DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2024.04.001

药用植物病虫害绿色防控技术的研究进展

林凯特，　韩佳怡，　胡怡珊，　牟娓葳，　范慧艳

浙江中医药大学 药学院，杭州 310053

摘　要：面对药用植物种植过程中存在的农药残留超标、病虫害严重与环境污染日益严重的现状，国家政策积极引导并推动绿色防控技术的发展. 基于此，系统探讨了药用植物绿色防控技术的 5 大核心技术，包括生物防治、植物源活性成分的应用、基因工程改良技术、生态调控以及纳米技术应用，详细论述了各类技术的独特优势，并剖析了潜在的技术瓶颈与挑战. 研究结果为构建高效环保的药用植物病虫害绿色防控新体系提供理论依据与实践参考.

关　键　词：药用植物；绿色防控技术；中药材品质；病虫害治理；研究进展

中图分类号：S432；R931.2　　**文献标志码：**A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文 章 编 号：2097－1354(2024)04－0001－10

Research Progress on Green Prevention and Control Technologies for Diseases and Pests in Medicinal Plants

LIN Kaite，　HAN Jiayi，　HU Yishan，
MOU Weiwei，　FAN Huiyan

College of Pharmaceutical Science，Zhejiang Chinese Medical University，Hangzhou 310053，China

Abstract：In response to the current issues of excessive pesticide residues，serious disease and pest problems，and escalating environmental pollution in the cultivation of medicinal plants，national policies actively guide and promote the development of green control technologies. This paper systematically discusses the five core technologies of green control for medicinal plants，including biological control，the application of plant-based active ingredients，genetic engineering improvement techniques，ecological regulation，and cutting-edge applications of nanotechnology. This paper elaborately discusses the unique advantages of each technology and analyzes potential technological bottlenecks and challenges. The results aim to provide theoretical basis

收稿日期：2024－04－08
基金项目：浙江省基础公益研究计划项目(LTGN24C140003)；浙江中医药大学 2023 年校级教育教学改革项目(CY23007).
作者简介：林凯特，本科，主要从事中草药栽培与鉴定研究.
通信作者：范慧艳，博士，讲师.

and practical reference for building an efficient and environmentally friendly new system for green control of disease and pest in medicinal plants.

Key words: medicinal plants; green prevention and control technology; quality of Chinese medicinal materials; disease and pest control; research progress

我国具有明确药用记载历史的植物种类超过 1 万种，涉及约 383 科 2 309 属，其中临床常用植物药材包括根及根茎类大黄、甘草、何首乌，果实种子类连翘、枸杞、牵牛子，花类红花、菊花、金银花，皮类厚朴、黄柏，叶类番泻叶、紫苏叶，全草类鱼腥草、穿心莲等共 700 余种[1-2]. 药用植物在我国分布地域广阔，贯穿西南、西北、中南、华东、华北、东北地区等 6 大区域. 同时，每种药用植物上病虫害多则 30～40 种，少则 3～5 种. 其中侵染性病害主要由病原细菌、真菌、病毒、线虫等引起，而非侵染性病害主要由生长环境如水分、土壤、气候等不适造成[3]. 浙江省道地药材病虫害种类繁多、为害严重、损失较大，且因种植环境、气候、区域和栽培模式以及管理等方面的差异，病虫害发生情况也不尽相同(表 1).

表 1 浙江省道地药材常见病虫害

药材名称	常见病害	常见虫害
浙贝母[4-5]	软腐病、灰霉病、立枯病、黑斑病、干腐病、基腐病	蛴螬、蜗牛、沟金针虫、蛞蝓、小地老虎
铁皮石斛[4-5]	炭疽病、白绢病、灰霉病、黑斑病、软腐病、根腐病、疫病、白枯病、霜霉病、根腐病、叶锈病	双叉犀金龟、红蜘蛛、蜗牛、蚜虫、白粉虱、斜纹夜蛾、蛞蝓、蝗虫
杭白菊[4-5]	根腐病、叶枯病、病毒病、白绢病	蚜虫、斜纹夜蛾、小地老虎、菊天牛、蝗虫、大青叶蝉、菊潜叶蝇
延胡索[4-5]	锈病、霜霉病、日灼病、菌核病	蜗牛、蛴螬、白毛球象、沟金针虫、小地老虎
玄参[4-5]	锈病、白绢病、叶斑病、灰霉病、炭疽病、轮纹病	蛴螬、小地老虎、黑点球象、黄胸寡毛跳甲、短额负蝗、沟金针虫、中华稻蝗
白术[4-5]	白绢病、立枯病、铁叶病、锈病、根腐病	蛴螬、白术术籽虫、小地老虎、白术长管蚜虫、中华稻蝗、短额负蝗、沟金针虫、黄胸寡毛跳甲、大青叶蝉
温郁金[4-5]	日灼病、炭疽病、叶枯病、细菌性病害(茄科劳尔氏菌)、病毒病、白绢病、根腐病	亚洲玉米螟

