中国科学: 生命科学 2024 年 第 54 卷 第 10 期: 1798 ~ 1813
SCIENTIA SINICA Vitae lifecn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 中国知名大学及研究院所专栏 中国热带农业科学院专辑

橡胶树主要病害研究现状与展望

李博勋[1,2], 刘先宝[1], 陈丽琼[3], 时涛[1], 许力丹[3], 李超萍[1], 黄贵修[1*]

1. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 农业农村部热带作物有害生物综合治理重点实验室, 海南省热带农业有害生物监测与控制重点实验室, 海口 571101;
2. 云南农业大学植物保护学院, 昆明 650201;
3. 中国热带农业科学院科技信息研究所, 海口 571101
* 联系人, E-mail: hgxiu@vip.163.com

收稿日期: 2024-06-17; 接受日期: 2024-09-25; 网络版发表日期: 2024-10-16
海南省自然科学基金(批准号: 324QN333)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(批准号: 1630042024021)资助

摘要 橡胶树是我国重要的热带经济作物, 其产物天然橡胶在国防安全、经济建设和人民生活等方面具有重要意义. 病害的发生与流行一直是制约天然橡胶产业健康、持续发展的重要生物限制因素. 本文总结了近年来国内外在橡胶树叶部、茎杆和根部主要病害的研究现状, 深入阐述了病害的发生与流行规律、检测监测与预警、致病机理与抗病机制, 以及现有防控技术、产品、模式的成熟度与应用现状等内容. 同时, 本文还分析了当前面临的橡胶树病害监测和防控技术落后、投入劳动成本高、优良抗病种质资源利用不足、智能化程度低等技术难题. 提出了加强橡胶树病害基础数据库建设, 深入开展致害机制系统研究, 创新研发智能化监测与控制技术体系, 建设橡胶树主要病害统防统治与社会化服务技术平台等研究展望. 通过对橡胶树主要病害研究工作的总结、分析与展望, 为今后橡胶树主要病害的宏观把控和精准防控提供理论依据, 将有助于实现天然橡胶产业绿色、健康、可持续发展.

关键词 橡胶树, 主要病害, 研究现状, 展望

全球有155个热带国家和地区, 主要分布在亚洲、拉丁美洲、非洲、北美洲等热带地区, 面积约为5360万平方公里, 耕地面积约为973万平方公里. 其中处于南北回归线区域的国家和地区有131个(国家118个、地区13个), 包含有典型热带国家和地区106个(国家94个、地区12个), 局部典型热带国家25个, 还有一部分虽不在南北回归线内, 但能生长典型热带作物的非典型热带国家24个[1]. 从地理学和气象学角度来看, 中国的陆地热区包括海南和台湾全省, 广东、广西、福建、云南、湖南和江西等省区局部地区, 四川省凉山州、攀枝花市和贵州干热河谷地区, 以及西藏的墨脱县、察隅县和波密县等低海拔地区, 共11个省区的464个县区, 面积约53.8万平方公里, 耕地面积为19.7万平方公里, 约占中国国土面积的5.6%[2].

热带作物, 广义上指适于热带地区栽培的各类作物的总称, 既包括水稻、花生、玉米、甘薯、豆类、芝麻等大田作物, 也包括甘蔗等经济作物; 狭义上指热带地区才能种植且具有一定经济价值的特种作物,

引用格式: 李博勋, 刘先宝, 陈丽琼, 等. 橡胶树主要病害研究现状与展望. 中国科学: 生命科学, 2024, 54: 1798–1813
Li B X, Liu X B, Chen L Q, et al. Current status and prospects of research on main diseases of rubber trees (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2024, 54: 1798–1813, doi: 10.1360/SSV-2024-0194

© 2024 《中国科学》杂志社 www.scichina.com
https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2024-0194

如橡胶树、木薯、椰子、油棕、剑麻、香茅、咖啡、香蕉、菠萝、杧果、荔枝、龙眼、胡椒、可可、香草兰等[3]. 据农业农村部农垦局统计数据显示, 截至2022年底, 全国橡胶树种植面积约为113万公顷, 其中云南56.34万公顷、海南51.86万公顷、广东4.71万公顷, 是我国种植面积最大的热带作物(不含甘蔗), 总产量约为86.2万吨.

橡胶树原产于南美洲亚马孙河流域的巴西、秘鲁、委内瑞拉、圭亚那等国, 是一种典型的热带雨林多年生乔木[4], 它属于大戟科(Euphorbiaceae)、橡胶树属(*Hevea*), 巴西橡胶树种(*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Mull. -Arg.). 除巴西橡胶树之外, *Hevea*属内还有10个种以及4个变种[5], 但是能直接大规模应用于生产栽培和商业化种植的仅有巴西橡胶树. 国际公认的橡胶树植胶区域为北纬15°以南及南纬10°以北之间的典型热带地区, 北纬17°以北不再适宜种植橡胶树, 我国是橡胶树的非传统种植种植区[6]. 20世纪50年代, 我国老一辈科技人员克服了重重困难, 将橡胶树引种并成功种植到中国热区, 使得我国成为世界上第一个在北纬18~24°范围内大面积成功种植橡胶树的国家, 实现了天然橡胶的自给[6,7]. 然而与泰国、马来西亚、印度尼西亚等传统植胶国相比, 我国植胶区积温较少, 割胶周期为每年4月~11月, 远低于传统植胶国全年均可割胶的水平, 加上经常受到寒害、风寒、干旱等自然灾害的影响, 橡胶树的长势和产胶能力也受到了限制. 基于这样特殊的栽培环境, 我国也是橡胶树病、虫、草害发生流行最为严重的国家.

1　橡胶树主要病害的发生与危害

据统计, 危害我国橡胶树的病害有91种, 以真菌性病害最为严重, 其中具有经济重要性的病害有11种. 叶部病害有白粉病、炭疽病、棒孢霉落叶病和拟盘多毛孢落叶病等; 茎杆病害有死皮病、割面条溃疡病和绯腐病等; 根部病害有白根病、红根病、褐根病以及由寒害引起的烂脚病等[8]. 2011年后, 随着全球天然橡胶贸易价格的不断下滑, 引发了天然橡胶产业经济下行, 导致全球天然橡胶生产格局和经营管理模式发生了重大变革, 胶林大量减毁、胶园失管或弃管. 在这样的大背景下, 我国天然橡胶产业的发展形势很严峻, 白粉病、炭疽病、割面条溃疡病、死皮病等常发病害大面积暴发流行, 棒孢霉落叶病、拟盘多毛孢落叶病等新发危险性病害也在主产区内频繁发生, 不仅对我国橡胶树的生产造成严重的产量和经济损失, 还对产业健康、可持续发展构成巨大威胁. 本文重点对南美叶疫病、棒孢霉落叶病、白粉病、炭疽病、死皮病以及白根病等主要病害进行综述.

1.1　南美叶疫病

橡胶树南美叶疫病由乌勒小环腔菌(*Microcyclus ulei* (P.Henn.) von Arx)侵染引起, 是国际头号检疫性病害, 也是橡胶树种植业的第一大危险性和毁灭性病害. 该病可为害橡胶树的叶片、花、果实和嫩枝, 感染该病后导致橡胶树叶片扭曲畸形并大量脱落, 嫩枝枯死, 胶树死亡, 可造成90%以上的产量损失[8]. 该病致使巴西橡胶树不能在其原产地巴西等南美洲国家大面积商业化种植, 只能被迫转移到泰国、印度尼西亚、马来西亚、缅甸、越南、老挝等东南亚国家以及科特迪瓦、尼日利亚等非洲国家进行规模化种植[9]. 亚洲及太平洋地区植物保护公约组织各成员国将该病病原列为重要的检疫性有害生物, 我国也将南美叶疫病菌*M. ulei*列入《中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录》一类有害生物[10]. 目前该病仍局限在拉丁美洲自北纬18°到南纬24°之间的国家和地区[11].

1.2　棒孢霉落叶病

橡胶树棒孢霉落叶病由多主棒孢(*Corynespora cassiicola* (Berk. & M.A. Curtis) C.T. Wei)侵染引起, 现已成为南亚、东南亚和中非橡胶树最具破坏性的叶部病害, 是继南美叶疫病之后第二个威胁世界天然橡胶产业的重要病害. 该病广泛分布于马来西亚、泰国、斯里兰卡、印度、越南、科特迪瓦等东南亚、西非和拉丁美洲等地区的橡胶种植园[12], 在橡胶树的各个生理期均能发生, 主要为害橡胶幼苗、幼树和成龄树的叶片、嫩梢和嫩枝, 导致叶片大量脱落、树皮爆裂、嫩梢回枯. 该病在苗圃发生最为严重, 造成小苗叶片形成大面积的坏死病斑甚至大量脱落, 实生苗感病后会阻碍胶苗茎杆的增粗, 达不到芽接要求; 染病幼树则重复落叶, 导致树冠裸露, 植株矮缩甚至死亡; 开割胶树感病后则会降低干胶产量20%~25%[8]. 我国于2006年首次在海南儋州和云南河口的橡胶苗圃地发现橡胶树棒孢霉落叶病[13], 目前该病害已经在海南、云

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2024-0194

南、广东等主要植胶区的实生苗上普遍发生，部分地区如云南普洱、河口，海南乐东、万宁等区域的成龄胶园和幼龄胶树上都发现该病，并呈现出扩散蔓延的趋势[14].

1.3 白粉病

橡胶树白粉病是由专性寄生菌橡胶树白粉菌(*Erysiphe quercicola* S. Takam. & U. Braun)侵染引起的一种气侯性病害，是我国橡胶主产区发生面积最大、危害最为严重的病害. 该病在每年早春3~4月份集中暴发流行，扩散蔓延迅速，短时期内能使新抽嫩叶、嫩梢染病，为害嫩叶、嫩梢、花序和果实. 发病叶片上布满白色粉状物，导致嫩叶皱缩畸形和大面积落叶，严重影响胶树的生长. 橡胶树白粉病使得胶树开割时间推迟1~2个月, 造成较大的产量和经济损失.

