

天然产物防治农作物病害的作用机理及应用

于清¹, 黄宏坤³, 黄文坤^{1*}, 周向平^{2*}

¹中国农业科学院植物保护研究所 植物病虫害综合治理全国重点实验室, 北京 100193; ²湖南省烟草

公司永州市公司, 永州 425100; ³农业农村部农业生态与资源保护总站, 北京 10012

摘要: 作物病害对作物产量、品质及经济效益造成严重影响, 大量使用化学农药对病害进行防治不仅会影响食品安全、造成环境污染, 还会导致病害产生抗性而增加病害防治的难度, 严重影响农业生产发展。因此寻找更高效环保的农药是当务之急。天然产物农药具有生物活性高、环境友好、不易产生抗药性等优点, 在防控农作物病害、减少作物损失、保障粮食安全、保护生态环境中发挥着重要作用。本文从天然产物对真菌、细菌、病毒、线虫病害的作用机理及其在防治农作物病害方面的应用进展进行了综述, 并对其应用前景进行了展望, 将为农作物病害绿色防控提供理论基础。

关键词: 天然产物; 病害防治; 作用机理; 应用; 农药

中图分类号: S476+.9 文献标志码: A

Mechanism and application of natural products on controlling crop diseases

YU Qing¹, HUANG Hong-kun³, HUANG Wen-kun^{1*}, ZHOU Xiang-ping^{2*}

¹State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, the Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; ²Yongzhou Tobacco Company, Hunan Provincial Tobacco Corporation, Yongzhou 425100, China; ³General Station of Agricultural Ecology and Resource Protection, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China

Abstract: Crop diseases can severely impact crop yield, quality, and economic benefits. The extensive use of chemical pesticides for disease control not only affects food safety and causes environmental pollution but also leads to the development of disease resistance, increasing the difficulty of disease management and severely affecting the development of agricultural production. Therefore, the search for more efficient and environmentally friendly pesticides is an urgent priority. Biopesticides, derived from natural products, have the advantages of high biological activity, environmental friendliness, and less likelihood of causing resistance in pests. They play an important role in the prevention and control of crop diseases, reduction of crop losses, safeguarding food security, and protection of the ecological environment. This article provides a comprehensive review of the mechanisms by which natural products act against fungal, bacterial, viral, and nematode diseases, as well as their application

progress in the prevention and control of crop diseases. It also looks forward to their application prospects, which will provide a theoretical basis for the green prevention and control of crop diseases.

Key words: Natural products; disease control; mechanism; application; pesticide

随着农业种植结构的不断调整, 植物病害出现常发和多发态势, 导致农作物大量减产、品质下降, 给农业生产带来了重大经济损失, 已成为限制我国农业可持续发展的重要瓶颈^[1]。长久以来, 防治植物病害主要依赖于化学农药, 不仅导致病原菌的抗药性增强, 还造成农药残留、环境污染、土壤理化性质和微生物群落破坏等一系列问题^[2]。因此, 寻求高效环保的新型农药成为目前绿色农业发展的关键^[3]。天然产物是指从动物、植物、微生物的组成成分或其次生代谢产物中提取的物质, 主要包括生物碱、挥发油、黄酮类、萜类、酚类、醌类、脂肪酸等, 因其具有多样化的化学结构和较好的病害防治效果, 在农作物病害防治方面表现出了对环境友好、对人畜安全、易降解和不易产生抗药性等优点^[4], 已成为新型生物农药的研发热点之一, 在农作物病害防治中具有广阔的应用前景^[5]。因此探究天然产物的作用机理, 了解天然产物在农药中的应用, 可以为天然产物的开发与应用提供理论依据。

1 天然产物的作用机理

1.1 天然产物抗真菌机理研究

天然产物对真菌的作用机理主要有破坏病原菌的细胞壁和细胞膜, 抑制能量代谢, 提高作物自身抗性等。生物碱是生物界中所有含氮的有机化合物, 具有良好的杀菌活性, 研究发现新白叶藤碱 (neocryptolepine) 在浓度为 25 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时对立枯丝核菌 (*Thanatephorus cucumeris*) 的抑制效果最好, 几乎无菌核形成。其抗菌活性在于与线粒体内膜呼吸链复合酶 III 的铁硫蛋白结合而影响复合酶的活性, 阻断菌丝的电子传递和能量代谢, 最终导致菌丝死亡^[6]。肉桂醛 (cinnamaldehyde) 作为肉桂挥发油中的主要成分, 可透过真菌的细胞壁, 严重干扰细胞壁中葡聚糖和几丁质的合成导致细胞壁受损, 最终真菌因细胞壁发育不完整而逐渐死亡^[7]。丁香酚 (eugenol) 能抑制灰霉病菌 (*Botrytis cinerea*) 菌丝体细胞中 Na^+/K^+ -ATPase 活性, 导致菌丝细胞膜外 K^+ 浓度升高, 改变细胞膜对 K^+ 的选择透性。并能诱导细胞质内游离的 Ca^{2+} 浓度升高, 引起细胞内活性氧含量升高和脂质过氧化, 导致菌丝细胞膜系统受到损伤, 最终造成菌丝细胞死亡^[8]。莪术油 (zedoary turmeric oil) 是一种天然植物精油, 在 2.5 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时对辣椒疫霉菌 (*Phytophthora capsici*) 的抑制率为 85.8%, 该植物精油通过破坏菌丝细胞膜的完整性, 使菌丝体发生不规则收缩、凹陷和一些细胞器降解, 达到抑制菌丝生长的效果^[9]。