随着中医药行业的不断发展，药用植物的需求量也不断增加，促进了药用植物的广泛种植和大面积推广，但其质量问题始终是大众关注的焦点. 药用植物种植过程中存在农药残留超标、病虫害严重、环境污染加剧、滥施化肥降低土地生产力、重金属污染、连作障碍等诸多问题. 我国制定的《“十四五”全国农业绿色发展规划》《中医药振兴发展重大工程实施方案》《“十四五”中医药发展规划》等一系列政策文件明确提出健全绿色技术创新体系，强化农业绿色发展科技支撑，实现中药材生产先进适用技术的有效转化和示范推广，进一步推动中药材资源可持续利用. 绿色防控技术是中国化的病虫害综合治理，强调综合预防、全面防治，始终遵循绿色环保的原则，优先采用资源节约型、环境友好型技术措施[6]，为中医药产业可持续发展提供强有力的支持. 本文系统对药用植物绿色防控技术的五大核心技术进行探讨，详细论述了各类技术的独特优势，并剖析了潜在的技术瓶颈与挑战，旨在为构建高效环保的药用植物病虫害绿色防控新体系提供理论依据与实践参考.

1　药用植物病虫害绿色防控技术

药用植物的绿色防控技术主要集中在生物防治、植物源活性成分的应用、基因工程改良技术、生态调控以及纳米技术等方面. 这些技术的发展和应用，旨在减少化学农药的使用，提高药用植物的产量和质量，同时保护环境和人类健康.

1.1　生物防治技术

生物防治是利用自然界存在的微生物(如细菌、真菌、线虫等)来控制病虫害的方法. 生物防治技术的研究和应用在我国农业发展中具有重要意义. 通过利用一种生物对付另一种生物的方法，如以虫治虫、以菌治虫和以鸟治虫等，可以不破坏环境和生态平衡地降低有害生物种群密度[7]. 近年来，研究者们已经完成了多个方面的研究，包括应用管氏肿腿蜂防治蛀茎性害虫、研制木霉制剂用于药用植物病害的防治、应用农抗 120 防治人参根疫病以及应用昆虫病原线虫防治枸杞负泥虫等[8]. 此外，还有研究聚焦于中药材土传病害的拮抗微生物[9]，以及利用生防微生物进行植物病害生物防治过程中存在的问题及其解决途径[10].

生物防治技术在提高药用植物病虫害管理效率和环保性方面有巨大潜力. 最新应用主要包括利用先进的生物技术进行病原体的检测与识别、有效使用生物防治剂及其组合、重视微生物生物防治剂的作用、通过生物技术减少农药使用以及不断研究和推广生物防治技术等方面.

1.1.1　植物病害的识别和检测

利用分子标记、聚合酶链式反应(PCR)等生物技术手段，对植物病原体进行快速、敏感和准确的检测与识别，是提高病害控制决策过程的关键. 先进的生物技术手段因其高度特异性，可在不同的分类水平上区分密切相关的生物，还可检测和鉴定不可培养的微生物. 例如，在全球范围内，RAPD 标记被报道可用于许多药用植物病原菌的诊断研究. 此外，已有研究使用 RAPD 和 ISSR 标记评估了引起桑树根腐病不同地理和寄主来源的菌株遗传差异[11]；实时荧光定量 PCR 方法可以检测灰霉菌(*Botrytis cinerea*)、尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)、尖孢炭疽菌(*Colletotrichum acutatum*)、拟茎点霉(*Phoma sclerotioides*)、畸雌腐霉(*Pythium irregular*)、立枯丝核菌(*Rhizoctonia solani*)、大丽轮枝菌(*Verticillium dahliae*)等多种病原真菌[12]. 这些技术的应用，不仅提高了植物病害诊断的准确性，还为开发具有特定抗性基因的转基因品种提供了可能. 而传统技术在检测病原菌方面仍具有很大挑战，许多细菌性植物病原体缺乏足够的敏感性和特异性，耗时长且很难将病原菌与附生或偶然的表面污染物以及无害或有益的内生细菌分开；用于检测真菌病原体的基本方法主要依赖于显微镜、形态学和培养方法，耗时长且需要具备一定的知识储备，可能因识别不力导致不可靠的结果.

1.1.2　生物防治剂的使用

生物防治剂(biological control agents，BCAs)的有效使用是可持续农业的一个重要组成部分. 其中，微生物生物防治剂在现代农业的综合害虫管理中扮演着重要角色，其易于使用、安全，是危险农药化学品的环保替代方法. 据文献报道，生防真菌有哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)、绿色木霉(*Trichoderma viride*)、蜡蚧轮枝菌(*Verticillium lecanii*)、绿僵菌(*Metarhizium anisopliae*)、淡紫拟青霉(*Paecilomyces lilacinus*)等；细菌生防菌荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*)等在抑制土传植物病原生物方面发挥着重要作用. 此外，捕食、寄生或其他自然机制也可用于减少害虫、杂草和植物病害等[13]. 这些生物防治剂在中药材等经济作物上应用，

都是生态可持续且有效的作物保护方法. 近年来，研究者越来越关注使用 BCAs 的组合来开发它们之间的潜在协同效应. 尽管在大多数情况下，BCAs 之间显示出的是拮抗作用而非协同作用，但仍有少数研究表明存在协同效应[14].

