

DOI: 10.11766/trxb202203290145

张福锁, 申建波, 危常州, 马文奇, 张卫峰, 黄成东, 吕阳, 张林, 鲁振亚, 营浩, 程凌云, 江荣风, 屈凌波, 侯翠红, 王辛龙, 修学峰, 马航. 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.

ZHANG Fusuo, SHEN Jianbo, WEI Changzhou, MA Wenqi, ZHANG Weifeng, HUANG Chengdong, LÜ Yang, ZHANG Lin, LU Zhenya, YING Hao, CHENG Lingyun, JIANG Rongfeng, QU Lingbo, HOU Cuihong, WANG Xinlong, XIU Xuefeng, MA Hang. Green Intelligent Fertilizer: From Interdisciplinary Innovation to Industrialization Realization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (4): 873–887.

绿色智能肥料: 从原理创新到产业化实现*

张福锁^{1†}, 申建波¹, 危常州², 马文奇³, 张卫峰¹, 黄成东¹, 吕 阳¹,
张 林¹, 鲁振亚¹, 营 浩¹, 程凌云¹, 江荣风¹, 屈凌波⁴, 侯翠红⁴,
王辛龙⁵, 修学峰⁶, 马 航⁷

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 绿色智能肥料创新农业农村部重点实验室, 植物-土壤相互作用教育部重点实验室, 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. 郑州大学化工学院, 郑州 450001; 5. 四川大学化学工程学院, 成都 610065; 6. 中国磷复肥工业协会, 北京 100013; 7. 云南云天化股份有限公司, 昆明 650228)

摘 要: 肥料作为粮食安全的物质基础, 在支撑我国粮食产量、农产品品质、人类营养健康等方面发挥了至关重要的作用。迈入新时代, 在全国社会经济特别是工农业绿色转型的大好形势下, 肥料创新面临着协同实现粮食安全、资源高效、环境友好、营养健康、绿色低碳的巨大挑战。为破解这一重大难题, 本文提出了绿色智能肥料概念与产业化途径, 通过系统阐述土壤-植物-微生物-肥料-环境之间的协同原理, 构建了匹配土壤、匹配作物、匹配气候环境条件的绿色智能肥料创制新学术思路, 提出了绿色智能肥料的理论框架、关键科学问题、研发路径以及未来突破的重点, 为多学科交叉创新、工农融合全产业链绿色发展的解决方案设计与实现提供借鉴, 旨在推动我国化肥产业绿色转型升级, 支撑农业绿色发展。

关键词: 绿色智能肥料; 植物营养; 根际过程与调控; 根际微生物组; 养分高效; 环境; 绿色低碳; 可持续发展

中图分类号: S14 **文献标志码:** A

Green Intelligent Fertilizer: From Interdisciplinary Innovation to Industrialization Realization

ZHANG Fusuo^{1†}, SHEN Jianbo¹, WEI Changzhou², MA Wenqi³, ZHANG Weifeng¹, HUANG Chengdong¹, LÜ Yang¹, ZHANG Lin¹, LU Zhenya¹, YING Hao¹, CHENG Lingyun¹, JIANG Rongfeng¹, QU Lingbo⁴, HOU Cuihong⁴, WANG Xinlong⁵, XIU Xuefeng⁶, MA Hang⁷

* 云南省科技厅项目“云南现代农业绿色关键技术创新与平台建设(202102AE090053)”、云天化股份有限公司项目“绿色智能坚果专用复合肥产品开发及应用(YTH-4320-WB-FW-2021-031303-00)”和北京高校高精尖学科建设项目共同资助 Supported by the Yunnan Province Science and Technology Department project “Key Technology Innovation and Platform Construction of Green Modern Agriculture in Yunnan (No. 202102AE090053)”, the Yuan-Tian-Hua Project “Development and Application of Green Intelligent Compound Fertilizer for Macadamia Nuts (No. YTH-4320-WB-FW-2021-031303-00)”, and the Beijing University Advanced Discipline Construction Project

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

收稿日期: 2022-03-29; 收到修改稿日期: 2022-04-15; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-04-27

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Key Laboratory of Green Intelligent Fertilizer Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, 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. School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 5. School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 6. China Phosphate compound Fertilizer Industry Association, Beijing 100013, China; 7. Yunnan Yuntianhua Co., LTD, Kunming 650228, China)

Abstract: As the material basis of food security, fertilizer plays an important role in supporting grain yield, agricultural product quality and human nutrition and health. Stepping into the new era, under the great situation of the national social economy, especially the green transformation of industry and agriculture, fertilizer innovation is facing the great challenge of synergistic realization of multiple objectives including food security, resource efficiency, environmental friendliness, nutrition and health, green and low-carbon. In order to solve this major problem, the concept and industrialization pathway of green intelligent fertilizer were put forward in this paper. Through systematically elaborating the interactive principle of soil, plant, microorganism, fertilizer and environment, this study put forward a new academic idea for creating green intelligent fertilizer that matches soil, crops and climate and environmental conditions, and proposed its theoretical framework, key scientific issues, research and development pathways and future breakthroughs of green intelligent fertilizer. This study can provide new insights and reference for the design and implementation of holistic solutions for the green development of the whole industrial chain of multi-disciplinary cross-innovation and integration of industry and agriculture, aiming at promoting the green transformation and upgrading of China's chemical fertilizer industry and ultimately supporting the green development of agriculture.

Key words: Green intelligent fertilizer; Plant nutrition; Rhizosphere processes and regulation; Rhizosphere microbiome; High nutrient use efficiency; Environment; Green and low-carbon; Sustainable development

化肥是粮食的“粮食”，是支撑粮食生产与粮食安全、绿色生态与环境、人类营养与健康，提升人民生活质量和幸福指数的战略物资，是养活全球 78 亿人的基本保障^[1]。进入新时代，绿色发展成为国家发展的主旋律，坚持绿色发展是发展观的一场深刻革命，迫切需要在推动经济社会发展的同时保护生态环境，实现资源高效利用和绿色低碳环保，使以往片面追求高投入、高产出、高消耗、高排放的传统发展方式走向绿色转型^[2-3]。当前，我国提出了 2030 年实现“碳达峰”、2060 年实现“碳中和”的战略目标，化肥生产与使用走向绿色低碳势在必行。

化肥产业支撑了农业生产，但同时也是资源消耗大户，对环境可持续性影响较大^[4]。据统计，化肥产业消耗了 2% 的煤炭、3% 的天然气、80% 的磷矿以及 60% 的硫资源^[5]；不合理使用化肥对农业源氮、磷排放的贡献分别达到 36% 和 51%，对水体污染的贡献为 24%^[6]。此外，我国肥料产业还涉及科研、服务、流通、管理等领域近 240 万人就业及数亿终端用户——农民的生计，年产值达 9 870 亿元，间接带动农业初级产品增值 8 万亿元、农产品深加工 20 万亿元和农业生产性服务 2 000 亿元^[4]。由此

