

张福锁, 程凌云, 黄成东, 张林, 王建超, 吕阳, 鲁振亚, 危常州, 马文奇, 马航, 申建波. 绿色智能肥料: 智能调控的创新思路与产业化途径[J]. 土壤学报, 2025,

ZHANG Fusuo, CHENG Lingyun, HUANG Chengdong, ZHANG Lin, WANG Jianchao, LÜ Yang, LU Zhenya, WEI Changzhou, MA Wenqi, Ma Hang, SHEN Jianbo. Green Intelligent Fertilizers: Innovative Approaches to Intelligent Regulation and Industrialization Pathways[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025,

绿色智能肥料: 智能调控的创新思路与产业化途径 *

张福锁^{1†}, 程凌云¹, 黄成东¹, 张林¹, 王建超¹, 吕阳¹,
鲁振亚¹, 危常州², 马文奇³, 马航⁴, 申建波¹

(1. 养分资源高效利用全国重点实验室, 植物-土壤相互作用教育部重点实验室, 中国农业大学资源与环境学院, 国家农业绿色发展研究院, 北京 100193; 2. 石河子大学农学院, 新疆石河子 832000; 3. 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071000; 4. 云南云天化股份有限公司, 昆明 650228)

摘要: 随着全球农业的发展和环境保护需求的提升, 绿色智能肥料作为一种新型肥料, 逐渐成为提高作物生产力和资源利用效率的重要途径。本文综述了绿色智能肥料的核心理念和发展现状, 探讨了植物-微生物-环境互作的智能调控原理, 以及基于根际生命共同体理论的肥料设计与应用策略。绿色智能肥料通过最大化利用作物和微生物的生物学潜力, 调控植物-土壤-微生物互作系统, 促进植物生长并减少对环境的影响。展望未来, 智能肥料将在材料创新、工艺优化和数智配肥等方面实现跨越式发展, 有力推动农业绿色转型, 为粮食安全和生态环境保护提供重要支撑。

关键词: 绿色智能肥料; 智能调控; 根际效应; 微生物调控; 材料创新

中图分类号: S14 文献标志码: A

Green Intelligent Fertilizers: Innovative Approaches to Intelligent Regulation and Industrialization Pathways

ZHANG Fusuo^{1†}, CHENG Lingyun¹, HUANG Chengdong¹, ZHANG Lin¹, WANG Jianchao¹, LÜ Yang¹, LU Zhenya¹, WEI Changzhou², MA Wenqi³, MA Hang⁴, SHEN Jianbo¹

(1. State Key Laboratory of Nutrient Use and Management, Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, College of Resources and Environmental Sciences, National Academy of Agriculture Green Development, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 3. College of Resources and Environmental Science, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China; 4. Yunnan Yuntianhua Co.,

* 国家重点研发计划项目 (2023YFD1700203, 2023YFD1901502) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (Nos. 2023YFD1700203, 2023YFD1901502)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhangf@cau.edu.cn

作者简介: 张福锁 (1960—), 男, 陕西凤翔人, 博士, 教授, 中国工程院院士, 主要从事植物营养与养分管理研究。E-mail: zhangf@cau.edu.cn

收稿日期: 2025-08-23; 收到修改稿日期: 2025-10-23; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025- - -

Abstract: As global agriculture evolves alongside the increasing demand for environmental protection, green intelligent fertilizers have emerged as a novel approach to enhancing crop productivity and resource use efficiency. This paper reviews the core concepts and development status of green intelligent fertilizers, exploring the principles of intelligent regulation within plant-microbe-environment interactions and the design and application strategies based on the rhizobiont theory. Green intelligent fertilizers operate by maximizing the biological potential of crops and microorganisms to regulate the integrated plant-microbe-soil system, thereby promoting plant growth and minimizing environmental impact. Looking ahead, breakthroughs in material innovation, process optimization, and intelligent fertilizer formulation will enable intelligent fertilizers to drive agricultural green transformation, providing critical support for global food security and environmental sustainability.

Key words: Green intelligent fertilizer; Intelligent regulation; Rhizosphere effect; Microbial regulation; Material innovation

在全球农业面临人口增长、气候变化以及土壤退化等多重挑战的关键时刻，协同提升农业生产力和资源环境可持续性已成为人类亟待解决的重要问题。传统肥料及其施用方式虽然提高了作物产量，但却常常导致资源浪费和环境污染，尤其是氮的损失和磷在土壤中的大量积累等问题严重，影响了资源和生态环境的可持续性^[1-2]。因此，创新绿色智能肥料产品，提高肥料利用效率并减少对环境的负面影响，已成为全球农业科技领域的研究前沿和热点。

绿色智能肥料作为一种创新的肥料类型，以其绿色和智能调控特性的显著优势，逐渐成为提升作物生产力和保障农业可持续发展的绿色投入品^[3]。智能调控的基本理念是基于对植物-土壤-微生物-环境系统的深刻理解，通过精准调控植物根系与微生物和环境因子的互动关系来提高养分利用效率、促进植物生长和减少资源浪费，从而推动农业绿色可持续发展。这一理念强调根系、微生物、环境与肥料间的互作，并挖掘和利用这些相互作用提升养分的利用效率^[3-4]。在互作中，根际微域是其核心场所和关键的调控枢纽，因为根际不仅是植物与土壤物质交换的主要场所，也是根系、微生物与环境交互作用时能量和信息交换的热点区域。因此，如何塑造“理想”的根际微域，促进作物根系-微生物-环境的协同作用，是绿色智能肥料智能调控研究的重要方向。

