张雪萍,周子恺,杨文佳,等.黄瓜白粉病生物防治对农业旅游区生态安全与游客感知的协同调控[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(3):64-75.
Zhang X P, Zhou Z K, Yang W J, et al.Synergistic regulation of cucumber powdery mildew biocontrol on ecological safety and visitor perceptions in agritourism zones[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(3):64-75.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202503024

黄瓜白粉病生物防治对农业旅游区生态安全与游客感知的协同调控

张雪萍[1],周子恺[2],杨文佳[3],吴奕琪[3,4],刘欣宇[3*]

(1.陇南师范学院 陇南特色农业生物资源研究开发中心,甘肃 陇南 742500;2.甘肃农业大学 食品科学与工程学院,甘肃 兰州 730070;3.中国农业大学有机循环研究院(苏州),江苏 苏州 215100;4.中国农业大学 资源与环境学院,北京 100800)

摘　要:[目的]农业旅游示范区因游客密集、采摘频率高及化学农药使用受限,面临黄瓜白粉病(*Podosphaera xanthii*)防控与生态安全协同的难题。本研究旨在筛选兼具高效控病、环境友好且符合游客体验需求的生物农药,探明其作用机制及综合效益,为生态敏感区病害绿色防控提供理论依据与技术方案。[方法]试验于长三角典型农业旅游示范区开展,选取10种生物农药,采用随机区组设计,通过动态监测病情指数、病情进展曲线下面积(AUDPC)、植株生理生化指标(叶绿素含量、SOD、POD、CAT活性)、果实品质(可溶性糖、蛋白质、维生素C等)及440名游客的感知评价(景观美观度、环境舒适度、采摘行为),构建多维评价体系。[结果]所有生物农药处理防效均显著优于对照(CK),但作用特性存在显著差异。植物源药剂综合表现最优,其中蛇床子素和苦参碱防效持续稳定,末次施药21 d病情指数较CK降低59.9%～62.1%,AUDPC减少68.6%～69.3%,二者可能通过提升叶绿素含量和SOD活性,同步抑制POD活性等过激防御反应,实现增产21.3%～23.6%,同时维生素C与可溶性糖含量也得到了显著提升。枯草芽孢杆菌防效的持效性不足但昆虫多样性评分最高,宁南霉素初期防效显著而后期衰退明显;矿物油受可能受到降雨冲刷和叶片生长的影响而防效波动较大。游客感知数据显示,植物源药剂处理区病斑可见度评分较CK降低60.7%～66.7%,采摘量提升106.7%～124.7%。[结论]1%蛇床子素水乳剂和2%苦参碱可溶液剂实现了对黄瓜白粉病的持续控制,并提升了黄瓜产量与品质改善,其病斑可见度和生态安全性契合农业旅游区需求。建议配套病害可视化监测与游客交互导览系统,推动生态防控与旅游体验的深度融合。

关键词:生物农药; 黄瓜白粉病; 生物安全; 旅游体验
中图分类号:S436.421.12　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)03-0064-12

Synergistic regulation of cucumber powdery mildew biocontrol on ecological safety and visitor perceptions in agritourism zones

Zhang Xueping[1], Zhou Zikai[2], Yang Wenjia[3], Wu Yiqi[3,4], Liu Xinyu[3*]

(*1.Research and Development Center for Characteristic Agricultural Biological Resources, Longnan Normal University, Longnan 742500, China; 2.College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3.Institute of Organic Recycling (Suzhou), China Agricultural University, Suzhou 215100, China; 4.College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100800, China*)

Abstract:[Objective]Agricultural tourism demonstration zones face challenges of balancing cucumber powdery mildew (*Podos-*

收稿日期:2025-03-17　　**修回日期**:2025-04-22
基金项目:国家自然科学基金面上项目(32071552);城乡和住房建设部科技示范项目(S20220395);江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BM2022006)
作者简介:张雪萍(ORCID:0009-0003-2637-7041),硕士,副教授,研究方向:农业旅游与绿色发展,E-Mail:zhangxpln@163.com
*通信作者:刘欣宇(ORCID:0009-0006-8032-5404),硕士,助理研究员,研究方向:资源利用与植物保护研究,E-Mail:liuxinyu@slass.cn

phaera xanthii) control with ecological safety due to high tourist density, frequent picking activities, and restrictions on chemical pesticide use. This study aimed to screen biopesticides that are highly effective, environmentally friendly, and aligned with tourist experience needs, elucidate their mechanisms and comprehensive benefits, and provide theoretical and technical solutions for green disease management in ecologically sensitive areas. [Methods]A field trial was conducted in a typical agricultural tourism zone in the Yangtze River Delta. Ten registered biopesticides (plant-derived, microbial, and mineral-based) were tested using a randomized block design with four replicates. A multidimensional evaluation system was established by dynamically monitoring the disease index, area under the disease progress curve (AUDPC), plant physiological and biochemical indicators (chlorophyll content, SOD, POD, and CAT activities), fruit quality (soluble sugars, protein, vitamin C), and feedback from 440 tourists (landscape aesthetics, environmental comfort, and picking behavior). [Results]All biopesticide treatments significantly outperformed the control (CK), but their efficacy characteristics varied. Plant-derived pesticides exhibited the best overall performance: osthol (T2) and matrine (T9) exhibited sustained and stable control, reducing the disease index by 59.9%～62.1% and AUDPC by 68.6%～69.3% at 21 days post-application compared to CK. These compounds likely enhanced chlorophyll content and SOD activity while suppressing excessive defense responses like POD activity, resulting in a yield increase of 21.3%～23.6% and significant improvements in vitamin C and soluble sugar content. *Bacillus subtilis* had limited persistence but scored highest in insect diversity, whereas ningnanmycin showed strong initial efficacy but declined later. Mineral oil exhibited fluctuating efficacy, possibly due to rainfall and leaf growth. Tourist surveys showed that plant-derived pesticide-treated areas reduced visible disease spots by 60.7%～66.7% and increased fruit picking activity by 106.7%～124.7% compared to CK. [Conclusion]1% Osthol EW and 2% matrine SL achieved sustainable disease control while enhancing yield and quality. Their low disease visibility and ecological safety align with the needs of agricultural tourism area. A supporting system integrating disease visualization monitoring and interactive visitor guides is recommended to deepen the integration of ecological control and tourism experience.