1.2 天然产物抗病毒机理研究

天然化合物抗病毒的主要机理包括抑制病毒侵染宿主细胞、抑制病毒增殖以及诱导植物产生抗病性等。研究发现当曲霉属真菌的代谢产物 malformin A₁ 浓度为 150 μmol/L 时，几乎可以完全抑制烟草花叶病毒 (tobacco mosaic virus) 外壳蛋白在寄主植物体内表达^[10]。石斛 (*Dendrobium nobile*) 多糖 DNPE6 也对黄瓜花叶病毒 (cucumber mosaic virus) 衣壳蛋白 (capsid protein) 表达有较强的抑制作用^[11]。芦竹碱 (gramine) 及其衍生物也可以通过交联烟草花叶病毒衣壳蛋白来抑制病毒的组装^[12]。在感染番茄黄化曲叶病毒 (tomato yellow leaf curl virus) 之后番茄植株可能通过调节水杨酸 (salicylic acid) 的生物合成来抵御病原体的攻击，水杨酸可以使作物产生超敏反应 (hypersensitive responses) 来抑制病毒的侵染^[13]。灵菌红素 (prodigiosin) 是黏质沙雷氏菌 (*Serratia marcescens*) 的次生代谢产物，能将烟草花叶病毒杆状病毒粒体断裂成排列紊乱的短杆状使其失去侵染能力，灵菌红素也可显著提高寄主体内抗性基因表达，诱导寄主产生系统抗性，从而抑制寄主体内烟草花叶病毒的复制增殖^[14]。从吴茱萸 (*Evodia rutaecarpa*) 中提取的吴茱萸次碱 (rutaecarpine) 能干扰烟草花叶病毒蛋白的表达和组装，影响植物病毒的增殖和传播^[15]。

1.3 天然产物抗细菌机理研究

天然产物抑制细菌的机理主要通过破坏或抑制细菌的细胞壁、细胞膜的生长，提高作物抗性，创造不利于细菌的生活环境来降低细菌对作物的危害。

抗菌肽 (antimicrobial peptide) 能提高丁香假单胞杆菌猕猴桃致病变种 (*Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*) 的膜渗透速度，破坏细菌的细胞膜，最终杀死细菌^[16]。小檗碱 (berberine) 影响水稻细菌性条斑病菌 (*Xanthomonas oryzae* pv. *oryzicola*) 分泌系统的功能和胞外多糖的合成，影响病菌的细胞膜结构和能量代谢，降低病菌的致病力^[17]。荧光假单胞菌 (*P. fluorescens*) 可以产生抗生素以保护植物免受细菌疾病侵害。其次生产物噬铁素 (siderophore) 与土壤中的铁离子竞争促进作物对铁离子的吸收，诱导作物产生抗性，降低病原菌对作物的危害^[18]。此外，荧光假单胞菌可通过减少有机酸和氮的积累缓解土壤酸性，创造具有不利于嗜酸性青枯雷尔氏菌 (*Ralstonia solanacearum*) 生存的环境，降低青枯病对作物的危害^[19]。

1.4 天然产物抗线虫机理研究

天然产物主要通过破坏线虫肠道、虫体结构，抑制卵孵化，作用于线虫的神经系统使线虫兴奋过度，阻碍线虫糖代谢，中断能量供给等方式降低线虫对作物的侵染数量。高浓度正辛酸 (octanoic acid) 处理线虫后，线虫虫体结构被破坏，线虫内含物流失，体内的糖

类和蛋白质等成分含量显著降低^[20]。白花曼陀罗 (*Datura metel*) 叶提取物直接作用于南方根结线虫 (*Meloidogyne incognita*) 的神经系统, 降低线虫体内的乙酰胆碱酯酶 (acetylcholinesterase) 活性, 乙酰胆碱含量显著上升, 最终线虫因过度兴奋而死亡^[21]。无茎刺苞木 (*Carlina acaulis*) 的主要活性成分是 carlina oxide, 它在导致线虫二龄幼虫麻痹和在宿主根生育周期停滞中发挥重要作用, 对南方根结线虫表现出很高的杀线虫活性。而且 carlina oxide 在小于 400 nm 的紫外线辐射下能进行光活化, 通过光毒性机制提高杀线虫效果^[22]。2-萘酚 (2-naphthol) 是从喜光花 (*Actephila merrilliana*) 中提取出的天然产物, 可以抑制南方根结线虫卵的孵化, 显著降低线虫对作物的侵染数量, 刺激线虫产生过量的活性氧, 杀线虫活性显著^[23]。天然产物对不同病害的作用机理见表 1。

表 1 天然产物对不同病害的作用机理

Table 1 Mechanism of action of natural products on various pathogens

来源 Source	主要活性成分 Main active ingredient	作用机理 Mechanism of action	病害种 类 Types of disease	参考文献 Ref.
大蒜 <i>Allium sativum</i>	大蒜素 Allicin	破坏菌丝和分生孢子, 使其变形	真菌	24
细辛 <i>Asarum heterotropoides</i>	甲基丁香酚 Methyl eugenol、 黄樟醚 Safrol、 细辛醚 Asarone	细胞膜和细胞壁结构和 功能受损	真菌	25
茶 <i>Camellia sinensis</i>	茶多酚 Tea polyphenols	抑制夏孢子萌发, 并引 起芽管异常生长	真菌	26
肉桂 <i>Cinnamomum cassia</i>	肉桂醛 Cinnamaldehyde	影响葡聚糖和几丁质的 合成, 使细胞壁受损	真菌	7
蛇床 <i>Cnidium monnieri</i>	蛇床子素 Osthol	破坏细胞壁的完整性和 动态平衡	真菌	27-29
血红白叶藤 <i>Cryptolepis sanguinolenta</i>	新白叶藤碱 Neocryptolepine	影响菌丝的能量代谢	真菌	6
莪术 <i>Curcuma aeruginosa</i>	莪术醇 Curcumol、 β -榄香烯 β -Elemene、 莪术二酮 Curdione、 莪术烯醇 Curcumenol	破坏菌丝细胞壁, 细胞 器降解	真菌	9
香茅 <i>Cymbopogon citratus</i>	香茅醛 Citronellal	细胞膜通透性增加, 抑 制能量代谢	真菌	30
丁香 <i>Eugenia caryophyllata</i>	丁香酚 Eugenol	破坏细胞完整性	真菌	8