生物智能是智能的重要组成部分，它通过激发植物根系和根际微生物的生物学潜力来提升养分利用效率。智能肥料可以通过调控氮、磷等关键养分信号，引导植物适应性地调整根系结构、生长发育及其功能，提高养分利用率，并增强作物在逆境中的适应能力和抗性；智能肥料也可以通过控制根系分泌物的种类和释放时机，优化根际微域环境，进一步增强植物对养分的利用效率；进一步还可以通过调节土壤中微生物的种类及其活性，优化根际微生物的群落结构，提升养分转化效率，同时可以通过增强植物对病虫害的抵抗力，促进作物的健康生长。环境智能也是智能的重要组成部分，通过调整根际的物理、化学和生物学特性，提升植物对养分的吸收能力。例如，可以优化土壤的水分保持和通气性能，控制根际的 pH 和氧化还原条件，从而最大化关键养分的有效性，降低环境损失风险，最终实现资源的高效利用。人工智能是绿色智能肥料精准配方、绿色生产、绿色施用以及这些过程协同实现的现代化工具和新质生产力。通过分析多源数据，动态预测作物需求并实时优化肥料配方与释放规律，实现养分供给与植物需求的智能匹配。通过人工智能驱动，融合生物智能（激发根系活力与微生物功能）与环境智能（优化根际微域理化特性），同步提升作物产量、减少化肥投入、提高养分利用效率并降低氮磷等养分的环境损失，实现高产、高效与减排的协同优化。

本文围绕绿色智能肥料智能调控的创新思路和产业化途径展开讨论，重点介绍智能内涵、智能调控策略以及产业化技术途径，并对未来发展进行了展望，旨在推动肥料产品创新向绿

色化、智能化方向发展,为农业生产提供更加精准、高效、可持续的新一代肥料产品与系统解决方案。

1 智能调控的科学思路

1.1 智能调控的概念与内涵

智能是绿色智能肥料创制的核心理念之一,也是引领工农业交叉创新、绿色发展的重要切入点。智能调控是融合生物智能、环境智能与人工智能于一体的协同过程,依据作物-微生物-环境相匹配的根际生命共同体调控原理,应用先进材料或技术、制造工艺进行肥料的创制,实现养分的高效应答和精准释放,最大化作物和微生物的生物学潜力。其特点是响应气候和土壤条件、精准匹配作物生长规律和养分需求,激发作物根际效应促进根肥互馈、驱动生物互作过程提高养分效率。智能调控包括五大内涵(图1):1)互作增效性:根肥互馈,级联放大;2)生物感知性:分子识别,实时响应;3)环境响应性:环境敏感,精准释放;4)材料创新性:技术引入,交叉创新;5)时空协同性:供需匹配,动态协同。



图1 智能调控的五大内涵

Fig. 1 Five core concepts of intelligent regulation

1.2 智能调控的策略

肥料智能化调控根据植物、微生物和环境三者的复杂互动可分为三个层次。

1.2.1 植物智能调控 植物智能调控是绿色智能肥料创新的核心理论之一,通过激发根系的生物学潜力、优化根际环境以及精准调控关键养分信号,实现高效的养分效率(图2)。

智能肥料通过刺激根系细胞分裂、伸长及分化,加速根系伸长、侧根和根毛的生成,优化植物对养分水分的获取。智能肥料精准释放生物刺激素,促进根系的向下伸展和侧向分布,不仅增强植物对深层养分的吸收,还提升对土壤养分富集区的响应能力。智能肥料还可以通过动态调控氮、磷等关键养分的信号通路,优化植物的养分吸收和利用效率。不同形态的氮(硝态氮 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 与铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$)对根系发育具有显著差异性。硝态氮通过 NRT1.1 硝酸盐传感器促进主根纵向伸长,而铵态氮通过根际酸化刺激侧根和根毛的分化^[5],科学利用两种氮形态,既促进主根向深层伸展,又增强侧根分布密度,从而优化根系结构。同时,硝酸盐诱导的小肽信号调控根系与地上部分的反馈机制,进一步协调氮的吸收与分配,提高氮的利用效率^[6]。在磷养分高效利用方面,智能肥料的设计可以基于系统和局部磷信号理论,

模拟植物对缺磷环境的响应, 激活根系磷信号 (如 PHR 等核心转录因子), 促进侧根分支、根毛生成及菌根共生。磷信号还与氮信号协同作用, 进一步提升了植物的整体养分吸收能力。智能肥料的设计可以通过调控复杂的信号网络 (如氮、磷信号及激素信号), 协调植物根系对外部环境变化的响应, 优化养分吸收与生长发育。

根系分泌物是根系释放到根际土壤中的化学物质, 涵盖了从小分子量的氨基酸、有机酸、糖类和酚类到高分子量的黏液 (多糖) 和蛋白质等多种成分。这些代谢物可以作为植物营养状况和周围环境中营养供应情况的传感器和整合器^[7]。例如, 在 N、P、K、Fe 等不同养分缺乏条件下, 根系分泌物的物质组成及含量均表现出独特的特征^[8]。一些特定的物质, 如丝氨酸在根际的浓度, 可以在多个物种如拟南芥、甘蓝型油菜中与植物的氮吸收具有相关性, 因此可作为识别植物氮营养状况的标志物^[9-10]。可以借助生物传感器等识别途径, 对根际中特定的物质分子进行特异性识别, 进而调控养分的精准释放。智能识别中应用的生物传感器, 具有针对目标物质高度的特异性、良好的亲和力和环境稳定性等特点^[11-12]。例如, L-丝氨酸作为甘蓝型油菜的一种根系分泌物, 能表征植物的氮素营养状况, 采用 SELEX 过程产生的特异性结合 L-丝氨酸的适配体, 可以作为智能氮肥的分子识别元件。将该适配体进行镜像改性并与肥料包覆材料进行组装后, 可形成稳定性的氮肥包膜, 当肥料颗粒与目标分子 L-丝氨酸相结合时, 适配体通过分子结构变化改变包膜材料的通透性, 进而释放养分, 精准响应作物的氮素需求^[13]。