1.1.3 减少农药使用

通过生物技术进行植物病虫害防治，不仅可以取得较好的防治效果，还可以有效减少农药的施用，降低植物农药残留，减小对环境的破坏. 这表明生物技术在促进植物健康生长的同时，也保护了生态环境. 例如，杆状病毒可预防鳞翅目昆虫引起的虫害，效果显著且安全性很高；激素可预防特定病虫害发生的概率，实现植物病虫害的防治，且能在较短的时间内治理病虫害；应用复合生物杀虫剂防治双线盗毒蛾、马尾松毛虫等害虫在国内已取得较好的效果[15]. 引入生物天敌具有防治效果周期长、环保性强、经济性状好的特点，可调控有害生物数量，维持生态平衡及各生物间的和谐共生，也能改善化学农药造成的污染，在保护生态的基础上实现病虫害的防治[16].

1.2 植物源活性成分的应用

大量研究发现植物源提取物对多种植物的病原菌、病毒具有杀菌、抑菌和抗病毒的活性，并且易于降解，使用安全[17]. 已有研究报道，从无花果内生真菌中分离到的化合物，可抑制芍药炭疽病的病原菌生长和繁殖[18]；苦参碱、百部碱、莨菪碱、小檗碱、雷公藤碱等多种植物的生物碱，已被证实对同翅目、鞘翅目、鳞翅目的多种害虫具有防控作用；植物源农药中的三萜类化合物是全世界所公认的中药昆虫拒食剂[19-20]. 这为推动化学农药减量增效，绿色生产提供了依据[21].

植物源活性成分通过诱导植物产生系统获得性抗病性能、直接抑制病原菌的生长和繁殖、协同抗生素消减细菌耐药性以及直接作用于病毒或病原菌等多种机制，可有效提高药用植物的抗病性.

1.2.1 诱导植物产生系统获得性抗病性能

植物抗病激活剂通过刺激植物的免疫系统，诱导植物产生具有广谱性、滞后性和持久性的系统获得性抗病性能. 这一过程不仅引发植物富含羟脯氨酸糖蛋白的变化，造成木质素在细胞壁沉积，形成物理防御机制，还能导致内源水杨酸的累积、形成氧化激增，以及植物局部细胞程序化死亡进而产生过敏反应. 这些变化和反应通过内源信号传导物质茉莉酸、水杨酸、一氧化氮和乙烯传导至整个植株，经一系列抗病相关基因的调控与表达，引起寄主防御酶系如几丁质酶、β-1，3-葡聚糖酶、过氧化物酶、苯丙氨酸解氨酶等以及抗病物质如植保素与木质素等的变化及病程相关蛋白的调控与表达[22]. 例如，施用壳寡糖可降低浙贝母黑斑病和灰霉病的发病率，提高抗病性[23]；施用氨基寡糖素可防治槟榔黄化病的发生[24].

1.2.2 抑制病原菌的生长和繁殖

植物内生真菌代谢产物中存在着有多样性结构的抗植物病原真菌活性化合物，这些化合物通过作用于真菌细胞膜、细胞壁以及抑制真菌蛋白质生物合成等方式，对病原菌的抑制效果显著[18]. 例如，丁香油及其酚类成分能够破坏赤星病菌(*Alternaria alternata*)的细胞膜结构并增加质膜通透性，引起细胞内含物的外渗，同时提高膜脂过氧化程度，增加丙二醛的含量，导致菌丝细胞死亡，进而抑制病原菌的生长和繁殖[25].

1.2.3 协同抗生素消减细菌耐药性

植物活性成分如生物碱类、萜类、多酚类、硫代葡萄糖苷、皂甙类、凝集素等化合物为基础

的抑菌剂，在抗菌等方面有巨大的潜力，还可与抗生素通过多种途径发挥协同抗菌作用，增强或恢复耐药菌对现有抗生素的敏感性[26].

1.2.4　直接作用于病毒或病原菌

某些植物源活性物质能够在体外直接作用于病毒或病原菌，降低其侵染活性或体内复制水平. 例如，熊果酸和 4-甲氧基香豆素可以不同程度提高植物过氧化物酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶这几种防御酶活性，降低过氧化物含量，在病毒侵染前期降低细胞膜脂过氧化程度并减轻细胞膜受损，同时上调 *NPR*1、*PR*1 和 *PR*2 等防卫反应相关基因的表达量，促进病程相关蛋白合成，进而降低病毒初侵染含量[25].

1.3　基因工程改良技术

基因工程改良技术在药用植物领域的应用显示了其在应对资源匮乏、生长环境恶化等问题上的潜力.