厚朴 <i>Houpoa officinalis</i>	和厚朴酚 Honokiol	破坏细胞膜的完整性, 细胞膜通透性增加	真菌	31
川芎 <i>Ligusticum sinense</i>	丁烯基苯酞 Butylidenephthalide	抑制糖和脂质的合成, 破坏菌丝线粒体结构	真菌	32
大黄 <i>Rheum palmatum</i>	大黄素甲醚 Physcion	诱导植物提高抗性	真菌	33
黄芩 <i>Scutellaria baicalensis</i>	黄芩苷 Baicalin	干扰病原菌分生孢附着 孢的正常形成	真菌	34
马铃薯 <i>Solanum tuberosum</i>	马铃薯糖苷生物碱 Potato glycoalkaloids	抑制菌丝呼吸速率和能 量代谢	真菌	35
苦参 <i>Sophora flavescens</i>	苦参碱 Matrine	细胞膜通透性增加	真菌	36
纳塔尔链霉菌 <i>Streptomyces barkulensis</i>	那他霉素 Natamycin	破坏细胞形态, 抑制细 胞膜和菌核形成, 产生 过多 ROS 损伤菌丝	真菌	37
球果伞属蘑菇 <i>Strobilurus mushrooms</i>	嗜球果伞素 Strobilurin	抑制线粒体电子传递链 复合物 III 的 Qo 位点, 最终抑制 ATP 合成。	真菌	38
醉蝶花 <i>Tarenaya hassleriana</i>	芳樟醇 Linalool、 牡丹酚 Paeonol、 茶香螺烷 Teaspirane 4-羟基苯甲醛	破坏菌丝细胞壁, 细胞 膜受损	真菌	39
生姜 <i>Zingiber officinale</i>	4-Hydroxybenzaldehyde、 槲皮素 Quercetin、 6-姜酚 6-Gingerol	细胞膜通透性增加, 原 生质外渗, 影响能量代 谢	真菌	40
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	臭椿苦酮 Ailanthone	抑制病毒外壳蛋白	病毒	41
鸦胆子 <i>Brucea javanica</i>	鸦胆子素 D Bruceine D	抑制病毒的复制和侵染	病毒	42
白屈菜 <i>Chelidonium majus</i>	白屈菜碱 Chelidonium	诱导植物抗病活性	病毒、 细菌、 真菌	43
长梗喉毛花 <i>Comastoma pedunculatum</i>	当药黄素 Swertisin、 高杯喉毛花内酯 A Comtraide A	使病毒粒子断裂成碎片	病毒	44
石斛 <i>D. nobile</i>	多糖 Polysaccharide	抑制病毒衣壳蛋白的表 达	病毒	11
吴茱萸 <i>E. rutaecarpa</i>	吴茱萸次碱 Rutaecarpine	干扰病毒蛋白表达, 抑 制病毒增殖	病毒	15

核桃青皮 <i>Juglans regia green husk</i>	胡桃醌 Juglone、 胡桃素 Juglandin、 5-羟基-2-甲氧基-1.4-萘醌 5-Hydroxy-2-methoxy-1.4- naphthoquinone、 β -谷甾醇 β -Sitosterol	细胞膜通透性增加，核 酸和蛋白质降解。病毒 粒体发生断裂钝化、抑 制初侵染和病毒复制增 殖	病毒、 真菌、 细菌	45
胡椒 <i>Piper nigrum</i>	胡椒碱 Piperine	细胞膜通透性增加， 抑制可溶性蛋白合成	病毒、 真菌	46
紫色紫孢菌 <i>Purpureocillium lavendulum</i>	不饱和脂肪酸类 Unsaturated fatty acids、 甘油酯类化合物 Triglyceride compounds	分泌几丁质酶和丝氨酸 蛋白酶降解线虫表皮	病毒、 真菌、 细菌、 线虫	47
黏质沙雷氏菌 <i>S. marcescens</i>	灵菌红素 Prodigiosin	破坏病毒粒体结构，诱 导作物产生抗性	病毒、 细菌、 真菌	14
板蓝 <i>Strobilanthes cusia</i>	3-丙酮基-3-羟基吲哚 3-Acetyl-3-hydroxyindole	介导植物水杨酸途径的 防御反应激活植物抗 性，抵抗病原菌侵染， 抑制病毒复制	病毒、 真菌	48
肿柄菊 <i>Tithonia diversifolia</i>	圆叶肿柄菊素 A Tagitinin A	诱导茉莉酸通路抑制病 毒侵染	病毒	49
咖啡 <i>Coffea arabica</i>	绿原酸 Chlorogenic acid	抑制真菌孢子萌发和生 长，破坏真菌和细菌的 细胞膜	细菌、 真菌	50
黄连 <i>Coptis chinensis</i>	小檗碱 Berberine	抑制菌丝细胞膜形成和 能量代谢	细菌、 真菌	17
山葵 <i>Eutrema wasabi</i>	异硫氰酸烯丙酯 Allyl isothiocyanate	细胞膜通透性增加，诱 导植物抗性，抑制能量 代谢，诱导线虫细胞压 力进行毒杀	细菌、 真菌、 线虫	51
银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	银杏酚酸 Ginkgolic acid	细胞膜通透性增加，菌丝 内蛋白质外泄	细菌、 真菌	52
留兰香 <i>Mentha spicata</i>	L-香芹酮 L-Carvone、 D-柠檬烯 D-Limonene	细胞膜通透性增加，原 生质外渗，菌丝变形， 线粒体受损	细菌、 真菌	53
牛至 <i>Origanum vulgare</i>	香芹酚 Carvone、 百里香酚 Thymol	破坏细胞膜的完整性、 抑制细菌内毒素的分泌	细菌、 真菌、 线虫	22,30,54

