

澳洲坚果病害及绿色防控综述

曾 叶^{1,2}, 刘子腾^{1,2}, 熊于斌^{1,2}, 王进强^{1,2}, 贺熙勇^{1,2*}

(1. 云南省热带作物科学研究所/云南省澳洲坚果农业工程研究中心, 云南景洪 666100;

2. 云南省木本油料技术创新中心, 昆明 650201)

[摘要] 澳洲坚果具有较高的营养价值和保健价值。近年来, 我国澳洲坚果产业蓬勃发展, 种植面积逐年增加, 产业发展迅速, 其相关病害及防治等问题引起广泛关注。文章整理澳洲坚果病害、病原菌及绿色防治等方面研究进展并总结存在的问题, 以期为澳洲坚果病害研究提供参考。

[关键词] 澳洲坚果; 病害; 病原菌; 生防菌; 育种

中图分类号: S667.9 文献标识码: A 文章编号: 1672-450X(2025)04-0029-08

Reviews of *Macadamia* spp. Diseases and Green Control

ZENG Ye^{1,2}, LIU Ziteng^{1,2}, XIONG Yubin^{1,2}, WANG Jinqiang^{1,2}, HE Xiyong^{1,2*}

1. Yunnan Institute of Tropical Crops/Yunnan Macadamia Agricultural Engineering Research Center, Jinghong 666100, China;

2. Yunnan Technology Innovation Center of Woody Oil, Kunming 650201, China

Abstract: *Macadamia* spp. possess extremely high nutritional and health value. In recent years, the *Macadamia* spp. industry in our country has flourished, with planting areas increasing year by year and rapid industrial development. Issues related to diseases and their prevention have attracted widespread attention. This article reviews research progress on diseases, pathogens, and green control methods of *Macadamia* spp., summarizes existing problems, and aims to provide a reference for research on *Macadamia* spp. diseases.

Key words: *Macadamia* spp.; diseases; pathogenic bacteria; biological control bacteria; breeding

澳洲坚果 (*Macadamia* spp.) 隶属山龙眼科 (Proteaceae) 澳洲坚果属 (*Macadamia* F. Muell) 多年生常绿高大乔木^[1]。澳洲坚果果仁富含优质不饱和脂肪酸 (如油酸、棕榈油酸和棕榈烯酸)、蛋白质、必需氨基酸和多种维生素 (如维生素 B1、B2 和烟酸) 等营养成分^[2], 具有极高的营养与保健价值。澳洲坚果主产区分布于南北纬 30° 之间的热带、亚热带地区, 在中国商业化种植主要集中于云南、广西、广东、贵州及四川等省区。其中, 云南的种植面积为 28.38 万 hm², 占全国的 78.96%、世界的 48.84%^[3]。随着商业化、规模化种植的持续扩展和树龄增长, 澳洲坚果病害问题日

益凸显, 速衰病、慢衰病、黑果病和溃疡病等主要病害频发^[4], 导致显著的经济损失, 严重制约了产业的可持续健康发展。因此, 深入解析澳洲坚果主要病害的病原学基础, 制定有效的防控策略, 并选育具备抗性的栽培品种, 是实现病害经济高效治理的核心途径。本文旨在分析澳洲坚果病害研究进展及绿色防控技术, 为建立澳洲坚果病害绿色、高效综合防控体系提供参考。

1 病害

1.1 澳洲坚果主要病害类型

澳洲坚果的病害主要有衰退病 (速衰病和慢

收稿日期: 2025-06-18

基金项目: 云南省热带作物科技创新体系建设专项资金项目 (RF2025-12);

“兴滇英才支持计划” (XDYC-CYCX-2022-0068)

作者简介: 曾叶 (1997—), 女, 研究实习员, 硕士, 研究方向为澳洲坚果栽培及育种。E-mail: zengye528@163.com

*通信作者: 贺熙勇 (1973—), 男, 研究员, 硕士, 研究方向为澳洲坚果品种选育、丰产栽培。E-mail: heda0691@163.com

衰病)、果腐病、黑果病、叶斑病、炭疽病和茎干溃疡病等真菌、病毒性病害,这些病害对产业构成了严重威胁(表1)。如澳洲坚果衰退病,主要症状为根部腐烂、叶褐变、枝干枯萎、幼苗死亡,严重时导致产量下降60%以上^[5]。果腐病主要症状为果壳表面出现褐色腐烂斑,严重时导致果实脱落,其发病与高温高湿环境相关^[6]。叶斑病主要症状为叶片出现圆形或不规则褐色病斑,边缘黄化^[7]。炭疽病主要症状为叶片、嫩梢和果实出现黑色病斑,后期叶片枯黄、果实变黑,在云南雨季高发^[8]。茎干溃疡病症状为树干出现红色流胶、深沟状溃疡,树势衰弱甚至死亡^[9]。李加智等^[16]

