

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2025.04.002

种衣剂制备工艺及其在作物健康调控中的应用进展

高翼¹, 牟白洋¹, 邓龙飞², 欧阳云鹏³, 郑志鹏⁴,
陈良玉¹, 蒋依萍¹, 严蓓¹, 刘开林¹

1. 湖南农业大学 植物保护学院, 长沙 410128; 2. 汉寿县农业农村局, 湖南 常德 415900;
3. 宁远县农业农村局, 湖南 永州 425600; 4. 茶陵县农业农村局, 湖南 株洲 412400

摘要: 种衣剂作为一种新型农药制剂, 通过黏合剂将干燥或湿润的种子包裹于农药组合内, 在种子表面形成具有特定功能与一定强度的保护膜。其主要组成成分包括活性成分(如农药原药、微肥等)和非活性成分(如成膜剂等助剂), 成膜性是其显著特征。首先综述了种衣剂的组成成分、种子包衣技术以及种衣剂在作物健康调控中应用的最新研究进展, 其中, 种子包衣技术包括拌种、薄膜包衣和造粒等类型, 包衣工艺有滚筒式、喷雾式和流化床包衣等; 进一步详细阐述了杀菌剂、杀虫剂、植物生长调节剂与微量元素、有益微生物等成分在种衣剂中对作物健康调控的核心功能, 包括病虫害防控、促生长与增产、增强抗逆性等功能; 并深入剖析该领域面临的主要问题, 提出未来种子包衣技术应朝着环保、低毒、低残留的方向发展, 尤其是通过开发生物可降解材料和天然成分, 提升种衣剂的安全性和效率。

关键词: 农药; 种衣剂; 包衣工艺;

作物健康调控

中图分类号: S473

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2097-1354(2025)04-0012-10

Research Progress of Preparation Technology of Seed Coating Agent and Its Application in Regulation of Crop Health

GAO Yi¹, MOU Baiyang¹, DENG Longfei², OUYANG Yunpeng³,
ZHENG Zhipeng⁴, CHEN Liangyu¹, JIANG Yiping¹,
YAN Bei¹, LIU Kailin¹

收稿日期: 2024-08-05

基金项目: 湖南省科技创新人才计划项目(2024RC8178)。

作者简介: 高翼, 硕士, 主要从事农药剂型研究。

通信作者: 严蓓, 硕士。

1. College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;
2. Hanshou County Agricultural and Rural Bureau, Changde Hunan 415900, China;
3. Ningyuan County Agricultural and Rural Bureau, Yongzhou Hunan 425600, China;
4. Chaling County Agricultural and Rural Bureau, Zhuzhou Hunan 412400, China

Abstract: Seed coating agents, as a novel type of pesticide formulation, encapsulate dry or moist seeds within a pesticide composite through adhesives, forming a protective film with specific functions and certain strength on the seed surface. Their primary components include active ingredients (such as pesticide materials, micro-fertilizers, etc.) and inactive ingredients (such as film-forming agents and other adjuvants), with film-forming capability being a distinctive feature. This review summarizes the latest research advances in the composition of seed coating agents, seed coating technologies, and their applications in crop health regulation. Seed coating technologies encompass types such as seed dressing, film coating, and pelleting, of which, coating processes including rotary drum coating, spray coating, and fluidized bed coating. Furthermore, it elaborates in detail on the core functions of components like fungicides, insecticides, plant growth regulators, trace elements, and beneficial microorganisms in seed coating agents for crop health regulation, including disease and pest control, growth promotion and yield increase, and stress resistance enhance. The paper also provides an in-depth analysis of the major challenges in this field and proposes that future development of seed coating technologies should toward environmental friendly, low-toxicity, and low-residue, particularly developing biodegradable materials and natural ingredients to improve the safety and efficiency of seed coating agents.

Key words: pesticides; seed coating agents; seed coating process; crop health regulation

中国近代种衣剂的研究始于1976年,原轻工部甜菜糖业科学研究所率先开展了甜菜种子包衣处理工作。1991年,我国颁发了首张种衣剂农药登记证,标志着种衣剂产品逐步实现制度化、商品化和标准化,成为我国最重要的农药剂型之一^[1]。现代农业生产中,化肥和农药的过度使用不仅增加了生产成本,还可能引发环境污染等社会生态问题^[2]。相比传统农药,种衣剂具有显著优势,能够降低施用成本,减少病原体和害虫对种子的危害,提高种子质量与价值,并减轻农药对环境的负面影响^[3]。种子包衣被广泛认为是推动农业可持续发展的有效手段之一,能够改善种子的物理和生理特性,提高生长指标,减轻非生物和生物胁迫,在作物健康调控中发挥重要作用^[4]。目前的种衣剂综述大多集中于特定种衣剂的研究,本文将从种衣剂的制备工艺及其在作物健康调控中的应用等方面进行全面综述。

1 种衣剂的概念与特征

种衣剂是一种具有成膜特性的剂型,用于包裹作物或其他植物的种子。其主要成分通常分为两部分^[5]:一部分是由农药原药(如杀虫剂、杀菌剂等)、微肥、植物生长调节剂等组成的活性成分,这些成分可直接或稀释后包裹于种子表面,形成具有一定强度和渗透性的农药制剂保护膜;另一部分是非活性成分,这些成分有助于维持种衣剂的理化性质,并能有效控制药剂释放的过程,例如,成膜剂、分散剂、防冻剂等经特定工艺加工的添加剂。