紫苏 <i>Perilla frutescens</i>	紫苏醛 Perillaldehyde、柠檬醛 Citral、 迷迭香酸 Rosmarinic acid	细胞膜通透性增加，细 胞结构被破坏	细菌、 真菌	55
补骨脂种子 <i>Psoralea corylifolia</i>	补骨脂种子提取物 Psoralea seed extract	抑制菌丝生长和孢子萌 发	细菌、 真菌	56
喜光花 <i>Actephila merrilliana</i>	2-萘酚 2-Naphthol	抑制线虫卵孵化	线虫	23
高地芽孢杆菌 <i>Bacillus altitudinis</i>	正辛酸 Octanoic acid	破坏线虫体壁，抑制运 动和神经系统	线虫	20
苏云金芽孢杆菌 <i>B. thuringiensis</i>	δ -内毒素 Cry14A δ -Endotoxin Cry14A	破坏线虫肠道	线虫	57
刺山柑 <i>Capparis spinosa</i>	异硫氰酸甲酯 Methyl isothiocyanate、 糠醛 Furfural、 2-噻吩甲醛 2-Thiophenaldhyde	角质层和内部损伤，内 部流体线虫物质的泄漏	线虫	58
无茎刺苞木 <i>Carlina acaulis</i>	Carlina oxide	麻痹二龄幼虫，促进宿 主根生物周期停滞，对 线虫产生光毒性	线虫	22
美国薄荷 <i>Monarda didyma</i>	香芹酚、百里香酚、 γ -萜品烯 γ -Terpene	抑制线虫卵的孵化	线虫	59
阿维链霉菌 <i>S. avermitilis</i>	阿维菌素 Abamectin	导致神经元细胞超极 化，使神经肌肉系统瘫 痪并死亡	线虫	60
万寿菊 <i>Tagetes erecta</i>	α -三联噻吩 α -Terthienyl	影响线虫体内谷胱甘肽 转硫酶和过氧化氢酶活 性，抑制线虫新陈代谢	线虫	61

2 天然产物在防治植物病害中的应用

2.1 天然产物在防治真菌病害中的应用

真菌病害是植物病害中最大的一类，约占植物病害的 70%~80%，严重危害作物的生长发育，影响全球农业经济发展。常见的真菌病害有白粉病 (*Erysiphe necator*)、晚疫病 (*P. infestans*)、赤霉病 (*F. graminearum*) 等。许多病菌可形成特殊的组织或孢子越冬，直接侵入寄主表皮，有时会与其他病原物进行复合侵染，使作物病症加重^[62]。

2003 年蛇床子素 (osthol) 首次获得国家专利，农药于同年上市，以该化合物为主要成分的农药是中国首创，主要应用于医药和农药生产方面^[27]。研究发现将白粉病菌 (*Sphaerotheca fuliginea*) 在 50 $\mu\text{g/mL}$ 蛇床子素中培养 48 h，能显著抑制孢子萌发和菌丝生长^[28]，还有研究表明 5 mg/mL 蛇床子素培养番茄灰霉病 2 d 后抑菌率达到 93.15%^[29]。苦参碱 (matrine) 是从苦参、山豆根、苦豆子中提取的四环喹啉啶类化合物，同样用于医药

和农药生产领域，目前已经在蔬菜、茶叶、果树及烟草等多种作物上登记和使用。在 22 mg/mL 时，苦参碱对茶树 5 种炭疽菌的抑菌率均达 95% 以上^[36]。另外，25 μg/mL 苦参碱·蛇床子素在喷施第 10、20、30 d 对高粱紫斑病的田间防治效果均在 50% 以上，且同样处理时间下均高于 83.33 μg/mL 代森锌处理对高粱紫斑病的防治效果^[63]。大蒜素 (allicin) 是大蒜 (*Allium sativum*) 中最重要的活性物质，主要应用于医药、畜牧、农业等领域^[24]，目前登记的大蒜素制剂有 5% 微乳剂和 50% 原药。在给番茄接种叶霉菌后 7 d 分别喷施不同浓度的大蒜素、多菌灵可湿性粉剂和 70% 甲基托布津可湿性粉剂，结果显示，大蒜素对番茄叶霉病的防治效果与多菌灵和甲基托布津相当^[64]。由中国农业科学院植物保护研究所研制的武夷菌素 (wuyiencin) 对黄瓜白粉病有较好的防治效果，将药剂间隔 7 d 对黄瓜进行两次喷施，在第二次施药后 10 d，剂量为 100 g/hm² 的 2% 武夷菌素水剂比剂量为 120 g/hm² 的 50% 醚菌酯水分散粒剂的防治效果高，达到 84.81%。该药剂现已被广泛用于蔬菜、果树、粮食和经济作物的真菌病害防治^[65]。上述天然产物都已制成商品制剂并进行小规模或规模化生产，这些天然产物农药杀菌效果比化学农药好或效果相当，因此使用天然产物农药可以降低化学农药的使用频率，减少了化学农药过量使用造成的环境污染。

2.2 天然产物在防治病毒病害中的应用

植物病毒病素有“植物癌症”之称。全世界危害最严重的植物病毒包括烟草花叶病毒、番茄斑萎病毒 (tomato spotted wilt virus)、番茄黄化曲叶病毒和马铃薯 Y 病毒 (potato virus Y) 等。参照国际病毒分类委员会 2019 病毒分类系统，植物病毒共有 1 608 种，亚病毒感染因子有 33 种类病毒，6 种卫星病毒，142 种卫星核酸。每年造成高达 600 亿美元的损失^[66,67]。病毒可通过昆虫、螨类、土壤真菌、线虫等介体传播，也可依靠花粉、种子等非介体传播。由于病毒种类繁多，传播途径广泛，又是胞内寄生，因此植物病毒病的防治非常困难^[67]。