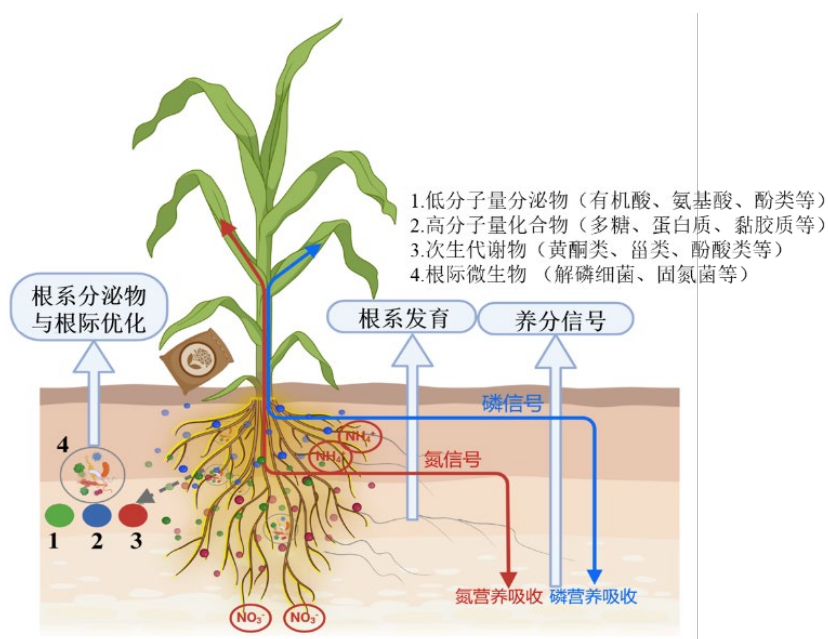


图 2 植物智能调控的策略

Fig. 2 Principles and strategies of plant intelligent regulation

1.2.2 微生物智能调控 土壤中的微生物, 尤其是根际微生物, 是植物-土壤物质交换界面的重要组成部分, 对实现根际生命共同体养分高效和生物互作产生级联放大效应至关重要。然而, 根际微生物的组成、功能及其互作关系会受到土壤环境和宿主植物根系分泌物的显著影响^[14]。因此, 智能肥料的创制不仅依赖于植物根系的调控, 还需要通过微生物的调控, 充分发挥其在养分转化和利用中的关键作用 (图 3)。

微生物的活性及功能很大程度上依赖于土壤中碳的输入, 而植物根系分泌物和菌丝分泌物是碳的重要来源。基于植物-微生物根际对话机制, 可以通过添加外源碳或信号物质, 促进微生物群落的功能提升。例如, 外源添加葡萄糖、果糖和蔗糖能够显著提高根际土壤中碱性磷酸酶的活性, 并增加关键微生物类群的丰度^[15]。此外, 果糖还能作为信号物质刺激解磷

细菌的磷酸酶分泌,从而增强土壤中磷的活化效率。通过碳源与肥料的科学复配,已在提高肥料利用效率方面表现出良好效果。智能肥料的微生物调控不仅关注数量调控,还需实现功能微生物的精准靶向调控。激素与次生代谢物在植物-微生物及微生物-微生物互作中发挥了重要作用。例如,乙烯可调控花生根际微生物网络中核心物种的丰度,从而提高微生物的磷矿化功能^[16]。此外,类黄酮、萜烯和苯并恶唑啉酮类次级代谢物在根际细菌群落的组装与功能优化中具有重要作用^[17]。因此,破译植物根系和菌丝分泌物中的这些关键信号物质,是实现微生物智能化调控的重要途径。

土壤微生物的功能不仅依赖于单一菌株,还需要菌群间的协同互作。菌群成员通过信号分子交换和任务分工,完成单一菌株难以实现的复杂功能。因此,基于单一功能微生物选培的基础,构建人工合成功能菌群并与智能肥料结合,是提高肥料效率的重要策略。通过整合宏基因组学、代谢组学和表型数据,可以识别并选择具有特定功能的微生物群体^[4]。这些合成菌群可在体外或体内通过优化生态位偏好和相互作用实现功能最大化。利用微胶囊技术构建多物种合成菌群,能够灵活调控群落结构和功能。例如,通过调整不同微胶囊的种类、数量和培养体积,可精确控制菌群的物种比例^[18]。这种设计不仅提高了菌群的稳定性,也增强了其在肥料微环境中的功能表现。