种衣剂区别于其他种子处理剂的显著特点之一成膜性。种衣剂以种子为载体,借助成膜剂附着于种子表面,并迅速形成均匀薄膜,这层膜具有良好的附着性和稳定性,即种衣。播种后,种衣在种子周围形成一道保护屏障。当种衣遇水时,能够在土壤中吸收水分并保持透气,从而促进种子正常发芽。此外,种衣中的农药、肥料等物质缓慢释放,为种子的生长提供必要的养

分。随着种子的发芽、生长和成苗,种衣剂中的有效成分逐渐被植物根系吸收,并输送到幼苗的各个部位,增强幼苗对病原体以及地上和地下害虫的抗性,提高作物活力,促进幼苗生长,最终提高作物产量^[6]。目前,悬浮种衣剂的应用最为广泛。

2 种衣剂的组成成分

2.1 活性成分

活性成分的主要作用是提高种子的发芽率并促进幼苗生长,保障其正常生长发育^[7]。这些活性成分包括生物刺激素、植物营养素、应对非生物和生物胁迫的保护剂以及接种剂。其中,种子保护剂是播种期病虫害防治中应用最为广泛的成分,涵盖了杀菌剂、杀虫剂、杀线虫剂等多种类型。目前已登记的种衣剂主要活性成分为杀虫剂和杀菌剂。在作物播种后,可能会出现盐碱或干旱等非生物胁迫,为了减轻这些胁迫对作物的影响,在种子包衣过程中,可以通过添加生物刺激素和营养元素等物质进行处理,从而有效缓解胁迫^[8]。

2.2 非活性成分

非活性成分又称为助剂系统,包括分散剂、悬浮剂、防冻剂、警戒色、消泡剂、成膜剂等。成膜剂是种衣剂中至关重要的助剂,是其关键的功能性成分。成膜剂的主要作用是将有效成分粘附于种子表面,并形成均匀光滑的薄膜。常用的成膜剂包括聚乙烯醇^[9]、聚醋酸乙烯酯、甲基纤维素^[10]、羧甲基纤维素^[11]和壳聚糖^[12]等。对于有机种子包衣,通常使用植物淀粉(麦芽糖糊精)^[13]和阿拉伯树胶^[14]。最新研究还发现了新兴的成膜剂,包括普鲁兰多糖^[15]和聚羟基脂肪酸酯^[16]。Skrzypczak 等^[17]研究表明,海藻酸盐水凝胶的包衣能够为植物早期生长输送养分,从而提高作物产量。

水通常是成膜剂的通用载体,在种子包衣过程中通过雾化技术被喷涂到种子表面。为了实现最佳的雾化效果,建议使用低黏度液体进行雾化,以确保液体能够均匀雾化并覆盖到种子表面。为此,需要调整液体中水的比例,确保溶液黏度保持在较低水平。

3 种子包衣技术

3.1 种子包衣的类型

种子包衣是一项通过人工或机械方法,将种衣剂按一定比例均匀地包裹在种子表面的加工技术,其目的是提高作物的产量和品质。种子包衣技术的主要类型包括拌种、薄膜包衣和造粒,可根据应用目的、种子种类或所选微生物的特性进行针对性选择^[18]。

拌种是最基本的包衣处理技术,即在种子表面撒上少量细碎的固体,通常用于农药施用^[19]。Shahzad 等^[20]研究发现,使用多菌株拌种处理的小麦种子能够促进小麦生长发育,并显著提高产量。张熙等^[21]研究中,采用 24.1% 脲菌·异噻胺种子处理悬浮剂、600 g/L 吡虫啉悬浮种衣剂和 0.136% 赤·吲乙·芸可湿性粉剂组合进行水稻药剂拌种,提高了秧苗素质,促进了秧苗白根生长,并减少了农药使用量。

薄膜包衣被认为是一种较新的方法,在这种方法中,一层薄薄的材料被均匀包裹在种子表面,而种子的形状、大小和质量几乎没有变化。它也可以视为传统浆液包衣的改良版,后者虽然将溶液或悬浮液应用到种子表面,但其包衣的均匀性和附着力较差^[22]。此外,薄膜包衣不仅能够提高加工精度,还能减少粉尘的产生。薄膜包衣是一种成熟的技术,已广泛应用于多种高价值园艺作物和其他重要农作物,例如,玉米、向日葵、大豆和油菜^[23]。与其他类型的种子包衣相比,薄膜包衣对种子萌发过程的干扰较小,且能够确保有效成分及时释放^[24]。

造粒是一种在种子表面施用填料和液体黏合剂的过程,通常会显著增加种子的质量和体

积。通过造粒,种子的形状变为球形或卵圆形,从而难以辨认出最初的种子形态^[25]。与之不同的是,如果在加工后,原始种子的形状仍然保持,则称该过程为“结壳”^[26]。通过造粒和结壳工艺,不仅可以增加有效成分的使用量,还能优化种子的处理和播种过程,尤其是在处理形状不规则的种子时,这一技术展现出了显著的优势。

