp1~sp21 分别为 *Cinygmina* sp.、*Ecdyonurus yoshidae*、*Epeorus*

sp.、*Heptagenia* sp.、*Uracanthella rufa*、*Drunella* sp.、*Baetiella* sp.、*Baetis* sp.、*Isonychia* sp.、*Siphonurus* sp.、*Ephemera pulcherrima*、*Caenis* sp.、*Paraleptophlebia* sp.、*Ameletus montanus*、*Sweltsa* sp.、*Capnia* sp.、*Perlomyia* sp.、*Nemoura* sp.、*Hydropsyche* sp.、*Mystacides* sp.、*Dolophilodes* sp.)。排序轴第 1、2 对群落变异解释分别为 30.35% 和 52.41%。前四轴的解釋变量(累计)为 78.8%,说明能较好地反映物种与环境因子之间的关系。在蜉蝣目中,雅丝扁蚴蜉、扁蜉、华丽蜉、细蜉与温度、压力、电导率呈正相关,其余蜉蝣目物种与上述环境因子呈负相关。在襉翅目中,除叉襉与溶氧量和氨氮含量呈负相关外,其余呈正相关。在毛翅目中,除长角石蛾与溶氧量和氨氮含量呈正相关,其余呈负相关。各样点与环境因子的 RDA 相关性分析如图 9 所示,由图 9 可以看出:St4、St5、St6 采样点群落结构与其他样点有显著差别;St4、St5 采样点的群落结构与氨氮含量、pH 值呈正相关;其他样点均与温度、溶氧量、电导率呈负相关,其中 St6 采样点最为显著。

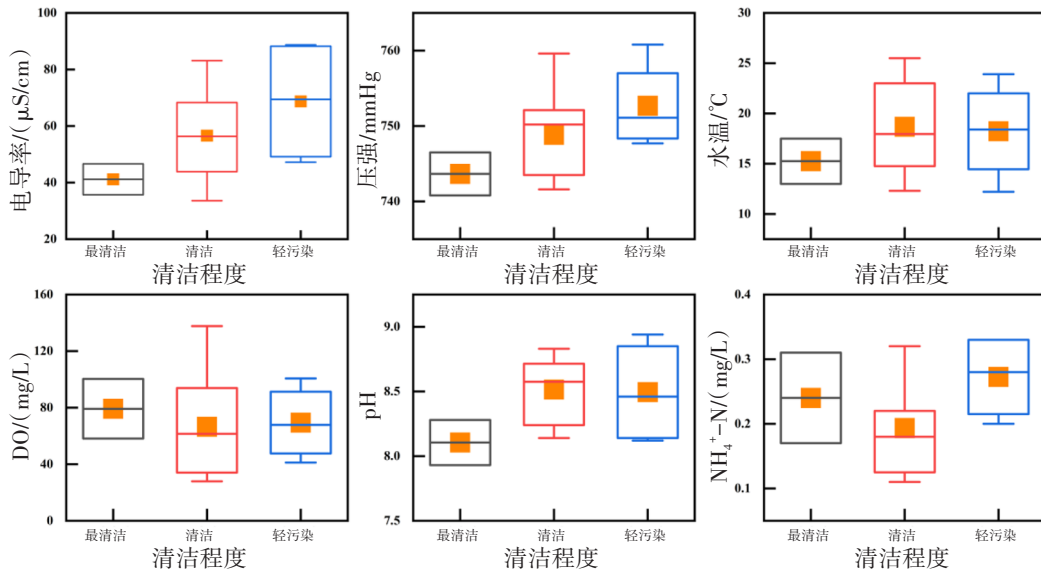


图 7 水质差异性分析

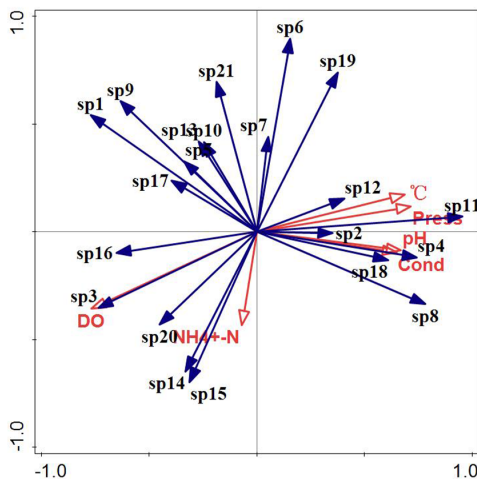


图 8 EPT 与环境因子的 RDA

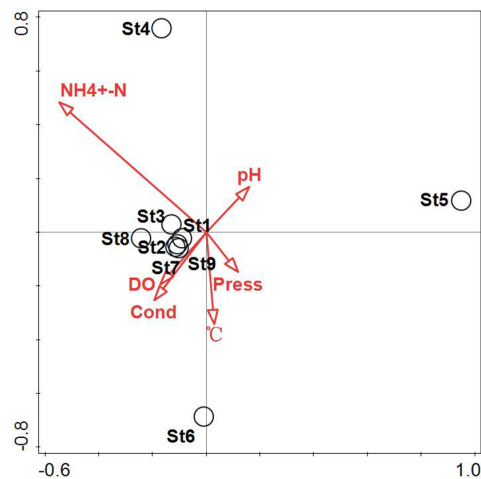


图 9 各样点与环境因子的 RDA

### 2.3 底栖动物群落结构对水质的指示作用

茶山溪水环境分析采用生物指数(BI)和 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )互相参考的评价方式,将各分类单元数据代入对应公式进行计算,得到各样点的指数值,如图 10~11 所示。Shannon-Wiener 多样性指数评价结果显示:St1~St8 采样点水质处于轻污染等级;St9 采样点处于中污染等级。生物指数评价结果

显示:St2 采样点水质为最清洁等级;St1、St3、St5、St6、St7、St9 采样点处于清洁等级;St4、St8 采样点处于轻污染等级。

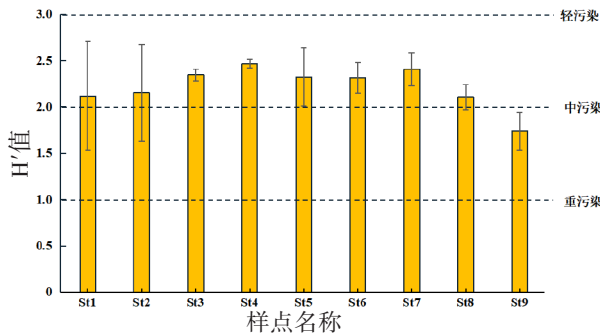


图 10 各样点 Shannon-Wiener 指数

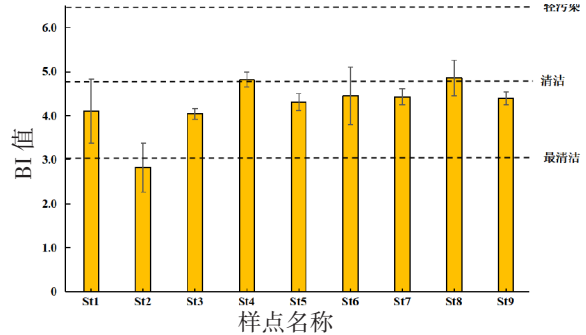


图 11 各样点生物指数

### 3 讨论

茶山溪的底栖动物群落结构丰富,其中昆虫纲占主导地位。摇蚊幼虫是茶山溪水生昆虫中种类最多的类群,共 67 种。根据摇蚊幼虫耐污值的相关评判标准<sup>[6,21]</sup>,茶山溪的摇蚊幼虫敏感种有 44 种,清水种 18 种,中度污染种 2 种,重度污染种 3 种。由此可见,水生态的环境较好。从整体上看,物种去重后,茶山溪中、下游的物种数高于上游。这主要是因为溪流上游至下游逐渐加深,流速放缓,底泥沉积量增加,为底栖动物提供了更舒适的生存空间。在密度和生物量方面,上游水深较浅,流速相对较快,底质多为砾石底,底栖动物的栖息环境较差,导致上游物种平均生物量不高。其中,St9 采样点为溪流起源地,溪流两岸无灌木,外源营养注入少,使其种数远低于其他样点。溪流中游部分两岸农田较多,且缺少生态沟,为底栖动物的食物提供了丰富的氨氮物质,使得中游的底栖动物物种数、密度、生物量都显著增加。特别是 St4 采样点,该样点受干扰因素较多,各项数据均高于大部分样点。但也因人为干扰,外源氨氮注入增多,出现了管水蚓、细蜉、纹沼螺等耐污物种。下游虽溪水变深,流速变缓,但更多的人为干扰却导致底栖动物物种数、生物量、密度相对于中游有所下降;而 St1 采样点因溪流底质为泥沙,为底栖动物提供了钻驻空间,使物种数居所有站点第二。茶山溪底栖动物群落的 Pielou 均匀度指数和 Simpson 多样性指数波动幅度相对较小,表明茶山溪底栖动物群落整体稳定性较高。这可能是由于茶山溪作为重要水源的注入分支溪流,其流域附近化工类型企业少,政府与居民环境的保护意识较强,溪流受到污染小,仅有少量人为因素的影响,如农业种植等。Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数两者变化趋势大体相似,且波动幅度较大,可能原因是物种丰富度的变化引起了多样性的变动。

底栖动物群落结构特征受自然环境影响<sup>[22]</sup>,RDA 相关性分析能准确反映环境因子与底栖动物群落结构之间的复杂关系<sup>[23]</sup>。在 RDA 分析中发现,EPT 昆虫整体与溶氧量呈正相关,其余呈负相关,其中溶氧量对底栖动物的影响最显著。已有研究认为溶解氧(DO)是影响底栖动物群落构建的关键环境变量之一,且对底栖动物物种具有筛选作用,进而影响底栖动物的群落组成<sup>[24]</sup>。在本文中,2 月水中溶氧量高于 5 月,更适合需氧量要求高的物种生存,如蜉蝣等清洁、喜氧种的个体数量较 5 月多,而颤蚓等耐污种的个体数量较 5 月减少,与相关研究相符。pH 值对底栖动物的影响也较为显著,茶山溪平均 pH 值整体偏碱性,能够满足 EPT 昆虫的生态位需求,符合相关研究结果<sup>[25]</sup>。除此之外,EPT 昆虫还受氨氮含量的影响,水生昆虫往往以水底的着生藻、浮游植物、水生植物为食,而氨氮是其食物的主要营养元素。当氨氮含量一定时,会促进水生昆虫的生长,维持其物种的多样性;当氨氮含量过高时,水体富营养化严重,溶解氧含量下降,影响底栖动物中敏感种和耐污种分布<sup>[26-28]</sup>。从各样点与环境因子的 RDA 分析发现,St4、St5、

St6 采样点与其他样点存在显著差异,可能原因是人为干扰导致 St4 水体外源营养物质注入多,但该样点的物种数量并未减少,转而出出现管水蚓、细蜉、纹沼螺等耐污物种,表明中度干扰使物种数增多。St5 采样点受干扰程度虽不如 St4,但在该样点溪流有小型水坝,水底有沉积物,导致 pH 值等相关环境因子发生显著变化,而 St6 采样点两岸灌木较多,溪底有大量落叶。

对茶山溪水质进行评价发现,Shannon-Wiener 多样性指数和生物指数的评价结果有差异,分析差异原因,可能是 Shannon-Wiener 多样性指数忽略了不同环境下物种分布均匀度的变化,而生物指数充分考虑底栖动物的耐污能力和生境多样性,评价结果更为客观<sup>[29]</sup>。因此,评价结果虽不相同但总体变化趋势大致相符,反映出茶山溪水质呈现“清洁-轻污染”状态。依据中度干扰假说,高强度的人为干扰会加速水生生态环境的改变,导致竞争增加,物种减少,生物多样性降低。尽管茶山溪底栖动物生物多样性较好且相对稳定,水质总体较好,但溪流仍受人类活动干扰,导致底栖动物群落结构在部分点位受到干扰,将会出现中度或重度污染。因此,对茶山溪水环境生态管理提出以下建议:(1)合理规划改造活动,避免人为过度干扰;(2)通过多种渠道普及生物多样性保护知识,引导公众关注溪流生态保护;(3)推广绿色农业技术,减少化肥、农药使用量,在农田与溪流间设置缓冲带,防止污染物汇入溪流,进而保护水环境。

#### 参考文献:

- [1]邓平,罗杨志,何弯弯,等. 沉湖底栖动物群落结构及其与表层沉积物营养盐的关系[J]. 环境监控与预警,2025,17(2):15-21.
- [2]田亚男,王帅帅,俞金泉,等. 济南玫瑰湖底栖动物群落结构特征及水质评价[J]. 河南水产,2025(2):30-33.
- [3]毛佳平. 滇中引水工程施工背景河流大型底栖动物多样性时空格局及驱动因素[D]. 西安:西安理工大学,2024.
- [4]张恩楼,唐红渠,张楚明,等. 中国湖泊摇蚊幼虫亚化石[M]. 北京:科学出版社,2019.
- [5]王业耀. 中国流域常见水生生物图集[M]. 北京:科学出版社,2020.
- [6]唐红渠. 中国摇蚊科幼虫生物系统学研究[D]. 天津:南开大学,2006.
- [7]余海军,张钰莹,周晶晶,等. 基于 DNA 条形码的摇蚊亚科部分物种界定[J]. 南开大学学报,2021,54(4):108-112.
- [8]林晓龙. 浙江省摇蚊科区系及生物地理学研究(双翅目:摇蚊科)[D]. 天津:南开大学,2015.
- [9]周长发,归鸿,苏翠荣. 中国蜉蝣概述[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [10]周凤霞,陈剑虹. 淡水微型生物与底栖动物图谱[M].2 版. 北京:化学工业出版社,2011.
- [11]SHADRIN N V, ANUFRIIEVA E V, BELYAKOV V P, et al. Chironomidae larvae in hypersaline waters of the Crimea:diversity, distribution, abundance and production[J].The European Zoological Journal,2017,84(1):61-72.
- [12]CRANSTON P S. Identification guide to genera of aquatic larval Chironomidae(Diptera)of Australia and New Zealand [J].Zootaxa,2019,4706(1):71-102.
- [13]ANDERSEN T, CANSTON P S, EPLER J H. The larvae of Podonominae (Diptera: Chironomidae) of the Holarctic Region-keys and diagnoses[J].Insect Systematics & Evolution,2013,66:2001-4549.
- [14]STUR E, EKREM T. The Chironomidae(Diptera)of Svalbard and Jan Mayen[J].Insects,2020,11(3):183.
- [15]GADAWSKI P, MONTAGNA M, ROSSARO B, et al. DNA barcoding of Chironomidae from the Lake Skadar region: reference library and a comparative analysis of the European fauna[J].Diversity and Distributions,2023,28(12):2838-2857.
- [16]王俊才,王新华. 中国北方摇蚊幼虫[M]. 北京:言实出版社,2011.
- [17]曾鸿滨,董建宇,刘伟豪,等. 北部湾北岸近海大型底栖动物群落结构与生态质量评价[J]. 海洋环境科学,2025,44(1):26-34.
- [18]窦乾明,王慧博,宋聃,等. 呼玛河大型底栖动物群落结构与水质生物评价[J]. 水产学杂志,2023,36(6):52-60.
- [19]曹龙智,韩晓,商书芹,等. 济南市雪野湖湿地公园大型底栖动物多样性调查[J]. 黑龙江水产,2025,44(2):144-149.
- [20]陈晓飞,吴卫菊,胡红娟,等. 孝感城市湖泊大型底栖无脊椎动物及其与环境因子的关系[J]. 环境科学与技术,2023,46(7):40-47.
- [21]姜永伟,王业耀,袁俊斌,等. 辽宁省大型底栖无脊椎动物耐污值修订研究[J]. 中国环境监测,2024,40(5):154-164.

- [22]赵晨辉,王永生,贾胜华,等.汕头东部近岸海域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J].海洋环境科学,2023,42(6):853-863.
- [23]黄鑫,王菲,吴丹,等.白洋淀淀区大型底栖动物群落结构及其对环境因子的响应[J].河北渔业,2023(12):33-40.
- [24]韦丽妮,刘珊,赵建亮,等.不同类型城市受纳河涌大型底栖动物多样性及其对水环境因子的响应[J].生态毒理学报,2025,20(2):92-104.
- [25]赵晨,孙佳伟,尹增强,等.大罗圈沟河水生生物多样性及水质评价[J].大连海洋大学学报,2023,38(3):504-514.
- [26]杨紫薇,董晓健,秦勤.京杭运河镇江段水系大型底栖动物分布多样性与环境因子相关性评价[J].环境生态学,2024,6(6):83-87.
- [27]李艺,何晨翔,胡成业,等.沙埕港大型底栖动物空间分布及其与环境因子之间的关系[J].浙江海洋大学学报(自然科学版),2023,42(4):312-318.
- [28]徐畅,潘继征,李勇,等.太湖西山岛秋季大型底栖动物群落分布格局及其环境影响因子分析[J].苏州科技大学学报(工程技术版),2024,37(3):56-64.
- [29]PAUL M J, JESSUP B, BROWN L R, et al. Characterizing benthic macroinvertebrate and algal biological condition gradient models for California wadeable Streams, USA[J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106618.

## Analysis of the Community Structure and Biodiversity of Benthic Animals in Chashan Stream

Wu Guoqiang<sup>1</sup>, Ge Yong<sup>2</sup>, Gu Yuting<sup>1</sup>, Xu Na<sup>1</sup>, Guo Kexin<sup>1</sup>, Qi Xin<sup>1</sup>

(1. School of Life Sciences, Taizhou University, Taizhou 318000, China;

2. Huangyan Branch, Taizhou Municipal Ecology and Environment Bureau, Taizhou 318020, China)

**Abstract:** Benthic animals are one of the important aquatic biological groups and serve as indicators of aquatic environmental conditions. To investigate the community structure and biodiversity characteristics of benthic animals in Chashan Stream, the research team established nine sampling sites along the stream in February and May 2025 for specimen collection. Water quality was assessed using the BI index and the Shannon-Wiener index. A total of 129 benthic macroinvertebrate species were identified, belonging to 4 phyla, 7 classes, 15 orders, 45 families, and 96 genera. The dominant species included *Parafossarulus striatulus*, *Ecdyonurus yoshidaei*, *Baetis* sp., *Caenis* sp., *Paraleptophlebia* sp., *Hydropsyche* sp., *Thienemannimyia carnea*, *Conchapelopia* sp. and *Helopelopia* sp.. Redundancy analysis (RDA) was applied to examine the correlations between the benthic animals community structure and the relationships between sampling sites and environmental factors. The results indicated that dissolved oxygen and pH value were the main factors influencing the structure of the benthic animal community. Significant differences were observed between the sampling sites St4, St5, and St6 and the other sampling sites. One-way ANOVA of environmental factors under different pollution levels revealed that, except for pressure, all other environmental factors were correlated with the degree of environmental pollution. The BI index evaluation results indicated that the water quality of Chashan Stream was in a "clean-slightly polluted" state. The Shannon-Wiener index was classified under the "slightly polluted-moderately polluted" level. Although the results of the two methods differed, the trend of change was consistent. Based on the evaluation results of the two indicators, the water quality of Chashan Stream is in a "clean-slightly polluted" state.

**Keywords:** Chashan Stream; benthic animals; community structure; environmental factors; water quality assessment

# NEDD8 结合酶 UBE2M 调控疾病进展的研究现状

程 凯, 杨舒涵, 王兴意, 孙东升, 韦俊东, 周丽莎

(台州学院 医学院, 浙江 台州 318000)

**摘要:** NEDD8 结合酶 E2M(UBE2M/UBC12)是一种神经前体细胞表达发育性下调因子 8(NEDD8)结合酶,它能够催化底物蛋白发生类泛素化 Neddylaton 修饰。UBE2M 在多种恶性肿瘤中过度表达,与患者总体生存率呈显著负相关。UBE2M 通过抑制凋亡/衰老或促进增殖,进而加速肿瘤生长。UBE2M 还在炎症、自身免疫性疾病和抗病毒免疫中发挥重要作用。本文重点介绍了 UBE2M 在肿瘤与非肿瘤疾病发生发展中的最新进展,揭示了 NEDD8 结合酶 UBE2M 可能是作为多种疾病治疗的关键靶点。

**关键词:** UBE2M;类泛素化 Neddylaton 修饰;肿瘤;炎症;肥胖;抗病毒免疫

DOI:10.13853/j.cnki.issn.1672-3708.2026.03.006

## 0 引言

类泛素化 Neddylaton 修饰是一种重要的蛋白翻译后修饰方式,即将类泛素小分子 NEDD8 经 NEDD8 活化酶 E1、NEDD8 结合酶 E2 及 NEDD8 连接酶 E3 相继催化共价连接到底物分子的过程,如图 1 所示。Neddylaton 修饰在进化上高度保守,能广泛调控机体发育、炎症免疫、肿瘤发生发展等生物学过程<sup>[1]</sup>。迄今为止,研究最为透彻的 Neddylaton 底物是 Cullin-RING E3 泛素连接酶(CRLs)超家族。CRL 是细胞内最大的多亚基泛素连接酶超家族,由 Cullin(CUL)-环盒蛋白(RBX)形成二聚体作为支架结构,招募底物识别蛋白等亚基组成泛素连接酶复合物,并进一步促进特异性底物发生泛素化修饰<sup>[2]</sup>。在正常情况下,CRL 泛素连接酶通过调节细胞周期、增殖和凋亡等过程维持机体生理功能,但 CRL 功能失调可以促进肿瘤发生,也可导致免疫调节紊乱,加快炎症进展,加剧感染程度<sup>[3-4]</sup>。CRL 泛素连接酶的激活需要 Cullin 亚基发生 Neddylaton 修饰,从而改变 CRL 复合物构象,激活其作为 E3 泛素连接酶的活性,而抑制 CRL 的 Neddylaton 修饰可诱导显著的抗肿瘤等效应<sup>[5]</sup>。

鉴于 Neddylaton 修饰在肿瘤发生发展中的关键作用,国际同行通过高通量筛选发现了 NEDD8 活化酶(NAE, E1)的特异性小分子抑制剂 MLN4924<sup>[6]</sup>。MLN4924 可在体内外显著抑制肿瘤恶性表型,已经进入多种恶性肿瘤的 I/II/III 期临床试验阶段,展示出良好的应用前景。但在研究中发现,肿瘤细胞可通过 NEDD8 活化酶(NAE)亚基 UBA3 的点突变(如 A171T)逃避 MLN4924 的抑制作用。该突变降低了 MLN4924 与 NAE 的结合亲和力,使肿瘤细胞在药物的压力下存活<sup>[7]</sup>。鉴于 MLN4924 有着诱导潜在耐药突变的弊端,迫切需要针对 Neddylaton 修饰通路鉴定新的分子靶标(如 NEDD8, NEDD8 结合酶 E2 或 NEDD8 连接酶 E3),进而探索新的靶向治疗策略。目前研究已揭示的 NEDD8 连接酶 E3 包括调控 CRL 活性的 RBX1/2<sup>[8]</sup>、适配蛋白 Cullin 类泛素化修饰缺陷 1 样蛋白家族(DCNL1-5)<sup>[9]</sup>、底物特异性识别因子

收稿日期:2025-11-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(82073069);国家级大学生创新创业训练计划项目(2024103500015)

作者简介:程 凯(2003—),男,浙江台州人,2022级临床医学专业本科生;周丽莎(通信作者)(1988—),女,浙江台州人,教授,博士,硕士生导师,主要从事肿瘤发生发展的机制研究。

[如 F-box 蛋白 11(FBXO11)<sup>[10]</sup>、c-Casitas B 细胞淋巴瘤(c-CBL)<sup>[11]</sup>、环指蛋白 111(RNF111)<sup>[12]</sup>]、非典型 E3[如鼠双微体 2(MDM2)<sup>[13]</sup>、凋亡抑制蛋白(IAPs)<sup>[14]</sup>及三元基序蛋白 40(TRIM40)<sup>[15]</sup>]等,其功能多样性与组织特异性分布为开发精准治疗策略提供了重要切入点。此外,哺乳动物细胞中存在两个 Neddylaton 结合酶,分别为 UBE2M 和 UBE2F<sup>[16]</sup>。UBE2M 和 UBE2F 通过核心结构域及 N-末端延伸,与 NEDD8 活化酶 NAE1 的泛素折叠区域和 UBA3 的疏水口袋结合<sup>[17]</sup>。UBE2F 和 UBE2M 之间存在明显的差异,它们行使不同的生物学功能。UBE2M 与 RBX1 结合并激活 CUL1-4,促进抑癌蛋白[如肿瘤蛋白 21(p21)、p27、B 细胞淋巴瘤-2 细胞死亡相互作用调节子(Bim)]的降解,导致细胞衰老和凋亡<sup>[18]</sup>。而 UBE2F 则与 RBX2 结合调节 CUL5 的 Neddylaton 修饰,激活 CRL5,引起下游底物[如载脂蛋白 B mRNA 编辑酶催化多肽样蛋白(APOBEC)、希佩尔-林道(VHL)、p53]降解<sup>[18]</sup>。本文重点介绍 UBE2M 在肿瘤与非肿瘤疾病发生发展及治疗中的重要作用。

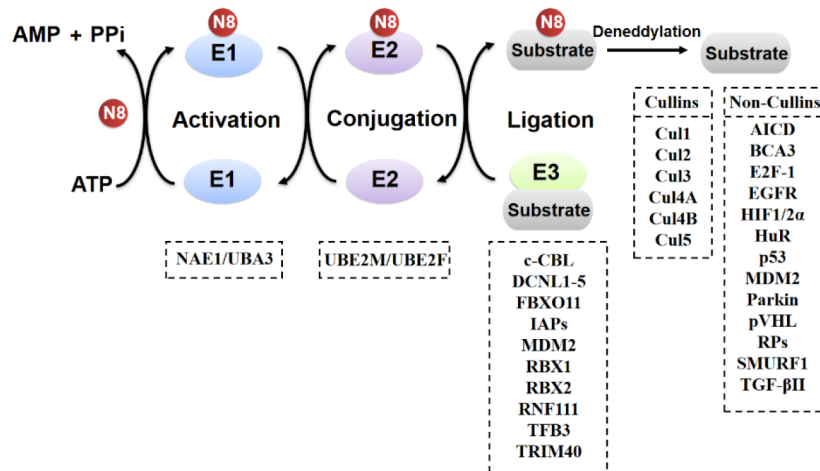
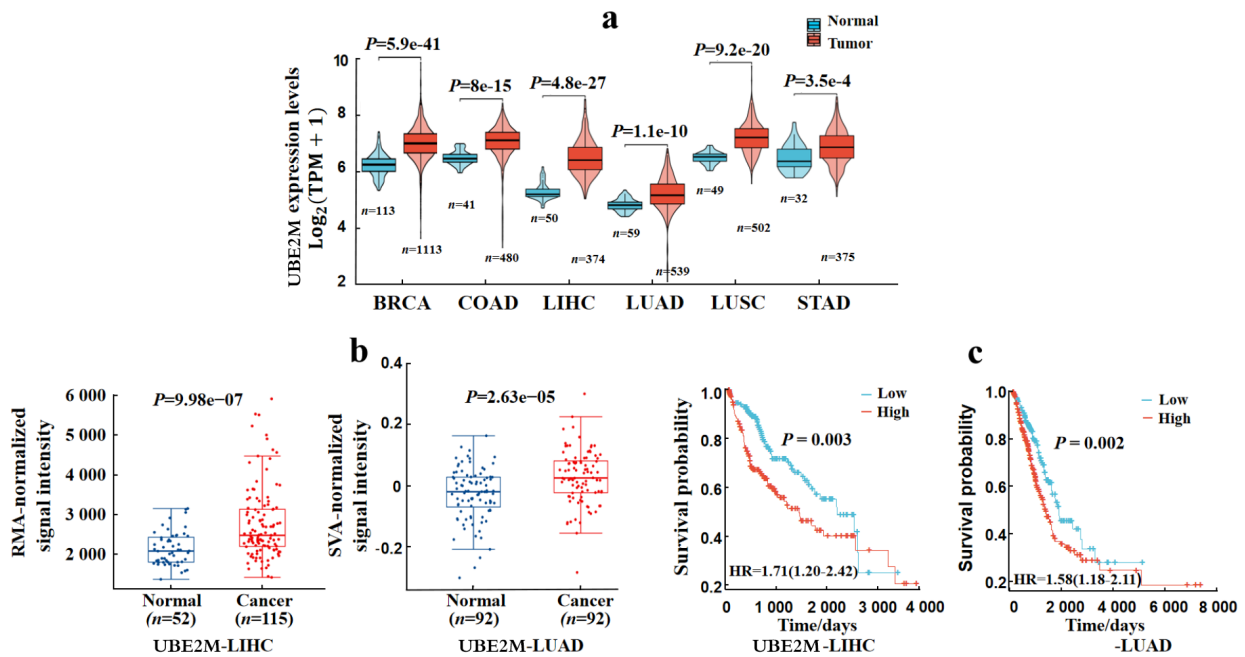


