

主编按：生物化学农药作为连接传统化学农药与生物农药的关键领域，以其高选择性、低残留、环境友好的核心优势，成为全球绿色植保与农业可持续发展的核心支撑。本期荣幸地邀请了呼吁把生物化学农药归类为生物农药的建议者钱旭红院士及其团队系统梳理生物化学农药的定义范畴、发展现状、产业实践，以期为生物化学农药学科发展和推动我国农药工业绿色转型贡献力量。

◆ 院士专论：生物化学农药(特约稿) ◆

生物化学农药

余金生¹, 吴忠伟¹, 张颖², 苏衡³, 周剑¹, 钱旭红^{1,4*}

(1. 华东师范大学化学与分子工程学院, 上海 200062; 2. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241; 3. 常州胜杰生命科技股份有限公司, 江苏常州 213164; 4. 华东理工大学药学院, 上海 200237)

摘要：生物化学农药作为“源于自然、优于自然、归于自然”的绿色农药，自2019年被我国农业农村部纳入生物农药管理体系以来，凭借其靶标特异性强、生态安全性高、环境兼容性好及抗性风险低等显著优势备受关注，符合国家农业可持续发展战略需求并成为绿色农药创新研发的重要方向。本文系统梳理了国内外生物化学农药的定义范畴、发展现状和类别特征，简要介绍了各品种的有效成分结构及代表性应用，并分析了当前面临的问题及未来发展趋势，以期为推动我国生物化学农药的研发应用和产业升级提供有益参考和启发，助力绿色农业高质量发展。

关键词：生物化学农药；定义范畴；发展现状；分类体系；绿色农药

中图分类号：TQ 450 文献标志码：A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2026.01.001

Biochemical pesticides

YU Jinsheng¹, WU Zhongwei¹, ZHANG Ying², SU Heng³, ZHOU Jian¹, QIAN Xuhong^{1,4*}

(1. School of Chemistry and Molecular Engineering, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. Changzhou Shengjie Life Technology Co., Ltd., Jiangsu Changzhou 213164, China; 4. School of Pharmacy, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Biochemical pesticides, as a type of green pesticides that originate from nature, beyond nature, and return to nature, exhibit significant advantages such as target specificity, ecological safety, environmental compatibility and low resistance risk, which have gained increasing attention since they are included in the biopesticide management system by the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China in 2019. Biochemical pesticides have emerged as an important direction for the innovative development of green pesticides in China, which meets the strategic needs of the Chinese sustainable agricultural development. This review article systematically sorts out the definition, the development status and classification of biochemical pesticides in China and other countries, briefly introduces the chemical structure of the active ingredients and representative applications of products, and analyzes the current limitations and future development trend, with the aim of providing beneficial references for promoting the research and application of biochemical pesticides and industrial upgrading, and contributing to the high-quality development of green agriculture in China.

Key words: biochemical pesticide; definition; status; classification; green agriculture

收稿日期：2025-07-07

基金项目：2026年度兵团中央引导地方科技发展资金项目(2026YD009)；国家自然科学基金委员会与盖茨基金会国际合作与交流项目(82561128264, 2025MVIP0106)

作者简介：余金生(1988—)，男，江西九江人，博士，教授，主要从事生物化学农药创制研究。E-mail: jsyu@chem.ecnu.edu.cn

通信作者：钱旭红，中国工程院院士，教授。E-mail: xhqian@ecnu.edu.cn

农药作为保障粮食安全和公共卫生的重大战略物资,是人类社会可持续发展的重要基础。联合国粮农组织(FAO)的权威数据显示,科学合理使用农药能有效防治农作物病虫害,每年能为全球挽回30%~40%的粮食产量损失,对稳定农产品供给、维护全球粮食安全起到不可替代的战略保障作用。我国以仅占全球7%的耕地成功养活了18%的人口,这一举世瞩目的农业成就离不开农药的应用,充分彰显了农药在提升农业生产效率、保障国家粮食安全中的核心价值。除农业生产外,农药在非农领域同样发挥着举足轻重的作用:在公共卫生领域是防控疟疾、登革热等致命性媒介传染病的重要工具;在林业保护方面为防控林业有害生物提供了有效技术手段;在工业船运领域为防控有害生物和霉菌提供了有效工具;在城市环境治理中为维护人居环境健康发挥着不可或缺的作用。这些跨领域的应用充分体现了农药在促进经济和社会可持续发展、维护生态环境平衡、保障人民健康安全等方面的多维价值,其战略地位随着人口增长和老龄化加剧,以及气候变化等全球性挑战的加剧而日益凸显。

尽管农药在农业和非农领域发挥着举足轻重的作用,但长期过量使用化学农药带来的抗药性、非靶标毒性和环境污染等负面效应,给农业安全、人类安全和生态安全带来巨大挑战^[1]。在全球人口持续增长和农业生产需求不断提升的双重压力下,传统化学农药已难以满足现代农业“高产、优质、高效、生态和安全”的发展要求。因此,必须在充分发挥农药对粮食安全和公共卫生等保障作用的同时,推动农药的科学和精准化使用以及绿色化可持续发展。这就要求加强高效、低毒、低残留绿色农药(green pesticides)和生物农药的研发与应用,推广生物农药和绿色防控技术,以及优化农药使用管理,在提高施药效率的同时减少不必要的化学农药投入^[2-3]。无疑,绿色农药和生物农药的发展是实现农药减量增效、提质增产、发展绿色防控的关键,已成为我国现代农业可持续发展的共识和未来发展的趋势,进而确保农药在保障人类健康福祉的同时,与生态环境和谐共生。

作为绿色农药的核心组成部分,生物化学农药(biochemical pesticides)凭借其“源于自然、优于自然和归于自然”三重绿色特征脱颖而出,成为生物农药的三大分支之一^[4]。因具有特异性强、安全性高和环境友好等优点,其逐渐走进人们的视野并受到国内外研究人员日益关注,为农业生产的可持续发

展提供了新的思路和解决方案。本文通过对中国生物化学农药定义、分类和发展现状,存在的问题及其未来发展等进行专题论述,阐明其在推动我国现代农业绿色高质量发展中的战略价值与巨大潜力。

1 生物化学农药的定义

生物化学农药是一类通过调节或干扰病虫害生长和繁殖等非毒杀性作用机制,达到防治病虫害目的的绿色农药,其作用机理与传统化学农药存在本质区别。根据我国2017年公布的《农药登记资料要求》,生物化学农药需同时满足2个要求:1)其对防治对象没有直接毒性,而只有调节生长、干扰交配或引诱等特殊作用;2)其是天然化合物,若经人工合成,其结构应与天然化合物相同(允许异构体比例的差异)^[5]。而美国环保局(EPA)对生物化学农药的定义及标准则是:1)必须是天然存在物质,若非天然存在,则其结构必须与天然物质相似且功能相同;2)必须对靶标害虫具有非毒性作用模式;3)必须具有对人类和环境无毒害的历史^[4]。可见,我国对生物化学农药的管理更严格,尤其在人工合成成分的结构一致性方面。源于严格的认定标准,生物化学农药具有选择性强、安全高效、无(低)毒性、无(低)残留、环境友好及不易产生抗性等多种优点,使得其完美契合现代农业发展的健康、生态和可持续发展三重需求(图1)。

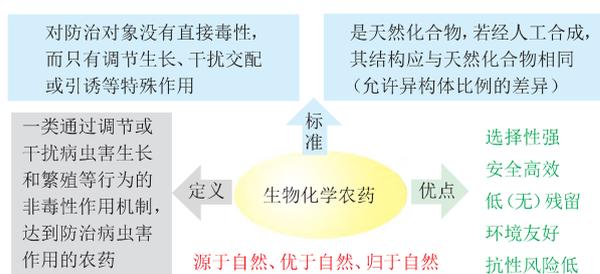


图1 生物化学农药的定义、判断标准及优点

2 生物化学农药的国内外发展现状

生物化学农药的发展呈现出显著的国内外差异。在欧美等发达国家,生物化学农药早在上世纪90年代前后已被列入生物农药范畴并得到快速发展与应用,形成了相对成熟的产业体系。相比之下,在我国的发展则严重滞后,直至2019年在钱旭红、吕龙等专家呼吁下,在农业农村部农药检定所积极推动下,生物化学农药才正式被明确归类为生物农药^[5-6];并由此确立了我国生物农药“三位一体”的分类体系:微生物农药、植物源农药和生物化学农药^[7-8]。

由于发展起步较晚,我国生物化学农药种类与发达国家差距甚大(图2)。据统计,截至2025年3月底,登记有效期内的148个生物农药有效成分(约占农药总量的20%)中,生物化学农药有效成分占比不到30%,仅43种^[9-11];而美国生物化学农药有效成分在生物农药中占比超50%,数量有200余种^[12-13]。尽管如此,近年来我国生物化学农药产品登记十分活跃,且呈逐年增长态势。截至2024年7月底,在2 020个登记有效期内的生物农药产品中,生物化学农药产品有1 086个,占据主导地位(占比约54%)。这些数据虽反映了我国生物农药领域的后发劣势,但更预示着巨大的发展潜力。随着全球绿色农业转型加速和国内“双碳”战略深入实施,我国生物化学农药迎来前所未有的发展机遇和广阔应用前景。

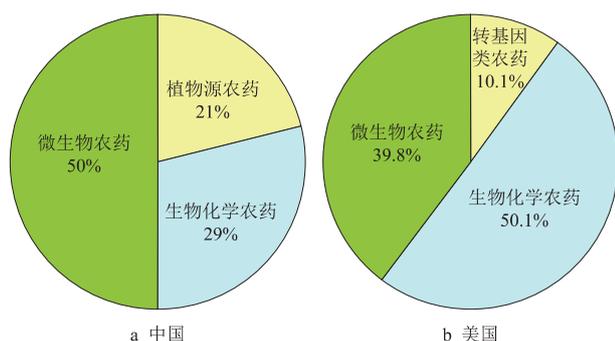


图2 中美两国生物化学农药有效成分在生物农药类别中的比较(截至2025年3月)