由中国科学院成都生物研究所研发的宁南霉素 (ningnanmycin) 是由微生物发酵生产的胞嘧啶核苷肽型抗生素，广泛用于烟草、蔬菜、瓜果以及热带经济作物病毒病、真菌病害防治^[68]。目前登记的宁南霉素剂量为 2%、4%、8%，剂型为可溶液剂、可溶粉剂、水剂和 40% 原药。将剂量为 3.0、4.0 mL/hm² 的 8% 宁南霉素水剂和 13.3 mL/hm² 的 20% 吗胍·乙酸铜可湿性粉剂分别喷施于缓苗期和团棵期的烟草上，共喷施两次，末次施药 7 d 后进行防治效果调查，结果表明两个浓度的 8% 宁南霉素水剂的防治效果均大于 20% 吗胍·乙酸铜可湿性粉剂的防治效果，其中 4.0 mL/hm² 的 8% 宁南霉素水剂对烟草病毒病的防治效果最高，为 95.31%^[69]。氨基寡糖素 (amino-oligosaccharide) 是从虾蟹壳等物质中提取出来经加

工得到的多糖类天然化合物^[70]，目前市场上氨基寡糖素剂量多为 0.5%、2%、3%、5%，剂型多为水剂、可溶液剂、颗粒剂和 85%原药。多用于防治蔬菜、水果、粮食等作物的病毒、真菌、细菌和线虫病害。使用剂量为 70、140、280 ga.i./hm² 的 5%氨基寡糖素水剂，2 000、4 000、8 000 ga.i./hm² 的 60%光合细菌粉剂，32、64、128 ga.i./hm² 的 6%寡糖·链蛋白可湿性粉剂和 8.83、17.66、35.32 ga.i./hm² 的 0.5%香菇多糖水剂分别处理被马铃薯 Y 病毒侵染的马铃薯，在马铃薯叶片分化 7~8 片时喷施，共施 3 次，在末次施药后 7、14、21 d 调查防治效果。结果表明，140 ga.i./hm² 的 5%氨基寡糖素水剂平均防治效果最好，为 78.7%，且该浓度对马铃薯的增产效果最高，达到 30.4%^[71]。

2.3 天然产物在防治细菌病害中的应用

几乎每种作物都会发生植物细菌病害，甚至一种植物可发生多种细菌病害。虽然植物细菌性病害在整个植物病害种类中所占的比重不大，但它发病迅速，防治十分困难，通常造成作物严重减产。而且一旦感病，种植区便可能成为终生疫区，危害极其严重^[72]。

春雷霉素 (kasugamycin) 是一种从土壤中分离的放线菌产生的氨基糖苷类抗菌素，自上市以来就广泛应用于蔬菜、水果等作物的农业生产中^[73]。已登记的春雷霉素剂量为 0.01%、0.1%、2%、4%、6%，剂型为水剂、可湿性粉剂、可溶液剂、水分散粒剂、颗粒剂、可溶粉剂，65%和 70%的原药。研究发现，2%春雷霉素可溶液剂对黄瓜细菌性角斑病菌 (*P. syringae* pv. *lachrymans*) 的 EC₅₀ 为 8.39 mg/L，低于 20%噻唑锌悬浮剂、20%噻菌铜悬浮剂、3%噻霉酮水分散粒剂、46%氢氧化铜水分散粒剂和 40%春雷·噻唑锌悬浮剂，说明在这些药剂中 2%春雷霉素可溶液剂对黄瓜细菌性角斑病的抑制效果最好^[74]。中生菌素 (zhongshengmycin) 是由中国农科院生防所研发的一种生物农药品种，填补了国内生物农药防治细菌性病害的空白^[75]。已登记的剂量分别为 0.1%、0.5%、3%、5%、6%，剂型为水剂、可湿性粉剂、可溶液剂、颗粒剂和 12%原药。研究表明，38%中生菌素原药对柑橘溃疡病菌 (*X. axonopodis* pv. *citri*) 的 EC₅₀ 为 41.317 9 μg/mL，明显低于春雷霉素的 EC₅₀ 63.944 μg/mL，当两种药剂以中生菌素：春雷霉素 = 2:5 复配时，共毒系数最大，为 126.99，说明两种药剂复配具有增效作用^[76]。用 1 000、1 200、1 400 倍液的 3%中生菌素可湿性粉剂、0.15%四霉素水剂 500 倍液、72%农用链霉素可溶性粉剂 1 500 倍液对烟草青枯病菌进行防治，第一次施药在烟草定植时用药液灌根，移栽后 20、60 d 用药液喷淋茎基部，末次施药后每 5 d 调查一次，结果表明 1 000~1 200 倍液的 3%的中生菌素可湿性粉剂平均防治效果在 70%以上，明显高于其他浓度和药剂处理的防治效果^[77]。

2.4 天然产物在防治线虫病害中的应用

植物寄生线虫是重要的致病线虫，是最难防治的土传病害之一，线虫入侵植物后吸取营养造成植物机械损伤，使植物的防御系统受到破坏，更易受到土壤中其他病原体的攻击，其自身分泌的致病因子也会诱发植物的各种病理变化。而且，线虫因具有难以用肉眼直接观察，病害特征容易与作物营养不良和其他病害特征混淆等特点，导致精准防控农作物线虫病害成为农业生产上的巨大挑战^[78]。