图 1 Neddylaton 修饰过程示意图

## 1 UBE2M 与肿瘤

### 1.1 UBE2M 与肿瘤发生发展

研究表明,UBE2M 在多种肿瘤,包括食管鳞状细胞癌、骨肉瘤、肺癌及肝细胞癌中表达上调。为进一步探索 UBE2M 在肿瘤中的表达和预后意义,研究团队借助癌症基因组图谱(TCGA)数据库分析 UBE2M 在肿瘤中的表达情况。与正常组织相比,UBE2M 的 mRNA 表达在乳腺癌(BRCA)、结肠腺癌(COAD)、肝细胞癌(LIHC)、肺腺癌(LUAD)、肺鳞癌(LUSC)及胃癌(STAD)等多种肿瘤中显著升高(除胃癌采用独立样本 *t* 检验外,其余均采用 Wilcoxon 秩和检验),如图 2(a)所示。基因表达综合(GEO)数据库分析显示,UBE2M 的 mRNA 表达在肝细胞癌(LIHC)和肺腺癌(LUAD)中显著升高(LIHC 数据集为 GSE76427, LUAD 数据集为 GSE46539,采用 Wilcoxon 秩和检验),如图 2(b)所示。Kaplan-Meier 分析显示,高表达 UBE2M 的肝细胞癌(LIHC)或肺腺癌(LUAD)患者总体生存率更低,提示与预后不良密切相关,如图 2(c)所示。这些研究表明,UBE2M 过度活化可能是肿瘤发生发展过程中的促进因素。与 NEDD8 活化酶 E1 (NAE1/UBA3)相比,UBE2M 表达与蛋白质 Neddylaton 修饰水平的变化能保持更好的协同性<sup>[19]</sup>。靶向 UBE2M 可抑制 Cullin 蛋白 Neddylaton 修饰并诱导 CRL 底物积聚,从而抑制 MLN4924 耐药细胞的生长<sup>[19]</sup>。此外,UBE2M 介导的 Neddylaton 修饰调控多种细胞应答,例如 DNA 损伤反应、细胞凋亡、细胞衰老和抗肿瘤免疫。



说明:a.TCGA 数据库分析显示 UBE2M 在多种肿瘤中显著高表达;b.GEO 数据库分析显示 UBE2M 在肝细胞癌(LIHC)和肺腺癌(LUAD)中显著高表达;c. 高表达 UBE2M 的肝细胞癌(LIHC)或肺腺癌(LUAD)患者总体生存率更低。

图 2 UBE2M 在不同癌症中的表达及对疾病发生的影响

细胞凋亡和衰老会引起细胞形态的改变并且涉及一系列基因的激活、表达及调控,UBE2M 调控细胞凋亡或衰老,进而抑制肿瘤发生发展。在结直肠癌细胞中,敲低 UBE2M 可抑制 Wnt/ $\beta$ -catenin 信号转导通路促进细胞凋亡<sup>[20]</sup>。在肝内胆管癌细胞中,敲低 UBE2M 会导致细胞形态收缩、剪切态多腺苷二磷酸核糖聚合酶(cleaved-PARP)和剪切态半胱天冬氨酸蛋白酶 3/9(cleaved-caspase-3/9)上调,诱导细胞凋亡。在肝癌细胞中,敲低 UBE2M 会诱导 cleaved-PARP 和 cleaved-caspase-3 积聚并使细胞凋亡相关蛋白[包括 p53、p53 上调凋亡调控因子(PUMA)、Bcl2 相关 X 蛋白(Bax)]的 mRNA 水平升高,促进细胞凋亡<sup>[21]</sup>。在食管鳞状细胞癌中,敲低 UBE2M 后膜联蛋白 V(Annexin V)阳性细胞数量显著增加<sup>[22]</sup>。在机制上,敲低 UBE2M 会诱导转录激活因子 4(ATF4)积聚,激活死亡受体 5(DR5)介导的外源性细胞凋亡和促凋亡蛋白 NAPDH 氧化酶激活因子(NOXA)介导的内源性细胞凋亡<sup>[22-23]</sup>。

相关研究报告显示:UBE2M 通过调节细胞周期可影响肿瘤细胞衰老的进程。在肺癌和食管鳞状细胞癌细胞中,敲低 UBE2M 可抑制 Cullin 蛋白 Neddylaton 修饰,降低 CRL 连接酶活性使 CRL 底物[包括 p21、p27、Wee1 G2 检查点激酶(Wee1)]积聚,从而触发 G2 期细胞周期阻滞;在肝癌细胞中,UBE2M 可以稳定  $\beta$ -catenin,进而导致细胞周期蛋白 Cyclin D1 上调,促进细胞 G1/S 期转换<sup>[19,22,24]</sup>。这些数据表明,抑制 UBE2M 可能通过多种机制,以细胞类型依赖性方式在不同阶段诱导细胞周期阻滞,促进细胞衰老,如图 3 所示。综上,靶向 UBE2M 可诱导细胞凋亡或衰老,是潜在的抗肿瘤靶点。

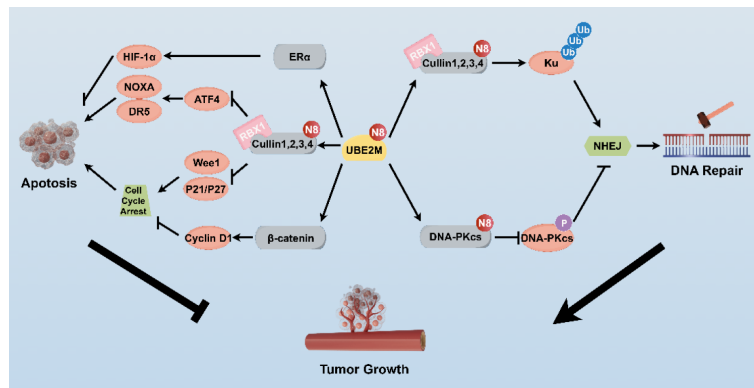


图 3 UBE2M 在肿瘤生长中的作用机制

## 1.2 UBE2M与肿瘤治疗

鉴于 UBE2M 在肿瘤发生发展中的重要作用,越来越多的研究表明靶向 UBE2M 可以显著抑制肿瘤生长并且增强肿瘤细胞的放、化疗敏感性。在雌激素受体(ER)阳性乳腺癌中,UBE2M 和 ER $\alpha$  形成正反馈回路驱动乳腺癌的进展和耐药性。机制上,ER $\alpha$  增强缺氧诱导因子-1 $\alpha$ (HIF-1 $\alpha$ )介导的 UBE2M 转录,UBE2M 反过来通过调节 ER $\alpha$  泛素化降解来维持其蛋白水平。UBE2M 沉默通过诱导细胞周期停滞和细胞凋亡来抑制乳腺癌细胞的生长,从而使乳腺癌细胞在体外和体内对氟维司群治疗更敏感<sup>[25]</sup>。此外,UBE2M 沉默还可增加膀胱癌细胞对吉西他滨(Gemcitabine)的敏感性<sup>[26]</sup>,增加卵巢癌细胞对紫杉醇(PTX)的敏感性<sup>[27]</sup>,以及诱导胃癌细胞对化疗的敏感性<sup>[28]</sup>。

除化疗增敏外,UBE2M 沉默还可通过干扰 DNA 损伤修复增强放疗敏感性。放疗诱导的 DNA 双链断裂(DSB)主要通过非同源末端连接(NHEJ)修复,而 UBE2M 介导的 Cullin 蛋白 Neddylaton 修饰可驱动 Ku70/80 蛋白泛素化,促进含缬酪肽蛋白(VCP)/p97 依赖的 Ku-DNA 复合物解离,从而保障 NHEJ 核心复合物的动态循环<sup>[29]</sup>。UBE2M 缺失或 Neddylaton 抑制剂 MLN4924 处理会引发 Ku 蛋白在损伤位点滞留,阻断修复进程。此外,UBE2M 与含 HECT、UBA 和 WWE 结构域的 E3 泛素蛋白连接酶 1(HUWE1)协同催化 DNA 依赖性蛋白激酶催化亚基(DNA-PKcs)结构域的 Neddylaton 修饰,通过构象变化促进其自身磷酸化及 NHEJ 通路激活。前列腺癌细胞中 UBE2M 敲低可显著抑制 DNA-PKcs 磷酸化并降低 NHEJ 修复效率,最终增强电离辐射诱导的细胞杀伤效应<sup>[30]</sup>。

## 1.3 UBE2M与肿瘤免疫

靶向程序性死亡受体 1(PD-1)/程序性细胞死亡配体 1(PD-L1)的免疫检查点阻断疗法在肿瘤治疗中具有重要地位。近期研究显示,UBE2M 介导的 Neddylaton 修饰通过多重机制调控 PD-L1 表达,构成肿瘤免疫逃逸的关键调控枢纽,如图 4 所示。其作用机制呈现三重调控路径:(1)在转录调控层面,抑制 CUL1 的 Neddylaton 修饰(通过 MLN4924 干预或 UBE2M 基因敲低)可显著削弱 CUL1-F-box 和 WD 重复结构域 7(FBXW7)E3 连接酶复合物的催化活性,导致原癌蛋白骨髓细胞瘤病毒癌基因同源物(c-MYC)泛素化降解受阻,引发 c-MYC 蛋白在胞内异常蓄积。积累的 c-MYC 通过直接结合 PD-L1 基因启动子区域,形成转录激活复合体,系统性上调 PD-L1 的 mRNA 表达水平<sup>[31]</sup>。(2)在信号转导层面,MLN4924 干预可特异性激活丝裂原活化蛋白激酶(MAPK)信号通路中的细胞外调节激酶(ERK)/应激活化蛋白激酶(JNK)双轴,诱导激活蛋白-1(AP-1)转录因子磷酸化。活化的 AP-1 直接锚定于 PD-L1 基因启动子区域,显著增强 PD-L1 的转录效率<sup>[32]</sup>。(3)在蛋白稳态层面,抑制 CUL3 的 Neddylaton 修饰同样导致 CUL3-斑点型锌指结构蛋白(SPOP)E3 连接酶复合物失活,进而阻断 PD-L1 的泛素化蛋白酶体降解,延长 PD-L1 的蛋白半衰期。这种蛋白稳定性提升通过抑制细胞毒性 T 淋巴细胞的浸润和杀伤功能,形成免疫抑制性肿瘤微环境<sup>[33]</sup>。值得注意的是,虽然 Neddylaton 通路抑制剂可通过诱导肿瘤细胞周期阻滞和凋亡发挥直接细胞杀伤作用,但其单药治疗可能通过上述机制诱发 PD-L1

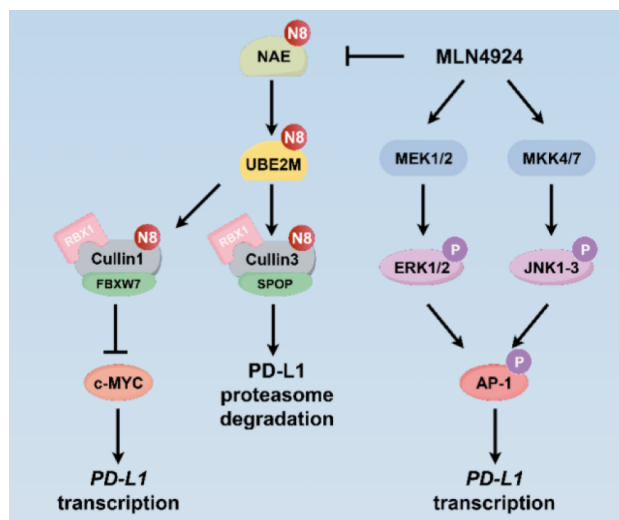


图 4 抗肿瘤免疫机制图

表达补偿性上调,形成“促癌—抑癌”的矛盾效应。临床前研究证实,MLN4924与PD-L1抗体联合治疗方案可产生协同效应:在胶质母细胞瘤原位移植模型和Kirsten大鼠肉瘤病毒癌基因同源物(*KRAS*)突变肺癌模型中,该组合疗法通过恢复T细胞浸润和重建免疫监视功能,协同抑制肿瘤生长<sup>[31-32]</sup>。这种协同效应为突破Neddylaton抑制剂的临床转化瓶颈提供了创新范式,特别适用于对单一免疫检查点阻断治疗响应不佳的“冷肿瘤”类型。

#### 1.4 靶向UBE2M的新型抗肿瘤抑制剂

靶向UBE2M进而阻断Neddylaton修饰是一种重要的抗肿瘤治疗方法。在胃癌细胞中,小分子抑制剂WS-299通过靶向RBX1-UBE2M复合物抑制CUL3和CUL5的Neddylaton修饰,导致下游底物NOXA和核因子-红细胞2相关因子2(NRF2)积累,抑制胃癌细胞生长<sup>[34]</sup>。在肺癌细胞中,中草药牛蒡子中的有效成分牛蒡子苷元(Arctigenin)被证实能够抑制UBE2M活性,抑制Cullin蛋白的Neddylaton修饰,特别是Cullin1、Cullin3和Cullin4,导致下游底物程序性细胞死亡受体4(PDCD4)积聚,抑制肺癌细胞生长、侵袭和转化<sup>[35]</sup>。此外,抗真菌药米卡芬净(Micafungin)能够靶向UBE2M,抑制Cullin蛋白Neddylaton修饰并诱导CRL底物积聚,抑制细胞迁移,降低存活率和诱导胃癌细胞DNA损伤<sup>[36]</sup>。DCN1是一种能够同时结合UBE2M和Cullin蛋白并稳定CRL E3连接酶复合物催化中心的亚基<sup>[37]</sup>。目前还发现多种可以克服MLN4924耐药并靶向UBE2M-DCN1相互作用的新型小分子抑制剂,例如SK-464<sup>[38]</sup>、DC-2<sup>[39]</sup>、化合物67(compound 67)<sup>[40]</sup>等,如表1所示。这些抑制剂可有效阻断UBE2M介导的Neddylaton修饰,进而抑制肿瘤发生发展。但UBE2M-DCN1抑制剂尚未进入临床试验,其特异性和效力有待进一步提高。

表1 靶向UBE2M的新型小分子抑制剂

研究提出者	抑制剂	作用机制	作用效果
Ma等 <sup>[34]</sup>	WS-299	靶向RBX1-UBE2M复合抑制CUL3&5泛素化降解导致NOXA和NRF2积累	诱导胃癌细胞周期阻滞在G2/M期
Chen等 <sup>[35]</sup>	牛蒡子苷元(Arctigenin)	靶向UBE2M抑制Cullin泛素化降解导致PDCD4积累	抑制肺癌细胞生长、侵袭和转化
Mamun等 <sup>[36]</sup>	米卡芬净(Micafungin)	靶向UBE2M抑制Cullin泛素化降解导致CRL底物积累	诱导胃癌细胞周期阻滞在G2/M期
Zhou等 <sup>[38]</sup>	SK-464	靶向DCN1-UBE2M抑制CUL3泛素化降解导致NRF2积累	抑制肺癌和食管鳞癌细胞生长、侵袭和转化
Zhou等 <sup>[39]</sup>	DC-2	同SK-464	抑制肺癌细胞增殖
Hammill等 <sup>[40]</sup>	化合物67 (compound 67)	同SK-464	抑制肺癌细胞增殖

## 2 UBE2M与非肿瘤疾病

### 2.1 UBE2M与免疫性疾病

系统性红斑狼疮(SLE)是一种累及多系统的复杂自身免疫性疾病,它首先导致先天免疫和适应性免疫的激活,从而导致T细胞激活自身反应性B细胞,使免疫复合物在组织中沉积,引起自身免疫级联反应,累及单个或全身器官。相关研究表明Neddylaton修饰对T细胞的调节至关重要。最新研究提出:在系

统性红斑狼疮(MRL/lpr)小鼠模型中,Cullin1 蛋白 Neddylaton 水平和 UBE2M 的表达显著提高;敲除 UBE2M 的系统性红斑狼疮小鼠中血清 IgG 和抗 dsDNA 抗体水平下降以及双阴性(DN)T 细胞数量减少。该研究还发现启动凋亡途径的 Bim 蛋白是 Cullin1 蛋白的下游底物。在系统性红斑狼疮小鼠中,敲除 Bim 会反转 UBE2M 敲除导致的 SLE 小鼠表型的减轻。总之,敲除 UBE2M 能够降低 Cullin1 蛋白 Neddylaton 修饰水平,抑制 Bim 泛素化降解,促进双阴性(DN)T 细胞凋亡,维持 SLE 患者免疫耐受。UBE2M 作为 Neddylaton 通路中的关键蛋白,可能是治疗 SLE 的关键靶点<sup>[41]</sup>。

长散布元件-1(L1)是机体内唯一可以自主发生逆转录的转座子,其活性异常可引起插入突变和染色体重排,与 Aicardi-Goutières 综合征(AGS)、范科尼贫血(FA)和皮炎(DM)等免疫性疾病的发生发展有关。最新研究显示,Neddylaton 修饰对 L1 转位发挥着关键作用,敲低 UBE2M 能够显著抑制 L1 转位及 L1 合成,抑制炎症和自身免疫性疾病进展<sup>[42]</sup>。

调节性 T 细胞(Treg)是 CD4<sup>+</sup>T 淋巴细胞的抑制性亚群,Treg 细胞耗竭引起早发性致死性炎症可见其对免疫稳态的重要性。研究表明,UBE2M 在 Treg 细胞的调节中发挥重要作用,敲除 UBE2M 会引起小鼠严重的自身免疫性炎症表型并伴有早发死亡。

基质金属蛋白酶-13(MMP-13)是参与软骨降解的主要基质金属酶,与骨关节炎(OA)高度相关。UBE2M 不仅能促进 MMP-13 过表达使细胞外基质过度降解,还能促进轴蛋白(Axin)泛素化降解,进而激活 Wnt/ $\beta$ -catenin 信号通路,加速骨关节炎进展<sup>[43]</sup>。

## 2.2 UBE2M 与肥胖

最新研究发现,相较于正常饮食小鼠,高脂饮食小鼠体内巨噬细胞的 UBE2M 表达显著上调。巨噬细胞特异性敲除 UBE2M 可减缓高脂饮食诱导的小鼠体重增速、增强葡萄糖代谢能力并改善胰岛素抵抗。该作用与脂肪酸代谢重编程相关,UBE2M 缺失可下调脂肪合成关键基因(如 *Fasn*, *Srebp1c*, *Pparg*),同时上调脂肪酸氧化(FAO)通路基因(如 *Hadha*, *Acadvl*, *Acadm*)。机制研究表明:UBE2M 可与 TRIM21 直接结合;UBE2M 沉默可降低 TRIM21 的 Neddylaton 修饰水平,抑制其泛素连接酶活性,导致 VHL 蛋白因泛素化降解受阻而累积。VHL 的稳定促进 HIF-1 $\alpha$  降解,从而减少白细胞介素-1 $\beta$ (IL-1 $\beta$ )生成,缓解巨噬细胞促炎极化,同时通过增强 FAO 通路活性及胰岛素受体底物 1(IRS-1)表达改善代谢稳态。基于此机制,研究团队利用装载 TRIM21 反义寡核苷酸的红细胞胞外囊泡靶向干预肝/脂肪巨噬细胞,成功抑制 IL-1 $\beta$  相关炎症并逆转代谢异常<sup>[44]</sup>。然而,UBE2M-TRIM21 互作模式是否保留、Neddylaton 关键修饰位点是否存在种属特异性,以及临床肥胖人群该通路激活程度与 IL-1 $\beta$  水平的相关性等问题,亟待通过人源巨噬细胞模型和临床队列研究进一步阐明。

## 2.3 UBE2M 与抗病毒免疫

研究表明,UBE2M 可以增强针对 RNA 病毒的先天免疫反应。有研究发现,髓系特异性敲低 UBE2M 的小鼠表现出对水疱性口炎病毒(VSV)和甲型流感病毒(H1N1)更加易感。体外实验进一步表明,感染 RNA 病毒的 UBE2M 缺陷型巨噬细胞以维 A 酸诱导基因 I(RIG-I)依赖的方式减少 I 型干扰素(IFN-I)表达,导致病毒感染加重。机制上,UBE2M 通过抑制 E3 连接酶 STIP1 同源性和包含 U 盒的蛋白 1(STUB1)介导的 RIG-I 泛素化修饰,阻断其蛋白酶体降解途径,从而维持 RIG-I 蛋白水平,增强抗 RNA 病毒免疫应答<sup>[45]</sup>。

UBE2M 在抗 DNA 病毒先天免疫中发挥关键调控作用。研究表明,在髓系特异性敲低 UBE2M 的小鼠模型中,I 型单纯疱疹病毒(HSV-1)感染后,其在肺、肝、脾组织中 IFN- $\beta$  及 C-X-C 基序趋化因子配体 10

(CXCL10)的表达显著受损,同时肺部炎症细胞异常浸润加剧,提示先天免疫应答缺陷。在机制上,UBE2M通过介导环鸟苷酸-腺苷酸合成酶(cGAS)的 Neddylation 修饰,促进 cGAS 与病毒 DNA 结合并形成功能二聚体,从而增强 cGAS-STING 信号通路,最终限制 DNA 病毒感染的扩散。该研究揭示了 UBE2M 通过调控 DNA 感受器的 Neddylation 修饰状态,进而促进抗病毒免疫应答的重要机制<sup>[12]</sup>。

靶向干扰病毒蛋白降解 p53 是一种抗病毒免疫的可行策略。有研究表明,腺病毒癌蛋白 E4orf6 能够诱导 Cullin5 的核输入,促进核底物 p53 连接到 E4orf6-CRL5 E3 连接酶复合物上,促进 p53 泛素化降解。敲低 UBE2M 能够抑制腺病毒癌蛋白 E4orf6 介导的 Cullin5 蛋白的 Neddylation 修饰,抑制 p53 降解。因此,可以推测 UBE2M 是开发人类腺病毒疫苗或抗腺病毒药物的重要靶点<sup>[46]</sup>。

### 3 结语

UBE2M 作为一种关键的酶,在 Neddylation 修饰通路中发挥着重要作用,而靶向抑制 Neddylation 通路过度激活的策略(如抑制 UBE2M 的功能),不仅能用于抗肿瘤治疗,还在抗炎和抗病毒研究中展现出潜力。在肿瘤细胞中,UBE2M 的过度表达与细胞的快速增殖及患者的不良预后密切相关,这凸显了 UBE2M 在肿瘤发生和发展中的关键作用,它能够通过多种细胞反应(如细胞衰老和细胞凋亡)来影响肿瘤的生长。尽管已有研究表明 UBE2M 在肿瘤生长中的重要作用,但其在肿瘤免疫中的具体作用机制仍需进一步实验研究。此外,UBE2M 在非肿瘤疾病的治疗中也扮演着重要角色,包括炎症、自身免疫性疾病及抗病毒免疫等方面。综上,UBE2M 在多系统疾病中的调控作用已得到初步验证,也进一步证明了它将是一个具有广泛应用前景的治疗靶点。

#### 参考文献:

- [1]ZHOU L S,JIANG Y Y,LUO Q,et al. Neddylation:a novel modulator of the tumor microenvironment[J].Mol Cancer,2019,18(1):77.
- [2]WANG K K,DESHAIES R J,LIU X. Assembly and regulation of CRL ubiquitin ligases[J].Adv Exp Med Biol,2020,1217:33-46.
- [3]ZHANG X Y,LIU Y E,ZHANG T,et al.Advances in the potential roles of Cullin-RING ligases in regulating autoimmune diseases[J].Front Immunol,2023,14:1125224.
- [4]ENCHEV R I,SCHULMAN B A,PETER M. Protein Neddylation:beyond cullin-RING ligases[J].Nat Rev Mol Cell Biol,2015,16(1):30-44.
- [5]SAKATA E,YAMAGUCHI Y,MIYAUCHI Y,et al. Direct interactions between NEDD8 and ubiquitin E2 conjugating enzymes upregulate cullin-based E3 ligase activity[J].Nat Struct Mol Biol,2007,14(2):167-168.
- [6]SOUCY T A,SMITH P G,MILHOLLEN M A,et al. An inhibitor of NEDD8-activating enzyme as a new approach to treat cancer[J].Nature,2009,458(7239):732-736.
- [7]TOTH J I,YANG L,DAHL R,et al. A gatekeeper residue for NEDD8-activating enzyme inhibition by MLN4924[J].Cell Rep,2012,1(4):309-316.
- [8]ZHOU L S,LIN X Z,ZHU J,et al. NEDD8-conjugating enzyme E2s: critical targets for cancer therapy[J].Cell Death Discov,2023,9(1):23.
- [9]MONDA J K,SCOTT D C,MILLER D J,et al. Structural conservation of distinctive N-terminal acetylation-dependent interactions across a family of mammalian NEDD8 ligation enzymes[J].Structure,2013,21(1):42-53.
- [10]ZHANG H,XIA P,YANG Z S,et al. Cullin-associated and Neddylation-dissociated 1 regulate reprogramming of lipid metabolism through SKP1-Cullin-1-F-box (FBXO11)-mediated heterogeneous nuclear ribonucleoprotein A2/B1 ubiquitination and promote hepatocellular carcinoma[J].Clin Transl Med,2023,13(10):e1443.