3 生物化学农药的分类、结构及活性

自2019年农业农村部正式将生物化学农药纳入生物农药管理体系以来,我国生物化学农药发展进入规范化发展新阶段,同时也成为生物农药发展方向之一。通过对既有农药品种的重新归类及新规下登记产品的梳理,我国现有生物化学农药有效成分43种,形成了较为完整的品类体系。按照作用机制和应用特点,这些有效成分可分为五大类别:化学信息物质、昆虫和植物生长调节剂、植物诱抗剂及其他生物化学农药(图3)^[6-7]。其中,植物生长调节剂登记数量最多,达22种,包括赤霉素、吡唑乙酰胺等广泛应用的产品;植物诱抗剂有10种,主要为蛋白质和糖类物质,如超敏蛋白、香菇多糖等;化学信息物质有9种,主要为各类昆虫性诱信息素,如草地贪夜蛾性诱剂、二化螟性诱剂等;昆虫生长调节剂仅有S-烯虫酯1个登记产品;此外还包括胆钙化醇、光敏性农药和RNAi农药等特殊作用机制的生物化学农药。下面根据类别分别进行简要介绍。



图3 生物化学农药的分类

3.1 化学信息物质^[14-15]

化学信息物质是一种由同种个体释放并引起其他个体特定行为的化学物质,通常具有物种特异性。我国目前归属于生物化学农药的化学信息物质有9种,分别是:诱虫烯、二化螟性诱剂、苹果蠹蛾性信息素、梨小性迷向素、绿盲蝽性信息素、斜纹夜蛾诱集性信息素、草地贪夜蛾性诱剂、葡萄花翅小卷蛾性信息素和玉米螟性诱剂。已登记的该类生物化学农药主要为性信息素,其通过模拟昆虫释放的性信息素,集中诱捕和干扰交配,从而实现目标害虫种群的精准防控。每种化学信息物质有效成分的化学结构见图4。

诱虫烯(muscalure)是1971年从雌性家蝇的表皮和粪便等类脂物中分离鉴定出的特异性信息素^[16-17]。其化学名称为顺-二十三碳-9-烯((9Z)-tricosene)。作为昆虫行为调控产品的代表,它具有灵敏度高、专一性强、对非靶标安全、抗性风险低、生态友好和经济性好等优势,已被广泛用于实蝇监测与防治。在我国登记为地中海家蝇类卫生害虫引诱剂后,于2019年根据新规重新纳入生物化学农药范畴^[18-19]。除家蝇外,该产品对蚊虫、蟑螂等也有一定引诱效果,还可与杀虫剂混用提高杀虫效率。

与卫生害虫防控领域应用相比,该类生物化学农药在农业领域应用更广。例如:二化螟性诱剂是一种用于监测和防治水稻常发性害虫二化螟的性信息素,由顺-9-十六碳烯醛、顺-11-十六碳烯醛和顺-13-十八碳烯醛按特定配比组成^[20]。该产品具有靶标特异性、无残留、对天敌昆虫和水生生物等非靶标安全、抗性风险低等优势,目前已在长江流域、华南等主要稻区规模化应用,成为我国水稻病虫害综合治理的关键技术手段之一。

苹果蠹蛾性信息素2020年获农业农村部正式登记,是用于防治苹果蠹蛾这一重大检疫性害虫的

首个性信息素类生物化学农药^[21-23]。其有效成分为(8*E*,10*E*)-十二碳二烯-1-醇,与苹果蠹蛾雌虫分泌的性信息素在化学结构和功能上相同。使用该产品不

仅具有靶标专一性、生态安全性和持效期长等优势,同时可大幅减少化学农药使用量,从而降低苹果蠹蛾的抗药性和果品农药残留^[24]。

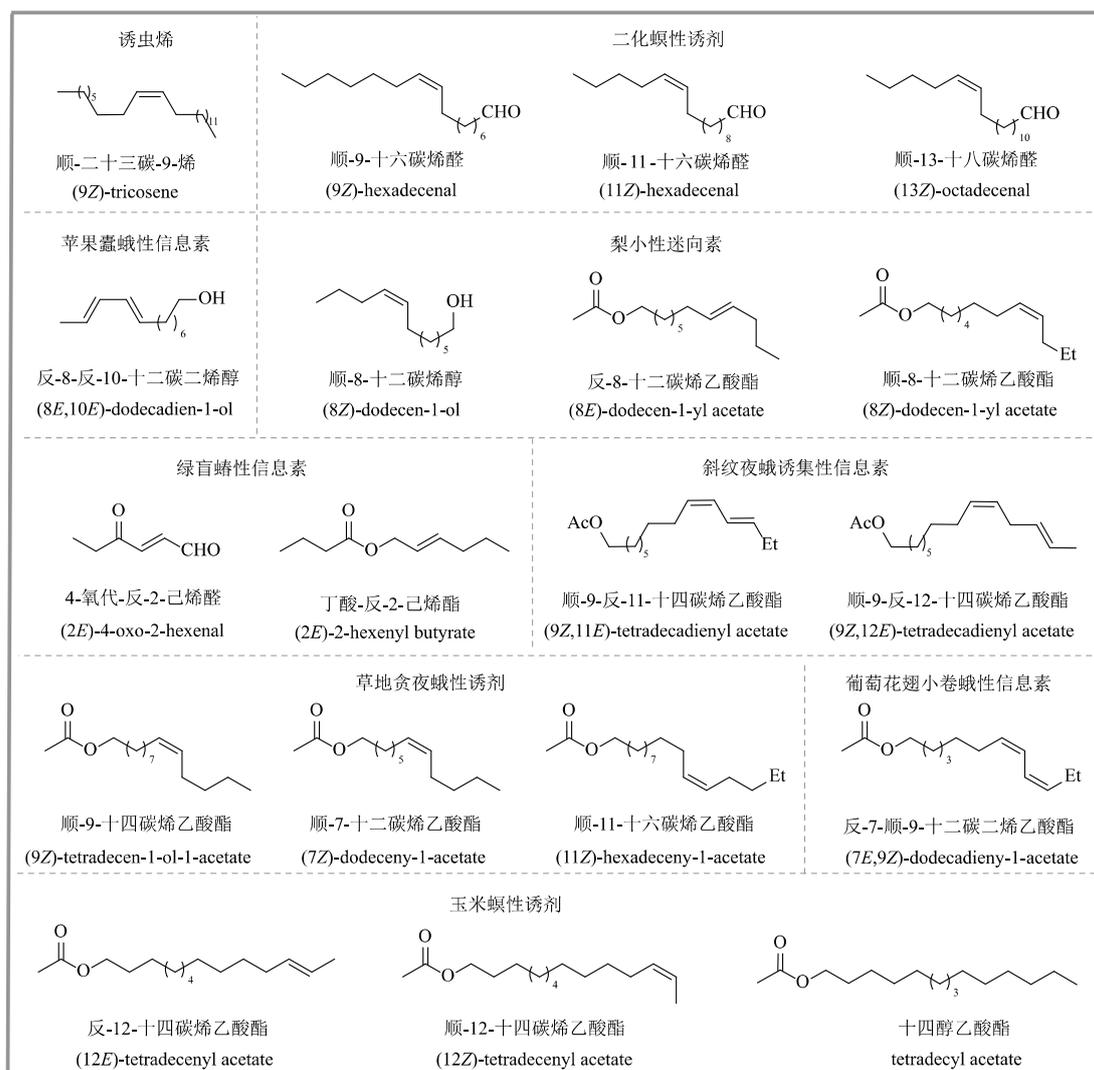


图 4 化学信息素类生物化学农药

梨小性迷向素是一种针对梨小食心虫的特异性昆虫性信息素,由顺-8-十二碳烯醇、反-8-十二碳烯乙酸酯和顺-8-十二碳烯乙酸酯中的一种或多种成分按特定比例组成,已在果树害虫综合治理中得到广泛应用^[25]。

绿盲蝽性信息素是由丁酸-反-2-己烯酯和4-氧代-反-2-己烯醛按特定比例组成的生物化学农药,可用于绿盲蝽的监测预警和防治^[26-28]。

斜纹夜蛾诱集性信息素是由顺-9-反-11-十四碳烯乙酸酯和顺-9-反-12-十四碳烯乙酸酯组成的生物化学农药,可用于对十字花科蔬菜等危害严重的斜纹夜蛾这一杂食和暴食性农业害虫的诱杀防治和虫情监测^[29]。

草地贪夜蛾性诱剂是一种用于监测和防控草地贪夜蛾的化学信息物质,由顺-9-十四碳烯乙酸酯、顺-7-十二碳烯乙酸酯、顺-11-十六碳烯乙酸酯中的一种或多种组成^[30]。该产品于2021年底在我国获批登记,用于玉米、水稻、甘蔗和棉花等农作物上草地贪夜蛾的防控和监测^[31-32]。

葡萄花翅小卷蛾性信息素的有效成分为反-7-顺-9-十二碳二烯醇乙酸酯,其是一种仿天然昆虫源合成的昆虫信息素^[33]。该产品于2023年获中国农业农村部登记,主要用于危害葡萄产量和品质的重大检疫性外来有害生物葡萄花翅小卷蛾的防治与监测^[34]。

玉米螟性诱剂是一种防治亚洲玉米螟的新型生物化学农药,通过提取鉴定雌性亚洲玉米螟的性

信息素后人工合成的产品,其主要有效成分为反-12-十四碳烯乙酸酯、顺-12-十四碳烯乙酸酯和十四醇乙酸酯^[35]。该产品于2024年首次在我国获批登记,用于亚洲玉米螟雄成虫的性诱捕。