研究了10种澳洲坚果,并鉴定出15种相关病原菌,涉及叶黄斑、叶枯、炭疽、灰霉和茎干溃疡等。王彤彤等^[17]在广西发现亚洲新拟盘多毛孢(*Neopestalotiopsis asiatica*)与腐生新拟盘多毛孢(*Neopestalotiopsis saprophytica*)是导致澳洲坚果干花病的病原菌,该病原菌会造成花瓣褐变,严重时整个花序干枯死亡。除真菌病害外,病毒性病害亦构成显著威胁。南非农业研究委员会团队首次在南非普马兰加省发现澳洲坚果环斑相关病毒,该病毒属于正孢病毒属(*Orthotospovirus*),感染植株表现叶片环斑与黄化等症状,并伴随严重的产量损失(高达60%)^[14]。

表 1 澳洲坚果主要病害类型

| 类型 | 名称 | 症状 | 发现地 |
|----|------------------------|--------------------------------------|-----------|
| 真菌 | 衰退病 ^[5] | 根部腐烂,叶变褐,枝干枯萎,幼苗死亡,产量下降。 | 美国夏威夷 |
| | 果腐病 ^[6] | 果实外壳出现病斑,内部果仁霉变。 | 南非 |
| | 叶斑病 ^[7] | 叶片出现褐色斑点,边缘黄化,后期穿孔。 | 老挝占巴塞省 |
| | 炭疽病 ^[8] | 叶片、嫩梢和果实出现黑色病斑,后期叶片枯黄、果实变黑。 | 中国云南 |
| | 茎干溃疡病 ^[9] | 树干出现红色流胶、深沟状溃疡,树势衰弱甚至死亡。 | 巴西圣保罗 |
| | 黑果病 ^[10] | 果实外壳出现黑色病斑 | 中国云南 |
| | 花序病害 ^[11] | 花絮枯萎 | 美国夏威夷 |
| | 灰霉病 ^[12] | 患病花朵呈深棕色,聚集成簇,花梗上附着真菌丝和灰白色的孢子。 | 澳大利亚新南威尔士 |
| | 绿霉病 ^[12] | 花上出现小水渍斑点,随后坏死;病株花序上会覆盖橄榄灰色的菌丝和孢子斑块。 | 澳大利亚 |
| 病毒 | 干花病 ^[13] | 花朵干燥,患病的花朵在摇晃时容易从花轴上脱落。 | 澳大利亚 |
| | 正孢病毒属 ^[14] | 叶片环斑、黄化,伴随产量下降。 | 南非普马兰加省 |
| | 番茄斑萎病毒 ^[15] | 叶片褪绿、黄化,叶脉间呈现近似圆形或不规则褐色枯斑。 | 中国云南 |

独特的地形地貌及高温多雨的气候条件导致病原菌生长、繁殖、扩散加速。我国澳洲坚果主要种植地为云南、广西,由于地形复杂,病原菌种类较多,夏季高温多雨,超过30℃的高温会导致病原体的孢子囊数量迅速激增^[18-19]。感病组织的病原菌子实体可以被雨水冲走并通过长距离传播,雨水可携带病原孢子进行传播,将其扩散至周边树木的土壤中^[20]。降雨集中且持续时间长,管理不善(果园清洁管理措施不到位或不彻底,导致病原菌初始基数偏高),果园郁闭度大等,均显著增加了病原菌爆发流行的风险。蒋桂芝等^[21]在云南盈江县果园的研究表明,小孢拟盘多毛孢(*Pestalotiopsis microspora*)是当地澳洲坚果叶枯病和枝枯病的主要病原菌,*Calonectria pseudore-teaudii*是导致黑果病的主要病原菌,且黑果病多

发于每年6—8月的雨季,发病严重的果园常伴随叶枯病。

1.2 病原菌

澳洲坚果致病菌种类多样,致病症状复杂,例如导致花裂和花序枯萎的枝孢菌属(*Cladosporium*)、新拟盘多毛孢属(*Neopestalotiopsis*)和葡萄孢属(*Botrytis*),引发根腐或树干腐烂病的多种真菌,以及复合侵染导致壳腐病和溃疡病的间座壳属(*Diaporthe*)、拟茎点霉属(*Phomopsis*)和刺盘孢属(*Colletotrichum*)等^[22],给澳洲坚果病害防治带来更大的挑战。多种病原真菌侵染可导致澳洲坚果出现根腐、叶黑、枯枝、黑果、幼果脱落、产量下降等复合症状^[23],多种真菌能侵染澳洲坚果不同部位,严重制约澳洲坚果的产量提升和品质保

障。澳洲坚果的某种病害有时候并不是由单一病原菌引起的,这使得其病理学成因分析更为复杂。例如壳腐病和溃疡病是由多种真菌引起的,包括间座壳属、拟茎点霉属和刺盘孢属^[12]。

澳洲坚果致病菌潜伏期长,扩散能力强。澳洲坚果树体表皮是抵御病原菌快速入侵的天然屏障,能阻挡病原菌的快速侵染,树木内部是高碳氮比的木质,也能够抑制病原菌的增殖,尽管

有这些防御措施,但部分病原体仍然可以感染树体。澳洲坚果常见病原真菌能够引起根腐病或树干腐烂,导致减产^[24]。部分病原体可以在土壤中存活 10 年以上,感染新种植的健康树木的根^[25]。部分病原体更有可能从基部向上侵染树干,然后扩散到树体上部的树干和分枝^[26]。因此,从澳洲坚果发病植株的根、茎、花、叶等病变组织中均可分离获得相应病原菌^[27](表 2)。