可见，化肥产业涉及粮食安全、资源安全、环境安全、社会稳定等国计民生等重大领域，是一个关乎“粮食-资源-能源-环境”绿色可持续的万亿级巨大产业。面对国家发展新形势，变革延续 40 余年的传统化肥产业中工农脱节、高耗高排、市场单一驱动的生产与发展方式，转型为工农融合、全产业链绿色发展模式，从根本上实现我国化肥产业的“绿色革命”，创新面向农业绿色发展需求，与土壤、作物和气候相匹配的新一代绿色智能肥料，对于加强化肥工业与农业的有效融合，实现农产品优质高产、资源高效、生态环境健康多目标协同的农业绿色发展具有重大理论与实践意义^[4, 7-11]。发展绿色智能肥料已成为肥料化工领域绿色转型与产业变革的重大需求和引领性方向^[8]。

本文通过对植物营养学、肥料科学及其化工工艺相关领域新进展的总结和分析，系统剖析了基于土壤-植物-微生物-肥料-环境协同的绿色智能肥料创制的新学术思路，提出了多学科交叉创新研究的核心领域-绿色智能肥料的基本概念、理论框架、关键科学问题、研发路径、未来技术与突破的重点，以期引发对多学科交叉创新、工农融合全产业

链解决方案的思考与讨论，推动化肥产业绿色转型升级，促进相关学科的交叉融合与发展，为我国农业现代化建设和第二个百年奋斗目标的实现提供科技战略支撑。

1 创新绿色智能肥料的必要性

过去 40 年，我国化肥总量保持快速增长。氮肥和磷肥的产能、产量及消费量均居世界首位，实现了自给有余；钾肥生产跃居世界第四，自给率大幅提升。我国化肥产业在满足国内需求的前提下，为全球化肥供应做出了巨大贡献，提升了我国在化肥生产领域的国际地位。然而，在新形势下，我国化肥产业绿色转型迟缓、发展相对滞后，与农业需求匹配度低，已无法满足“碳达峰、碳中和”和绿色发展的新需求。

1.1 从历史演变的角度看，创新绿色智能肥料成为必然选择

传统化肥产业模式难以保障粮食安全与绿色发展的协同。化肥是粮食安全的压舱石，对粮食产量的贡献率达 50% ~ 55%。长期以来，发展化肥产业一直作为实现粮食安全的重要国策，促进了我国化肥产业发展，化肥生产量与消费量分别占到世界的 30% 和 25%。目前，我国化肥产能过剩，主要以合成氨工艺为主生产高浓度的化学氮肥，而农业施用不合理，导致氮素年盈余量达 1 900 万吨^[12]，肥料养分在土壤中过度积累，粮食产量与养分效率仅实现了最大潜力的 50%^[13]。高浓度氮肥的过量施用，导致 1980s—2000s 年间农田土壤 pH 平均下降 0.5 个单位^[14]，酸化面积增加了 1.2 亿亩（1 hm²=15 亩），总计达 2.9 亿亩；导致农田活性氮损失达 892 万吨/年，约占化学氮肥投入的 1/3，其中氨排放贡献了大气 PM_{2.5} 的 10% ~ 18%。活性氮损失相关的环境及人类健康损害成本高达 2 800 亿元/年。与此同时，气象灾害、疫情突发、市场波动、粮食安全与化肥产业脆弱性等问题凸显。由于全球大宗商品价格上涨的带动，以及异常气候频发导致的农业消费增加，2020 年 10 月以来化肥价格快速上涨，到 2022 年年初，尿素价格同比上涨近 1 倍，磷酸一铵价格增长 91%，氯化钾价格增长 190%。为此，中央财政 2022 年再次为种粮农民一次性补贴资金 200 亿元。尽管各种补贴发挥了重要作用，但农民的总收益还是难

以得到维持，出现了显著下降的趋势。因此，传统化肥产业以生产高浓度养分为主的发展模式，已经难以保障粮食安全和绿色发展的协同实现。

化肥产业高耗高排，难以满足“碳达峰、碳中和”和“绿色发展”的新需求。化肥产业的自身属性决定其成为重要的“碳排放”源，在诸多产业中排名前五。化肥产业资源消耗大，由于我国天然气供给严重不足，是全球唯一依赖于煤炭为原料的主要化肥生产国，其碳排放因子较天然气高出 50%。而我国的氮磷化肥农业当季利用效率在全球仍处较低水平，每年氮、磷资源仅有 14%、22% 最终被消费利用。我国化肥生产与运输、农业生产及养殖等多个环节产生了大量的碳排放，碳排放量总量达 15.2 亿吨/年，占全国温室气体排放总量的 15%，远高于土壤碳固定的 2.3 亿吨/年，实现“双碳”目标，任务艰巨。

由此可见，传统化肥产业模式难以保障粮食安全与绿色发展的协同，创新绿色智能肥料成为必然选择^[9]。

1.2 从产业发展的角度看，亟需工农融合创新化肥产业体系

缺乏工农融合的化肥产业创新体系，难以支撑化肥产业“绿色革命”。我国化肥产业创新能力不足，研发投入和动力缺乏，产业集中度低，虽然拥有 3 000 多家生产企业，但关键技术装备创新、研发合作平台、创新引领人才等普遍缺乏，在全球及全国能达到引领性的企业数量极少。行业过度竞争，全行业利润率长年低于 5%，企业亏损面长期高达 30% 以上，很多化肥企业依靠化工产品支撑，化肥变成了“副业”，如当前锂电池领域磷酸铁锂产业的快速发展，使得高品质磷资源的需求和消耗不断增长，在一定程度上挤压了磷复肥产业的发展空间，使磷复肥的生产工艺也发生了改变，企业不得不考虑使用较低品质的磷资源进行肥料生产，使高浓度、高水溶性磷复肥产品生产受到影响。由于专业的工农融合队伍很少，农民购肥及如何施肥基本由肥料销售者基于利润最大原则进行推荐，而忽视了知识密集型的肥料创新本身，极易出现施肥量大、肥料与农业需求不匹配的现象。此外，我国肥料管理缺乏法律法规约束，主要依托农业农村部相关部门开展有限的管理工作，其力度和效果受到很大局限。而工业部门主导的肥料标准、行政许可法规等成为管理主体，严重弱化了肥料的农业和环境资源属性，

是导致产品匹配度差、应用效率低、环境风险大的关键因素。因此,亟需打造适应绿色发展要求、工农高度融合的化肥产业创新体系。

1.3 创新绿色智能肥料是破解化肥产业绿色发展瓶颈的突破口

化肥产业的绿色发展依赖于化肥产品的创新。长期以来,工业生产主导着我国化肥产业的发展,化肥产品是否匹配农业需求被忽视。近年来,我国化肥工业开始转型,如云南云天化股份有限公司与中国农业大学合作,2015 年成立了云天化植物营养学院、云天化国际植物营养研究院和云天化农业研究中心,工农融合极大推动了面向农业需求的化肥生产,并且农业需求开始推动化肥产品创新,提出了主要作物种植区的肥料大配方,推动了作物专用肥生产与应用。此外,生长刺激素、肥料增效剂等产品开始应用于化肥工业和农业生产^[15-19]。然而,从整个产业来看,在资源全量化利用和化肥产品匹配土壤、作物和气候方面并没有取得理论和技术上的根本性突破。在资源利用和工业生产端,仍然以追求高浓度氮磷钾养分为主要目标,忽视了中微量元素和枸溶性磷等养分形态的全量化利用,造成大量工业废渣排放;在产品应用端,多是以水溶、大量元素等肥料为主,产品功能单一,强调给土壤和作物提供养分,没有主动利用各种养分调节植物生长发育的潜力,忽视了作物本身对养分的主动应答、吸收和反馈作用,在养分靶向精准调控方面缺乏创新。产品创新原理和技术的不足,严重制约了化肥产业和农业绿色发展。近年来,随着植物营养和材料科学等相关学科的快速发展,绿色、智能、资源高效、低碳环保等逐渐成为化肥领域的研究热点,最近两款绿色智能复合肥(澳洲坚果和水稻专用肥)在云天化应运而生,正显现出良好的发展前景。因此,创新绿色智能肥料有望成为破解化肥产业绿色发展瓶颈的突破口。