综上所述,化学信息物质类生物化学农药主要由一种或几种有效成分按一定比例混合而成,通过模拟昆虫性信息素的化学通讯机制,以诱捕或干扰其交配行为的方式实现对害虫种群的有效调控和精准防治。该产品往往具有作用靶标高度特异、防控效果好、安全性高、使用便捷、持效期长、生态环境友好,以及对天敌昆虫和水生生物等有益生物影响小等显著优势。

3.2 昆虫生长调节剂

昆虫生长调节剂是一类通过特异性干扰或阻碍昆虫正常生长发育过程,使其个体死亡或活动能力下降,从而发挥防控作用的生物合理性农药。其具有作用机制独特、环境相容性好、靶标特异性

强等特点,已成为害虫综合治理体系中的重要组成部分。

目前,*S*-烯虫酯(*S*-methoprene)是我国唯一获准登记的昆虫生长调节剂类生物化学农药,其发展历程颇具代表性(图5)。其研发历程可追溯至20世纪60年代,美国Zoecon公司研究团队通过对天蚕蛾保幼激素JH的结构改造与优化,成功开发出外消旋体烯虫酯(化学结构为(2*E*,4*E*)-11-甲氧基-3,7,11-三甲基-2,4-十二碳二烯酸异丙酯)。其对埃及伊蚊的活性比JH提升2400多倍,展示了生物化学农药源于自然和优于自然的特性^[36]。进一步研究显示,烯虫酯C-7位立体构型对其生物活性具有决定性影响,其中*S*-构型对映体是唯一的活性组分,而*R*-构型对映体几乎无效^[37]。这一发现促使*S*-构型的烯虫酯逐步取代其外消旋体。*S*-烯虫酯在美国、澳大利亚、加拿大和新西兰等发达国家广泛应用于蚊蝇防控、害虫防治、宠物保健等众多领域^[38]。

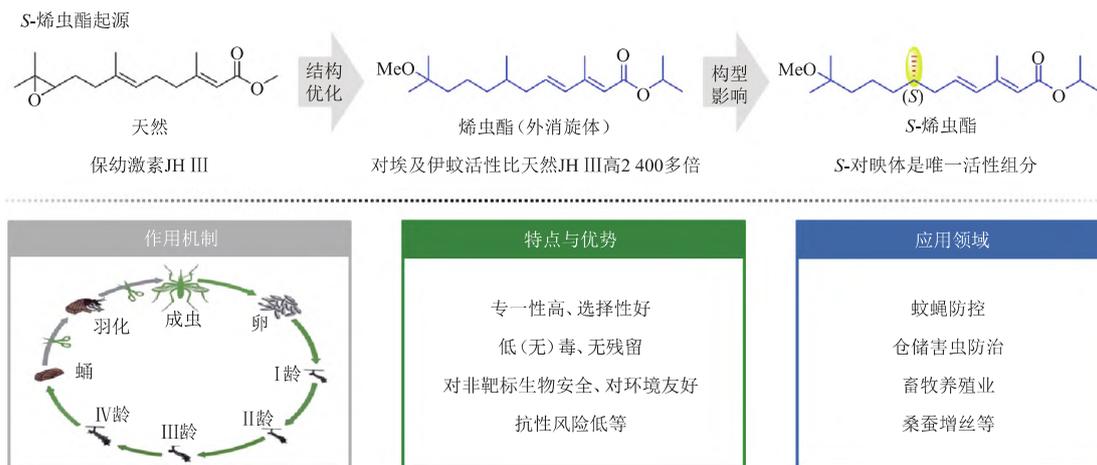


图5 昆虫生长调节剂类生物化学农药——*S*-烯虫酯

尽管*S*-烯虫酯早在1982年已被美国EPA列为生物化学农药,但因我国对生物化学农药的判定标准之一是应为天然物质,从而使得这一与天然昆虫保幼激素JH结构高度类似且功能完全一致的产品直到2018年才在钱旭红、吕龙等专家推动下,作为个案首次被我国农业农村部认定为生物化学农药,并由常州胜杰生命科技股份有限公司登记用于卫生害虫(蚊幼虫)的防治。在农业农村部于2019年明确将生物化学农药纳入生物农药管理范畴,以及常州胜杰突破关键合成技术瓶颈实现*S*-烯虫酯国产化生产之后,*S*-烯虫酯产品在国内的应用逐渐获得关注并引起重视,并在蚊蝇防控等领域崭露头角。典型案例包括其成功应用于在上海崇明召开的中国第十届花博会及其园区、上海滴水湖洲际酒店和上

海宋庆龄学校等室内外场所的生态控蚊^[39]。*S*-烯虫酯作用机制是通过模拟天然保幼激素功能,与蚊虫体内保幼激素受体(Met蛋白)特异性结合,从而干扰正常的生长发育过程,导致幼虫-蛹变态受阻,使幼虫无法发育为成虫,最终形成超龄幼虫或畸形个体而死亡^[40]。因此,该产品往往具有以下显著特点:广谱高效(对鳞翅目、双翅目、鞘翅目和同翅目等多种害虫有效);环境友好(可快速降解为二氧化碳和水);安全可靠(对人畜及其他非靶标无毒);抗性风险低等。相信随着纳米缓释技术和智能施药系统的发展,*S*-烯虫酯未来在我国绿色防控领域的应用前景将更加广阔。

3.3 植物生长调节剂^[41]

植物生长调节剂是根据植物激素的结构、功能

和作用原理,利用化学合成或微生物发酵得到,通过改变植物体内源激素的含量与分配来干扰植物内部有关基因组的表达和表达产物的运输与分配,进而调节植物的代谢和生理功能的化学物质。根据与植物激素作用的相似性,植物生长调节剂可分为

生长素类、赤霉素类、细胞分裂素类、脱落酸类、乙烯类和芸苔素类等六大类,也可根据对植物的生长效应分为生长促进剂、生长延缓剂和生长抑制剂。在我国最新农药管理体系中,目前登记为生物化学农药的植物生长调节剂共有22个有效成分(图6)。

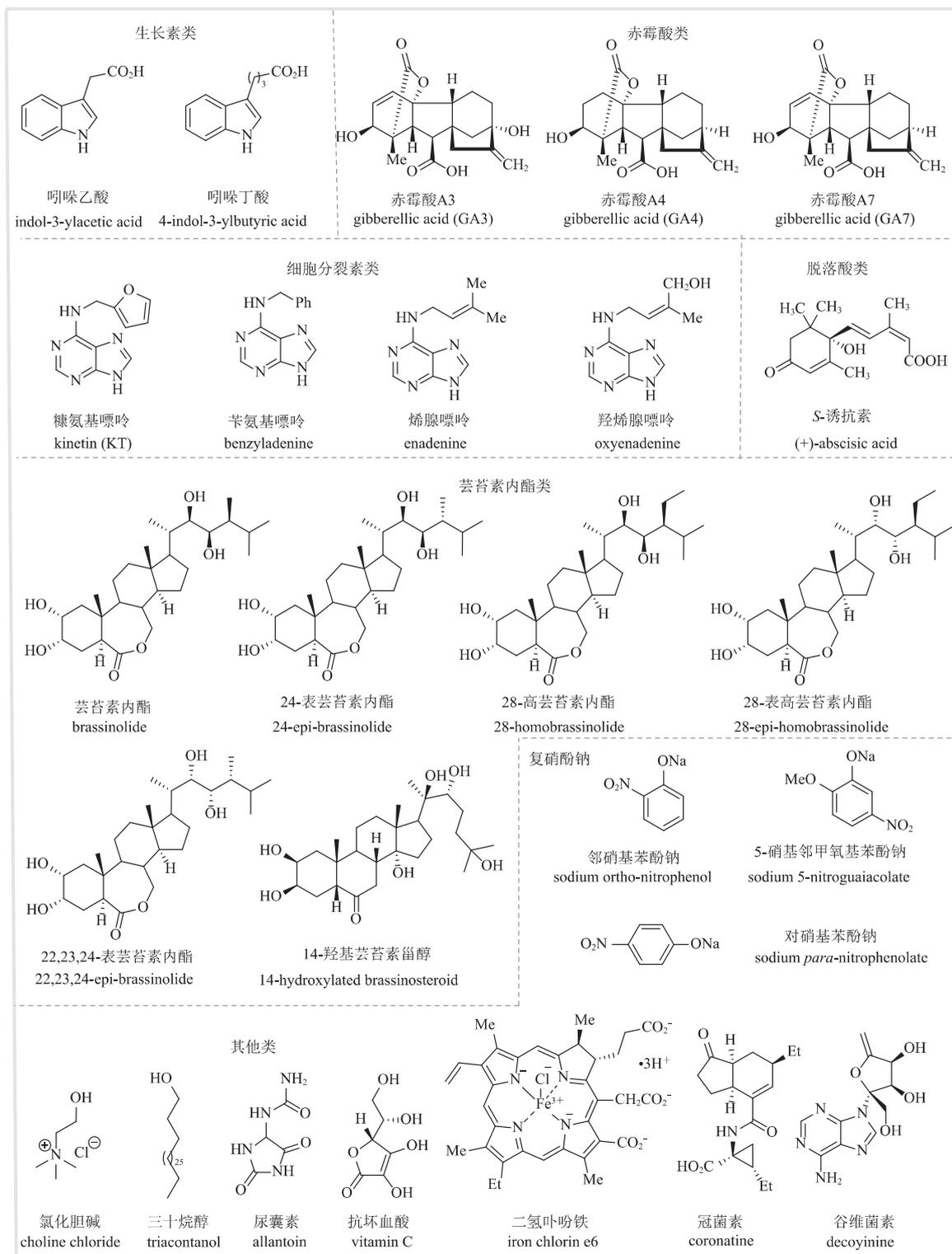


图 6 天然植物生长调节剂类生物化学农药

它们分别为:吲哚乙酸,吲哚丁酸,赤霉素(赤霉素A3),赤霉素A4,赤霉素A7,苯氨基嘌呤,糠氨基嘌呤,羟烯腺嘌呤,烯腺嘌呤,S-诱抗素,芸苔素内酯(24-表芸苔素内酯、28-表高芸苔素内酯、28-高芸苔素内酯、22,23,24-表芸苔素内酯、14-羟基芸苔素甾醇),复硝酚钠(邻硝基苯酚钠、对硝基苯酚钠、5-硝基邻甲氧基苯酚钠),氯化胆碱,三十烷醇,尿囊素,抗坏血酸,二氢卟吩铁,谷维菌素和冠菌素。下面按类别对每种植物生长调节剂的结构与代表性应用进行简要介绍。