Keywords: Biopesticides, Cucumber powdery mildew, Biosafety, Tourism experience

农业旅游作为融合农业生产、生态保护与休闲体验的新型产业模式,在中国乡村振兴战略中发挥重要作用[1]。截至2023年,全国已建成国家级农业旅游示范区超200个,年均接待游客量逾1.2亿人次,直接带动农产品销售及周边产业经济规模突破5000亿元[2]。然而,高密度人流与开放式种植场景导致作物病害传播风险加剧,其中由苍耳单囊壳白粉菌(*Podosphaera xanthii*)引起的黄瓜白粉病已成为制约农业旅游区可持续发展的突出问题。该病原菌分生孢子可随游客衣物、采摘工具等跨区域扩散,单次接触传播效率达12.3%,且在适宜温湿度下病斑面积扩展达8.7 mm^2/d,显著高于常规农田环境[3]。与此同时,农业旅游区因游客对"无化学残留"农产品的需求,化学农药使用受限,进一步加剧病害防控压力。

传统化学农药在旅游场景中面临多重矛盾,其残留风险如苯醚甲环唑在果实表皮半衰期长达7.3 d,且视觉污染效应难以满足生态安全与景观美学需求[4]。而病原菌抗药性快速发展如白粉病菌对三唑酮抗性频率达82.7%,更削弱了化学防控的可持续性[5]。生物农药虽被寄予厚望,但现有研究多局限于常规农田环境下的防效评价,对旅游场景的特殊需求缺乏系统考量[6-8]。例如,防控措施需同时满足病害控制、果实商品性、景观美学及生态安全等多目标协同;旅游区黄瓜因附加体验价值,其病害经济损失阈值显著低于常规农田。

当前中国登记用于防治黄瓜白粉病的农药共计480种,其中生物农药仅13种,占比为2.7%(http://www.icama.org.cn/zwb/dataCenter)。尽管生物农药种类稀缺,但其环境友好特性与农业旅游场景需求高度契合[9]。本研究基于可获得性和市场普及度,从13种登记生物农药中选取10种,覆盖植物源、微生物源及矿物类3大类别,重点解析其应用潜力。针对上述问题,本研究以长三角典型农业旅游示范区为对象,创新性构建多维度评估框架,涵盖病原抑制、生理调控、生态安全与游客感知四大核心维度。通过动态监测病情指数、抗氧化酶活性、果实营养品质及游客的感知行为数据,系统对比10种生物农药的适配性。研究结果为农业旅游区绿色防控技术体系提供理论支撑,推动农业生产与生态旅游的深度融合,为全球类似生态敏感区的可持续发展提供科学范式。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2024年6-7月在江苏省昆山市农业旅游示范区(31°23'14''N,120°57'52''E)进行。示范区属亚热带季风气候,年均温17.6 ℃,年降水量1200 mm。土壤为黄壤土,pH 6.2,有机质含量2.1%。示范区年均接待游客8万人次,试验区域为游客采摘核心区,白粉病常年发生严重。

1.2 试验材料

供试黄瓜品种为津研4号,常规水肥管理,定植密度为3.0×10^4株/hm^2。供试药剂详细信息如表1所示。

表1 供试药剂详细信息

Table 1 Detailed information of pesticides

处理编号 Processing Number	药剂名称 Name of pesticides	登记证号 Registration No.	用药量 Dosage
T1	80亿CFU/毫升枯草芽孢杆菌悬浮剂	PD20150190	3000 g/hm^2
T2	1%蛇床子素水乳剂	PD20120949	1500 mL/hm^2
T3	0.5%大黄素甲醚水剂	PD20130369	1800 mL/hm^2
T4	10%多抗霉素可湿性粉剂	PD20101129	750 g/hm^2
T5	95%矿物油乳油	PD20190123	4500 mL/hm^2
T6	0.5%几丁聚糖水剂	PD20183466	1800 mL/hm^2
T7	0.5%小檗碱盐酸盐水剂	PD20182989	3000 mL/hm^2
T8	4%小檗碱硫酸盐可溶液剂	PD20211160	450 mL/hm^2
T9	2%苦参碱可溶液剂	PD20181757	900 mL/hm^2
T10	10%宁南霉素可溶粉剂	PD20110754	750 g/hm^2

1.3 研究方法

试验采用随机区组设计,共设11个处理(10种药剂处理及空白对照),每处理重复4次,共计44个小区,小区面积15 m^2(含30株黄瓜)。小区间隔1 m宽隔离带(种植玉米),避免药剂飘移干扰。于白粉病初发期(病叶率5%)开始首次施药,每隔7 d喷施1次,连续施药3次。药剂按商品推荐浓度配制,以不施药为空白对照(CK)。所有处理区与非处理区通过隐蔽编码标记,游客及数据采集人员均不知晓编码对应关系。使用背负式电动喷雾器(喷嘴孔径0.3 mm)全株均匀喷雾。

1.3.1 防治效果评价

依据农业行业标准《GB/T 17980.30.32-2000农药田间药效试验准则(一):杀菌剂防治黄瓜白粉病》中规定的方法计算不同处理的病情指数及防治效果[10],采用9级分级标准:0级(无病斑);1级(病斑面积≤叶面积5%,零星分布);3级(5%~10%,病斑连片);5级(10%~20%,叶片部分发黄);7级(20%~50%,叶片明显枯黄);9级(>50%,叶片枯死或脱落)。每小区随机标记10株黄瓜,于末次施药后7、14、21 d调查全部叶片病情,按以下公式计算病情指数与防治效果:

$$\text{病情指数}=\frac{\text{各级病叶数}\times\text{相对级数值}}{\text{调查总叶数}\times 9}\times 100$$

$$\text{防治效果}(\%)=\left(1-\frac{CK_0\times PT_1}{CK_1\times PT_0}\right)\times 100$$

式中,CK_0和CK_1分别代表空白对照区施药前和施药后的病情指数,PT_0和PT_1分别代表药剂处理区施药前和施药后的病情指数。

同时,本研究采用病情进展曲线下面积(AUDPC)量化不同生物农药处理对白粉病发展的整体抑制效果。AUDPC通过积分计算病害严重程度随时间变化的累积值,能够综合反映药剂的长效性和动态防效,避免了单一时间点数据的局限性[11]。计算公式如下:

$$\text{AUDPC}=\sum_{i=1}^{n-1}\left(\frac{y_i+y_{i+1}}{2}\right)\times(t_{i+1}-t_i)$$

式中,y_i为第i次调查的病情指数,t_i为调查天数,n

为总调查次数。

1.3.2　植株生理生化分析

于末次施药后3 d,利用SPAD 502叶绿素含量测定仪测定植株叶片叶绿素含量,每小区随机选择30株植株进行叶片采集,每株均选取充分受光、叶位一致的叶片3片进行测定。同时集黄瓜第3片真叶,液氮速冻后-80 ℃保存。采用愈创木酚法[12]测定植株叶片过氧化物酶(POD)活性,采用氮蓝四唑光化还原法[13]的方法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,通过分光光度法测定过氧化氢酶(CAT)活性[13]。

1.3.3　黄瓜产量与品质评价

以试验小区收获后全部黄瓜果实重量折合亩产计算产量,选用头茬黄瓜果实进行品质的测定,采用茚三酮显色法[14]进行游离氨基酸含量的测定,考马斯亮蓝法[15]进行可溶性蛋白质含量的测定,蒽酮比色法[16]进行可溶性糖含量的测定,通过6-二氯靛酚比色法[17]进行维生素C含量的测定。