- [11] LEE G W, PARK J B, PARK S Y, et al. The E3 Ligase C-CBL inhibits cancer cell migration by neddylation of the proto-oncogene c-Src[J]. *Oncogene*, 2018, 37(41): 5552–5568.
- [12] LI C H, ZHANG L L, QIAN D, et al. RNF111-facilitated Neddylation potentiates cGAS-mediated antiviral innate immune response[J]. *PLoS Pathog*, 2021, 17(3): e1009401.
- [13] XIONG X F, CUI D R, BI Y L, et al. Neddylation modification of ribosomal protein RPS27L or RPS27 by MDM2 or NEDP1 regulates cancer cell survival[J]. *FASEB J*, 2020, 34(10): 13419–13429.
- [14] BROEMER M, TENEV T, RIGBOLT K T, et al. Systematic in vivo RNAi analysis identifies IAPs as NEDD8-E3 ligases[J]. *Mol Cell*, 2010, 40(5): 810–822.
- [15] ZHAO C Y, JIA M T, SONG H, et al. The E3 Ubiquitin Ligase TRIM40 attenuates antiviral immune responses by targeting MDA5 and RIG-I[J]. *Cell Rep*, 2017, 21(6): 1613–1623.
- [16] ZHAO Y C, MORGAN M A, SUN Y. Targeting Neddylation pathways to inactivate cullin-RING ligases for anticancer therapy[J]. *Antioxid Redox Signal*, 2014, 21(17): 2383–2400.
- [17] HUANG D T, MILLER D W, MATHEW R, et al. A unique E1-E2 interaction required for optimal conjugation of the ubiquitin-like protein NEDD8[J]. *Nat Struct Mol Biol*, 2004, 11(10): 927–935.
- [18] HUANG D T, AYRAULT O, HUNT H W, et al. E2-RING expansion of the NEDD8 cascade confers specificity to cullin modification[J]. *Mol Cell*, 2009, 33(4): 483–495.
- [19] LI L H, KANG J H, ZHANG W J, et al. Validation of NEDD8-conjugating enzyme UBC12 as a new therapeutic target in lung cancer[J]. *EBioMedicine*, 2019, 45: 81–91.
- [20] XU J M, LÜ G Q, XU B H, et al. Overexpression of UBE2M through Wnt/beta-Catenin signaling is associated with poor prognosis and chemotherapy resistance in colorectal cancer[J]. *Transl Cancer Res*, 2020, 9(9): 5614–5625.
- [21] KIM J H, JUNG J H, LEE H J, et al. UBE2M drives hepatocellular cancer progression as a p53 negative regulator by binding to MDM2 and ribosomal protein L11[J]. *Cancers*, 2021, 13(19): 4901.
- [22] WANG S W, XIAN J R, LI L H, et al. NEDD8-conjugating enzyme UBC12 as a novel therapeutic target in esophageal squamous cell carcinoma[J]. *Signal Transduct Target Ther*, 2020, 5(1): 123.
- [23] LIU X J, JIANG Y N, WU J F, et al. NEDD8-activating enzyme inhibitor, MLN4924 (Pevonedistat) induces NOXA-dependent apoptosis through up-regulation of ATF-4[J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2017, 488(1): 1–5.
- [24] ZHANG G C, YU X N, SUN J L, et al. UBE2M promotes cell proliferation via the beta-catenin/cyclin D1 signaling in hepatocellular carcinoma[J]. *Aging*, 2020, 12(3): 2373–2392.
- [25] LIN X Z, SUN D S, YANG S H, et al. UBE2M forms a positive feedback loop with estrogen receptor to drive breast cancer progression and drug resistance[J]. *Cell Death Dis*, 2024, 15(8): 590.
- [26] HUANG A M, KAO Y T, TOH S, et al. UBE2M-mediated p27 (Kip1) degradation in gemcitabine cytotoxicity[J]. *Biochem Pharmacol*, 2011, 82(1): 35–42.
- [27] HONG X L, LI S Y, LI W Y, et al. Disruption of protein Neddylation with MLN4924 attenuates paclitaxel-induced apoptosis and microtubule polymerization in ovarian cancer cells[J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2019, 508(3): 986–990.
- [28] GUO Y J, PANG J R, ZHANG Y, et al. Neddylation-dependent LSD1 destabilization inhibits the stemness and chemoresistance of gastric cancer[J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 254(3): 126801.
- [29] BROWN J S, LUKASHCHUK N, SCZANIECKA-CLIFT M, et al. Neddylation promotes ubiquitylation and release of Ku from DNA-damage sites[J]. *Cell Rep*, 2015, 11(5): 704–714.
- [30] GUO Z P, WANG S Z, XIE Y, et al. HUWE1-dependent DNA-PKcs Neddylation modulates its autophosphorylation in DNA damage response[J]. *Cell Death Dis*, 2020, 11(5): 400.
- [31] ZHOU S L, ZHAO X Y, YANG Z, et al. Neddylation inhibition upregulates PD-L1 expression and enhances the efficacy of immune checkpoint blockade in glioblastoma[J]. *Int J Cancer*, 2019, 145(3): 763–774.
- [32] ZHANG S Z, YOU X H, XU T T, et al. PD-L1 induction via the MEK-JNK-AP1 axis by a Neddylation inhibitor promotes cancer-associated immunosuppression[J]. *Cell Death Dis*, 2022, 13(10): 844.
- [33] ZHANG J F, BU X, WANG H Z, et al. Cyclin D-CDK4 kinase destabilizes PD-L1 via cullin 3-SPOP to control cancer immune surveillance[J]. *Nature*, 2018, 553(7686): 91–95.

- [34] MA T, SONG Q Q, CHENG B, et al. Proapoptotic effect of WS-299 induced by NOXA accumulation and NRF2-counterbalanced oxidative stress damage through targeting RBX1-UBE2M interaction in gastric cancers [J]. *Bioorg Chem*, 2024, 144: 107142.
- [35] CHEN Y F, LIU R Z, YING W W, et al. Arctigenin impairs UBC12 enzyme activity and cullin Neddylolation to attenuate cancer cells [J]. *Acta Pharmacol Sin*, 2023, 44(3): 661-669.
- [36] MAMUN M A A, LIU S, ZHAO L J, et al. Micalofungin: a promising inhibitor of UBE2M in cancer cell growth suppression [J]. *Eur J Med Chem*, 2023, 260: 115732.
- [37] HUO J L, FU W J, FENG Q, et al. Blockade of Neddylolation through targeted inhibition of DCN1 alleviates renal fibrosis [J]. *Clin Sci*, 2025, 139(3): 229-246.
- [38] ZHOU W J, XU C H, DONG G J, et al. Development of phenyltriazole thiol-based derivatives as highly potent inhibitors of DCN1-UBC12 interaction [J]. *Eur J Med Chem*, 2021, 217: 113326.
- [39] ZHOU W J, MA L Y, DING L N, et al. Potent 5-cyano-6-phenyl-pyrimidin-based derivatives targeting DCN1-UBE2M interaction [J]. *J Med Chem*, 2019, 62(11): 5382-5403.
- [40] HAMMILL J T, BHASIN D, SCOTT D C, et al. Discovery of an orally bioavailable inhibitor of defective in cullin Neddylolation 1 (DCN1)-mediated cullin Neddylolation [J]. *J Med Chem*, 2018, 61(7): 2694-2706.
- [41] ZHANG Y, DU L J, WANG C X, et al. Neddylolation is a novel therapeutic target for lupus by regulating double negative T cell homeostasis [J]. *Signal Transduct Target Ther*, 2024, 9(1): 18.
- [42] LI Y, SHEN S Y, GUO H R, et al. Pharmacological inhibition of Neddylolation impairs long interspersed element 1 retrotransposition [J]. *Cell Rep*, 2024, 43(2): 113749.
- [43] BA C, NI X H, YU J L, et al. Ubiquitin conjugating enzyme E2 M promotes apoptosis in osteoarthritis chondrocytes via Wnt/beta-catenin signaling [J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2020, 529(4): 970-976.
- [44] LU X L, KONG X H, WU H, et al. UBE2M-mediated Neddylolation of TRIM21 regulates obesity-induced inflammation and metabolic disorders [J]. *Cell Metab*, 2023, 35(8): 1390-1405.
- [45] KONG X H, LU X L, WANG S B, et al. Type I interferon/STAT1 signaling regulates UBE2M-mediated antiviral innate immunity in a negative feedback manner [J]. *Cell Rep*, 2023, 42(1): 112002.
- [46] GUO H R, SHEN S Y, LI Y, et al. Adenovirus oncoprotein E4orf6 triggers Cullin5 Neddylolation to activate the CLR5 E3 ligase for p53 degradation [J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2019, 516(4): 1242-1247.

## Research Status of NEDD8-Conjugating Enzyme UBE2M Regulating Disease Progression

Cheng Kai, Yang Shuhan, Wang Xingyi, Sun Dongsheng, Wei Jundong, Zhou Lisha

(School of Medicine, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

**Abstract:** UBE2M or UBC12 is a neural precursor cell-expressed developmentally downregulated 8 (NEDD8) conjugating enzyme, which can catalyze the Neddylolation modification of substrate proteins. UBE2M is overexpressed in a variety of malignant tumors and is significantly negatively correlated with the overall survival rate of patients. UBE2M accelerates tumor growth by inhibiting apoptosis/senescence or promoting proliferation. UBE2M also plays an important role in inflammation, autoimmune diseases, and antiviral immunity. This review focuses on the latest progress of UBE2M in the occurrence and development of tumor and non-tumor diseases, suggesting that the NEDD8-conjugating enzyme UBE2M may be a key therapeutic target for a variety of diseases.

**Keywords:** UBE2M; Neddylolation; tumor; inflammation; obesity; antiviral immunity

# 小分子天然产物醉茄素 A 抗肿瘤活性及机制研究进展

金楠, 卢顾然, 朱佳怡, 陈曦

(台州学院 医学院, 浙江 台州 318000)

**摘要:**癌症对人类健康构成严重威胁。目前在临床治疗中,人体对化疗药物有抗药性并会产生不良反应。为了减轻化疗药物对人体产生的毒副作用,从天然植物中寻找低毒性、高疗效的抗癌活性成分一直是国内外科学工作者研究的热点。其中,从著名的膳食补充剂南非醉茄中提取的天然产物醉茄素 A (Withaferin A, WA)表现出显著的抗肿瘤功效。从机制上分析,WA 通过诱导细胞周期阻滞、凋亡、自噬和铁死亡等方式发挥抗肿瘤作用。此外,它还抑制细胞增殖、转移,并能增敏化疗药物功效。本文全面总结了 WA 作为潜在抗肿瘤候选药物的药理学特征及其作用机制,为其进一步开发和作为前瞻性药物的研发奠定基础。

**关键词:**醉茄素 A;天然产物;抗肿瘤活性;作用机制

DOI:10.13853/j.cnki.issn.1672-3708.2026.03.007

## 0 引言

癌症以其高死亡率和难以治愈的特点,成为全球范围内严重威胁人类健康和生命的重大疾病。2022 年全球癌症统计数据表明,全球新发癌症病例达 1 996 万例,其中癌症死亡病例为 974 万例<sup>[1]</sup>。目前经典肿瘤药物仍存在药性不稳定、选择性差、易产生耐药性、毒性大等局限性。因此,我们迫切需要新型的药物和手段对抗癌症。在抗肿瘤药物研发领域,天然产物凭借其明确的抗癌功效、丰富的候选资源和低毒性等优势,成为抗癌新药研发的关键。WA 作为南非醉茄的主要活性成分之一,其抗肿瘤功效主要源于 WA 对多种信号通路的调节能力<sup>[2]</sup>,但其具体的抗肿瘤效应和杀伤肿瘤的靶点仍不甚明晰。因此,我们需进一步加深对 WA 抗肿瘤作用机制的研究,以充分发挥 WA 在肿瘤治疗中的优势,达到靶向、安全、高效的治疗效果,从而为临床用药提供新的方案,为中药活性成分的抗肿瘤应用提供示范。本综述旨在总结和分析 2005 年至今 WA 的抗肿瘤潜在分子机制,并探讨其在临床治疗癌症中的应用前景,为未来癌症治疗的研究与实践提供有价值的参考依据。

## 1 醉茄素 A 结构与药理活性

醉茄素 A (WA),分子式为  $C_{28}H_{38}O_6$ ,以麦角甾烷为母核,具备三大关键活性官能团:一是 5 $\beta$ , 6 $\beta$ -环氧环,它可与靶点蛋白亲核氨基酸形成共价结合,增强相互作用稳定性<sup>[3]</sup>;二是  $\alpha$ ,  $\beta$ -不饱和酮,它通过迈克尔加成反应参与氧化还原调节,在诱导活性氧(reactive oxygen species, ROS)生成、激活内质网应激中起关键作用<sup>[4]</sup>;三是 C-22/C-26 位  $\gamma$ -内酯侧链,它是与血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)、谷胱甘肽过氧化物酶 4(glutathione peroxidase 4, GPX4)等靶点结合的核心位点<sup>[5]</sup>。上述研究不仅有助于识别肿瘤治疗的新靶点,也为深入理解肿瘤本质和开发创新性临床治疗策略提供了重要

收稿日期:2025-11-21

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划项目(2024103500012)

作者简介:金楠(2004—),女,浙江温州人,2023级临床医学专业本科生;陈曦(通信作者)(1992—),男,浙江金华人,讲师,博士,主要从事天然产物及其类似物抗肿瘤/抗炎药理活性和靶点机制研究。

科学依据。WA 的结构特征是其发挥药理活性的基础,南非醉茄的植物来源及 WA 的具体化学结构如图 1 所示。

## 2 醉茄素 A 的药代动力学特征与安全性

在药代动力学层面,基于 Q-trap 和 LC-MS/MS 分析,给予雄性大鼠静脉注射(5 mg/kg)和口服(10 mg/kg)WA,其口服生物利用度为(32.4±4.8)%<sup>[6]</sup>。同时,由大鼠肠肝原位灌注实验发现,WA 含量迅速下降,1 小时后仅存留 27.1%。实验提示,首关代谢可能是 WA 口服生物利用度受限的主要原因,且在人类中可能存在类似情况<sup>[6]</sup>。不过,随着纳米技术的发展,纳米脂质体制剂为提升 WA 的药代动力学性能带来了新的突破。Abeesh 等<sup>[7]</sup>研究发现,将 WA 制备为聚乙二醇化的纳米脂质体复合物后可提高 WA 的生物利用度。这一改进增强了 WA 在肿瘤部位的富集程度,为其发挥抗癌作用提供了更有利的药代动力学基础。在临床前研究中,I 期试验对 WA 的安全性进行了初步验证,以 216 mg/d 的剂量给药时,患者未出现严重不良反应<sup>[8]</sup>。这些数据初步证实了 WA 在体内具有较好的安全性特征,为其后续的临床开发和成药性研究奠定了重要基础。

尽管 WA 展现出诸多抗癌潜力,但其在临床转化过程中仍面临一些瓶颈与担忧。其一,WA 口服生物利用度低并存在首过消除效应,严重限制其口服给药后的体内吸收效率;其二,从分子结构来看,WA 作为甾体类酯类化合物,脂溶性良好,理论上可能通过血脑屏障,这一特性虽为其在脑部肿瘤治疗中提供潜在优势,但也需警惕其对中枢神经系统的非靶向作用,这一隐患可能引发神经毒性等风险。

## 3 醉茄素 A 抗肿瘤活性的作用机制

### 3.1 铁死亡

铁死亡是铁依赖性的磷脂过氧化作用驱动的一种独特的细胞死亡方式,受到多种细胞代谢途径的调控。

最近研究结果指出,WA(1~10 μmol/L)可介导经典铁死亡诱导方式和非经典铁死亡诱导方式,致使神经母细胞瘤细胞铁死亡。在经典铁死亡调控通路中,GPX4 可以有效地清除脂质过氧化物,维持细胞内氧化还原平衡<sup>[9]</sup>,且 WA 通过靶向和抑制 GPX4 的蛋白水平和活性,诱导脂质过氧化物累积,最终引发铁死亡<sup>[10]</sup>。而在非典型铁死亡调控通路中,WA 通过直接作用于 Kelch 样 ECH 相关蛋白 1(Kelch-like ECH-associated protein 1, Keap1),过度激活血红素加氧酶-1(heme oxygenase-1, HO-1),导致细胞内不稳定的 Fe(II)含量增加,造成毒性脂质自由基积聚,引发铁死亡<sup>[10]</sup>。然而,有两项研究报道 HO-1 在铁死亡激活剂 erastin 诱导的铁死亡中呈现相反作用:在肝细胞癌中 HO-1 具有保护作用<sup>[11]</sup>;而在纤维肉瘤细胞中则观察到其细胞毒性作用<sup>[12]</sup>。据此,我们提出 HO-1 的上调水平可能是决定其促进或抑制铁死亡的关键。而神经母细胞瘤细胞中高水平的铁、GPX4 和 HO-1 表达也许是致命弱点,使其在 WA 处理时容易诱导铁死亡而非 ROS 介导的细胞凋亡。

### 3.2 细胞凋亡

细胞凋亡是指细胞在一定的生理或病理条件下,受内在遗传机制控制,按照自身程序主动性、生理性死亡的过程。真核细胞主要存在 4 种凋亡通路,WA 已被证实主要通过线粒体调控的内源性凋亡途径来诱导肿瘤细胞发生凋亡。

在细胞凋亡中,天冬氨酸特异性半胱氨酸蛋白水解酶(cysteine-aspartic acid proteases, Caspases)家

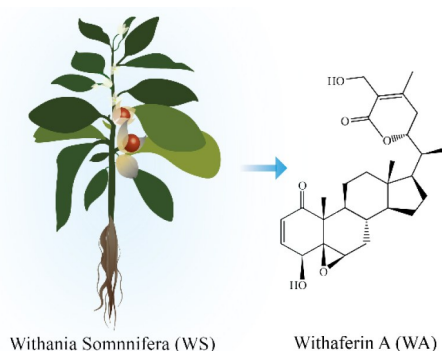


图 1 南非醉茄与醉茄素 A 的结构示意图

族是细胞凋亡的“执行者”<sup>[13]</sup>。WA(1~5  $\mu\text{mol/L}$ )在人乳腺癌 MCF-7 细胞<sup>[14]</sup>、人结肠癌 HCT116 细胞<sup>[15]</sup>、人肝癌 Huh7 细胞<sup>[16]</sup>、人口腔鳞状细胞癌 Ca9-22 细胞<sup>[4]</sup>等多种肿瘤细胞系中均被报道能上调 ROS 水平,激活线粒体调控的内源性凋亡途径,进而触发 Caspase 级联反应,最终引发细胞凋亡。相关研究显示,WA(3  $\mu\text{mol/L}$ )能介导人急性 T 型白血病 MOLT-4 细胞中 Bcl-2 相关 X 蛋白(Bcl-2-associated X protein, Bax)的表达增强,以及 B 细胞淋巴瘤 2 蛋白(B-cell lymphoma 2 protein, Bcl-2)的水平降低<sup>[17]</sup>。与之相反,在人白血病 U937 细胞中,WA(0.25~2.00  $\mu\text{mol/L}$ )处理后 Bax 的诱导效应并不明显<sup>[18]</sup>。尽管 Bax 在 WA 诱导的细胞死亡中所发挥的作用具有细胞系特异性,但上述研究均未考察 WA 处理对 Bax 激活的影响,因为 Bax 的激活及其线粒体易位,是其在响应多种处理时发挥促凋亡活性的必要条件。体内证据表明,WA(8 mg/kg)仅在 CaSki 细胞株移植瘤小鼠模型中被发现能介导 Bax 的上调和 Bcl-2 的下调<sup>[19]</sup>。因此,我们需要进一步深入探究这些现象背后的分子机制,以及其在不同癌症类型和生理环境中的普适性。

### 3.3 细胞自噬

自噬是指细胞通过自噬泡,包裹自身受损、衰老或过剩的生物大分子和细胞器,随后与溶酶体融合释放出游离小分子供细胞回收利用的正常动态生命过程。在癌症治疗中,细胞自噬的异常调节与肿瘤的发生、发展及耐药性等密切相关,因此被视作极具潜力的癌症治疗靶点。而 WA 诱导的细胞自噬具有多种作用机制及细胞特异性。

在乳腺癌细胞中,WA(2~8  $\mu\text{mol/L}$ )虽然促进微管相关蛋白 1 轻链 3(microtubule-associated protein 1 light chain 3, LC3)从 LC3-I 向 LC3-II 转化及酸性囊泡细胞器积累,诱导自噬体形成,但它能通过抑制微管聚合及促进微管蛋白超乙酰化,阻碍自噬体与溶酶体融合,导致隔离体 1 蛋白(sequestosome 1, p62)积累自噬流阻断,形成不完全自噬<sup>[20]</sup>。而在胃癌细胞中,WA(20  $\mu\text{mol/L}$ )与放射治疗联合使用时,会先激活自噬,随后通过 LC3-II 和 p62 的积累阻断自噬流,同时破坏线粒体功能,从而增强放射敏感性<sup>[21]</sup>。研究还指出其自噬调控表现为时间依赖性:早期激活自噬作为应激反应,后期阻断自噬流以阻止癌细胞适应存活<sup>[21]</sup>。

### 3.4 抑制肿瘤新生血管生成

血管生成是指从现有的血管系统中新生出血管的过程。由于肿瘤组织需要诱发血管生成以获得更多的营养和氧气来支持其持续增长,所以新生血管生成对于肿瘤的恶性转变至关重要。

肿瘤新生血管的生成受 VEGF 的调控。WA 与 VEGF 有良好的亲和力,可通过结合 VEGF 来抑制血管的生成<sup>[5]</sup>。在作用机制上,WA 可通过抑制转录因子特异性蛋白 1 与 VEGF 基因启动子的结合,直接调控 VEGF 的表达,从而发挥抗血管生成作用<sup>[5]</sup>。此外,Withanone(南非醉茄中常见醉茄内酯类成分)和 WA(0.25  $\mu\text{g/mL}$ )的组合给药可通过调控 VEGF、蛋白激酶 R 样内质网激酶和基质金属蛋白酶-2 的表达,最终抑制新生血管的生成<sup>[22]</sup>。值得注意的是,WA 在 12 nmol/L 时即可选择性抑制血管内皮细胞增殖<sup>[23]</sup>,但鉴于其易被代谢的特点,游离状态下难以维持有效浓度。而近期研究发现 AS1411(一种人工合成的富 G 序列寡核苷酸)适配体功能化的 WA 负载 PEG 化纳米脂质体(ALW)可延缓 WA 的代谢清除,延长其在肿瘤微环境的作用时间<sup>[24]</sup>。

### 3.5 抑制肿瘤的侵袭和转移

肿瘤的侵袭和转移,即恶性肿瘤突破原发病灶的基底膜等组织屏障,向周围组织浸润生长,形成新的肿瘤病灶的过程。这一性质是恶性肿瘤最为突出的特点,使得癌症的治疗难度大幅增加。

在人非小细胞肺癌细胞中,WA(0.5  $\mu\text{mol/L}$ )通过抑制核因子- $\kappa\text{B}$ (nuclear factor- $\kappa\text{B}$ , NF- $\kappa\text{B}$ )信号通路,阻断 NF- $\kappa\text{B}$  的核转位,进而减少下游促侵袭因子的表达,抑制肿瘤的侵袭和转移<sup>[25]</sup>。同时,WA 能阻止 Mothers against decapentaplegic 同源物 2/3(Smad2/3)的核转位与磷酸化,从而抑制转化生长因

子-β1(transforming growth factor-β1, TGF-β1)诱导的 EMT<sup>[25]</sup>。此外,WA 还可通过抑制腺苷酸激酶 4-缺氧诱导因子-1α 信号轴发挥作用,该抑制作用可使 WA 成为肺癌中强效的抗转移剂<sup>[26]</sup>。在转录因子层面,WA(0.25~5.00 μmol/L)通过下调螺旋科转录抑制因子 2 和 Twist 家族碱性螺旋-环-螺旋转录因子 1 的表达逆转 EMT 过程,降低细胞移动能力<sup>[27]</sup>。在钙黏蛋白调节层面,WA(0.25~5.00 μmol/L)主要通过上调抑癌性钙黏蛋白、下调促转移钙黏蛋白发挥抑制细胞黏附与迁移能力作用<sup>[28-29]</sup>。体内实验证明,WA(4 mg/kg)在 MMTV-neu 小鼠乳腺癌模型中也可上调上皮型钙黏蛋白的表达<sup>[30]</sup>。WA(0.25 μg/mL)还可通过与波形蛋白及异质性核糖核蛋白 K 相互作用,下调神经型钙黏蛋白的表达,减少肿瘤转移<sup>[22]</sup>。与此同时,WA 通过靶向波形蛋白与神经前体细胞表达的发育,下调蛋白 9 形成的信号复合物发挥抗转移作用<sup>[31]</sup>。

### 3.6 细胞周期阻滞

细胞周期进程的失调和不受控制的增殖是癌细胞生长和发育的标志。针对癌细胞的周期失调,将其阻滞于某一周期从而抑制癌细胞的无限增殖是抗肿瘤治疗的一大策略。

WA 能够调控多种机制使癌细胞在 G2/M 期停滞,WA(1~3 μmol/L)能够以浓度和时间依赖性方式,降低细胞周期蛋白依赖性激酶 1、细胞分裂周期蛋白 25 同源物 C 和细胞分裂周期蛋白 25 同源物 B 的表达水平,从而导致细胞周期的停滞<sup>[32]</sup>。此外,WA(0.25~2.00 μg/mL)还可下调细胞周期蛋白 B1、细胞周期蛋白 A、细胞周期蛋白依赖性激酶 2 和其磷酸化蛋白的表达,同时上调磷酸化检查点激酶 1/2 的水平,进一步加剧细胞周期的停滞<sup>[33]</sup>。从形态学角度切入,研究者们通过电镜观察到 WA 影响有丝分裂纺锤体进而导致微管结构破坏,发现了 WA 诱导的 G2/M 期阻滞的线索<sup>[34]</sup>,为进一步探究 WA 对细胞周期的影响机制奠定了基础。在实际肿瘤微环境中,肿瘤细胞的增殖和转移是紧密关联的恶性行为,WA 可以作用于细胞周期和 EMT,从多个层面遏制肿瘤的发展。然而,现有研究大多单独探讨细胞周期阻滞或 EMT 的调控通路,对两者间的直接交叉对话机制阐述不足。未来仍需阐明 WA 对两者的协同调控网络,为优化 WA 的抗肿瘤作用(如抑制细胞的增殖和转移)提供更深入的机制支撑。为了系统梳理 WA 在体内外实验中对不同肿瘤的抑制效果及作用特征,首先汇总 WA 在多种肿瘤细胞系中的 IC<sub>50</sub>值、蛋白表达变化及核心作用机制(表 1);然后基于动物模型,总结 WA 的体内干预效果、给药方案及人等效剂量换算(表 2),为 WA 的临床转化提供实验依据。