吲哚乙酸(IAA)和吲哚丁酸(IBA)作为生长素类植物生长调节剂的典型代表,在植物生长发育调控中发挥重要作用^[42]。二者在来源、特性及应用方面既有联系又有差异^[43-44]。吲哚乙酸是一种植物体内天然存在的内源性生长素,可诱导植物细胞分裂、伸长、扩大,诱发组织分化,提高细胞膜的透性,加快原生质流动,从而促进植物生长、生根和发芽等,可用于促进种子萌发、扦插生根、防止落花落果等。吲哚丁酸则是一种人工合成的吲哚乙酸类似物,虽然两者具有相似的生理功能,但其因不易被吲哚乙酸氧化酶分解而表现出良好的生物活性和持效性;且经植物吸收后其不易在体内传导,往往滞留在根部,主要用于促进扦插生根。

赤霉素是一类具有四环二萜类结构骨架的广谱性天然植物生长调节剂,主要包括赤霉素A3、A4和A7,能促进细胞分裂与伸长、核酸与蛋白质的合成及内源生长素的合成与降解,提高多种酶活性^[45-46]。2003年,我国批准首个原药临时登记后,赤霉素在国内农业领域的应用日益受到关注,目前已广泛应用于水稻、小麦、棉花、马铃薯、蔬菜、水果和花卉等,可起到打破种子休眠、增加叶菜鲜重或果实产量、诱导单性结实及调整花卉开花期等作用^[47-48]。

苯氨基嘌呤(BA)是第一代人工合成的细胞分裂素,具有通过刺激细胞分裂引起植物生长和发育,抑制植物叶内叶绿素、核酸和蛋白质的降解来延长绿色蔬菜的保鲜等多种效能,可促进细胞分裂,延缓衰老,提高坐果率及改善作物品质^[49-50]。目前,我国登记的苯氨基嘌呤产品包括单剂和复配制剂,可用于柑橘、葡萄和苹果等果树,黄瓜、番茄和叶菜类等蔬菜,水稻、小麦等大田作物,以及花卉等的生长调节、增产及保鲜等。

糠氨基嘌呤(KT)与苯氨基嘌呤同属第一代细胞分裂素,是嘌呤类植物生长调节剂^[51-52]。它最初于DNA降解产物中发现,后通过化学合成实现规模化

生产,在植物组织培养、抗衰老及作物增产等领域有重要应用。其可用于水稻、菜豆、棉花、茶树、小麦、柑橘树、花生、苹果树、油菜和玉米等调节生长。

异戊烯腺嘌呤是链霉素经深层发酵产生,含烯腺嘌呤和羟烯腺嘌呤的细胞分裂素类植物生长调节剂,具有促进细胞分裂和分化、延缓植物组织衰老,以及诱导单性结实、提高坐果率等作用^[53]。该产品已登记用于水稻、玉米、大豆和柑橘等多种作物。

S-诱抗素,又称脱落酸,是一种具有倍半萜结构的天然植物生长调节剂,与生长素、赤霉素、细胞分裂素、乙烯利并称为五大经典植物生长调节物质,具有绿色环保、无毒无残留等优点^[54-57]。该产品可用于水稻、小麦等大宗粮食作物及葡萄、番茄、柑橘、烟草、花生和棉花等,主要功能是调节植物体内的激素平衡,促进植物生长发育和提高抗逆能力,通过作物抗旱、抗寒和耐盐碱能力的提升来提高其产量和品质等。

芸苔素内酯是一种广泛用于农业生产的甾醇类植物生长调节剂,兼具生长素、赤霉素、乙烯利、细胞分裂素和脱落酸五大类植物生长调节剂综合功效,被称为第六大类植物激素^[58-59]。目前,市场上有5种常见类型,分别为14-羟基芸苔素甾醇、28-高芸苔素内酯、28-表高芸苔素内酯、24-表芸苔素内酯、22,23,24-表芸苔素内酯。尽管来源和活性存在差异,但这些化合物都具有甾体结构,且表现出相似生理功能,如具有促进植物生长、增强抗逆性、改善光合作用、促进开花结果和延缓植物衰老等功效^[60-62]。该产品已在水稻、小麦、玉米、蔬菜或果树等数十种作物上取得登记,用于增产和生长调节。

除上述五大类外,还有一些可归属为植物生长调节剂类的生物化学农药,包括复硝酚钠、氯化胆碱、三十烷醇、尿囊素、抗坏血酸,以及我国自主研发的二氢卟吩铁、谷维菌素和冠菌素。复硝酚钠是日本旭化成于20世纪60年代开发的一种高效复合型植物生长调节剂,于1999年在我国首次登记,主要成分有邻硝基苯酚钠、对硝基苯酚钠和5-硝基邻甲氧基苯酚钠^[63]。该产品经由植株根、叶及种子吸收,能够迅速渗透到植物体内,促进细胞原生质流动,提高细胞活力,并显著改善植物的生长发育状况;可促进植物发根、生长、生殖和结果等。目前其已应用于番茄、大豆、茶树、玉米、棉花、马铃薯、辣椒、黄瓜等作物生产中,可显著提高产量和品质^[63]。需说明的是,复硝酚钠作为人工合成的植物生长调节剂,其化学结构虽非天然来源,不符合我国生

物化学农药标准中“天然化合物”的严格定义,但鉴于其模拟天然植物激素的作用机制特性和环境友好属性,以及美国EPA将其归类为生物化学农药等的考量,本文将作为特例纳入生物化学农药范畴进行介绍^[13]。

氯化胆碱是一种广谱性的胆碱类植物生长调节剂,其化学名称是2-羟乙基三甲基氯化铵^[64]。自20世纪90年代在我国首次登记作为植物生长调节剂以来,目前已有数十个单剂或复配剂获得登记,主要用于水稻、小麦、甘薯、大蒜、花生、马铃薯及多种蔬菜和中药材的生长调节,具有提高作物种子的发芽率、促进生根、形成壮苗,以及提高产量和品质等功效。

三十烷醇(TRIA)是一种天然的广谱性长碳链植物生长调节剂^[65]。其分子结构为包含30个碳原子的直链脂肪伯醇($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{28}\text{CH}_2\text{OH}$)。自2007年在我国首次登记以来,该产品已用于水稻、小麦和玉米等粮食作物,大豆和花生等油料作物及棉花、烟草、柑橘、葡萄和番茄等经济作物,通过促进植物生长和增加干物质的累积等来提高作物产量^[66]。

尿囊素作为一种乙内酰脲类天然植物生长调节剂,化学名称为*N*-2,5-二氧-4-咪唑烷基脲^[67-68]。其于2020年在我国首次获得原药登记^[69]。该产品已在小麦、水稻、大豆和黄瓜等作物上应用,具有促进生长、增产、固果、催熟、生根及抗逆和防病等作用,同时还是生产各种复合肥、微肥、缓释肥及稀土肥等不可或缺的添加剂。

抗坏血酸,又称维生素C,是我国近年来新登记的一种植物生长调节剂类生物化学农药^[70]。6%抗坏血酸水剂和6%可溶液剂分别于2023年和2024年获批登记,用于烟草调节生长。该产品作为一种天然水溶性抗氧化剂,主要通过参与电子传递系统中的氧化还原作用,促进植物的新陈代谢,具有抗逆和抗病等多种作用^[71]。

二氢卟吩铁是我国自主研发的一种天然植物生长调节剂^[72-73]。其与叶绿素及血红素结构相似,具有卟啉环核心骨架,能通过螯合金属离子发挥生物活性。该产品源自天然蚕沙提取物,由南京百特生物工程有限公司开发,于2019年获得农药登记^[74]。二氢卟吩铁具有绿色环保、安全高效和无残留等优点,广泛用于水稻、玉米、小麦、油菜、棉花和大豆等作物,在提高作物抗逆性、增加产量和改善品质等方面具有显著效果。

谷维菌素也是我国自主创制的植物生长调节

剂类生物化学农药,是由东北农业大学从药用植物重楼的内生放线菌NEAU6发酵产物中分离得到的核苷类化合物^[75]。该产品于2021年底在我国获得农药登记,用于水稻调节生长,通过促进生长、提高抗病性和抗逆性等来提高水稻产量和品质^[31]。此外,其可实现辣椒、白菜、茄子、豇豆、韭菜、茼蒿、玉米、马铃薯、大豆和棉花等作物的增产。

冠菌素是一种具有茉莉酸信号功能的植物生长调节剂,最初从植物病原菌丁香假单胞菌绛红致病变种的培养液中分离获得^[76-77]。其由(1*S*,2*S*)-1-氨基-2-乙基环丙烷-1-羧酸与冠菌酸通过酰胺键连接而成。该产品由成都新朝阳作物科学股份有限公司和中国农业大学联合开发,并于2021年获得农药登记,用于棉花和番茄的生长调节,具有促进细胞分化与生长发育、提高叶绿素含量、抑制细胞衰老和增强抗逆性及抗病性等多重生理调控功能^[31]。