3.2 种子包衣的工艺流程

目前,种子包衣的主要工艺包括喷雾式包衣、流化床包衣和滚筒式包衣。喷雾式包衣常用的设备为旋转锅,适用于造粒、结壳、修边及薄膜包衣。旋转锅的工作原理为:种子在倾斜圆盘内随旋转缓慢移动,包衣液通过雾化后逐层包覆,随后通过筛分和干燥完成工艺。除了旋转锅,薄膜包衣和结壳也可以使用流化床技术实现。根据喷嘴位置的不同,流化床技术主要分为顶喷、底喷和侧喷3种类型^[27]。

典型的流化床包衣工艺包括以下步骤:首先,包衣液通过喷嘴被雾化成喷雾液滴,在热流化空气的作用下,颗粒保持流化状态。当颗粒通过包衣区域时,喷雾液滴均匀喷洒到颗粒表面。液滴与颗粒接触后,渗透进颗粒表面,形成一层薄膜。该过程可能需要多次重复,以确保包衣的厚度和均匀性达到要求。随着颗粒继续暴露在热气流中,包衣迅速干燥,最终形成具有不同功能的包衣颗粒,直至达到所需的厚度或质量^[28]。

目前,另一种广泛用于种子包衣的设备是旋转包衣机,即滚筒式包衣机。该设备包括一个带有两个旋转底盘的圆柱形滚筒和一个凹形滚筒,通过旋转使种子沿滚筒壁稳定移动。此外,还配有一个较小的装置,用于将液体或浆料形式的包衣材料雾化后喷射到旋转的种子上。尽管大多数科学出版物提供了关于设备基本信息和使用方法,但许多种子包衣程序仍由专业公司执行^[29]。

4 种衣剂在作物健康中的功能作用

4.1 防治作物病虫害

种衣剂含有杀虫剂和杀菌剂,能够在作物苗期缓慢释放,有效灭除地下害虫和病原菌,并通过内吸作用传导至植株上部。这样不仅有助于提升种子质量,还能防控苗期害虫和系统性侵染病害。例如,24.1%肟·异噻胺悬浮种衣剂包衣水稻种子防治稻瘟病,效果随剂量增高而显著提高^[30];45 g/L 甲霜·种菌唑种衣剂用量为500 g/100 kg时,对棉苗立枯病防效最佳,齐苗后6 d,对棉苗立枯病的防效达到75.45%^[31];14%丙硫菌唑·吡唑醚菌酯·呋虫胺和14%噻呋酰胺·吡唑醚菌酯·呋虫胺拌种,能显著防治小麦根腐病与纹枯病,并促进出苗^[32];含简单酚酸类化合物的种子包衣能有效防控大豆孢囊线虫,同时不影响大豆早期生长^[33]。因此,包衣有效成分在苗期的释放与传导特性,似乎为种子幼苗铸就了“防护铠甲”。

4.1.1 杀虫剂

早期种衣剂中的杀虫剂多为有机磷类,例如,毒死蜱等。毒死蜱由美国陶氏化学公司于1965年开发并商品化,具有触杀、胃毒和熏蒸作用,能防治多种害虫。然而,由于其高毒性、持久残留及生态风险,毒死蜱已被欧美多国禁用,我国也于2016年禁止其用于蔬菜种植。目前,登记的种衣剂中仅有6个复配产品,主要用于粮食作物。目前种衣剂中常用的杀虫剂包括吡虫啉、噻虫嗪、噻虫胺等烟碱类杀虫剂,以及氟虫腈、硫双威、氯氰菊酯和辛硫磷等。刘景坤等^[34]的研究表明,50%噻虫嗪悬浮种衣剂对棉蚜具有良好的防治效果;田间试验结果显示,当施用的有效剂量为187.5 g/hm²时,防治效果最佳,50%噻虫嗪种子包衣对棉花4叶期、5叶期蚜虫的防治效果分别达到83.94%和53.94%;该研究证实了噻虫嗪种衣剂对棉蚜的显著防控效能,为田间精准施药提供了理论依据,有助于在保障防治效果的同时,最大程度地优化资源利用并降低潜在的环境风险。张帅等^[35]在山东齐河和河南临营进行了复合种衣剂防治小麦病虫

害的示范试验, 研究结果显示, 31.9%戊唑醇·吡虫啉悬浮种衣剂以及 10%苯醚甲环唑悬浮种衣剂与 70%吡虫啉悬浮种衣剂复配处理的种子, 对小麦蚜虫的防治效果均在 90%以上。针对新入侵害虫草地贪夜蛾, 甘林等^[36]筛选了 5 种杀虫剂种衣剂, 并在田间条件下开展了关于玉米的出苗率和保苗率实验, 发现 50.00%氯虫苯甲酰胺种衣悬浮剂(5 g/kg 拌种处理)在玉米苗期对草地贪夜蛾的防治效果显著, 防治效果为 64.15%。目前, 登记的种衣剂主要针对地下害虫和蚜虫等刺吸性害虫, 而防治草地贪夜蛾或其他鳞翅目害虫的种衣剂仍需进一步研究。