通过基因工程可以提高药用植物的抗病、抗虫能力，增加药用植物活性物质的含量，改善药材的品质等. 例如，将外源豇豆胰蛋白酶抑制剂基因 *CpTI* 与苏云金芽孢杆菌杀虫蛋白基因 *CryIA*(c)一同转入四倍体菘蓝后，对害虫小菜蛾表现出明显的抗性；外源蚜虫抗性基因雪花莲凝集素酶(GNA34)整合至枸杞的基因组后，可显著提高枸杞的抗蚜虫能力；将兔 NP-1(CN) 和抗菌肽 cecropin B 融合基因转入鱼腥草中，可培育出抗菌活性提高的鱼腥草新品种；转化苜蓿 β-1，3-葡聚糖酶(AGLU)基因和水稻几丁质酶(RCH10)基因至白术基因组中，可获得对白术立枯病抗性增强的 5 个转基因白术株系[27].

在环境保护方面，基因工程技术的应用也显示出其潜力. 例如，通过基因工程方法培育出的作物能够抵抗虫害，无需使用农药，这样不仅能提高种植的经济效益，还能有效保护环境[28]. 此外，基因工程还能增强药用植物的抗逆性，使其能够更好地适应不同的环境条件，如干旱、寒冷等非生物胁迫[29]. 这不仅有助于提高药用植物的生存率和产量，还能减少因环境变化导致的生产波动.

然而，基因工程技术的应用也引发了一系列环境影响的担忧. 首先，转基因作物可能通过花粉传播影响非目标生物，这可能会破坏生态系统的平衡. 其次，引入特定基因可能会对野生动植物的生物多样性产生影响[30]. 因此，在推广基因工程作物时，需要进行全面的环境影响评估，以确保这些技术的应用不会对环境造成不可逆转的损害.

1.4　生态调控技术

中药材调控技术的研究前沿包括从生态位角度讨论中药材生态种植的概念、内涵和实质，以及种植模式及其类型的划分[31]. 中药原生态种植作为一种生态的种植模式，对于减少病虫害的发生、提高栽培药材的质量、改善生态环境等具有重要意义[32].

1.4.1　生态种植模式的多样化与成熟化

基于系统层次的常见中药材生态种植模式及其配套技术的研究，总结了病虫草害绿色防控技术、菌根栽培技术、野生抚育配套技术、土壤改良技术、测土配方施肥技术、定向培育技术、精细农业耕作技术、设施栽培技术等 8 种成熟的中药材生态种植技术. 当前，包括生态调控技术、理化诱控技术、生物防治技术和科学用药技术等在内的病虫害绿色防控技术已较为成熟，有学者将其综合运用于丹参生产中，有效地控制了病虫害问题，产量和质量有显著提升. 同时，丛枝菌根真菌栽培技术已在三七、铁皮石斛、丹参、苍术等栽培上得到广泛应用，提高了植物的抗逆性，减少土传病害的发生，也能在一定程度上克服了连作障碍. 此外，已有学者采用定

向培育技术，成功培育出具有抗病、抗逆、高产等特性的板蓝根新品种，可解决板蓝根质量差、病虫害多、产量低等问题[33]. 这些技术的应用和成熟，有助于减少病虫害的发生，提高中药材的质量和产量.

1.4.2 中药生态农业的原理与问题

中药生态农业的发展基于 4 个方面的原理，包括生态位原理、生物多样性原理、逆境效应原理、结构稳定原理等[34]. 研究表明，霍山石斛在设施栽培模式下受人工干预较大，生长主要受病虫害的威胁；林下栽培模式下人工干预相对较少，且水分适宜，受昼夜温差等胁迫，病虫害相对少；拟境栽培模式下几乎无人工干预，且模拟了野生型的生境，各类环境胁迫因子在生长过程中可能出现或同时出现，环境的生物多样性高，几乎无病虫害. 与设施栽培和林下栽培相比，拟境栽培虽受各种环境的胁迫，产量相对较低，但其综合效益显著. 当前，石斛已广泛采用野生抚育配套技术进行规模化的生产[35]. 同时，中药生态农业发展中也存在问题，如有待完善生态种植模式与配套技术、有待提高对生态农业示范推广的认识等[34]. 这些问题的识别为后续的研究提供了方向.

1.4.3 林下中药材种植

林下中药材种植作为中药生态农业的重要组成部分，其研究进展表明，通过不同林地对中药材栽培的影响、地域对林下种植中药材品种的影响等方面的研究，可以有效提升中药材的质量[36]. 例如，花栎木、柑橘、侧柏、松树、桃树、桂花树等不同树种下套种黄精，因长时间连续降雨导致所有黄精在不同程度上感染了根腐病. 其中花栎木因树干较高，林间可顺畅通风，病害发生率最低；而侧柏和柑橘林间通透性较差，树林郁闭度较高，且林下地块土壤含水量较高，导致树下的黄精发生细菌性病害和真菌性病害较多. 同时，不同树种对黄精的存活率、生长势和产量均有影响[37].