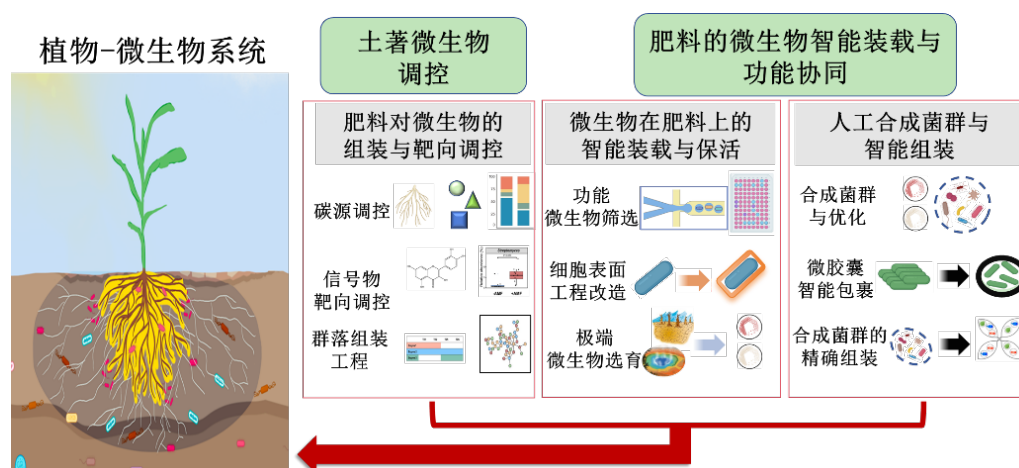


图3 微生物智能调控的策略

Fig. 3 Principles and strategies of microbial intelligent regulation

1.2.3 环境智能调控 智能肥料的环境智能响应可以通过智能材料来实现,其中温敏材料和pH响应材料在肥料中应用较为广泛(图4)。温敏材料是具有亲水和疏水官能团的聚合物材料,能够根据环境温度的变化调节溶解度。当温度高于临界溶解温度时,温敏材料发生相变,聚合物析出并释放养分。例如,温敏肥料通过调节肥料的包膜材料,控制养分的释放速度,适应土壤温度变化,确保植物在不同温度条件下获得稳定的养分供应^[19]。pH响应材料是一类化学刺激响应聚合物,能够根据土壤或根际的pH变化,调节其自身结构和性质,从而控制养分释放。常见的pH响应材料包括聚丙烯酸盐,能够在酸性条件下吸收质子并发生体积收缩,促进肥料中的养分释放^[20]。pH响应材料适用于在土壤酸化或根际强烈酸化的情况下释放养分,提高肥料的使用效率。

与此同时,智能肥料通过调节植物根际的物理、化学环境,提升植物对养分的吸收能力。例如,施用控释肥料或缓释肥料时,通过根际酸化作用降低局部pH,可以显著促进磷、锰等微量元素的溶解与吸收。此外,通过调节土壤的氧化还原条件,智能肥料可以提高铁、锰等微量元素的利用率,进一步提升植物的养分吸收能力。智能肥料通过调节植物根系与微生物的互动,进一步增强植物对资源的获取效率。研究表明,通过调节根际的营养条件,如碳氮比、碳磷比等,促进有益微生物的繁殖,抑制有害微生物的生长,优化植物的养分吸收环

境^[15]。肥料通过对微域环境的精准调控,不仅直接促进植物的养分吸收,还通过优化微生物的活动和多样性,进一步增强植物与根际微生物的相互作用,达到以较小投入实现资源高效利用、“四两拨千斤”的目标。

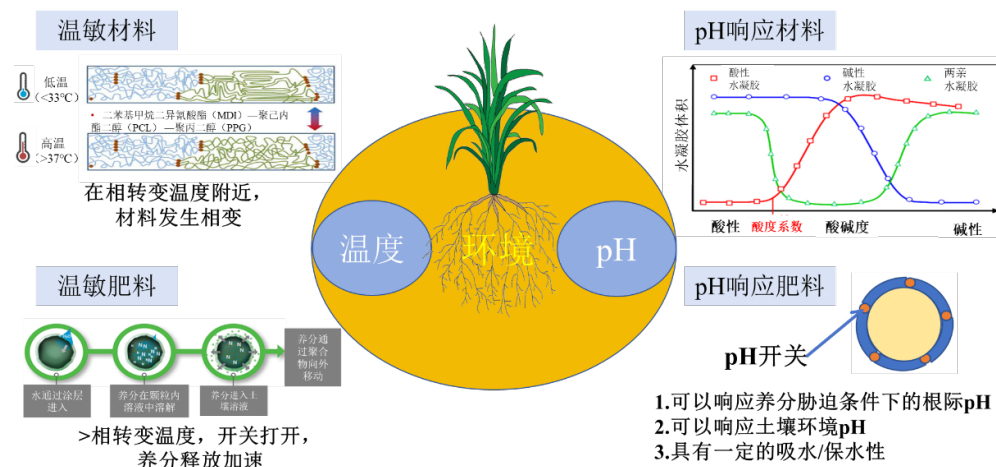


图4 环境智能调控的策略

Fig. 4 Principles and strategies of environmental intelligent regulation

2 绿色智能肥料产业化潜力与技术途径

2.1 产业化潜力

绿色智能肥料面向“作物-微生物-土壤”系统,通过对根际热点区域的时空匹配与环境响应,实现养分高效供给与过程减排。它的核心思想是在充分把握根际界面物质循环与信号网络的前提下,以最小外源投入撬动植物与微生物的生物学潜力,从而提升产量与养分利用效率并降低环境代价^[3]。近年来,该方向呈现出以下产业化趋势与机遇:1) 全球粮食安全、资源高效、环境保护等联合国可持续发展目标,推动肥料从“供给导向”向“效率与生态并重”升级。绿色智能肥料能够针对不同区域、作物与土壤-气候情景开展靶向化设计,具备显著的场景区适配潜力;2) 靶向性地开发智能调控养分利用的肥料产品已经成为了国内外植物营养和材料科研界、肥料产业界追求的科学与开发前沿,进入到了多学科交叉、工农融合、产教联合突破的新时期,肥料的智能在科学研究与产业化上具有广阔的前景;3) 涉及到复杂的根际过程的产品化时,更需要抓住土壤-植物系统智能调控的核心点,将机理优势固化为可设计、可量产的材料与工艺模块,最终实现产品化。

2.2 技术途径

智能产品的创制需要针对肥料-土壤-植物-微生物互作的微域环境,精准调节养分供应,最大限度激发根系吸收和微生物活化养分的能力,其关键抓手在于智能物质与材料的创制与应用。相应的技术路径可概括为三个环节:智能材料合成、提纯与添加(图5)。材料合成需要考虑原料来源、理化特性与实现途径,具体为:1) 生物途径,在充分认识养分流与碳流互作及根际界面复杂调控机制的基础上,依托生物工程与技术(包括生物合成学),通过发酵、生物催化、自然提取等手段,获得具备特定养分调控功能的活性物质;2) 化学途径,结合对养分在土壤-植物体系中转化、吸收、利用规律,采用化学合成、基团改性、官能团修饰等方法,构建对关键养分过程具有正向调控效应的功能分子、聚合物或载体。在保障智能材料/物质稳定与安全的前提下,还需要完成提纯与规模化制造,以支撑肥料工业的稳定添加与应用;策略包括“自然替代”(如原料直接替代、关键活性产物替代)与“化学提纯”,并综合评估工艺实现路径与配套环境(装置适配性、操作难度、过程安全),遵循低