4.1.2 杀菌剂

种衣剂中的杀菌剂可防治种传病害和土传病害。种子周围形成的包衣膜在吸水膨胀时构建多孔结构, 调控杀菌剂的释放速率, 从而阻挡病菌入侵, 降低病原菌基数, 提升出苗率和幼苗成活率。目前种衣剂中常用的杀菌剂包括咯菌腈、苯醚甲环唑、戊唑醇、灭菌唑、精甲霜灵、多菌灵等化学农药。Lamichhane 等^[37]研究了在油菜种子处理中单独使用氟唑唑作为杀菌剂, 发现有效成分为 6.6 g/kg 的氟唑唑种子处理大大降低了油菜黑茎病的严重程度, 并在 4 个田间地点提高了产量。除了单独使用杀菌剂外, 种衣剂中的杀菌剂通常与其他成分协同作用。Tian 等^[38]研究表明, 大黄素甲醚与几种杀菌剂混合的种子包衣对促进植物生长和防治小麦白粉病具有良好效果; 田间试验显示, 大黄素甲醚与井冈霉素、嘧啶核苷酸按 1:50 复配时, 出苗率, 分蘖数, 对白粉病的防治效果, 抗坏血酸过氧化物酶(Ascorbate Peroxidase, APX)、谷胱甘肽还原酶(Glutathione Reductase, GR)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性, 光合色素水平及产量均达到最高。这为小麦防病增产提供了有效途径, 并为大黄素甲醚的合理应用奠定了基础。不同研究中的种衣剂所含杀菌剂在防控各自目标作物病害方面均显示了显著效果, 且部分产品还具有促进植物生长的作用, 为农业生产中的病害防治和作物增产提供了有力支持。

4.2 促进幼苗生长, 提高作物产量

4.2.1 植物生长调节剂与微量元素

种衣剂中的植物生长调节剂在促进种子萌发、幼苗生长以及增强作物抗逆性方面具有不可替代的作用。Khodadadi 等^[39]对甜菜种子包衣与植物生长调节剂对种子萌发及幼苗生长特性的影响进行了研究, 结果表明: 体积分数为 0.6%、0.4%和 0.2%的乙烯溶液 100 mL 能够显著提高甜菜种子的发芽率, 并缩短达到 10%和 90%发芽率所需的时间; 而用相同体积分数的赤霉素处理后, 种子的萌发率显著降低, 达到 10%和 90%的萌发时间延长。这可能是因为乙烯通过激活 CTR1-EIN2 信号通路, 解除种子休眠并促进胚根伸长^[40]。高浓度赤霉素抑制萌发的原因可能与 DELLA(植物特异性核蛋白 GRAS 家族中的核转录调节因子)蛋白过度降解有关^[41], 从而导致脱落酸信号未被拮抗。在其他种子处理中, 赤霉素质量浓度为 0.08%和 0.12%以及乙烯体积分数为 0.2%处理的根干质量高于其他处理, 这一结果表明种衣剂中的不同植物生长调节剂对种子萌发和幼苗生长具有不同的促进效果。种衣剂中的植物生长调节剂通过成膜剂的缓释作用能够持续促进种子的生长发育。Larson 等^[42]发现, 将液体乙基纤维素和赤霉素酸应用于生理休眠的种子, 可以缓释赤霉素酸以诱导种子发芽。在 15 °C 和 25 °C 下, 种子萌发率分别提高了 3.0 倍和 3.9 倍, 乙基纤维素包衣的赤霉素缓释系统持续诱导 α -淀粉酶的表达, 从而提升了生理休眠种子的萌发率。

除了植物生长调节剂外, 种衣剂中的微量元素也能促进作物的生理代谢, 并提高作物的产品质量。Chen 等^[43]以玉米为研究对象, 研究了硼(B)、铁(Fe)、锰(Mn)、钼(Mo)和锌(Zn)等元素的硫酸盐对玉米萌发、幼苗生长、种子产量、种子品质以及种子微量元素的影响。包膜处理后, B、Zn、Fe、Mn、Mo 等微量元素在玉米种子中积累较多, 与未处理对照组相比, 显著提高了玉米种子的产量和质量。植物生长调节剂与微量元素通过协同调控种子生理代谢, 覆盖从

种子萌发、幼苗生长到成熟的全生育期,进而实现健康调控目标。

4.2.2 有益微生物

国内外对利用植物有益微生物提高农作物产量和适应性的研究热度不断增加^[44]。种衣剂通过调节种子周围的土壤微生物环境,能够促进种子的萌发与幼苗生长^[45]。微生物种衣剂的研究大多集中于植物促生长微生物(Plant Growth-Promoting Bacteria, PGPB)的应用。在PGPB中,假单胞菌和芽孢杆菌最常用,主要作为植物生长促进剂^[46]。除了常见的PGPB外,Meena等^[47]的研究表明,木霉菌包衣的水稻种子能够显著提高水稻的萌发率和存活率。木霉菌通过分泌几丁质酶降解病原菌的细胞壁,并激活植物的茉莉酸/乙烯信号通路^[48],从而诱导系统抗性并提高水稻种子的存活率。Marelli^[49]开发了一种基于蚕丝的种子包衣技术,旨在输送植物根际促生菌(Plant Growth-Promoting Rhizobacteria, PGPRs);该技术克服了PGPRs在土壤外及干燥条件下活性受限的问题;通过蚕丝与多糖结合,粘附于种子表面,干燥时包裹并保存细菌,同时调控其在种子微生物圈中的输送与生长。这项研究为种子包衣技术与植物有益微生物的协同应用开辟了新的方向。有益微生物不仅可以单独应用,也可以与其他有效成分共同包衣。陈丽华等^[50]为充分发挥甲基营养型芽孢杆菌菌株LH-L3的抑菌和促生长特性,将其作为复合种衣剂的主要成分,并制备了包含克百威10%、咯菌腈2.5%、福美双10%、109 cfu/mL LH-L3的种衣剂;研究表明,该复合种衣剂的防治效果显著优于未加入芽孢杆菌的种衣剂,这可能是因为甲基营养型芽孢杆菌菌株LH-L3通过产出挥发性有机物,促进PR1基因的表达^[51],从而与化学杀菌剂协同作用,抑制病原菌孢子的萌发。