2 绿色智能肥料的概念与原理创新

2.1 绿色智能肥料的概念与内涵

绿色智能肥料是指根据作物-土壤-环境相匹配的植物营养调控原理,采用大数据智能算法进行有针对性的定向匹配设计,应用先进绿色制造工艺生产的具有作物根际效应激发^[20-25]、养分精准匹配和

矿产资源全量利用的一类新型高品质肥料,具有养分高效、低碳环保,低排无废、资源全量利用的绿色特点;施用后具有能高效挖掘作物的生物学潜力^[26]、与根系“对话”激发根际效应、响应气候和土壤条件、精准匹配作物需求的智能特点。绿色智能肥料改变传统给土施肥的方式,注重调节和调动根系生长的能力,强调根际生命共同体养分高效的应答与生物互作级联放大效应^[20, 25-26],能够最大化作物生物学潜力,绿色智能复合肥是其产业化的高端物化产品。绿色智能肥料不仅具有更好增产提质和培肥土壤作用,而且是引领工农全链条融合与化肥产业绿色转型的重要切入点。

绿色智能肥料包括五大内涵(图1):

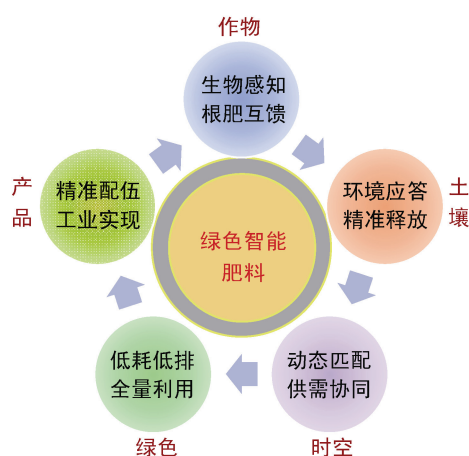


图1 绿色智能肥料的主要构成因素与五大内涵

Fig. 1 Main components and five major connotations of green intelligent fertilizer

1) 作物: 生物感知, 根肥互馈

作物根系或土壤微生物可以强烈感知养分的供应,作物根系、根际效应与肥料能产生互馈增效作用,并通过根际生命共同体的级联放大效应最大化肥料的功能^[20-21, 23, 26-28]。例如硝态氮能促进根系伸长,而铵态氮可促进根系分支,提高侧根数量和增生能力,从而大幅度提高作物生长^[29-31]。改变复合肥中的铵硝比可有效调控作物的地上部与地下根系生长。磷肥中速效与缓效磷的匹配可显著影响植物的根系生长,如澳洲坚果拥有一种特殊的根系——排根^[32-33],排根是低磷诱导形成的、像毛刷一样由大量有限生长的小侧根形成的根簇,可分泌大量柠檬酸高效活化根际土壤中的难溶性磷,提高植物对土壤磷资源的活化、吸收利用效率,而供应过量的

水溶性磷，会显著抑制澳洲坚果排根形成与柠檬酸分泌，甚至产生磷的奢侈吸收，造成植株磷毒害^[33]。当农民施用过量的水溶性磷肥，不仅浪费严重，还造成澳洲坚果排根生长受到抑制，影响植株的正常生长，进而降低果实的产量和品质。依据澳洲坚果自身的特点，在磷肥供应中，可以使用部分难溶性磷或枸溶性磷，优化氮肥形态，激发根系生长，强化根际效应，提高地上部对养分资源的利用效率，形成智能养分促根，根系生长强化根土界面效应，根际效应激活土壤养分，形成根肥互馈，提高作物的产量和品质^[32]。

2) 土壤：环境应答，精准释放

作物生命活动受环境条件的显著制约。低温条件下作物的生长发育速度显著降低，其养分吸收量和吸收速度均显著下降；土壤含水量显著影响根系发育以及养分迁移，几乎所有养分的有效性均受到土壤含水量的影响，对于硝态氮、磷、钾尤其如此。绿色智能肥料可根据环境条件的变化，自主调节养分释放的强度，以便与作物营养需求相匹配。既注重考虑对土壤障碍因素的调控，更要注重根际微域的智能响应和反应。如采用分子亲水材料制作包膜，肥料只有在土壤含水量达到一定的阈值时才能充分吸水崩裂从而释放养分^[34-35]。除水分以外，土壤 pH 也是影响养分有效性的重要因素，绿色智能肥料的养分释放也可依赖于土壤 pH 的变化^[36]，甚至对根分泌的有机酸、土壤环境温度做出反应，通过对环境应答的控制与调节，实现养分的精准释放。

3) 时空：动态匹配，供需协同

绿色智能肥料需要从时间与空间上实现与作物需求的高度匹配。由于作物生长发育速率以及不同发育时期（营养生长与生殖生长）的动态变化，不同时期的养分需求差异很大，而肥料产品施入土壤后，养分释放规律也随着施肥时间和空间位置的变化而改变。因此，为了实现养分利用效率的最大化，需要考虑新型肥料产品的养分供应与根系发育、作物需求在时间、空间尺度上的动态匹配，同时也需要考虑土壤环境对养分转化、损失与植物生长速率的影响。另一方面，养分主要通过根系被作物吸收，但随着作物不断生长，其根系在土壤内的分布不断发生变化，同时，不同养分在土壤中的移动特征存在很大差异。肥料施用需要结合机械化精准施用装备，将养分施用在根系分布区域，提高其空间有效

性。作物根系也可通过优化养分施用被定向调控，如局部施肥促进根系增生和根际的强烈酸化，提高根系与肥料养分的接触范围，发挥互作增效潜力，增强作物对根层养分的活化吸收与利用效率，促进地上部生长，良好的地上部发育又反馈增强根系的生长，实现在时空上的动态匹配，供需协同^[8, 26]。

4) 绿色：低耗低排，全量利用

绿色智能肥料产品中的绿色主要是从产品全生命周期中资源利用和环境排放两个维度来考量的。全量利用指的是矿产养分资源的利用强度和效率，强调尽量保留原料中各种养分并高效利用；在原料开采和肥料制造过程中要求主要养分损失少，利用率高，其他养分如中微量元素也要通过各种途径加以利用，既可以直接将矿产资源中各种养分一次性保留在肥料产品中，也可以通过延长产业链，将各种副产品中养分资源通过二次或多次加工制成新的肥料产品，提高养分资源利用效率。低耗低排是指肥料产品全生命周期中能源消耗和环境排放要低，首先在原料开采和产品制造过程中能耗低，温室气体和各种废弃物排放少；同时在肥料施用后养分利用效率要高，有利于作物对养分的高效利用，土壤残存少，环境负效应低。最终实现绿色低碳、全量利用。