1.3.4　游客体验调查

基于隐蔽处理组(游客未知施药信息)原则,于末次施药后22 d组织440名游客进行分组体验调查,每个小区随机分配10名游客。问卷聚焦景观美观度、环境舒适度及采摘行为三个维度,共设计5项封闭式问题(表2)。问题表述避免技术术语,确保游客基于直观感受作答。“植株健康感知”采用正向5级评分(1=非常不健康,5=非常健康);“病斑可见度”采用逆向评分转正向(1=非常多:5分,5=完全没有:1分);“异味感知强度”采用逆向5级评分(1=非常明显,5=完全没有);“昆虫多样性体验”采用正向5级评分(1=几乎没有,5=非常多)。“采摘行为”采用有序分类评分(1=1~3个,2=4~6个,3=7~10个,4=11~14个,5=≥15个)。

表2　游客体验问卷内容

Table 2　Contents of the visitor experience questionnaire

维度 Dimension	问题描述 Question description	问题含义 Implications of the question
景观美观度 Landscape aesthetics	您认为当前区域的黄瓜植株是否健康? 叶片上是否有白色粉状物或病斑?	植株健康感知 病斑可见度
环境舒适度 Environmental comfort	您在游览过程中是否闻到刺鼻或不适气味? 您是否观察到蜜蜂、蝴蝶等昆虫活动?	异味感知强度 昆虫多样性体验
采摘行为 Picking behavior	您在本区域实际采摘的黄瓜数量约为多少?	采摘黄瓜数量

1.4　数据处理

试验原始数据以Excel 2021软件进行初步统计,通过DPS 18.1软件开展单因素方差分析,相关性分析利用Origin 2025软件实现。

2　结果与分析

2.1　不同生物农药对黄瓜白粉病的防治效果

由表3可知,所有生物农药处理对黄瓜白粉病的防控效果均显著优于空白对照(CK),但不同药剂间存在动态差异。在末次施药后7 d,CK组病情指数高达71.56,而各处理组中T9(苦参碱)和T2(蛇床子素)表现最优,病情指数分别为16.67和18.35,较CK分别降低76.7%和74.4%,显著优于T5(矿物油)、T3(大黄素甲醚)等处理($P<0.05$)。至末次施药后14 d,CK组病情指数持续攀升至80.34±1.94,而T2(蛇床子素)和T9(苦参碱)仍保持最低病情指数(23.44和25.62),分别较CK降低70.8%和68.1%。其中T2的防控效果显著优于T7(小檗碱盐酸盐)、T8(小檗碱硫酸盐)等处理。末次施药后21 d,CK组病情指数达87.91,而T2(蛇床子素)和T9(苦参碱)的病情指数分别为33.24和35.24,较CK分别降低6.1%和59.9%,且二者防效稳定性显著高于T8(小檗碱硫酸盐)和T5(矿物油)($P<0.05$)。

从病情进展累积效应(AUDPC)来看,CK组AUDPC值高达1 388.45,表明病害全程快速蔓延。T2(蛇床子素)和T9(苦参碱)的AUDPC值分别为426.34和436.84,较CK分别减少69.3%和68.6%,二者显著优于其它处理($P<0.05$)。其中T5(矿物油)的AUDPC值为569.36,显著高于T2和T9,表明其持效性不足;T1(枯草芽孢杆菌)和T6(几丁聚糖)的AUDPC值分别为484.82和

495.7,虽优于矿物油,但仍与植物源药剂存在显著差异。

综合分析表明,T2(蛇床子素)和T9(苦参碱)在病害抑制速度、持效性及累积防效方面表现最优。二者可能通过激活植物系统抗性或多靶点抑制病原菌扩展的机制发挥作用,而矿物油等物理性药剂因依赖成膜隔离作用,易受环境湿度及病原菌二次侵染影响,导致防效波动。此外,小檗碱类药剂(T7、T8)在施药后期防效衰退显著,可能与病原菌对其活性成分产生适应性有关。

表3 不同处理下黄瓜白粉病的病情发展形势

Table 3 Disease development situation of cucumber powdery mildew with different treatments

处理 Treatments	病情指数 Disease severity index			AUDPC
	7 d	14 d	21 d	
CK	71.56±2.55a	80.34±1.94a	87.91±1.18a	1388.45±4.31a
T1	22.33±1.85bc	26.56±1.49de	35.73±0.96cd	484.82±7.39c
T2	18.35±2.07cd	23.44±1.21f	33.24±2.30d	426.34±29.40d
T3	25.52±2.55b	29.18±2.08cd	38.12±0.99bc	533.83±35.17bc
T4	24.15±3.47b	27.67±0.90cde	37.33±2.76bcd	510.86±20.10c
T5	25.00±3.68b	33.67±0.67b	40.34±2.99b	569.36±37.96b
T6	22.67±2.93bc	26.91±1.49de	37.47±1.78bcd	495.72±26.78c
T7	24.00±1.36b	30.16±1.39c	37.89±3.27bc	529.25±30.26bc
T8	23.33±1.93b	28.87±2.10cd	41.11±0.51b	526.80±29.39bc
T9	16.67±2.39d	25.62±1.61ef	35.24±2.49cd	436.84±15.49d
T10	20.63±1.41bcd	26.96±2.07de	38.97±2.50bc	487.04±32.57c

注:同一列不同小写字母代表不同处理间存在显著性差异($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column represented significant differences among different treatments at $P<0.05$.

2.2 不同生物农药对黄瓜白粉病的防治效果

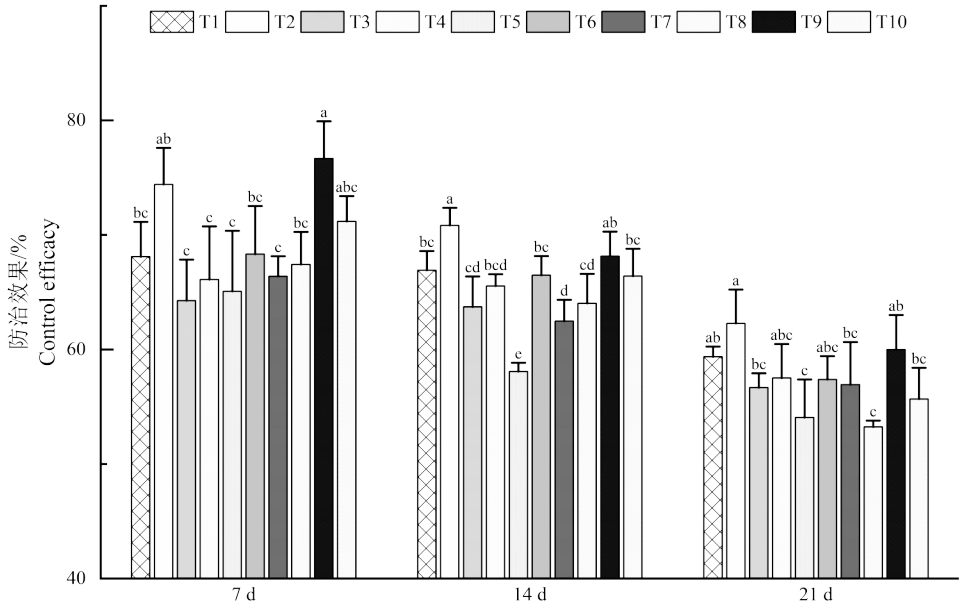
结合图1可知,各处理组对黄瓜白粉病的防治效果随时间推移呈现差异化演变。末次施药后7 d,T9(苦参碱)的防治效果最高(76.66%),显著优于T2(蛇床子素,74.41%)及其它处理($P<0.05$);T5(矿物油)和T3(大黄素甲醚)的初期防效较弱,分别为65.06%和64.26%,且与T9、T2存在显著差异。至末次施药后14 d,T2(蛇床子素)的防效提升至70.83%,超越T9(68.14%)成为最优处理,而T5(矿物油)防效显著下降至58.07%,表明其作用时效性较差。末次施药后21 d,T2(蛇床子素)仍保持最高防效(62.27%),T9(苦参碱)次之(59.98%),二者显著高于T5(矿物油,54.06%)、T8(小檗碱硫酸盐,53.24%)等处理($P<0.05$)。