表 2 澳洲坚果致病病原菌

| 病原菌 | 病况 | 部位 | 时间 |
|--|--------------|------|--------|
| 疫霉 <i>Phytophthora</i> ^[28] | 引起树干溃疡 | 树干 | 1961 年 |
| 腐霉菌 <i>Pythium carlinianum</i> ^[29] | 根系坏死, 抑制果树生长 | 根系 | 1970 年 |
| 辣椒疫霉 <i>Phytophthora capsici</i> ^[11] | 花序腐烂脱落 | 花 | 1976 年 |
| 棍棒柄座菌 <i>Kretzschmaria clavus</i> ^[30] | 根部腐烂 | 根系 | 1977 年 |
| 异色拟盘多毛孢 <i>Pestalotiopsis versicolor</i> ^[31] | 叶片出现枯斑并逐渐扩大 | 叶 | 1981 年 |
| 葡萄孢属 <i>Botrytis</i> ^[4] | 花疫病 | 花 | 2002 年 |
| 假尾孢属 <i>Pseudocercospora</i> ^[32] | 叶片、果实出现病斑 | 叶、果实 | 2003 年 |
| 热带疫霉 <i>Phytophthora tropicalis</i> ^[33] | 叶片枯萎 | 叶 | 2016 年 |
| <i>Pestalotiopsis</i> sp. ^[13] | 花枯萎坏死, 花束枯萎 | 花 | 2017 年 |
| <i>Neopestalotiopsis</i> sp. ^[13] | 花枯萎坏死, 花束枯萎 | 花 | 2017 年 |
| 小孢拟盘多毛孢菌 ^[34] | 叶片出现灰斑 | 叶 | 2018 年 |
| 假毛丛赤壳菌 <i>Nectria pseudotrichia</i> ^[10] | 黑果病 | 果实 | 2019 年 |
| 间座壳菌 <i>Diaporthe</i> spp. ^[35] | 果壳腐烂 | 果实 | 2020 年 |
| <i>Neopestalotiopsis clavispora</i> ^[35] | 叶片出现斑点 | 叶 | 2020 年 |
| 暹罗炭疽菌 <i>Colletotrichum siamense</i> ^[35] | 叶片出现斑点 | 叶 | 2020 年 |
| 丽赤壳菌 <i>Calonectria pentaseptata</i> ^[36] | 果实出现红褐斑 | 果实 | 2020 年 |
| <i>Calonectria pseudoreteauidi</i> ^[21] | 黑果病 | 果实 | 2022 年 |
| 可可毛色二孢 <i>Lasiodiplodia theobromae</i> ^[37] | 顶梢枯死 | 芽 | 2022 年 |
| <i>Neofusicoccum luteum</i> ^[37] | 顶梢枯死 | 芽 | 2022 年 |
| <i>Lasiodiplodia iraniensis</i> ^[37] | 顶梢枯死 | 芽 | 2022 年 |
| 亚洲新拟盘多毛孢 <i>Neopestalotiopsis asiatica</i> ^[17] | 花瓣变褐, 花序干枯死亡 | 花 | 2023 年 |
| 腐生新拟盘多毛孢 <i>Neopestalotiopsis saprophytica</i> ^[17] | 花瓣变褐, 花序干枯死亡 | 花 | 2023 年 |
| 假可可毛色二孢 <i>Lasiodiplodia pseudotheobromae</i> ^[9] | 茎溃疡 | 茎 | 2024 年 |
| <i>Cladosporium xanthochromaticum</i> ^[9] | 树枝枯萎 | 枝 | 2024 年 |
| <i>Cladosporium pauciramosa</i> ^[6] | 果壳腐烂 | 果实 | 2024 年 |

尽管目前已鉴定出较多的澳洲坚果病原菌,但各种病害致病机理仍不清晰。为此,亟需深化病原微生物的鉴定及其生理生化特性研究及解析致病机制,同时筛选高效拮抗菌株并系统探明病原菌种群结构、侵染机制、病害发生流行规律及病原菌-寄主互作机制等核心科学问题。只有从根本层面阐明病害发生的内在原因,才能为其绿色、可持续防控策略的制定提供坚实基础。

2 澳洲坚果病害绿色防控策略

澳洲坚果病害的综合防控包括农业防治(如合理轮作、修剪和土壤管理)、化学防治(如使用杀菌剂)和生物防治(如应用拮抗微生物)。澳洲坚果病害防治策略中应该注重“防”在前“治”在后的原则,更加关注精准绿色防控,为生物防治提供更多可能性。

2.1 生物防治

利用微生物(细菌和真菌)对病原菌的拮抗作

用进行澳洲坚果病害防治是一种安全和潜在有效的防治策略^[38]。生防菌可以通过竞争占位作用、拮抗作用、诱导抗性、促生长、重寄生作用以及通过诱导植物产生抗病信号刺激植物本身产生防御反应,与植物共同抵抗病原菌。