4.3 增强作物对胁迫环境的忍耐力

在农业生产领域,种子包衣技术展现了多方面的积极影响。在常规土地环境中,种子包衣能够有效促进作物生长并提升产量;而在特殊环境下,亦发挥着至关重要的作用。

在盐胁迫条件下,相关试验结果表明,当水杨酸和脯氨酸作为高粱种子包衣的有效成分时,所培育的高粱幼苗在发芽率、株高、根长、干质量及鲜质量等关键生长指标上显著优于未进行包衣处理的高粱幼苗,表现出更加卓越的耐盐特性^[52]。这一现象可能是因为水杨酸通过激活抗氧化酶系统,清除活性氧,减少膜脂过氧化,同时上调耐盐基因的表达,促进Na⁺的外排与K⁺的吸收,维持了离子稳态;而脯氨酸作为渗透调节物质,通过降低细胞渗透势,保护酶活性和膜结构的完整性,增强了种子的水分保持能力。Neamatollahi等^[53]使用不同的化合物和组合对甜菜种子进行包衣处理,所使用的物质包括微量元素(如铁、锌、铜、锰、钴和钼)、大量元素(如氮、磷和钾)、腐植酸、赤霉素酸、高岭土和壳聚糖等。通过对30种不同处理方式的效果进行评估,在盐胁迫和干旱胁迫条件下,含微量元素和大量元素、腐植酸、赤霉素酸的处理组合效果最佳;该研究结果表明,种子包衣能够显著减缓盐胁迫和干旱胁迫所造成的不良影响。

研究还表明,在淹水条件下,过氧化钙包衣的水稻种子能显著提高幼苗活力^[54];过氧化钙包衣的水稻种子在淹水环境中,氧水平显著提升,种子的呼吸作用和酶活性也得到了增强,促进了水稻植株的生长发育。同时,淹水环境对杂草的生长也起到了抑制作用^[55]。因此,过氧化钙水稻种子包衣技术在淹水条件下能有效提高幼苗出苗率,为水田作物的种植提供了有力的技术支持和保障。

此外,外包黑色素能有效保护种子免受电离辐射的伤害。Swaraj等^[56]发现,增加黑色素包膜浓度能够显著提高玉米种子在Cs-137(铯)和Co-60(钴)辐射下的发芽率。使用0.5 kGy的Co-60辐射时,未包裹黑色素的种子死亡率为50%~60%,而包裹黑色素的种子存活率几乎达到100%。这一研究表明,含有黑色素的包膜材料能够为种子提供有效的辐射屏蔽,具有重要的应用价值,尤其是在太空农业和极端环境下的农业生产中。

5 种衣剂存在的问题

5.1 对鸟类的影响

种衣剂中的活性成分对某些鸟类存在不同程度的影响。Maria 等^[57]的研究表明,使用不同剂量的吡虫啉包衣种子对栗翅牛鹂产生了不同程度的危害;当每千克体质量摄入 20.6 mg 吡虫啉时,观察到鸟类出现轻度中毒,表现为活动减少和羽毛蓬松;当剂量增加到每千克体质量 29.7 mg 时,鸟类的活动显著减少,表现为静止地站立在栖木或地面上,羽毛蓬松,眼睛变窄,颈部收缩,并在许多情况下腹部接触地面;当剂量达到或超过每千克体质量 35 mg 时,鸟类出现震颤、跌倒后无法站起、眼睛闭合或变窄、喙张开、缺乏运动、共济失调等严重中毒症状;最小致死剂量为每千克体质量 37.7 mg 吡虫啉,所有死亡均发生在吡虫啉给药后 24 h 内。Maria 等^[58]的另一项研究也表明,栗翅牛鹂食用相当于其每日进食量 1.8% 的吡虫啉处理过的种子,就足以引发行为和生理上的改变。

5.2 对有益昆虫的影响

Rundlöf 等^[59]的研究表明,使用适用于油菜种子的含有新烟碱类噻虫胺和拟除虫菊酯 β -氟氯氰菊酯组合的杀虫剂进行种子包衣,会导致野蜂密度下降、单蜂筑巢数量减少,并抑制大黄蜂在田间条件下的生长和繁殖。因此,这类杀虫剂的使用可能对农业景观中的野蜂群体构成显著风险。Herbertsson 等^[60]也发现,使用噻虫胺包衣的油菜种子会显著降低红泥蜂的授粉效率和觅食速度。

5.3 对环境的潜在影响

尽管种衣剂能够有效保护种子,但其使用也可能对环境造成显著的负面影响。某些种衣剂中的活性成分可能破坏生态系统的自然平衡,伤害非目标物种,包括益虫。此外,一些包衣材料在环境中难以降解^[61]。因此,在使用种衣剂时应保持谨慎态度。在施用这些化学品之前,必须进行充分的风险评估,并权衡其潜在的负面影响与实际益处^[62]。