1.4.4 生态因子与中药品质的相关性

研究表明，降水量、光照强度、土壤因子等生态因子与中药材品质的相关性最为密切，这一发现为中药材的生态种植提供了重要的理论依据[38]. 例如，降水量对一些地下害虫土中分布有显著影响，如小地老虎、细胸金针虫多发生于低洼地或土壤湿度大的地方；宽背金针虫钩和金针虫则多发生于较干旱和土壤湿度小的地区；而拟地甲多发生于干旱的砂土地. 同时，降雨造成土壤湿度过大时，不利于蛴螬下移，进而可减轻其危害[39]；强光或者持续光照会影响常见害虫甜菜夜蛾取食、交尾、产卵及存活等生物学习性，抑制其性信息素的合成和求偶行为，从而控制其种群的发展[40]；人参无公害种植技术的关键是土壤改良和消毒，但若农家肥施入过量，会引起人参红皮、烧须、红参、赤参等病害现象严重[41].

1.4.5 中药材与其他植物间作的效益及机理

研究人员发现与其他植物间作能缓解中药材连作障碍. 因此，通过发挥种间促进作用、种间互补作用及改善土壤微环境，能够实现减少病虫害发生、增加药用植物产量和药效成分含量、提高土壤质量以及改善生态环境等效益. 这一研究成果为中药材的可持续发展提供了新的思路[42]. 例如，同单作桔梗进行比较，桔梗与大葱间作可通过提高细菌数量、微生物总量和土壤多酚氧化酶活性，降低镰刀腐霉属真菌数量，从而抑制桔梗根腐病，提高土壤有效养分，同时有效缓解其连作障碍.

1.5 纳米技术的应用

纳米技术在防治植物病害中的应用现状表明，这一领域已经取得了显著的进展，包括金属

纳米材料和无机纳米材料对植物病原菌的抗菌性研究，以及利用纳米载体和纳米农药防治植物病害的研究现状[43]. 纳米材料因其独特的物理化学性质，如小尺寸、大表面积和高反应性，被广泛研究和应用于植物病害的管理中. 这些材料可以作为杀菌剂、杀真菌剂、纳米肥料，以及作为生物传感器用于植物病害诊断. 同时，金属纳米材料可释放金属营养物质以促进植物生长[44]. 例如，氧化铜纳米颗粒可显著降低尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)对菊花的侵染[45]；ZnO 纳米肥能促进姜黄生长，提高主要活性成分的含量并提高产量[46]. 此外，纳米技术还被探索用于抗病毒策略[47]，通过增强植物的先天免疫反应，以及作为活性成分(如农药、微量营养素和诱导剂)的载体[48]. 未来纳米技术在植物病害管理中的应用预计将进一步扩展. 随着对纳米材料特性的深入理解和合成技术的进步，预计将开发出更多高效、环保的纳米产品用于农业. 例如，锌基纳米材料因其具有潜在的靶向抗菌属性和低至可忽略的植物毒性，被认为是未来植物病害管理的重要方向[49]. 此外，纳米孔测序技术的应用可能为植物病原体的快速准确检测提供新的解决方案[50].

然而，尽管纳米技术在植物病害管理中展现出巨大潜力，其商业化应用仍面临一些挑战. 这包括需要进行更多的生态和生物安全性评估[49]、缺乏足够的田间试验以及对害虫-作物宿主系统利用不足[51-52]. 为了克服这些挑战，未来的研究需要解决科学上的空白，提供合理的基础，促进商业纳米产品的开发. 纳米技术在防治植物病害中的应用现状显示了其在提高作物健康、减少化学农药使用以及促进可持续农业发展方面的巨大潜力. 未来的发展趋势将集中在开发更安全、更有效的纳米产品上，同时解决商业化应用中的挑战. 随着研究的深入和技术的进步，纳米技术有望成为农业病害管理的重要工具.

2　药用植物病虫害绿色防控技术的发展策略

2.1　应用优势

绿色防控技术是针对病虫害防治提出的防控手段，在药用植物的应用中具有 3 大优势：一是提高了病虫害防治效果，促进无公害中药材种植技术的推广和标准化. 中国中药协会组织召开了“无公害中药材种植技术推广总结验收会”，并审议通过了“中药材无公害生产标准操作规程”. 在精准把握病虫害发生情况的基础上，综合运用绿色防控技术，能有效降低药用植物病虫害的发生率，同时减少病虫害的抗药性发生，降低损失[53]，也为中国无公害中药材生产和中药产业发展提供了重要的技术支撑和经验参考[54]. 二是化肥农药减量增效，中药资源短缺缓解. 随着中药产业的迅猛发展，野生药材资源不断减少，人工栽培成为解决中药资源短缺的主要方式. 综合应用绿色防控技术，发展无公害中药材栽培技术，能在有效消除病虫害的前提下减少化肥和农药的使用量，减少农药残留超标、重金属污染等问题，同时提升药用植物的品质[55]，促进中药材生产的可持续发展. 三是提高中药质量和安全性，迎合中药材市场需求. 针对欧盟、日美等国际市场对芳香植物和药用植物种植规范化趋势的需求，我国积极开展环境质量监测科研方面的工作，确保了空气、土壤、水质无污染. 结合无公害中药材栽培技术开展应用实践，提高中药的质量和安全性，同时收获种植效益与生态效益，推动农业生产及中药材产业的良性发展，接续助力乡村振兴，同时对促进中药产品出口也具有重要意义[56-58].