成本、高效率、可复制的原则。进入到绿色智能肥料生产环节,智能材料/物质的高效添加成为重点:明确添加工艺与引入节点(湿/干法造粒、喷浆包膜、熔融共混、后喷涂/浸渍等)及其工艺窗口(pH、温度、离子强度、含水率、盐度等),界定适用对象与剂量,确保与不同肥料基体的相容性和功能稳定释放;同时从调控途径与农业应用场景(作物类型、土壤性质、气候条件、栽培制度)出发,阐明作用机制并完成田间验证。

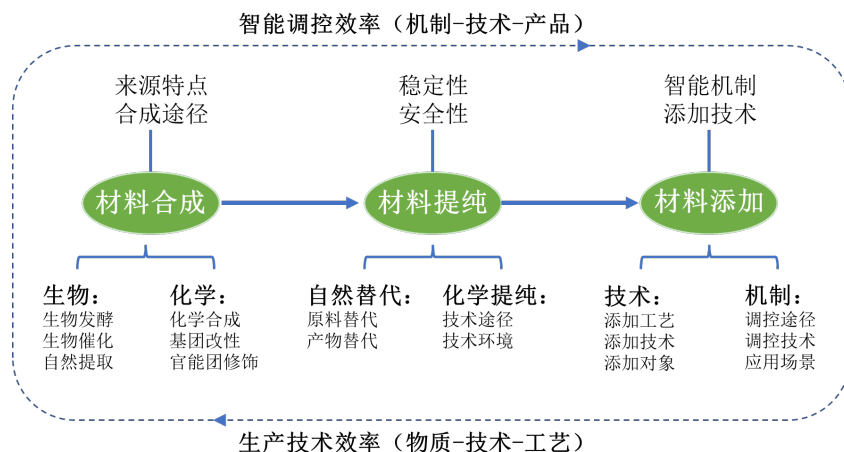


图 5 肥料产品实现智能调控的产业化技术途径

Fig. 5 Industrial technical pathways for achieving intelligent regulation in fertilizer products

2.2.1 智能材料 植物响应型材料,指能感知作物生长过程并调控关键营养/信号通路的材料或活性物质,用于强化根系对养分的获取与利用。其形态可为生物或化学合成物、养分信号分子,甚至是兼具营养与信号功能的元素本身;例如钙既为必需养分又参与信号转导,在马铃薯块茎形成与膨大过程中发挥调控作用^[21]。

微生物调控型材料,包括有益微生物(或其组合)、关键代谢产物及其促活/调控因子,能够提升难利用养分的活化与吸收效率。这类材料依托合成生物学与生物工程,通过发酵、代谢通路重塑、天然产物提取等方式实现规模化;亦可采用化学途径获得功能等效分子。例如,对麦根酸进行化学改性的铁载体-脯氨酸-2-脱氧麦根酸,有助于提升土壤中低可及铁形态的利用潜力^[22]。

环境响应型材料是能够对土壤环境(如温度、pH、水分、盐分等)做出响应,从而养分释放动力学并与根际过程“对话”。当前研究较多的是温度和 pH 响应型材料,通过化学合成、化学接枝、自由基聚合等方法,精准调控材料分子结构中温度敏感成分,如 N-异丙基丙烯酰胺、乙烯基醚等,开发出温度响应型智能材料。温度响应型材料/物质可以包裹在肥料的表面,使得其随温度升高而产生理化性状的变化,进而对养分的控制释放效果产生差异性,养分释放速率加快,供应能力增强,实现肥料养分的定时或按需释放。pH 响应型材料主要调控养分在不同酸碱条件下的生物活性,进而影响养分的有效性,在根际环境中,植物分泌有机酸和质子,根际 pH 在时空上存在着动态变化,利用根际 pH 的变化规律,可以利用化学修饰、自由基聚合、化学交联等方法,精准引入 pH 响应基团,开发 pH 响应型智能材料/物质^[23]。相应的 pH 响应型材料/物质并添加到肥料中,实现养分释放与植物根际过程“对话”,这类材料当前有自然界存在的壳聚糖、海藻酸等物质,也有化学合成的高分子聚合物材料,如聚多巴胺类等^[24]。

2.2.2 智能材料添加工艺与技术 智能材料添加工艺与技术创新是实现肥料智能调控的关键支撑。其核心在于如何在工业生产创新提前下,实现对智能材料/物质的高效添加,并且在农业生产应用中能够有效发挥其智能调控功能。这里需要考虑工业技术实现度与农业生产有效度,在二者之间会有技术复杂性与适应性、经济效益等综合评估。

工业技术着重于创新：1) 添加工艺，当前国内外所采用的肥料生产工艺已经持续运行了几十年时间，涉及到了大量的大型装置，这些装置的创新升级需要经历长时间的探索与实践应用，才能够安全、稳定地应用，因此，智能材料的高效添加也是基于当前主流工艺的应用，要稳定、安全可长时间运营，不会对工艺的可持续生产产生负面影响，例如腐蚀装备等。未来仍然需要创新工艺，一方面是提高肥料的生产效率，另一方面是能够更好地适应智能材料/物质的添加；2) 添加技术，由于不同的智能材料/物质有着不同的物理化学属性，在酸碱、高盐、高温等条件下其稳定性是必须考虑的因素，在现有主流工艺生产装置条件下，要明确其添加的生产技术环节、有效添加量、添加环境技术条件（比如酸碱性和温度等）等，确保其技术实现的简易、高效、有效；3) 添加对象，不同肥料的酸碱性、生产技术存在着较大差异，智能材料/物质所需与添加的肥料对象之间具有高度有效匹配兼容性，才能够实现其与肥料养分的协同增效作用。在添加智能材料/物质之后，需要在农业生产中明确其调控的具体途径，是否与原理创新相一致，形成与现有施肥技术配套的关键调控技术，从而能够在具体的农业生产应用场景中起到智能调控养分利用的效果，推动作物增产、养分增效、环境保护等多目标协同实现。