6 未来展望

6.1 新型技术材料在种子包衣中的应用

目前,纳米材料已成为一种新兴的种子包衣材料^[63],其中金属纳米颗粒在作物保护中的应用是该领域的最新研究方向^[64]。静电纺丝技术作为一种新兴的纳米技术,能够利用高分子材料在强静电场中形成纳米纤维包衣。由于其在精准控制和靶向农用化学品输送方面的优势,这种技术有助于作物的生长、发育与保护,因此被认为是一种稳健的应用方法^[65]。此外,生物可降解且具备生物相容性的聚合物包衣也逐渐成为研究核心领域和重点方向。

6.2 研究环境友好型种子处理剂

部分种衣剂中的化学成分可能对环境 and 人体健康构成潜在威胁,因此,研发更加环保、低毒、低残留的种衣剂成为重要发展方向,同时需要确保其在使用过程中对种子、操作人员以及非靶标生物的安全性。近年来,学术界与工业界对环境友好型种子处理技术的研究不断深化,取得了显著进展。这类种子处理技术的核心优势在于以对环境产生最小损害的方式,达到理想的作物保护效果。从天然植物、微生物等资源中筛选和提取具有杀虫、杀菌和生长调节功能的活性成分,将可能显著提升种衣剂的环保性和安全性^[65],因此,生物型种衣剂有望成为未来研究的重点。

参考文献:

- [1] 李海龙,方淑梅,孔祥森,等. 种衣剂的研究应用现状与发展方向 [J]. 贵州农业科学, 2018, 46(9): 59-63.

- [2] 卜元卿,孔源,智勇,等.化学农药对环境的污染及其防控对策建议[J].中国农业科技导报,2014,16(2):19-25.
- [3] HALECKY A, REN N, LOCKWOOD F, et al. Correlation of the Mechanical Properties of Seed Coating Films and Dust-Off, Flowability, and Plantability Tests [C]//36th Symposium on Pesticide Formulation and Delivery Systems: Emerging Trends Building on a Solid Foundation. ASTM International, 2016: 183-201.
- [4] PARAVAR A, PIRI R, BALOUCHI H, et al. Microbial Seed Coating: An Attractive Tool for Sustainable Agriculture [J]. Biotechnology Reports, 2023, 37: e00781.
- [5] 王科翰,邱德志.种子包衣技术研究概述[J].农业科技通讯,2021(11):8-10.
- [6] 周园园,王媛媛,朱晓峰,等.生物种衣剂 SN101 的研制及其对大豆胞囊线虫病的防效[J].中国油料作物学报,2014,36(4):513-518.
- [7] WIEN HC, STÜTZEL H. The Physiology of Vegetable Crops[M]. Cabi, 2020.
- [8] AFZAL I, JAVED T, AMIRKHANI M, et al. Modern Seed Technology: Seed Coating Delivery Systems for Enhancing Seed and Crop Performance [J]. Agriculture, 2020, 10(11): 526.
- [9] RYU C M, KIM J, CHOI O, et al. Improvement of Biological Control Capacity of *Paenibacillus Polymyxa* E681 by Seed Pelleting on Sesame [J]. Biological Control, 2006, 39(3): 282-289.
- [10] LOPISSO D T, KÜHLMANN V, SIEBOLD M. Potential of Soil-Derived Fungal Biocontrol Agents Applied as a Soil Amendment and a Seed Coating to Control *Verticillium* Wilt of Sugar Beet [J]. Biocontrol Science and Technology, 2017, 27(9): 1019-1037.
- [11] KANGSOPA J, HYNES R K, SIRI B. Lettuce Seeds Pelleting: A New Bilayer Matrix for Lettuce (*Lactuca sativa*) Seeds [J]. Seed Science and Technology, 2018, 46(3): 521-531.
- [12] 张贤,程壮,温子慧,等.交联壳聚糖用作种衣剂中成膜剂的研究[J].湖北农业科学,2023,62(1):89-93.
- [13] KIMMELSHUE C, GOGGI A S, CADEMARTIRI R. The Use of Biological Seed Coatings Based on Bacteriophages and Polymers Against *Clavibacter Michiganensis subsp. nebraskensis* in Maize Seeds [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 17950.
- [14] JAVED T, AFZAL I. Impact of Seed Pelleting on Germination Potential, Seedling Growth and Storage of Tomato Seed [J]. Acta Horticulturae, 2020(1273): 417-424.
- [15] MAHMOUD Y A, EL-NAGGAR M E, ABDEL-MEGEED A, et al. Recent Advancements in Microbial Polysaccharides: Synthesis and Applications [J]. Polymers, 2021, 13(23): 4136.
- [16] BEHERA S, PRIYADARSHANEE M, VANDANA, et al. Polyhydroxyalkanoates, the Bioplastics of Microbial Origin: Properties, Biochemical Synthesis, and Their Applications [J]. Chemosphere, 2022, 294: 133723.
- [17] SKRZYPCZAK D, JARZEMBOWSKI Ł, IZYDORCZYK G, et al. Hydrogel Alginate Seed Coating as an Innovative Method for Delivering Nutrients at the Early Stages of Plant Growth [J]. Polymers, 2021, 13(23): 4233.
- [18] ROCHA I, MA Y, SOUZA-ALONSO P, et al. Seed Coating: A Tool for Delivering Beneficial Microbes to Agricultural Crops [J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 1357.
- [19] SCOTT J M. Seed Coatings and Treatments and Their Effects on Plant Establishment [J]. Advances in Agronomy, 1989: 43-83.
- [20] SHAHZAD S, KHAN M Y, ZAHIR Z A, et al. Comparative Effectiveness of Different Carriers to Improve the Efficacy of Bacterial Consortium for Enhancing Wheat Production under Salt Affected Field Conditions[J]. Agricultural and Food Sciences, Environmental, 2017, 49(4): 1523-1530.
- [21] 张熙,冉一茜,何灵芝,等.药剂拌种技术在水稻上的应用效果[J].现代农业科技,2024(3):71-74.
- [22] O'CALLAGHAN M. Microbial Inoculation of Seed for Improved Crop Performance: Issues and Opportunities [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, 100(13): 5729-5746.
- [23] ACCINELLI C, ABBAS H K, LITTLE N S, et al. A Liquid Bioplastic Formulation for Film Coating of Agro-nomic Seeds [J]. Crop Protection, 2016, 89: 123-128.
- [24] HALMER P. Seed Technology and Seed Enhancement [J]. Acta Horticulturae, 2008(771): 17-26.
- [25] TEKRONY D M. Seed Technology and Its Biological Basis [J]. Crop Science, 2001, 41(5): 1636-1637.

