



邢鲁亭, 汤勇华, 陆文敏, 朱俊颖, 桑珠, 况慧云, 祁兵, 沈悦. RNA生物农药研发进展及监管现状 [J]. 环境昆虫学报, 2026, 48 (2): 346–352. XING Lu-Ting, TANG Yong-Hua, LU Wen-Min, ZHU Jun-Ying, SANG Zhu, KUANG Hui-Yun, QI Bing, SHEN Yue. Research progress and regulatory status of RNA biopesticides [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2026, 48 (2): 346–352.

RNA生物农药研发进展及监管现状

邢鲁亭, 汤勇华, 陆文敏, 朱俊颖, 桑珠, 况慧云, 祁兵*, 沈悦*

(上海市农业科技服务中心, 上海 200000)

摘要: RNA生物农药具有靶标专一性强、研发周期较短、环境兼容性好且无残留等优势, 在植物保护领域展现出广阔的应用前景, 随着美国的GreenLight Biosciences公司的产品成功商业化, 将RNA生物农药的研发与应用推向了新的阶段。为了更好地理解RNA生物农药, 本文综述了RNA生物农药的作用机制、特点以及应用形式, 结合国内外研发历程与商业化进展, 概述了现阶段RNA生物农药产业化面临的挑战及发展方向, 梳理了不同监管区域对该类产品的政策, 以为RNA生物农药的开发和商业化应用提供参考, 为我国生物农药产业进步和乡村振兴战略实施提供支撑。

关键词: RNA生物农药; 研发; 商业化; 监管

中图分类号: Q969

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2026) 02-0346-07

Research progress and regulatory status of RNA biopesticides

XING Lu-Ting, TANG Yong-Hua, LU Wen-Min, ZHU Jun-Ying, SANG Zhu, KUANG Hui-Yun, QI Bing*, SHEN Yue* (Shanghai Agricultural Science and Technology Service Center, Shanghai 200000, China)

Abstract: RNA biopesticides offer advantages such as high target specificity, short development cycles, good environmental compatibility, and no residue, demonstrating broad application prospects in the field of plant protection. The successful commercialization of products by GreenLight Biosciences in the United States has propelled the research and application of RNA biopesticides to a new stage. To enhance the understanding of RNA biopesticides, this article reviews their mechanisms of action, characteristics, and application forms. By examining domestic and international research and development history as well as commercialization progress, it outlines the current challenges and future directions for the industrialization of RNA biopesticides. Additionally, it summarizes the regulatory policies for such products in different regions. The aim is to provide a reference for the development and commercial application of RNA biopesticides and to support the advancement of China's biopesticide industry and the implementation of the rural revitalization strategy.

Key words: RNA Biopesticides; research and development; commercialization; regulations

作为新兴的颠覆性前沿技术和植保领域未来发展的重要方向, RNA生物农药被称为“农药史上的第三次革命”, RNA杀虫剂的田间应用被《科学》杂志列为“2024年度十大科学突破之一”, 其

开发与应用被世界各国所重视, 我国亦将其列入《“十四五”全国农药产业发展规划》、《全国农业科技创新重点领域(2024–2028年)》等重要发展规划之中, 上海市人民政府办公厅发布的《关于加

作者简介: 邢鲁亭, 女, 硕士, 农艺师, 研究方向为作物遗传育种, E-mail: xinglutong888@126.com

*共同通讯作者 Author of correspondence: 沈悦, 男, 硕士, 高级畜牧师, 研究方向为畜牧兽医, E-mail: 675404128@qq.com; 祁兵, 男, 本科, 畜牧师, 研究方向为畜牧兽医, E-mail: vet0102qibing@163.com

收稿日期 Received: 2025-10-28; 修回日期 Revision received: 2026-01-17; 接受日期 Accepted: 2026-01-19

快推进本市农业科技创新的实施意见》中，也将创制RNA生物农药作为布局农业科技新赛道的方向之一，充分体现了其在推动绿色农业发展和保障粮食安全方面的重大战略价值。本文就RNA生物农药的作用机制、商业化进度及相关的监管审批问题进行阐述，以期为该技术的进一步研究、政策制定和产业应用提供参考。