表 1 体外实验 WA 抗癌效果

癌症类型	细胞系	IC <sub>50</sub> /μmol/L	蛋白表达变化	核心机制	参考文献
神经母细胞瘤	IMR-32	1.00	GPX4,Keap1 ↓ ;Nrf2,HO-1 ↑	抑制经典及非经典通路诱导铁死亡	[10]
结肠癌	SW620	5.00	Notch-1,Hes-1,PCNA ↓ ;	激活 JNK 介导的细胞凋亡	[35]
	HCT116	5.33	p-JNK,cle-Cas3,cle-PARP1 ↑		
骨肉瘤	U2OS	0.32	ROS,cle-Cas3,	激活 ROS 介导的线粒体细胞凋亡	[36]
	MG-63	0.36	cle-Cas9,		
	Saos-2	0.88	cle-PARP1,Bax/Bcl-2 ↑		
肝癌	Huh7	3.40	TrxR1 ↓ ;ROS,cle-Cas3,	激活 ROS 介导的线粒体细胞凋亡	[16]
	HepG2	3.10	cle-PARP1,Bax/Bcl-2 ↑		
乳腺癌	MCF-7	2.50~5.00	p-AKT ↓ ;FOXO3a,cle-Cas3, cle-PARP1,Bax/Bcl-2 ↑	激活 FOXO3a-Bim 通路诱导 细胞凋亡	[37]
	MDA-MB-231	1.50~3.00			
	MCF-7	5.98±0.12	ATG5-ATG12,Beclin-1,Tubulin ↓ ; LC3- I ,LC3- II ,p62,GRP78,CHOP ↑	不完全自噬导致的内质网应激 介导的未折叠蛋白反应	[20]
	MDA-MB-231	4.57±0.40			
	BT-549	0.10~2.00	波形蛋白 ↓	诱导波形蛋白 S56 残基磷酸化抑制 肿瘤转移	[38]

续表

癌症类型	细胞系	IC <sub>50</sub> / μmol/L	蛋白表达变化	核心机制	参考文献
口腔鳞状细胞癌	SCC-9	2.50~4.00	Claudin-1 ↓ ;Let-7a ↑	抑制肿瘤转移	[39]
	SCC-25	2.50~4.00			
肺癌	H1299	0.25	TGFβ1,Smad2/3,TNF-α,NF-κB, Cyclin B1,Cyclin E2, N-cadherin,波形蛋白,Snail, 纤连蛋白 ↓ ;E-cadherin ↑	双重抑制 TGFβ1/Smad2/3、TNFα/ NF-κB 信号通路,阻断 EMT 进程	[25, 40, 41]
	A549	0.56		双重抑制 TGFβ1/Smad2/3、TNFα/ NF-κB 信号通路,阻断 EMT 进程	

表2 体内实验 WA 抗癌效果

癌症类型	动物模型	给药剂量方法	核心机制	人等效剂量/(mg/kg)	参考文献
神经母细胞瘤	IMR-32 细胞裸鼠 异种移植瘤模型	IMR-32 细胞裸鼠 异种移植瘤模型	抑制经典及非经典通路诱导铁死亡	0.33	[10]
骨肉瘤	肉瘤细胞瑞士白化小鼠 异种移植瘤模型	腹腔注射,剂量为 10 mg/kg,连续给药 7 d	G2/M 期阻滞 与线粒体细胞凋亡	0.81	[42]
	S-180 细胞瑞士小鼠或 DBA/ 2 小鼠异种移植瘤模型	10 或 30 mg/kg	微管破坏 与细胞周期阻滞	0.81 或 2.44	[34]
结肠癌	HCT116 细胞裸鼠 异种移植瘤模型	腹腔注射,剂量为 2 mg/kg,每 2 天一次,持续 32 d	激活 JNK 介导的细胞 凋亡	0.16	[43]
		口服给药,剂量为 5 mg/kg,每周给药 5 d,持续 4 周	AKT 通路抑制	0.41	[29]
乳腺癌	MDA-MB-231 细胞裸鼠 异种移植瘤模型	腹腔注射,剂量为 8 mg/kg,持续 2.5 周	E-钙黏蛋白上调 与 EMT 逆转	0.65	[37]
		口服给药,剂量为 5 mg/kg, 每周给药 5 d,持续 4 周	FOXO3a/Bim 依赖的 细胞凋亡	0.41	[44]
	4T1 小鼠乳腺癌模型	腹腔注射,剂量为 4 mg/kg,隔天 1 次,持续 1 月	波形蛋白磷酸化 与转移抑制	0.33	[38]
		腹腔注射,剂量为 5~10 mg/kg,隔天 1 次,持续 2 周	c-FLIP 抑制 与 translational 衰减	0.41~0.81	[45]
	N-甲基-N-亚硝基脲 诱导的大鼠模型	4~8 mg/kg	肿瘤抑制因子上调	0.33~0.65	[46]
口腔鳞状细胞癌	HSC-4 细胞 NOD-SCID 小鼠 异种移植瘤模型	腹腔注射,剂量为 2 mg/kg, 每周 3 次,持续 13 周	Claudin-1 下调 与转移抑制	0.65	[39]
前列腺癌	PC-3 细胞裸鼠 异种移植瘤模型	瘤内注射,剂量为 5 mg/kg, 每周 5 d,最多持续 4 周	Par-4 依赖的细胞凋亡	0.41	[47]
		腹腔注射,剂量为 4~8 mg/kg,持续 7 d	不完全自噬 与凋亡协同	0.33~0.65	[47]
肝癌	HepG2 细胞小鼠异种移植瘤 模型和 DEN 诱导的 小鼠肝细胞癌模型	每日 4 mg/kg,持续 5 周	ETS-1/DR5 通路激活	0.33	[48]
肺癌	H441-L2G 细胞 NOD/SCID 小鼠异种移植瘤模型	2 mg/kg,持续 6 周	TGFβ1/Smad2/3 通路抑制	0.16	[49]
	PC9 细胞裸鼠 异种移植瘤模型	2 mg/kg,每周 3 次	EGFR-TKI 耐药逆转	0.16	[50]

注:人等效剂量=动物剂量×动物体重系数/人体体重系数(小鼠与人体的换算系数分别为 0.081 和 1)。

WA 涉及的程序性细胞死亡机制如图 2 所示。从图 2 可以看出:WA 抑制 GPX4 功能并通过 Keap1-Nrf2

通路加剧铁死亡(图 2a);WA 调控 Bax/Bcl-2,促进线粒体释放 Cyt c,激活 Caspase 级联反应(图 2b);WA 促进 LC3-I 向 LC3-II 转化及酸性囊泡细胞器积累,诱导自噬体形成,但能通过阻碍自噬体与溶酶体融合,导致 p62 积累自噬流阻断,形成不完全自噬(图 2c)。

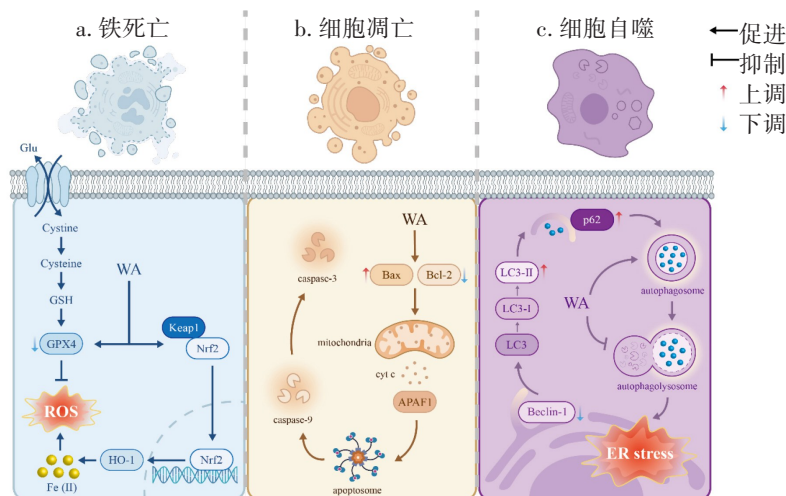


图 2 WA 涉及的程序性细胞死亡机制图

## 4 醉茄素 A 的化疗增敏作用

在过去的 20 年里,肿瘤学领域的药物研发重点聚焦于分子靶向药物。然而,靶点突变而迅速出现的耐药性导致药物疗效显著降低,如何克服耐药性成为当下抗肿瘤药物所面临的首要难题。

多项研究表明,WA 具有逆转各种癌症的耐药性的能力。Kunimasa 等<sup>[50]</sup>证明,WA 和根皮素组合给药,致使吉非替尼肺癌耐药株皮下移植瘤体积显著减小。此外,WA 还是一种天然的硫氧还蛋白还原酶 1 抑制剂,它可通过激活 ROS 介导的内质网应激与 DNA 损伤,在肝癌细胞中协同增强索拉非尼的抗肿瘤功效<sup>[16]</sup>。并且,在索拉非尼耐药的人肝癌细胞中,WA 能够增加 Keap1 的表达,从而抑制 NF-E2 相关因子 2 信号所调控的 EMT 和铁死亡相关蛋白溶质载体家族 7 成员 11 的表达,进而诱发铁死亡<sup>[10]</sup>。同时,波形蛋白可作为索拉非尼耐药的潜在治疗靶点和肿瘤转移的潜在标志物,而 WA 则能够以剂量依赖性的方式进一步降低细胞中波形蛋白的表达<sup>[51]</sup>。因此,WA 可以降低索拉非尼耐药和肿瘤转移潜能,有望成为治疗肝癌,尤其是晚期肝癌的有效药物。最近的研究还发现,在人胶质母细胞瘤细胞中,WA 可消耗 O6-甲基鸟嘌呤-DNA 甲基转移酶并通过蛋白激酶 B (protein kinase B, AKT)/雷帕霉素靶蛋白 (mammalian target of rapamycin, mTOR) 途径诱导细胞凋亡,使替莫唑胺耐药细胞重新敏感<sup>[52]</sup>。综上所述,WA 在克服肿瘤耐药性方面展现出广泛且显著的潜力;同时,鉴于 WA 能通过多途径重塑肿瘤免疫微环境,与免疫抑制剂联合用药可能有助于进一步提升 WA 对肿瘤细胞的杀伤效能。

## 5 结语

天然产物来源的抗肿瘤化合物具有高效、低毒、多靶点等优点。本文总结了 WA 这种天然化合物的来源、药代动力学特征与安全性、抗肿瘤机制及其逆转化疗药物耐药性的效果,提示 WA 作为一种天然抗肿瘤药物,在肿瘤治疗领域具有重要的研究价值和潜在的应用前景。

与现有临床前阶段的天然产物相比,WA 的竞争优势显著。WA 不仅对多种肿瘤细胞株有低 IC<sub>50</sub>值,能以低浓度发挥强效抑制作用,还可依托甾类结构靶向多环节关键分子实现协同抗肿瘤,且甾类结构便于制剂改造、临床转化潜力高。而现有临床前天然产物普遍存在 IC<sub>50</sub>值高、作用机制单一、结构复杂难修

饰的短板,这些短板制约了疗效与转化进程。同时,相较于葫芦素 B 等同类甾类内酯结构的天然产物,WA 作用范围更广泛,它在抗炎、抗菌、抗癫痫、抗关节炎、调节代谢、调节免疫等方面均有明确活性。然而,目前尚无研究明确 WA 剂量浓度与细胞效应差异的量化关系,也未阐明导致该差异的核心调控因素,需通过梯度剂量实验结合多组学分析,为 WA 后续的临床转化给药方案提供实验依据。

#### 参考文献:

- [1] BRAY F, LAVERSANNE M, SUNG H, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. *CA: a Cancer Journal for Clinicians*, 2024, 74(3): 229–263.
- [2] VANDEN BERGHE W, SABBE L, KAILEH M, et al. Molecular insight in the multifunctional activities of Withaferin A [J]. *Biochemical Pharmacology*, 2012, 84(10): 1282–1291.
- [3] WIJERATNE E M, XU Y M, SCHERZ-SHOVAL R, et al. Structure–activity relationships for withanolides as inducers of the cellular heat–shock response[J]. *Journal of Medicinal Chemistry*, 2014, 57(7): 2851–2863.
- [4] CHANG H W, LI R N, WANG H R, et al. Withaferin A induces oxidative stress–mediated apoptosis and DNA damage in oral cancer cells[J]. *Frontiers in physiology*, 2017, 8: 634.
- [5] SAHA S, ISLAM M K, SHILPI J A, et al. Inhibition of VEGF: a novel mechanism to control angiogenesis by *Withania somnifera*'s key metabolite Withaferin A[J]. *In Silico Pharmacology*, 2013, 1: 11.
- [6] DAI T M, JIANG W F, GUO Z Z, et al. Studies on oral bioavailability and first–pass metabolism of Withaferin A in rats using LC–MS/MS and Q–TRAP[J]. *Biomedical Chromatography*, 2019, 33(9): e4573.
- [7] ABEESH P, VISHNU W K, GURUVAYOORAPPAN C. Preparation and characterization of Withaferin A loaded pegylated nanoliposomal formulation with high loading efficacy: in vitro and in vivo anti–tumour study [J]. *Materials Science & Engineering C: Materials for Biological Applications*, 2021, 128: 112335.
- [8] PIRES N, GOTA V, GULIA A, et al. Safety and pharmacokinetics of Withaferin–A in advanced stage high grade osteosarcoma: a phase I trial[J]. *Journal of Ayurveda and Integrative Medicine*, 2020, 11(1): 68–72.
- [9] BRIGELIUS-FLOHÉ R, MAIORINO M. Glutathione peroxidases[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2013, 1830(5): 3289–3303.
- [10] HASSANNIA B, WIERNICKI B, INGOLD I, et al. Nano–targeted induction of dual ferroptotic mechanisms eradicates high–risk neuroblastoma[J]. *The Journal of Clinical Investigation*, 2018, 128(8): 3341–55.
- [11] SUN X F, OU Z H, CHEN R C, et al. Activation of the p62–Keap1–NRF2 pathway protects against ferroptosis in hepatocellular carcinoma cells[J]. *Hepatology*, 2016, 63(1): 173–184.
- [12] KWON M Y, PARK E, LEE S J, et al. Heme oxygenase–1 accelerates erastin–induced ferroptotic cell death[J]. *Oncotarget*, 2015, 6(27): 24393–24403.
- [13] MOYER A, TANAKA K, CHENG E H. Apoptosis in cancer biology and therapy [J]. *Annual Review of Pathology*, 2025, 20(1): 303–328.
- [14] HAHM E R, MOURA M B, KELLEY E E, et al. Withaferin A–induced apoptosis in human breast cancer cells is mediated by reactive oxygen species[J]. *PLoS one*, 2011, 6(8): e23354.
- [15] XIA S X, MIAO Y L, LIU S D. Withaferin A induces apoptosis by ROS–dependent mitochondrial dysfunction in human colorectal cancer cells[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2018, 503(4): 2363–2369.
- [16] CHEN X, ZHU N, WU Y J, et al. Withaferin A, a natural thioredoxin reductase 1 (TrxR1) inhibitor, synergistically enhances the antitumor efficacy of sorafenib through ROS–mediated ER stress and DNA damage in hepatocellular carcinoma cells[J]. *Phytomedicine: International Journal of Phytotherapy and Phytopharmacology*, 2023, 128: 155317.
- [17] MANDAL C, DUTTA A, MALLICK A, et al. Withaferin A induces apoptosis by activating p38 mitogen–activated protein kinase signaling cascade in leukemic cells of lymphoid and myeloid origin through mitochondrial death cascade [J]. *Apoptosis: an International Journal on Programmed Cell Death*, 2008, 13(12): 1450–1464.
- [18] OH J H, LEE T J, KIM S H, et al. Induction of apoptosis by Withaferin A in human leukemia U937 cells through down–regulation of AKT phosphorylation [J]. *Apoptosis: an International Journal on Programmed Cell Death*, 2008, 13(12): 1494–1504.
- [19] MUNAGALA R, KAUSAR H, MUNJAL C, et al. Withaferin A induces p53–dependent apoptosis by repression of

- HPV oncogenes and upregulation of tumor suppressor proteins in human cervical cancer cells[J].*Carcinogenesis*,2011,32(11):1697-1705.
- [20]GHOSH K,DE S,MUKHERJEE S,et al. Withaferin A induced impaired autophagy and unfolded protein response in human breast cancer cell-lines MCF-7 and MDA-MB-231[J].*Toxicology in Vitro:an International Journal Published in Association with BIBRA*,2017,44:330-338.
- [21]LU P,XUE J,JI X. Radiosensitizing effects of Withaferin A in gastric cancer cells via autophagy Inhibition and mitochondrial disruption[J].*Scientific Reports*,2025,15(1):19695.
- [22]GAO R,SHAH N,LEE J S,et al. Withanone-rich combination of Ashwagandha withanolides restricts metastasis and angiogenesis through hnRNP-K[J].*Molecular Cancer Therapeutics*,2014,13(12):2930-2940.
- [23]MOHAN R,HAMMERS H J,BARGAGNA-MOHAN P,et al. Withaferin A is a potent inhibitor of angiogenesis[J].*Angiogenesis*,2004,7(2):115-122.
- [24]ABEESH P,GURUVAYOORAPPAN C. Inhibition of tumor-specific angiogenesis by AS1411 aptamer functionalized Withaferin A loaded PEGylated nanoliposomes by targeting nucleolin[J].*Biochemical and Biophysical Research Communications*,2023,673:106-113.
- [25]KYAKULAGA A H,AQIL F,MUNAGALA R,et al. Withaferin A inhibits epithelial to mesenchymal transition in non-small cell lung cancer cells[J].*Scientific Reports*,2018,8(1):15737.
- [26]JAN Y H,LAI T C,YANG C J,et al. Adenylate kinase 4 modulates oxidative stress and stabilizes HIF-1 $\alpha$  to drive lung adenocarcinoma metastasis[J].*Journal of Hematology & Oncology*,2019,12(1):12.
- [27]BOLÓS V,PEINADO H,PÉREZ-MORENO M A,et al. The transcription factor Slug represses E-cadherin expression and induces epithelial to mesenchymal transitions: a comparison with Snail and E47 repressors[J].*Journal of Cell Science*,2016,129(6):1283.
- [28]NISHI M,AKUTSU H,KUDOH A,et al. Induced cancer stem-like cells as a model for biological screening and discovery of agents targeting phenotypic traits of cancer stem cell[J].*Oncotarget*,2014,5(18):8665-8680.
- [29]SUMAN S,DAS T P,SIRIMULLA S,et al. Withaferin-A suppress AKT induced tumor growth in colorectal cancer cells[J].*Oncotarget*,2016,7(12):13854-13864.
- [30]LEE J,HAHM E R,MARCUS A I,et al. Withaferin A inhibits experimental epithelial-mesenchymal transition in MCF-10A cells and suppresses vimentin protein level in vivo in breast tumors[J].*Molecular Carcinogenesis*,2015,54(6):417-429.
- [31]SHERAPURA A,KIRAN B K,PAVAN KUMAR G S,et al. Withaferin-A induced vimentin S56 phosphorylation dissociates NEDD9 signaling loop to regress progressive metastatic melanoma into lung adenocarcinoma[J].*Chemico-Biological Interactions*,2025,406:111319.
- [32]STAN S D,ZENG Y,SINGH S V. Ayurvedic medicine constituent Withaferin A causes G2 and M phase cell cycle arrest in human breast cancer cells[J].*Nutrition and Cancer*,2008,60(Suppl 1):51-60.
- [33]YU Y,KATIIYAR S P,SUNDAR D,et al. Withaferin-A kills cancer cells with and without telomerase: chemical, computational and experimental evidences[J].*Cell Death & Disease*,2017,8(4):e2755.
- [34]SHOHAT B,SHALTIEL A,BEN-BASSAT M,et al. The effect of Withaferin A, a natural steroidal lactone, on the fine structure of S-180 tumor cells[J].*Cancer Letters*,1976,2(2):71-77.
- [35]KODURU S,KUMAR R,SRINIVASAN S,et al. Notch-1 inhibition by Withaferin-A: a therapeutic target against colon carcinogenesis[J].*Molecular Cancer Therapeutics*,2010,9(1):202-210.
- [36]ZHANG H L,ZHANG H. Withaferin-A induces apoptosis in osteosarcoma U2OS cell line via generation of ROS and disruption of mitochondrial membrane potential[J].*Pharmacognosy Magazine*,2017,13(51):523-527.
- [37]STAN S D,HAHM E R,WARIN R,et al. Withaferin A causes FOXO3a- and Bim-dependent apoptosis and inhibits growth of human breast cancer cells in vivo[J].*Cancer Research*,2008,68(18):7661-7669.
- [38]THAIPARAMBIL J T,BENDER L,GANESH T,et al. Withaferin A inhibits breast cancer invasion and metastasis at sub-cytotoxic doses by inducing vimentin disassembly and serine 56 phosphorylation[J].*International Journal of Cancer*,2011,129(11):2744-2755.
- [39]SHIN J A,KIM L H,RYU M H,et al. Withaferin A mitigates metastatic traits in human oral squamous cell carcinoma caused by aberrant claudin-1 expression[J].*Cell Biology And Toxicology*,2022,38(1):147-165.
- [40]CHAUDHARY A,KALRA R S,MALIK V,et al. 2,3-Dihydro-3 $\beta$ -methoxy Withaferin-A lacks anti-metastasis potency: bioinformatics and experimental evidences[J].*Scientific Reports*,2019,9(1):17344.

- [41] KYAKULAGA A H, AQIL F, MUNAGALA R, et al. Synergistic combinations of paclitaxel and Withaferin A against human non-small cell lung cancer cells[J]. *Oncotarget*, 2020, 11(16):1399-1416.
- [42] AMIN H, NAYAK D, UR RASOOL R, et al. Par-4 dependent modulation of cellular  $\beta$ -catenin by medicinal plant natural product derivative 3-azido Withaferin A[J]. *Molecular Carcinogenesis*, 2016, 55(5):864-881.
- [43] CHOI B Y, KIM B W. Withaferin-A inhibits colon cancer cell growth by blocking STAT3 transcriptional activity[J]. *Journal of Cancer Prevention*, 2015, 20(3):185-192.
- [44] NAGALINGAM A, KUPPUSAMY P, SINGH S V, et al. Mechanistic elucidation of the antitumor properties of Withaferin A in breast cancer[J]. *Cancer Research*, 2014, 74(9):2617-2629.
- [45] UR RASOOL R, RAH B, AMIN H, et al. Dual modulation of Ras-Mnk and PI3K-AKT-mTOR pathways: a novel c-FLIP inhibitory mechanism of 3-AWA mediated translational attenuation through dephosphorylation of eIF4E [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1):18800.
- [46] SAMANTA S K, SEHRAWAT A, KIM S H, et al. Disease subtype-independent biomarkers of breast cancer chemoprevention by the ayurvedic medicine phytochemical Withaferin A [J]. *Journal of the National Cancer Institute*, 2017, 109(6):293.
- [47] SRINIVASAN S, RANGA R S, BURIKHANOV R, et al. Par-4-dependent apoptosis by the dietary compound Withaferin A in prostate cancer cells[J]. *Cancer Research*, 2007, 67(1):246-253.
- [48] KUPPUSAMY P, NAGALINGAM A, MUNIRAJ N, et al. Concomitant activation of ETS-like transcription factor-1 and Death Receptor-5 via extracellular signal-regulated kinase in Withaferin A-mediated inhibition of hepatocarcinogenesis in mice[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):17943.
- [49] HSU J H, CHANG P M, CHENG T S, et al. Identification of Withaferin A as a potential candidate for anti-cancer therapy in non-small cell lung cancer[J]. *Cancers*, 2019, 11(7):1003.
- [50] KUNIMASA K, NAGANO T, SHIMONO Y, et al. Glucose metabolism-targeted therapy and Withaferin A are effective for epidermal growth factor receptor tyrosine kinase inhibitor-induced drug-tolerant persisters[J]. *Cancer Science*, 2017, 108(7):1368-1377.
- [51] MAKOL A, KAUR H, SHARMA S, et al. Vimentin as a potential therapeutic target in sorafenib resistant HepG2, a HCC model cell line[J]. *Clinical and Molecular Hepatology*, 2020, 26(1):45-53.
- [52] GROGAN P T, SARKARIA J N, TIMMERMANN B N, et al. Oxidative cytotoxic agent Withaferin A resensitizes temozolomide-resistant glioblastomas via MGMT depletion and induces apoptosis through AKT/mTOR pathway inhibitory modulation[J]. *Investigational New Drugs*, 2014, 32(4):604-617.

## Research Advances on Antitumor Activity and Mechanism of Small Molecule Natural Products Withaferin A

Jin Nan, Lu Guran, Zhu Jiayi, Chen Xi

(School of Medicine, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

**Abstract:** Cancer poses a serious threat to human health. Currently, in clinical treatment, the human body develops resistance to chemotherapy drugs and produces adverse reactions. In order to reduce the toxic and side effects of chemotherapy drugs on the human body, searching for anticancer active ingredients with low toxicity and high efficacy from natural plants has always been a research hotspot among scientists at home and abroad. Among them, Withaferin A (WA), a natural product extracted from the well-known dietary supplement Ashwagandha, shows significant antitumor effects. Mechanistically, WA exerts antitumor effects by inducing cell cycle arrest, apoptosis, autophagy, and ferroptosis. In addition, it inhibits cell proliferation and metastasis, and can sensitize the efficacy of chemotherapy drugs. This review aims to comprehensively summarize the pharmacological characteristics and mechanisms of WA as a potential antitumor candidate drug, contributing to its further development and the discovery of prospective drugs.