木霉是目前研究最广的生物防治菌之一,其在澳洲坚果病害生物防治方面具有很强的潜力。木霉属中,多种木霉作为有效生防菌株已被广泛研究^[39]。木霉菌在接触到病原菌后,菌丝通过识别、接触、缠绕等方式穿透病原菌,产生细胞壁降解酶例如纤维素酶、几丁质酶、葡聚糖酶等,降解或者抑制病原菌^[40]。目前研究发现有哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)、深绿木霉(*Trichoderma atroviride*)、钩状木霉(*Trichoderma hamatum*)等至少对20余种病原真菌、细菌有拮抗作用^[41]。杨蕊等^[8]通过研究云南省德宏州澳洲坚果叶枯病与叶斑病的病原菌,发现哈茨木霉对污斑新拟盘多毛孢菌(*Pestalotiopsis foedans*)和小孢拟盘多毛孢菌有较好的拮抗作用,其抑菌率为60.56%。林志伟等^[42]发现,在大豆叶片施用木霉后,与空白对照组相比,大豆植株产生的抗逆酶要明显高于对照。Li等^[43]发现钩状木霉体外试验对黑乳杆菌(*Lactobacillus theobromae*)有明显的抑制作用,相对于无菌水对照,喷雾处理的分生孢子悬浮液能显著减少人工接种澳洲坚果叶片上的乳杆菌引起的病变大小,降低澳洲坚果幼苗的发病指数。Sanabria等^[44]研究表明,木霉属菌株能够降低澳洲坚果感染*Rosellinia* sp.后的发病率。

2.2 抗病品种选育与应用

1986年,Ko等^[45]通过在澳洲坚果幼苗植株上直接接种病原菌来快速筛选抗性品种。2001年,Craig等^[46]开展澳洲坚果品种对假尾孢菌属的抗性试验工作。2012年,Akinsanmi等^[47]研究表明澳洲坚果表型性状“果实气孔丰度”与其壳斑病抗性有关,并确定植物表型性状可作为澳洲坚果育种计划中抗病性筛选的选择依据。随后在2016年测试了4种澳洲坚果对肉桂疫霉(*Phytophthora cinnamomi*)侵染的相对敏感性和耐受性,提出四叶澳洲坚果(*Macadamia tetraphylla*)的相对耐受性可能支持其作为抗肉桂疫霉病原菌的首选砧

木^[48]。2020年,Nunn等^[49]通过筛选壳斑病抗性相关的遗传标记,提高了澳洲坚果壳斑病抗性育种试验的效率。2021年,Olumide等^[50]通过澳洲坚果叶片试验,鉴定出14份种质和2份野生种质(对肉桂疫霉和*Phytophthora multivora*具有抗性)。2022年,Nunn等^[51]筛选出假尾孢菌抗性品种,澳洲坚果‘HAES246’和‘BAM263’被鉴定为具有假尾孢菌抗性品种,可以作为亲本进一步评估;后又对病原菌田间接种方法进行改进,使其能够在大规模育种群体中得到有效的应用,并对其有效性进行了评价^[52]。Hardner等^[53]采用数量遗传学方法培育澳洲坚果优良种质,新品种于2017年进入澳大利亚官方澳洲坚果育种计划。Katie等^[54]采取基因组选择的方法提高了遗传增益和选择效率,在相关群体中预测的澳洲坚果产量遗传增益为传统育种方法的2倍以上,将世代长度从8 a减少到4 a。截至目前,澳洲坚果抗病育种工作仍不够深入,澳洲坚果育种工作还比较依赖传统育种方法,育种周期较长,且育种工作研究主要集中在提高产量和质量上。

澳洲坚果抗病育种需明晰种质亲缘关系与遗传多样性。随着基因组学、蛋白组学在植物育种中的应用^[55],如利用全基因组关联分析来识别与重要性状相关的分子标记,以及对复杂性状的基因组选择^[56],澳洲坚果育种步入新阶段。基于SNP、SSR分子标记技术,能够明确澳洲坚果种质亲缘关系与遗传多样性^[57],构建DNA指纹图谱,对澳洲坚果种质资源进行快速鉴定。近年来,我国研究者在澳洲坚果基因组研究中取得重要进展。Xia等^[58]选用‘桂热1号’品种进行测序,构建出了染色体级别的澳洲坚果基因组。Lin等^[59]利用测序结合Hi-C等技术,完成了澳洲坚果染色体级别的基因组组装。李志强等^[60]对来自农业部景洪澳洲坚果种质资源圃的208份澳洲坚果进行全基因组重测序,摸清了不同材料之间的种群结构和关系。这些工作为澳洲坚果抗病育种提供了条件。

利用植物本身具有的某种抑菌代谢化合物,人为定向强化相关表达基因,可以加速育种进程。植物体本身存在一些代谢化合物,能够抑制

病原菌的入侵,有些生防菌通过穿透并定殖在宿主植物的表皮和皮层组织中来诱导植物局部产生防御反应,宿主在接收到信号后会合成抗菌化合物,例如类黄酮、萜类化合物、酚的衍生物、抗毒素、糖苷配基等,在病原菌入侵植物的路径进行拦截^[61-62]。Yang等^[63]研究明确儿茶素等类黄酮物质的抗病作用,过表达儿茶素合成基因(CoDFR和CoANR)可以提高植株抗炭疽病能力。Wang等^[64]发现黄酮3-羟化酶的转基因表达可改变高粱类黄酮的生物合成,减轻炭疽病感染。Zhang等^[65]发现位于细胞内质网的CfSnf1基因是果炭疽菌(*Colletotrichum fructicola*)发育和致病性的关键因素,是炭疽病防治的潜在杀菌剂靶点。