综上所述,植物生长调节剂类生物化学农药主要包括生长素类、赤霉素类、细胞分裂素类、脱落酸类和芸苔素内酯等类别,往往具有作用高效、环境友好,兼具促进生长和增强抗逆性等多重功能,应用范围广,无残留风险。随着新型高效类似物的研发、复配方案的优化创新、作用机制的深入研究、精准施用技术的开发等不断发展,该类生物化学农药在现代可持续农业中的地位日益凸显,未来发展前景广阔。

3.4 植物诱抗剂^[78-84]

植物诱抗剂不能直接对病原菌进行强烈毒杀,而是通过调节植物自身的免疫、生长和代谢等过程,增强植物对病原菌的抗性,提高植物抗逆性,并促进植物生长发育的天然源化学物质,因此被称为“植物疫苗”。这类农药具有对人畜毒性低、环境相容性好、作用谱广且不产生抗性等优点,在农业生产中应用日益广泛,完全符合绿色植保和农业可持续发展理念。据统计,目前我国登记为生物化学农药的植物诱抗剂有效成分共有10种,分别是超敏蛋白、极细链格孢激活蛋白、香菇多糖、葡聚糖、几丁聚糖、低聚糖素、氨基寡糖素、几丁寡糖素、酰胺寡糖素和混合脂肪酸(图7)。下面对这些有效成分的结构及应用领域作简要阐述。

超敏蛋白,又称Harpin蛋白,是1992年首次从梨火疫病菌中分离提取的一种致病病原蛋白激发因子^[85-86]。其作用机制是通过Harpin Ea蛋白模拟病原菌侵染信号,激活作物产生天然的免疫机制,使植物能抵抗细菌、真菌和病毒等多种病原菌的侵害。作

为一种高效、安全的蛋白类植物诱抗剂生物化学农药,超敏蛋白不仅能增强作物抗逆性,还具有促进

生长和提高产量的功效。2004年获得我国农药临时登记,用于番茄、辣椒、油菜和烟草等作物^[18]。

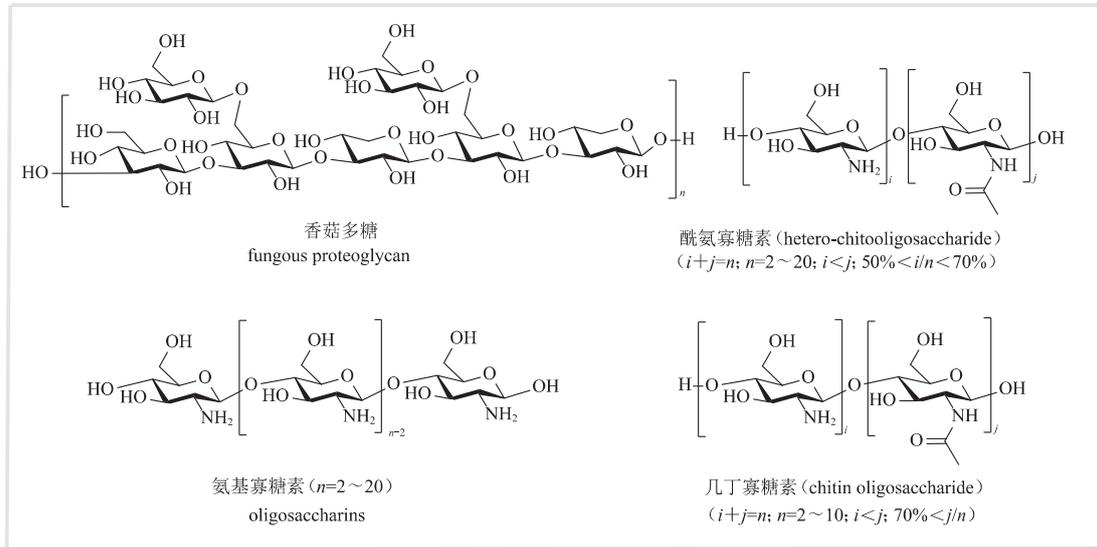


图7 部分糖类植物诱抗剂类生物化学农药

极细链格孢激活蛋白是从极细链格孢菌发酵液中提取的一种单一稳定的蛋白质,由207个氨基酸组成,是一种具有诱导植物抗病性和促进生长的双重功能的植物免疫诱抗剂^[87-88]。该激活蛋白是由中国农业科学院植物保护研究所自主研制,于2009年获得农药正式登记,成为我国自主研制的第1个蛋白质农药。已登记的极细链格孢激活蛋白产品对白菜、番茄、水稻、西瓜和烟草等作物病害具有良好的防效^[89-90]。

香菇多糖是从香菇子实体中分离的一类具有诱导抗性的多糖化合物,其是以 β -D-(1 \rightarrow 3)-Glc为主链,以1 \rightarrow 6和1 \rightarrow 3相连的葡萄糖残基为侧链的葡聚糖^[91-94]。该产品不仅能钝化病毒,降低病毒对植物的危害,还能诱导植物产生抗性因子如水杨酸、植保素和几丁质酶等来增强其免疫能力。目前,登记有效期内的香菇多糖产品有40余个,已广泛用于水稻、番茄、辣椒、黄瓜、烟草、马铃薯和花卉等多种作物病毒病的防治^[18]。

葡聚糖是 β -葡聚糖(如香菇多糖等)降解得到的寡糖片段,主要通过激活植物表面受体及信号分子传导,调控植物病原相关蛋白、植保素等抗病物质的产生及次生代谢物质的积累,达到预防病毒病侵入和扩展及在植物体内转移的作用,同时兼具调控植物生长和发育等性能^[95]。该产品是一种环境友好、安全高效的植物诱抗剂类生物化学农药,已登记用于防治番茄病毒病等^[96]。

几丁聚糖,又称壳聚糖、脱乙酰甲壳质等,是几

丁质(甲壳素)经水解脱去部分乙酰基(脱乙酰度 $>50\%$)后生成的一种线性多糖,其由 β -(1,4)-D-葡萄糖胺(GlcN)组成,部分残基可能保留N-乙酰葡萄糖胺(GlcNAc)结构(取决于脱乙酰度)^[97]。该产品主要通过诱导植株的免疫抗性防治病害,对水稻和小麦等大田作物及蔬菜、果树、中药材、园林花卉等具有广谱诱导抗性,同时具有促进植物生长和提升免疫力等作用。

低聚糖素是从天然植物或微生物代谢产物中提取的低聚糖类物质,由2~20个单糖,如葡萄糖、甘露糖或半乳糖等通过 β -1,3或 β -1,6糖苷键连接而成^[98]。该产品可通过激活植物免疫系统提高植物的抗病能力,调控植物内源激素合成达到促进生长和发育等作用。已登记的6%低聚糖素水剂可用于防治小麦赤霉病、水稻稻瘟病、玉米粗缩病和番茄、胡椒和西番莲病毒病等^[18]。

氨基寡糖素是从海洋生物外壳提取的寡糖类植物诱抗剂,由D-氨基葡萄糖以 β -1,4糖苷键连接而成的低聚糖(通常包含2~20个糖单元)^[99]。该产品具有抗病毒、抗菌、抗逆、增强植物免疫和促进生长等功效,且富含碳和氮等能被微生物分解为植物生长所需营养的成分^[100-101]。作为新一代海洋生物化学农药,因具有无毒害、环境友好、拥有药效和肥效双重功效等优点,氨基寡糖素已登记用于小麦、水稻、果蔬、烟草和中药材等作物的病害防治。

几丁寡糖素,又称壳寡糖,是几丁质和壳聚糖的降解低聚糖产物。其由 β -1,4糖苷键连接的N-乙酰

葡萄糖胺(GlcNAc)和 β -(1 \rightarrow 4)-D-葡萄糖胺(GlcN)组成(通常包含2~20个氨基葡萄糖单元)^[102]。该产品具有激活植物系统抗性、提高抗病性及促进生长等功效,于2021年获批登记,用于辣椒和番茄病毒病防治^[31]。

酰氨基寡糖素是一种通过序列精控生物酶解技术从海洋甲壳类生物中定向降解获得的特定结构几丁类寡糖^[103-104]。其通常由2~20个氨基葡萄糖和N-乙酰氨基葡萄糖通过 β -1,4糖苷键连接而成。该产品在我国于2021年获批登记,为植物诱抗剂类生物化学农药,用于甘蓝的小菜蛾的防治^[31]。

混合脂肪酸是一类以天然长链脂肪酸混合物为活性成分的植物诱抗剂类生物化学农药,具有广谱抗菌、抗病毒及诱导植物系统抗性的作用^[81]。该产品已在我国登记用于番茄、辣椒、西瓜和烟草等病毒病防治。其主要通过激活植物免疫信号通路诱导抗病相关蛋白表达,从而显著增强植物的抗病能力,同时能刺激植物生长,实现增产效果。

由上可知,植物诱抗剂类生物化学农药主要是蛋白和糖类大分子,虽往往具有较复杂的三级结构或特定糖苷键连接方式,但对非靶标生物安全、无残留风险、环境友好,且通常具有激活植物诱导抗性提升抗病防病能力及促进生长等多重生理功效。随着合成生物学和基因编辑等技术的不断进步,以及相关作用机制和靶标等的深入研究,这一符合现代可持续绿色农业发展的生物化学农药将会获得越来越多的关注、发展与应用。

3.5 其他类生物化学农药

生物化学农药除上述四类外,还包括胆钙化醇、光敏性农药和RNA干扰(RNAi)农药等具有特殊作用机制的绿色农药品种。胆钙化醇(维生素D₃),化学名称为(5Z,7E)-9,10-开环胆甾-5,7,10(19)-三烯-3 β -醇,是一种靶向钙代谢调控系统的特异性灭鼠剂(图8)^[105]。其作用机理为:经鼠类摄食后,在体内代谢转化为2,5-二羟基胆钙化醇。该活性物质可三重调控钙代谢——增强肠道钙磷吸收、促进骨钙溶解释放、抑制肾脏钙排泄,最终引发严重的高钙血症,导致多器官功能衰竭而死亡。该药剂自1984年在美国首登以来,已在美国、新西兰和澳大利亚等发达国家广泛应用,并于2012年取得中国农药登记许可。其优势体现在:1)环境兼容性好,且对鸟类等非靶标生物安全性高;2)特别适用于有机农产品生产基地的鼠害防治;3)对已产生抗凝血剂抗性的鼠种群仍具优异防效;4)与抗凝血剂联用可产生协同