1.4 炭疽病

橡胶树炭疽病是由胶孢炭疽菌复合种(*Colletotrichum gloeosporioides* species complex)内的暹罗炭疽菌(*C. siamense*)和果生刺盘孢菌(*C. fructicola*), 尖胞炭疽菌复合种(*C. acutatum* species complex)内的华南炭疽菌(*C. australisinense*)和版纳炭疽菌(*C. bannanense*)，以及博宁炭疽菌复合种(*C. boninense* species complex)内的喀斯特炭疽菌(*C. karstii*)等多种病原菌引起的又一种重要叶部病害[15]. 该病与白粉病统称橡胶树“两病”，主要侵染嫩叶、叶柄、嫩梢和果实等部位，引起嫩叶皱缩畸形、嫩梢回枯和果实腐烂. 橡胶树炭疽病每年4~5月份暴发流行，有时与橡胶树白粉病一起发生, 导致橡胶树大量落叶, 影响胶树生长, 缩短割胶周期以及胶树减产，是我国橡胶主产区每年开春重点防治的对象.

1.5 死皮病

橡胶树死皮病是一种严重的生理综合症，它会导致橡胶树割线排胶减少或完全停止排胶，对橡胶树产胶影响极大[16]. 这种症状在世界各地的橡胶种植园普遍发生，发病率在14%~50%之间，全球每年因橡胶死皮病造成的干胶产量损失达50万吨[17]. 死皮病的形成机制较为复杂，早期刘志昕等人认为死皮病的形成可能是由病原生物和生理等多种因子胁迫，引发氧化跃变后产生的信号分子转导，进而激发细胞程序性死亡机制而表现出的防卫反应[18]. 陈守才等人认为死皮病是由强割和强乙烯刺激后引起的细胞程序性死亡现象[19]. 覃宝祥等人从生理的角度认为橡胶树死皮病可能是由强割或强乙烯刺激引起过度排胶，进而导致胶乳原位凝固和产胶功能衰竭、乳管细胞原位自毁的生理综合症[16]. 尽管很多学者分别从病理学[20,21]、生理学[22,23]、解剖学[24,25]、遗传学[26,27]等方面对橡胶树死皮病的形成机制进行探索与研究，但目前仍未明确橡胶树死皮病形成的真正原因.

1.6 白根病

橡胶树白根病是由木质硬孔菌(*Rigidoporus lignosus* (Klotzsch) Imaz.)引起的一种根部病害, 曾在马来西亚、印度尼西亚、印度和科特迪瓦等国的植胶园造成严重为害. 与橡胶树南美叶疫病一样，其病原被列入《中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录》[10]. 该病主要为害幼龄橡胶树，发病率可达60%, 严重影响橡胶树的生长并可导致植株死亡[28]. 我国于1983年在海南东太农场首次发现该病[29]，经过多年的严格管控，目前该病仅在云南河口地区的部分胶园零星发生，但仍然需要做好严格的检疫和管控措施，防止该病害的进一步扩散蔓延.

1.7 其他新发危险性病害

近十年来，全球天然橡胶产业的生产格局发生了巨大变化, 我国橡胶种植区生态环境和套种模式也趋向多样化，这导致了原有的次要或新发病害的加剧. 在海南、云南等主要植胶区相继发生了由茄类镰刀菌(*Fusarium solani*)引起的茎杆溃疡病[30]，由尖孢镰刀菌(*F. oxysporum*)引起的茎基腐病[31]，由互隔交链孢霉(*Alternaria alternata*)引起的黑斑病[32], 以及由壳梭孢菌(*Neofusicoccum ribis*)引起的橡胶树壳梭孢叶斑病等一系列新发危险性病害, 这些病害都不同程度地对橡胶树生长和产量造成影响[33]. 2019年，由新拟盘多毛孢属(*Neopestalotiopsis* sp.)病原真菌引起的橡胶树拟盘多毛孢落叶病在印度尼西亚、泰国、马来西亚、斯里兰卡等东南亚橡胶种植园大面积暴发流行，导致橡胶树大量反复落叶、胶树停胶，短时期内病情难以控制，造成重大的产量和经济损失[34~36]. 2020年5月，该病在我国海南省乐东县志仲镇首次报道[37].

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2024-0194

2　橡胶树主要病害的检测、监测与预警

2.1　橡胶树主要病害的检测

2.1.1　白粉病检测

橡胶树白粉病菌为专性寄生菌，其有性态很少被发现. 早期根据无性态将其描述为橡胶粉孢(*Oidium heveae* Steinm)，之后发现橡胶树白粉菌与日本栎属(*Quercus*)植物上收集的白粉菌(*Erysiphe* sp.)ITS序列一致，推测*O. heveae*可能为*Erysiphe* sp.的无性态[38]. 在形态和分子系统发育分析基础上，Liyanage和Wu等人将橡胶树白粉病的病原菌*O. heveae*修订为*Erysiphe quercicola*[39,40]，Mao等人根据白粉菌基因组中特有的保守序列OHS，建立了橡胶树白粉菌PCR及巢式PCR (nested PCR)分子检测技术[41]. 官鑫等人结合叠氮溴化丙啶(PMA)和实时荧光定量PCR技术(qPCR)，构建了一种检测橡胶树白粉菌活菌量的PMA-qPCR检测体系, 该体系能够快速定量检测活菌量, 具有灵敏、准确和高效的优点[42]. 最近的研究提出了一种结合光谱和理化参数特征的早期检测技术，通过测量健康和早期感染白粉病的橡胶树叶子的高光谱反射率数据和理化参数数据，使用支持向量机、随机森林和逻辑回归等方法建立检测模型[43]，这项技术展示了早期检测橡胶树白粉病的可行性，为病害的早期识别和管理提供了新的思路.

2.1.2　炭疽病检测

橡胶树炭疽菌种群复杂多样，根据炭疽菌特定的基因序列，如β-微管蛋白(TUB2)、3-磷酸甘油醛脱氢酶、核糖体转录间隔区序列(ITS)等对其种群进行有效区分[15]. 近年来，随着炭疽菌新的国际分类标准建立[44]，目前已确定引起橡胶树炭疽病的刺盘孢属(*Colletotrichum*)有3个复合种, 分别为胶孢炭疽复合种、尖孢炭疽复合种和博宁炭疽复合种，其中胶孢炭疽复合种下有果生刺盘孢菌、暹罗炭疽菌和乐东炭疽菌；尖孢炭疽复合种下有华南炭疽菌和版纳炭疽菌，博宁炭疽复合种下有喀斯特炭疽菌[15,45,46]. 刘先宝等人建立了基于ITS序列橡胶树尖孢炭疽菌快速分子检测方法[47]，杜艳楠等人建立了基于荧光定量PCR的橡胶树炭疽病动态检测模型[48]，连文旭等人以β-tubulin为靶标基因，建立了橡胶树胶孢炭疽菌复合种的环介导等温扩增检测方法[49]. 在橡胶树炭疽病的检测中，最关键的是明确其病原种群，不同种群对药剂敏感性和对寄主的致病力都存在明显差异. 因此建立准确有效的检测方法，将有助于明确炭疽菌的种群，指导科学防治炭疽病.

2.1.3　棒孢霉落叶病检测

橡胶树多主棒孢病菌种群结构复杂、遗传多样性丰富. Cassiicolin是该菌重要的寄主专化型蛋白类毒素, 存在6种毒素类型(Cas1~Cas6亚型)[50], 同时也是多主棒孢种群划分的依据. Déon等人发现这6个亚型多主棒孢的种群多样性与寄主来源、形态特征、致病性以及地理来源具有相关性[51]. 刘先宝和李博勋等人分析了国内橡胶树多主棒孢Cassiicolin蛋白的多样性与致病力分化之间的关系，明确了国内橡胶树多主棒孢病菌存在Cas5和Cas2两种亚型，其中Cas5亚型为优势种群[52,53]. 之后建立了基于Cassiicolin毒素基因的分子检测技术，并对来自不同区域、时间年份和寄主来源的919份多主棒孢菌株的种群进行了划分，构建了橡胶树多主棒孢的基因条形码数据库[54]. 由于不同亚型的多主棒孢在寄主专化性、致病性和抗药性上都存在明显差异, 早期检测对明确其种群结构, 制定病害的防控策略具有重要意义.

2.2　橡胶树主要病害的监测与预警

监测技术对橡胶树病害及时、有效的防控十分重要. 由于我国植胶区生态环境、气候条件与其他植胶国家有着很大差异，植保问题也更为严峻，因此我国非常重视橡胶树病害的监测工作，特别是橡胶树白粉病、炭疽病和棒孢霉落叶病等叶部病害. 在充分了解病害的发生流行规律、病原生活史、生物学特性以及成灾关键因子的基础上，制定了农业行业标准《橡胶树白粉病测报技术规程 NY/T 1089-2015》, 规范了病害监测网点的建设与管理、数据收集与统计、病害为害程度与等级划分、调查方法与数据分析等内容[55]，形成了一套完整的病害监测技术体系. 根据病害发生流行特点、种植区域以及气候类型建立了长期固定的病害监测站和观察点，全国病害监测覆盖率超过90%. 利用白粉病病情指数、物候和天气等参数来预测白粉病发生严重程度[56]，制定了橡胶树白粉病防治决策模型，并结合我国的天然橡胶产量、防治成本、防治效果、胶价等情况统计分析，确定了橡胶树白粉病的防

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2024-0194

治指标为20, 为指导橡胶树白粉病的精准监测、科学防治提供了很好的理论支撑[57,58].

同时, 我国通过《橡胶树棒孢霉落叶病监测技术规程 NY/T 2250-2012》《橡胶树棒孢霉落叶病诊断与防治技术规程NY/T3006-2016》《热带作物病虫害监测技术规程 橡胶树炭疽病 NY/T 3518-2019》等3个农业行业标准的颁布与实施[59~61], 形成了对橡胶树炭疽病和棒孢霉落叶病的规范化监测技术体系, 并研发了《橡胶树病虫草害数据库手机APP软件V1.0》和《橡胶树病虫草害数据库软件V1.0》网络平台, 通过互联网+天然橡胶植保数据平台, 有效获取各监测网点病害动态发生情况, 以及区域内气象因子、寄主物候、栽培品种、病原优势种群及危害特点等数据信息, 对常发病害和新发危险性病害进行有效监测预警、远程诊断和防治技术指导, 及时发布病害监测预报信息, 掌握病害防治时机, 指导科学防治, 减少施药次数和农药用量, 降低防治成本.