厚孢轮枝菌 (*Verticillium chlamydosporium*) 微粒剂是国内第一个登记的线虫生物防治产品。登记的剂量为 2.5×10^9 个孢子/g，剂型为微粒剂、颗粒剂和 2.5×10^9 个孢子/g 原药。研究表明将剂量为 100 mL/667 m² 的 41.7% 氟吡菌酰胺悬浮剂、2 000 g/667 m² 的 10% 噻唑膦颗粒剂和 3 000 g/667 m² 的 2.5×10^9 个孢子/g 厚孢轮枝菌微粒剂在黄瓜定植时施下，最多施两次，结果表明厚孢轮枝菌微粒剂对黄瓜根结线虫的防治效果最好，达 88.1%，并使黄瓜增产 13.7%^[79]。阿维菌素 (abamectin) 是从土壤阿维链霉菌 (*Streptomyces avermitilis*) 发酵产物中分离得到的天然活性化合物，有高效杀虫、杀螨和杀线虫活性，多应用于农业和畜牧业。该药剂登记的种类较多，剂量主要有 0.5%、1.8%、2%、3%、5% 等，剂型主要有乳油、微乳剂、水乳剂、悬浮剂、颗粒剂、可湿性粉剂、83.5% 和 95% 原药等。研究发现，将剂量为 3 000、4 000、5 000 g/667 m² 的 0.5% 阿维菌素颗粒剂，2 500 g/667 m² 的 1% 阿维菌素颗粒剂和 1 500 g/667 m² 的 10% 噻唑膦颗粒剂在山药种植时分别拌少量细沙土均匀沟施，结果表明，2 500 g/667 m² 的 1% 阿维菌素颗粒剂和 5 000 g/667 m² 的 0.5% 阿维菌素颗粒剂处理的防治效果与 1 500 g/667 m² 的 10% 噻唑膦颗粒剂处理的防治效果相当^[60]。

3 总结与展望

本文总结了天然产物作用机理和应用的研究进展。天然产物主要从植物的根、茎、叶、花、果实和微生物的次生代谢产物中分离。目前已发现有抑制作物病害活性的植物有菊科、桃金娘科、豆科、唇形科、姜科和伞形科等，活性成分主要有酚类、醛类、有机酸、生物碱、挥发油、黄酮类、萜类、醌类等。比如，肉桂醛、蛇床子素、香茅醛和丁香酚均能破坏菌丝的结构，抑制菌丝生长，香茅醛、槲皮素、丁烯基苯酞和新白叶藤碱通过抑制菌丝的能量代谢降低病原菌对作物的侵染。臭椿苦酮和吴茱萸次碱能干扰病毒蛋白表达，白屈菜碱能诱导植物对病毒产生抗性。2-萘酚、香芹酚和百里香酚能抑制线虫卵的孵化，正辛酸和阿维菌素能抑制线虫的神经系统，影响线虫活动降低线虫侵染数量等。天然产物如丁香酚、香芹酚和百里香酚广泛存在于多种植物中，既能直接开发利用，也能作为先导化合物通过化学合成进行结构优化来开发更高活性的化合物，是创制新农药的途径之一。但是，天然产物农药的研发和应用仍存在一些问题。天然产物制作成本高于化学农药，而且一些

天然成分在植物材料中含量较低,提取和纯化的成本较高,高效、环保、低成本的提取和纯化技术研究亟待加强,同时天然产物储存的稳定性问题也要重点关注^[80]。

参考文献

- 1 Chakraborty S,et al.Climate change,plant diseases and food security:an overview[J].Plant Pathol,2011,60:2-14.
- 2 Wang JX,et al.Status quo of pesticide use in China and its outlook[J].Agric Outlook(农业展望),2017,13:56-60.
- 3 Chen XM,et al.Current situation of Chinese pesticide application and policy suggestions[J].Pestic Sci Admin(农药科学与管理),2016,3:4-8.
- 4 Yuan R.Discussion on the application strategies of microbial pesticides in plant pest control[J].Agric Technol(农业与技术),2017,3:17.
- 5 Chen JX,et al.Natural nematicidal active compounds:recent research progress and outlook[J].J Integr Agric,2021,20:2015-2031.
- 6 Shang XF.Bioactivities and modes of action of four kinds of natural products[D].Lanzhou:Lanzhou University(兰州大学),2019.
- 7 Wang K,et al.Studies of inhibitory effect of *trans*-cinnamaldehyde on cell wall synthesis in yeast[J].Food Ferment Ind(食品与发酵工业),2012,38:68-72.
- 8 Zhang J.Studies on bioactivity of eugenol,a natural compound against *Botrytis cinerea*[D].Nanjing:Nanjing Normal University(南京师范大学),2008.
- 9 Wang B,et al.Antifungal activity of zedoary turmeric oil against *Phytophthora capsici* through damaging cell membrane[J].Pestic Biochem Physiol,2019,159:59-67.
- 10 Song XL.Anti-tobacco mosaic virus effect and action mechanism of malformin A₁[D].Fuzhou:Fujian Agriculture and Forestry University(福建农林大学),2019.
- 11 Li ZR,et al.Naturally potential antiviral agent polysaccharide from *Dendrobium nobile* Lindl[J].Pestic Biochem and Physiol,2020,167:104598.
- 12 Lu AD,et al.Natural products for drug discovery:discovery of gramines as novel agents against a plant virus[J].J Agric Food Chem,2019,67:2148-2156.
- 13 Ghosh D,et al.Molecular interplay between phytohormones and geminiviruses:a saga of a never-ending arms race[J].J Exp Bot,2021,72:2903-2917.
- 14 Bi JH,et al.Secondary metabolites produced by *Serratia marcescens* as an inhibitor against TMV[J].Sci Agric