从防效稳定性来看,T2(蛇床子素)在全程试验中标准差较小(7 d 3.19%、21 d 2.95%),表明其作用受环境波动影响较小;而T10(宁南霉素)的防效在末次施药后21 d时显著下降至55.66%,可能与药剂残留期较短或病原菌适应性增强有关。值得注意的是,T1(枯草芽孢杆菌)和T6(几丁聚糖)的防效随时间衰减幅度较小,末次施药后7 d至21 d降幅分别为8.74%和10.94%,表现出中等持效性,但其整体防效仍显著低于T2和T9。

T2(蛇床子素)和T9(苦参碱)的持续高效防效可能与其多重作用机制相关。蛇床子素可通过破坏病原菌细胞膜完整性并诱导植物系统抗性(如提升POD、SOD活性),而苦参碱可能通过干扰菌丝生长及孢子萌发实现多阶段抑制。相比之下,T5(矿物油)依赖物理覆盖作用阻断病原菌侵染,易因降雨或植株生长导致膜结构破裂,防效随施药间隔延长显著降低。此外,小檗碱类药剂(T7、T8)防效的快速衰退表明需进一步优化其复配方案或施用频率以延缓抗药性产生。

2.3 不同生物农药对黄瓜叶片生化指标的影响

从图2及对应数据可知,不同生物农药处理对黄瓜叶片的叶绿素含量及防御酶活性调控作用显著分化。在叶绿素含量方面(图2A),T9(苦参碱)和T2(蛇床子素)显著超出其它处理组,其叶绿素含量分别为45.10和43.71,较CK(33.71)提升33.8%和29.6%,且与矿物油(T5,41.45)、



同一分组内不同小写字母代表显著性差异($P<0.05$)

Different lowercase letters within the same subgroup represented significant differences among different treatments at $P<0.05$

图1　不同生物农药对黄瓜白粉病的防治效果

Fig.1　Effectiveness of different biopesticides against powdery mildew of cucumber

T6(几丁聚糖,41.11)等处理存在显著差异($P<0.05$)。图2B显示,T9(苦参碱)和T2(蛇床子素)的SOD活性分别达83.47 U/(mg protein)和82.05 U/(mg protein),显著高于CK(63.54 U/(mg protein))及其他处理组,其中T1(枯草芽孢杆菌,76.34 U/(mg protein))和T6(几丁聚糖,73.96 U/(mg protein))的SOD活性虽优于CK,但仍与植物源药剂存在显著差距。

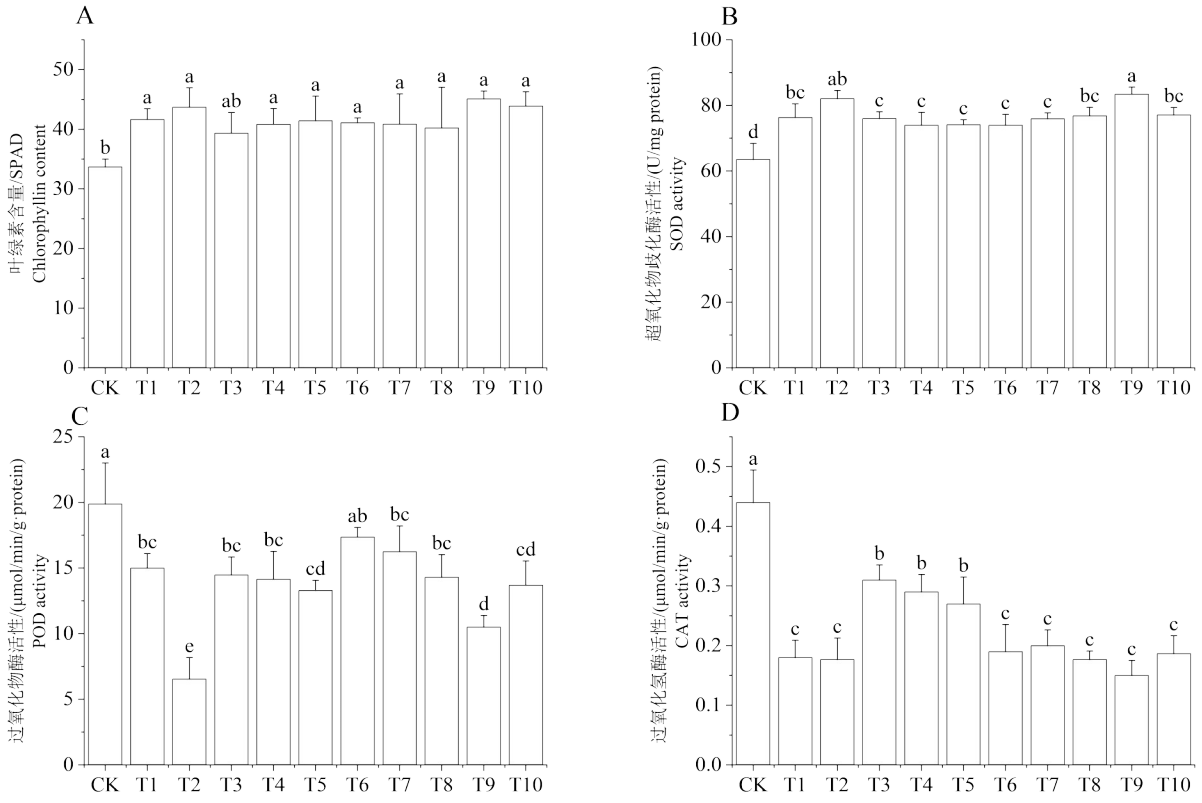
图2C和图2D进一步揭示了POD与CAT活性的分布特征。CK组因白粉病重度侵染,POD活性(19.88 μmol/min/g Protein)和CAT活性(0.44 μmol/min/g Protein)均处于最高水平,而生防药剂处理组中,T2(蛇床子素)和T9(苦参碱)的POD活性最低(6.54 μmol/min/g Protein和10.50 μmol/min/g Protein),且CAT活性亦同步降至0.18 μmol/min/g Protein和0.15 μmol/min/g Protein,显著区别于CK及其他处理($P<0.05$)。例如,小檗碱类药剂T7(小檗碱盐酸盐)和T8(小檗碱硫酸盐)的POD活性(16.25 μmol/min/g Protein和14.30 μmol/min/g Protein)显著高于T2和T9,而T5(矿物油,13.30 μmol/min/g Protein)及T4(多抗霉素,14.16 μmol/min/g Protein)的POD活性亦处于中等水平。