3 橡胶树抗病育种研究

3.1 国内橡胶树抗病育种

我国橡胶树抗病选育种及抗病品种利用方面的基础研究较为薄弱, 一直把选育高产、抗寒、抗风、胶木兼优等农艺形状作为育种的目标[62], 但抗病种质的鉴选与创制利用却未受到重视. 目前, 我国收集保存有6185份橡胶树种质资源[63], 而生产上大面积推广种植的PR107、RRIM600、GT1、热研7-33-97等主栽品种对橡胶树白粉病、炭疽病和棒孢霉落叶病等病害都不具有很好的抗病性[64]. 因此从这些丰富的种质资源中筛选出优良的抗病种质材料, 对于培育高产、高质、抗病的橡胶树品种来说非常重要.

近十年来, 我国在抗病品种/种质鉴选方面做了大量工作, 先后制定和颁布实施了农业行业标准《热带作物种质资源抗病虫鉴定技术规程 橡胶树白粉病 NY/T2814-2015》[65]《热带作物种质资源抗病虫鉴定技术规程 橡胶树炭疽病 NY/T 3197-2018》[66]《热带作物种质资源抗病虫鉴定技术规程 橡胶树棒孢霉落叶病 NY/T 3195-2018》[67]. 在此基础上, 李文杨和蔡志英等人明确了国内300份橡胶树种质和18个主栽品种对胶孢炭疽和尖孢炭疽的抗病性水平[68,69]. 李裴春等人评价了192份橡胶种质对白粉病和炭疽病的抗病性水平, 筛选出对白粉病高抗的品种24个、中抗品种9个, 炭疽病抗性品种35个[70]. 李博勋等人明确了42份国内核心橡胶品种(系)对棒孢霉落叶病菌Cas5和Cas2亚群菌株的抗病性水平, 筛选获得抗病种质4份[71], 同时还开展了IAN873$^{♂}$×云研277-5$^{♀}$、云研277-5$^{♂}$×热垦525$^{♀}$、RRIC103$^{♂}$×热研8-79$^{♀}$共821份F1代群体对棒孢霉落叶病的早期抗病性鉴定, 最终获得5份F1代抗病新种质[72]. 这些工作为橡胶树抗病种质资源的挖掘与利用提供了很好的基础材料. 但是相比于其他粮食作物, 我国橡胶树抗病育种的研究工作相对滞后, 现代科技在橡胶树抗病育种领域的应用不足, 难以满足抗病种质资源在天然橡胶产业高质量发展上的需求, 这也严重制约了橡胶树抗病种质的创新利用. 未来还需要加大橡胶树抗病育种基础研究的投入力度, 通过构建高通量表型鉴定技术平台, 实现对橡胶树抗病性的快速鉴定; 同时还需要建立标准化的抗病性评价方法和标准, 以确保种质资源抗病性鉴定结果的可靠性和准确性.

3.2 国外橡胶树抗病育种

20世纪80年代, 斯里兰卡的橡胶产业遭受了棒孢霉落叶病的严重危害, 摧毁了很多高产橡胶品种/系. 经过9年的努力, 该国筛选出抗病芽条, 并成功培育出RRIC100、RRIC102、RRIC121、RRISL203等18个抗病品种, 拯救了斯里兰卡的天然橡胶产业[73]. 随着棒孢霉落叶病在亚洲其他植胶国家的广泛传播, 各国也采取了相应的措施. 马来西亚选育出PB86、PB213、RRIM712、RRIM628等品种; 泰国选育出PB260、RRIC101、KRS156等品种; 印度尼西亚选育出IRR100和IRR200等品种; 印度选育出IAN873、GT1、IIRR208等品种[73,74]. 这些品种在田间都显示出良好的抗病性, 并在一定程度上减少了病害对产量的影响. 然而随着多主棒孢病菌优势种群和生理小种的变异, 这些原有的抗病品种也逐渐丧失了对病害的抵抗能力.

近年来, 随着分子遗传育种技术的深入研究与应用, 分子标记辅助选择技术在橡胶树南美叶疫病和棒孢霉落叶病的抗病育种中也有了一定进展. Le等人采用QTL, 在抗病种质MDF180中定位到一个抗病基因位点*M15md*, 位于连锁群g15; 同时还鉴定出4个抗性数量性状基因座QTLs, 其中有2个显示与*M15md*基因

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2024-0194

互作[75]. 采用集群分离分析技术并结合微卫星标记, 该学者又在橡胶树无性系Fx2784中定位了一个新的遗传位点. 该位点由单基因控制, 对南美叶疫病具有完全抗性, 与橡胶树基因组第2连锁群中的微卫星标记具有紧密连锁关系. 先后定位到的这两个基因位点在遗传上是独立的, 有利于遗传改良, 为抗南美叶疫病种质材料的遗传改良提供了有利条件[76]. 相比于其他大宗作物, 橡胶树抗病种质资源的挖掘、抗病基因的鉴定以及抗病种质材料的利用等方面仍缺乏深入系统的研究. 随着橡胶树全基因组序列的测定以及重测序数据的发表[77,78], 通过全基因组关联分析方法筛选、鉴定抗病性状的关键基因和分子标记, 将更快更高效地辅助橡胶树抗病种质材料的鉴选与创制利用.

4　橡胶树主要病害致病机理及寄主抗病机制

4.1　橡胶树主要病害致病机理

4.1.1　白粉病致病机理

随着基因组学和转录组学技术的发展, 目前国内外已经完成了橡胶树白粉病、炭疽病和棒孢霉落叶病病原菌的全基因组序列测定, 为病害的致病机理和致病相关基因的分析提供了数据信息. Ji等人首次完成橡胶树白粉菌(*E. quercicola*)线粒体基因组的组装. 与一般子囊菌线粒体相比, 橡胶树白粉菌线粒体基因组大小发生明显的扩张, 蛋白编码基因选择压力存在两极化, 预测得到6377个蛋白编码基因和133个候选分泌效应分子. 该研究还发现白粉菌在丢失部分碳水化合物代谢通路基因的同时保留了脂类代谢通路, 从而适应专性寄生环境, 为白粉菌线粒体基因组进化及群体研究提供了新的视角[79]. Liang等人通过比较基因组学研究发现, 橡胶树白粉菌与其他子囊菌类的植物病原菌相比, 白粉菌中碳水化合物代谢途径相关酶的多个基因家族明显收缩, 单子叶植物和双子叶植物的白粉病菌之间候选外泌效应蛋白家族也存在明显差异, 这些营养代谢相关基因家族进化可能驱动了白粉病菌专性活体营养型生活方式[80]. Li等人鉴定了一个可促进白粉病菌侵染的效应蛋白EqCSEP01276, 该蛋白通过干扰叶绿体中脱落酸生物合成关键酶9-顺式环氧类胡萝卜素双加氧酶的定位, 抑制了脱落酸生物合成和寄主植物的防御反应[81], 这些研究为系统解析白粉病菌的致病机理奠定了基础.

4.1.2　炭疽病致病机理

橡胶树炭疽菌属于半活体营养型, 侵染过程依次经过活体营养和死体营养两个阶段. 炭疽病菌分生孢子首先附着在寄主表面, 随后产生芽管并形成附着胞. 附着胞产生侵染囊泡, 通过初生菌丝延伸到邻近细胞. 初生菌丝没有穿透细胞膜, 而是维持活体营养型方式, 一旦大面积植物组织被定殖, 死体营养型菌丝也随之产生并在大量外泌酶的作用下引起植物细胞壁的极度降解, 导致寄主细胞死亡. 在这一系列过程中涉及不同毒力因子的参与[82,83]. 早期主要采用构建突变体库的方法筛选致病力丧失或减弱的突变体, 进而克隆和研究致病相关基因功能[84,85]. 目前已鉴定到一些影响菌株生长发育、孢子形成和萌发、附着胞形成和穿透寄主能力等方面的致病相关基因[86~90]. 近期, 刘先宝等人利用比较基因组学, 分析了能引起橡胶树叶片两种不同症状类型的暹罗炭疽菌和华南炭疽菌致病相关基因家族的差异, 发现分泌性碳水化合物活性酶, 细胞色素氧化酶和次生代谢产物合成酶等基因在暹罗炭疽菌中更为丰富, 而与病原菌侵染早期相关的质外体分泌蛋白(Nep1-Like proteins, NLPs)则在华南炭疽菌中更为丰富[91].

4.1.3　棒孢霉落叶病致病机理

多主棒孢是一类死体营养型病原真菌. Breton等人首次从橡胶多主棒孢中分离到一个关键致病因子Cassiicolin, 它是一种新的寄主选择性毒素蛋白. 该蛋白能导致寄主细胞壁严重破坏, 胞质外溢、细胞核退化和淀粉粒缺失, 表明多主棒孢是一种死体营养型病原真菌, 而作为寄主专化性毒素的Cassiicolin蛋白则为死体营养型效应子[92]. Lamotte等人确定了Cassiicolin蛋白分子量为2885 Da, 由27个氨基酸组成的多肽链, 在第2位氨基酸残基处出现糖基化, N-末端由1个焦谷氨酸和6个半胱氨酸组成3个二硫键[93]. Ribeiro等人发现, 敲除Cas1型*Cassiicolin*基因的突变体完全丧失了对橡胶树感病品种PB260和IRCA631的毒力, 并且其触发的寄主感病性是与橡胶树感病品种中携带的特定易感基因相互作用的结果, 符合死体营养型效应子触发的感病性模式[94]. 不同类型的Cassiicolin蛋白在参与多主棒孢致病和与寄主的互作机制上存在显著差

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2024-0194

异. Li 等人通过比较基因组分析发现, 国内橡胶树多主棒孢优势种群Cas5型和Cas2型与国外Cas1型在外泌降解酶、碳水化合物合成酶、次生代谢产物合成相关基因、外泌小分子蛋白以及Cassiicolin毒素蛋白等方面存在明显差异[95]. Reshma等人从印度Cas2型橡胶树多主棒孢全基因组中注释到229个与寄主细胞坏死相关的效应子, 主要涉及碳水化合物合成和氨基酸代谢[96].

近十年的文献显示, (图1, 附表1), 橡胶树主要病害致病机理的研究主要集中在病原菌的基因组学分析、种群结构、遗传进化、致病基因的功能鉴定以及分子作用机制等方面. 研究最多的是橡胶树炭疽病, 目前已克隆鉴定了24个与病原菌生长发育、能量代谢、附着胞形成相关的致病基因, 其次是棒孢霉落叶病的6个Cassiicolin毒素蛋白和1个影响病原菌生长相关*CCK1*基因, 另外还有白粉病的2个分泌型效应子*EqCSEP04187*和*EqCmu*. 这些研究不仅有助于深入理解橡胶树病害的致病机理, 也为这些病害的有效防控提供了科学依据和技术支持. 然而, 关于橡胶树病原菌与寄主的互作, 致病相关基因的分子作用机制以及效应子在寄主免疫反应中发挥的功能等方面仍然缺乏更深入和系统的研究. 未来可关注橡胶树炭疽病和棒孢霉落叶病不同种群间致病力差异产生的分子机制及与寄主的互作机制, 以及橡胶树白粉病菌早期侵染的调控机制等研究领域.