作用,既能缩短致死时间,又能提升杀灭效率。这些特性使胆钙化醇在现代有害生物综合防治体系中具有重要应用价值。

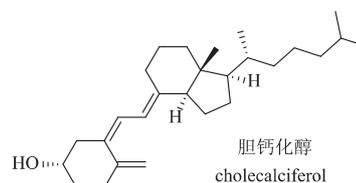


图 8 生物化学农药胆钙化醇

光敏性农药是一类依赖光能激活具有独特作用机制的新型农药^[106-110]。其活性成分在特定波长光照激发下发生光化学反应,生成具有杀虫、杀菌或除草活性的物质。其核心作用机理是通过 I 型(自由基途径)和 II 型(单线态氧途径)光动力作用,产生具有强氧化活性的单线态氧、羟基自由基等活性氧物质,进而破坏靶标生物的核酸、脂质和功能蛋白等关键生物大分子,实现对病毒、细菌、真菌、线虫、昆虫和其他植物等靶标的多靶点杀伤作用。代表性天然光敏性农药包括:呋喃香豆素类(如补骨脂素)、卞啉类(如血卞啉)、聚乙炔类(如 α -三噻吩),以及醌类(如萘嵌苯酮)等。光敏性农药具有高效广谱、抗性风险低、生态友好、安全低毒和可光照精准施药等明显优势,在绿色植保领域展现出重要应用前景。

RNAi农药是一种基于RNA干扰机制的新型生物农药,主要通过dsRNA靶向沉默害虫或病原菌的关键基因,抑制基因表达和蛋白合成,从而抑制或杀死靶标生物,实现精准防控^[111-112]。这类农药凭借高度特异性、环境友好性、不易产生抗性等优势,被誉为农药史上的第三次技术革命。我国已将RNAi农药列为《“十四·五”全国农药产业发展规划》优先发展方向,也取得了一些重要进展。例如,硅羿科技(上海)有限公司研发的烟草花叶病毒核酸干扰素SG-RNA001于2022年进入农药登记田间试验阶段,成为我国首个进入田间试验的RNAi生物农药。国际上,美国EPA于2023年12月批准了全球首个喷洒型RNAi农药Ledprona,用于防治马铃薯甲虫。在农业绿色转型和“双碳”战略背景下,随着研发技术迭代和政策支持,RNAi农药凭借其环保特性和技术优势,将成为未来农药市场的重要增长点,为农业可持续发展提供创新解决方案。

4 生物化学农药发展面临的问题及未来趋势

自2019年纳入生物农药管理范畴以来,生物化

学农药逐渐成为中国农业绿色转型的重要支撑和植物保护、绿色农药、生物农药发展的重要机遇。尽管近年来在政策推动和技术创新的双重驱动下取得了阶段性进展,但与国际先进水平相比仍存在显著差距,亟待发展。该领域的发展目前面临以下关键挑战:1)研发创新能力不足,基础研究薄弱,目前市场上产量居前5位的生物化学农药仍以传统品种,如赤霉酸、氨基寡糖素和芸苔素内酯等为主导(占70%以上),且在作用机制研究、剂型改良和应用技术等方面存在很大提升空间。亟需加强基础研究投入,深化产学研协同,培育突破性新实体或者新剂型创新产品。2)活性成分多源于结构复杂的天然化合物,面临天然来源不足、合成或规模化生产困难,且传统工艺下的不同批次产品稳定性和质量难以保证。合成生物学、人工智能辅助设计和“超限制制造”的微流化学/微流控等新兴技术有望突破源头创新、研究开发、生产和应用的瓶颈,实现快速高效、经济节约、质量稳定的绿色工业化生产,是未来技术创新的重要方向。3)市场认知度不高,民众普遍对生物化学农药“预防为主”的应用理念认知不足,叠加价格劣势和使用复杂性,导致农户更倾向选择见效快、价格低的传统化学农药。未来需构建基于微纳通道、微纳剂型、微纳器件、控制释放、智能响应、飞防应用等升级技术以及更加完善的技术推广服务体系,建议通过建立“统防统治+绿色防控”示范区、加强基层技术培训、优化补贴政策等方式,提升市场认可度。4)政策与标准体系有待完善,尽管国家多次出台政策鼓励生物农药发展,但尚未建立生物化学农药专项管理法规,在登记管理、市场监管等环节存在制度性障碍。未来中国可参考借鉴国际经验,优化建立适应生物化学农药特点的评估标准和登记管理制度,降低企业合规成本,加速产品市场化进程,以促进绿色农业发展。

随着全球对食品安全和生态环境需求的持续提升,生物化学农药凭借其环境兼容性好、靶标特异性强、使用安全性高和抗性风险低等优势,正逐步从补充性产品向主流植保方案转变。通过政策体系完善、技术创新突破和市场培育的协同推进,我国生物化学农药产业将迈向高质量发展新阶段,为农业可持续发展和粮食安全提供核心支撑。

参考文献

[1] DE SOUZA R M, SEIBERT D, QUESADA H B, et al. Occurrence, impacts and general aspects of pesticides in surface water: a review [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 135: 22-37.

- [2] LI Z, SHAO X, LEE P W, QIAN X H. Green pesticide R&D in China[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(14): 5417-5418.
- [3] 邵旭升, 杜少卿, 李忠, 钱旭红. 中国绿色农药的研究和发展[J]. *世界农药*, 2020, 42(4): 16-24.
- [4] JONES R S. Biochemical pesticides: green chemistry designs by nature[M]//BOETHLING R, VOUCHKOVA A. *Handbook of green chemistry*, Vol. 9: Designing safer chemicals. 1st ed. New Jersey: Wiley, 2012: 329-347.
- [5] 中华人民共和国农业农村部. 中华人民共和国农业部公告 第2569号 [EB/OL]. (2017-09-13) [2025-07-07]. http://www.moa.gov.cn/nygbg/2017/dsq/201802/t20180201_6136196.htm.
- [6] 中华人民共和国农业农村部. 对十三届全国人大二次会议第8886号建议的答复(农办议[2019]244号)[EB/OL]. (2019-08-06) [2025-07-07]. https://www.moa.gov.cn/gk/jyta/201908/t20190812_6322486.htm.
- [7] 杨峻, 侯燕华, 林荣华, 等. 我国生物农药登记品种清单式管理初探[J]. *中国生物防治学报*, 2022, 34(4): 812-820.
- [8] 农业农村部农药检定所. 农业农村部农药检定所关于征求《我国生物农药登记有效成分清单(2020版)》(征求意见稿)意见的函[EB/OL]. (2020-03-10) [2025-07-07]. <http://www.chinapesticide.org.cn/zgnyxxw/zwb/detail/17649>.
- [9] 潘家新, 李林生, 粟月萍. 我国生物农药登记产品特点分析及发展建议[J]. *农药*, 2025, 64(2): 87-93.
- [10] 罗子罗玢, 李洋. 2024年国内新登记的农药品种[J]. *世界农药*, 2025, 47(1): 17-26.
- [11] 傅桂平, 王依琳. 2025年第一季度农药登记产品情况分析[J]. *农药科学与管理*, 2025, 46(5): 61-62.
- [12] 王以燕, 袁善奎, 刘杏忠, 等. 2017年美国生物农药有效成分登记情况[J]. *世界农药*, 2018, 40(1): 40-49; 52.
- [13] EPA. Biopesticide active ingredients[DB/OL]. [2025-07-01]. <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/biopesticide-active-ingredients>.
- [14] RIZVIS A H, GEORGE J, REDDY G V P, et al. Latest developments in insect sex pheromone research and its application in agricultural pest management[J]. *Insects*, 2021, 12(6): 484-510.
- [15] 王留洋, 杨超霞, 郭兵博, 等. 昆虫性信息素研究进展与应用前景[J]. *农药学报*, 2022, 24(5): 997-1016.
- [16] CARLSON D A, MAYER M S, SILHACEK D L, et al. Sex attractant pheromone of the house fly: isolation, identification, and synthesis[J]. *Science*, 1971, 174: 76-78.
- [17] UEBEL E C, SONNET P E, MILLER R W, et al. House fly sex pheromone: enhancement of mating strike activity by combination of (Z)-9-tricosene with branched saturated hydrocarbons[J]. *Environmental Entomology*, 1976, 5(5): 905-908.
- [18] 农业农村部农药检定所. 中国农药信息网 数据中心[DB/OL]. [2025-07-07]. <http://www.chinapesticide.org.cn/zwb/dataCenter.pdno=WP20080055>.
- [19] 王以燕, 姜志宽, 李富根. 70年来我国卫生用农药的发展历程与展望[J]. *中华卫生杀虫药械*, 2020, 26(1): 1-7.
- [20] 胡代花. 中国水稻二化螟性信息素研究及应用新进展[J]. *江苏农业学报*, 2019, 35(3): 736-742.