综合图2可见,T9(苦参碱)和T2(蛇床子素)在叶绿素含量、SOD活性上表现突出,同时在POD和CAT活性上维持低值,形成"高光效-强抗氧化-低过激响应"的生理特征。相较之下,T1、T6虽能提升叶绿素和SOD活性,但其增幅有限且POD活性偏高;矿物油及小檗碱类药剂(T7、T8)则因SOD活性不足或POD和CAT活性失衡,难以实现生理功能的系统性优化。这一结果从生化层面解释了不同药剂在病害防控及植株健康维护中的效能差异。

2.4　不同生物农药对黄瓜产量及果实品质的影响

由表4可知,生物农药处理显著提升了黄瓜产量及果实品质,但不同药剂的作用效果存在显著差异。T9(苦参碱)和T2(蛇床子素)在产量与品质综合表现中占据绝对优势,其产量分别达63.91 t/hm^{2}和62.76 t/ha,较CK(51.73 t/ha)增产23.6%和21.3%,且显著高于其他处理($P<0.05$)。T4(多抗霉素)和T3(大黄素甲醚)产量分别为61.85 t/hm^{2}和61.97 t/hm^2,虽优于CK,但与T9、T2仍存在显著差异;而T6(几丁聚糖)和T8(小檗碱硫酸盐)的产量提升幅度较小,表明其增产能力有限。

在果实品质方面,T9(苦参碱)和T2(蛇床子素)的多项指标表现突出。T9的可溶性蛋白含量



不同小写字母代表显著性差异($P<0.05$)

Different lowercase letters in each graph represented significant differences among different treatments at $P<0.05$

图2 不同生物农药对黄瓜叶片生化指标的影响

Fig.2 Effects of different biopesticides on biochemical indices of cucumber leaves

(3.88 mg/g)和游离氨基酸含量(4.44 mg/g)均为最高,分别较CK提高40.6%和8.0%;T2的可溶性糖含量(5.79 mg/g)和维生素C含量(7.05 mg/100g)显著领先,较CK分别增加24.8%和26.6%。值得注意的是,T10(宁南霉素)的维生素C含量(7.06 mg/100g)与T9、T2无显著差异,但其可溶性糖含量(5.20 mg/g)和产量(61.75 t/ha)相对较低,表明其品质提升可能具有选择性。

T5(矿物油)在产量(61.82 t/ha)和品质指标上表现中等,其可溶性糖(4.99 mg/g)和维生素C(6.45 mg/100g)含量显著低于T2、T9($P<0.05$),说明物理性药剂对果实营养积累的促进作用可能有限。T1(枯草芽孢杆菌)的产量(60.98 t/ha)和可溶性蛋白含量(3.44 mg/g)虽优于CK,但其游离氨基酸(4.18 mg/g)和维生素C(6.33 mg/100g)增幅较小。

2.5 相关性分析

由图3可知,黄瓜植株的生理特性、防御酶系统与产量品质指标间存在显著关联性。叶绿素含量与产量($r=0.89$)、维生素C($r=0.89$)及可溶性糖($r=0.55$)呈显著正相关($P<0.05$),表明光合效能提升可能直接促进光合产物向产量和营养物质的转化。超氧化物歧化酶(SOD)活性与产量($r=0.90$)、维生素C($r=0.90$)、可溶性蛋白($r=0.85$)的强正相关进一步验证了抗氧化能力对品质形成的支撑作用。过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性与产量、品质指标普遍呈负相关。POD活性与产量($r=-0.75$)、维生素C($r=-0.84$)及叶绿素($r=-0.76$)显著负相关,CAT活性亦与产量($r=-0.74$)、可溶性糖($r=-0.34$)呈负向关联。这一结果表明,植株在病害胁迫下过度激活POD和CAT防御反应可能导致光合同化产物被大量消耗,进而抑制产量和营养物质的合成。可溶性糖与维生素C($r=0.85$)、产量($r=0.82$)的强正相关揭示了糖代谢在品质提升中的核心地位。此外,可溶性蛋白与游离氨基酸的显著正相关($r=0.78$)表明氮代谢对品质的贡献,进一步优化了果实的营养均衡性。