4.2 橡胶树抗病机制

近年来, 橡胶树抗病机制方面的研究主要集中于各类抗病相关基因的克隆鉴定与表达分析上(图1, 附表1). 目前已克隆鉴定了与白粉病抗病相关的植物受体类激酶*HbBIK1*基因[97]、抗病负调控因子*HbMLO12*[98]和*HbLFG1*基因[99]、参与生物和非生物应激反应的*HbPRX42*基因等[100]; 与胶孢炭疽菌互作相关的转录因子*HbWRKY40* [101]、蛋白激酶基因*HbCDPK5*72、与活性氧产生相关的*HbGASA*等[102]; 与棒孢霉落叶病抗病性相关的类萌发素蛋白HbGLP01[103]、NPR家族基因*HbNPR1*[104]、HAD家族中的酸性磷酸酶基因*HbVSP2*[105]、抗病相关基因类似序列*NBS-LRR*和*TIR*保守结构域的同源基因*HbRGH2*和*HbRGA-1*等. 这些基因的克隆为橡胶树抗病基因的挖掘与利用提供了资源, 也为橡胶树种质抗病性的早期分子诊断和抗病选育奠定了基础.

由于橡胶树遗传转化体系还未成熟, 抗病基因的功能验证主要在拟南芥、烟草等模式植物上展开. Zhang等人将橡胶树受体类激酶基因*HbBIK1*转到拟南芥中, 不仅可以使同源基因敲除突变体的生长恢复正常, 还可以提高植株的抗病能力[97]. 分泌效应子*EqCSEP04187*在橡胶树白粉菌感染后期高度特异性表达, 该基因在烟草和拟南芥中的异源表达可以引起植物的防御反应, 在橡胶树叶肉细胞原生质体中瞬时表达*EqCSEP04187*同样能引起细胞的免疫反应[106]. 胶孢炭疽菌接种后, 橡胶树中钙依赖蛋白激酶基因*HbCDPK5*被诱导表达, 并定位于细胞膜和细胞质中, 调控橡胶树叶肉原生质体中活性氧ROS的积累[107]. Ribeiro等人分析了橡胶抗感种质在多主棒孢Cassiicolin毒素蛋白处理下的转录组数据, 发现该蛋白可明显抑制抗感种质光合作用及抗病相关基因的表达, 但未明确抗病相关途径或基因[108].

近几年橡胶树抗病机制的研究取得了一定的进展, 但仍然存在很多不足. 尽管鉴定了一些与抗病性相关的基因, 但对这些基因的功能和抗病作用机制的研究还不够深入; 基因与基因之间的相互作用及其调控机制仍需进一步阐明; 病原菌与橡胶树之间的互作关系以及寄主免疫反应的作用机制等也缺乏系统研究. 解决这些问题还需依赖多学科知识的深度融合以及新技术的开发与应用.

5 橡胶树主要病害的防控

5.1 传统的人工施药技术

橡胶树白粉病和炭疽病等叶部病害的防治手段通常采用传统的人工背负式由下往上喷粉或喷雾的方式进行. 为了使粉剂类药剂更好地粘附在叶片表面, 同时减少因高温导致的药剂蒸发和降解, 工人需要在每天凌晨时分进入胶园, 背负沉重的喷雾器或喷粉设备进行长时间的作业. 由于白粉病扩散蔓延迅速, 防治窗口期短, 需在短期内进行规模化的集中防治. 而橡胶树高大且树冠广展, 人工施药方式难以将药剂送达到树冠, 无法实现药剂的均匀覆盖, 且极易造成药剂浪费[109]. 无人机飞防技术能很好地解决这些问题, 并且该技术已在其他农作物病虫害防治上大面积推广应用, 这将有助于解决橡胶树施药难度大和作业效率低

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2024-0194

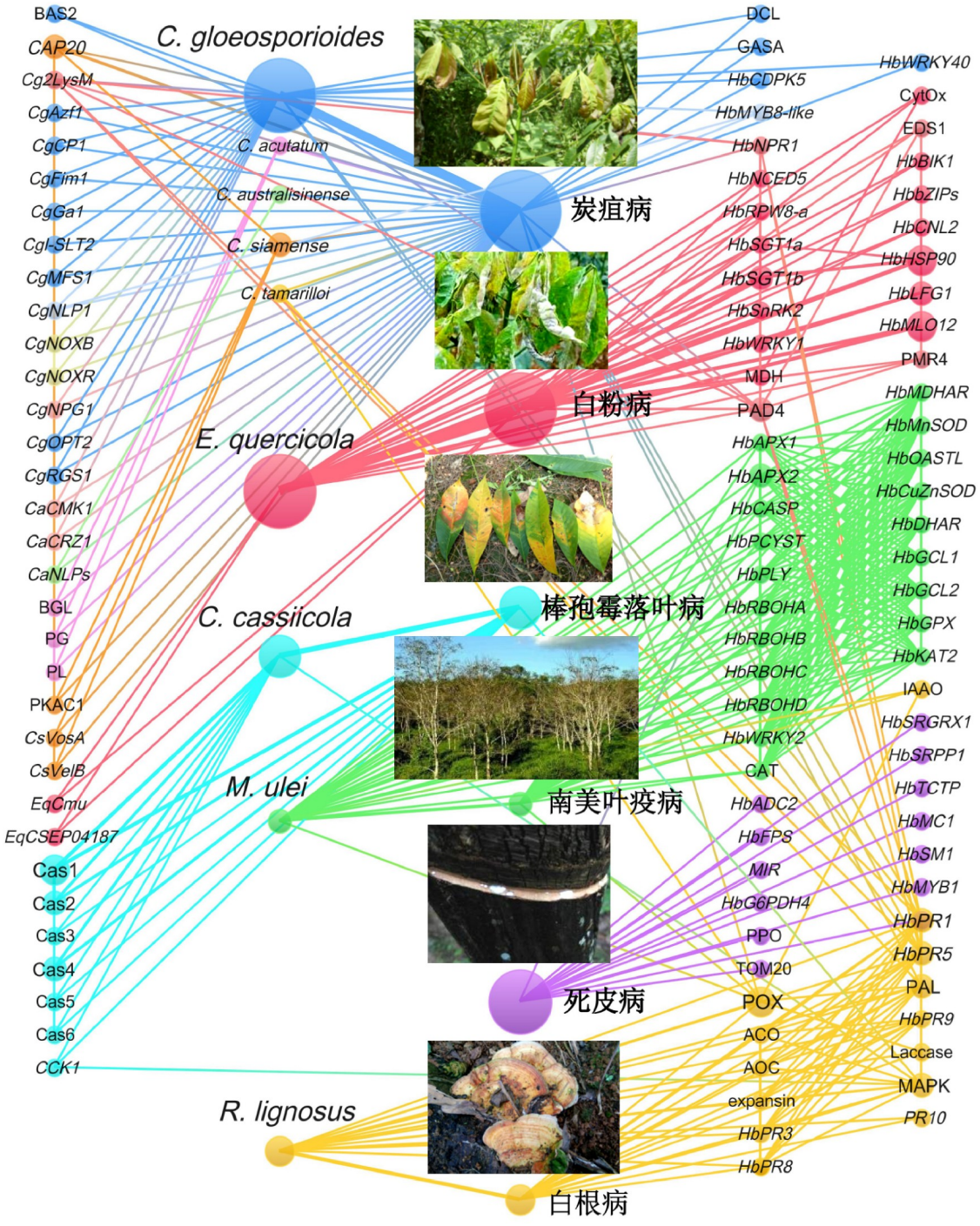


图 1　橡胶树主要病害致病基因与抗病基因研究网络关系图**.** 左侧第一列为致病相关基因和蛋白**(**斜体为基因、正体为蛋白**);** 左侧第二列为病原菌拉丁名**;** 右侧第一和第二列均为抗病相关基因和蛋白**(**斜体为基因、正体为蛋白**).** 连线表示共现**,** 圆点大小表示发文数量**,** 基因及蛋白详细信息见附表**1.**

Figure 1　Relationships between pathogenic genes and disease resistant genes of main diseases in rubber trees. The first column on the left shows the pathogenesis related genes (italics) and proteins (upright), and the second column on the left shows the Latin names of the pathogens; The first and second columns on the right show genes (italics) and proteins (upright) related to disease resistance. The line represents co-occurrence, and the size of the dots represents the number of articles published. More detailed information on genes and proteins is shown in the supplementary table 1.

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2024-0194

等问题，也将加快实现天然橡胶产业智能化转型升级和高质量绿色发展.

5.2 植保无人机施药技术

近几年来，植保无人机飞防技术在橡胶树叶部病害防治上取得了不少进展. 李博勋等人研发了载药量在100 kg以上的油动大载荷植保无人机的施药技术, 通过旋翼形成的下压气流，能够将药液由上往下送达到中下层叶片，突破了传统的人工由下往上施药的技术，实现了药液均匀覆盖，提高了药剂利用率[110]. 然而，植保无人机飞防技术在橡胶树叶部病害防治上的应用仍然处于初级阶段，还存在着作业不规范、飞防专用药剂缺乏，以及飞行参数不确定等问题. 为了进一步规范植保无人机在橡胶树上的应用，李博勋等人制定了橡胶树叶部病害大载荷植保无人机的飞防技术规程, 规范了无人机的飞防作业条件, 明确了大载荷无人机在橡胶树上的最佳施药参数，研发了飞防专用药剂19% 咪酰胺•三唑酮微乳剂和60% 硫磺粉悬浮剂[111]. 目前大载荷无人机飞防技术已经逐步从技术示范转向实际生产应用，对提高防治功效、减少药剂用量、节约劳动力成本以及精准施药等方面都发挥了重要作用. 为了将植保无人机飞防技术更好地应用到橡胶树叶部病害防治中，还需要持续进行技术创新, 包括无人机机型选择、飞防专用药剂研发、剂型改良、飞行控制系统升级，以及对操控人员进行专业培训等, 以确保安全、有效地开展飞防作业.