- [21] KADOIC BALASKO M, BAZOK R, MIKAC K M, et al. Pest management challenges and control practices in codling moth: a review[J]. *Insects* 2020, 11(1): 38-60.
- [22] 白小宁, 李友顺, 杨锚, 等. 2020年我国登记的新农药[J]. *农药*, 2021, 60(2):79-82.
- [23] 中华人民共和国农业农村部. 中华人民共和国农业部公告 第 333号[EB/OL]. (2020-09-15) [2025-07-07]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202009/t20200917_6352227.htm.
- [24] 徐亮. 苹果蠹蛾绿色防控技术体系构建的探讨[J]. *防护林科技*, 2022(6): 81-84.
- [25] 王付平, 张丽, 李拥虎, 等. 梨小食心虫迷向技术研究及应用进展[J]. *中国果树*, 2019(5): 12-15.
- [26] 张涛. 绿盲蝽(*Apolygus lucorum*)性信息素的提取鉴定及应用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [27] 张萍, 傅黎, 王琴, 等. 绿盲蝽性信息素诱芯的结构鉴定和定量分析[J]. *精细化工中间体*, 2021, 51(3): 66-69.
- [28] 苏恒, 孙小旭, 张金勇. 苹果园绿盲蝽性诱剂监测与诱集方法研究[J]. *果树学报*, 2021, 38(8): 1390-1395.
- [29] 张显勇, 高惠姝, 江敏华, 等. 斜纹夜蛾性信息素的研究与应用[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(13): 188-191.
- [30] 金化亮. 性引诱剂对草地贪夜蛾的诱捕效果与应用[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(20): 175-177.
- [31] 白小宁, 王以燕, 赵安楠, 等. 2021年我国登记的新农药[J]. *农药*, 2022, 61(3):157-162; 183.
- [32] 中华人民共和国农业农村部. 中华人民共和国农业部公告 第 468号[EB/OL]. (2021-09-03) [2025-07-07]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202109/t20210916_6376518.htm.
- [33] IORIATTI C, ANFORA G, TASIN M, et al. Chemical ecology and management of *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae)[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2011, 104(4): 1125-1137.
- [34] 中华人民共和国农业农村部. 中华人民共和国农业部公告 第 715号[EB/OL]. (2023-10-23) [2025-07-07]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202310/t20231025_6439088.htm.
- [35] 许波, 郭华友, 杜占琴. 玉米螟性诱剂介绍[J]. *农药科学与管理*, 2023, 45(12): 53-55.
- [36] HENRICK C A, STAAL G B, SIDDALL J B. Alkyl 3,7,11-trimethyl-2,4-dodecadienoates, a new class of potent insect growth regulators with juvenile hormone activity[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1973, 21(3): 354-359.
- [37] HENRICK C A, ANDERSON R J, STAAL G B, et al. Insect juvenile hormone activity of optically active alkyl (2*E*,4*E*)-3,7,11-trimethyl-2,4-dodecadienoates and of arylterpenoid analogs [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1978, 26 (3): 542-550.
- [38] 苏天运. 美国烯虫酯研究开发和应用——50年成功回顾[J]. *中华卫生杀虫药械*, 2018, 24(4): 316-324.
- [39] 徐瑞哲, 符哲琦. 花露水白带了!花博会为啥没蚊子?这里是全国第一个无蚊害广大区域[EB/OL]. (2021-05-22) [2025-07-07]. <https://www.jfdaily.com/wx/detail.do?id=370008>.
- [40] 杨华铮, 邹小毛, 朱有全, 等. 现代农药化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [41] 张义, 刘云利, 刘子森, 等. 植物生长调节剂的研究及应用进展[J]. *水生生物学报*, 2021, 45(3): 700-708.
- [42] LUDWIG-MÜLLER J. Indole-3-butyric acid in plant growth and development[J]. *Plant Growth Regulation*, 2000, 32: 219-230.
- [43] WANG S, TAKETA S, ICHII M, et al. Lateral root formation in rice (*Oryza sativa* L.): differential effects of indole-3-acetic acid and indole-3-butyric acid[J]. *Plant Growth Regulation*, 2003, 41: 41-47.
- [44] SAUER M, ROBERT S, KLIFFE V. Auxin: simply complicated[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(9): 2565-2577.
- [45] SHAHD S H, ISLAM S, MOHAMMAD F. Gibberellic acid: a versatile regulator of plant growth, development and stress responses[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2023, 42: 7352-7373.
- [46] CAMARA M C, VANDENBERGHE L P S, RODRIGUES C, et al. Current advances in gibberellic acid (GA3) production, patented technologies and potential applications[J]. *Planta*, 2018, 248: 1049-1062.
- [47] MURASE K, HIRANO Y, SUN T P, et al. Gibberellin-induced DELLA recognition by the gibberellin receptor GID1[J]. *Nature*, 2008, 456: 459-463.
- [48] 殷凯楠, 吴酬飞, 尹良鸿, 等. 基于代谢组学的赤霉素生物合成研究进展[J]. *农药学报*, 2022, 24(6): 1314-1326.
- [49] 丁梦娇, 黄萍, 周霞, 等. 农作物生长的好帮手——细胞分裂素[J]. *化学教育(中英文)*, 2024, 45(11): 1-8.
- [50] SAKAKIBARA H. Cytokinins: activity, biosynthesis, and translocation[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2006, 57: 431-449.
- [51] 佚名. 植物生长调节剂糠氨基嘌呤[J]. *农药科学与管理*, 2018, 39 (5): 64-65.
- [52] BARCISZEWSKIA J, MASSINOB F, CLARK B F C. Kinetin—a multiactive molecule[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2007, 40(3): 182-192.
- [53] 农业部种植业管理司, 农业部农药检定所. 新编农药手册[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [54] 宋姝娥. 新型植物生长调节剂——S-诱抗素[J]. *农业知识*, 2013 (16): 33.
- [55] 解艳玲, 杜军, 沈振荣, 等. S-诱抗素研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(4): 1517-1518.
- [56] 周欣欣, 陈立萍, 王宁, 等. S-诱抗素(ABA)产业发展现状及展望 [J]. *农药科学管理*, 2017, 38(10): 21-24.
- [57] VISHWAKARMA K, UPADHYAY N, KUMAR N, et al. Abscisic acid signaling and abiotic stress tolerance in plants: a review on current knowledge and future prospects [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 161-172.
- [58] GROVE M D, SPENCER G F, POHWEDDER W K. Brassinolide, a plant growth promoting steroid isolated from *Brassica napus* pollen[J]. *Nature*, 1979, 281: 216-217.
- [59] 孙陈铭, 蔡岩, 苗志伟. 新型绿色植物生长调节剂——芸苔素内酯的研究进展[J]. *化学教育*, 2022, 43(6): 1-8.
- [60] 王强锋, 李芹, 夏中梅, 等. 芸苔素类物质生物学活性比较研究与评价[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(12): 2766-2774.
- [61] 宋伟丰, 韦庆慧, 刘凯, 等. 天然植物生长调节剂芸苔素的生物活性及应用浅析[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(24): 97-101.
- [62] KHRIPACH V, ZHABINSKII V, DEGROOT A. Twenty years of