1 RNA生物农药的作用机制、应用途径及特点

RNA生物农药的核心成分是一段双链多核苷酸片段(double-stranded RNA, dsRNA)，其特异性地结合靶标生物中特定基因转录的信使RNA(messenger RNA, mRNA)，通过利用生物体内天然存在的RNA干扰(RNA interference, RNAi)通路，外源导入对应的dsRNA进入体内，随后被切割后再与体内相关酶结合形成RNA诱导的沉默复合物(RNA-induced silencing complex, RISC)与目的基因结合产生的mRNA降解；从而干扰靶标生物的正常生长并减少对寄主植物的为害，最终达到有害生物防治与植物保护的目(Zhang *et al.*, 2017)。

RNA生物农药在农业上的应用主要有寄主诱导的基因沉默策略(Host-induced gene silencing, HIGS)、病毒诱导的基因沉默策略(Virus-induced gene silencing, VIGS)、喷雾诱导的基因沉默策略(Spray-induced gene silencing, SIGS)、纳米载体递送的基因沉默策略(Nanocarrier-delivered gene silencing, NDGS)4种应用途径(关梅等, 2022)(图1)。HIGS技术的核心是将植物本身作为“生物反应器”，利用基因工程手段使寄主植物稳定表达与病原菌关键基因互补的siRNA或发夹RNA(Hairpin RNA, hpRNA)，这些内源性产生的小RNA分子进入病原菌细胞后，特异性识别并降解病原体的靶基因mRNA，从而干扰靶基因的表达(曹建承等, 2024)，该技术的优势在于长效性和稳定性，一旦植物成功表达靶标小RNA，即可在整个生育期对病原菌形成持续防控；VIGS技术通常选用中性病毒载体或者植物内生菌作为dsRNA的表达和运送载体，由于病毒独特的侵染与自身复制机制，能够在寄主体内快速扩散或高效表达dsRNA，并实现基因沉默的目的；SIGS技术以病

原菌生长发育和致病相关基因为靶标，将体外合成的针对靶基因的dsRNA喷施于植物表面，抑制目标病原菌靶基因的表达(陈夕军等, 2022)，其具有操作简便、成本可控、适用范围广的特点；SIGS技术的关键挑战在于dsRNA的稳定性，裸露的dsRNA易被环境中的核酸酶降解，且在植物体表的滞留能力较差，因此需要通过助剂优化提升其抗降解能力和叶片附着力。NDGS技术是利用纳米载体保护和递送dsRNA以克服喷洒型RNA农药应用易降解的问题。常用的纳米载体包括脂质纳米粒(LNP)、壳聚糖纳米粒、二氧化硅纳米粒等，这些载体具有粒径小、比表面积大、生物相容性好的特点，可通过静电作用、疏水作用等方式与dsRNA形成稳定的纳米复合物。

在病虫害绿色防控需求日益迫切的当下，RNA生物农药凭借其防治目标精准、靶标开发便捷、应用操作灵活的突出优势，逐渐成为替代传统化学农药的重要方向，为农业病虫害精准防控提供了全新解决方案(关若冰等, 2022)。其优势主要体现在以下3个方面：

一是RNA生物农药防治目标专一，因其靶向性比较强，可以实现对某一害虫的精准防控，这种“精准打击”模式，不仅能减少农药对环境的污染，还能延缓病虫害抗药性的产生，为病虫害可持续防控提供了可能。二是RNA生物农药开发周期相比化学农药开发周期短，据估计，研发一款新的化学农药需要用时10年左右，花费超过2.5亿美元(袁杨和杨红艳, 2022)。而RNA生物农药的开发，只需要建立重要农业病虫害相关物种的转录本数据集，结合基因功能分析、生物信息学分析、机器学习大模型等，即可进行RNA生物农药的开发，开发周期缩短至2~5年。这种高效的开发模式，能快速响应农业生产中突发病虫害的防控需求，例如在入侵性害虫侵入时，可在短时间内开发出针对性的RNA生物农药，有效降低病虫害带来的经济损失；三是RNA生物农药在应用场景上便捷且多元化，并且具有高度兼容性。其应用方式与传统化学农药类似，既可以通过叶面喷施、灌根处理、树干注射，也可结合种子包衣技术。这种多元化的应用方式，能满足不同作物、不同生育期及不同病虫害类型的防控需求，又极大地降低了农户的使用门槛，因此，便于在农业生产中快速推广应用。