5) 产品：精准配伍，工业实现

作物对养分的偏好已被诸多研究所证实，但由于精准配伍的难度及工业制造上的复杂性，有关理论在肥料科学领域的应用非常少。硝酸盐对多数作物既是一种良好的氮源，同时也是营养信号物质，在调节地上、地下部发育及激素响应方面发挥着重要作用。因此对很多作物而言，采用铵硝搭配往往优于单一氮素形态的肥料效果。由于磷酸根离子与钙、镁等金属离子易发生沉淀反应，从而降低养分的有效性和肥料的水溶性，因此，在复合肥生产中，如何高效实施中微量元素肥料的复合一直是肥料行业的难点之一。在某些情况下，肥料的生产加工过程也可能使初始养分配伍发生飘移，改变肥料产品中的养分配方。绿色智能肥料通过优化工业设计，尤其是通过造粒工艺、螯合等技术创新，使中量元素肥料在肥料颗粒中与水溶性磷肥实现分隔，使磷素与中量元素共存，从而提高钙镁缺乏地区（通常是酸性土壤）肥料的整体利用效率；如通过原位螯合中微量元素实现磷与中微量元素的协同，创制含中微量元素低 pH 的水溶性磷酸一铵，从而适应北

方硬水条件下的碱性缺素土壤，提高磷与中微量元素利用率。通过创新绿色生产工艺，实现肥料产品中养分形态的精准配伍和高稳定性。

2.2 绿色智能肥料的创新原理

绿色智能肥料的创新在于“绿色”与“智能”。因此，绿色智能肥料要求在工业产品生产端尽量利用原料中对植物有益的各种养分，最大限度地减少能源消耗和工业三废排放，实现绿色工业制造。在农业生产使用端，肥料养分的供应要匹配土壤和作物，符合植物营养需求规律，提供多种营养元素，并能提高肥料所含各种养分的吸收利用效率，减少肥料在土壤中的残留以及向水体、大气的排放。

绿色智能肥料的创新有赖于对植物营养生物学规律、肥料在土壤中转化和迁移规律的深入理解和创造性应用等知识创新，实现理论突破；也取决于工农融合肥料制造工艺和新材料的发明、发现与应用，实现产品创新。主要创新途径有：（1）养分分隔与共存。在复合肥料生产中，集成钙镁与大量营养元素，避免发生沉淀反应，采用“物理隔离”原理是破解这一难题的重要途径，在复合肥料颗粒中水溶性磷与钙镁成分实现空间隔离、稳定共存。按照这一原理设计的复合肥料既能“智能地”避免肥料成分之间的不利反应，又能均衡地释放作物需要的养分，满足这些设计目标需要肥料制造工艺的不

断创新。（2）纳米微粒与稳定悬浮。研究表明，MgO、CaO 等材料制成纳米颗粒后，不仅能避免其与大量元素的化学反应，而且能在使用时形成稳定的悬浮液，不需要采用络合等手段保持其稳定性，纳米级的 MgO、CaO 还可以实现跨膜吸收^[37-38]。（3）敏感材料与靶向调控。当前，工业制造与学术界在努力探索 pH 敏感、温度敏感、特定物质（根分泌物如黄酮、类黄酮）敏感的包覆材料^[39-42]。一旦这些材料成果应用于肥料制造领域，可实现在响应特定环境条件下肥料养分的智能释放，使绿色智能肥料技术达到分子调控水平。

绿色智能肥料的创新设计需要与土壤特性和作物需求有机结合，通过根层调控技术充分发挥其功效，促进植物根系生长，强化根际养分活化能力，大幅度提高植物根系对养分的利用效率，在时空上满足高产群体不同阶段的养分需求。土壤是绿色智能肥料发挥最大作用效力的场所，设计的绿色智能肥料应当与特定的土壤理化性质相匹配，在此基础上，通过各种其他农学管理措施，如施用土壤调理剂、微生物制剂、生物刺激素等，优化土壤结构-养分供应-生物过程之间的关系，强化肥沃根层、蓄水保肥、生物活力，增强土壤健康与整个系统的弹性，实现根层养分供应与高产群体的匹配，提高系统的可持续生产能力（图 2）。

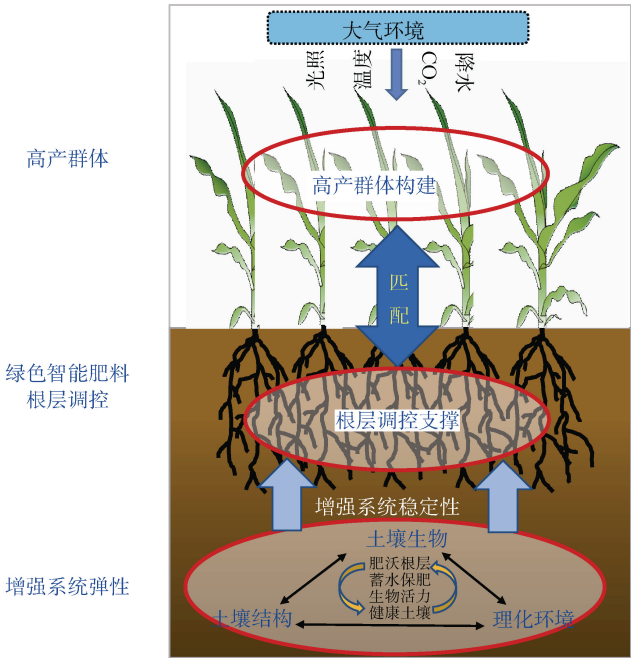


图 2 绿色智能肥料在土壤-植物系统综合管理中的作用示意图
Fig. 2 Role of green intelligent fertilizer in integrated soil-plant system management

3 绿色智能肥料的创新与产业化思路

3.1 总体思路

绿色智能肥料创新与产业化需要围绕提质增效、产业升级和绿色发展这一总体目标，通过理论基础研究的知识创新与工农融合支撑的产品创新两大抓手，绿色智能肥料产品的创制要按照“元

素协同工艺增效”“精准配伍材料创新”和“生物互作级联放大”三步走策略，产业化中重点做好“四个匹配”，首先是工业生产过程与作物生产过程的匹配，其次是肥料产品特性与作物根系响应的匹配，第三是肥料产品与根际生命共同体提升的匹配，最后是工农融合与全链条绿色发展的匹配（图3）。