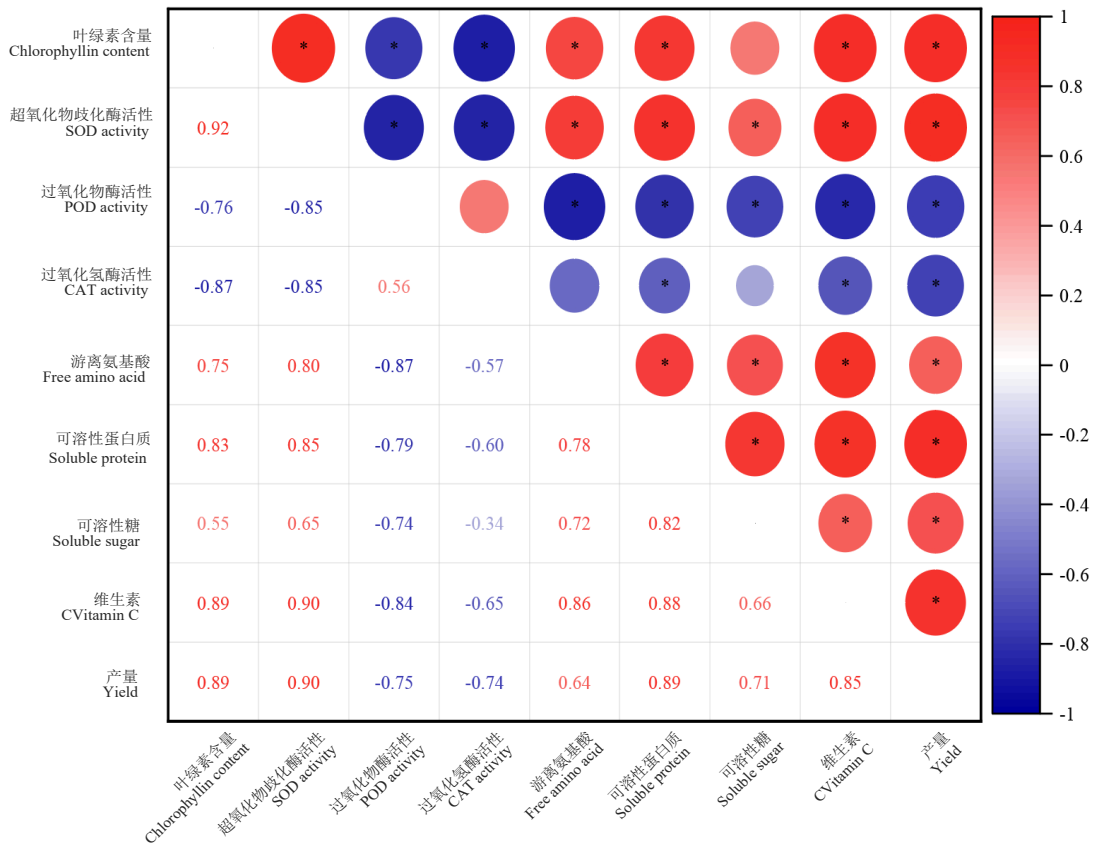
表4　不同生物农药对黄瓜产量及果实品质的影响

Table 4　Effects of different biopesticides on cucumber yield and fruit quality

处理 Treatments	产量/(t/ha) Yield	可溶性蛋白质/(mg/g) Soluble protein	游离氨基酸/(mg/g) Free amino acid	可溶性糖/(mg/g) Soluble sugar	维生素C/(mg/100g) Vitamin C
CK	51.73±0.44f	2.76±0.09g	4.11±0.08f	4.64±0.08e	5.57±0.09e
T1	60.98±0.96cd	3.44±0.09def	4.18±0.02ef	5.23±0.07cd	6.33±0.13cd
T2	62.76±0.31ab	3.73±0.16abc	4.55±0.09a	5.79±0.02a	7.05±0.08a
T3	61.97±0.23bc	3.53±0.09cde	4.26±0.04de	5.52±0.14b	6.69±0.12b
T4	61.85±0.38bcd	3.80±0.13ab	4.31±0.04cd	5.63±0.09ab	6.45±0.14c
T5	61.82±0.23bcd	3.31±0.12ef	4.19±0.02ef	4.99±0.16d	6.45±0.13c
T6	59.23±1.02e	3.23±0.06f	4.24±0.02de	4.99±0.13d	6.25±0.07d
T7	61.07±0.80cd	3.32±0.14ef	4.26±0.08de	5.16±0.15cd	6.32±0.11cd
T8	60.47±0.44d	3.39±0.10def	4.24±0.05de	5.03±0.22cd	6.32±0.02cd
T9	63.91±0.85a	3.88±0.09a	4.44±0.04b	5.25±0.10c	7.23±0.05a
T10	61.75±1.12bcd	3.62±0.18bcd	4.38±0.05bc	5.20±0.10cd	7.06±0.06a

注:同一列不同小写字母代表显著性差异($P<0.05$)。

Note:Different lowercase letters in the same column represented significant differences among different treatments($P<0.05$).



*代表显著性差异($P<0.05$)

* represented significant differences ($P<0.05$)

图3　黄瓜产量品质及叶片生化指标相关性分析

Fig.3　Correlation analysis of cucumber yield quality and leaf biochemical indexes

2.6　游客对不同处理的感知情况

由表5可知,游客对不同处理黄瓜种植区的感知情况存在较大差异。在植株健康感知方面,T9(苦参碱)得分最高(3.93),显著优于CK(1.33)及

多数处理($P<0.05$),其植株叶片完整、色泽鲜绿的特征直观提升了游客对作物健康的认可度;T2(蛇床子素)以3.33分位列第二,与T3(大黄素甲醚,3.67)、T4(多抗霉素,3.50)等处理无显著差异,但显著高于T5(矿物油,3.00)及T8(小檗碱硫酸盐,3.13)。病斑可见度指标进一步验证了病害防控效果与景观美观度的直接关联。T2(蛇床子素)和T9(苦参碱)的病斑可见度得分最低(1.50和1.77),显著低于CK(4.50)及T8(小檗碱硫酸盐3.43)、T7(小檗碱盐酸盐,3.17)等处理($P<0.05$),表明其高效控病能力大幅减少了叶片病斑的视觉干扰。与此形成对比的是,CK组因白粉病严重,病斑可见度得分高达4.50,导致游客对植株健康评价极低(1.33)。

在环境舒适度方面,所有处理组的异味感知强度无显著差异,表明生物农药均未引起游客可察觉的异味不适。昆虫多样性得分则以T4(多抗霉素,4.67)、T7(小檗碱盐酸盐,4.60)、T3(大黄素甲醚,4.53)等处理较高,而T9(苦参碱,4.27)和T2(蛇床子素,4.47)仍维持中等偏上水平,反映生物农药对田间昆虫群落的负面影响较小,符合生态旅游区对生物多样性的保护需求。

游客采摘行为数据揭示,病害控制与景观改善可显著提升参与度。T10(宁南霉素)的采摘数量最高(3.53),但其植株健康感知(3.40)和病斑可见度(2.30)表现中等,可能与果实外观吸引力,如形状、色泽的单独优势相关;T9(苦参碱)和T2(蛇床子素)的采摘数量分别为3.37和3.10,与二者低病斑可见度、高健康感知形成协同效应,说明游客更倾向于选择病害轻、植株健壮的区域进行采摘。相比之下,CK组因病害严重,采摘数量最低(1.50),直观体现了病害对旅游体验的负面影响。

表5 游客对不同处理的感知评价

Table 5 Tourists′ perceptual evaluation of different treatments

处理 Treatments	植株健康感知 Plant health perception	病斑可见度 Spot visibility	异味感知强度 Odor perception intensity	昆虫多样性 Insect diversity	采摘黄瓜数量 Number of cucumbers picked
CK	1.33±0.55c	4.50±0.48a	4.50±0.46a	3.87±0.36b	1.50±0.40f
T1	3.23±0.37ab	2.23±0.55de	4.13±0.29a	4.37±0.16ab	2.33±0.12e
T2	3.33±0.59ab	1.50±0.40f	4.20±0.17a	4.47±0.40a	3.10±0.20abcd
T3	3.67±0.57ab	2.60±0.49ed	4.10±0.30a	4.53±0.18a	3.03±0.12bcd
T4	3.50±0.50ab	3.17±0.67bc	4.33±0.39a	4.67±0.13a	3.17±0.15abc
T5	3.00±0.22b	2.67±0.10cd	4.33±0.07a	4.50±0.05a	2.70±0.30cde
T6	3.13±0.23ab	2.83±0.25bcd	4.30±0.15a	4.50±0.18a	2.87±0.21cd
T7	3.30±0.27ab	3.17±0.12bc	4.30±0.19a	4.60±0.39a	2.67±0.26cde
T8	3.13±0.32ab	3.43±0.17b	4.33±0.24a	4.53±0.30a	2.60±0.26de
T9	3.93±0.37a	1.77±0.38ef	4.37±0.04a	4.27±0.27ab	3.37±0.23ab
T10	3.40±0.25ab	2.30±0.13de	4.53±0.26a	4.33±0.00ab	3.53±0.32a

注:同一列不同小写字母代表显著性差异($P<0.05$)。

Note:Different lowercase letters in the same column represent significant differences among different treatments ($P<0.05$).