- [26] PEDRINI S, MERRITT D J, STEVENS J, et al. Seed Coating: Science or Marketing Spin? [J]. Trends in Plant Science, 2017, 22(2): 106-116.
- [27] TEUNOU E, PONCELET D. Batch and Continuous Fluid Bed Coating-Review and State of the Art [J]. Journal of Food Engineering, 2002, 53(4): 325-340.
- [28] 孔松涛, 兰鹰, 赵丽君, 等. 基于颗粒特性的流化床包衣质量影响因素综述 [J]. 中国医药工业杂志, 2020, 51(3): 325-333.
- [29] ROZIER C, HAMZAOU J, LEMOINE D, et al. Field-Based Assessment of the Mechanism of Maize Yield Enhancement by Azospirillum Lipoferum CRT1 [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 7416.
- [30] 姜海平, 郭荣, 朱凤, 等. 24.1% 脲菌·异噻胺悬浮种衣剂对稻瘟病的防病增产效果[J]. 中国农技推广, 2021, 37(3): 79-81.
- [31] 丁啸言. 三种不同药剂对棉苗立枯病的防治效果及棉花生长发育的影响 [D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2021.
- [32] 厉运潘. 2 种小麦种衣剂的安全性及其防效测定[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020, 5.
- [33] YATES P, JANIOL J, LI C B, et al. Nematocidal Potential of Phenolic Acids: A Phytochemical Seed-Coating Approach to Soybean Cyst Nematode Management [J]. Plants, 2024, 13(2): 319.
- [34] 刘景坤, 刘润峰, 宋建华, 等. 50% 噻虫嗪悬浮种衣剂的研制及其对棉花蚜虫的防治效果[J]. 农药学报, 2015, 17(1), 60-67.
- [35] 张帅, 闵红, 林彦茹, 等. 复合型种衣剂应用于小麦病虫害防控的示范效果 [J]. 中国植保导刊, 2019, 39(10): 57-60.
- [36] 甘林, 张扬, 邹成佳, 等. 9 种种衣剂对鲜食玉米草地贪夜蛾、顶(茎)腐病的防效及其安全性评价[J]. 福建农业学报, 2021, 36(5): 564-571.
- [37] LAMICHHANE J R, YOU M P, LAUDINOT V, et al. Revisiting Sustainability of Fungicide Seed Treatments for Field Crops [J]. Plant Disease, 2020, 104(3): 610-623.
- [38] TIAN Z X, LI J C, ZHANG F L, et al. Effects of Mixtures Containing Physcion and Several Fungicides on the Yield of Wheat by Seed Coating and Its Potential Mechanisms [J]. Agriculture, 2024, 14(2): 237.
- [39] KHODADADI S, CHEGINI M A, SOLTANI A, et al. Effects of Seed Coating with Plant Growth Regulators on Seed Germination and Seedling Growth of Sugar Beet (*Beta vulgaris*) [J]. Indian Horticulture Journal, 2018, 8(1): 52-59.
- [40] KUNDU A, DAS A, PAL S, et al. Elicitation-based Modulation of Shelf Life in Fruits: Pysiological and Molecular Insights [J]. Phyton, 2023, 92(8): 2283-2300.
- [41] 蒋梦婷, 渠慎春. DELLA 蛋白在植物生长发育中的作用 [J]. 西北植物学报, 2018, 38(10): 1952-1960.
- [42] LARSON A J S, CARTWRIGHT M M, JONES W D, et al. Slow Release of GA3 Hormone from Polymer Coating Overcomes Seed Dormancy and Improves Germination [J]. Plants, 2023, 12(24): 4139.
- [43] CHEN F B, FENG Y C, HUO S P. Seed Coating with Micronutrients Improves Germination, Growth, Yield and Microelement Nutrients of Maize (*Zea mays* L.) [J]. Biotechnic and Histochemistry, 2023, 98(4): 230-242.
- [44] VURUKONDA S S K P, VARDHARAJULA S, SHRIVASTAVA M, et al. Enhancement of Drought Stress Tolerance in Crops by Plant Growth Promoting Rhizobacteria [J]. Microbiological Research, 2016, 184: 13-24.
- [45] YANG Q, YANG X L, HUANG X W, et al. Seed Coating with Fungicide Causes a Beneficial Shift in Root-associated Microbiomes of Mature Soybean [J]. Soil Science Society of America Journal, 2023, 87(1): 43-62.
- [46] REHMAN A, FAROOQ M, NAVEED M, et al. Seed Priming of Zn with Endophytic Bacteria Improves the Productivity and Grain Biofortification of Bread Wheat [J]. European Journal of Agronomy, 2018, 94: 98-107.
- [47] MEENA S K, RAKSHIT A, SINGH H B, et al. Effect of Nitrogen Levels and Seed Bio-Priming on Root Infection, Growth and Yield Attributes of Wheat in Varied Soil Type [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2017, 12: 172-178.
- [48] XIE S S, DUAN C G. Epigenetic Regulation of Plant Immunity: From Chromatin Codes to Plant Disease Re-