6 我国橡胶树病害防治面临的挑战及应对策略

6.1 存在的问题及挑战

自上世纪80年代起，我国就开始了橡胶树病害方面的研究. 经过40余年的探索，在橡胶树重要病害的监测预警、新发危险性病害的管控，以及重要病原微生物的致病机理及其与寄主的互作机制等方面都取得了很多突破性的研究进展，也研发出各类技术、产品和模式. 然而，我国橡胶树病害的研究与防控仍然面临诸多挑战: (i) 受国际市场和大环境的影响，天然橡胶价格持续低迷，导致橡胶园生产性投入减少、重视度不够，使得一些常发的白粉病、炭疽病、根病以及新发危险性病害的防控措施不到位，监测和防治技术仍然很落后，安全、高效的防治专用药剂和剂型缺乏，新技术和新产品得不到大面积的推广应用. (ii) 橡胶树病害的基础研究工作较为薄弱，主要病害的致害机理、成灾机制、抗病种质鉴选以及防控核心关键技术等方面的研究仍然缺乏系统性; 新发/检疫性病害的发生流行规律、病原生物学特性、致病机理以及应急防控策略等方面的理论支撑和技术储备不足. (iii) 橡胶树抗病性精准鉴定和评价技术体系不完善，抗病种质筛选、抗病基因的挖掘与利用以及抗病机制的解析等方面的研究较为缺乏. (iv) 能够满足实际生产需求的植保新产品、新技术、新模式等科研成果转化效力不足，能够适应现代农业生产需求的自动化、智能化新装备和新系统研发力度不够，高成本、低效率的防治技术手段仍缺乏替代技术等.

6.2 应对策略及发展趋势

6.2.1 加强橡胶树病害基础数据库建设, 提升智能化监测预警技术水平

为解决橡胶树主要病害监测技术落后、时效性差以及准确度低等问题，需进一步完善橡胶树病害监测网络，构建橡胶树病害基础数据库; 收集病原、寄主、气象以及病害发生的历史数据，掌握病害疫情动态，加强对病害发生、流行有关的温、光、水等气象因子的监测; 加强对寄主品种、长势、生长阶段，以及病原菌生物学特性、种群结构以及发生危害情况等基础数据的收集整理; 建立橡胶树种质资源、重要病原微生物和生防微生物的基础数据库; 整合卫星、气象和病害发生情况等多源信息融合下的病害监测预警技术，重点研发基于遥感图像识别和有害生物传感器以及基于病原优势种群(生理小种)、危害特点的寄主表型数据解析技术、算法和模型等.

6.2.2 注重对橡胶树主要病害致害机理的研究, 阐明病害成灾机制

橡胶树白粉病、炭疽病等主要病害一直是我国植胶区防治的重点和难点，深入研究病害的流行关键因子和致害机理，阐明病害成灾机制，对于指导橡胶树主要病害的有效防控具有重要意义. 一方面可以利用高通量测序技术，从组学水平挖掘致病关键因子，并阐明其在致病过程中的作用机制; 另一方面可以解析橡胶树与病原菌互作过程中的细胞学变化以及橡胶树

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2024-0194

对病原菌的分子响应机制. 还可以通过构建橡胶树重要病害早期监测预警技术体系、快速检测技术及监测网络，对病害的发生流行规律进行分析; 综合应用基因组学、转录组学、代谢组学、转基因以及生态学等研究方法, 解析重要病原致病机理、成灾机制以及病原种群演替规律等, 发掘致病关键因子, 进而开发靶向性药剂和产品等.

6.2.3　加强橡胶树主要病害抗病基因挖掘及其调控网络解析, 鉴选和创制优良抗性种质材料

橡胶树抗病种质资源的鉴选与创制利用是病害防治的关键. 通过构建橡胶树抗病性精准鉴定和评价技术体系，可鉴选获得对橡胶树白粉病、炭疽病、棒孢霉落叶病等主要病害具有较好抗性的优良种质. 利用组学测序技术构建橡胶树遗传变异图谱, 并通过基因型多态性分析, 结合精细表型评价数据来解析控制抗病性状的遗传位点, 挖掘重要的抗病基因并阐明其生物学功能，相关研究将有望开发出橡胶树抗病性早期分子诊断技术，对橡胶种质资源的抗病性早期鉴定以及抗病新种质的创制利用都具有重要意义.

6.2.4　推进橡胶树主要病害智能化防控技术的研发与应用

目前，我国橡胶树主要病害的防治仍然依赖于传统的人工施药方法，不仅劳动强度大，而且防治功效低. 因此研发智能化的植保装备和应用系统，推进精准的无人机施药技术, 探索适合我国不同栽培模式橡胶园的飞行航线、模式、参数和喷洒系统, 形成配套的无人机飞防技术规程, 建立标准化的橡胶树病害无人机飞防技术体系和作业质量评价标准, 不仅能解决劳动力缺乏、劳动成本高等问题，还能从技术层面得到创新与突破. 为了使智能化防控技术得到更好的应用，还应培养智能化防治领域的专业人才，提高从业人员的技术水平，确保新技术在实际应用过程中发挥出更好的效能. 此外，还要积极争取相关政策的支持与资金投入，保障智能化防治技术研发的持续性，让这些新技术能真正得到推广应用，并服务于天然橡胶产业的智能化转型和高质量绿色发展.

6.2.5　提高橡胶树病害统防统治与社会化服务水平

对于高度集约化的天然橡胶产业来说, 统防统治和社会化服务是今后橡胶树病害防治的趋势. 运用物联网、大数据、AI等先进技术可以有效搭建主要病害统防统治与社会化服务决策管理平台. 通过研发、集成研究与应用推广橡胶树病害统防统治与社会化服务共性关键技术及标准规范, 可为热区农业主管部门、龙头企业、合作社、农户等主体提供数字化、实时化、精准化的橡胶树病害统防统治与社会化服务. 通过对病害的监测预警、在线专家、培训指导、效果评估等多个功能版块技术的研发和融通, 建立包含服务主体、服务协议、监测与控制方案以及投入品等多元信息的专业化服务电子档案, 并可为专业化监控服务组织提供技术培训、指导与服务, 规范服务行为与知识分享.

参考文献

1 Huang G X. Analysis of Global Tropical Crop Technology Competitiveness (in Chinese). China Agricultural Science and Technology Press, 2022. 3–4 [黄贵修. 全球热带作物科技竞争力分析. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2022. 3–4]

2 Ren N. Analysis of Global Trends in Tropical Crop Technology Development (in Chinese). China Agricultural Science and Technology Press, 2022. 3–4 [任妮. 全球热带作物科技发展态势分析. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2022. 3–4]

3 Li G H, Li Y P, Zeng X H, et al. Research on the development status and strategies of global tropical crop industry (in Chinese). Trop Agric Sci, 2023, 1–16 [李光辉, 李玉萍, 曾小红, 等. 全球热带作物产业发展现状及策略研究. 热带农业科学, 2023, 1–16]

4 National Natural Rubber Industry Technology System. Research on Sustainable Development Strategy of Modern Agricultural Industry in China. (Natural Rubber Volume) (in Chinese). Beijing: China Agricultural Press, 2016. 11–14 [国家天然橡胶产业技术体系. 中国现代农业产业可持续发展战略研究(天然橡胶分册). 北京: 中国农业出版社, 2016. 11–14]

5 Shi T, Liu X B. Quarantine Diseases of *Hevea brasiliensis* (in Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2021. 1–6 [时涛, 刘先宝. 巴西橡胶树检疫性病害. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2021. 1–6]

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2024-0194

6 Liu S J, Zhou G S, Fang S B. Northern boundary of rubber planting in China (in Chinese). J Ecol, 2016, 36: 1272–1280 [刘少军, 周广胜, 房世波. 中国橡胶种植北界. 生态学报, 2016, 36: 1272–1280]

7 Liu S J, Cai D X, Tong J H, et al. The influence of meteorological conditions on rubber tree planting in China (in Chinese). J Trop Biol, 2022, 13: 376–381 [刘少军, 蔡大鑫, 佟金鹤, 等. 气象条件对中国橡胶树种植的影响. 热带生物学报, 2022, 13: 376–381]

8 Huang G X, Xu C G, Li B X. Identification and Control of Diseases, Pests, and Weeds in Natural Rubber in China. 2nd ed. (in Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2018. 1–4 [黄贵修, 许灿光, 李博勋. 中国天然橡胶病虫草害识别与防治(第二版). 北京: 中国农业科学技术出版社, 2018. 1–4]

9 John C K, Zhang K M. Overview of South America leaf blight (in Chinese). Trans Trop Crops, 1981, 5: 17–21 [John C K, 张开明. 橡胶树南美叶疫病概述. 热带作物译丛, 1981, 5: 17–21]

10 The Planting Industry Management Department of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. List of plant quarantine pests imported into the People's Republic of China (Announcement No. 862 of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs). Available from: http://www.zys.moa.gov.cn/flfg/201904/t20190428_6245344.htm (in Chinese). 2007-5-29 [中华人民共和国农业农村部种植业管理司. 中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录(农业农村部公告第862号发布). http://www.zys.moa.gov.cn/flfg/201904/t20190428_6245344.htm. 2007-5-29]

11 Bai R, Li N, Zhang J H, et al. Risk prediction of rubber tree South American leaf blight invasion into China under the background of future climate change (in Chinese). J Ecol, 2020, 39: 3500–3508 [白蕤, 李宁, 张京红, 等. 未来气候变化背景下橡胶树南美叶疫病入侵中国的风险预测. 生态学杂志, 2020, 39: 3500–3508]

12 Shi T, Li B X, Feng Y L, et al. Safety assessment of rubber tree clubbing and leaf drop disease on natural rubber and related industries in China (in Chinese). Trop Agric Sci, 2019, 39: 66–71 [时涛, 李博勋, 冯艳丽, 等. 橡胶树棒孢霉落叶病对中国天然橡胶及相关产业的安全性评估. 热带农业科学, 2019, 39: 66–71]

13 Jinji P, Xin Z, Yangxian Q, et al. First record of *Corynespora* leaf fall disease of *Hevea* rubber tree in China. Austral Plant Dis Notes, 2007, 2: 35–36