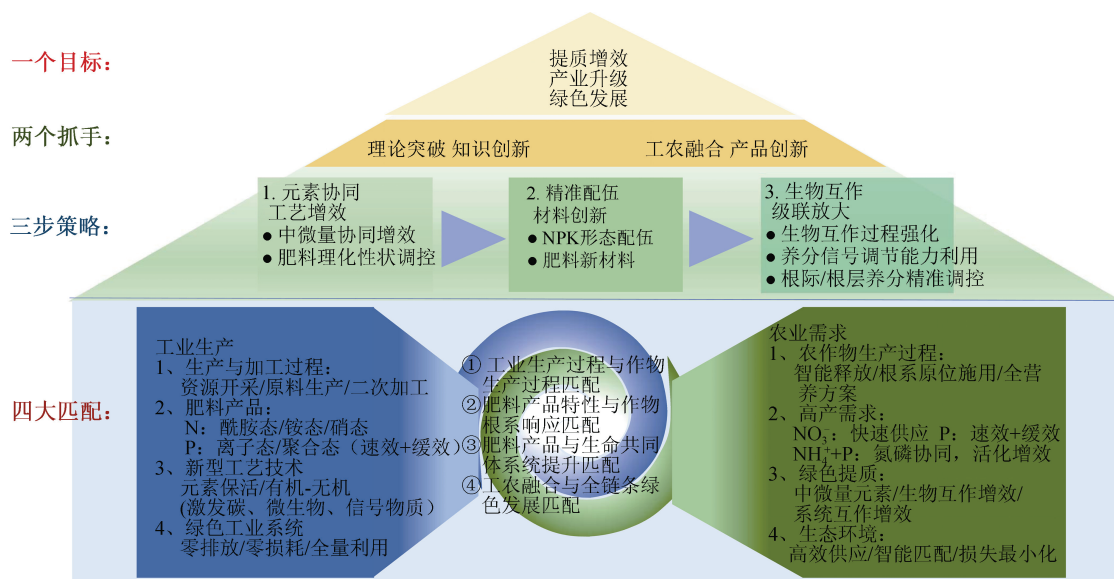


图3 绿色智能肥料的创新与产业化总体思路

Fig. 3 Strategy and pathway of innovation of green intelligent fertilizer - integrating industry and agriculture towards green development of whole industry chain

3.2 绿色智能肥料的“三步走”创制策略

3.2.1 元素协同，工艺增效 绿色智能肥料创新第一步是元素协同、工艺增效的策略，元素协同指的是通过大量元素适宜配比和中微量元素的添加与保活，实现肥料养分供应与土壤、作物和气候的匹配，而在这种养分配比中，为防止养分效应退化的问题，需要进行工艺创新，实现养分增效。目前，在农业生产中，随着氮磷钾肥料的大量施用，中微量元素缺乏和养分失衡问题日渐突出，已成为影响肥料效果的重要限制因素，也是肥料产品研发的重点攻关方向，“十三五”减肥专项对此也开展了大量研究，取得了重要进展，为绿色智能肥料的进一步创新奠定了基础。

3.2.2 精准配伍，材料创新 我国农业已走过了仅凭单一元素化肥、氮磷钾复合肥施用即可实现增产的阶段，进入了要求营养元素协同供应、提质增效、绿色发展的新时代。这对复合肥料创新提出了

更高要求。我国土壤和作物分布区域变异大，南方大量酸性土壤地区果树、蔬菜、甚至大田作物均亟须补充钙镁营养，北方石灰性土壤通常缺乏微量元素铁和锌^[43-45]。虽然在酸性土壤上可以施用石灰、钙镁磷肥调整土壤酸碱度、补充钙镁等，但是施用环节复杂，易产生副作用，采用复合肥料添加钙镁是更为可行的途径。这要求对复合肥料的配方进行精准配伍，使其更符合土壤和作物营养需求，并采用物理隔离、纳米材料等新型工艺方法制造智能型肥料^[46-47]。肥料成分的复杂化可能会导致肥料在制造、储存过程中不同营养元素之间发生不良的化学反应，创新与研发新材料是解决这些关键问题的重要途径。目前国内外已经取得一定进展，如某些纳米材料和包膜材料能自主感知环境的变化、控制养分的释放^[40]，但总体而言，智能型包膜材料创新仍然处于探索中，产品的产业化应用尚待时日。

3.2.3 生物互作，级联放大 绿色智能肥料的合

理施用不仅能定向调控根系扩展空间、强化根际效应提升活化能力，而且还可以激发根际生物互作增效、级联放大的功能，高效活化利用土壤养分(图4)。研究发现，植物可通过根系形态改变、根分泌物释放、菌根系统高效活化利用土壤养分，它们之间存在明显的权衡机制^[27-28]。根层养分供应与根系、根际养分效率呈“倒U型”规律：相对于根层养分盈余，优化根层养分供应能够增强根系密度与长度、提高根际分泌物释放与酶活性、促进菌根效应及菌丝生长，最大化根系高效活化利用养分的生物学潜力。局部养分供应不仅能为根系提供矿质营养，还能定向调控并提升根层微域增效功能：局部供应的

养分可作为信号促进根系生长(包括根系长度、根系密度、菌根菌丝长度等)，增强根际酸化和分泌物作用^[20, 48]，进一步激发根系-微生物、微生物-微生物互作，从而形成养分调控的级联放大效应，系统提升作物养分利用效率^[23, 25-26, 49]。研究表明，局部氮、磷供应能刺激玉米根系增生^[48-49]，促进质子分泌降低根际 pH，增强磷酸酶活性^[20, 50-52]。利用根际少量磷的起爆效应，调控菌丝分泌物信号促进解磷细菌与菌根真菌的协同互作^[24-25]，土壤养分活化效率提升 30%。因此，调控作物根层的养分形态与精准供应能有效耦合根系、根际、生物互作等过程，逐级放大效能，实现养分高效利用。

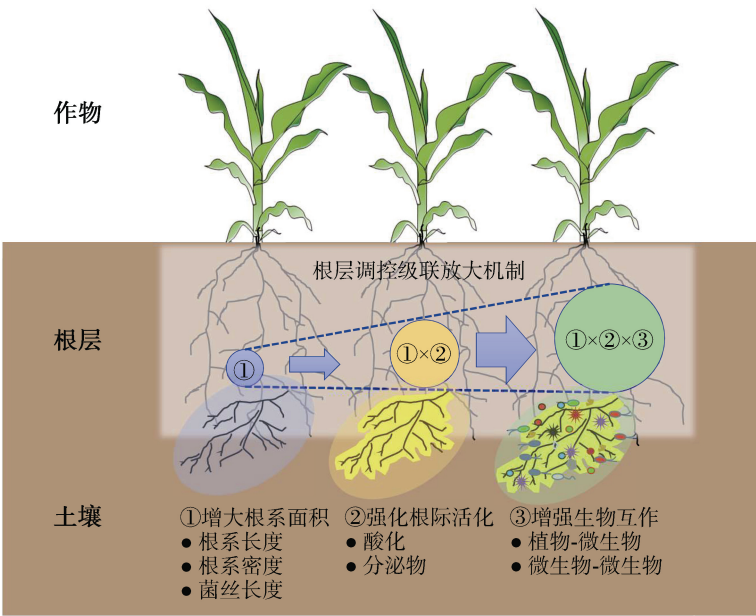


图4 根层生物互作、级联放大示意图

Fig. 4 Effects of root-zone biological interactions and cascading amplification for improving nutrient use efficiency