- Sin(中国农业科学),2014,47:912-922.
- 15 Li ZX,et al.Identification of natural rutaecarpine as a potent tobacco mosaic virus (TMV) helicase candidate for managing intractable plant viral diseases[J].Pest Manag Sci,2023,80:805-819.
 - 16 Mariz-ponte N,et al.A synergic potential of antimicrobial peptides against *Pseudomonas syringae* pv.*actinidiae*[J].Molecules,2021,26:1461.
 - 17 Yang P,et al.Physiological and transcriptional response of *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* to berberine,an emerging chemical control[J].Phytopathology,2020,110:1027-1038.
 - 18 Wang XY,et al.Preliminary study on the control mechanism of *Pseudomonas fluorescens* 2P24 on bacterial fruit blotch[J].Chin J Biol Control(中国生物防治学报),2023,39:575-584.
 - 19 Shi HL,et al.Effects of *Pseudomonas fluorescens* on alleviating soil acidification and controlling tobacco bacterial wilt[J].Tobacco Sci Technol(烟草科技),2023,56:19-25.
 - 20 Wang JY.Screening and nematocidal mechanism of *Bacillus altitudinis* AMCC1040 against root-knot nematode[D].Taian:Shandong Agricultural University(山东农业大学),2021.
 - 21 Lu XH,et al.Nematicidal activities and mechanisms of total alkaloids extracts from leaf of *Datura metel* Linn[J].Chin Agric Sci Bull(中国农学通报),2006,22:331-334.
 - 22 Ntalli N,et al.*Carlina acaulis* essential oil nanoemulsion for managing *Meloidogyne incognita*[J].Ind Crops Prod,2023,193:116180.
 - 23 Zhang X,et al.Discovery of 2-naphthol from the leaves of *Actephila merrilliana* as a natural nematicide candidate[J].J Agric Food Chem,2023,71:13209-13219.
 - 24 Perello A,et al.In vitro efficacy of garlic extract to control fungal pathogens of wheat[J].J Med Plants Res,2013,7:1809-1817.
 - 25 Li SH,et al.Inhibition mechanism of antifungal compounds from *Asarum himalaicum* against *Alternaria solani*[J].J Inner Mongolia Agric Univ:Nat Sci(内蒙古农业大学学报:自科版),2015,36:17-21.
 - 26 Yang YH,et al.Tea polyphenol is a potential antifungal agent for the control of obligate biotrophic fungus in plants[J].J Phytopathol,2017,165:547-553.
 - 27 Zhang W,et al.Control effect of 1% osthole EW on powdery mildew in cucumbers[J].Sichuan Agric Sci Technol(四川农业科技),2017,7:34-35.
 - 28 Sun GZ,et al.Field trials of the plant-derived pesticide osthole for controlling powdery mildew on wheat[J].Hubei Plant Prot(湖北植保),2016,3:6-7.
 - 29 Liu JC,et al.Inhibitory effect of osthole from Chinese traditional drug *Cnidium monnieri* on the *Botrytis*

- cinerea* in greenhouse tomato[J/OL].Mol Plant Breed(分子植物育种):1-10[2024-09-19].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230613.1601.016.html>.
- 30 He LL.Material basis and mechanism of the combination of *Origanum vulgare* and *Cymbopogon citrates* essential oils in inhibiting phytopathogenic fungi[D].Kunming:Yunnan Agricultural University(云南农业大学),2023.
- 31 Chen TT.Mechanism of bacterial inhibition of *Botryosphaeria dothidea* by honokiol[D].Guiyang:Guizhou University(贵州大学),2023.
- 32 Cui KD,et al.Antifungal activity of *Ligusticum chuanxiong* essential oil and its active composition butylidenephthalide against *Sclerotium rolfsii*[J].Pest Manag Sci,2023,79:5374-5386.
- 33 Wang N.Biological activity and action mechanism of physcion against *Magnaporthe oryzae*[D].Beijing:China Agricultural University(中国农业大学),2020.
- 34 Liang ML,et al.Baicalin affects the cell development of *Magnaporthe oryzae* and its control efficacy on rice blast[J].J Plant Prot(植物保护学报),2023,50:1176-1183.
- 35 Ding DD.Mechanism of potato glycoside alkaloids inhibiting wolfberry root rot fungi through the mitochondrial respiratory chain pathway[D].Lanzhou:Gansu Agricultural University(甘肃农业大学),2023.
- 36 Cheng QH,et al.Studies on the antifungal effect of matrine on colletotrichum species on tea plant[J].Acta Horti Sin(园艺学报),2023,50:432-440.
- 37 Cao YX,et al.Efficacy and toxic action of the natural product natamycin against *Sclerotinia sclerotiorum*[J].Pest Manag Sci,2023,80:1981-1990.
- 38 Zhang P,et al.Recent advances in the natural products-based lead discovery for new agrochemicals[J].Adv Agrochem,2023,2:324-339.
- 39 Cheng XN.Study on inhibitory activity and mechanism of *Cleome spinosa* on *Botrytis cinerea* in strawberry[D].Harbin:Northeast Agricultural University(东北农业大学),2023.
- 40 Xi KY,et al.Antifungal activity of ginger rhizome extract against *Fusarium solani*[J].Horticulturae,2022,8:983-983.
- 41 Zhu JX.Study on the inhibitory effect of aianthone on rice stripe virus[D].Fuzhou:Fujian Agriculture and Forestry University(福建农林大学),2022.
- 42 Xiao QZ,et al.Study progress in biological prevention of plant virus[J].South China Agric(南方农业),2021,15:64-69.
- 43 Guo WH.Study on the effect of induced plant resistance and related mechanism of natural product