3 讨论

本研究在农业旅游场景下系统评估了10种生物农药对黄瓜白粉病的防控效果,揭示了生物农药的综合优势及其作用机制。试验表明,蛇床子素(T2)和苦参碱(T9)的防效显著优于其它处理,其核心优势源于对病原菌的直接抑制与植物系统抗性激活的协同作用。这与部分学者的研究结果有所不同,安福涛等[8]针对6种生物农药对黄瓜白粉病进行了防治效果评价,该研究中的蛇床子素和苦参碱对黄瓜白粉病的最终防治效果分别为45.11%和51.10%,明显低于本研究中两种生物农药的防治效果。分析其原因,应在于药剂有效成分含量和施药次数的不同。本研究中使用的蛇床子素的有效成分含量为1%、苦参碱的有效成分含量为2%,且进行了连续3次的施药,而安福涛等[8]研究中的两种生物农药的有效成分含量分别为0.4%和0.36%,且只连续施药2次。从作用机

制来看,蛇床子素可能通过香豆素类化合物的疏水特性破坏病原菌细胞膜透性[18],干扰菌丝扩展,同时激活水杨酸信号通路诱导系统抗性[19],表现为超氧化物歧化酶(SOD)活性提升29.2%而过氧化物酶(POD)活性降低67.1%。这种"低消耗抗性"模式使植株在维持抗病能力的同时,减少因氧化应激导致的光合损耗,从而促进光合产物向果实分配,最终实现产量提升23.6%和维生素C含量增加26.6%。苦参碱则可能通过喹诺里西啶生物碱结构与病原菌细胞色素bc1复合体的Qo位点结合[20],阻断能量代谢链,施药7 d防效达76.7%,且持效性稳定,这对旅游区高频次病原侵染的压力缓解至关重要。

其余药剂中,微生物源和矿物源制剂呈现差异化特性。枯草芽孢杆菌(T1)可以通过分泌脂肽类抗生素抑制孢子萌发[21],但其防效受环境湿度显著影响,露天环境下21 d防效较T2低6.9%,可能与菌体定殖稳定性不足有关。矿物油(T5)依赖物理覆盖阻断病原侵染,但露天旅游区降雨或植株叶片生长均可导致油膜破裂,其防效从7 d 65.1%衰减至21 d 54.1%,凸显其可能更适用于设施栽培。小檗碱类药剂(T7、T8)因靶点单一且易被病原菌ABC转运蛋白外排[22],防效衰退显著(T8的21 d防效较7 d下降9.7%),可能需通过复配表面活性剂改善渗透性。

农业旅游场景的特殊性要求药剂兼具生产、生态与体验三重效益。本研究发现,病斑可见度与游客采摘量可能呈显著负相关,T2和T9处理组通过将病斑可见度从对照的4.50分降至1.50～1.77分,使采摘量提升106.7%～124.7%。这一结果与"视觉完整性驱动消费决策"的行为经济学理论吻合[23],即叶片表观健康度直接影响游客对作物价值的判断。此外,植物源药剂释放的微量挥发性物质,如蛇床子素中的肉桂醛,可能潜在地提升环境舒适度[24],而化学农药常因刺激性气味降低游客停留意愿,尽管本试验中异味感知无显著差异,但挥发性成分的积极影响值得后续研究。生态安全方面,所有生物农药处理均未显著抑制昆虫多样性,其中多抗霉素(T4)和小檗碱盐酸盐(T7)处理区传粉昆虫数量较对照增加18.9%～20.7%,印证其对非靶标生物的低风险性。

尽管植物源药剂成本较高,但其旅游增值效益可部分抵消成本差异。同时,高维生素C含量可作为"功能性农产品"溢价销售,参照相关研究,价格提升空间达20%～30%[25]。这一发现验证了"生态防控成本可通过旅游价值链内部化"的假说[26],为政府制定生物农药补贴政策提供了实证支持。

最后,本研究仍存在一定局限性。首先,未系统评估药剂施用对土壤微生物组的长期影响,尤其是旅游区高人流活动可能通过踩踏压实、根际扰动等改变微生物群落结构,进而影响药剂的环境行为;其次,未量化游客行为,如植株触摸频率、采摘工具携带病原孢子等对白粉病传播的贡献率,而游客密集区的频繁接触可能成为病原扩散的潜在途径。未来研究需重点关注以下方向:一是构建"游客行为-病原传播"关联模型,例如通过荧光标记孢子追踪游客流动路径与病害分布的时空相关性,明确人为活动对二次侵染的贡献;二是制定旅游区病害防控的"行为干预"策略,例如在采摘入口设置手部消毒设施、规划单向游览路线以减少交叉感染,或利用物联网传感器实时监测人流密度并触发施药预警;三是开发游客参与的防控教育模式,例如通过互动游戏引导游客识别早期病斑并上报,将被动防控转化为群体协作的生态实践。

4　结论

在农业旅游区黄瓜白粉病防控中,1%蛇床子素水乳剂和2%苦参碱可溶液剂展现出显著综合优势,实现病情指数降低59.9%～62.1%、AUDPC减少68.6%～69.3%,同时提升产量21.3%～23.6%并优化果实品质。其低病斑可见度与高昆虫多样性特性,契合旅游区对景观美学与生态平衡的双重需求。

参　考　文　献

[1]陈瑞萍,宗婉婷. 智慧旅游如何助推乡村旅游经济发展[J]. 山西财经大学学报,2024,46(S2):149-151.
Chen R P, Zong W T. How does smart tourism boost the development of rural tourism economy[J]. Journal of Shanxi University of Finance and Economics,2024,46(S2):149-151.

[2]王晶晶,王兆峰.中国农业与旅游产业融合发展的时空演进及空间关联性[J].湖南师范大学自然科学学报,2023,46(6):1-10.
Wang J J, Wang Z F. Spatio-temporal Pattern and Spatial

Correlation of Integrated Development of Agriculture and Tourism Industries in China[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University,2023,46(6):1-10.

[3]Jin J, Song G N, Zhang S Y, et al. Pyridaben as a novel fungicide against *Sphaerotheca fuliginea*, the causal agent of cucumber powdery mildew[EB/OL].(2025-03-04)[2025-04-22]https://doi.org/10.1094/PDIS-11-24-2483-RE

[4]凌淑萍,付岩,王全胜,等. 苯醚甲环唑和吡唑醚菌酯在西瓜中的残留分析及膳食风险评价[J]. 食品安全质量检测学报,2021,12(3):1215-1223.
Ling S P, Fu Y, Wang Q S, et al. Residual analysis and dietary risk assessment of difenoconazole and pyraclostrobin in watermelon[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(3):1215-1223.

[5]项佳胤. 苦瓜白粉病菌拮抗菌的筛选鉴定、培养条件优化及生防机制研究[D]. 海口:海南大学,2023.
Xiang J Y. Screening and identification of antagonistic bacteria against powdery mildew of bitter melon, optimization of culture conditions and study on biological control mechanism[D]. Haikou:Hainan University,2023.