3.3 绿色智能肥料工业生产与农业需求的匹配原则

3.3.1 工业生产过程与农业生产需求的匹配 现代肥料的工业生产与农业需求脱节的弊端日益凸显。现代农业生产追求的目标是“提质增效、绿色发展”，在注重绿色增产增效的同时，要提高农产品的营养品质，实现农业高质量发展；而且我国经过半个世纪的发展，土壤养分肥力快速提升，许多地区土壤出现“富营养化”，加剧了环境污染的风险。而传统的肥料工业生产仍然在追求“高纯度、高浓度”，忽视了矿产资源养分的全量利用、高浓度单一化的产品不能与土壤和作物需求相匹配，难以满足

绿色增产增效、营养健康、高质量发展的新需求。绿色智能肥料要求工业生产过程与农业生产过程匹配，针对不同作物生产方式，需要考虑以下技术路线：(1)粮食作物生产。在优化 NPK 配比的基础上，结合中微量元素添加，走资源全量化利用路线，不强调高浓度、全水溶的肥料，注重养分速效与缓效的协同；在我国东北特定条件下，玉米生产以一次性施肥为主，迫切需要研发非水溶性、多养分元素共存、控释增效、养分供需匹配、适用于机械化施肥装备的新型制造工艺和造粒技术。(2)经济作物生产。通常采用水肥一体化技术，这种农业生产过程要求高端的水溶性绿色智能肥料，强调“高浓度、

水溶性、均衡营养、配伍高稳定性”的工业生产要求，以及针对水肥一体化设备的适用性。可见，化肥工业生产需要研究农业生产过程的新需求，及时调整研发思路和革新生产工艺，农业生产过程需要为化工生产提出新的课题，二者相互促进与融合，实现工业生产过程与农业生产过程的匹配。

3.3.2 肥料产品特性与作物根系响应的匹配 肥料产品中的养分总量、元素形态对作物根系的生长均具有深刻影响，应依据根层养分供应强度与根系根际效率的关系原理，破解高投入体系中生物学潜能不能充分发挥的难题。利用定向设计的肥料产品，优化根层养分供应强度能最大化根系与根际高效活化利用养分的生物学潜力，适宜的根层养分强度调控可使玉米根长增加 40%，菌根养分吸收贡献率提高 3 倍。利用根系对养分的觅食（Root foraging）原理，根层局部养分供应能提升根系与根际微域的增效功能，并通过级联放大效应激发根际互作潜能，如局部硝酸盐信号可以诱导玉米侧根增长 1~1.5 倍，氮吸收效率提高 25%^[53]；局部铵磷供应能刺激玉米根系增生 30%，促进质子分泌导致根际 pH 下降 1~2 个单位^[50]，磷酸酶活性增强 50%^[20]。因此为了最大化发挥根系响应的效果，需要根据不同作物根系生物学特征，设计与之相匹配的智能型专用肥料产品。

3.3.3 肥料产品与根际生命共同体系统提升的匹配

作物对养分的高效利用是一个从土壤到作物从微生物到农业生产多界面互作的系统过程。任何单一过程的研究均无法破解整个系统的运行机制，也就难以从整体上大幅度提高作物养分效率。“根际生命共同体”是将“植物-根系-根际-菌丝际-土体及其微生物”连接在一起的自上而下能量流与自下而上养分流形成的一个闭环系统^[54]。根系作为植物吸收养分的主要器官，将地上和地下连为一体；根际则是控制植物-土壤互作界面物质、能量流动和信息交换的枢纽；菌丝际及其他微生物进一步拓展了植物吸收利用土壤养分的范围与功能。在“根际生命共同体”系统中，植物将光合产物输送到地下，驱动了地下多样化生命过程的运转。光合产物一部分用于支撑根系生长及其生理活动，另一部分以根分泌物的形式释放到根际环境中，显著地改变根际土壤的物理、化学和生物学性质，招募和供养微生物，使根际成为植物-微生物、微生物-微生物互作最活

跃的热点区域，成倍提升植物对土壤养分的活化与利用效率。根外菌丝和其他土壤微生物又将根际范围扩展上百倍，并能从距离根系很远的土体，以及根系难以进入的微团聚体内把养分捕获并传输给植物。由此可见，控制养分高效利用的是根际生命共同体系统，绿色智能肥料的研发应着眼于对整个共同体系统的改善与优化，而不是仅仅单一地促进根系或者微生物生长。开发肥料产品的多靶向性协同调控、优化根际生命共同体系统将是未来绿色智能肥料创新与产业化的重要引领性方向。

3.3.4 工农融合与全链条绿色发展的匹配

绿色智能肥料产品的研发和产业化，需要工农全链条与绿色发展的融合与匹配。首先需要工业和农业在产品上的深度融合，农业方面根据作物、土壤和气候等提出对肥料产品养分配比、形态和特性的需求，并通过大数据智能算法进行产品定向设计；工业方通过工艺创新最大程度实现精准配伍并达到智能化释放，再进一步反馈给农业方进行修正和效果验证；同时工业方提供各种矿产原料、副产品及废弃物资源等给农业方进行养分资源特征研究，工业方进行肥料产品物料的选配创新，实现养分的全量高效利用；双方同时从全产业链进行系统分析，找到降耗减排、绿色增效的卡口，通过关键技术突破，优选绿色智能肥料产品实现的技术途径；最后共同根据工业生产条件进行绿色智能肥料的产业化。

3.4 绿色智能肥料的工艺革新

绿色智能肥料从制造和产品工艺而言，可以分成两部分：绿色智能肥料材料创制与绿色智能肥料产品制造。

3.4.1 绿色智能肥料材料创制 绿色智能肥料材料创制是肥料产品创新的关键，其材料可以是撬动根际生命共同体、强化生物互作的信号物质或微生物，也可以是智能响应土壤环境条件的敏感型材料，还可以是来自于自然界或工农业生产中产生的低成本具有绿色环境属性的物质或资源。

1) 生物信号物质或微生物制剂。绿色智能肥料创新原理本质在于深入理解根际生命共同体互作过程中的物质产生与合成、微生物的生命活动规律，以及这些物质或微生物在作物生长过程中所起到的核心调控作用^[54]。因此，有必要利用现代生物合成学、新材料合成、生物源材料提取等手段，在系统

理解根际生命共同体调控原理与技术的基础上, 创新合成技术与有效降低合成成本, 制备新型高效生物信号物质, 或者重组土壤微生物群落^[55], 将理论与技术以产品的方式落地应用。

2) 环境响应敏感型材料。土壤是植物生长与肥料养分传输的介质, 土壤的特性及养分在土壤中的转化是影响肥料利用效率的关键点之一, 肥料养分对土壤环境的变化响应很敏感, 如土壤 pH、温度、湿度等。制备环境响应敏感型材料是目前新材料科学的前沿, 大量研究证明了新材料的潜在应用价值, 尤其是绿色、低成本、可生物降解的材料^[56]。针对植物对养分需求特性, 设计合成能够精准控制温度、pH 的响应型高分子材料、高吸水性/纳米多孔道材料(如高吸水性树脂、金属-有机骨架材料、分子筛、层状氢氧化物等), 将这些具有环境敏感特性的材料通过官能团自组织、靶向敲除等手段进行表面物理化学性质的改性, 强化材料对温度、湿度、pH 的敏感性^[57-61], 从而具有更强的养分保持和释放的能力, 成为智能型肥料的主要载体^[41-42, 62]。但目前尚无成熟的工艺, 有关产品的研发与创新亟待加强。