- chelidonine[D].Xiayang:Northwest A&F University(西北农林科技大学),2022.
- 44 Cheng L,et al.Effects of three compounds from *Comastoma pedunculatum* on the resistance to TMV and activities of four defense enzymes in tobacco[J].J South Agric(南方农业学报),2023,54:3591-3598.
- 45 Liu J,et al.Research progress of walnut green husk as a botanical pesticide[J].J Agric Disasters(农业灾害研究),2018,8:12-14.
- 46 Bao H,et al.Inhibitory effect of piperine on *Botrytis cinerea* and its mechanism[J].J China Agric Univ(中国农业大学学报),2022,27:117-124.
- 47 Bao ZX.Secondary metabolites of two strains of *Purpureocillium lavendulum* and their nematocidal activities[D].Kunming:Yunnan Agricultural University(云南农业大学),2022.
- 48 Zhang LZ,et al.Elimination of potato virus S and potato virus Y by plant resistance inducer AHO combined with shoot tip culture[J].Plant Prot(植物保护),2022,48:239-245.
- 49 Cui Y.Effect of Tagitinin A on TSWV genes replication and its field application experiment[D].Kunming:Yunnan Agricultural University(云南农业大学),2023.
- 50 Zhang DF,et al.Effect of chlorogenic acid on controlling kiwifruit postharvest decay caused by *Diaporthe* sp.[J].LWT-Food Sci Technol,2020,132:109805.
- 51 Li YB,et al.Research progresses on the anti-microbial activity and application of allyl isothiocyanate in agriculture[J].Plant Prot(植物保护),2018,44:108-119.
- 52 Shen FJ,et al.Inhibition of ginkgoic acid on fungi in *Ginkgo biloba* testa[J].J Dalian Univ Technol(大连工业大学学报),2020,39:241-244.
- 53 Chen LJ,et al.Fumigant antifungal activities of essential oils from *Mentha spicata*[J].Plant Prot(植物保护),2019,45:75-80.
- 54 Zhang JF.Studies on the antibacterial activity and mechanism of two plant essential oils against *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* associated with onion soft rot[D].Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University(兰州交通大学),2023.
- 55 Zhou D,et al.Study on the inhibitory effect of perilla extract on two plant pathogenic fungi[J].China J Plant Prot(中国植保导刊),2022,42:15-19.
- 56 An L,et al.Study on the bacteriostatic activity of psoralea seed extract against *Cytospora* sp.[J].South China Fruits(中国南方果树),2021,50:130-133.
- 57 Kahn TW,et al.A *Bacillus thuringiensis* Cry protein controls soybean cyst nematode in transgenic soybean plants[J].Nat Commun,2021,12:3380-3380.

- 58 Caboni P,et al.Nematicidal activity of 2-thiophenecarboxaldehyde and methylisothiocyanate from caper (*Capparis spinosa*)against *Meloidogyne incognita*[J].Agric Food Chem,2012,60:7345-7351.
- 59 Laquale S,et al.Nematotoxic activity of essential oils from monarda species[J].J Pest Sci,2018,91:1115-1125.
- 60 Zhang TQ,et al.Efficacy test of 0.5% avermectin granules for the control of root-knot nematodes of iron stick yam[J].Bull Agric Sci Technol(农业科技通讯),2020(8):186-188.
- 61 Gu JF,et al.Effects of plant extracts on bioactivity of kiwifruit root-knot nematodes[J].North Hortic(北方园艺),2021,9:18-24.
- 62 Gao F,et al.The battle and pathogenic intervention between plant and soilborne pathogens[J].Chin J Nat(自然杂志),2020,42:499-504.
- 63 Sun YB,et al.Evaluating the efficacy of osthole and matrine for control of sorghum purple spot[J].J Plant Dis Prot,2021,128:1-6.
- 64 Xue DQ,et al.Inhibition of allicin on different races of tomato leaf mold[J].J Henan Agric Sci(河南农业科学),2016,4:71-76.
- 65 Ma X.Field study on the control of cucumber powdery mildew with 2% wuyiomycin AS[J].Seed Sci Technol(种子科技),2017,35:140.
- 66 Ge BB,et al.The progress and prospects of biological pesticide-wuyiencin[J].Chin J Biol Control(中国生物防治学报),2021,37:655-659.
- 67 Hong J,et al.Plant viruses in the new 15-rank taxonomic system of ICTV[J].Acta Phytopathol Sin(植物病理学报),2020,51:143-162.
- 68 Liu CJ,et al.Advances on the antiphytoviral compounds from microorganisms[J].Biotic Res(生物资源),2019,41:381-389.
- 69 Zhang N,et al.Application of ningnanmycin in plant diseases[J].Sichuan Agric Sci Technol(四川农业科技),2023,5:47-50.
- 70 Song LF,et al.Field efficacy test of 2% amino-oligosaccharide water on tomato virus disease[J].Agric Technol Equip(农业技术与装备),2020,369:145-146.
- 71 Yang S,et al.Evaluation and analysis of control effect of four medicament in potato virus Y disease[J].Agrochemicals(农药),2022,61:136-139.
- 72 Chen MM,et al.Study on plant bacterial diseases and its prevention and control measures[J].J Zhejiang Agric Sci(浙江农业科学),2022,63:1798-1804.
- 73 Zhang HZ,et al.Uptake and transportation of kasugamycin in corn and tobacco[J].Agrochemicals(农

药),2021,60:797-804.

- 74 Xu PD,et al.In vitro activity and field control efficacy of six fungicides against cucumber bacterial angular leaf spot[J].World Pestic(世界农药),2021,43:48-52.
- 75 Liu QH.Analysis of the application status of zhongshengmycin invention patents in China[J].Technol Innov Appl(科技创新与应用),2024,14:98-101.
- 76 Li SS,et al.Study on the indoor activity of zhongshengmycin and its combinations against *Xanthomonas axonopodis* pv. *citri*[J].Sichuan Agric Sci Technol(四川农业科技),2023,4:63-66
- 77 Zhou KT,et al.Experiment on toxicity and field control effect of zhongshengmycin against tobacco bacterial wilt in Gui Zhou[J].Agric Sci Technol Equip(农业科技与装备),2017,11:14-16.
- 78 Sikandar A,et al.Review article:*Meloidogyne incognita*(root-knot nematode)a risk to agriculture[J].Appl Ecol Environ Res,2020,18:1679-1690.
- 79 Wang HS,et al.Control effect of a new microbial pesticide *Verticillium chlamydosporium* microparticle on root-knot nematodes in greenhouse cucumber[J].China Veg(中国蔬菜),2019,12:88-89.
- 80 Hezakiel HE,et al.Biopesticides:a green approach towards agricultural pests[J].Appl Biochem Biotechnol,2023,196:5533-5562.

收稿日期: 2024-04-01 接受日期:

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2600404, 2022YFC2602204); 国家自然科学基金(32172382);
湖南省烟草公司永州市公司科技项目(YZ2024KJ01)

*通信作者 Tel:13522412250; E-mail: wkhuang2002@163.com, 21360222@126.com