14 Li B X, Liu X B, Cai J M, et al. Investigation and occurrence regularity of Corynespora leaf fall diseases of rubber tree in China (in Chinese). J Trop Crops, 2015, 36: 2058–2066 [李博勋, 刘先宝, 蔡吉苗, 等. 中国橡胶树棒孢霉落叶病疫情调查及其发生规律初探. 热带作物学报, 2015, 36: 2058–2066]

15 Liu X, Li B, Cai J, et al. *Colletotrichum* species causing anthracnose of rubber trees in China. Sci Rep, 2018, 8: 10435

16 Qin B X, Hu X W, Deng X D, et al. Formation and mechanism of rubber tree tapping panel dryness (in Chinese). Plant Physiol Commun, 2005, 41: 827–830 [覃宝祥, 胡新文, 邓晓东, 等. 橡胶树死皮病的形成及其机制. 植物生理学通讯, 2005, 41: 827–830]

17 Guo X L, Zhuang Y F, Liu J P. Latest research progress on tapping panel dryness of rubber tree and its molecular mechanism (in Chinese). Trop Agric China, 2015, 66: 34–37 [郭秀丽, 庄玉粉, 刘进平. 橡胶树死皮病及其分子机制最新研究进展. 中国热带农业, 2015, 66: 34–37]

18 Liu Z X, Zheng X Q. The mechanism and hypothesis of rubber tree tapping panel dryness (in Chinese). Life Sci Res, 2002, 6: 82–85 [刘志昕, 郑学勤. 橡胶树死皮病的发生机理和假说. 生命科学研究, 2002, 6: 82–85]

19 Chen S, Peng S, Huang G, et al. Association of decreased expression of a Myb transcription factor with the TPD (tapping panel dryness) syndrome in *Hevea brasiliensis*. Plant Mol Biol, 2003, 51: 51–58

20 Chen M R, Luo D Q, Xu L Y, et al. Study on inoculation of rubber tree tapping panel dryness (in Chinese). J Trop Crops, 2000, 21: 15–20 [陈慕容, 罗大全, 许来玉, 等. 橡胶树褐皮病皮接传染研究. 热带作物学报, 2000, 21: 15–20]

21 Li Z T. Screening and identification of viruses related to rubber tree tapping panel dryness (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Hainang: Hainan University, 2020 [李肇通. 橡胶死皮病相关病毒的筛选鉴定. 硕士学位论文. 海南: 海南大学, 2020]

22 He J, Feng T T, Guo X L, et al. Physiological study on latex during the process of rubber tree dead skin induced by high concentration ethylene stimulation (in Chinese). J Northwest For Univ, 2018, 33: 123–128 [何晶,冯成天,郭秀丽, 等. 高浓度乙烯利刺激诱导橡胶树死皮发生过程中的胶乳生理研究. 西北林学院学报, 2018, 33: 123–128]

23 Liu H, Hu Y Y, Feng T T, et al. The physiological effects of excessive stimulation of ethylene on rubber tree tapping panel dryness (in Chinese). For Sci, 2021, 57: 46–55 [刘辉,胡义钰,冯成天,等. 乙烯利过度刺激诱发橡胶树死皮的生理效应. 林业科学, 2021, 57: 46–55]

24 Li Y J, Liu J P. Research progress on the types, causes, and prevention and treatment of rubber tree tapping panel dryness (in Chinese). J Trop Biol, 2015, 6: 223–228 [李艺坚,刘进平,等. 橡胶树死皮病种类、病因及防治的研究进展. 热带生物学报, 2015, 6: 223–228]

25 Lu Y L, Zhang S X, Wang Z H, et al. Structural analysis of rubber tree tapping panel dryness of germplasm "RY7-33-97" at different levels (in

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2024-0194

Chinese). J Trop Crops, 2021, 42 : 1918–1924 [卢亚莉,张世鑫,王真辉,等. 巴西橡胶树“RY7-33-97”不同级别死皮树皮结构分析. 热带作物学报, 2021, 42: 1918–1924]

26 Peng S Q, Fu X H, Wu K X, et al. Structural analysis and expression of *HbMyb1* gene related to rubber tree tapping panel dryness (in Chinese). J Plant Physiol Mol Biol, 2003, 29: 147–152 [彭世清, 傅湘辉, 吴坤鑫, 等. 巴西橡胶树死皮病相关基因*HbMyb1*的结构分析及表达. 植物生理与分子生物学学报, 2003, 29: 147–152]

27 Zhang L, Liu J P. Research progress on genes and proteins related to rubber tree tapping panel dryness (in Chinese). J Trop Biol, 2015, 6: 347–352 [张霖,刘进平. 巴西橡胶树死皮病相关基因与蛋白质研究进展. 热带生物学报, 2015, 6: 347–352]

28 Zhang K M. Rubber tree white root disease (in Chinese). Trop Agric Technol, 2006, 29: 33–34 [张开明. 橡胶树白根病. 热带农业科技, 2006, 29: 33–34]

29 He C P, Wu H L, Li R, et al. Biological study on white root pathogen of rubber tree (in Chinese). J Trop Crops, 2010, 31: 1981–1985 [贺春萍,吴海理,李锐,等. 橡胶树白根病菌生物学研究. 热带作物学报, 2010, 31: 1981–1985]

30 Zhou X M, Liu X B, Li B X, et al. Pathogen identification and biological characteristics determination of newly developed stem ulcer disease in rubber trees (in Chinese). J Trop Crops, 2016, 37: 758–765 [周雪敏, 刘先宝, 李博勋,等. 橡胶树新发茎杆溃疡病病原鉴定及其生物学特性测定. 热带作物学报, 2016, 37: 758–765]

31 Li B X , Shi T , Liu X B, et al. First report of rubber tree stem rot caused by *Fusarium oxysporum* in China. Plant Dis, 2014, 98: 1008

32 Cai Z Y, Liu Y X, Huang G X, et al. First report of *Alternaria heveae* causing black leaf spot of rubber tree in China. Plant Dis, 2014, 98: 1011

33 Nyaka Ngobisa A I C, Zainal Abidin M A, Wong M Y, et al. *Neofusicoccum ribis* Associated with Leaf Blight on Rubber (*Hevea brasiliensis*) in Peninsular Malaysia. Plant Pathol J, 2013, 29: 10–16

34 Pornsuriya N S A. Identification and characterization of *Neopestalotiopsis* fungi associated with a novel leaf fall disease of rubber trees (*Hevea brasiliensis*) in Thailand. J Phytopathol, 2020, 168: 416–427

35 Thaochan N, Pornsuriya C, Chairin T, et al. Roles of systemic fungicide in antifungal activity and induced defense responses in rubber tree (*Hevea brasiliensis*) against leaf fall disease caused by *Neopestalotiopsis cubana*. Physiol Mol Plant Pathol, 2020, 111: 101511

36 Hadi Ismail M Z, Mohamad Mahyudin M, Noran A S, et al. Unravelling fungal diversity in Pestalotiopsis leaf fall disease symptomatic leaves of Hevea brasiliensis in Malaysia. J Rubber Res, 2024, 27: 501–515

37 Li B X, Liu X B, Shi T, Cai J M, et al. Identification and etiology of a new dangerous Neopestalotiopsis leaf fall disease of rubber tree (*Hevea brasiliensis*) in China (in Chinese). J Trop Crops, 2020, 41: 1616–1624 [李博勋,刘先宝,时涛, 等. 国内新发危险性橡胶树拟盘多毛孢叶斑病鉴定及其病原学研究. 热带作物学报, 2020, 41: 1616–1624]

38 Limkaisang S, Kom-un S, Takamatsu S, et al. Molecular phylogenetic and morphological analyses of *Oidium heveae*, a powdery mildew of rubber tree. Mycoscience, 2005, 46: 220–226

39 Liyanage K K, Khan S, Brooks S, et al. Taxonomic revision and phylogenetic analyses of rubber powdery mildew fungi. Microb Pathog, 2017, 105: 185–195

40 Wu H, Pan Y, Di R, et al. Molecular identification of the powdery mildew fungus infecting rubber trees in China. For Pathol, 2019, 49: e12519

41 Mao Y N, Liang P, Liu W B, et al. Establishment of molecular detection technology for rubber tree powdery mildew pathogen (in Chinese). Plant Protect Sci, 2016, 42: 119–123+146 [毛宇宁, 梁鹏, 刘文波, 等. 橡胶树白粉病菌分子检测技术的建立. 植物保护, 2016, 42: 119–123+146]

42 Guan X, Tu M, Cai H B, et al. The PMA qPCR detection system and application of rubber tree powdery mildew (in Chinese). Guangdong Agric Sci, 2022, 49: 102–109 [官鑫, 涂敏, 蔡海滨, 等. 橡胶树白粉病PMA-qPCR检测体系及应用. 广东农业科学, 2022, 49: 102–109]

43 Zeng T, Wang Y, Yang Y, et al. Early detection of rubber tree powdery mildew using UAV-based hyperspectral imagery and deep learning. Comput Electron Agric, 2023, 46: 2222–2237

44 Marin-Felix Y, Groenewald J Z, Cai L, et al. Genera of phytopathogenic fungi: GOPHY 1. Studies Mycology, 2017, 86: 99–216

45 Cai Z Y, Liu Y X, Shi Y P, et al. First report of leaf anthracnose caused by *Colletotrichum karstii* of rubber tree in China. Plant Dis, 2016, 100: 2528

46 Shi Y P, Liu Y X., Li L L, et al. First Report of *Colletotrichum laticiphilum* causing anthracnose of rubber tree in China. Plant Dis, 2019, 103: 2636

47 Liu X B, Lin C H, Cai J M, et al. Molecular detection and genetic polymorphism analysis of Colletotrichum gloeosporioides in rubber trees (in Chinese). J Trop Crops, 2011, 32 : 273–277 [刘先宝, 林春花, 蔡吉苗, 等. 橡胶树尖孢炭疽菌分子检测及遗传多态性分析.热带作物学报,