**Keywords:** Withaferin A; natural products; antitumor activity; mechanism

# 我国制造业城市技术创新策源能力演进及特征分析

## ——以地级制造业城市为例

王香莲

(台州学院 图书馆, 浙江 台州 318000)

**摘要:**技术创新策源能力是发展新质生产力、推动创新强国的基石。本文以2015—2024年的高价值专利为基础,综合运用AHP-熵值法与非整次秩和比法,从生产策源力、影响策源力、战略策源力和市场策源力4个维度,梳理了国家先进制造业十强地级城市的技术创新策源能力、演进趋势及演进特征。研究表明:样本城市的技术创新策源能力差距明显。通过横向与纵向对比,揭示了各样本城市的技术创新策源力提升差异;同时,针对各城市的技术创新策源特征,分析了它们的发展强项与存在的短板。

**关键词:**技术创新策源能力;高价值专利;AHP分析法;熵值法;非整次秩和比法

DOI:10.13853/j.cnki.issn.1672-3708.2026.03.008

## 0 引言

技术创新策源能力是创新主体把握技术创新发展前沿趋势,掌握技术创新核心技能,推动产业发展和变革的开拓者所具备的能力,是发展新质生产力、推动创新强国的基石。制造业是国家发展的脊梁、强国之基,是创新经济的核心和实施技术创新的主要领域。将我国先进制造业城市的技术创新策源能力进行梳理和评价,描绘其演进轨迹和特征,揭示不同城市间的技术创新策源差异,对于构建现代产业体系、培育和打造具有国际竞争力的创新型城市和先进制造业集群,具有重要的现实意义。

本文从生产策源力、影响策源力、战略策源力和市场策源力4个维度构建技术创新策源能力评价体系,通过对我国地级城市制造业的技术创新策源能力进行评价与分析,深入剖析其演进趋势和特征,旨在为我国城市的健康、高质量发展提供参考和借鉴。

## 1 研究综述

创新策源能力是一个国家/区域的核心竞争力,自2018年起被广泛提起。陈超<sup>[1]</sup>指出创新策源能力包括学术新思想、技术新发明等4个方面。敦帅等<sup>[2]</sup>认为创新策源能力是包括创新能力建设和创新条件建设的一种新的创新范式。卢超等<sup>[3]</sup>指出,创新策源能力是创新行为对基础科学研究、前沿技术应用、形成引领型战略性新兴产业、掌握科技和经济核心竞争力的能力。王少<sup>[4]</sup>认为创新策源能力强调原始创新能力和创新引领辐射能力。创新策源能力的建设目标是形成一批基础研究和应用基础研究的原创性成果,拥有支撑产业发展的关键核心技术,并在高科技竞争中占据一席之地。

技术创新策源能力是创新策源能力的重要组成部分,它不仅强调了技术从无到有、从有到新的原创

收稿日期:2025-06-03

基金项目:浙江省教育厅一般科研项目(Y202145908);台州市哲学社会科学规划重点课题(21GHZ02)

作者简介:王香莲(1977—),女,浙江台州人,馆员,主要从事知识服务、决策咨询研究。

性和突破性,更强调了技术对产业和经济的辐射性与引领性。首先,技术创新策源能力体现的是前所未有的技术原始创新能力;其次,它在原理、技术、方法等某个或多个方面具备重大突破能力;最后,它能为技术发展产生重大的引领辐射作用,不断催生原创性的创新成果,为技术现状和产业发展带来重大影响,甚至引发产业竞争态势的变化,导致产业结构重新分配,竞争格局重新形成。本文提出技术创新策源能力是创新主体的技术原始创新能力和辐射引领能力的融合,既强调创新主体的技术源头创新能力和自主创新能力,又强调技术创新驱动产业发展和产业变革的能力。

学界对科技创新策源能力和区域创新策源能力的研究已广泛展开。敦帅等<sup>[5]</sup>提出创新策源能力的内涵为创新策动和创新之源的双螺旋模型。袁野等<sup>[6]</sup>和朱梦菲等<sup>[7]</sup>分别评价了31个省级行政区的原始创新策源能力,揭示了区域差距及动态演化规律。张金福等<sup>[8]</sup>运用模糊综合评价法得出我国创新集聚趋势明显,地区创新分布不均衡的结论。谢婧青<sup>[9]</sup>对上海的科技创新策源能力进行了分析。刘琦<sup>[10]</sup>指出2011—2020年间,粤港澳大湾区创新策源能力整体稳步向上。还有学者应用熵权法、灰色关联分析、HAKEN协同演化等研究方法对区域、重点城市的创新策源能力进行了研究<sup>[2,11]</sup>。但仅针对技术创新策源能力的研究还较少:卢超等<sup>[3]</sup>认为国家技术发明奖可以表征技术创新策源能力;王香莲等<sup>[12]</sup>基于专利信息对长三角30所高校的技术创新策源能力和策源特征进行了实证分析;衣春波等<sup>[13]</sup>基于专利信息,运用层次分析法赋权,对纽约、东京、伦敦、上海人工智能领域的技术创新策源能力进行了评价。目前,还没有其他广泛、深入的技术创新策源能力研究,更没有对地级制造业城市这个创新主体的相关研究。基于此,本文在已有研究的基础上,对技术创新策源能力评价模型进行了深入探索,分析了国内十强先进制造业城市的技术创新策源能力及其演进趋势,以期为培育和打造具有核心竞争力的先进制造业集群提供参考。

## 2 研究设计

以专利表征技术创新已得到国内外学者的广泛认可。有研究表明,专利价值呈高度偏态分布,约10%的高价值专利占全部专利价值的81%~85%<sup>[14]</sup>。高价值专利是指具备高水平技术研发、高质量申请确权、高效益转化运用和高起点产业引领的专利<sup>[15]</sup>。因此,本文认为高价值专利不仅是技术创新的核心代表,更加切合技术创新策源能力的概念内涵,能精准地表征技术创新策源能力。

### 2.1 指标体系

根据对技术创新策源能力概念的理解,基于高价值专利视角,以生产策源力为技术创新的活力源泉,以技术创新影响策源力为质量杠杆,以技术创新战略策源力为战略引擎,以技术创新市场策源力为转化动力来构建技术创新策源能力评价指标,如表1所示。

表1 技术创新策源能力评价指标

一级指标	二级指标	变量
技术创新生产策源力	授权发明专利	$X_1$
	被引证专利	$X_2$
技术创新影响策源力	标准必要专利	$X_3$
	中国专利奖	$X_4$
技术创新战略策源力	协同创新专利	$X_5$
	境外授权专利	$X_6$
技术创新市场策源力	价值超百万专利	$X_7$
	转让专利	$X_8$
	许可专利	$X_9$
	质押专利	$X_{10}$

### 2.1.1 技术创新生产策源力

技术创新生产策源力反映技术创新能级和活力。专利授权需要经过严格的实质性审查,以确保其具备新颖性、创新性和实用性,专利授权量,尤其是发明授权专利量越多说明技术创新策源能力越强。

### 2.1.2 技术创新影响策源力

技术创新影响策源力是技术创新质量的重要体现,由被引证专利、标准必要专利和中国专利奖3个指标构成。技术创新具有继承性和创新性,大多数技术创新都是受现有技术启发或是在前人技术基础上进行改进或拓展延伸产生的新技术。专利被引证说明其是后续技术的基础技术或核心技术,对后续技术将产生影响和辐射作用,被引证次数越多,说明技术创新策源能力越强。标准必要专利是专利和标准相互融合的特殊产物,行业内企业生产相关工业产品都必须获得授权许可的专利,这是行业技术统治力的象征<sup>[16]</sup>。中国专利奖是国家唯一专门奖励专利创造的政府部门奖,是高价值专利的代表,主要从专利的质量,技术先进性,运用、保护措施和成效,社会效益和发展前景4个维度进行评选。

### 2.1.3 技术创新战略策源力

技术创新战略策源力反映的是技术主体的战略合作考量以及对高质量专利进行境外战略层面的布局,由协同创新专利和境外授权专利组成。随着技术创新的复杂性、交叉性和不确定性的加剧,多个创新主体的协同创新可以突破单个主体创新能力局限性<sup>[17]</sup>,实践证明它更有利于实现重大科技创新。专利境外布局是技术创新战略布局的核心内容,创新主体为了市场竞争的需要,将某项关键核心技术在多个国家申请保护,构筑牢固的技术壁垒,扩大技术保护范围。境外授权专利是成功通过境外高水平创新新颖性审查的专利,它反映了更高的技术创新要求。

### 2.1.4 技术创新市场策源力

技术创新市场策源力反映的是技术创新的市场价值和产业效能,是技术创新成果转化的重要衡量指标,由价值超百万美元专利、转让专利、质押专利、许可专利4个指标组成。根据综合评估,将价值超过百万美元的专利认定为高质量专利。技术创新策源能力最终的评价在于市场的认可,只有经过市场转化,获得商业利益的检验,才能支撑技术创新的意义。专利转让、质押和许可是技术创新被认可、接受、传播和实施的客观结果。因此,价值超百万美元专利、转让专利、质押专利、许可专利反映了技术创新的市场价值、辐射价值和经济价值,数量越多,说明技术创新策源能力越强。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 指标赋权方法

本文采用AHP-熵值法进行指标赋权。层次分析法(AHP)是一种定性和定量相结合来解决多要素、多目标、多层次复杂问题的常用分析方法。AHP权重计算公式为

$$Q_j = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{X'_{ij}}{\sum_{k=1}^n X'_{kj}}, \quad (1)$$

其中: $Q_j$ 为第 $j$ 个指标权重; $n$ 为总指标数; $X'_{ij}$ 和 $X'_{kj}$ 分别为第 $i$ 个评价对象和第 $k$ 个评价对象在第 $j$ 个指标上的归一化值。

熵值法是利用指标离散程度来确定权重的方法,指标离散程度越大,则该指标的权重越大。确定权重的步骤:(1)根据指标比重建立无量纲矩阵;(2)计算指标熵值;(3)计算指标权重向量。

熵值法指标比重 $Y_{ij}$ 的计算公式为

$$Y_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m X'_{ij}}, \quad (2)$$

其中,  $m$  为评价对象个数。

指标熵值计算公式:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m Y_{ij} \cdot \ln Y_{ij}。 \quad (3)$$

指标权重计算公式:

$$Z_j = \frac{1 - e}{\sum_{j=1}^n (1 - e)}。 \quad (4)$$

采用 AHP-熵值法进行赋权,既能体现指标在定性基础上的量化,又保留了指标数据的定量关系,使指标权值更加科学合理。本文根据均值法,得到最终权重公式为

$$W_j = \frac{1}{2} (Q_j + Z_j)。 \quad (5)$$

### 2.2.2 非整次秩和比法

秩和比(RSR)法是一种集古典参数统计与近代非参数统计于一体的统计信息分析方法,是一种全新的广谱数量方法,具有较强的统计信息功能。它针对性强、操作简便、分析效果显著,已在多指标综合评价、统计质量控制、统计预测预报等方面得到广泛应用<sup>[18]</sup>。传统秩和比法在编秩时可能造成原始指标值定量信息缺失,为了真实反映指标数据差距,保留原指标值之间存在的定量线性关系,本文引入了非整次秩和比法,用类似于线性插值的方式对指标值进行编秩。非整次秩和比法的具体步骤如下:

(1)编秩,第  $i$  个对象在第  $j$  个指标的秩值  $R_{ij}$  公式为

$$R_{ij} = 1 + (m - 1)X'_{ij}。 \quad (6)$$

(2)利用秩值计算得到加权秩和比  $w_{\text{RSR}}$  值,公式为

$$w_{\text{RSR}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^n W_j R_{ij}, \quad (7)$$

其中: $n$  为指标个数; $W_j$  为第  $j$  个评价指标的权重。

(3)确定  $w_{\text{RSR}}$  分布,得到对应概率单位  $P_{\text{robit}}$  值。

将  $w_{\text{RSR}}$  值进行排序,值相同的作为一组,编制  $w_{\text{RSR}}$  频率分布表,列出各组频数  $f$ ,计算各组累计频数  $\sum f$ ;确定各组  $w_{\text{RSR}}$  的秩次范围  $R$  和平均秩次  $\bar{R}$ ;计算累计频率  $P = R/n \times 100\%$ 。根据累计频率,对照“百分数与概率单位对照表”,得出  $P_{\text{robit}}$  值。

(4)建立回归方程并计算。

以  $P_{\text{robit}}$  值为自变量,  $w_{\text{RSR}}$  值为因变量,建立回归方程,并计算样本城市的 RSR 拟合值。

(5)分档排序并检验。

根据各分档方差一致原则,对样本城市的 RSR 拟合值进行分档排序,并验证差异具有显著性。

## 2.3 对象选取

先进制造业是现代产业体系的核心组成部分,是实现国家高质量发展的重要基石。国内学者对国家创新城市、重点省会城市及经济特区等方向已有不同程度的研究,本文立足国内先进制造业城市,以赛迪顾问(<http://www.ccidconsulting.com/>)2024年12月发布的针对全国293个地级市的《2024年先进制造业

城市研究》榜单的前十强城市(深圳、苏州、广州、宁波、长沙、青岛、杭州、成都、武汉、南京)为样本(以下简称样本城市)。赛迪顾问直属于工业和信息化部中国电子信息产业发展研究院,是国内首家上市咨询企业,它从2018年开始每年发布先进制造业城市发展指数,是城市经济的第一智库,企业战略的第一顾问。

## 2.4 数据来源及处理

以样本城市专利授权日期为2015-01-01至2024-12-31的高价值专利生成原始数据矩阵 $X$ (数据库检索时间:2025年1月1日),专利数据来源于智慧芽全球专利检索数据库PatSnap(<https://www.zhiihuiya.com/>),PatSnap数据库收录了全球172个专利受理局的1.9亿以上个专利数据和科技文献等数据,相关数据每日更新,符合本文的研究要求。

为减少数据的量纲差异,统一利用公式(8)对样本城市的原始数据进行归一化处理,得到数据矩阵 $X'$ :

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \text{Min}(X_j)}{\text{Min}(X_j) - \text{Max}(X_j)}, \quad (8)$$

其中, $\text{Min}(X_j)$ 和 $\text{Max}(X_j)$ 分别为评价对象在第 $j$ 指标上的最小值和最大值。

应用公式(1~5)得到各指标的权重,如表2所示。由表2可知,标准必要专利( $X_3$ )、中国专利奖( $X_4$ )和价值超百万专利( $X_7$ )的权重均超过0.1,非常符合技术创新策源力评价预期,说明指标赋权结果合理、可信。

表2 各指标权重

变量	AHP 权重	熵值法权重	综合权重
$X_1$	0.029	0.059	0.044
$X_2$	0.040	0.093	0.067
$X_3$	0.220	0.296	0.258
$X_4$	0.199	0.069	0.134
$X_5$	0.037	0.041	0.039
$X_6$	0.063	0.127	0.095
$X_7$	0.145	0.172	0.158
$X_8$	0.089	0.043	0.066
$X_9$	0.089	0.036	0.062
$X_{10}$	0.089	0.063	0.076

应用非整次秩和比法得到样本城市的RSR拟合值回归方程:RSR拟合值 =  $0.207 \times P_{\text{robit}} - 0.764$ ,检验统计量 $F = 22.002$ ,概率值 $P = 0.0008 < 0.001$ ,回归方程具有统计意义。利用回归方程得到各样本城市的RSR拟合值。根据秩和比法分档原则,在各分档方差一致,具有显著性差异的前提下,将样本城市的技术创新策源能力划分为3个等级,如表3所示。从表3可以看出,第一等级包括深圳和广州,其RSR拟合值大于0.477;第二等级包括杭州、南京、苏州、武汉、成都、青岛、宁波7座城市,RSR拟合值在0.063~0.477区间;第三等级包括长沙,RSR拟合值小于0.063。

表3 样本城市分档结果及RSR拟合值分布

等级	百分位数临界值	RSR 临界值(拟合值)	城市
第一等级	>84.134	>0.477	深圳(0.676)、广州(0.535)
第二等级	84.134~15.866	0.063~0.477	杭州(0.444)、南京(0.379)、苏州(0.323)、武汉(0.270)、成都(0.218)、青岛(0.162)、宁波(0.096)
第三等级	<15.866	<0.063	长沙(0.005)

### 3 结果分析

#### 3.1 样本城市技术创新策源能力分析

第一等级表现优异。深圳和广州的技术创新策源能力 RSR 拟合值分别为 0.676 和 0.535,位列样本城市第一、二名。被公认为“中国硅谷”的深圳,堪称制造业高质量发展的城市样板。2015—2024 年,深圳的授权发明专利超 38 万件,占样本城市总授权发明专利的 23.06%,是唯一一个授权发明超 30 万件的先进制造业城市。10 年间,深圳在全球 41 个国家/地区授权 9 000 多件发明专利,其标准必要专利雄冠样本城市,占样本城市相关专利的 98.83%。广州作为广东省的省会城市和华南地区的经济中心,拥有华南理工大学、中山大学等丰富的高教、科研资源,其质押专利居样本城市榜首,专利授权量、中国专利奖和许可专利排名第二,其他创新策源指标表现均衡,体现了超强的技术创新策源能力。

第二等级差距明显,各有长项短板。第二等级的技术创新策源能力 RSR 拟合值集中于 0.096~0.444,总体实力较第一等级略有逊色,是先进制造业发展中的骨干城市,主要来源于沿海发达城市群和中西部中心城市。江苏、浙江作为长三角的核心省份,两省的技术创新策源能力有目共睹,在第二等级中占 57.14%,撑起了第二等级的大半江山,杭州、南京、苏州位居第二等级前列。杭州得益于数字经济领域优势,质押专利第一,授权发明、境外授权专利、许可专利第二,但标准必要专利较少。南京的许可专利位列榜首,转让专利和质押专利排名第三,但价值超百万专利不多。“最牛地级市”苏州的中国专利奖、高价值专利、转让专利和质押专利名列前茅,但还没有产出标准必要专利。成都和武汉作为中西部的两大中心城市,全国重要的工业、信息化产业基地,分别位列样本城市技术创新策源能力的第六名和第七名。青岛作为样本城市中唯一一座北方城市,拥有百年工业历史,近年来瞄准世界工业互联网作为未来制造业竞争的制高点,重点围绕智能家电、轨道交通装备、新能源汽车等领域,协同创新和中国专利奖和境外授权专利等指标表现突出,技术创新策源能力位列样本城市第八名。宁波作为国家级专精特新“小巨人”企业上榜最多的地级城市,单项冠军企业、隐形冠军企业众多,转让、质押和许可专利指标表现突出。

第三等级相较于其他等级存在较大差距。样本城市中长沙属于第三等级,其中国专利奖和许可专利指标都有不俗的表现,但相比其他样本城市,还有很大的提升空间。

#### 3.2 样本城市技术创新策源能力演进分析

根据秩和比法评价特点,数据集内数据差值越大,RSR 拟合值离散程度越高。因此,同一数据集内,RSR 拟合值和排名均可反映研究对象的优劣,对于不同数据集,可以利用数据集内 RSR 拟合值排名进行粗略评价。本文根据 RSR 拟合值排名,将排名保持不变或稳步提升的城市称为稳步提升型城市,排名出现 3 次及以上下降但整体上升的城市称为波动提升型城市,其他为波动下降型城市。

##### 3.2.1 横向演进

以城市为序列,计算各年度样本城市的技术创新策源能力 RSR 拟合值,可以横向揭示样本城市间的技术创新策源能力差距。图 1 展示了各年度样本城市的 RSR 拟合值排名。2016 年深圳率先推出“科创 62 条”,提出 47 条新增政策,15 条加码政策,从顶层设计上为深圳科技创新按下了新一轮“加速键”。由图 1 可知,深圳一直稳居第一。自浙江省 2018 年 12 月制定“科技新政 50 条”以来,杭州以数字经济为突破口,大力实施创新驱动发展战略,技术创新策源能力快速提升,由 2018 年的第七名跃升到 2024 年的第二名。苏州是先进制造业城市

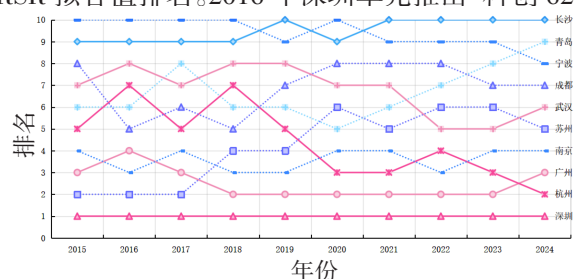


图 1 2015—2024 年样本城市 RSR 拟合值排名

的佼佼者,2015—2017年的RSR拟合值排名稳居第二,但随后几年被广州、杭州和南京赶超,排名降至第五、六名。2018年获批建设国家自主创新示范区后,宁波的排名开始提升。

根据前文定义,深圳、杭州、广州和宁波属于稳步提升型城市,南京、武汉和成都属于波动提升型城市,苏州、青岛和长沙属于波动下降型城市。

### 3.2.2 纵向演变

以时间为序列,计算各年度样本城市的技术创新策源能力RSR拟合值,可以更立体、直观地展示各城市的技术创新策源能力演变趋势。被引证专利、转让、质押和许可专利受时间影响不及其他年份,可能导致近两年排名有所下降。从2015—2024年,样本城市的RSR拟合值整体呈现上升趋势,发展态势良好,稳步提升型城市有深圳、广州、杭州、南京、苏州、成都和青岛,波动提升型城市有武汉、宁波和长沙,没有波动下降型城市。

为更精准地反映各城市的技术创新策源能力变化细节,本文在样本城市各年技术创新策源能力RSR拟合值的基础上计算各年增长率,如表4所示。由表4可以看出,2015—2024年RSR拟合值平均年增长率排名前三名的城市分别是武汉、成都和宁波。武汉的技术创新策源能力增长最快,波动也最大,2016—2017年和2019—2020年的增长率超90%,排名也随之从2016年的第十名跃升到2017年的第六名,从2019年的第七名跃升到2020年的第一名。成都2015—2016年、2017—2018年和2020—2021年的年增长率均超过30%。苏州的平均年增长率最低,只有5.56%,缘于其在2018—2019年的最大负增长率,排名从第一名降至第八名;但纵观其在2023—2024年的增长率,排除时间影响,其RSR拟合值排名位居10年来的第二名,说明苏州本身有很大的创新策源实力和潜力。

表4 2015—2024年样本城市RSR拟合值年度增长率

年份	广州	杭州	南京	苏州	武汉	成都	青岛	宁波	长沙
2015—2016	27.92	21.14	46.91	7.53	-23.90	55.76	18.53	48.13	-20.89
2016—2017	15.96	12.42	-18.32	17.29	92.15	-15.09	11.50	-8.56	45.45
2017—2018	11.52	63.28	12.12	23.13	-19.62	46.69	79.63	-11.02	31.85
2018—2019	9.57	-22.12	17.84	-27.27	12.54	-9.50	-25.63	42.41	-7.90
2019—2020	44.83	16.20	7.34	15.83	91.57	21.26	18.22	-6.74	65.93
2020—2021	-10.63	26.46	16.03	-6.83	-24.21	35.28	-26.13	57.11	-13.74
2021—2022	-8.53	-36.58	25.97	11.78	-16.80	17.28	23.36	-12.61	-17.81
2022—2023	42.52	15.37	-12.57	-13.82	35.16	-24.28	-24.45	-16.13	8.96
2023—2024	-35.42	-19.87	-15.89	22.44	-19.00	-9.01	14.84	8.10	-28.68
平均年增长率	10.86	8.48	8.83	5.56	14.21	13.15	9.99	11.19	7.02

## 3.3 样本城市技术创新策源特征及演进分析

### 3.3.1 样本城市技术创新特征分析

各样本城市的生产策源力、影响策源力、战略策源力和市场策源力RSR拟合值及排名如表5所示。从表5可以了解各样本城市技术创新的强项和短板:深圳各项特征值都遥遥领先,稳居第一;杭州和广州的生产策源力相差不多,分别排第二和第三名,但与深圳差距甚大;广州的影响策源力排名第二,其中国专利奖数量仅次于深圳,远多于其他样本城市;影响策源力是杭州的短板,其标准必要专利稀少,中国专利奖数量偏少,应加强在这些方面的布局;南京的战略策源力有很好的表现,在样本城市中排第二;青岛的战略策源力高于其他几项,居第五名,但市场策源力在样本城市中居第九位;宁波的市场策源力是强项,居第七位,而生产策源力和影响策源力则有待加强。

表5 样本城市技术创新策源特征 RSR 拟合值和排名情况

城市	生产策源力		影响策源力		战略策源力		市场策源力	
	RSR 拟合值	排名	RSR 拟合值	排名	RSR 拟合值	排名	RSR 拟合值	排名
深圳	0.694	1	0.635	1	0.745	1	0.703	1
杭州	0.358	2	0.275	5	0.485	3	0.565	2
广州	0.351	3	0.492	2	0.411	4	0.476	3
南京	0.318	4	0.332	4	0.587	2	0.412	4
苏州	0.306	5	0.399	3	0.289	6	0.357	5
武汉	0.271	6	0.221	6	0.230	7	0.305	6
成都	0.255	7	0.044	9	0.167	8	0.199	8
青岛	0.174	8	0.168	7	0.348	5	0.135	9
长沙	0.149	9	0.111	8	-0.009	10	0.045	10
宁波	0.134	10	-0.049	10	0.093	9	0.254	7

### 3.3.2 样本城市技术创新特征演进分析

图(2~5)展示了各年度样本城市技术创新特征的演进变化,大部分样本城市的生产策源力 RSR 拟合值排名整体相对稳定,武汉和广州的排名波动最大。2019年,广州、杭州、武汉和苏州的排名发生了较大变化。自贯彻落实“科创12条”实施细则以来,广州的生产策源力由2015、2016年的第五、六名跃升到2019、2023、2024年的第二名,成效显著。苏州被誉为世界工厂,外资占了经济的一半,随着国际形势变化,技术创新主体不确定性增加,苏州由2018年的第二名退到2019年的第七名,但2022年开始苏州的生产策源力排名又开始稳步提升,2024年回归到第四名。

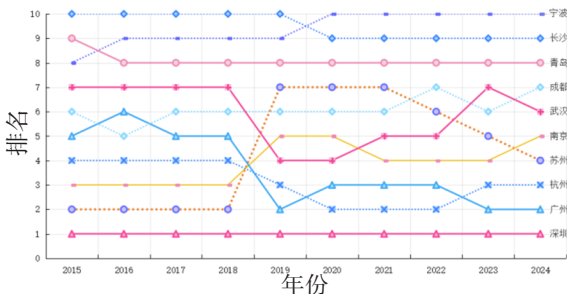


图2 2015—2024年样本城市生产策源力 RSR 拟合值排名

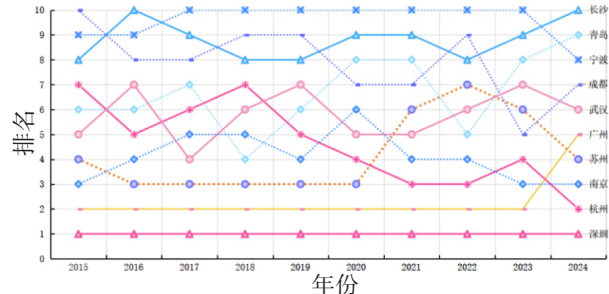


图3 2015—2024年样本城市影响策源力 RSR 拟合值排名

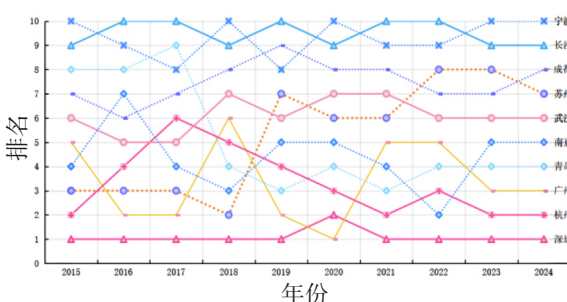


图4 2015—2024年样本城市战略策源力 RSR 拟合值排名

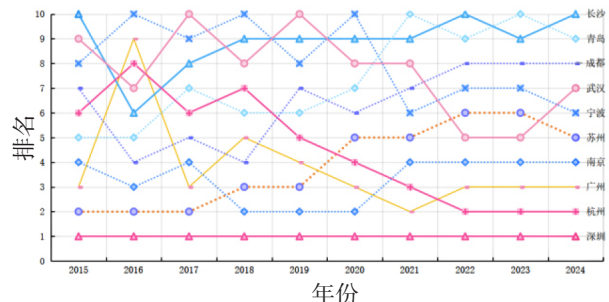


图5 2015—2024年样本城市市场策源力 RSR 拟合值排名

从图(3~5)可以看出,除深圳、广州和宁波外,各年度样本城市技术创新的影响策源力、战略策源力和市场策源力相对波动较大:自浙江省“科技新政50条”颁布后,杭州的影响策源力和市场策源力发展迅猛,排名提升迅速;2020年广州的战略策源力排名超过深圳,位居第一,但迅速回落到第五名;广州的市场策源力在2016年跌至谷底后迅速回升;宁波在2021年和2024年的市场策源力排名创下最好成绩;武汉的市场策源力在2022、2023年均达到第五名。