2.3 农业生态调控措施

以土壤-作物-病原菌-生防菌系统为研究对象,采用科学的农业生态调控措施,阻断病原菌生活史,能够有效抑制病害。如在前期做好预防工作,利用微生物进行病害预防(例如从健康植物或抑病土壤中人工构建微生物群落,结合种子包衣、叶片喷洒和作为生物有机肥料等方式进行利用);在果园管理中引进轮作与间套作、覆盖作物、减免耕以及有机种植等技术措施,预防澳洲坚果病害^[66];同时,加强田间栽培管理,定期修剪树形,合理施用肥料。在我国现有的生态条件下,还需考虑到果园种植的诸多因素,因地制宜衡量农事操作的可行性,以科学的农业生态调控措施抑制病害的发生^[67]。

2.4 化学农药的科学减量与应急应用

在澳洲坚果病害防治中,化学防治快速有效,如黑果病、叶枯病和枝条回枯病常用多菌灵、甲基硫菌灵、咪鲜胺水乳剂、克菌丹粉剂等按照不同比例稀释喷雾;速衰病常用甲霜灵锰锌或甲霜灵;炭疽病常用多菌灵、炭疽福美或咪鲜胺水乳剂、百菌清水剂;澳洲坚果花疫病常用苯菌灵和代森锰锌可湿性粉剂;澳洲坚果茎干溃疡病常用25 g/L氧化铜泥浆、敌菌丹、复合甲霜灵^[68]。依赖羧酸酰胺类、苯甲酰胺类杀菌剂及环丙唑类悬浮剂等化学农药,虽有一定效果,但有效预防病害、稳定产量与保障品质仍面临巨大挑战。化学农

药的长期广泛施用已导致部分病原菌产生抗性,且依靠化学药剂治标不治本,会对植株产生药害及造成土壤、环境污染^[69]。化学农药减量使用是促进澳洲坚果绿色发展和保障果实质量安全的重要途径。在澳洲坚果病害防治过程中,首先要做到熟悉不同病害的发病特征、发病时间以及流行规律,在最佳时期进行防治。而日常果园管理科学要尽量减少化学农药使用或者选用高效低毒型化学农药,在防治病害的同时保护环境。

2.5 监测预警与精准防控

病害监测与预警系统的建立对病害的早期诊断和控制具有重要意义。目前,植物病害监测预警技术的研究取得一定进展,“3S”技术(遥感技术、地理信息系统、全球定位系统)、电子传感技术(电子鼻、电子舌等)以及分子生物学技术的应用,促进了病害监测预警技术的发展^[70]。赵睿等^[71]设计了一种基于粒子群优化的支持向量机(PSO-SVR)模型的黄瓜病害温室物联网预警系统,能够针对病害建立预警模型,结合环境参数选择是否进行病害预警提示。在澳洲坚果病害预警方面,也可以对病害图像进行收集管理,通过病害图像识别技术提取识别病害特征,构建植保信息化和智慧化系统,在病害形成规模前提前预警^[72]。

3 展望

实现澳洲坚果病害的综合绿色防控仍需着力突破若干关键瓶颈。一是生防菌剂产业化与应用技术的深度攻关。在明确病害病原菌的致病机理并建立遗传操作系统、筛选获得高效生防菌株的基础上,如何实现生防菌剂产业化与应用、明确生防菌对土壤中原始微生物群落的影响等,是目前生防菌防治技术面临的挑战。

二是基于生态系统的综合治理策略的深化研究。病害的发生与传播受多种生态因子影响,包括气候条件、土壤环境。加强对病害流行规律及生态环境影响的深度研究具有重要意义,未来研究应聚焦于关键病害的流行规律,揭示其与生态环境的相互作用,为制定科学的病害防控策略提

供理论依据。

三是多组学技术驱动抗病精准育种体系的构建。澳洲坚果抗病育种工作应明确澳洲坚果种质亲缘关系与遗传多样性,通过基因组学、蛋白组学和转录组等多组学技术,开发澳洲坚果育种分子筛选标记、构建DNA指纹图谱,深入挖掘抗病基因资源,拓展功能验证的技术手段,缩短育种周期。

四是构建标准化的绿色防控技术体系与推广协同网络。目前,我国澳洲坚果病害绿色防控技术标准仍处于空白,尚未建立标准化的绿色防控技术体系。后续可以根据现有的综合防治措施,与国内澳洲坚果种植园开展合作,推广绿色防治技术,并通过国际合作与数据共享,构建全球范围的澳洲坚果病害研究与防控网络,以整合不同地区的研究成果,为绿色防控技术体系的标准化与推广提供支持。