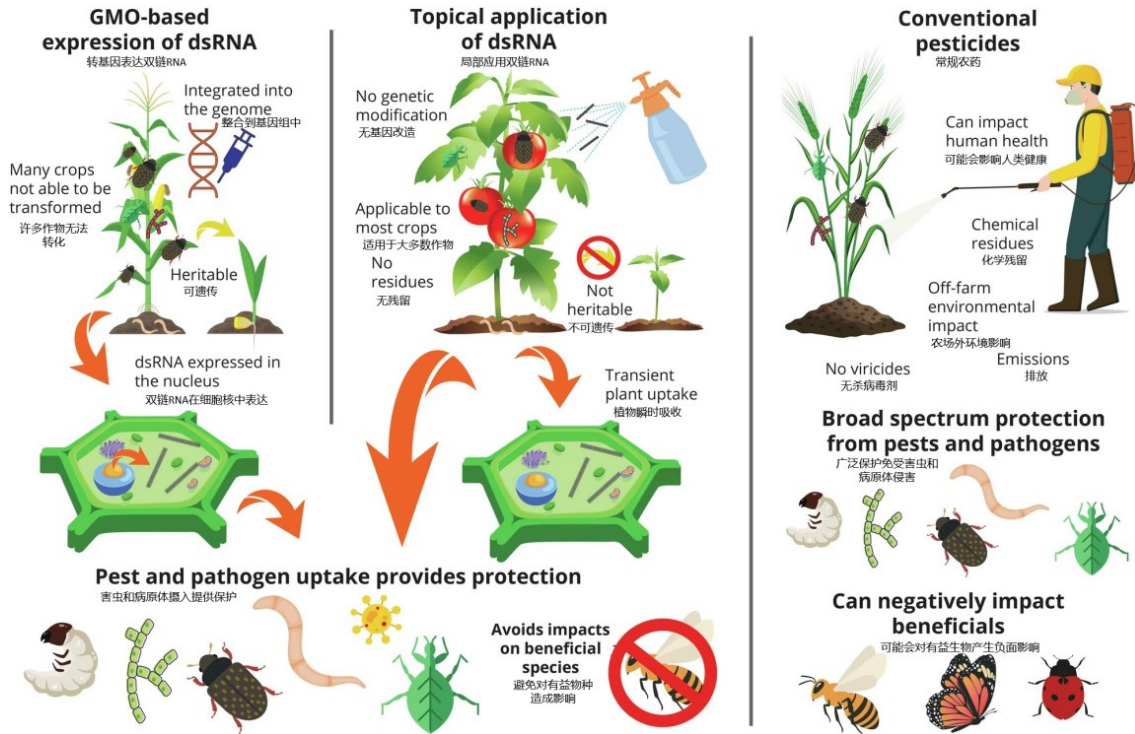


图1 基于RNAi的害虫防治的田间应用方案 (Tardin-Coelho *et al.*, 2025)

Fig. 1 RNAi-based pest control field application schemes (Tardin-Coelho *et al.*, 2025)

2 RNA 生物农药研究历程及商业化进程

为了获得更多的粮食，人类自有农业生产活动以来，就一直与各种农业有害生物作斗争，而农药是人类与农业有害生物斗争的一种工具（陈万义，1998）。随着科技的进步，农药的发展和迭代大致经历了化学农药的应用、转基因作物商业化种植、RNA生物农药这三次革命。RNA生物农药可将化学农药和转基因的优势技术合二为一，它既继承了化学农药应用灵活便捷的特点，又兼具转基因作物靶向性强、长效防控的优势，RNA生物农药仅针对有害生物的特异性基因发挥作用，对非靶标生物无影响，且能通过持续沉默靶基因实现高效防控。

RNAi是RNA生物农药的核心作用机制，指dsRNA可以抑制同源基因表达，引起靶标基因的沉默，1998年这个过程被美国科学家Fire等人证实（Fire *et al.*, 1998），并于2006年获得诺贝尔生理或医学奖，为RNAi技术的产业化探索奠定了坚实的理论基础。此后经过二十余年的研究，RNAi技术在农业领域的应用逐步从实验室走向实际生