3) 绿色环境属性的物质或资源。目前许多化肥尤其是以磷钾为主的肥料的生产高度依赖于不可再生矿产资源, 需要在用好矿产资源的同时, 充分挖掘来自于自然界或工农业生产中产生的大量低成本的伴生或副产物资源, 如磷矿开采与磷肥生产、农产品生产与加工过程中产生的副产物, 这些副产物对于土壤而言是良好的养分资源, 甚至含有调控植物生长的有益物质。在纳米材料方面, 可以将难溶性原料纳米化, 与水溶性 H_2PO_4^- 的反应活性显著下降, 实现多元素共存保活。纳米粒子可以实现跨膜运输, 提高根系的吸收能力。纳米材料作为包膜材料制成的肥料具有很高的胶体稳定性和优良吸附性能, 肥料施入土壤后, 在一定程度上能感知土壤中的湿度和通气状况, 有效控制肥料的释放, 从而达到蓄肥、保肥的目的, 实现在关键作物生长时期, 肥料养分供得上、保得住。近年来, 能感应作物根际信号的包膜材料也在快速发展中, 韩国学者发现以木质素-铁-羟基磷灰石构成的超分子结构材料, 对根系释放的有机酸高度敏感, 在根际酸度增强时这种材料制成的包膜开始分解并释放出养分, 可以显著提高肥料的利用率^[63]。智能型包膜材料创新以及产品的产业化应用亟待加强。

3.4.2 绿色智能肥料制造工艺 绿色智能肥料是链接化肥工业革命与农业绿色发展的纽带, 也是工农融合绿色发展的抓手, 其制造工艺要在现化工业革命与农业生产新需求的基础上不断变革与发展, 面向双碳和农业现代化发展目标, 闯出一条绿色化、高效化、智能化的发展之路, 绿色智能肥料产品的创制与产业化, 迫切需要颠覆性的肥料生产工艺创新与技术突破。

1) 原料共伴生资源全量化利用工艺。绿色智能肥料产品创制强调生产原料的绿色低碳生产、高效活化和全量利用技术, 大幅提升矿产资源的肥料化效率。例如, 磷矿原料中富含磷、钙、镁、硅等多种营养元素, 但多为难溶性或低活性养分, 基于不同土壤-气候-作物需求, 需要创新磷矿产资源中养分绿色、高效、智能活化与半活化生产技术^[64], 并通过新的工艺技术手段, 如作物信号调控物质的协同增效, 来强化作物自主活化、吸收养分的能力, 实现磷矿资源养分的高效、全量利用, 突破当前磷化工发展的瓶颈。研究表明, 采用整合、聚合和生物物质活化/半活化原位调控技术可以实现磷与中微量元素^[65]、多种磷素形态以及有机碳与磷的协同利用与增效, 或采用高温活化技术综合利用尾矿和渣酸, 实现钙、镁、硅、磷等的协同利用, 形成磷矿养分全量化利用原位技术体系, 创制含中微量元素的水溶性磷酸一铵、“原位二铵”、肥料级聚磷酸铵、聚磷酸钙镁、有机磷铵等绿色增效肥料产品。在此基础上, 进一步通过原位活化工艺创新实现养分与作物信号调控物质协同是未来的重要方向。

2) 氮肥低碳生产合成与增效工艺。氮是作物所需矿质营养中, 唯一通过化学合成形成肥料产品的元素。常规的合成氨工艺能耗很大, 而在常温常压下或利用清洁能源(风能、太阳能等)产生的“绿氨”创新工艺被认为是传统 Haber-Bosch 合成氨工艺的替代方案, 如常温常压下的电化学合成、高效催化剂等, 这类方法关键在于新型催化剂的研发以及工艺技术优化^[66-68]。这类创新的“绿氨”技术将会以全新的、绿色的方式养活和驱动世界。另一方面, 合成氨主要用来生产主要的氮肥产品-尿素, 目前虽有硝化抑制剂、脲酶抑制剂和硫包衣等包膜材料等途径可以一定程度实现尿素中氮养分的缓/控释放^[69-70], 但仍缺乏更高效、环保、价廉的新材料或助剂, 实现肥料产品对环境条件的智能响应、氮

素养分的精准释放，动态匹配作物氮素需求，进一步创新更价廉、更高效、更安全的双抑制剂等氮肥增效剂，以及相应的保护剂研制与生产工艺创新，这些仍是未来氮肥产品创制的重要方向。

3) 绿色低碳(环保)的复合肥生产工艺。目前复合肥料生产工艺技术，如料浆法、高塔造粒、熔体造粒法、团粒法工艺技术，均是基于高浓度、造粒特性较好的 NPK 肥料原料(如磷铵)等进行产品的二次加工生产，较少涉及中微量元素及助剂的添加，造粒相对容易实现工业连续化，但存在能耗高、损失大、资源浪费严重、配方与农业需求匹配度低等制约绿色可持续发展的关键问题；绿色智能复合肥料产品的产业化生产需通过技术创新，突破传统的用原料肥进行二次加工思路，转向以矿产原料直接活化加工和造粒，实现养分有效化、加工低碳化及产品可商业化的有机结合，兼顾养分精准配伍、增效物质或助剂添加，结合新材料应用，实现低废低排低耗的智能化肥料加工和生产等关键技术。如将容易发生化学反应导致失活的肥料原料分层造粒，实现不同元素在肥料颗粒中相对空间隔离，是现阶段绿色智能肥料新途径，如“肥包肥”技术将钙、镁、锌以多层喷布的方式造粒，实现单一颗粒中磷、钾与中量元素的共存^[71]。尽管如此，在某些条件限制的情况下，绿色智能肥料生产工艺也需借鉴现有复合肥料的生产工艺，坚持绿色低碳发展，加强技术创新，注重资源综合利用，保证安全和环保生产，提高成品率，有效减少返料循环，避免肥料成分不均匀、物性差等问题，分阶段实现智能化复合肥料的升级换代。

4 绿色智能肥料创新与产业化发展前景

绿色智能肥料创新和产业化必将成为化肥产业发展的新方向，是工农融合全产业链绿色发展的总抓手及未来化肥产品创新的重点，也是促进肥料产业减少生产过程碳排放，产品使用过程中实现碳中和的重要手段之一。因此，围绕绿色智能肥料创新和产业化，在“双碳”目标和“绿色发展”新的形势下，未来还需要抓好以下重点研究内容(图5)：

1) 大数据智能化：建立基于我国区域数字土壤、数字作物与数字环境相匹配的大数据智能系统，为

区域绿色智能肥料大配方提供支撑。将大数据、物联网、云计算等新一代数字技术应用在智能肥料创制、精准应用与产业发展等方面，构建集智能监控、数据采集、远程传输、智能分析和自动化控制一体化的绿色智能肥料大数据支撑平台，将绿色智能肥料参数在动态变化条件下自动更新并实时建模，创新数据驱动的绿色智能肥料技术体系，实现区域标准化与精准化，使来自土壤、肥料和环境的动态养分供应与高产作物养分需求在数量上匹配、在时间上同步、在空间上耦合，既满足作物养分需求，又不会造成养分过量累积而向环境中迁移，为区域绿色智能肥料大配方提供支撑。结合自动控制、传感器、农机装备等，构建区域场景方案自动决策系统，利用数据赋能作业装备，使农业生产向标准化、机械化、智能化方向发展，实现从传统要素驱动为主向科技创新驱动为主的转变。