突破上述瓶颈,不仅需要学科间的深度融合与技术创新,更需产业界、科研机构与政府部门的通力协作。唯有如此,方能构建起高效、环保、可持续的澳洲坚果病害绿色综合防控体系,为澳洲坚果产业的提质增效与绿色发展提供长远保障。

参考文献:

- [1] HUETT DO. Macadamia physiology review a canopy light response study and literature review [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2004, 55: 609-624.
- [2] WANG Y, XIA J, WANG Z, et al. Combined analysis of multi-omics reveals the potential mechanism of flower color and aroma formation in *Macadamia integrifolia* [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 13: 1095644.
- [3] 贺熙勇, 聂艳丽, 吴霞, 等. 云南澳洲坚果产业高质量发展的建议 [J]. 中国南方果树, 2022, 51(4): 205-210.
- [4] 林文有. 澳洲坚果病害综述 [J]. 热带作物研究, 1994(2): 73-78.
- [5] YAO XF, LIU QM, LIU YX, et al. Managing Macadamia decline: a review and proposed biological control strategies [J]. Agronomy, 2024, 14(2): 308.
- [6] TWIDDY DI, FOUCHÉ A, AKINSANMI OA, et al. Biology and pathogenicity of fungi causing husk rot of macadamia in South Africa [J]. European Journal of Plant Pathology, 2024, 170(3): 501-518.
- [7] PHANTHAVONG S, DALY A, WEIR B, et al. First report of *Calonectria pseudoreteaudii* in Lao PDR associated with a leaf spot disease of *Macadamia integrifolia* [J]. Australasian Plant Pathology, 2022, 52: 23-26.
- [8] 杨蕊, 肖月, 李萍, 等. 澳洲坚果叶部病害病原菌鉴定及其生防菌筛选 [J]. 经济林研究, 2023, 41(1): 282-291.
- [9] SILVA R, NECHET K, MORIYA L, et al. Etiology and prevalence of Macadamia diseases in Brazil [J]. Australasian Plant Pathology, 2024, 53: 159-174.
- [10] 蒋桂芝, 周程, 李子强, 等. 澳洲坚果黑果病原鉴定及防治药剂毒力测试 [J]. 热带农业科技, 2019, 42(1): 25-29.
- [11] KUNIMOTO R. *Phytophthora capsici*, corrected name for the cause of *phytophthora* blight of Macadamia racemes [J]. Etiology, 1976, 66: 546-548.
- [12] BRIGHT J. Macadamia plant protection guide 2022-2023 [R]. Department of Primary Industries, 2022.
- [13] AKINSANMI OA, NISA S, JEFF-EGO OS, et al. Dry flower disease of Macadamia in Australia caused by *Neopestalotiopsis macadamiae* sp. nov. and *Pestalotiopsis macadamiae* sp. nov [J]. Plant Disease, 2017, 101(1): 45-53.
- [14] ROBERTS R, ROBBERTSE N, THOMPSON GD, et al. Characterization of Macadamia ringspot-associated virus, a novel Orthotospovirus associated with *Macadamia integrifolia* in South Africa [J]. European Journal of Plant Pathology, 2024, 169(2): 347-357.
- [15] 方琦, 丁铭, 董家红, 等. 云南澳洲坚果苗木感染番茄斑萎病毒属病毒初报 [J]. 园艺学报, 2013, 40(2): 350-354.
- [16] 李加智, 蔡志英. 云南省澳洲坚果病害 [J]. 热带农业科技, 2003(2): 11-14.
- [17] 王彤彤, 蒋婷, 谭德锦, 等. 广西澳洲坚果干花病原菌鉴定 [J]. 植物保护, 2023, 49(6): 238-241, 252.
- [18] PRASANATH K, GALEA VJ, AKINSANMI OA. Influence of climatic factors on dry flower, grey and green mould diseases of Macadamia flowers in Australia [J]. Journal of Applied Microbiology, 2022, 132(2): 1291-1306.
- [19] SHEARER BL. Time course studies of temperature and soil depth mediated sporangium production by *Phytophthora cinnamomi* [J]. Australasian Plant Pathology, 2014, 43(3): 235-244.
- [20] KO WH. Biological control of *Phytophthora* root rot of rapaya with virgin soil [J]. Plant Diseases, 1982, 66(1):