2.2　面临的挑战及对策

针对中药材绿色防控技术的研究进展，未来的研究方向和挑战主要包括以下 5 个方面：① 推进绿色防控技术体系的集成创新. 研发更高效、环保的防治技术是推动中药材绿色防控的关

键，包括开发新型生物农药、物理防治方法等，减少化学农药的使用，降低对环境的影响. 同时将现有的病虫害绿色防控技术和方法进行整合创新，形成一套完整的病虫害绿色防控技术体系，以适应不同地区、不同类型药用植物的需求. ②加强绿色防控保障体系的建设. 建立和完善病虫害监测体系是实现中药材绿色防控的前提，通过及时准确的监测数据，可以为病虫害的防治提供科学依据. 同时需要强化相关的法律法规体系，确保绿色防控技术的应用和发展有法可依. ③加强技术指导和宣传引导. 提高药农对绿色防控技术的认知和接受度，需要加强对药农的技术指导和宣传引导，使他们能够正确理解和应用这些技术，加强对生态环境保护的主观意识，提高对药用植物绿色防控的认知，在主观层面树立绿色环保理念，有效促进绿色防控技术的应用推广. ④优化药用植物栽培管理机制. 合理使用化学农药和化肥对于保护药用植物资源和环境至关重要. 未来的研究需要关注如何在保证药用植物生长的前提下，减少化学物质的使用量和频率[3]. 同时需要通过深入研究分析中药材种植、培育过程，建立科学化的管理机制，实现对中药材的科学化管理和科学指导，保障中药材的质量和安全[59]. ⑤扩大绿色防控技术的应用推广. 在绿色生产理念下，加强对新型生物农药的应用，减少病虫害威胁以及化学药物的危害[60-61]. 这包括对植物免疫学的研究，利用植物的先天免疫系统对抗病原生物的侵害[62]. 同时，通过构建药用植物跨组学大数据平台，集成与分析药用植物生态、形态、组学与药效数据，解读药效与疾病间的关系，实现药用植物资源与新药的智慧创制[63]. 这种方法有助于精准栽培和药效单体生物制药，促进药用植物资源保护与开发利用的协调发展.

3 讨论与展望

国家高度重视中医药对人民健康的保障作用，2023 年 6 月发布了《中药材 GAP 实施技术指导原则》，进一步加强了药用植物种植规范. 病虫害绿色防控技术的发展为调控药用植物栽培环境和提升中药材品质，提供了新的机遇. 药用植物病虫害绿色防控技术的研究进展涵盖了生物防治、植物源活性成分的应用、基因工程改良技术、生态调控以及纳米技术等多个方面. 这些技术的发展和应用，是保证药材品质和产量的基础，有助于减少病虫害的发生，减少化学农药的使用，保护环境和人类健康，也是实现药农增收，促进农业生产可持续发展、推进生态文明建设的重要举措. 然而，这些技术的应用也面临着一些挑战，如生物防治精准化施药技术的研发相对滞后[64]，以及针对药用植物作用机制的研究相对较少等问题[65]. 因此，未来的研究需要进一步加强这些领域的技术开发和应用推广，以充分发挥药用植物在病虫害绿色防控中的作用和价值.

参考文献：

[1] 孙汉董. 21 世纪的现代本草新篇章：《中国药用植物志》[J]. 中草药，2024，55(4)：1427-1428.

[2] 施梦馨，刘莹，官会林，等. 药用植物化感自毒作用及消减措施 [J]. 中国现代中药，2023，25(9)：2013-2019.

[3] 赵中华，朱晓明，刘万才. 我国药用植物病虫害绿色防控面临的挑战和机遇 [J]. 中国植保导刊，2020，40(9)：103-106，110.

[4] 姚晓明，施德，何春龙，等. 浙江省主要中药材病虫发生现状与防治对策 [J]. 浙江农业科学，2014，55(12)：1785-1788.

[5] 戴德江，沈颖，沈瑶，等. 浙产特色中药材病虫害化学防治的研究进展 [J]. 农药学学报，2019，21(5)：759-771.

[6] CHEN T T，LU X J，WU Z Y. Factors Affecting the Adoption of Green Prevention and Control Techniques by Family Farms：Evidence from Henan Province of China [J]. Frontiers in Psychology，2022，13：1015802.