## 4 结论与启示

### 4.1 结论

经过多年的高速发展,我国制造业城市的技术创新进入跟跑、并跑、领跑“三跑并存”新阶段,技术创新策源能力取得了显著成效。基于本文构建的技术创新策源能力评价体系可以得出以下结论:

(1)样本城市技术创新策源能力差距明显。深圳和广州作为第一等级,凭借头部创新型科技企业和优质高校资源领跑技术创新发展,表现优异。沿海发达城市群如杭州、南京、苏州则凭借雄厚的实体经济优势和独特的地理优势支撑技术创新发展。武汉、成都等中西部中心城市基于其重要的工业化、信息化产业基地发展迅速。长沙的技术创新策源能力稳步提升,但距离其他样本城市还有很大提升空间。

(2)样本城市的技术创新策源力提升差异。横向而言,深圳、杭州、广州和宁波属稳步提升型城市,南京、武汉和成都属波动提升型城市,苏州、青岛和长沙属波动下降型城市;纵向而言,稳步提升型城市有深圳、广州、杭州、南京、苏州、成都和青岛,波动提升型城市有武汉、宁波和长沙,无波动下降型城市。

(3)样本城市的技术创新策源特征。整体而言:深圳各项特征值都遥遥领先;杭州和广州的生产策源力分别排第二和第三名,但与深圳差距甚大;广州的影响策源力排名第二,但杭州的影响策源力却是短板;南京和青岛的战略策源力表现优秀,分别排第二和第五名,但青岛的市场策源力只排第九名;宁波的市场策源力是强项,但生产策源力和影响策源力则有待加强。纵向而言:大部分样本城市的生产策源力排名相对稳定,影响策源力、战略策源力和市场策源力相对波动较大;各样本城市的创新策源特征各有强项和短板,竞争非常激烈,强有力的政策措施对其有关键的指挥棒和催化作用。

### 4.2 启示

当前,国际形势复杂多变,只有不断提升技术创新策源能力,提升城市创新的内生动力,才能在技术创新增长极踔厉奋发,奋勇向前。

#### 4.2.1 谋划技术创新策源保障力:做好顶层设计的大文章

围绕科技前沿和经济主战场,前瞻布局面向国家战略需求和城市产业发展的重大科技项目,建立集境内外高校、科研院所、企业、政府于一体的开放式创新平台,构建“基础研究—技术攻关—成果产业化—科技金融—人才支撑”全过程创新生态链。

#### 4.2.2 激发技术创新策源驱动力:做好“0→1”的大文章

当代卫星、超导、核能、航空航天等高科技的突破创新,90%源于基础研究的发展<sup>[19]</sup>。持续加大基础研究投入,保障技术创新策源的根基和活力。深圳率先规定市级科研资金每年至少30%用于基础研究和应用基础研究<sup>[20]</sup>。华为公司从1992年起规定,每年按销售额的10%投入研发<sup>[21]</sup>,2021年的研发经费达到全年收入的22.4%。

#### 4.2.3 磨砺技术创新策源战略攻坚力:做好“1+1>2”的大文章

吸引国际高端科技人才及创新团队加盟,鼓励多组织、多区域协同攻坚,形成交叉、集成创新优势,实现重大原始创新策源和“卡脖子”问题破解。

#### 4.2.4 增强技术创新策源市场转化力:做好成果转化的大文章

持续推动产学研用深度融合,把实验室建在产业生产线上,促进技术供需对接、科技成果的“沿途下蛋,就地转化”,激励科技人员以科技成果使用权作价投资孵化科技型企业,以技术入股、灵活成果转化收益分配制度等多重举措,推动创新链、产业链协同提升,打通原始创新到产业发展的“最后一公里”。

**参考文献:**

- [1]陈超. 如何理解创新策源能力[J]. 竞争情报, 2018(4):3.
- [2]敦帅,陈强,马永智. 创新策源能力评价研究:指标构建、区域比较与提升举措[J]. 科学管理研究, 2021,39(1):83-89.
- [3]卢超,李文丽. 京沪深创新策源能力评价研究:基于国家科学技术“三大奖”的视角[J]. 中国科技论坛, 2022(2):151-161.
- [4]王少. 科技创新策源地:概念、内涵与建设路径[J]. 科学管理研究, 2021,39(2):17-21.
- [5]敦帅,陈强. 创新策源能力:概念源起、理论框架与趋势展望[J]. 科学管理研究, 2022(4):33-41.
- [6]袁野,曹倩,陶于祥,等. 中国原始创新策源能力的统计测度、区域差距及动态规律[J]. 科技管理研究, 2024,44(14):86-93.
- [7]朱梦菲,陈守明,邵悦心. 基于 AHP-TOPSIS 和 SOM 聚类的区域创新策源能力评价[J]. 科研管理, 2020,41(2):40-50.
- [8]张金福,刘雪. 我国地方创新策源能力的模糊综合评价研究[J]. 科技管理研究, 2021,41(9):8-14.
- [9]谢婧青. 科技创新策源能力:影响因素与提升路径[J]. 上海经济研究, 2023(2):64-77.
- [10]刘琦. 粤港澳大湾区科技创新策源能力评价研究[J]. 经济体制改革, 2021(3):65-72.
- [11]宁连举,肖玉贤,刘经涛,等. 跨行政区域创新策源能力评价与实证:基于熵权法、TOPSIS 法、灰色关联分析[J]. 科技管理研究, 2021,41(20):44-51.
- [12]王香莲,徐萍,胡金杰. 专利视角下长三角高校技术创新策源分析[J]. 台州学院学报, 2023,45(6):77-86.
- [13]衣春波,赵文华,邓璐芴,等. 基于专利信息的技术创新策源评价指标体系构建与应用[J]. 情报杂志, 2021,40(2):55-62.
- [14]FM S,DIETMAR H. Technology policy for a world of skew-distributed outcomes.[J].Research Policy,2000(29):559-566.
- [15]刘勤,杨玉明,刘友华. 高价值专利评估建模与实证[J]. 情报理论与实践, 2021,44(2):6.
- [16]范思博. 高通的全球反垄断调查与标准必要专利研究[J]. 情报杂志, 2021,40(4):92-100.
- [17]苏屹,李忠婷. 区域创新系统主体合作强度对创新绩效的影响研究[J]. 管理工程学报, 2021,35(3):64-76.
- [18]李勤敏,郭进利. 基于主成分分析和神经网络对作者影响力的评估[J]. 情报学报, 2019,38(7):709-715.
- [19]樊增强. 基础研究与技术创新能力提升[J]. 东北师大学报(哲学社会科学版), 2020(2):93-102.
- [20]乔小燕,张浩博. 苏州与北上深杭独角兽企业成长环境对比研究[J]. 现代商贸工业, 2023,44(6):6-8.
- [21]苏佳丽,邓锴. 从电商经济的发展态势分析我国经济的可持续增长[J]. 现代商业, 2019(32):75-77.

## Analysis on the Evolution and Characteristics of Technological Innovation Source Capability of Advanced Manufacturing Cities in China —Taking Prefecture-Level Manufacturing Cities as an Example

Wang Xianglian

(Library, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

**Abstract:** The technology innovation source capability is the cornerstone for developing new forms of productive forces and promoting an innovation-driven country. Based on high-value patents from 2015 to 2024, this article comprehensively utilizes the AHP(Analytic Hierarchy Process)-Entropy method and the non-integer rank-sum ratio method to analyze the technology innovation source capability, evolution trends, and evolution characteristics of the top 10 prefecture-level cities in national advanced manufacturing industry from four dimensions: production sourcing power, influence sourcing power, strategic sourcing power, and market sourcing power. The research results show that there are significant differences in the technology innovation source capabilities among the sample cities; and through horizontal and vertical comparisons, the differences in the improvement of technology innovation sourcing power among the sample cities are clearly revealed. Additionally, based on the technology innovation source characteristics of each city, their strengths and weaknesses in development are also analyzed.

**Keywords:** technological innovation source capability; high-value patents; analytic hierarchy process method; entropy method; non-integer rank-sum ratio method

# 社区老年人跌倒调查及其危险因素研究

## ——以浙江省台州市黄岩区为例

郑 媚<sup>1</sup>, 舒幼平<sup>1</sup>, 郑超男<sup>2</sup>

(1. 台州市黄岩区疾病预防控制中心 慢病科, 浙江 台州 318020;

2. 台州市疾病预防控制中心(台州市卫生监督所), 浙江 台州 318000)

**摘要:**老年人跌倒是我国65岁及以上人群伤害死亡的首要原因,也是严重威胁该群体生命健康的重要公共卫生问题。本文调查了浙江省台州市黄岩区60岁及以上老年人的跌倒发生现状及相关危险因素,以期为制定针对性的老年人跌倒防治措施提供科学依据。采用多阶段分层整群随机抽样法,抽取黄岩区两个乡镇(街道)共648名60岁及以上老年人,通过面对面问卷调查收集相关信息。结果显示:黄岩区60岁及以上老年人的跌倒发生率为13.73%;跌倒发生时间主要集中在夏季和春季,发生地点以道路、田地和卧室为主,发生时的主要活动为步行。单因素分析结果显示,年龄、文化程度、睡眠质量、害怕跌倒、使用手杖、骨质增生及眩晕症是老年人跌倒的危险因素;多因素logistic回归分析结果显示,年龄、睡眠质量、害怕跌倒、骨质增生和眩晕症是该人群跌倒的独立影响因素。

**关键词:**老年人;社区;跌倒发生率;影响因素

DOI:10.13853/j.cnki.issn.1672-3708.2026.03.009

## 0 引言

在我国老龄化进程持续推进的背景下,老年人跌倒已成为65岁及以上人群伤害死亡的首要诱因,同时也是当前公共卫生领域亟须重点关注的、危害老年群体生命安全与健康质量的关键问题<sup>[1-2]</sup>。老年人跌倒后,轻者活动受限、生命质量下降,重者可致残疾甚至死亡<sup>[3]</sup>。世界卫生组织(WHO)数据显示,跌倒是全球老年人面临的主要公共卫生问题,65岁及以上老年人跌倒发生率达28%~35%<sup>[4]</sup>;在我国,60岁及以上老年人的跌倒发生率为19.30%,而跌倒相关死亡已成为65岁及以上老年人伤害死亡的首要原因<sup>[5]</sup>。老年人跌倒的原因比较复杂,可以分为内在因素和外在因素,早期识别危险因素并实施针对性干预,可以有效降低跌倒发生率<sup>[6]</sup>。2024年黄岩区60岁及以上老年人口占比29.10%,其中65岁及以上人口占比达20.77%,是台州市老年老龄化程度最高的地区之一。基于此,本文通过调查黄岩区社区老年人跌倒发生情况及其危险因素,明确其流行病学特征,为当地开展老年人跌倒预防控制工作提供科学依据。

## 1 对象与方法

### 1.1 对象来源

调查对象为黄岩区选中的两个乡镇(街道)的常住老年人。调查对象纳入标准:(1)年龄60岁及以上;(2)过去1年内在选中的村居中生活满6个月;(3)能进行有效交流,或者身边有人能代答。排除标准:

收稿日期:2025-12-07

基金项目:浙江省疾病预防控制计划项目(2025JK314)

作者简介:郑 媚(1989—),女,浙江临海人,主管医师,主要从事慢性病防治等研究。

(1)处于疾病危重期不能参与调查;(2)自身存在认知及交流障碍且身边无人代答。

采用多阶段分层整群随机抽样方法(PPS)随机抽取1个街道和1个乡镇,按照性别、年龄分层随机抽取老年人开展调查,其中:男、女比例为1:1;60~69岁、70~79岁、80岁及以上3个年龄段的人数比为1.6:1.3:1;每个行政村/村居各抽取324人。本次调查对象由浙江省疾病预防控制中心统一抽样,最终确认调查对象648人,人口学资料由台州市黄岩区公安分局提供。

## 1.2 调查方法及内容

采用统一的调查问卷,由经过培训的调查员,严格按照《浙江省社区老年人跌倒流行病学调查及跌倒风险评估方法评价项目工作手册》要求,对调查对象进行面对面问卷调查,所有调查对象均须签署知情同意书。调查内容包括:(1)调查对象的基本情况,如年龄、性别、婚姻、文化水平等;(2)调查对象跌倒相关情况,如过去1年的跌倒次数等;(3)调查对象跌倒发生因素,如患慢性病情况、生活自理能力等。

## 1.3 质量控制

调查前对所有调查人员开展统一培训;现场调查阶段采用市、县两级抽样复核机制:数据采集统一通过平板电脑完成,调查结束后即时上传到指定数据库。黄岩区疾病预防控制中心(以下简称黄岩区疾控中心)负责项目资料的收集、保存与上报;浙江省疾病预防控制中心(以下简称浙江省疾控中心)负责数据的审核和清理,针对发现的问题数据及时反馈,由调查人员及时完成核实和补充。

## 1.4 统计学分析

文章采用SPSS 25.0统计软件进行统计分析。计量资料以 $\bar{x} \pm S$ 表示,采用构成比或率表示,组间率比较采用 $\chi^2$ 检验,老年人跌倒相关因素采用logistic回归模型进行分析。统计分析采用双侧检验,检验水准 $\alpha = 0.05, P < 0.05$ 表示有统计学意义。

# 2 结果

## 2.1 调查对象的基本情况

本次共调查老年人648名,男、女各324名,平均年龄为(73.030±8.717)岁,平均睡觉时间(7.730±1.504)h;文化程度方面,小学及以下占58.64%,初中占19.75%,高中及以上占21.64%;婚姻状况中,已婚占68.67%,离婚占12.35%;居住状况以与家人同住为主(85.96%),独居占12.04%;近3个月每天持续10 min以上身体活动者比例为16.36%;患慢性疾病情况,高血压患者居多,占47.53%,糖尿病、心脏病、脑卒中、慢性支气管炎、哮喘患者分别占18.06%、4.63%、4.48%、3.24%、0.62%。

## 2.2 跌倒发生情况

调查发现,过去1年中发生过跌倒的老年人共89人,累计跌倒98次,跌倒发生率为13.73%。其中有6人发生2次及以上跌倒,占跌倒总人数的6.74%,跌倒次数最多者1年内累计发生5次。男性跌倒发生率为12.96%,女性跌倒发生率为14.51%,男女跌倒发生率差异无统计学意义( $\chi^2=0.326, P=0.568$ )。跌倒发生高度为同一平面的占77.60%;跌倒发生时间主要集中在夏季和春季,夏季(6—8月)占40.82%,春季(3—5月)占32.65%;跌倒地点主要发生在道路(24.49%)、田地(22.45%)和卧室(17.35%),这三者占64.29%;跌倒发生时的活动以步行为主,占37.08%,其次为工作时,占21.35%。

## 2.3 跌倒影响因素的单因素分析

跌倒影响因素调查的单因素分析如表1所示。一般情况单因素分析结果显示:年龄、文化程度、睡眠质量、害怕跌倒、使用手杖的差异有统计学意义( $P < 0.05$ );性别、婚姻、是否同住、身体活动、生活自理能

力差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。疾病史相关情况单因素分析结果显示:骨质增生、眩晕症差异有统计学意义( $P < 0.05$ );高血压、糖尿病、心脏病、脑卒中、哮喘、慢性支气管炎、关节炎、骨质疏松、帕金森、阿尔茨海默病、视力障碍、足部疾病和肿瘤差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。药物服用情况单因素分析显示:抗精神病药、抗抑郁药、抗癫痫药、利尿剂、镇静类药、强心苷类药、阿片镇痛药差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。

表1 黄岩区老年人跌倒影响因素的单因素分析( $n=648$ )

影响因素	类别	跌倒发生率/%(n/总例数)	$\chi^2$	$P$
性别	男	12.96(42/324)	0.326	0.568
	女	14.51(47/324)		
年龄	60~69岁	8.75(23/263)	10.026	0.007
	70~79岁	15.81(34/215)		
	≥80岁	18.82(32/170)		
婚姻	未婚	0(0/4)	0.751	0.861
	已婚	13.64(76/557)		
	丧偶	15.00(12/80)		
	离婚	14.29(1/7)		
文化程度	小学及以下	16.84(64/380)	7.630	0.022
	初中	10.16(13/128)		
	高中及以上	8.57(12/140)		
同住	是	14.39(82/570)	1.696	0.193
	否	8.97(7/78)		
身体活动	是	18.87(20/106)	2.819	0.093
	否	12.73(69/542)		
生活自理能力	完全正常	12.90(68/527)	1.758	0.415
	不同功能程度下降	16.42(11/67)		
	明显的功能障碍	18.52(10/54)		
睡眠质量	好	12.47(48/385)	13.937	0.003
	一般	13.88(29/209)		
	差	15.56(7/45)		
	非常差	55.56(5/9)		
害怕跌倒	是	23.36(32/137)	24.828	< 0.001
	否	11.15(57/511)		
助行辅具	从不使用	13.26(79/596)	8.655	0.013
	手杖	27.78(10/36)		
	助行器	0(0/16)		
高血压	是	16.23(50/308)	3.095	0.079
	否	11.47(39/340)		
糖尿病	是	13.68(16/117)	0.001	0.984
	否	13.75(73/531)		
心脏病	是	16.67(5/30)	0.043	0.837
	否	13.59(84/618)		

续表

影响因素	类别	跌倒发生率/%(n/总例数)	$\chi^2$	P
脑卒中	是	20.69(6/29)	0.701	0.402
	否	13.41(83/619)		
哮喘	是	25.00(1/4)	0.431	0.447
	否	13.66(88/644)		
慢性支气管炎	是	19.05(4/21)	0.157	0.691
	否	13.56(85/627)		
关节炎	是	19.44(7/36)	1.049	0.317
	否	13.40(82/612)		
骨质疏松	是	18.81(19/101)	2.603	0.107
	否	12.80(70/547)		
骨质增生	是	36.84(7/19)	8.821	0.003
	否	13.04(82/629)		
帕金森	是	25.00(1/4)	0.431	0.447
	否	13.66(88/644)		
阿尔茨海默病	是	28.57(2/7)	0.354	0.248
	否	13.57(87/641)		
视力障碍	是	16.20(35/216)	1.667	0.197
	否	12.50(54/432)		
足部疾病	是	25.00(7/28)	3.135	0.090
	否	13.23(82/620)		
眩晕症	是	30.51(18/59)	15.414	< 0.001
	否	12.05(71/589)		
肿瘤	是	27.27(3/11)	1.731	0.188
	否	13.50(86/637)		
抗精神药	是	25.00(1/4)	0.431	0.447
	否	13.66(88/644)		
抗抑郁药	是	50.00(1/2)	2.227	0.256
	否	13.62(88/646)		
抗癫痫药	是	50.00(1/2)	2.227	0.256
	否	13.62(88/646)		
利尿剂	是	20.00(1/5)	0.001	1.000
	否	13.69(88/643)		
镇静类药	是	18.18(2/11)	0.187	0.654
	否	13.66(87/637)		
强心苷类药	是	50.00(1/2)	2.227	0.256
	否	13.62(88/646)		
阿片镇痛药	是	50.00(1/2)	2.227	0.256
	否	13.62(88/646)		

注:  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2.4 社区老年人跌倒影响因素的 logistic 回归分析

以是否跌倒为因变量(0=否,1=是),将单因素分析中有统计学意义的变量作为自变量进行二元 logistic 回归分析,结果显示:年龄、睡眠质量、害怕跌倒、骨质增生和眩晕症是黄岩区老年人跌倒的独立影响因素( $P < 0.05$ ),如表 2 所示。

表 2 黄岩区老年人跌倒流行病学调查因素的 logistic 回归分析

变量	分组	<i>b</i> 值	标准误差	Wald $\chi^2$ 值	<i>P</i> 值	OR 值	95%CI(OR)
年龄	—	0.025	0.015	3.036	0.041	1.026	1.012~1.055
	好			8.629	0.035		
睡眠质量	一般	-2.308	0.789	8.550	0.003	0.099	0.021~0.467
	差	-2.243	0.795	7.956	0.005	0.106	0.022~0.504
	非常差	-2.116	0.883	5.739	0.017	0.121	0.021~0.681
害怕跌倒	否						
	是	0.582	0.277	4.422	0.035	1.789	1.040~3.076
骨质增生	否						
	是	1.201	0.561	4.587	0.032	3.324	1.107~9.979
眩晕症	否						
	是	0.955	0.335	8.147	0.004	2.600	1.349~5.010

注: $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 3 讨论

本研究调查结果显示,黄岩区社区老年人跌倒的发生率为 13.73%,高于上海市青浦区<sup>[7]</sup>,低于杭州市富阳区<sup>[8]</sup>,其中男性跌倒发生率为 12.96%,女性跌倒发生率为 14.51%。

### 3.1 单因素分析结果

年龄方面:80 岁及以上组跌倒率最高,60~69 岁组跌倒率最低,这与高艳等<sup>[9]</sup>对驻京地区 60 岁以上老年人跌倒情况的研究结果一致,即年龄越大,跌倒的发生率越高。年龄是反复跌倒和跌倒后骨折的风险因素<sup>[10]</sup>,随着年龄的增长,老年人体质虚弱,合并多种疾病,身体机能逐渐减退,平衡能力下降,下肢肌肉减退,从而跌倒的风险增大<sup>[11]</sup>。文化程度方面:文化程度越高,健康意识越强,对跌倒防治知识的学习及接受能力越强,自我管理较好,跌倒的发生率就低,这与厦门市和唐山市对 60 岁以上老年人研究得出的结论一致<sup>[12-13]</sup>。De Roza 等<sup>[14]</sup>研究发现,使用手杖的老人具有较高恐惧心理,而害怕跌倒的恐惧心理是促进跌倒发生的危险因素,这与本文得出的使用手杖老年人跌倒发生率高的结论相吻合。

### 3.2 多因素 logistic 回归分析结果

logistic 回归分析结果显示,年龄、睡眠质量、害怕跌倒、骨质增生和眩晕症是黄岩区社区老年人跌倒的独立影响因素。睡眠质量是跌倒恐惧的危险因素之一<sup>[15]</sup>,睡眠质量不好会影响身体的激素分泌,从而影响身体的协调平衡性,导致跌倒发生的概率增加。骨质增生显著增加老年人跌倒发生率,由于骨质增生多发生在脊椎、腰椎、膝关节及足跟等部位,易引起不同程度的疼痛或麻木,而疼痛症状及其严重程度均与老年人跌倒存在明显的关联<sup>[16]</sup>,进而增加跌倒发生风险。

眩晕症是指患者感到自身或周围环境物体旋转或摇动的一种主观感觉障碍,常伴有客观的平衡障碍和一般无意识障碍。引起眩晕的原因众多,如睡眠质量不好、用药、慢性疾病等,从而引发患者的跌倒。已有研究报道,20%~85%的老年人存在害怕跌倒的心理<sup>[17]</sup>,近1年内发生过跌倒的老年人,其产生害怕跌倒情绪的概率是无跌倒史的6.41倍<sup>[18]</sup>。本文研究结果与上述结论一致,进一步证实害怕跌倒是老年人跌倒发生的独立影响因素。鉴于老年人对跌倒的普遍恐惧心理会显著限制其活动能力、降低生活质量,并可能形成“恐惧—活动减少—功能下降—更易跌倒”的恶性循环,相关部门应将老年人跌倒防治工作的干预重心前移,高度重视老年人跌倒恐惧心理的疏导,同时开展系统化、个性化的健康教育,包括传授防跌倒知识、平衡能力训练指导、居家环境改造及科学用药指导等多方面内容,从根本上提升老年人的防跌倒自信心与行动能力,最终实现老年人跌倒的有效预防。

### 3.3 跌倒发生特征与环境干预要点

跌倒的发生季节主要集中在夏季和春季,黄岩区属于典型的江南气候,3月份天气逐渐变暖,老年人外出活动机会增加,但衣服仍旧穿得较厚,活动受限,加上此时雨水开始增多,老年人在田地务农的机会增多,容易发生跌倒;而回南天、梅雨季节和台风等特殊天气的出现,也使室内容易出现湿滑,因此老年人在室内发生跌倒的情况也易发生。本文发现老年人跌倒一般出现在步行期间,这与以往研究中“老年人跌倒大多出现在走路过程中”的结论一致<sup>[19]</sup>。因此,建议相关部门在跌倒多发地段,如田地、公共道路、步道楼梯、乡间小路等增设防跌倒宣传标语,提供安全的环境和设施,尤其在极端天气出现期间加强宣传频次,降低户外跌倒风险;另外可以社区为依托,深入老年人家中进行适老化改造,如在卫生间、厨房等地方安装扶手、放置防滑垫,在卧室及走廊安装小夜灯等,切实提升老年人居住环境的舒适度和安全性。

### 3.4 研究结果差异及影响因素探讨

本文未发现不同性别的跌倒发生率差异有统计学意义,与陈洁等<sup>[12]</sup>和韦晓淋等<sup>[20]</sup>的研究结果不一致。由于本文抽样严格遵循男女比例1:1,60~69岁,70~79岁,80岁及以上3个年龄段的人数比为1.6:1.3:1,而苏州市和厦门市则只随机抽取了60岁以上人群,这可能在一定程度上降低了性别对结果的影响。相关研究<sup>[13,21]</sup>指出,高血压、糖尿病、脑卒中、哮喘、慢性支气管炎等慢性病可能会增加老年人跌倒发生率,而本文也未发现。血压和血糖控制不良可能引起老年人身体功能多方面的影响,如头昏、感知异常、肌肉平衡能力降低等,从而引起跌倒。而2024年黄岩区高血压、糖尿病的规范管理率分别为75.96%、78.74%,血压、血糖控制率分别为77.54%和60.18%,均远高于国家基本公共卫生服务规范中高血压规范管理率(65%)、血压控制率(45%)、糖尿病规范管理率(65%)及血糖控制率(40%)的要求。因此,良好的血压、血糖控制率对降低高血压和糖尿病患者跌倒率有积极的意义。黄岩区应持续结合国家基本公共卫生服务项目,加强对老年人及慢性病的健康管理工作,尽早发现慢性病,加强慢性病的预防和控制措施,提高健康宣教,对可能因慢性病及药物引起的跌倒进行知识普及,增强老年人的防跌倒意识。此外,本文调查对象中脑卒中、哮喘、慢性支气管炎的患病占比均低于5%,是其他地区同类型研究报道患病率的一半甚至更低。样本中此类慢性病患者占比偏低,可能导致本研究未能充分揭示这些慢性疾病与跌倒率发生的关联。

### 3.5 黄岩区老年人跌倒防控的现存问题与健康教育建议

虽然黄岩区社区老年人跌倒发生率低于全国(19.30%),但是综上所述,随着黄岩区老年人基数的不断增加,公共设施建设不够完善、健康教育覆盖不全等因素仍然存在,导致发生跌倒的风险依旧较高。因此,黄岩区老年人跌倒防治工作仍任重道远。相关部门可通过建立和完善制度,增加公共场所安全措施;也可通过制作并发放图文并茂、语言通俗的防跌宣传折页、海报和短视频,在社区公告栏、公交车屏、地方

电视台等渠道广泛传播。责任医生可结合日常管理服务的各类宣传活动,系统开展社区宣传教育,通过街道、社区养老服务中心和基层医疗机构,定期组织防跌倒知识讲座、现场演示及互动活动,向老年人及其家属普及跌倒常见原因、高风险环境特征及预防方法。