- 446.
- [21] 蒋桂芝, 王康, 李学斌, 等. 盈江澳洲坚果黑果病病原鉴定及防治药剂室内筛选 [J]. 热带农业科技, 2022, 45 (3): 30-34.
- [22] PRASANNATH K, GALEA VJ, AKINSANMI OA. Diversity and pathogenicity of species of *Botrytis*, *Cladosporium*, *Neopestalotiopsis* and *Pestalotiopsis* causing flower diseases of Macadamia in Australia [J]. Plant Pathology, 2023, 72(5): 881-899.
- [23] KO WH. Nature of slow and quick decline of Macadamia trees [J]. Botanical Studies, 2009, 50(1): 1-10.
- [24] ADASKAWES JE, OGAWA JM. Wood decay pathology of fruit and nut trees in California [J]. Plant Disease, 1990, 74(5): 341-352.
- [25] ANN PJ, CHANG TT, KO WH. *Phellinus noxius* brown root rot of fruit and ornamental trees in Taiwan [J]. Plant disease, 2002, 86(8): 820-826.
- [26] KO WH, KUNIMOTO RK. Quick decline of Macadamia trees: association with *Phellinus gilvus* [J]. Japanese Journal of Phytopathology, 1996, 62: 37-39.
- [27] OLUMIDE SJ, ANDRE D, BRUCE T, et al. Prevalence of *Phytophthora* species in Macadamia orchards in Australia and their ability to cause stem canker [J]. Plant Pathology, 2020, 69(7): 1270-1280.
- [28] ZENTMYER GA, WILLIAM BS. California avocado society 1961 yearbook *Phytophthora* canker of Macadamia trees [J]. California Avocado Society, 1961, 45: 107-109.
- [29] SEGURA BD. Root rot caused by *P. carolinianum* on Macadamia in the nursery [J]. Turrialba, 1970, 20(4): 513-514.
- [30] KO WH. Root decay caused by *Kretzschmaria clavus*: its relation to *Macadamia integrifolia* decline [Fungal diseases] [J]. Phytopathology, 1977, 77(1): 18-21.
- [31] RAWAL RD, MUNIYAPPA NC. A new leaf disease of Macadamia [J]. Agricultural and Food Sciences, Current Science, 1981.
- [32] BEILHARZ V, MAYERS PE, PASCOE IG. *Pseudocercospora Macadamiae* sp. nov., the cause of husk spot of Macadamia [J]. Australasian Plant Pathology, 2003, 32 (2): 279-282.
- [33] KEITH LM, SUGIYAMA LS, MATSUMOTO TK, et al. Disease management strategy for Macadamia quick decline [J]. Acta Horticulturae, 2016, 1109: 237-242.
- [34] 户雪敏, 詹儒林, 吴婧波, 等. 澳洲坚果叶斑病新病原及生物学特性 [J]. 中国南方果树, 2018, 47(4): 7-12.
- [35] WRONA CJ, MOHANKUMAR V, SCHOEMAN MH, et al. Phomopsis husk rot of Macadamia in Australia and South Africa caused by novel *Diaporthe* species [J]. Plant Pathology, 2020, 69(5): 911-921.
- [36] 蒋桂芝, 何双凌, 岳海, 等. 澳洲坚果褐腐病的病原菌鉴定及生物学特性 [J]. 植物保护, 2020, 46(2): 107-111.
- [37] MOHANKUMAR V, DANN EK, AKINSANMI OA. Diversity and pathogenicity of botryosphaeriaceae associated with macadamia branch dieback in Australia [J]. Plant Disease, 2022, 106(10): 2576-2582.
- [38] ESSALIMI B, ESSERTI S, RIFAI LA, et al. Enhancement of plant growth, acclimatization, salt stress tolerance and verticillium wilt disease resistance using plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) associated with plum trees (*Prunus domestica*) [J]. Scientia horticulturae, 2022, 291: 110621.
- [39] SANCHEZ AD, OUSSET MJ, SOSA MC. Biological control of *Phytophthora* collar rot of pear using regional *Trichoderma* strains with multiple mechanisms [J]. Biological Control, 2019, 135: 124-134.
- [40] 曾叶, 庄文颖, 余知和, 等. 低温降解玉米秸秆的木霉菌菌株筛选 [J]. 微生物学通报, 2023, 50(9): 3939-3951.
- [41] AKINSANMI OA, DRENTA A. Phosphite and metalaxyl rejuvenate macadamia trees in decline caused by *Phytophthora cinnamomi* [J]. Crop Protection, 2013, 53: 29-36.
- [42] 林志伟, 于春生, 李海燕, 等. 哈茨木霉抗多菌灵突变株对大豆菌核病的诱导抗性生理 [J]. 大豆科学, 2016, 35(3): 472-476.
- [43] LI X, LENG J, YU L, et al. Efficacy of the biocontrol agent *Trichoderma hamatum* against *Lasiodiplodia theobromae* on Macadamia [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 994422.
- [44] SANABRIA V, ANDRÉS D. Biological control of *Rosellinia* sp. causing of the sudden death of the macadamia (*Macadamia integrifolia*) with isolates of *Trichoderma* spp. [J]. Ciencia E Investigacion Agraria, 2016, 18: 77-86.
- [45] KO WH, KUNIMOTO RK. A rapid method for screening macadamia seedlings for resistance to *Kretzschmaria clavus* [J]. Nippon Shokubutsu Byori Gakkaiho, 1986, 52(2): 336-337.
- [46] CRAIG H, CALVIN W, RUSS S, et al. Genetic parameters for nut and kernel traits in Macadamia [J]. Euphytica, 2001, 117: 151-161.