[7] 李晓娇. 病虫害生物防治技术的研究进展及应用 [J]. 科技创新导报，2016，13(4)：74，76.
[8] 程惠珍，丁万隆，陈君. 生物防治技术在绿色中药材生产中的应用 [J]. 中国中药杂志，2003，28(8)：693-695.
[9] 姜竹，李晶. 中药材土传病害生物防治研究进展[J]. 现代农业科技，2009，(24)：152-153，156.
[10] 胡燕梅，杨龙. 利用微生物防治植物病害的研究进展[J]. 中国生物防治，2006(S1)：190-193.
[11] 谢红辉. 桑毛色二孢根腐病的病原、发生规律及其防治研究 [D]. 南宁：广西大学，2016.
[12] TIBEBUB，NUHB. Biotechnological Tools for Detection，Identification and Management of Plant Diseases [J]. African Journal of Biotechnology，2019，18(29)：797-807.
[13] DEY U，SARKAR S，MALIK M，et al. A Promising Sustainable Pest Management Technology：Microbial Bio-Control Agent [J]. Microbiology Research Journal International，2021：23-26.
[14] XU X M，JEFFRIES P，PAUTASSO M，et al. Combined Use of Biocontrol Agents to Manage Plant Diseases in Theory and Practice [J]. Phytopathology，2011，101(9)：1024-1031.
[15] 葛文来. 生物技术在植物病虫害防治中的作用[J]. 农业开发与装备，2020，(5)：71，73.
[16] 左热古丽·买买提，阿不都瓦哈·艾再孜，买买提库尔班·阿力，等. 生物技术在林业病虫害防治中的应用[J]. 世界热带农业信息，2022(6)：3-4.
[17] 崔东亚，蒋继志，杨美玲，等. 植物源活性成分与植物病害防治研究进展 [J]. 农业与技术，2009，29(2)：39-41.
[18] 马养民，赵洁，周雪宁. 植物内生真菌抗植物病原真菌活性物质的研究 [J]. 化学进展，2010，22(2)：440-448.
[19] 沈丹霓，曾文慧，张丹丹，等. 植物源活性物质对昆虫生殖的干扰作用 [J]. 环境昆虫学报，2020，42(4)：884-894.
[20] 曹慧. 植物源农药活性成分的应用及研究进展 [J]. 北京农业，2015(9)：123.
[21] 刘燕刚，韩莉，韩锦峰. 植物源中草药防治农业病虫害的研究进展 [J]. 安徽农业科学，2022，50(20)：18-20，28.
[22] 范志金，刘秀峰，刘凤丽，等. 植物抗病激活剂诱导植物抗病性的研究进展 [J]. 植物保护学报，2005，32(1)：87-92.
[23] 陈敏洁，杨超超，汪晓菲，等. 免疫诱抗剂对浙贝母生长与抗病的影响 [J]. 浙江农业科学，2022，63(12)：2865-2868.
[24] 吴宇炼，范慧艳，汪彦欣，等. 植物免疫诱抗剂研究文献计量可视化分析 [J]. 中国农学通报，2022，38(27)：138-146.
[25] 张旺. 几种植物源活性物质的抑菌、抗病毒效果及其机理研究 [D]. 重庆：西南大学，2017.
[26] 陈金玉，刘单阳，赵勇，等. 植物活性成分协同抗生素消减细菌耐药性的研究进展 [J]. 天然产物研究与开发，2021，33(6)：1063-1071.
[27] 滕中秋，申业. 药用植物基因工程的研究进展 [J]. 中国中药杂志，2015，40(4)：594-601.
[28] 卢大鹏. 基因工程技术在农业环境保护中的应用[J]. 现代农业科学，2009，16(5)：186，190.
[29] 吴延军，何伟，王江. 植物基因工程技术在农业上的应用 [J]. 中国农学通报，2002，18(4)：71-74.
[30] DALE P J. Environmental Impact of Biotech Crops [J]. Journal of Animal Science，2001，79(suppl_E)：E144-E147.
[31] 杨利民. 中药材生态种植理论与技术前沿 [J]. 吉林农业大学学报，2020，42(4)：355-363.
[32] 田硕，苗明三. 中药原生态种植研究 [J]. 中医学报，2014，29(9)：1339-1341.
[33] 康传志，吕朝耕，黄璐琦，等. 基于系统层次的常见中药材生态种植模式及其配套技术 [J]. 中国中药杂志，2020，45(9)：1975-1981.
[34] 郭兰萍，康传志，周涛，等. 中药生态农业最新进展及展望 [J]. 中国中药杂志，2021，46(8)：1851-1857.
[35] 易善勇，康传志，王威，等. 霍山石斛种植模式比较及拟境栽培的优势分析 [J]. 中国中药杂志，2021，46(8)：1864-1868.
[36] 田丰铭，佘瑞宁，陈博威，等. 林下中药材种植与应用研究进展 [J]. 中国野生植物资源，2022，41(6)：64-71.
[37] 陈风雷，孟德玉，王洪军，等. 不同树种林下套种黄精种植技术初探 [J]. 湖北农业科学，2021，60(7)：77-79.
[38] 臧亚男，顾正位，冯帅，等. 生态因子与中药品质相关性研究进展 [J]. 山东中医杂志，2022，41(10)：1137-1141.
[39] 党志浩，陈法军. 昆虫对降雨和干旱的响应与适应 [J]. 应用昆虫学报，2011，48(5)：1161-1169.
[40] 蒋月丽，郭培，李彤，等. 黄光光照强度对甜菜夜蛾成虫生殖行为和寿命的干扰效果 [J]. 环境昆虫学报，2020，42(5)：1230-1234.