相关学术研究已证明<sup>[22-26]</sup>,八段锦和太极拳可以提高老年人肌耐力,从而降低跌倒发生率。当地政府可因地制宜,推动老年人平衡功能训练常态化,依托社区文化礼堂、老年活动中心、健身公园等场所,开设太极拳、八段锦和简易体操等适合老年人的集体锻炼课程,增强肌耐力、协调性和平衡能力。为提高训练的有效性,可培养社区志愿者或专业健身指导员,带领老年人开展日常训练,并提供居家平衡训练方法指导。目前黄岩区还未在社区普及开展老年人跌倒风险评估,卫生行政部门可制定政策,鼓励社区卫生服务中心和乡镇卫生院将跌倒风险评估纳入老年人健康管理常规内容,开展步态和平衡能力筛查,并为高风险人群制定个性化干预方案。

## 4 结语

黄岩区社区老年人跌倒发生风险较高,且风险随着年龄的增加而增加。根据 2024 年黄岩区死因登记数据,跌倒是该区 65 岁及以上老年人伤害死亡的首要原因;加之黄岩区作为台州市老龄化严重地区之一,老年人口比例持续攀升,老年人跌倒防治工作刻不容缓。为此,当地政府应通过加强环境改造、开展健康教育、推广平衡功能训练等针对性的防治措施,降低社区老年人跌倒风险,保障老年群体生命安全与健康质量。

### 参考文献:

- [1] 中国疾病预防控制中心慢性非传染性疾病预防控制中心,国家卫生健康委员会统计信息中心. 中国死因监测数据集 2018[M]. 北京:中国科学技术出版社,2019.
- [2] 孟九菊,徐小丹,张华,等. 虚拟情景互动训练对老年人跌倒风险的干预效果研究[J]. 中国康复,2020,35(1):43-46.
- [3] BERGEN G, STEVENS M R, BURNS E R, 等. 2014 年美国对 65 岁及以上老年人跌倒和跌伤的报告[J]. 上海预防医学,2018,30(9):794-798.
- [4] 康宁,于海军,陆晓敏,等. 中国老年人跌倒发生率的 Meta 分析[J]. 中国循证医学杂志,2022,22(10):1142-1148.
- [5] 张聪颖,耳玉亮,叶鹏鹏,等. 2020 年中国老年人伤害死亡特征分析[J]. 中国健康教育,2022,38(11):968-972.
- [6] 周知,龚涛. 老年人跌倒的危险因素[J]. 中华全科医师杂志,2016,15(8):580-582.
- [7] 叶开友,王森,吴周理,等. 上海市青浦区 60 岁及以上老年人跌倒风险评估及相关危险因素分析[J]. 中国初级卫生保健,2020,34(12):6-9.
- [8] 杨海峰,黄丹妮. 杭州市富阳区社区老年人跌倒发生现状及影响因素[J]. 江苏预防医学,2022,33(6):680-682.
- [9] 高艳,谭纪萍,马挺,等. 驻京地区 792 例老年人跌倒的发生率和危险因素调查[J]. 中华保健医学杂志,2023,25(1):51-54.
- [10] 王晓晨,李惠敏,陶东霞. 运动认知风险综合征对跌倒和反复跌倒及跌倒后骨折影响的前瞻性队列研究[J]. 中国实用护理杂志,2020,36(8):583-587.
- [11] 何长英,魏丽君,钟杏,等. 基于德尔菲法构建住院老年患者跌倒风险评估量表的研究[J]. 护士进修杂志,2017,32(9):771-774.
- [12] 陈洁,吴阿华,蓝彦琦,等. 厦门市老年人跌倒伤害特征及其影响因素研究[J]. 实用预防医学,2025,32(7):775-779.
- [13] 裴鑫悦,卢孟倩,邢凤梅. 社区老年人跌倒恐惧现状及影响因素分析[J]. 现代养生,2023,23(7):514-517.
- [14] DE ROZA J G, NG D W L, MATHEW B K, et al. Factors influencing fear of falling in community-dwelling older adults in Singapore: a cross-sectional study[J]. BMC Geriatr, 2022, 22(1):186.
- [15] HITA-CONTRERAS F, ZAGALAZ-ANULA N, MARTÍNEZ-AMAT A, et al. Sleep quality and its association with postural stability and fear of falling among spanish postmenopausal women[J]. Menopause, 2018, 25(1):62-69.

- [16]温绮慧,陈晓东,何凌骁,等.中国老年人不同疼痛程度与跌倒的关联研究[J].伤害医学(电子版),2023,12(3):19-25.
- [17]VO M T H, THONGLOR R, MONCATAR T J R, et al. Fear of falling and associated factors among older adults in Southeast Asia: a systematic review[J].Public Health,2023,222:215-228.
- [18]蒋婷婷.认知-运动干预对老年血液透析患者跌倒恐惧的效果研究[D].郑州:郑州大学,2020.
- [19]VERGHESE J, ANNWEILER C, AYERS E, et al. Motoric cognitive risksyndrome: multicountry prevalence and dementia risk[J].Neurology,2014,83(8):718-726.
- [20]韦晓淋,黄桥梁,陆艳.苏州市老年人跌倒伤害发生情况及影响因素分析[J].中国慢性病预防与控制,2021,29(9):684-688.
- [21]钟韵,刘宪峰,李高婷,等.重庆市南岸区老年人跌倒发生状况及影响因素分析[J].健康教育与健康促进,2025,20(3):251-254.
- [22]赵磊.健身气功八段锦对社区老年人跌倒风险及跌倒自我效能的影响[D].上海:上海师范大学,2021.
- [23]郑丽维,饶玉莲,方晓鸿,等.八段锦运动对老年原发性高血压患者跌倒效能和平衡能力的影响[J].军事护理,2024,41(12):15-18.
- [24]洪莹,陈旭艳.健身气功八段锦对老年人跌倒及平衡功能影响的 meta 分析[C]//中国体育科学学会体能训练分会.2024年第二届“一带一路”体能高峰论坛暨第二届全国体能训练年会论文摘要集.武汉:武汉体育学院,2024:84-85.
- [25]李欣欣,刘卉,马沐佳.太极拳与其他运动降低老年人跌倒风险的 Meta 分析[J].中国康复理论与实践,2022,28(10):1169-1177.
- [26]胡秀.八式太极拳练习对老年人平衡能力影响的研究[D].济南:山东体育学院,2021.

## Investigation on Falls among the Elderly in the Community and Research on Its Risk Factors

—Taking Huangyan District, Taizhou City, Zhejiang Province as an example  
Zheng Mei<sup>1</sup>, Shu Youping<sup>1</sup>, Jia Chaonan<sup>2</sup>

(1. Department of Chronic Disease, Huangyan Center for Disease Control and Prevention, Taizhou 318020, China;

2. Taizhou Center for Disease Control and Prevention (Taizhou Health Supervision Institute), Taizhou 318000, China)

**Abstract:** Falls are the leading cause of injury-related deaths among people aged 65 and above in China, and they pose a significant threat to the health and lives of this group, making it a major public health issue. This study aimed to understand the current situation of falls and related risk factors among the elderly aged 60 and above in Huangyan District, Taizhou City, Zhejiang Province, to provide a basis for the effective implementation of fall prevention measures for the elderly. A multi-stage stratified cluster random sampling method was used to select 648 elderly people aged 60 and above from two towns (sub-districts) in Huangyan District. Face-to-face questionnaire surveys were conducted to collect relevant information. The results demonstrated that the fall rate among the elderly aged 60 and above in the community of Huangyan District was 13.73%. The fall incidents mainly occurred in summer and spring, and the main locations were roads, fields, and bedrooms. The main activities at the time of falls were walking. Univariate analysis results indicated that age, educational level, sleep quality, fear of falling, use of walking sticks, osteophytes, and vertigo were risk factors for falls among the elderly. Multivariate logistic regression analysis results revealed that age, sleep quality, fear of falling, osteophytes, and vertigo were independent influencing factors for falls among the elderly in the community of Huangyan District.

**Keywords:** the elderly; community; incidence of falls; influencing factors

# 学科竞赛视域下地方应用型本科院校 生物科学专业人才培养的探索和实践

——以台州学院为例

王晓华,程瑾莹,程子良,李月灵

(台州学院 a.全省滨海受损生态系统修复重点实验室; b.生命科学学院, 台州 318000)

**摘要:**学科竞赛是培养本科生实践技能和创新能力的有效环节,是高校人才培养过程 and 高质量教育体系构建的重要方式之一。地方应用型本科院校作为创新型人才培养的重要基地,在培养复合型、创新型人才,以及促进高校产学研结合等方面发挥出越来越积极的作用。台州学院生命科学学院生物科学专业坚持“厚基础、重实践、强创新、精专业”的办学理念,以学科竞赛为抓手,通过学生全程参与项目及“以赛促学、以研提能”的培养模式,培养了具备扎实理论知识、实践能力和创新能力的应用型人才。基于此,本文以该专业为研究对象,深入探讨地方应用型本科院校依托学科竞赛培养高素质生物科学专业人才的实践措施,以期为构建高质量教育体系提供实践参考。

**关键词:**学科竞赛;地方应用型本科院校;生物科学;人才培养;创新型人才

DOI:10.13853/j.cnki.issn.1672-3708.2026.03.010

## 0 引言

新时代我国人才培养的核心任务是培养具有创新精神和实践能力的人才,要求各高校在教育改革中强化科研育人功能,深化创新创业教育改革,将创新创业教育贯穿于人才培养全过程<sup>[1-2]</sup>。地方应用型本科院校作为高等教育体系的重要部分,聚焦于培养适应区域经济社会发展需求的高素质人才,肩负着服务区域经济社会发展的重任<sup>[3]</sup>。生物科学专业是推动我国经济行稳致远和提质增效的新引擎,是驱动社会进步与科技创新的关键力量,生物科学专业的人才培养,不仅对推动学科发展、提高国家科技创新能力具有重要意义,更在保障人类健康、食品安全等方面有着不可替代的作用。

国家多项重要发展规划明确强调,生命科学当下已成为前沿科学研究的活跃领域,生物技术将成为促进未来发展的关键支撑力量。由此可见,生物科学领域的高素质拔尖创新人才,是服务国家发展战略不可或缺的重要支撑,高质量的生物科学人才培养也因此成为各高校关注的核心议题。诸多高校以学科竞赛为切入点,不断探索生物科学专业人才培养的有效路径,并将其作为检验高校创新人才培养质量的标尺<sup>[4-5]</sup>。台州学院作为地方应用型本科院校,秉持“立足台州、面向长三角”的办学思路,为地方经济社会发展输送了大批应用型人才。本文以台州学院生命科学学院生物科学专业为研究对象,系统总结学科竞赛在

收稿日期:2026-01-04

基金项目:浙江省“十四五”研究生省级教学改革常规项目(JGCG2024449);台州市产学研合作协同育人项目(台发改社会[2024]286号);台州学院实践教学改革专项项目(82023150)

作者简介:王晓华(1973—),女,黑龙江哈尔滨人,实验师,主要从事生物医药研究;李月灵(通信作者)(1989—),男,浙江衢州人,教授,博士,主要从事生物学研究。

培养大学生创新精神和实践能力过程中发挥的作用,并对人才培养实践中存在的问题进行梳理和深入探讨。

## 1 地方应用型本科院校生物科学专业人才培养的现状与问题

### 1.1 人才培养目标与社会需求脱节

生物科学是当前较富活力的交叉学科之一,它与理、工、农、医等各专业紧密交叉,培养的人才需要具备全面的知识素养、扎实的学科基础和过硬的实践创新能力<sup>[6-7]</sup>。在当前生物科学蓬勃发展的背景下,地方应用型本科院校纷纷开设该专业,毕业生数量增长较快,但高精尖人才仍显不足;与此同时,就业市场对于生物科学专业毕业生的专业技能要求日益严格,他们期望这些毕业生不仅掌握深厚的理论知识,还须具备出色的实践操作能力,能够将理论知识有效应用于实际生产和科研中。然而,当前众多地方应用型本科院校生物科学专业在人才培养上似乎未能紧密贴合这一社会需求。这一不匹配现象不仅削弱了毕业生的就业竞争力,还使得“就业难”这一困境愈发凸显。要使生物科学专业成为高水平且具有特色的专业,地方应用型本科院校应该依托自身优势,从实际出发,充分考虑地方对人才层次的需求,围绕地方支柱产业,服务地方经济发展,培养能在生物科学及相关领域从事科学研究、创新创业、科技推广、技术研发和管理工作的创新型人才。

### 1.2 实践平台有待完善

创新的动力来源于实践,创新的过程也是在实践中产生,缺少了实践,创新能力的培养也就无从谈起<sup>[8]</sup>。目前,大量地方应用型本科院校的实践平台有待完善,存在教学与科研脱节<sup>[9]</sup>、基础实验室设备不完善<sup>[10]</sup>、相关校企协同育人的具体实施多停留于协议层面<sup>[11]</sup>、学生缺乏充分的交流<sup>[12]</sup>等问题。这些问题不仅限制了学生实践能力的充分发展,还严重阻碍了他们创新思维和创新能力的培养。实践平台不完善,意味着学生难以获得将理论知识转化为实际操作技能的机会,导致他们在面对实际问题时手足无措,缺乏解决问题的能力 and 经验。只有为学生提供充足、高质量的实践机会,才能真正激发他们的学习热情,培养他们的创新能力,使他们能够适应社会发展的需要。

### 1.3 师资建设薄弱

教师的教学水平及科研能力决定着专业建设的水平,也是人才培养质量的保障。高素质应用型、创新型生物科学人才的培养,要求教师具备良好的专业理论知识和过硬的专业技能实操能力,同时还要具备丰富的企业经验和较高的教学水平。然而,在师资方面,多数高校教师以教学为主,缺乏从业背景和行业实践<sup>[13]</sup>,在培养应用型和创新型学生方面无法提供有力指导。师资建设的薄弱,导致教学内容与行业需求的脱节。教师们虽然理论功底深厚,但往往难以将最新的行业动态和技术革新融入课堂教学,导致学生所学知识与实际应用之间存在较大差距。此外,缺乏企业经验和实践能力的教师,在指导学生进行科研创新、解决实际问题时也显得力不从心,难以激发学生的创新思维 and 实践能力。因此,加强专业师资建设,引进具有丰富实践经验和较高教学水平的“双师型”教师,已成为提升人才培养质量、推动专业建设发展的关键所在。

## 2 依托学科竞赛培养高素质生物科学专业人才的实践措施

台州学院生命科学学院生物科学专业依托学科竞赛平台,通过组建高水平导师团队、搭建高水准科技创新实践平台、遴选产学研结合的竞赛选题、强化学生队员选拔和团队化长效建设等举措,着力培养生物科学领域高素质应用型人才。

## 2.1 以“立德树人”为核心,组建高水平导师团队

导师团队是高质量人才教育的核心要素之一,高水平导师是培养创新型人才的前提。只有组建高水平的导师团队,采取分工、合作方式,汇聚众人的智慧和能力,才能把握科技的前沿和热点,培养出具有创新型和实践型的高质量人才。目前,台州学院生命科学学院生物专业已建成一支具有10名教授、9名副教授和15名中级职称教师的导师团队,其中包括教育部新世纪优秀人才、浙江省高层次人才特殊支持计划领军人才、浙江省高校中青年学科带头人等学者。为了更好地落实立德树人根本任务,推进“三全育人”,学院制定并实施了本科生导师制,即以“专业负责人”为领航者,把握学科竞赛方向;以“专任教师”为指导者,引导学生在专业领域深入探索;以“班主任+辅导员”为辅助管理者,提供个性化的学业指导和心理支持。同时,由校外企业技术主管组成的一体化导师团队,全方位指导生物专业大学生开展学科竞赛活动。

## 2.2 以“协同创新”为关键,搭建高水准科技创新实践平台

搭建高水准的科技创新实践平台是大学生开展学科竞赛的硬件保障。为保障各项创新创业教育活动和人才培养工作的推进,台州学院生命科学学院以浙江省一流学科——生态学为依托,建有全省滨海受损生态系统修复重点实验室、省级生态定位观测研究站、校珍稀濒危植物园和校生态学实践基地等实践平台,并与浙江省农业科学院、台州市质量检测中心、浙江伟杰信生物科技有限公司等20余家企事业单位签订了合作协议,建立生物专业实践基地,为学生学习、科研和实践提供了保障。通过创新实践平台,学生能够及时了解各项学科竞赛的信息动态,进而主动投身于各类竞赛实践中。与此同时,学院建有分子生态、生理生态、植物生态、化学生态、微生物生态等常规开放实验室,拥有步入式人工气候室、植物组织培养室等功能性开放实验室,并全面为本科生开放,服务于学生的各类创新实践活动。

## 2.3 以“市场需求”为导向,遴选产学研结合的竞赛选题

在当今快速变化的市场环境中,“市场需求”已成为驱动技术创新与产业升级的核心动力。有效遴选产学研结合的竞赛选题,正是这一趋势下的重要实践。生物专业秉承“厚基础、强创新、精专业、重实践”的办学理念,紧密对接台州市乡村振兴战略,在乡村产业振兴、乡村人才振兴和乡村生态振兴等方面起着积极作用。近年来,生物专业师生主持或参与的项目中,70%聚焦乡村振兴主题;团队积极参与台州多个县市的生物多样性调查工作,为台州市的生物多样性保护作出了重要贡献。此外,针对台州西蓝花产业生产中的病害频发问题,生物专业师生积极申报课题,从国内外引进了200余个西蓝花材料,从中筛选出了多个农艺性状优良的抗病种质资源。团队还积极开展土壤成分检测、重金属污染调查、农田污染评价等系列项目,为粮食安全和台州市民健康保驾护航。

## 2.4 以“三全育人”为途径,强化学生队员选拔和团队化长效建设

在组建科研团队的过程中,导师团队非常重视学生队员的选拔和创新团队的长效建设。学院依托本科生导师制,积极发挥导师在学生科研意识和科研精神培养方面的作用。学院导师经常利用课堂教学、团体辅导、个别谈心谈话等方式进行分类引导和培养,鼓励有创新精神、进取心强的学生尽早进入实验室,掌握实验技能。从大一第二学期开始,学院就从学生中公开招募竞赛队员,经过导师组对学生思想品德、学业成绩、未来规划、科研兴趣、合作意识、培养潜质等方面的测试和综合考核,选拔一批有科研潜质的学生,组成竞赛见习小组。同时,为保证竞赛项目的延续性和团队的稳定性,导师非常重视团队的稳定建设工作,采取“团队相对固定、成员新老接替、高年级阶段性辅导、导师长远规划”的策略开展学科竞赛工作,使成员全程参与资料查阅、文献阅读、方案设计、实验研究、数据处理、论文写作、专利申请、作品申报、参加竞赛等各个环节。

### 3 基于学科竞赛的生物科学专业人才培养实践成效

#### 3.1 激发学生参赛热情,竞赛成绩显著提升

从学科竞赛的参与成效来看,系列举措的实施极大地激发了学生参加学科竞赛的积极性。2016—2023年,学生学科竞赛参与率由最初的30.00%上升至83.12%。学生参加各类学科竞赛的成绩也显著提升。近5年,150人次获得国家A类学科竞赛奖,1050人次获得省级A类学科竞赛奖。在省级奖项中,30人获特等奖,205人获一等奖,315人获二等奖,500人获三等奖。与此同时,通过学科竞赛的历练,学生的自信心和抗压能力明显增强,他们在面对挑战时更加从容不迫,展现出过硬的心理素质和全面的综合素养。以2023届生物科学三台班为例,全班专业课及方向选修课课程通过率均达100%,平均学分绩点全校排名第一,在各类实习实践中优良率高达100%,荣誉称号覆盖率达100%,校立奖学金覆盖率达88.80%。

#### 3.2 考研升学率提高,促进学生高质量发展

学科竞赛的深入实施,极大地促进了本科教育质量的飞跃,为顶尖985、211高校及科研机构输送了众多具备卓越科研潜力、创新思维与实践能力并重的优秀研究生后备力量。近5年,生物科学专业的考研升学率从最初的9.52%跃升至43.75%,这一数据见证了学生们不懈追求学术卓越的历程。众多学子凭借出色表现,成功踏入浙江大学、中国科学院大学、华东师范大学等“双一流”建设高校进一步深造。学院创立的生物科学“拔尖人才班”,发展成效尤为显著,其考研升学率由首届的66.67%升至第二届的90.00%,这一成绩不仅体现了拔尖人才培养模式的显著成效,还极大地推动了本科生教育质量的全面提升,为学生的高质量、全方位发展奠定了坚实基础。

#### 3.3 学生就业技能提升,增强职场竞争力

在当今日益激烈的职场竞争浪潮中,学科竞赛已成为锤炼学生能力、彰显个人风采的璀璨舞台。这一平台既是学生迈向卓越的坚实基石,更成功培育了众多致力于推动地方经济繁荣与产业升级的技术精英与工程人才。自1985年至今,生物科学专业已为社会培养1700余名毕业生,毕业生以其卓越的综合素质赢得了市场的广泛认可。众多在校期间积极投身学科竞赛的学子,凭借其深厚的知识功底与实践创新能力,在毕业前便已成功跻身知名大型企业及上市公司的行列,且在短时间内迅速成长为企业的技术中坚、管理精英或特定领域的领航者,为地方经济的蓬勃发展及特色优势产业的蓬勃兴起贡献着不可小觑的力量。

#### 3.4 形成“政产学研用”协同育人新模式

生物科学专业作为台州市唯一的生物类专业,与台州市乡村振兴战略密切对接,涉及方向包括农林渔业、生命健康和农业生态等。在历届师生的共同努力下,生物科学专业通过构建依托学科竞赛平台培养创新型人才的完整体系,以及长期的磨砺践行,针对社会、市场和产业对人才与技术的实际需求,积极将本科教学、人才培养、科学研究、技术开发、社会服务和产业提升等方面进行有机融合,在教学科研、人才培养和社会服务等方面协同发展,取得了突出成绩,形成了“政产学研用”于一体培养创新型人才的教育新模式。该专业以“立足台州,面向长三角”的办学思路,积极搭建创新实践平台,在产品研发、技术服务、项目合作和技术创新等方面起到了不可替代的作用,为一流人才的培养提供了保障。

## 4 结语

在地方应用型本科院校生物科学专业人才培养的深入探索和实践过程中,须将提升学生实践能力置于核心地位。学科竞赛作为连接理论与实践的桥梁,不仅检验学生对专业知识的掌握程度,更在实践中锻炼了他们解决实际问题的能力。近年来,台州学院生命科学学院以学科竞赛为切入点,持续推进生物科学专业创新型人才培养工作,这不仅增强了学生的就业竞争力,也推动了教学改革与专业的特色发展。

## 参考文献:

- [1]教育部关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见:教高[2019]6号[EB/OL].(2019-09-29)[2025-11-05].  
[http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201910/t20191011\\_402759.html](http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201910/t20191011_402759.html).
- [2]教育部关于加快建设高水平本科教育全面提高人才培养能力的意见:教高[2018]2号[EB/OL].(2018-09-17)  
[2025-11-05].[http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201810/t20181017\\_351887.html](http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201810/t20181017_351887.html).
- [3]刘峥.地方应用型本科院校校企合作人才培养模式探索:以物流管理专业为例[J].高教探索,2017(3):41-44.
- [4]吕海霞,张丽靖,张艳辉,等.学科竞赛与实验中心教改深度融合的探索[J].实验室研究与探索,2020,39(1):170-172.
- [5]李忠玉,孙睿,郭阳勇.培养创新实践能力的学科竞赛教学模式探索[J].实验室研究与探索,2021,40(11):199-203.
- [6]魏炜,许小娟,赵云.生物学拔尖学生科研能力培养机制的构建[J].高校生物学教学研究,2022,12(1):10-14.
- [7]唐铁军,肖湘平.推进生物科学基础学科拔尖人才自主培养的探索与思考[J].中国大学教学,2023(3):12-17.
- [8]韩振峰.习近平总书记对理论创新和实践创新的新表述[J].前线,2017(5):13-17.
- [9]王芳,朱常香,林榕姗,等.地方农业院校生物类专业“一核四驱”创新型人才培养模式的构建[J].创新创业理论与实践,2024,7(6):128-132.
- [10]杨雅舒,裴红宾,陕嘉楠.转型期地方本科院校生物科学专业多元化应用型人才培养模式构建:以山西电子科技学院为例[J].西部素质教育,2024,10(11):100-103.
- [11]伍俊晖,黄小东,蔡丽.技能型社会建设背景下校企协同育人机制创新研究[J].教育与职业,2022(15):71-74.
- [12]马莉,沈思怡,饶玉春.新时代背景下创新型专业人才培养模式的探索及实践[J].生物工程学报,2024,40(1):292-303.
- [13]郑方亮,付琳,王翔宇,等.真实问题导向下生物技术专业创新应用型人才培养模式改革与实践[J].微生物学杂志,2023,43(5):122-128.

# Exploration and Practice of Talent Cultivation in Biological Science Major of Local Application-Oriented Undergraduate Universities from the Perspective of Disciplinary Competitions

—Taking Taizhou University as an example

Wang Xiaohua, Cheng Cuiying, Cheng Ziliang, Li Yueling

(a. Zhejiang Key Laboratory for Restoration of Damaged Coastal Ecosystems;

b. School of Life Sciences, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

**Abstract:** Disciplinary competitions are an effective component of practical teaching for cultivating undergraduates, practical and innovative abilities, and also serve as one of the important approaches to college talent cultivation and the construction of a high-quality education system. As key bases for cultivating innovative talents, local application-oriented universities are playing an increasingly active role in fostering compound and innovative talents and promoting the integration of industry, university and research. The Biological Science major at the School of Life Sciences, Taizhou University, adheres to the educational philosophy of "solid foundation, practical focus, strong innovation, and professional excellence". Taking disciplinary competitions as the starting point, the major has adopted a training model of "promoting learning through competitions and enhancing capabilities through research", thereby cultivating applied talents with solid theoretical knowledge, proficient practical skills, and strong innovative capabilities. Taking this as an example, this paper deeply explores how local application-oriented universities can rely on disciplinary competitions to cultivate talents in the field of biological science. The findings are expected to provide practical references for constructing a high-quality education system.