3 智能肥料创制案例与研究进展

3.1 植物响应型智能肥料

在植物响应型方面，当前热点领域有根际酸化、养分信号物质等。产业化的产品有云南云天化股份有限公司与中国农业大学合作研发的绿色智能肥料—澳洲坚果专用肥，基于澳洲坚果排根生长对磷养分有效性的响应特点，在缺磷或者低磷条件下，能够有效刺激排根形成并分泌大量的柠檬酸，活化利用土壤中的难溶性磷养分资源，在调动澳洲坚果根生长的前提下实现了对磷利用效率的大幅提升，有效节约了肥料养分资源，并在生产中取得了增产增收的效果，这是根际酸化活化利用土壤养分资源的典型案例。利用根际酸化特点，开发智能肥料产品也处于国际开发前沿，例如，利用壳聚糖在中度酸性（ $\text{pH}=4\sim5$ ）条件下具有溶解的特点，将其包裹在肥料外围，当根际周围 pH 足够低时，壳聚糖开始溶解，包裹层结构被打破，肥料养分遇水溶解透过包裹层，进入到根际范围供植物根系吸收利用^[25]。加拿大研究人员研制了基于分子识别的智能肥料，选择比其他天然感受器亲和力更强的核酸适配体作为生物感受器，将核酸适配体嵌入到具有多层膜的聚合电解质的包膜材料中，在保护生物传感器不受外界影响的同时，可有效实现根系分泌物与生物传感器的靶向性识别，以期实现养分的释放匹配作物需求，提高肥料养分的利用效率^[13]。

3.2 微生物调控型智能肥料

在微生物调控型方面，当前热点领域是利用微生物或者其代谢产物，或是调控微生物生命活动过程，从而实现智能调控的物化。以氮为例，利用合成生物学的潜力，借助基因编辑手段，生物科技创新型企业和科学界从农田土壤中分离出了具有生物固氮属性的微生物，并进行了产业化。并针对不同植物上的定殖特性进行匹配，保留了亲本菌株在具备定殖植物根部的能力，同时在富氮土壤条件下能够大幅度地提高固氮活性，在农业生产田间取得了节约化学氮肥的良好效果^[26]，这是典型地利用了微生物来将大气中的氮气转化为铵，供植物吸收利用氮素的案例。另一方面，利用微生物代谢产物或者化学合成相应的调控物质，也是当前热点。例如，花生与玉米间作改善铁营养的研究发现，特定微生物菌群（如假单胞菌属）能够有效提高花生的铁吸收，并促进产量增加^[27]。

3.3 环境响应型智能肥料

在环境响应型方面，当前研究热点主要集中在对温度、 pH 等的感知与响应。例如，相关学者报道了一种通过表面引发原子转移自由基聚合法在磷酸铵锌上嫁接聚合物（二甲基丙

烯酸二甲胺乙酯)的“智能”肥料,可以在低温、低 pH 条件下促进养分的释放,而在高温、高 pH 条件下可减缓养分的释放,避免养分的过量释放对作物根系带来的损伤。此外,利用不同类型的聚氨酯作为包膜材料,通过调控不同分子量的聚己酸内酯/聚醚多元醇共混物与二苯基甲烷二异氰酸酯反应,基于流化床工艺可以构建温度响应型尿素控释肥料,能有效感知温度变化促进尿素释放^[19,28]。pH 响应型肥料也处于国际农业领域开发前沿。例如,利用氨化改性对纤维素纳米纤维进行处理,并与阳离子型聚(丙烯酰胺-2-氨基乙基甲基丙烯酸盐)相反应,通过封装硝酸铵成功组装了 pH 响应型控释肥料,将其应用于灌溉中性类型土壤中,能有效感知土壤 pH 变化,实现养分智能释放^[20,29]。

4 发展趋势与展望

绿色智能肥料的发展将经历从初级到高级的逐步演进(图 6)。第一阶段主要聚焦于现有肥料配方配伍的优化与养分高效供应,以提高养分供应强度与作物吸收速率的匹配度。第二阶段通过肥料新材料和功能物质的引入,养分形态组合和缓控释技术创新,及其与中微量元素协同、物理结构的优化等,进一步改进肥料养分的释放和作物吸收的时空匹配度,提高养分利用效率;同时,推动矿产养分资源的全量利用。第三阶段以智能化技术为核心,以最大化植物-土壤-微生物系统互作潜力为突破口,全面提升肥料的功能性和适应性。这一阶段以智能化配方和智能化材料挖掘为引领,通过生物过程强化、养分信号调控以及根层/根际养分精准调控,实现肥料与植物生长需求的动态匹配;同时,整合了新材料应用、生物合成、人工智能等多方面技术,推动肥料向更加高效、精准、绿色的方向发展。