[6]Zheng C J, Li W, Gao Z Q, et al. Deep cutaneous fungal infection in an immunocompetent individual caused by a biological pesticide: a rare case report[J]. BMC Infectious Diseases,2025,25(1):341.

[7]Gastelbondo-Pastrana B, Santorum M, Scudeler E L, et al. Azadirachtin-based biopesticide affects fitness and ovarian development of the natural enemy *Ceraeochrysa claveri* (Neuroptera:Chrysopidae)[J]. Plants,2025,14(3):416.

[8]安福涛,刘欣宇,孙富余.6种植物源农药在黄瓜白粉病防治中的应用效果[J].中国植保导刊,2023,43(5):63-65,7.
An F T, Liu X Y, Sun F Y. Efficacy of Six Botanical Pesticides in the Control of Cucumber Powdery Mildew[J]. China Plant Protection,2023,43(5):63-65, 7.

[9]宋聪聪,罗小锋,孙彬涵,等. 口粮与利润导向如何影响稻农生物农药施用行为*-兼论环境意识的调节作用[J]. 中国生态农业学报(中英文),2024,32(11):1954-1967.
Song C C, Luo X F, Sun B H, et al. How do rations and profits orientations affect rice farmers' biological pesticide application behavior: concurrently discussing the regulating effect of environmental awareness[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2024,32(11):1954-1967.

[10]中华人民共和国农业部. GB/T 17980.30-2000, 农药 田间药效试验准则(一)杀菌剂防治黄瓜白粉病[S].北京:中国标准出版社,2000.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. GB/T 17980.30-2000, Pesticide—Guidelines for the field efficacy trials(I)—Fungicides against cucumber powdery mildew[S]. Beijing:China Standard Publishing House,2000.

[11]鹿秀云,苏振贺,刘晓萌,等. 西瓜黄萎病菌种群结构类型及致病性分析[J]. 植物病理学报,2024,54(5):890-901.
Lu X Y, Su Z H, Liu X M, et al. Analysis of the population structure types and pathogenicity of *Verticillium dahliae* from watermelon[J]. Acta Phytopathologica Sinica, 2024, 54(5): 890-901.

[12]安福涛,刘欣宇,孙富余.3种芽孢杆菌在番茄生产过程中的应用效果研究[J].山西农业大学学报(自然科学版),2023,43(1):82-88.
An F T, Liu X Y, Sun F Y. Study on the effectiveness of three Bacillus strains in tomato production[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2023,43(1):82-88.

[13]韩国荣,刘艳丽,王文昊,等. 稀土半胱氨酸螯合物对盐胁迫下黄瓜种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 中国蔬菜,2024(10):72-79.
Han G R, Liu Y L, Wang W H, et al. Effect of rare earth cysteine chelates on seed germination and seedling growth of cucumber under salt stress[J]. China Vegetables, 2024(10): 72-79.

[14]丁永霞. 茚三酮显色分光光度法测定食品中α-氨基酸含量的方法探讨[J]. 食品工程,2017(1):55-57.
Ding Y X. Determination of alpha amino acid in food by ninhydrin color spectrophotometry[J]. Food Engineering, 2017(1):55-57.

[15]姜惠萍,刘万顺,宋福来等.改良考马斯亮蓝试剂法测定壳聚糖及其衍生物中蛋白质含量[J].现代食品,2022,28(17):173-178.
Jiang H P, Liu W S, Song F L, et al. Determination of Protein Content in Chitosan and Its Derivatives by Modified Coomassie Brilliant Blue Reagent Method[J]. Modern Food, 2022,28(17):173-178.

[16]周振祥,赵博,王唯先,等.不同前处理对测定甜高粱茎秆汁液3种糖含量的影响[J].草业科学,2022,39(5):940-948.
Zhou Z X, Zhao B, Wang W X, et al. Determination of three soluble sugars in stem juice of sweet sorghum by anthrone colorimetry[J]. Pratacultural Science,2022,39(5):940-948.

[17]苏佳雯,李海平,李灵芝,等. 腐植酸液体有机肥提升番茄产量与品质的研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(6):59-67.
Su J W, Li H P, Li L Z, et al. Effects of humic acid liquid organic fertilizer on yield and quality of tomato[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2024,44(6):59-67.

[18]Fan H Y, Gao Z F, Ji K, et al. The *in vitro* and *in vivo* anti-inflammatory effect of osthole, the major natural coumarin from *Cnidium monnieri* (L.) Cuss, *via* the blocking of the activation of the NF-κB and MAPK/p38 pathways[J]. Phytomedicine,2019,58:152864.

[19]陈曦. 水杨酸(SA)诱导黄瓜抗白粉病作用机制初探[D]. 扬州:扬州大学,2018.
Chen X. Mechanism of salicylic acid (SA) inducing cucumber resistance to powdery mildew[D]. Yangzhou: Yangzhou University,2018.

[20]Cely-Veloza W, Kato M J, Coy-Barrera E. Quinolizidine-type alkaloids: chemodiversity, occurrence, and bioactivity[J]. ACS Omega,2023,8(31):27862-27893.

[21]Santos-Lima D, de Castro Spadari C, de Morais Barroso V, et

al. Lipopeptides from an isolate of *Bacillus subtilis* complex have inhibitory and antibiofilm effects on *Fusarium solani*[J]. Applied Microbiology and Biotechnology,2023,107(19):6103-6120.

[22]孙铭优,吴照晨,王斌,等.ABC转运蛋白及其相关的多药抗性研究现状[J].植物保护学报,2022,49(1):374-38.
Sun M Y, Wu Z C, Wang B, et al. Research status of ATP-binding cassette transporters and related multidrug resistance [J]. Journal of Plant Protection,2022,49(1):374-38.

[23]叶子铭,刘楠,车敬上,等. 营销领域完形特征对消费行为的影响及机制研究述评[J]. 外国经济与管理,2020,42(9):63-75.
Ye Z M,Liu N,Che J S,et al. A literature review of the effect and mechanism of gestalt feature on consumer behavior[J]. Foreign Economics & Management,2020,42(9):63-75.

[24]邵芬娟,丁雪梅. 气相色谱-质联技术在纺织品洗涤前后香味含量测定的应用[J]. 应用化工,2020,49(6):1580-1582.
Shao F J,Ding X M. Application of gas chromatography-mass spectrometry in the test of the content of fragrance of textiles before and after being washed[J]. Applied Chemical Industry,2020,49(6):1580-1582.

[25]Li S S,Kallas Z. Meta-analysis of consumers′ willingness to pay for sustainable food products[J]. Appetite,2021,163:105239.

[26]郑永贤,薛菲,张智光. 森林旅游景区生态安全IRDS模型实证研究[J]. 资源科学,2015,37(12):2350-2361.
Zheng Y X, Xue F, Zhang Z G. Ecological security measurement using the IRDS model in forest scenic spots[J]. Resources Science,2015,37(12):2350-2361.

(编辑:吕俊俐)