产。2007年，中国科学院上海生命科学研究院陈晓亚院士团队与孟山都公司同步作出了具有里程碑意义的研究成果，在《自然·生物技术》杂志发表了一种植物介导的RNAi技术，可以有效、特异地抑制昆虫基因的表达，从而抑制害虫的生长（Baum *et al.*, 2007; Mao *et al.*, 2007），该论文是“第一次成功报道利用植物自生表达昆虫基因的双链RNA来抑制植食性昆虫防御基因的研究”，这一研究成果奠定了RNA生物农药开发的基础（Baum *et al.*, 2007）。2010年起孟山都公司每年投入数百万美元进行RNA生物农药相关产品的研发，此后拜耳、先正达、陶氏化学和巴斯夫等化工巨头们也先后开始对RNA生物农药以及相关转基因产品的研发进行投资，加速推动了技术落地（高沥文等，2022）。2011年，中国科学院上海生命科学研究院首次提出了基于RNAi技术的生物农药可以像化学农药一样进行喷洒施用（Wang *et al.*, 2011），该结果明确了喷雾型RNA农药的技术可行性，为后续SIGS技术的发展提供了重要理论指引；2013年，孟山都公司介绍了利用RNAi进行草甘膦抗性杂草治理的试验结果，证明RNAi不仅可防控害虫，还能针对性解决农业生产中日益严峻的杂草

抗性问题的研究，为杂草绿色防控提供了新方案（陈良和苏少泉，2013）。2017年1月，澳大利亚昆士兰大学昆士兰农业与食品创新联盟和昆士兰大学生物工程与纳米技术研究所报道了一种新型纳米粘土颗粒材料介导的RNAi可持续抵御植物病毒感染的研究，可有效延长抗病毒作用时间达20 d，有效解决RNA农药易降解、持效期短的技术瓶颈（Mitter *et al.*, 2017）。同年6月，孟山都公司表达针对玉米根萤叶甲 *Diabrotica virgifera virgifera* Snf7基因的抗虫转基因玉米（Mon87411）获得美国环境保护署（Environmental Protection Agency, EPA）批准，这是全球首例将RNAi技术用于生物防治领域，标志着RNAi技术正式进入农业生产应用阶段。2019年，美国食品和药物管理局（Food and Drug Administration, FDA）批准了将一个转基因棉花品种用作人和其他动物的食品原料，该品种利用RNAi技术，让相关基因保持“沉默”，消除了棉花籽中的棉籽酚成分。2021年，澳新食品标准局（Food Standards Australia New Zealand, FSANZ）批准基于RNAi的耐除草剂和抗虫玉米产品用于食品，进一步验证了RNAi技术在作物性状改良与食品安全领域的可靠性，推动该技术在全球范围内的认可度提升。2023年，EPA正式批准登记了全球首个RNA生物农药，一款专门用于防治马铃薯头号害虫马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* 的可喷洒的RNA生物农药，该产品的获批，不仅填补了全球RNA生物农药登记的空白，更证明了喷雾型RNA农药的商业化可行性，为RNA生物农药的大规模应用开辟了新路径。2025年，EPA拟再次批准了针对蜜蜂瓦螨 *Varroa destructor* 的第二款RNA生物农药，可通过特异性沉默瓦螨的关键基因实现防控蜜蜂寄生虫。该产品的获批也进一步拓展了RNA生物农药的应用场景，展现出该技术在绿色农业与生态保护中的巨大潜力。

在此之间，我国对此项技术给予了高度重视，2018年，中国农药工业协会首次提出了“RNA农药将对行业产生颠覆性的影响”；2022年，RNA生物农药进入我国“十四五全国农药产业规划”优先发展目标；2024年，农业农村部发布《全国农业科技创新重点领域（2024–2028年）》，再次将RNA生物农药列为重点发展领域。

3 RNA生物农药研究面临的产业化挑战

RNA生物农药从实验室走向田间的路径，挑战与机遇并存，在技术方面、环境风险评估、人类健康风险评估、RNA生物农药开发过程中的人才储备和政策层面仍有诸多因素要考虑（Tardin-Coelho *et al.*, 2025）。