**Keywords:** disciplinary competitions; local application-oriented undergraduate universities; biological science; talent cultivation; innovative talent

# 档案袋评价法在“房屋建筑学”课程中的应用

俞 静

(台州学院 建筑工程学院, 浙江 台州 318000)

**摘要:**档案袋评价法通过系统性地收集学生在课程学习过程中的各类学习成果、反思记录及评价结果,对学生进行客观、综合的评价,实现对学生学习过程的动态追踪和综合评估。该方法契合工程教育认证中“以学生为中心、成果导向、持续改进”理念,为课程教学评价提供了新的思路与方法,打破了课程传统考核方式的“重结果、轻过程、能力评价缺失”等不足。本文借助超星学习通平台,探索档案袋评价法在“房屋建筑学”课程教学中的具体实施路径,并分析其在学生能力发展可视化与教师教学优化方面的应用效果,旨在为高校建筑类课程教学评价体系改革提供实践参考。

**关键词:**房屋建筑学;档案袋评价法;电子档案袋;教学评价改革

DOI:10.13853/j.cnki.issn.1672-3708.2026.03.011

## 0 引言

档案袋评价(portfolio assessment)又称为“学习档案评价”或“学生成长记录袋评价”,是以档案袋为依据而对评价对象进行客观、综合的评价。portfolio(档案袋)一词源自意大利语 portafoglio,本意指用于收纳文件、画作或学习成果的工具。20世纪70年代初,档案袋的应用逐渐由艺术、建筑设计等创作性领域扩展至教育领域,并被引入教学评价中。教学档案袋作为一种注重过程记录和多维证据呈现的评价方式,已在境外高校形成较为成熟的应用模式,对于促进教师教学反思与专业发展发挥了积极作用<sup>[1-2]</sup>。

进入21世纪,“以学生为中心”“成果导向(outcome based education, OBE)”“核心素养培养”等理念的不断深化,档案袋评价法逐渐被广泛采用,尤其在工程教育和教师教育领域表现出较为突出的应用成效<sup>[3]</sup>。与传统以结果为主的评价方式不同,档案袋评价强调对学习过程的持续记录与反思,通过收集学习证据、跟踪学习变化和呈现能力的发展过程,构建相对完整的学习发展档案。其价值在于能够较为真实地反映学习成果的形成路径,使教学评价在一定程度上具备发展性、多元性和真实性特征,增长学生自主学习的能力<sup>[4-7]</sup>。档案袋评价法为改进学习评价提供了新思路,已逐渐成为支持教学改进的重要工具。以“档案袋评价法”和“建筑”为核心关键词,在知网平台进行高级检索,共检出相关文献8篇。经梳理分析,现有研究尚未涉及档案袋评价法在建筑类课程教学中的应用探索,这一空白为本文的选题提供了明确的创新切入点。

## 1 “房屋建筑学”课程概述

“房屋建筑学”是土木工程专业重要的专业基础课程,设在第三学期。本课程阐述了民用建筑设计基本原理和方法、结构体系及建筑构造的组成和原理。通过该课程的学习,学生在知识、能力和素养上能达

收稿日期:2026-01-06

基金项目:浙江省一流本科课程“房屋建筑学”(浙教办函[2021]195号);浙江省思政示范课程“房屋建筑学”(浙教函[2021]47号);台州学院校级实践教学评价改革项目(台州学院教发[2024]48号)

作者简介:俞静(1979—),女,浙江天台人,讲师,主要从事力学与设计类教学、建筑材料等研究。

到以下 3 个课程目标(course objectives,CO):

课程目标 1(CO1):掌握民用建筑的平面、立面和剖面的基本设计原理与方法,具备根据房屋建筑学的知识点对民用建筑方案进行比较及评价的能力。

课程目标 2(CO2):掌握民用建筑构造的基本设计原理与方法,具备根据要求进行民用建筑构造设计、绘制建筑施工图的能力。

课程目标 3(CO3):掌握建筑空间构成及组合的基本原理、理解常用结构体系所适用的建筑类型,具备根据用户提供的选址规划书和设计委托书进行建筑方案设计的能力。

价值塑造层面,要求学生践行“知行合一”理念,秉承“守正创新”精神,树立“规范先行”意识和可持续发展的设计观,实现相关学科知识融合及建筑设计、构造解析的融通。课程目标严格对接毕业生培养目标,它与毕业要求之间的对应矩阵如表 1 所示。

表 1 课程目标与毕业要求对应关系

序号	毕业要求	毕业要求指标点	课程目标
1	毕业要求 1. 工程知识 能够运用数学、自然科学、工程基础和专业知 识,将复杂工程问题用专业的语言加以表述; 能够推演复杂工程问题的数学或力学模型并 对其进行正确分析,综合解决复杂工程问题	1.4 能够将土木工程专业知识和方法用于土木 工程问题解决方案的比较与综合	CO1
2	毕业要求 2. 分析问题 能够应用数学、自然科学和工程科学的基本原 理对复杂工程问题进行识别和表达;能够通过文 献研究对复杂工程问题进行分析,并获得有效 的结论	2.2 能够运用相关原理通过图表、图纸或文字 等准确有效地表达土木工程专业的复杂工程问 题	CO2
3	毕业要求 3. 设计(开发)解决方案 能够设计满足特定需求的体系、功能单体或者 施工方案;能够兼顾社会、健康、安全、法律、 文化及环境等因素提出复杂工程问题的解决方 案,并具有创新意识	3.1 能够根据用户需求确定土木工程问题的 设计目标及方案。掌握土木工程设计和产品开 发全周期、全流程的基本设计/开发方法和技术, 了解影响设计目标和技术方案的各种因素	CO3

根据课程目标,本课程采用以“项目驱动”为主的教学设计方式,将课程内容划分为 6 个项目模块,并进一步分解为 16 个学习任务单元,同时结合实际工程完成课程的知识建构与学生能力的提升,如图 1 所示。

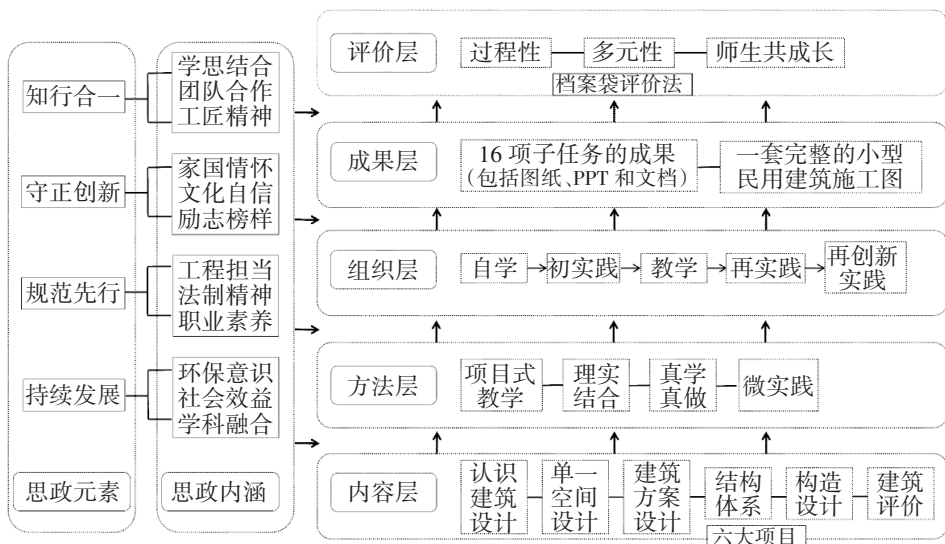


图 1 房屋建筑学课程框架图

本课程传统的课程评价方式以期末考试成绩或图纸提交为主,该评价方式存在以下明显问题:(1)重

结果轻过程。学生在课程学习过程中的探索、设计迭代和反思未被记录,学习过程被弱化。(2)能力评价缺失。评价过于关注图纸成果正确性,忽视了工程思维、协作能力和职业素养的考核。(3)反馈滞后。缺少阶段性评价机制,教师难以及时了解学生学习问题,教学调整缺乏依据。(4)学生投入不足。学生往往只在任务提交节点集中完成作业,缺乏持续学习动力。

针对这些问题,课程亟须建立能够体现学生学习过程与能力成长轨迹的科学评价机制。本文尝试将档案袋评价法引入“房屋建筑学”课程,通过构建电子档案袋系统,形成以“任务驱动—过程记录—多元评价—反思改进”为核心的课程评价机制,实现教学模式由结果导向转向过程与结果并重。

## 2 档案袋评价法在“房屋建筑学”课程中的实施路径设计

### 2.1 档案袋内容框架构建过程

#### 2.1.1 档案袋建立与作品收集前的规划阶段

学生电子档案的内容遵循课程教学大纲和课程目标,既要展现学生能力获得过程及过程中产生的成果,也要体现电子档案袋评价的多元性、过程性、发展性特点。通过电子档案袋,学生能及时了解自己实践任务的成果,从而进行反思和提高。在第一节课,教师对本课程的评价方式予以充分说明,告知学生什么是档案袋评价、档案袋评价的目的、档案袋的内容组成(图2)和档案袋评价的方式,展示往届学生的作品,从心理上缓解学生对档案袋评价的茫然,以便在实施过程中顺利进行。

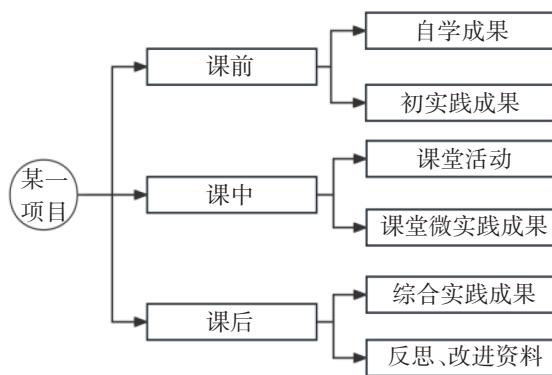


图2 档案袋内容组成

#### 2.1.2 作品收集与整理阶段

项目中每一个任务的成果形式包括幻灯片(PPT)、图纸或照片等。在每一项任务开展时,教师会再一次具体清晰地阐述各项成果的收集标准,包括格式规范、内容要求、提交时间节点及所使用的教学平台,以便学生从不同维度(如创新性、规范性、完整性、应用能力、反思深度等)有目的地完成,然后将成果上交到指定平台或者教师。教师对上交的作品及时登记、检查。对于过程性作品,如建筑方案设计等,教师则会一对一进行不定期指导,并在课程设计开始前统一收齐。

#### 2.1.3 作品评价阶段

根据作品形式不同,评价的主体也不同。个人作品主要是教师评价(100%);小组作品包括教师评价(80%)、学生自评(10%)和同伴互评(10%);课程设计则包括教师评价(80%)和企业专家评价(20%)。教师和企业专家的评价主要针对作品存在的优点和不足,撰写具体的建设性评语;学生自评主要写作品的创造过程及对作品的反思、评估;同伴互评则基于现有的知识,学习他人作品的优点,并指出其不足之处,提出改进建议。通过不同的评价主体,学生可以多维度反思自己的作品。最后,教师将各项评价结果及时反馈给学生。

#### 2.1.4 反思与教学改进阶段

每一个项目结束后,教师组织学生系统回顾该项目的整个学习过程。学生结合教师、同伴及企业专家的评语,对整个学习过程进行反思,同时制订后期学习计划,包括哪些部分需要加强、如何加强等,以持续改进。教师通过学生的作品,系统了解学生对该项目的掌握情况及存在的问题,同时对自己在前阶段的教学方式及时进行总结。

## 2.2 “房屋建筑学”电子档案袋内容

### 2.2.1 学生电子档案袋

根据课程的6大项目16项子任务,学生电子档案袋分成三大类:建筑设计档案袋、构造设计档案袋和综合实践档案袋。每个档案袋包含实践任务、实践成果、实践反思记录和各方评价等内容。

(1)建筑设计档案袋。建筑设计档案袋中的任务主要包括单一空间课前作业、人体尺度和人体活动所需的尺度及常用家具尺寸、40人中学普通教室的设计、卫生间调研和设计及场地设计。档案中同步收集各任务对应的学生成果、反思记录及持续改进资料。成果形式包括文本、照片、图纸及PPT,如图3所示。



图3 建筑设计档案袋展示图

(2)构造设计档案袋。构造设计档案袋中的任务主要包括楼梯构造设计课前作业和设计作业、墙体构造设计课前作业和设计作业、屋面构造设计课前作业和设计作业。档案中还包括各任务对应的学生成果、反思记录、持续改进资料。成果形式包括照片、图纸及PPT。

(3)综合实践档案袋。综合实践档案袋中的任务主要包括单元式住宅设计方案调研、中小学教学楼设计方案调研、小别墅设计方案调研、建筑方案设计、建筑评价和课程设计。档案袋中还有各任务对应的学生成果、反思记录、持续改进资料。成果形式包括照片、图纸及PPT。

### 2.2.2 教师电子档案袋

教师电子档案袋的内容主要针对教师能够系统地追踪和管理教学过程、为教学反思和持续改进提供依据而设计,从而有助于提升教师的教学能力和专业素养。它主要包括两方面的内容:(1)学生实践任务的适用情况。实践任务取用于真实案例,所以在布置实践任务前,要综合考虑实践任务是否符合更新的规范,是否符合当下任教的学生水平。在任务实施后,及时总结任务的组织过程、记录与学生的互动情况,包括学生的提问、教师的解答及对个别学生的指导。(2)对实践成果的评价情况。对学生完成的实践成果及时地进行评价,提出针对性的意见和建议,促使学生改进和提高,并遴选每一次实践过程中优秀的实践成果。实践成果的评价资料,也能从侧面佐证实践任务的适用性。

## 2.3 超星学习通平台实施

“房屋建筑学”课程在超星学习平台建立小规模限制性在线课程(small private online course, SPOC), SPOC具有过程管理和成绩评价等功能,可以满足电子档案袋的记录、展示和评价等基本要求,同时SPOC上有学习资源可以成为学生在线自主学习的平台。

在开课前,教师首先在SPOC中根据选课的学生建立班级。随着课程教学进度的推进,教师针对每一

个项目发布课前学习任务单;针对项目中的每一个子任务,发布任务的内容、目的、成果形式和评定方式;根据任务的组织形式(小组任务或个人任务),教师设置教师评价、师生评价或者生生评价。在任务结束后,学生首先将自己的成果上传至学习通;接着,教师或者其他学生根据任务要求对其进行评价;最后,学生根据成果及评价进行总结和反思。

### 3 档案袋评价法在“房屋建筑学”课程中的实施效果

土木工程专业认证要求教学以学生为中心,体现学生的学习成果产出并能持续改进。课程的档案袋评价法紧密围绕学生知识目标、能力目标及素养目标制定各项目,并分解各项任务,从而收集相关的成果和资料,完全以学生学习、成长为中心。档案袋的成果和资料就是展现学生学习过程和结果的质量及依据。

#### 3.1 应用成效分析

结合 2023 级土木工程专业“房屋建筑学”课程目标达成评价结果(表 2),以课程目标 1 为例,该课程目标主要考查学生运用建筑空间设计原理,构建学生对完整建筑物的认知体系及能进行单一空间设计和空间组合设计,由建筑空间设计、建筑评价及期末考试(开卷)3 项内容支撑。档案袋中涵盖建筑设计档案袋和综合实践档案袋中的资料。从分值来看,学生平时对这部分知识点的掌握较好,综合运用能力稍弱一些,建筑评价只有 79.2 分。学生个体达成情况如图 4 所示。

表 2 2023 级土木工程“房屋建筑学”课程目标达成评价结果

课程目标	评价环节	权重 $p/\%$	目标分值 $M$	平均分	目标达成评价价值
课程目标 1	建筑空间设计	30	100	81.0	0.823
	建筑评价	30	100	79.2	
	期末考试	40	50	85.7	
课程目标 2	建筑构造设计	60	100	80.0	0.732
	期末考试	40	50	62.9	
课程目标 3	建筑方案设计	100	100	81.5	0.815

注:数据来源于 2023 级土木工程专业“房屋建筑学”课程成绩。

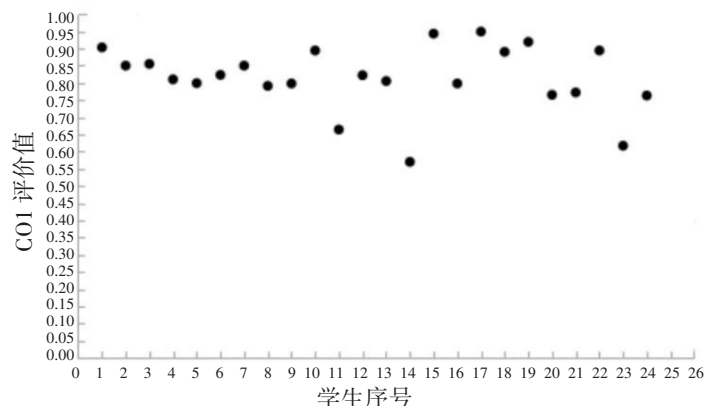


图 4 学生课程目标 CO1 评价价值散点分布图

从图 4 中可以看出,大部分学生的 CO1 评价价值在 0.6 以上,达成度较高。其中序号为 14 的学生评价价值最低,其主要原因是该同学平时学习态度不够端正,实践作业上交不及时,经教师催促后上交的作业质量不高;并且反思不及时,无法同步档案袋评价系统。序号为 17 的学生评价价值最高,其主要原因除了学生自身学习态度好以外,还在于能非常好地同步档案袋评价系统,并不断持续改进。

从考核结果的分数看,在使用档案袋评价法后,首先没有再出现不及格的学生,各项指标的平均值有 5%~10% 的提升;其次,在每一阶段学生的学习投入及师生间的互动大大增加;最后,学生的习作成果质

量明显提高,受到企业导师的肯定,企业导师也可提前选择实习生。通过对近两届学生的问卷调查,教师能够了解学生对档案袋评价法的看法。问卷题目设有“档案袋评价法与传统考试比更倾向于哪一种”“档案袋评价法是否让学习过程更加可视化”“档案袋评价法是否能促进自主学习和反思”“看到档案袋中的资料是否有成就感”等,90%的学生对档案袋评价法表示认可和赞成,个别学生持中立态度,认为交任务、写反思记录的档案袋评价法过程过于烦琐。对于这种现象,今后考虑做一些改进:第一,部分实践任务或者写反思记录部分在课内实践时间完成;第二,在达成同等教学效果的前提下,对作业提交形式酌情灵活调整;第三,因材施教,不同层次的学生设置不同的任务量。

### 3.2 以档案袋为载体的能力发展可视化(学生维度)

档案袋评价法通过动态整合学生在不同学习阶段的实践成果(如单一空间设计、楼梯构造设计详图、墙体构造设计详图、建筑方案设计草图等),系统记录其从“知识习得”到“能力迁移”的进阶过程。

#### 3.2.1 阶段化能力诊断

基础能力层。通过子任务的实践或者子任务的测试,学生可以诊断自己是否掌握该项技能,从而获得该项能力。例如通过构造设计档案袋中的楼梯布置课前作业和楼梯构造设计作业,学生可以对标自查,判断自己是否掌握楼梯组成要素、是否合理选择楼梯形式、是否准确确定楼梯构造的各项尺寸、是否具备查阅相关规范能力,以及楼梯制图表达是否标准等。

综合应用层。通过综合实践,将各个子任务在复杂条件中综合运用,从而获得解决复杂问题的能力。如在综合实践档案中,通过单元式住宅设计的调研,学生借力学习职业建筑设计师的成果,感知卧室、客厅、厨房、卫生间等各房间的尺寸及布局;再通过建筑方案设计,引导学生综合运用已有的知识点,自主布局房间尺寸和位置,以此分析学生空间功能规划与创新思维的整合能力。

职业素养层。在所有任务中,大部分任务是小组合作完成的,例如综合实践档案中的所有任务,都需要小组一起去调研、制作方案和项目汇报,以此考查学生的协作、沟通和表达能力,从而培养学生的职业素养。

#### 3.2.2 可视化成长轨迹

借助超星平台的数据分析功能,可直观呈现学生在课程周期内的能力变化趋势,将档案袋内容转化为可量化的评价指标,例如,针对某学生的“楼梯构造设计”任务,通过梳理档案袋中多次迭代的设计文件与教师反馈记录,能够观察到其制图规范性、尺寸合理性的明显优化,以及后期技术熟练度的显著提升。

### 3.3 基于档案袋的教学优化与范式革新(教师维度)

通过学生电子档案袋和教师电子档案袋,教师可获取大量的教学数据,并以此作为教学改革的支持资源,从而推动教学从经验驱动向证据驱动转型。

#### 3.3.1 高频错误分析与精准干预

通过汇总档案袋中的共性技术问题,教师能够针对性地调整教学策略。例如教师发现楼梯踏步尺寸计算错误或者楼梯平台与梯段尺寸关系错误,可以立即结合虚拟仿真技术,演示踏步尺寸与人体工程学的关联,或者找不同的楼梯案例设计来解决这个问题。针对学生楼梯设计制图规范性较弱问题,可以适当增设“楼梯构造设计”教学课时,结合虚拟仿真技术解读楼梯的投影关系,从而进行教学设计优化。对错误率高的学生及时推送微课视频,而对能力突出的学生适时提供拓展性任务(如无障碍坡道设计等),并进行分层指导。

#### 3.3.2 典型案例库的生态化建设

自从电子档案袋建立以来,学生的学习成果都被有效存储。一方面,教师可以从档案袋中遴选学生优

秀成果,标注其创新点,形成“问题解决型”教学资源;另一方面,学生的初期错误习作,可以作为错题纠正集,反向再对学生进行技能的培养。同时,教师通过电子档案袋建设案例库,并结合行业技术迭代(如装配式建筑新规范等),定期更新案例库内容,确保教学资源与产业需求同步。

## 4 结语

本文以“房屋建筑学”课程为例,基于档案袋评价法构建了“任务驱动—过程记录—多元评价—反思改进”为核心的课程评价机制,注重评价的过程性、多元性和发展性。研究结果表明,档案袋评价法通过持续积累作品与反思记录,不仅形成了学生个性化的学习轨迹,也增强了他们的自我认知与职业竞争力。教师借助过程性数据实现了教学决策的科学化,推动课程向个性化与精准化发展。档案袋评价法的实施不仅为“房屋建筑学”课程教学改革提供了可行路径,也为新工科背景下建筑类课程教学质量的提升与人才培养模式的创新提供了借鉴。

### 参考文献:

- [1]彭夏尧,杨震,段远源.境外教学档案袋的发展、侧重点及教师反馈:对清华大学能源与动力工程系工作的启示[J].热科学与技术,2024(6):620-628.
- [2]王东芳,刘晶.专业学位博士生教育中的档案袋评价:缘起及其在英、美、澳的实践[J].学位与研究生教育,2025(2):85-93.
- [3]周艳平,陈方.面向工程教育专业认证教学档案袋的构建与实施[J].教育教学论坛,2022(10):9-12.
- [4]柳青,董蓉蓉,徐嗣群.以评促学:档案袋评价法与培养自主英语写作者:以南方科技大学为例的实证研究[J].考试与评价(大学英语教研版),2020(6):36-42.
- [5]闫婷婷,高斌芳.普通财经类高校教师教学质量评价体系构建:以教学档案袋为研究工具[J].教学研究,2023(6):28-35.
- [6]王敏仪.档案袋评价法在学前教育专业教学中的应用研究[D].南昌:南昌大学,2023.
- [7]孔菊芳.外语专业课程档案袋评价标准的师生共建研制:以“综合英语”课程为例[J].外语界,2025(1):81-89.

## A Study on the Application of the Portfolio Assessment Method in the Building Architecture Course

Yu Jing

(School of Architecture and Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

**Abstract:** The portfolio assessment method collects various learning outcomes, reflection records, and evaluation results of students during the course learning process systematically. Based on these, it conducts an objective and comprehensive assessment of students, achieving dynamic tracking and comprehensive evaluation of the learning process. This method aligns with the "student-centered, outcome-oriented, and continuous improvement" concept of engineering education, providing new ideas and methods for course teaching evaluation. It breaks through the shortcomings of traditional course assessment methods such as "emphasizing results over processes and lacking ability evaluation". This paper explores the specific implementation path of the portfolio assessment method in "Building Architecture" in combination with the Chaoxing platform, analyzes its application effects in visualizing students' ability development and optimizing teachers' teaching, aiming to provide practical references for the reform of the teaching evaluation system of architecture courses in colleges and universities.

**Keywords:** building architecture course; portfolio assessment method; electronic portfolio; teaching evaluation reform

## 科研业绩

学院科研实力雄厚。近三年，学院教师团队主持国家自然科学基金项目重点项目（含面上项目）等国家级项目16项、浙江省重点研发计划项目等省部级项目11项；荣获浙江省科学技术进步奖三等奖、中国产学研合作促进会科技创新成果奖二等奖各1项；发表SCI论文235篇，其中在 *Nature Communications*、*Nature Catalysis*、*Journal of Agricultural and Food Chemistry*等SCI一区、二区期刊上发表学术论文132篇；获授权发明专利32项；承担企业委托的横向项目62项；到账科研经费2 600余万元。



教师团队荣获浙江省科学技术进步奖三等奖

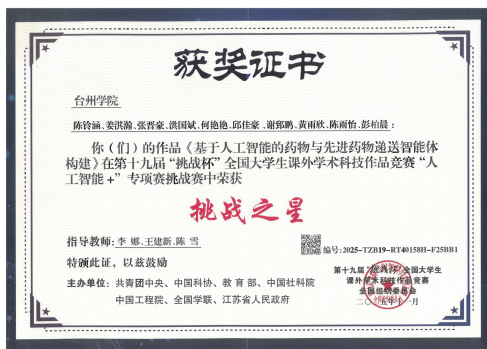


教师团队荣获中国产学研合作促进会科技创新成果奖二等奖

## 育人成效

学院构建“三全育人”格局，着力培养具有“家国情怀、垦荒之志、扎实本领”的高素质应用型人才，以有温度、有精度、有显示度的工作，服务学生成长成才；积极拓展与行业龙头企业深度合作，搭建高水平应用型人才培养实践平台，成立“华海产教融合学院”。

近三年，学生在学科竞赛上屡获佳绩，2025年荣获第十九届“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛特等奖及“挑战之星”称号，实现了学校在此类赛事上的重要突破。2024年、2025年考研升学率连续位居全校前列。2024届、2025届毕业生初次就业率分别为94.69%、93.28%，毕业生综合素质过硬，深受用人单位好评。



师生团队荣获全国大学生课外学术科技作品竞赛“挑战之星”



实践教学现场



全国大学生课外学术科技作品竞赛特等奖团队师生合影

## 中国·台州

TAIZHOU CHINA

主管单位 台州学院

Authority Taizhou University

主办单位 台州学院

Sponsor Taizhou University

主编 韩得满

Editor-in-chief Han Deman

副主编 邵凯云

Deputy Editor Shao Kaiyun

编辑出版 台州学院学报编辑部

Edited by Editorial Board of Journal of Taizhou University

地址 浙江省临海市东方大道605号

Address No. 605, Dongfang Avenue, Linhai, Zhejiang Province

邮编

Postcode 317000

网址

The URL <https://journal.tzc.edu.cn>

印刷单位 台州印刷厂(有限公司)

Printed by Taizhou Printing House(Co., Ltd.)

国内发行 台州学院学报编辑部

Domestic Distributor Editorial Board of Journal of Taizhou University

国外发行 中国出版对外贸易总公司(北京782信箱 邮编:100011)

Overseas Distributor China National Publishing Industry Trading Corporation (P.O. Box 782, Beijing 100011, China)

电子邮箱

E-mail [xbb@tzc.edu.cn](mailto:xbb@tzc.edu.cn)

电话

Tel. 0576-85137169

双月刊

1979年创刊

第48卷 第3期

(总第257期) 2026年6月20日出版

Bimonthly Started in 1979

(Issue No. 257) Vol. 48 No. 3 Jun. 2026

封面题字: 沙孟海

中国标准连续出版物号:

ISSN 1672-3708

CN 33-1306/Z

定价: 12.00元



ISSN 1672-3708



9 771672 370265