[41] 沈亮，李西文，徐江，等. 人参无公害农田栽培技术体系及发展策略 [J]. 中国中药杂志，2017，42(17)：3267-3274.

[42] 唐艺玲，雷晓青，李雪芹，等. 中药材与其他植物间作的效益及机理研究进展 [J]. 中药材，2019，42(3)：693-697.

[43] 陈娟妮，蔡璘，李石力，等. 纳米技术在植物病害防控中应用的研究进展 [J]. 植物保护学报，2019，46(1)：142-150.

[44] ELMER W，WHITE J C. The Future of Nanotechnology in Plant Pathology [J]. Annual Review of Phytopathology，2018，56：111-133.

[45] LI Y B，ZHANG P，LI M S，et al. Application and Mechanisms of Metal-Based Nanoparticles in the Control of Bacterial and Fungal Crop Diseases [J]. Pest Management Science，2023，79(1)：21-36.

[46] KHATTAB S，ALKUWAYTI M A，YAP Y K，et al. Foliar Spraying of ZnO Nanoparticals on Curcuma longa Had Increased Growth，Yield，Expression of Curcuminoid Synthesis Genes，and Curcuminoid Accumulation [J]. Horticulturae，2023，9(3)：355.

[47] FAROOQ T，ADEEL M，HE Z F，et al. Nanotechnology and Plant Viruses：an Emerging Disease Management Approach for Resistant Pathogens [J]. ACS Nano，2021，15(4)：6030-6037.

[48] FU L，WANG Z Y，DHANKHER O P，et al. Nanotechnology as a New Sustainable Approach for Controlling Crop Diseases and Increasing Agricultural Production [J]. Journal of Experimental Botany，2020，71(2)：507-519.

[49] KALIA A N，ABD-ELSALAM K A，KUCA K. Zinc-Based Nanomaterials for Diagnosis and Management of Plant Diseases：Ecological Safety and Future Prospects [J]. Journal of Fungi，2020，6(4)：222.

[50] 路惠馨，孙凯，尹传林，等. 纳米孔测序技术在植物病原检测中的应用与展望 [J]. 农业生物技术学报，2021，29(9)：1817-1824.

[51] WORRALLE，HAMID A，MODY K，et al. Nanotechnology for Plant Disease Management [J]. Agronomy，2018，8(12)：285.

[52] KUTAWA A B，AHMAD K，ALI A，et al. Trends in Nanotechnology and Its Potentialities to Control Plant Pathogenic Fungi：a Review [J]. Biology，2021，10(9)：881.

[53] 王永青，李光荣，刘华. 绿色防控技术在江苏滨海白首乌上的示范应用与推广 [J]. 农业装备技术，2022，48(6)：33-35.

[54] 科技创新推动中药材生产进入无公害时代[J]. 中国现代中药，2018，20(6)：776.

[55] 何婉雯，陆世忠. 绿色防控技术对农药减量增效的成效和推广应用前景 [J]. 绿色科技，2023，25(17)：103-106，144.

[56] 方晓红，施心建. 大力发展中药材无公害栽培技术 [J]. 中国药业，2004，13(6)：19-20.

[57] 万修福，王升，康传志，等. “十四五”期间中药材产业趋势与发展建议 [J]. 中国中药杂志，2022，47(5)：1144-1152.

[58] 我国“绿色中药材”进入国际市场[J]. 中国中医药信息杂志，1999(7)：53.

[59] 高晨光，马宝英，高照艳. 信息时代下绿色中药材生产监督机制研究 [J]. 物流科技，2020，43(3)：44-46.

[60] 王金彩. 新型农药的应用及绿色植保技术探讨 [J]. 农业工程技术，2017，37(35)：22.

[61] 陆广梅. 新型农药的应用及绿色植保技术研究 [J]. 农业开发与装备，2022(5)：178-180.

[62] 张杰，董莎萌，王伟，等. 植物免疫研究与抗病虫绿色防控：进展、机遇与挑战[J]. 中国科学：生命科学，2019，49(11)：1479-1507.

[63] 秦双双，韦坤华，胡营，等. 药用植物 4.0 研究进展与展望 [J]. 中国现代中药，2023，25(7)：1383-1395.

[64] 吴晓青，赵晓燕，徐元章，等. 植物生物防治精准化施药技术的研究进展 [J]. 中国农业科技导报，2019，21(3)：13-21.

[65] 李鹏飞，刘明珠，肖贺贺，等. 药用植物在水产养殖动物病原防控中的应用进展 [J]. 南方农业学报，2021，52(7)：2015-2024.

责任编辑 王新娟