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2024-0194

2011, 32: 273–277]
48 Du Y N, Wang M, Ma J Q, et al. Early detection technology of plant pathogenic fungi and its application in predicting and forecasting anthracnose of rubber tree (in Chinese). J Trop Biol, 2021, 12: 124–131 [杜艳楠, 王萌, 马建强, 等. 植物病原真菌早期检测技术及其在橡胶树炭疽病预测预报中的应用. 热带生物学报, 2021, 12: 124–131]
49 Lian W X, Wang M, Zhang Y, et al. Establishment and application of LAMP detection method for Colletotrichum gloeosporioides species complex of rubber tree (in Chinese). Acta Phytopathol Sin, 2022, 52: 849–856 [连文旭, 王萌, 张宇, 等. 橡胶树胶孢炭疽菌复合群LAMP检测方法的建立及应用. 植物病理学报, 2022, 52: 849–856]
50 Déon M, Bourré Y, Gimenez S, et al. Characterization of a cassiicolin-encoding gene from *Corynespora cassiicola*, pathogen of rubber tree (*Hevea brasiliensis*). Plant Sci, 2012, 185: 227–237
51 Déon M, Fumanal B, Gimenez S. Diversity of the Cassiicolin gene in *Corynespora cassiicola*, and relation with the pathogenicity in *Hevea brasiliensis*. Fungal Biol, 2014, 118: 32–47
52 Liu X B, Li B X, Chen S, et al. Analysis of diversity and pathogenicity of Cassiicolin toxins from *Corynespora cassiicola* of rubber trees (in Chinese). J Trop Crops, 2016, 37: 1969–1973 [刘先宝, 李博勋, 陈珊, 等. 国内橡胶树多主棒孢Cassiicolin毒素多样性及致病性分析. 热带作物学报, 2016, 37: 1969–1973]
53 Li B X, Feng Y L, Liu X B, et al. Genetic diversity and pathogenic variability among isolates of *Corynespora cassiicola* from tropical crops in China (in Chinese). J Trop Crops, 2019, 40: 2456–2465 [李博勋, 冯艳丽, 刘先宝,等. 我国热带作物多主棒孢种群多样性及致病力分化分析. 热带作物学报, 2019, 40: 2456–2465]
54 Li B X, Liu X B, Feng Y L, et al. Construction of Cassiicolin genes barcode database and molecular detection technology of *Corynespora cassiicola* from *Hevea brasiliensis* in China (in Chinese). J Trop Crops, 2019, 40: 1770–1782 [李博勋, 刘先宝, 冯艳丽, 等. 橡胶树多主棒孢病菌Cassiicolin基因条形码数据库构建及分子检测技术. 热带作物学报, 2019, 40: 1770–1782]
55 Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Technical Regulations for Prediction and Forecasting Powdery Mildew of Rubber Trees NY/T 1089-2015 (in Chinese). Beijing: China Standard Press, 2015. [中华人民共和国农业农村部. 橡胶树白粉病测报技术规程NY/T 1089-2015. 北京: 中国标准出版社, 2015.]
56 Yu Z T, Xiao Q C, Huang W R, et al. Study on decision model for prevention and control of rubber tree powdery mildew (in Chinese). J Trop Crops, 2002, 23: 27–31 [余卓桐, 肖倩莼, 黄武仁, 等. 橡胶树白粉病防治决策模型研究. 热带作物学报, 2002, 23: 27–31]
57 Yu Z T, Huang C H. Determination of damage and economic damage level caused by powdery mildew on rubber trees (in Chinese). Trop Crop Res, 1982, 2: 33–39 [余卓桐, 黄朝豪. 橡胶树白粉病为害损失测定及经济为害水平的初步分析. 热带作物研究, 1982, 2: 33–39]
58 Yu Z T, Wang S C, Lin S M, et al. Preliminary study on the determination of damage and economic threshold caused by powdery mildew on rubber trees (in Chinese). J Trop Crops, 1989, 2: 73–80 [余卓桐, 王绍春, 林石明, 等. 橡胶树白粉病为害损失测定及经济阈值的初步研究. 热带作物学报, 1989, 2: 73–80]
59 Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Technical Code for Monitoring Corynespora Leaf Fall Disease of Rubber Tree NY/T 2250-2012 (in Chinese). Beijing: China Standard Press, 2012. [中华人民共和国农业农村部. 橡胶树棒孢霉落叶病监测技术规程NY/T 2250-2012. 北京: 中国标准出版社, 2012.]
60 Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Technical Code of Practice for Diagnosis and Control of Corynespora Leaf Fall Disease in Rubber Tree NY/T3006-2016 (in Chinese). Beijing: China Standard Press, 2016. [中华人民共和国农业农村部. 橡胶树棒孢霉落叶病诊断与防治技术规程NY/T3006-2016. 北京: 中国标准出版社, 2016.]
61 Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Technical Code for Monitoring Pests of Tropical Crops—Anthracnose of Rubber Tree NY/T 3518-2019 (in Chinese). Beijing: China Standard Press, 2019. [中华人民共和国农业农村部. 热带作物病虫害监测技术规程 橡胶树炭疽病NY/T 3518-2019. 北京: 中国标准出版社, 2019.]
62 Wu C T, Li W G, Gao X S, et al. Exploration of breeding objectives and development strategies for rubber trees in China (in Chinese). Guangxi Agric Sci, 2009, 40: 1633–1636 [吴春太, 李维国, 高新生, 等. 我国橡胶树育种目标及发展策略探讨. 广西农业科学, 2009, 40: 1633–1636]
63 Hu Y S, Zhou S J, An Z W, et al. Safe preservation of resources in the national rubber tree germplasm resource nursery (in Chinese). J Trop Crops, 2022, 43: 78–86 [胡彦师, 周世俊, 安泽伟, 等. 国家橡胶树种质资源圃资源安全保存. 热带作物学报, 2022, 43: 78–86]
64 Li B X, Liu X B, Lin C H, et al. Evaluation of resistance of main rubber tree germplasms in China to Corynespora leaf fall disease (in Chinese). Plant Protect Sci, 2014, 40: 86–92 [李博勋, 刘先宝, 林春花, 等. 国内橡胶树主要种质对棒孢霉落叶病的抗性评价. 植物保护, 2014, 40: 86–92]

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2024-0194

65 Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Technical Specification for Resistance Identification to Diseases and Insects of Tropical Crop Germplasm—Powdery Mildew of Rubber Tree NY/T2814-2015 (in Chinese). Beijing: China Standard Press, 2015. [中华人民共和国农业农村部. 热带作物种质资源抗病虫鉴定技术规程 橡胶树白粉病 NY/T2814-2015. 北京: 中国标准出版社, 2015.]

66 Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Technical Code of Practice for Resistance Identification to Diseases and Insects of Tropical Crop Germplasm—Anthracnose of Rubber Tree NY/T 3197-2018 (in Chinese). Beijing: China Standard Press, 2018. [中华人民共和国农业农村部. 热带作物种质资源抗病虫鉴定技术规程 橡胶树炭疽病NY/T 3197-2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.]

67 Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Technical Code of Practice for Resistance Identification to Diseases and Insects of Tropical Crop Germplasm—Corynespora Leaf Fall Disease of Rubber Tree NY/T 3195-2018 (in Chinese). Beijing: China Standard Press, 2018. [中华人民共和国农业农村部.热带作物种质资源抗病虫鉴定技术规程 橡胶树棒孢霉落叶病NY/T 3195-2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.]

68 Li W Y, Zheng C Y, Li C P, et al. Resistance evaluation of Chinese rubber tree main cultivars and germplasms to *Colletotrichum acutatum* (in Chinese). Trop Agric Eng, 2009, 33: 31–36 [李文杨, 郑春耀, 李超萍, 等. 中国橡胶树主栽品系和部分种质对尖孢炭疽病的室内抗性评价. 热带农业工程, 2009, 33: 31–36]

69 Cai Z Y, Huang G X. Research progress on anthracnose of *Hevea brasiliensis* (in Chinese). J Southwest For Univ, 2011, 31: 89–93 [蔡志英, 黄贵修. 巴西橡胶树炭疽病研究进展. 西南林业大学学报, 2011, 31: 89–93]

70 Li P C, Li Z P, Liang X Y, et al. Field resistance evaluation of rubber tree germplasm resources to powdery mildew and anthracnose (in Chinese). J Trop Crops, 2022, 43: 1200–1213 [李裴春, 李增平, 梁晓宇, 等. 橡胶树种质资源对白粉病和炭疽病的田间抗病性评价. 热带作物学报, 2022, 43: 1200–1213]

71 Li B X, Liu X B, Lin C H, et al. Resistance evaluation of main *Hevea brasiliensis* germplasmsto Corynespora leaf fall disease in China (in Chinese). Plant Protect Sci, 2014, 40: 86–92 [李博勋, 刘先宝, 林春花, 等. 国内橡胶树主要种质对棒孢霉落叶病的抗性评价. 植物保护, 2014, 40: 86–92]

72 Li B X, Huang G X, He L G, et al. Selection and analysis of disease-resistant germplasms in hybrid F1 generations of rubber tree (in Chinese). J Trop Crops, 2023, 44: 2281–2291 [李博勋, 黄贵修, 和丽岗, 等. 橡胶树杂交F_1代抗病种质鉴选及其抗病性分析. 热带作物学报, 2023, 44: 2281–2291]

73 Huang G X, Shi T, Liu X B. Corynespora leaf falling disease of *Hevea brasiliensis* (in Chinese). China Agricultural Science And Technology Press, 2008. [黄贵修, 时涛, 刘先宝. 巴西橡胶树棒孢霉落叶病. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008.]