- brassinosteroids: steroidal plant hormones warrant better crops for the XXI century[J]. *Annals of Botany*, 2000, 86: 441-447.
- [63] 李君. 复硝酚钠——新型植物生长调节剂[J]. *中国农业信息*, 2006(10): 36.
- [64] 郑庆伟. 其他类植物生长调节剂——氯化胆碱, 未来市场前景可期[DB/OL]. (2024-10-09) [2025-07-06]. <https://mp.weixin.qq.com/s/1NLdv1bMZr7T9JRMUWJnIQ>.
- [65] ISLAM S, MOHAMMAD F. Triaccontanol as a dynamic growth regulator for plants under diverse environmental conditions [J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2020, 26(5): 871-883.
- [66] 刘德盛, 张群, 陆东和. 我国三十烷醇研究进展及其在农业上的应用前景[J]. *中国工程科学*, 2001(2): 91-94.
- [67] KAUR R, CHANDRA J, VARGHESE B, et al. Allantoin: a potential compound for the mitigation of adverse effects of abiotic stresses in plants[J]. *Plants*, 2023, 12(17): 3059-3079.
- [68] KAUR H, CHOWRASIA S, GAUR V S, et al. Allantoin: emerging role in plant abiotic stress tolerance[J]. *Plant Molecular Biology Reporter*, 2021, 39: 648-661.
- [69] 中华人民共和国农业农村部. 中华人民共和国农业部公告 第379号 [EB/OL]. (2020-12-18) [2025-07-07]. https://www.zzys.moa.gov.cn/gzdt/202101/t20210107_6359626.htm.
- [70] WU P, LI B, LIU Y, et al. Multiple physiological and biochemical functions of ascorbic acid in plant growth, development, and abiotic stress response[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, 25(3): 1832-1848.
- [71] CONKLIN P L, FOYER C H, HANCOCK R D, et al. Ascorbic acid metabolism and functions[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2024, 75(9): 2599-2603.
- [72] 陈黎明. 植物生长调节剂二氢吡吩铁[J]. *农药科学与管理*, 2018, 39(3): 67-68.
- [73] 张国, 于居龙, 凌鸿, 等. 二氢吡吩铁浸种对水稻生长与增产效应研究[J]. *农学报*, 2024, 14(3): 34-39.
- [74] 李洋. 2019年国内新登记农药品种[J]. *世界农药*, 2020, 42(3): 7-19.
- [75] SHI Y, AN X, ZHANG B, et al. Hydrolysis, photolysis, and biotoxicity assessment of a novel biopesticide, guvermectin [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(51): 16117-16125.
- [76] 汪宝卿, 李召虎, 翟志席, 等. 冠菌素及其生理功能[J]. *植物生理学通讯*, 2006, 42(3): 503-510.
- [77] 陶群, 黄官民, 郭庆, 等. 冠菌素对玉米抗倒伏能力及产量的影响[J]. *药学报*, 2019, 21(1): 43-51.
- [78] 赵继红, 孙淑君, 李建中. 植物诱导抗病性与诱抗剂研究进展[J]. *植物保护*, 2003, 29(4): 7-10.
- [79] 王露露, 岳英哲, 孔晓颖, 等. 植物免疫诱抗剂的发现、作用及其在农业中的应用[J]. *世界农药*, 2020, 42(10): 24-31.
- [80] 郑家瑞, 李云洲. 植物诱导抗性研究进展[J]. *山地农业生物学报*, 2022, 41(2): 51-58.
- [81] ZHU F, CAO M Y, ZHANG Q P, et al. Join the green team: inducers of plant immunity in the plant disease sustainable control toolbox[J]. *Journal of Advanced Research*, 2024, 57(5): 15-42.
- [82] 邱德文. 我国植物免疫诱导技术的研究现状与趋势分析[J]. *植物保护*, 2016, 42(5): 10-14.
- [83] YANG B, YANG S, ZHENG W Y, et al. Plant immunity inducers: from discovery to agricultural application[J]. *Stress Biology*, 2022, 2: 5.
- [84] 张越, 杨冬燕, 张乃楼, 等. 植物抗病激活剂研究进展[J]. *中国科学基金*, 2020, 34(4): 519-528.
- [85] WEI Z M, LABY R J, ZUMOFF C H, et al. Harpin, elicitor of the hypersensitive response produced by the plant pathogen *Erwinia amylovora*[J]. *Science*, 1992, 257: 85-88.
- [86] CHOI M S, KIM W, LEE C, et al. Harpins, multifunctional proteins secreted by gram-negative plant-pathogenic bacteria[J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2013, 26(10): 1115-1122.
- [87] 邱德文, 杨秀芬, 曾洪梅, 等. 激活植物免疫的链格孢菌蛋白生物农药创制[R]. 北京: 中国农业科学院植物保护研究所, 2006.
- [88] 中国农业科学院植物保护研究所. 2012年 极细链格孢激活蛋白生物农药创制[DB/OL]. (2017-09-29) [2025-07-07]. <http://www.ippcas.cn/kxyj/kjll/yjjcg/72963.htm>.
- [89] 佚名. 极细链格孢激活蛋白[J]. *农药科学与管理*, 2010, 31(10): 58.
- [90] 王娟, 徐军, 段小莉, 等. 极细链格孢激活蛋白与氨基寡糖素复配制剂防控白菜软腐病的协同增效作用[J]. *农药科学与管理*, 2025, 46(3): 48-55.
- [91] ZHANG Z X, WANG H Y, WANG K Y, et al. Use of lentinan to control sharp eyespot of wheat, and the mechanism involved[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(50): 10891-10898.
- [92] ZHANG G Y, SU L Q, CAO A J, et al. Lentinan promotes the root of *Brassica campestris* L[J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2015, 58(3): 333-336.
- [93] SUN S, YAN H, CHEN G, et al. Use of lentinan and flupropimide to control cotton seedling damping-off disease caused by *Rhizoctonia solani*[J]. *Agriculture*, 2022, 12(1): 75-91.
- [94] 王家腾, 王贺聪, 刘蕾. 香菇多糖构效关系的研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(19): 363-369.
- [95] 房士梅. 葡聚烯糖——新型的病毒诱抗剂[J]. *农业知识*, 2008(2): 43.
- [96] 姬小雪, 乔康. 葡聚烯糖0.5%可溶粉剂防治番茄病毒病试验[J]. *世界农药*, 2014, 36(1): 58-59.
- [97] 王禾, 杨铭铎, 刘浩宇. 几丁质/几丁聚糖的开发及研究进展[J]. *黑龙江商学院学报(自然科学版)*, 2000, 16(3): 18-23.
- [98] 何国亚. 神奇的植物疫苗低聚糖素[J]. *四川农业科技*, 2011(2): 43.
- [99] 安亚杰. 新型生物农药: 氨基寡糖素[J]. *农村新技术*, 2018(4): 41.
- [100] 吴玉超, 陈意苹. HPLC-ELSD法检测农药中氨基寡糖素含量的研究[J]. *广东化工*, 2022, 49(13): 178-180.
- [101] 卢春兰, 王蓓. 壳寡糖和几丁寡糖的制备方法及其在水产上的应用[J]. *广东农业科学*, 2023, 50(2): 136-146.

(下转第 17 页)

制剂、DOXP抑制剂、PPO抑制剂等其中一种组合,能有效防除异型莎草等莎草科杂草、稻稗等禾本科杂草,以及鸭舌草等阔叶杂草。组合使用具有扩大除草谱,减少施用量,产生增效作用并解决抗药性杂草等特点^[9]。

2022年,江苏清原农冠杂草防治有限公司申请了专利CN 118056496A,发明名称为“包含氟氯氨草酯的三元除草组合物及其应用”。该专利涉及包含氟氯氨草酯的三元除草剂组合物及其应用,配伍成分分别选自苯唑氟草酮、硝磺草酮、苯唑草酮、异噁唑草酮、氟吡草酮、tolpyralate中的1种和莠去津、特丁津中的1种^[10]。

2023年,巴斯夫欧洲公司申请涉及氟氯氨草酯的除草组合物专利CN 119451575A,发明名称为“包含L-草铵膦或其盐和第二种除草剂的除草混合物”。其中第二种除草剂包括氟氯氨草酯^[11]。

2025年,安徽农业大学申请了专利CN 120349278A,发明名称为“一种氟氯氨草酯中间体的制备方法”。该专利优化了氟氯氨草酯关键中间体的合成工艺^[6]。

6 总结

氟氯氨草酯是我国自主研发、包含吡啶结构的合成激素类除草剂,具有强内吸传导性和长效灭生性。其除草谱广,能有效防除对草甘膦、草铵膦等灭生性除草剂产生抗性的杂草,以及小飞蓬等多种顽固性杂草;同时,对林地、非耕地中难防除的小灌木及藤本植物也表现出良好的防效。此外,氟氯氨草酯在土壤中降解迅速,其降解产物具有较低的毒性

风险,展现出广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 吕庆浩,陈姿,董立尧,等. 激素类除草剂氟吡啶酯的毒理与抗性研究进展[J]. 植物保护学报, 2025, 52(2): 274-283.
- [2] 叶萱. 杂草对合成生长素类除草剂的抗性[J]. 世界农药, 2018, 40(6): 1-9.
- [3] ZAKHARYCHEV V V, MARTSYNKEVICH A M. Development of novel pyridine-based agrochemicals: a review[J]. Advanced Agrochem, 2025, 4: 30-48.
- [4] ZHOU W T, ZHANG W B, HAN H L, et al. Degradation of a novel herbicide fluchloraminopyr in soil: dissipation kinetics, degradation pathways, transformation products identification and ecotoxicity assessment[J]. Environment International, 2024, 193: 109135.
- [5] 彭学岗,赵德,崔琦,等. 包含R型吡啶氨基羧酸衍生物的除草组合物及其应用: ZL, 202010228317.6[P]. 2021-01-29.
- [6] 李亚辉,田青强,李赵,等. 一种氟氯氨草酯中间体的制备方法: ZL, 202510771347.4[P]. 2025-07-22.
- [7] 农业农村部农药检定所. 农药登记数据[DB/OL]. [2025-12-12]. <http://www.chinapesticide.org.cn/zwb/dataCenter>.
- [8] 连磊,彭学岗,华荣保,等. R型吡啶氨基羧酸及其盐、酯衍生物、制备方法、除草组合物和应用: ZL, 201911321469.4[P]. 2020-07-07.
- [9] 彭学岗,张景远,赵德,等. 包含N-(1,3,4-噁二唑-2-基)芳基甲酰胺类化合物的除草组合物及其应用: ZL, 202010953693.1[P]. 2022-11-29.
- [10] 李平生,姜若鲲,赵德,等. 包含氟氯氨草酯的三元除草组合物及其应用: ZL, 202211445680.9[P]. 2024-05-21.
- [11] 扎加尔 C. 包含L-草铵膦或其盐和第二种除草剂的除草混合物: ZL, 202380049710.0[P]. 2025-02-14.
- [102] LIU Y, YANG H H, WEN F, et al. Chitooligosaccharide-induced plant stress resistance[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 302: 120344.
- [103] 周欣欣,吴声敢,王倬,等. 植物免疫诱导剂酰氨基寡糖素对环境非靶标生物的毒性研究[J]. 现代农药, 2022, 21(3): 50-53.
- [104] LIAQAT F, ELTEM R. Chitooligosaccharides and their biological activities: a comprehensive review[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 184: 243-259.
- [105] 陈谊,张彩菊,蒋洪. 胆钙化醇灭鼠剂的研究[J]. 中华卫生杀虫药械, 2014, 20(3): 282-286.
- [106] GROSU C, JIJIE A R, MANEA H C, et al. New insights concerning phytophotodermatitis induced by phototoxic plants[J]. Life, 2024, 14(8): 1019.
- [107] SHAO X H, ZHANG Z H, QIAN X H, et al. Potential biochemical pesticide—synthesis of neofuranocoumarin and inhibition the proliferation of *Spodoptera frugiperda* cells through activating the mitochondrial pathway[J]. Toxins, 2022, 14(10): 677.
- [108] CHEN C Y, TANG Z B, LIU Z C. Recent advances in the synthesis and applications of furocoumarin derivatives[J]. Chinese Chemical Letters, 2023, 34(9): 108396.
- [109] WU J C, WANG L Y, ZHANG Y F, et al. Synthesis and photoactivated toxicity of 2-thiophenylfuranocoumarin induce midgut damage and apoptosis in *Aedes aegypti* larvae[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(3): 1091-1106.
- [110] QBAL Z, IQBAL M S, HASHEM A, et al. Plant defense responses to biotic stress and its interplay with fluctuating dark/light conditions[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 631810.
- [111] 李琳红,王海宝,梁沛. RNA杀虫剂研究进展[J]. 现代农药, 2024, 23(4): 13-21.
- [112] 路子琪,王静,张震,等. 基于RNAi的生物农药研究进展[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 968-977.

(上接第13页)