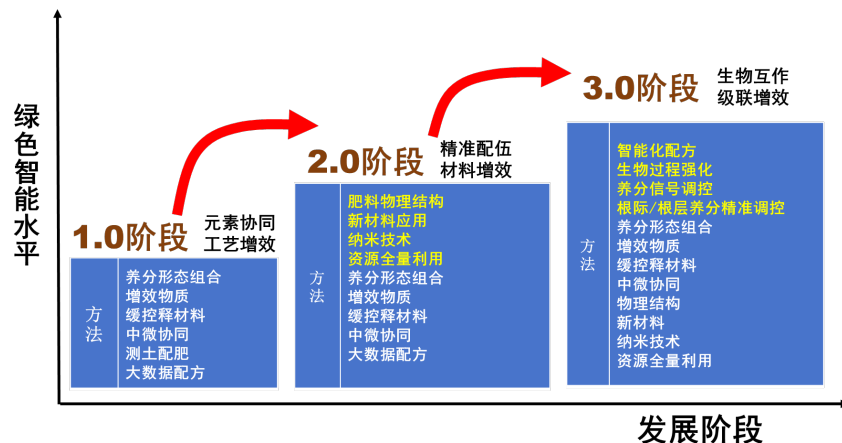


图 6 肥料产品智能化水平发展阶段

Fig. 6 The development stage of the intelligent level of fertilizer products

目前,我国大部分产品处于 1.0 阶段,同时兼有 2.0 和 3.0。以聚合物包膜尿素和增效氮肥为代表的复合材料已实现大规模应用,生物基高效包膜材料和新型氮肥增效材料的创制势在必行。环境响应型绿色智能肥料也已成为目前研发的热点和重点。在国际上,以欧美为代表的发达国家已普遍进入第二阶段,即以环境响应型材料为主的成熟应用阶段,例如包膜控释肥料,该类产品能够依据土壤温度调控养分释放,使释放曲线与玉米、小麦等作物的季节性需肥规律相吻合^[30]。与此同时,发达国家已启动对第三阶段前沿技术的探索,例如研发可识别植物根系分泌物并触发养分释放的“传感器”涂层等创新体系^[31]。未来,绿色智能肥料的发展将更加依赖于材料科学、化学工程、微生物学、人工智能等多学科的深度融合,在理论创新与技术融合的推动下,实现从基础优化到智能调控的系统性升级,为新型肥料创制与农业资源高效利用提供关键支撑。

4.1 材料创新是肥料智能调控取得突破的关键

在智能肥料的开发中,新型材料的引入使得肥料能够更好地响应环境和作物的需求,达到精准调控养分释放的目的。除了基于根际生命共同体理论挖掘的新活性物质以及功能性微生物菌种,新型环境响应材料(如温敏、pH 响应、纳米材料)是实现肥料养分智能释放的重要载体(图 7)。未来研究需聚焦于发掘具有多重响应特性、植物感知和微生物调控能力的创新材料,同时在分子/纳米尺度调控养分释放动力学,同步提升肥料利用效率。



图 7 绿色智能肥料创新与应用

Fig. 7 Innovation and application of green intelligent fertilizers

4.2 工艺技术优化是实现肥料智能调控的重要支撑

智能肥料功能的稳定实现高度依赖先进生产工艺(图 7),关键在于突破材料保活、精密涂层(如包膜)与可控组装等核心工艺瓶颈,实现对关键工艺参数(温度、压力、时间、界面性质)的精准调控。变革传统生产工艺路线,依据绿色智能肥料的特点和要求,优化工艺路径与设备创新是提升新型肥料产品一致性、功能性及推动规模化应用的关键。

4.3 构建绿色智能评价体系是创新绿色智能肥料产品的重要保障

根据肥料产品绿色设计和生态认证要求,可选取具有影响大,社会关注度高,国家法律或政策明确要求的资源养分利用效率、单位产品综合能耗和单品产品碳排放等作为绿色评价重要指标。根据绿色智能肥料与土壤-作物-气候的相匹配原理,可选取养分配比配伍及养分供应与作物-土壤-气候需求的匹配性、对作物的响应等作为智能评价重要指标。

4.4 大数据和人工智能工具将大幅度提升针对实战场景的靶向性智能大配方设计

基于大数据与人工智能的区域智能大配方是未来核心方向。需深化深度学习与优化算法在耦合多源数据(土壤-作物-气候-管理)中的应用,解析养分需求时空规律,构建动态适配的场景化肥料配方模型。这种设计模式将显著提升配方设计的科学性、效率与普适性,支撑作物高产、资源高效与环境减排的协同优化。

4.5 工农产业链融合是绿色智能肥料创新的必由之路

绿色智能肥料的创新发展与落地应用亟需工农产业链深度融合。核心在于构建“研-产-用”高效协同机制,贯通材料研发、工艺优化、产品定制、农艺适配与效果反馈的全链条。深化产学研合作,建立以农业生产实际需求为导向的肥料创新平台,推动智能肥料精准服务于区域农业可持续发展。此外,政策支持和市场引导也将在推动工农融合和智能肥料的普及中发挥重要作用。

参考文献 (References)

- [1] Zhang X, Davidson E A, Mauzerall D L, et al. Managing nitrogen for sustainable development[J]. Nature, 2015, 528(7580): 51-59.
- [2] Zou T, Zhang X, Davidson E A. Global trends of cropland phosphorus use and sustainability challenges[J]. Nature, 2022, 611(7934): 81-87.
- [3] Zhang F S, Shen J B, Wei C Z, et al. Green intelligent fertilizer: From interdisciplinary innovation to industrialization

realization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(4): 873-887. [张福锁, 申建波, 危常州, 等. 绿色智能肥料: 从原理创新到产业化实现[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 873-887.]

[4] Shen J B, Bai Y, Wei Z, et al. Rhizobiont: An interdisciplinary innovation and perspective for harmonizing resources, environment, and food security[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4): 805-813. [申建波, 白洋, 韦中, 等. 根际生命共同体: 协调资源、环境和粮食安全的学术思路与交叉创新[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 805-813.]

[5] Jia Z T, von Wirén N. Signaling pathways underlying nitrogen-dependent changes in root system architecture: From model to crop species[J]. Journal of Experimental Botany, 2020, 71(15): 4393-4404.