- [47] AKINSANMI OA, TOPP B, DRENTA A. Pericarps retained in the tree canopy and stomatal abundance are components of resistance to husk spot caused by *Pseudocercospora macadamiae* in Macadamia [J]. Euphytica, 2012, 185(2):313-323.
- [48] AKINSANMI OA, WANG G, NEAL J, et al. Variation in susceptibility among macadamia genotypes and species to *Phytophthora* root decay caused by *Phytophthora cinnamomi* [J]. Crop Protection, 2016, 87:37-43.
- [49] NUNN J, ALAM M, AKINSANMI O, et al. Breeding for Resistance to Husk Spot Disease in Macadamia [Z]. The Third International Tropical Agriculture Conference (TROPAG 2019). 2020.
- [50] OLUMIDE SJ, TOPP B, DRENTA A, et al. Resistance in wild Macadamia germplasm to *Phytophthora cinnamomi* and *Phytophthora multivora* [J]. Annals of Applied Biology, 2021, 178(3):519-526.
- [51] NUNN J, HARDNER C, DE FAVERI J, et al. Genetic parameters of husk spot resistance in Macadamia breeding families [J]. Euphytica, 2023, 219(5):54.
- [52] NUNN J, ALAM M, HARDNER CM, et al. Evaluation of in-field inoculation methods for characterization of Macadamia Germplasm to husk spot incidence and severity [J]. Plant Disease, 2023, 107(1):76-82.
- [53] HARDNER C, COSTA E SILVA J, WILLIAMS E, et al. Breeding new cultivars for the Australian Macadamia industry [J]. HortScience horts, 2019, 54(4):621-628.
- [54] KATIE MO, BEN JH, CRAIG MH, et al. Genomic selection and genetic gain for nut yield in an Australian Macadamia breeding population [J]. BMC Genomics, 2021, 22(1):370.
- [55] IWATA H, MINAMIKAWA MF, KAJIYA- KANEGAE H, et al. Genomics-assisted breeding in fruit trees [J]. Breeding Science, 2016, 66(1):100-115.
- [56] O' CONNOR K, HAYES B, HARDNER C, et al. Genome-wide association studies for yield component traits in a macadamia breeding population [J]. BMC Genomics, 2020, 21(1):199.
- [57] 谭秋锦, 王文林, 陈海生, 等. 基于SNP分子标记的澳洲坚果种质遗传多样性分析[J]. 分子植物育种, 2020, 18(21):7246-7253.
- [58] XIA C, JIANG S, TAN Q, et al. Chromosomal-level genome of Macadamia (*Macadamia integrifolia*) [J]. Tropical Plants, 2022, 1(1):13-21.
- [59] LIN J, ZHANG W, ZHANG X, et al. Signatures of selection in recently domesticated Macadamia [J]. Nature Communications, 2022, 13(1):242.
- [60] LI Z, WU C, MA J, et al. Genetic diversity analysis of Macadamia germplasm in China based on whole-genome resequencing [J]. Tree Genetics & Genomes, 2024, 20(3):14.
- [61] MORAN- DIEZ E, RUBIO B, DOMÍNGUEZ S, et al. Transcriptomic response of *Arabidopsis thaliana* after 24 h incubation with the biocontrol fungus *Trichoderma harzianum* [J]. Journal of Plant Physiology, 2012, 169(6):614-620.
- [62] FONTENELLE ADB, GUZZO SD, LUCON CMM, et al. Growth promotion and induction of resistance in tomato plant against *Xanthomonas euvesicatoria* and *Alternaria solani* by *Trichoderma* spp. [J]. Crop Protection, 2011, 30(11):1492-1500.
- [63] YANG C, WU P, YAO X, et al. Integrated transcriptome and metabolome analysis reveals key metabolites involved in *Camellia oleifera* defense against Anthracnose [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(1):536.
- [64] WANG L, LUI A, LAM P, et al. Transgenic expression of flavanone 3-hydroxylase redirects flavonoid biosynthesis and alleviates anthracnose susceptibility in sorghum [J]. Plant Biotechnology Journal, 2020, 18(11):2170-2172.
- [65] ZHANG S, GUO Y, LI S, et al. Functional analysis of CfSnf1 in the development and pathogenicity of anthracnose fungus *Colletotrichum fructicola* on tea-oil tree [J]. BMC Genetics, 2019, 20(1):94.
- [66] 赵紫华, 高峰, 贺达汉, 等. 多尺度空间下害虫生态调控理论与应用[J]. 中国科学:生命科学, 2015, 45(8):755-767.
- [67] 戈峰, 欧阳芳, 赵紫华. 基于服务功能的昆虫生态调控理论[J]. 应用昆虫学报, 2014, 51(3):597-605.
- [68] 龚力波, 贺熙勇, 杨斌, 等. 澳洲坚果丰产栽培管理技术[M]. 昆明:云南教育出版社, 2022.
- [69] Agosteo GE, Raudino F, Cacciola SO. Resistance of *Phytophthora capsici* to metalaxyl in plastic-house capsicum crops in southern Italy [J]. EPPO Bulletin, 2008, 30(2):257-261.
- [70] 曹学仁, 周益林. 植物病害监测预警新技术研究进展[J]. 植物保护, 2016, 42(3):1-7.
- [71] 赵睿, 程鑫, 徐晓辉, 等. 基于PSO-SVR模型的温室病害预警防治系统[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4):854-860.
- [72] 王海光. 植物病害图像识别及其发展前景[J]. 植物病理学报, 2025, 55(4):964-977.