- sistance [J]. aBIOTECH, 2023, 4(2): 124-139.
- [49] MARELLI B. Biomaterials for Boosting Food Security [J]. Science, 2022, 376(6589): 146-147.
- [50] 陈丽华, 何鹏飞, 袁德超, 等. 一种防治棉花黄萎病的生物复合种衣剂的研制 [J]. 棉花学报, 2018, 30(3): 282-291.
- [51] HAN Z, XIONG D G, SCHNEITER R, et al. The Function of Plant PR1 and Other Members of the CAP Protein Superfamily in Plant-pathogen Interactions [J]. Molecular Plant Pathology, 2023, 24(6): 651-668.
- [52] 邢艺凡. 高粱耐盐种衣剂的研制及其生理作用解析 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [53] NEAMATOLLAHI E, MOHAMMADI M, AFSHARI R T. Assessing of Sugar Beet Seed Adaptation under Salt and Drought Stress Conditions with Coating Technology Based on Fuzzy Inference System [J]. Heliyon, 2024, 10(19): e38618.
- [54] BISWAS J K, ANDO H, KAKUDA K I, et al. Effect of Calcium Peroxide Coating, Soil Source, and Genotype on Rice (*Oryza sativa* L.) Seedling Establishment under Hypoxic Conditions [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2001, 47(3): 477-488.
- [55] JAVED T, AFZAL I, MAURO R P. Seed Coating in Direct Seeded Rice: An Innovative and Sustainable Approach to Enhance Grain Yield and Weed Management under Submerged Conditions [J]. Sustainability, 2021, 13(4): 2190.
- [56] SWARAJ K, SUSHRUT B, SESHAGIRI R, et al. Melanin from the Fungus *Gliocephalotrichum Simplex* Protects Seeds from the Effects of Exposure to Gamma Radiation [J]. Scientific Reports, 2025, 12(1): 6473.
- [57] MARÍA B P, CRISTOS D S, BRODEUR J C. Imidacloprid Seed Coating Poses a Risk of Acute Toxicity to Small Farmland Birds: A Weight-of-Evidence Analysis Using Data from the Grayish Baywing *Agelaioides Badius* [J]. Science of The Total Environment, 2021: 763.
- [58] MARÍA B P, BRODEUR J C. Behavioral and Physiological Changes in the Passerine *Agelaioides Badius* Following the Ingestion of Coated Seeds with Imidacloprid in a 30-Day Experiment [J]. Science of the Total Environment, 2023: 905.
- [59] RUNDLÖF M, ANDERSSON G K S, BOMMARCO R, et al. Seed Coating with a Neonicotinoid Insecticide Negatively Affects Wild Bees [J]. Nature, 2015, 521(7550): 77-80.
- [60] HERBERTSSON L, KLATT B K, BLASI M, et al. Seed-coating of Rapeseed (*Brassica Napus*) with the Neonicotinoid Clothianidin Affects Behaviour of Red Mason Bees (*Osmia Bicornis*) and Pollination of Strawberry Flowers (*Fragaria* × *Ananassa*) [J]. PLoS One, 2022, 17(9): e0273851.
- [61] ZHANG K K, KHAN Z, YU Q, et al. Biochar Coating Is a Sustainable and Economical Approach to Promote Seed Coating Technology, Seed Germination, Plant Performance, and Soil Health [J]. Plants, 2022, 11(21): 2864.
- [62] JARRAR H, EL-KEBLAWY A, GHENAI C, et al. Seed Enhancement Technologies for Sustainable Dryland Restoration: Coating and Scarification [J]. Science of The Total Environment, 2023, 904: 166150.
- [63] ZAIM N S H B H, TAN H L, RAHMAN S M A, et al. Recent Advances in Seed Coating Treatment Using Nanoparticles and Nanofibers for Enhanced Seed Germination and Protection [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2023, 42(12): 7374-7402.
- [64] SOHAIL M, PIRZADA T, OPPERMAN C H, et al. Recent Advances in Seed Coating Technologies: Transitioning Toward Sustainable Agriculture [J]. Green Chemistry, 2022, 24(16): 6052-6085.
- [65] ADELABU D B, FRANKE A C. The Beneficial Effects of Insect Pollination and Biochar Seed Coating on Okra (*Abelmoschus esculentus*) Seed Quality at Varying Temperature Conditions [J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1690.