[6] Ohkubo Y, Tanaka M, Tabata R, et al. Shoot-to-root mobile polypeptides involved in systemic regulation of nitrogen acquisition[J]. Nature Plants, 2017, 3: 17029.

[7] Canarini A, Kaiser C, Merchant A, et al. Root exudation of primary metabolites: Mechanisms and their roles in plant responses to environmental stimuli[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 157.

[8] Carvalhais L C, Dennis P G, Fedoseyenko D, et al. Root exudation of sugars, amino acids, and organic acids by maize as affected by nitrogen, phosphorus, potassium, and iron deficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2011, 174(1): 3-11.

[9] Lesuffleur F, Paynel F, Bataillé M P, et al. Root amino acid exudation: Measurement of high efflux rates of glycine and serine from six different plant species[J]. Plant and Soil, 2007, 294(1): 235-246.

[10] Tschoep H, Gibon Y, Carillo P, et al. Adjustment of growth and central metabolism to a mild but sustained nitrogen-limitation in *Arabidopsis*[J]. Plant, Cell & Environment, 2009, 32(3): 300-318.

[11] Mastronardi E, McKeague M, Monreal C, et al. 139 Development and application of crop exudate specific aptamers[J]. Journal of Biomolecular Structure and Dynamics, 2013, 31(sup1): 89.

[12] Mastronardi E, Monreal C, DeRosa M C. Personalized medicine for crops? Opportunities for the application of molecular recognition in agriculture[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(26): 6457-6461.

[13] Mastronardi E, Cyr K, Monreal C M, et al. Selection of DNA aptamers for root exudate l-serine using multiple selection strategies[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(14): 4294-4306.

[14] Sasse J, Martinoia E, Northen T. Feed your friends: Do plant exudates shape the root microbiome [J]. Trends in Plant Science, 2018, 23(1): 25-41.

[15] Wang G W, Jin Z X, Wang X X, et al. Simulated root exudates stimulate the abundance of Saccharimonadales to improve the alkaline phosphatase activity in maize rhizosphere[J]. Applied Soil Ecology, 2022, 170: 104274.

[16] Chen Y, Bonkowski M, Shen Y, et al. Root ethylene mediates rhizosphere microbial community reconstruction when chemically detecting cyanide produced by neighbouring plants[J]. Microbiome, 2020, 8(1): 4.

[17] Wang X C, Zhang J Y, Lu X J, et al. Two diversities meet in the rhizosphere: Root specialized metabolites and microbiome[J]. Journal of Genetics and Genomics, 2024, 51(5): 467-478.

[18] Wang L, Zhang X, Tang C W, et al. Engineering consortia by polymeric microbial swarmbots[J]. Nature Communications, 2022, 13: 3879.

[19] Qiao D, Li J, Zhang S, et al. Controlled release fertilizer with temperature-responsive behavior coated using polyether polyol (PPG)/polycaprolactone (PCL) blend-based polyurethane performs smart nutrient release[J]. Materials Today Chemistry, 2022, 26: 101249.

[20] Shaghaleh H, Alhaj Hamoud Y, Xu X, et al. A pH-responsive/sustained release nitrogen fertilizer hydrogel based on aminated cellulose nanofiber/cationic copolymer for application in irrigated neutral soils[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 368: 133098.

[21] Wu C H, Huang C D. Research progress on the key roles of calcium nutrition in regulating potato yield, quality and stress resistance[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(6): 1199-1210. [吴楚红, 黄成东. 钙调控马铃薯产量、品质和抗逆性的关键作用研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(6): 1199-1210.]

[22] Wang T Q, Wang N Q, Lu Q F, et al. The active Fe chelator proline-2'-deoxymugineic acid enhances peanut yield by improving

soil Fe availability and plant Fe status[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2023, 46(1): 239-250.

[23] Wang Y, Zhang M M, Lyu Y, et al. pH-responsive materials and their applications in intelligent fertilizer[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, 43(8): 4477-4489. [王洋, 张苗苗, 吕阳, 等. pH 响应材料及其在智能肥料中的应用[J]. *化工进展*, 2024, 43(8): 4477-4489.]

[24] Cheng G Y, Kuan C Y, Lou K W, et al. Light-responsive materials in droplet manipulation for biochemical applications[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(2): 2313935.

[25] Bindra P, Kaur K, Rawat A, et al. Nano-hives for plant stimuli controlled targeted iron fertilizer application[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 375: 121995.

[26] Wen A, Havens K L, Bloch S E, et al. Enabling biological nitrogen fixation for cereal crops in fertilized fields[J]. *ACS Synthetic Biology*, 2021, 10(12): 3264-3277.

[27] Wang N Q, Wang T Q, Chen Y, et al. Microbiome convergence enables siderophore-secreting-rhizobacteria to improve iron nutrition and yield of peanut intercropped with maize[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 839.

[28] Shang H Y, Yang X X, Liu H. Temperature-responsive hydrogel prepared from carboxymethyl cellulose-stabilized N-vinylcaprolactam with potential for fertilizer delivery[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 313: 120875.

[29] Alhaj Hamoud Y, Shaghaleh H, Guo X P, et al. pH-responsive/sustained release nitrogen fertilizer hydrogel improves yield, nitrogen metabolism, and nitrogen use efficiency of rice under alternative wetting and moderate drying irrigation[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2023, 211: 105376.

[30] Sahota T S. Environmentally smart nitrogen (ESN)—Potential for improving modern crop production and N-use efficiency[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 2020, 10(6): 327-340.

[31] Lam S K, Wille U, Hu H W, et al. Next-generation enhanced-efficiency fertilizers for sustained food security[J]. *Nature Food*, 2022, 3(8): 575-580.

(责任编辑: 卢 萍)