一是技术上要考虑dsRNA的有效设计、低成本生产、稳定性等问题，RNA生物农药的核心在于设计高效且安全的dsRNA分子，当前的dsRNA设计主要集中在靶标基因的序列分析，缺乏全面的转录组水平评估，导致靶标筛选效率低且易产生脱靶效应。此外，现有的dsRNA设计工具多是基于模式生物的基因数据，而实际田间有害生物种类繁多，使得现有工具无法适用于非模式的有害生物，严重制约了RNA生物农药的创制范围和应用场景（Chen *et al.*, 2025）。dsRNA的合成成本是RNA生物农药商业化应用的一个突出问题，通过化学合成方法生产出dsRNA，效率较低且价格昂贵，如何工业化地生产dsRNA是RNA生物农药商业化进程中面临的挑战。目前已经有家公司构建了规模化dsRNA合成工艺路径，大大降低了dsRNA的合成成本；同时，由于dsRNA属于核酸类物质，在大田环境中易发生降解，如何保持RNA生物农药的稳定性，保证其货架期，对于RNA生物农药商业化落地也是至关重要的。

二是环境风险评估上要注意dsRNA的残留量、对非靶标物种的影响以及环境安全性。传统农药的残留检测方法相对成熟，有气相色谱质谱联用检测法、酶联免疫吸附测定法、免疫层析检测法以及高效液相色谱检测法等，而对于RNA生物农药应用过程中释放的dsRNA在环境中的存在及降解情况的检测（Mendelsohn *et al.*, 2020），也亟需开发相对便捷、高效、灵敏的检测方法，以明确dsRNA在环境中的持续时间、迁移范围及降解产物，为环境风险评估提供数据支撑。RNA生物农药对非靶标物种的影响究竟如何，是其应用之前亟需进一步研究的关键问题，尽管实验室研究表明，dsRNA仅对序列高度同源的靶标生物起作用，但田间生态系统复杂多样，存在大量非靶标生物，这些都是在RNA农药田间规模化应用之前，需要明确解决的。在安全性上，渗入到植物内部的游

离RNA在进入人体后会不会产生副作用、人类吸收此类RNA后是否有相关风险也尚需继续考证,尽管现有研究表明,人体消化道中的核酸酶可降解大部分外源RNA,且RNA分子难以通过肠道屏障进入血液循环,但长期、低剂量摄入的潜在风险仍需通过大规模、长期的安全性试验进一步验证。

三是人才储备上要加强,RNA生物农药开发及研究需要专业技术人才,特别是在植保学、生物工程、制药技术等方面,应考虑如何加强人才的培养、引进和使用,提高研究和生产人员的素质和能力,推进RNA生物农药领域的科技创新和产业发展。

四是完善监管政策体系,打通商业化路径。RNA生物农药和其他新型农药一样,监管政策的确立是其商业化的前置条件,传统农药的审批流程及相关政策已比较成熟,而RNA生物农药作为新产品、作为一个强监管严监管的领域,要严格评估其有效性、环境影响、安全性,尤其要考虑到它可能涉及基因层面的影响。而目前监管政策的研究和建设正处于新阶段,也还没有针对性的法律法规,其在成果转化、产业化及商业化上仍面临挑战 (Schutter *et al.*, 2022)。

4 RNA生物农药在不同国家的监管政策

RNAi技术作为农药领域的革命性工具,正以其独特优势重塑农业病虫害防控格局,其能够提高作物生产力、减少农药残留、提高农业生产效率,同时最大限度地减少健康和环境危害,为农业可持续发展提供有力支撑 (Mendelsohn *et al.*, 2020; Schutter *et al.*, 2022; Tardin-Coelho *et al.*, 2025)。但是,不同国家针对这一新型技术,态度不同,相应的监管政策也存在差异。

针对喷洒型RNA生物农药,由于其特殊性,给政策制定者带来了更多监管模糊性和治理挑战。相较于传统转基因作物,喷洒型RNA生物农药虽凭借更高的精确性与作用效率备受青睐,但其快速迭代的技术特性与尚不明确的长期影响,对现有风险评估体系提出了严峻考验。

潜在的环境风险是围绕喷洒型RNA生物农药需要关注的关键问题之一。例如,dsRNA分子在

环境中的持久性和传播路径如何。dsRNA在土壤环境中能否被降解、降解产物是否具有活性,能否通过地表径流进入水体影响水生生物,或通过植物残体进入食物链引发富集效应,这些问题仍需更系统的科学数据支撑 (Fletcher *et al.*, 2020; Schutter *et al.*, 2022)。