74 Tan A M, Loo T P, Vadivel G, et al. Survey of major leaf disease of rubber in Peninsular Malaysia. Plant Bull, 1992, 211: 51–62

75 Le Guen V, Garcia D, Mattos C, et al. A newly identified locus controls complete resistance to *Microcyclus ulei* in the *Fx2784* rubber clone. Tree Genet Genomes, 2013, 9: 805–812

76 Le Guen V, Garcia D, Doaré F, et al. A rubber tree's durable resistance to *Microcyclus ulei* is conferred by a qualitative gene and a major quantitative resistance factor. Tree Genet Genomes, 2011, 7: 877–889

77 Chao J, Wu S, Shi M, et al. Genomic insight into domestication of rubber tree. Nat Commun, 2023, 14: 4651

78 Cheng H, Song X, Hu Y, et al. Chromosome-level wild *Hevea brasiliensis* genome provides new tools for genomic-assisted breeding and valuable loci to elevate rubber yield. Plant Biotechnol J, 2023, 21: 1058–1072

79 Ji X, Tian Y, Liu W, et al. Mitochondrial characteristics of the powdery mildew genus Erysiphe revealed an extraordinary evolution in protein-coding genes. Int J Biol Macromol, 2023, 230: 123153

80 Liang P, Liu S, Xu F, et al. Powdery mildews are characterized by contracted carbohydrate metabolism and diverse effectors to adapt to obligate biotrophic lifestyle. Front Microbiol, 2018, 9: 1–14

81 Li X, Liu Y, He Q, et al. A candidate secreted effector protein of rubber tree powdery mildew fungus contributes to infection by regulating plant ABA biosynthesis. Front Microbiol, 2020, 11: 591387

82 De Silva D D, Crous P W, Ades P K, et al. Life styles of *Colletotrichum* species and implications for plant biosecurity. Fungal Biol Rev, 2017, 31: 155–168

83 Villa-Rivera M G, Conejo-Saucedo U, Lara-Marquez A, et al. The role of virulence factors in the pathogenicity of *Colletotrichum* sp. Curr Protein Pept Sci, 2017, 18: 1–14

84 Cai Z, Li G, Lin C, et al. Identifying pathogenicity genes in the rubber tree anthracnose fungus *Colletotrichum gloeosporioides* through random insertional mutagenesis. Microbiol Res, 2013, 168: 340–350

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2024-0194

85 Zhang B, An B, Luo H L. Construction of T-DNA insertion mutant library and insertion site analysis of rubber tree Colletotrichum gloeosporioides (in Chinese). Mol Plant Breed, 2018, 16: 4279–4284 [张贝,安邦, 罗红丽. 橡胶树胶孢炭疽菌 T-DNA 插入突变体库的构建及插入位点分析. 分子植物育种, 2018, 16: 4279–4284]
86 An B, Wang W, Guo Y, et al. BAS2 Is Required for Conidiation and Pathogenicity of *Colletotrichum gloeosporioides* from *Hevea brasiliensis*. Int J Mol Sci, 2018, 19: 1860
87 Wang Q, An B, Hou X, et al. Dicer-like Proteins Regulate the Growth, Conidiation, and Pathogenicity of *Colletotrichum gloeosporioides* from *Hevea brasiliensis*. Front Microbiol, 2018, 8: 2621
88 Wang W, An B, Feng L, et al. A *Colletotrichum gloeosporioides* cerato-platanin protein, CgCP1, contributes to conidiation and plays roles in the interaction with rubber tree. Can J Microbiol, 2018, 64: 826–834
89 Liu Z Q, Wu M L, Ke Z J, et al. Functional analysis of a regulator of G-protein signaling *CgRGS1* in the rubber tree anthracnose fungus *Colletotrichum gloeosporioides*. Arch Microbiol, 2018, 200: 391–400
90 Lin C H, Zhang Y, Liu WB, et al. Research progress on anthracnose disease of *Hevea brasiliensis* in China (in Chinese). J Trop Biol, 2021, 12: 393–402 [林春花, 张宇, 刘文波, 等. 我国巴西橡胶树炭疽病的研究进展. 热带生物学报, 2021, 12: 393–402]
91 Liu X B, Li B X, Yang Y, et al. Pathogenic adaptations revealed by comparative genome analyses of two *Colletotrichum* spp., the causal agent of anthracnose in rubber tree. Front Microbiol, 2020, 11: 1–12
92 Breton F , Sanier C , Auzac J D. Role of Cassiicolin, a host-selective toxin, in pathogenicity of *Corynespora Cassiicola*, causal agent of a leaf fall disease of *Hevea*. J Rubber Res, 2000, 3: 115–128
93 de Lamotte F, Duviau M P, Sanier C, et al. Purification and characterization of cassiicolin, the toxin produced by *Corynespora cassiicola*, causal agent of the leaf fall disease of rubber tree. J Chromatogr B, 2007, 849: 357–362
94 Ribeiro S, Tran D M, Déon M, et al. Gene deletion of *Corynespora cassiicola* cassiicolin Cas1 suppresses virulence in the rubber tree. Fungal Genet Biol, 2019, 129: 101–114
95 Li B X, Yang Y, Cai J M, et al. Genomic characteristics and comparative genomic analysis of two Chinese *Corynespora cassiicola* strains causing *Corynespora* leaf fall disease. J Fungi, 2021, 7: 1–22
96 Reshma T R, Vineeth V K, Babu S, et al. An exhaustive genome analysis of a virulent Indian isolate of *Corynespora cassiicola*, causal agent of *Corynespora* leaf fall (CLF) disease in *Hevea brasiliensis*. J Plant Pathol, 2022, 104: 1417–1429
97 Zhang S, Guo S, Feng L, et al. Functional analysis of rubber tree receptor-like cytoplasmic kinase *HbBIK1* in plant root development and immune response. Tree Genet Genomes, 2020, 88: 1–10
98 Qin B, Wang M, He H, et al. Identification and characterization of a potential candidate *Mlo* gene conferring susceptibility to powdery mildew in rubber tree. Phytopathology, 2019, 109: 1236–1245
99 Li X, Li S, Liu Y, et al. HbLFG1, a rubber tree (*Hevea brasiliensis*) lifeguard protein, can facilitate powdery mildew infection by suppressing plant immunity. Phytopathology, 2021, 111: 1648–1659
100 Wang L F, Wang J K, An F, et al. Molecular cloning and characterization of a stress responsive peroxidase gene *HbPRX42* from rubber tree. Braz J Bot, 2016, 39: 475–483
101 Yang J, Wang Q, Luo H, et al. *HbWRKY40* plays an important role in the regulation of pathogen resistance in *Hevea brasiliensis*. Plant Cell Rep, 2020, 39: 1095–1107
102 An B, Wang Q, Zhang X, et al. Comprehensive transcriptional and functional analyses of *HbGASA* genes reveal their roles in fungal pathogen resistance in *Hevea brasiliensis*. Tree Genet Genomes, 2018, 14: 41
103 Chen S, Li B X, Chen Y P, et al. Cloning and expression analysis of germin-like gene *HbGLP01* from rubber tree (in Chinese) . J Trop Crops, 2016, 37: 715–721 [陈珊, 李博勋, 陈奕鹏, 等. 橡胶树类萌发素蛋白基因*HbGLP01*的克隆及其表达分析. 热带作物学报, 2016, 37: 715–721]
104 Li B X, Shi T, Lin C H, et al. Cloning and expression analysis of resistance-related gene *HbNPR1* from *Hevea brasiliensis* (in Chinese). J Trop Crops, 2014, 35: 1076–1083 [李博勋, 时涛, 林春花, 等. 橡胶树抗病相关基因*HbNPR1*的克隆及其表达分析. 热带作物学报, 2014, 35: 1076–1083]
105 Li B X, Chen Y P, Tian W M, et al. Expression analysis of acid phosphorylase gene *VSP2* in rubber tree HAD family protein (in Chinese). J Trop Crops, 2016, 37: 1107–1114 [李博勋, 陈奕鹏, 田维敏, 等. 橡胶树HAD家族蛋白酸性磷酸化酶基因*VSP2*的表达分析. 热带作物学报, 2016, 37: 1107–1114]

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2024-0194

106 Li X, Liu M, Liu Y, et al. A putative effector of the rubber-tree powdery mildew fungus has elicitor activity that can trigger plant immunity. Planta, 2022, 255: 1–13

107 Zhang B, Song Y, Zhang X, et al. Identification and expression assay of calcium-dependent protein kinase family genes in *Hevea brasiliensis* and determination of *HbCDPK5* functions in disease resistance. Tree Physiol, 2022, 42: 1070–1083

108 Ribeiro S, Label P, Garcia D, et al. Transcriptome profiling in susceptible and tolerant rubber tree clones in response to cassiicolin Cas1, a necrotrophic effector from *Corynespora cassiicola*. PLoS ONE, 2021, 16: e0254541

109 Wang M, Wang Q T, Huang F, et al. A brief discussion on the application and urgent issues of plant protection drones in preventing and controlling rubber tree diseases and pests (in Chinese). China Trop Agric, 2020, 96: 62–65 [王明, 王其同, 黄飞, 等. 浅谈植保无人机防控橡胶树病虫害的应用及亟待解决的问题. 中国热带农业, 2020, 96: 62–65]

110 Li B X, Liu X B, Feng Z J, et al. Technical cord for prevention and control technology of rubber leaf diseases by heavy-load plant protection unmanned aerial vehicle (in Chinese). Trop Agric Sci, 2023, 43: 52–59 [李博勋, 刘先宝, 冯志军, 等. 橡胶树叶部病害大载荷植保无人机防治技术规程. 热带农业科学, 2023, 43: 52–59]

111 Li B X, Huang G X, Liu X B, et al. Optimization of application parameters for heavy-load plant protection unmanned aerial vehicle and study on the control effect of different chemical agents on the powdery mildew and anthracnose of rubber trees (in Chinese). J Trop Crops, 2023, 44: 2558–2568 [李博勋, 黄贵修, 刘先宝, 等. 大载荷植保无人机施药参数优选及不同药剂对橡胶树“两病”的飞防效果研究. 热带作物学报, 2023, 44: 2558–2568]

Current status and prospects of research on main diseases of rubber trees

LI BoXun[1,2], LIU XianBao[1], CHEN LiQiong[3], SHI Tao[1], XU LiDan[3], LI ChaoPing[1] & HUANG GuiXiu[1]

1 Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Key Laboratory of Integrated Pest Management on Tropical Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hainan Key Laboratory for Monitoring and Control of Tropical Agricultural Pests, Haikou 571101, China;
2College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;
3Institute of Scientific and Technical Information, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China

Rubber tree is an important tropical economic crop in China, and natural rubber is of great significance in national defense security, economic construction, and people’s lives. The occurrence and prevalence of diseases have always been important biological limiting factors that restrict the sustainable development of the natural rubber industry. This article summarizes the research status of the main diseases that infect rubber tree leaves, stems, and roots in the past decade. It elaborates on the occurrence and prevalence patterns of diseases, monitoring and early warning technologies, pathogenic and disease resistance mechanisms, as well as the current status of disease control technologies and applications. It also discusses challenges including outdated monitoring and prevention technologies, high labor costs, insufficient utilization of disease resistant germplasms, and low levels of intelligence. Suggestions have been made for the construction of basic database for rubber tree diseases, in-depth research on the mechanism underlying the rubber tree diseases, and building a platform for the unified monitoring, prevention, and control of rubber tree diseases. It provides a theoretical and practical basis for the macro-control and precise prevention of the main diseases of rubber trees, which will help achieve healthy, green, and sustainable development of the natural rubber industry.

rubber tree, main diseases, research status, prospects

doi: 10.1360/SSV-2024-0194

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2024-0194