从伦理角度来看,针对RNA生物农药的主要担忧之一是脱靶问题。dsRNA可能无意中沉默非靶标生物中的基因,包括对农业生产至关重要的有益昆虫、土壤微生物群,甚至是通过环境接触暴露的人类。这些非靶标生物的生态功能具有不可替代性,一旦其生存受到RNAi技术的潜在威胁,将对长期农业可持续性造成连锁破坏。因此,需要用整体思维评估和指导RNA生物农药的研发和应用。

从法律角度来看,喷洒型RNA生物农药带来了监管分类和协调方面的挑战 (Rinaldi *et al.*, 2022)。现有法律体系难以对其进行精准归类,导致监管分类与国际协调面临重重挑战。目前世界范围内,仅有2款产品获得美国EPA批准,其余国家还没有产品,也没有相应的政策法规。一些人认为,应调整现有植物保护产品 (Plant Protection Products, PPP) 的风险评估框架,针对性纳入dsRNA的特性指标;另一部分观点则坚持,RNAi技术涉及基因层面的调控,应作为基因工程产品的特殊类别进行严格监管。针对RNA生物农药的监管,支持者主张澄清监管模糊性,并采用适当且标准化的风险评估方法来评估喷洒型RNA生物农药,避免因政策不明确阻碍技术转化。

美国环境保护署将喷洒型RNA生物农药纳入现行农药法规体系,主要依据《联邦杀虫剂、杀菌剂和灭鼠剂法》(Federal Insecticide, Fungicide, and Rodenticide Act, FIFRA)与《联邦食品、药物和化妆品法》(Federal Food, Drug, and Cosmetic Act, FDCA)开展评估,同时在《联邦法规》第40篇第158部分提供生化农药专项指南,2023年《农药改进法案》(Pesticide Registration Improvement Act, PRIA 5)进一步明确其可归类为“植物嵌入式农药 (Plant Incorporated Protectant, PIP)”。欧盟则通过欧洲食品安全局 (European Food Safety Authority, EFSA) 将其归为化学农药,严格遵循《法规 (EC) 1107/2009》的审批流程;马来西亚、印度等国则参考《卡塔赫纳议定书》,

沿用转基因产品的监管框架,对其实施严格的基因安全评估。在澳大利亚,2019年10月8日《2001年基因技术条例》修正案生效前,喷洒型RNA生物农药需同时接受基因技术监管办公室(Office of the Gene Technology Regulator, OGTR)与澳大利亚农药与兽药管理局(Australian Pesticides and Veterinary Medicines Authority, APVMA)的双重监管;修正案则明确了“非转基因”的监管边界—若施用的RNA不能被翻译成多肽、不会改变生物体基因组序列且不产生传染性因子,相关技术即不构成“基因技术”,由此产生的生物体也不属于转基因生物,自此后仅由APVMA按农用化学品进行监管,豁免了复杂的基因技术法规审查,为RNA生物农药的审批简化了流程。

不同司法辖区的监管框架在对RNA生物农药的监管和评估方式上存在差异,已成为制约其产品开发与市场准入的关键因素之一。监管政策的不统一,企业需针对不同国家调整研发与申报策略;另一方面,在许多国家, RNA生物农药受现有化学农药框架监管,且评估方法往往较为传统,无法充分覆盖RNAi技术的基因层面风险,而部分国家过度依赖转基因监管框架,又可能因流程冗长延缓技术落地。总而言之,目前RNA生物农药登记在不同国家的政策法规差异较大(Tardin-Coelho *et al.*, 2025),这种不同国家政策的差异,也为全球RNA生物农药监管协调提出了亟待解决的问题。

5 RNA生物农药前景展望

作为农药领域的革命性技术, RNA生物农药优势显著,其研究发展也相当迅速,随着绿色农业理念的深入推广和科技的不断进步, RNA生物农药有望迎来快速发展,并将在以下几个方面呈现爆发式突破:

一是RNA生物农药研发不断进行技术创新。技术上将聚焦如何提高靶标基因选择的精确性、降低生产成本以及增强环境稳定性。通过快速高效挖掘有价值的分子靶标、加强有害生物农药分子靶标的结构解析;通过生物信息学方法,预测可能的脱靶效应,避免选择可能脱靶的靶标基因,提高靶标选择的精准性;研究利用微生物发酵、

植物生物反应器或无细胞方式表达合成dsRNA,以降低RNA生物农药的生产成本;开展如纳米载体技术、复配制剂研究,对dsRNA进行修饰或者包埋,以稳定dsRNA并确保RNA生物农药货架期。

二是RNA生物农药研究将推进生命科学、信息、农学等学科交叉融合。RNA生物农药研究已突破单一学科边界,将利用基因编辑等新兴生物技术、人工智能等计算信息技术、农药制剂纳米化技术等,设计基于dsRNA的活性成分、建立靶标基因的智能化筛选系统、完成RNA生物农药低成本规模化生产和纯化工艺,推进多学科协同与渗透、新技术交叉与集成、行业间跨界与整合,加快形成和发展农药新质生产力,综合提升创新研究水平。通过生命科学、信息科学、材料科学领域的深度融合,形成“基础研究-技术开发-产品转化”的完整创新链条,全面提升RNA生物农药领域的科技创新水平与产业竞争力。

三是RNA生物农药产品将逐步得到市场认可。RNA生物农药的技术原理使其具备了众多先天优势,其应用可显著减少化学农药的用量,降低化学农药导致的环境污染、天敌锐减、害虫抗药增强、农药残留等不良生态影响,其商业化和田间应用将使植保技术更加完善(Rinaldi *et al.*, 2022),目前,国际上有很多农药公司和研究机构投入大量人力、物力开展RNA生物农药的研发工作,并已经有相应的产品上市,我国在该领域基础研究较早,有一些具有前瞻性视野农药生产企业,也对此领域进行了布局,随着该技术的不断成熟,必然带来新产品的广泛应用,最终实现RNA生物农药的广泛市场化。助力农药防控体系转型升级,并成为全球农业病虫害绿色防控体系的核心产品之一。

参考文献 (References)

- Baum JA, Bogaert T, Clinton W, *et al.* Control of coleopteran insect pests through RNA interference [J]. *Nature Biotechnology*, 2007, 25: 1322-1326.
- Cao JC, Nong JY, Chen Y, *et al.* Research progress on the application of host-induced gene silencing in the control of *Sclerotinia sclerotiorum* [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2024, 470: 102-106.
- [曹建承, 农杰英, 陈祎, 等. 宿主诱导的基因沉默在菌核病防治中的应用研究进展 [J]. 湖南农业科学, 2024, 470: 102-106]

- Carpenter JE. Peer-reviewed surveys indicate positive impact of commercialized GM crops [J]. *Nature Biotechnology*, 2010, 28: 319–321.
- Chen L, Su SQ. Current status of glyphosate-resistant weeds and implications for control using RNA interference [J]. *World Pesticides*, 2013, 35: 30–33. [陈良, 苏少泉. 草甘膦抗性杂草现状及利用RNA干扰进行治理的启示 [J]. 世界农药, 2013, 35: 30–33]
- Chen WY. From the development history of pesticides to see the pesticides of the 21st century. In: China Agricultural University, ed. Proceedings of the Academic Annual Conference "Science and Technology Facing the New Century" on Scientific and Technological Progress and Discipline Development [C]. Beijing: China Agricultural University, 1998: 737–742. [陈万义. 从农药发展历程看21世纪的农药. 见: 中国农业大学编. 科技进步与学科发展—“科学技术面向新世纪”学术年会论文集 [C]. 北京: 中国农业大学, 1998: 737–742]
- Chen XJ, Shi T, Chen C, et al. Research progress on spray-induced gene silencing (SIGS) technology for plant disease control [J]. *Plant Protection*, 2022, 48:15–22. [陈夕军, 石童, 陈宸, 等. 喷施诱导的基因沉默 (SIGS) 技术控制植物病害研究进展 [J]. 植物保护, 2022, 48: 15–22]
- Chen Y, Shi Y, Wang Z, et al. dsRNA Engineer: a web-based tool of comprehensive dsRNA design for pest control [J]. *Trends in Biotechnology*, 2025, 43: 969–983.
- Fire A, Xu SQ, Montgomery MK, et al. Potent and specific genetic interference by double-stranded RNA in *Caenorhabditis elegans* [J]. *Nature*, 1998, 391: 806–811.
- Fletcher SJ, Reeves PT, Hoang BT, et al. A perspective on RNAi-based biopesticides [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11:51.
- Gao LW, Chen SG, Zhang Y, et al. Development status and prospects of RNA interference-based biopesticides [J]. *Modern Agrochemicals*, 2022, 38: 700–715. [高泚文, 陈世国, 张裕, 等. 基于RNA干扰的生物农药的发展现状与展望 [J]. 现代农药, 2022, 38: 700–715]
- Guan M, Chao ZJ, Yan S. Research status and development prospects of RNA pesticides [J]. *Modern Agrochemicals*, 2022, 22: 11–18. [关梅, 臧子健, 闫硕. RNA农药的研究现状和发展前景 [J]. 现代农药, 2022, 22: 11–18]
- Guan RB, Li HC, Miao XX. Commercialization status and existing problems of RNA biopesticides [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55: 2949–2960. [关若冰, 李海超, 苗雪霞. RNA生物农药的商业化现状及存在问题 [J]. 中国农业科学, 2022, 55: 2949–2960]
- Huang JK, Hu RF, Rozelle S, et al. Transgenic varieties and productivity of smallholder cotton farmers in China [J]. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 2002, 46: 367–387.
- Mao YB, Cai WJ, Wang JW, et al. Silencing a cotton bollworm P450 monooxygenase gene by plant-mediated RNAi impairs larval tolerance of gossypol [J]. *Nature Biotechnology*, 2007, 25: 1307–1313.
- Mendelsohn ML, Gathmann A, Kardassi D, et al. Summary of discussions from the 2019 OECD conference on RNAi based pesticides [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 740.
- Mitter N, Worrall EA, Robinson KE, et al. Clay nanosheets for topical delivery of RNAi for sustained protection against plant viruses [J]. *Nature Plants*, 2017, 3: 16207.
- Qaim M, Zilberman D. Yield effects of genetically modified crops in developing countries [J]. *Science*, 2003, 299: 900–902.
- Rinaldi A, Mat Jalaluddin NS, Mohd Hussain RB, et al. Building public trust and acceptance towards spray-on RNAi biopesticides: lessons from current ethical, legal and social discourses [J]. *GM Crops & Food*, 2022, 16: 398–412.
- Schutter KD, Taning CNT, Daele LV, et al. RNAi-based biocontrol products: market status, regulatory aspects, and risk assessment [J]. *Frontiers in Insect Science*, 2022, 1: 818037.
- Tardin-Coelho R, Fletcher S, Manzie N, et al. A systematic review on public perceptions of RNAi-based biopesticides: developing social licence to operate [J]. *npj Sustainable Agriculture*, 2025, 3: 15.
- Wang CJ. Study on the population dynamics and control timing of corn aphid in corn fields [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 1997, 25 (3): 58–61. [王存晋. 玉米田玉米蚜发生动态与防治适期研究 [J]. 山西农业科学, 1997, 25(3): 58–61]
- Wang YB, Zhang H, Li HC, et al. Second-generation sequencing supply an effective way to screen RNAi targets in large scale for potential application in pest insect control [J]. *PLoS ONE*, 2011, 6: e18644.
- Wu KM, Lu YH, Feng HQ, et al. Suppression of cotton bollworm in multiple crops in China in areas with Bt toxin-containing cotton [J]. *Science*, 2008, 321: 1676–1678.
- Yin YZ. Studies on the occurrence pattern and control of corn aphid [J]. *Plant Protection*, 1980, 6 (2): 10–12. [尹永忠. 玉米蚜发生规律及其防治研究 [J]. 植物保护, 1980, 6 (2): 10–12]
- Yuan Y, Yang HY. Development history and application prospects of biopesticides in China [J]. *South China Agriculture*, 2022, 16: 59–63. [袁杨, 杨红艳. 我国生物农药发展历程及应用展望 [J]. 南方农业, 2022, 16: 59–63]
- Zhang J, Khan SA, Heckel DG, et al. Next-generation insect-resistant plants: RNAi-mediated crop protection [J]. *Trends in Biotechnology*, 2017, 35: 871–882.