2) 绿色智能新工艺：加快绿色矿山建设和低碳零排制造工艺与信息智能技术的融合，推动绿色智能肥料制造工艺创新与产业化发展。重构化肥生产工艺技术体系，探索从原料直接合成肥料产品的新技术新工艺，减少资源损失与能源消耗；大力发展绿色低碳清洁生产技术，如常温常压合成氨、磷资源全量低耗利用等；破解化肥工艺生产与农业需求不匹配的难题，建立低碳绿色高效新工艺，实现养分配比与形态配伍精准工业生产，强调中微量养分、生物活性物质等的功能及其活性高效保持，匹配区域气候-土壤-作物系统和现代农业生产条件对绿色智能肥料产品的需求。

3) 绿色智能产品精准应用：结合现代农业智能化数字技术，科学合理布局产品适宜生态区域与土壤-作物系统，实现产品时空动态决策分配与智能管理；着重创新现代化肥料施用机械与装备(如农业大机械、水肥一体化设备、无人机等)、作物根际/根层生物高效调控相配套的绿色高效施用技术；建立绿色智能肥料产品评价标准体系与施用技术体系，指导产品落地应用。

4) 新型绿色化肥产业体系：建立面向农业绿色发展的化肥生产、技术服务和人才培养的新型绿色化肥产业体系。重构农业需求导向-适用产品革新-制造工艺革新-销售服务革新的全产业链模式，利用“绿色原料”、采用“绿色工艺”、生产“绿色产品”。建立我国自主研发、设计、制造、运营和管理的绿

色产业体系。融合数字、信息与智能技术,建立绿色智能新型化肥的技术创新与支撑体系。

5) 科技自主创新体系: 根据农业绿色发展新需求, 全面改革化肥工业技术体系, 实现工业和农业全链条的充分融合, 通过科技自主创新, 突破制约产业绿色转型升级的关键技术, 制订战略规划与实施方案, 促进工农融合、绿色转型相关的方案落地。

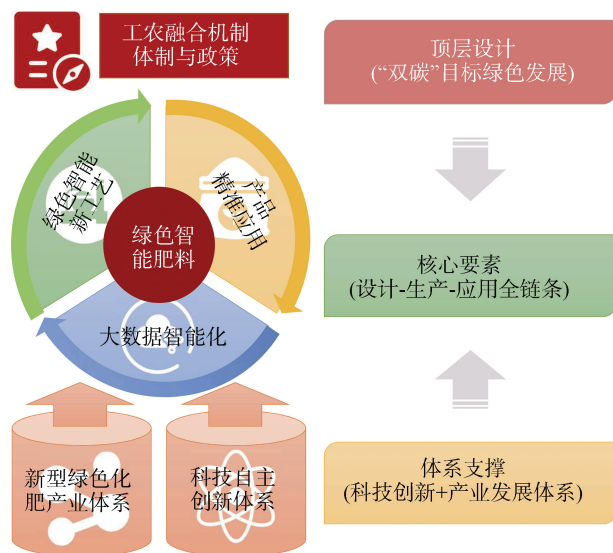


图 5 绿色智能肥料创新与产业化发展蓝图

Fig. 5 Development blueprint for green intelligent fertilizer innovation and industrialization

6) 工农融合及绿色智能肥料政策保障机制: 建立与农业绿色发展相适应的绿色智能肥料产业的技术与产品标准, 制定工艺准入、产品准入、市场准入、服务准入标准, 销售人员具有专业资质要求。制定相关法律法规保护, 完善环境保护、节能减排约束性指标管理, 全面实行排污许可制, 建立健全风险管控机制。建立我国肥料管理立法体系, 实行农田肥料投入的环境限制、提升区域管理规范, 推动化肥产业转型升级, 制定激励措施或管理政策。促进现代化肥产业稳定健康发展, 为我国乃至全球农业现代化建设提供支撑。

参考文献 (References)

- [1] Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition. A new paradigm for plant nutrition[EB/OL]. 2020. [2022-03-29]. https://www.sprpn.org/_files/ugd/3b83b9_cfeb9d2493cb44-96b22a41cac3358cd8.pdf.
- [2] Jiao X Q, Lyu Y, Wu X B, et al. Grain production versus resource and environmental costs: Towards increasing sustainability of nutrient use in China[J]. Journal of Experimental Botany, 2016, 67 (17): 4935—4949.
- [3] Shen J B, Zhu Q C, Jiao X Q, et al. Agriculture green development: A model for China and the world[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2020, 7 (1): 5—13.
- [4] Zhang F S, Huang C D, Zhang W F. Scientific understanding of chemical fertilizers: The "food" of food[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2021. [张福锁, 黄成东, 张卫峰. 科学认识化肥: 粮食的“粮食”[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2021.]
- [5] Zhang W F, Yi J J, Zhang F S. Annual Report of China Fertilizer Development Research 2016[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2017. [张卫峰, 易俊杰, 张福锁. 中国肥料发展研究报告 2016[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2017.]
- [6] Ministry of Ecology and Environment of China, National Bureau of Statistics of China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China. The Second National Pollution Source Census Bulletin[R/OL]. (2020-06-10) [2022-03-29]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-06/10/content_5518391.htm. [生态环境部, 国家统计局, 农业农村部. 第二次全国污染源普查公报[R/OL]. (2020-06-10) [2022-03-29]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-06/10/content_5518391.htm.]
- [7] Calabi-Floody M, Medina J, Rumpel C, et al. Smart fertilizers as a strategy for sustainable agriculture[J]. Advances in Agronomy, 2018, 147: 119—157.
- [8] Zhang F S. Innovating fertilizer industry towards a new era of green intelligent fertilizer. The 22nd Domestic High-Concentration Phosphate Compound Fertilizer Production and Marketing Conference Series Forum—Keynote presentation of “Fertilizer Industry Innovation and Development Forum in the Post-epidemic Period”[R]. Beijing: China Phosphate and Compound Fertilizer Industry Association. 2021-10-29. [张福锁. 革新肥料产业, 开启绿色智能肥料新时代. 第 22 届国产高浓度磷复肥产销会系列论坛之——“后疫情时期肥料产业创新发展论坛”主旨报告[R]. 北京: 中国磷复肥工业协会. 2021-10-29.]
- [9] Hou C H, Xu X C, Wang H B, et al. Establishment of green fertilizer industrial system and its scientific problems[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60 (36): 3535—3542. [侯翠红, 许秀成, 王好斌, 等. 绿色肥料产业体系构建及其科学问题[J]. 科学通报, 2015, 60 (36): 3535—3542.]
- [10] Zhao Y F, Yin Y W. Key scientific problems on establishing green fertilizer insurance system[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60 (36): 3527—3534. [赵玉芬, 尹应武. 我国肥料使用中存在的问题及对策[J]. 科学通报, 2015, 60 (36): 3527—3534.]
- [11] Zhao Y F, Zhao B Q, Hou C H, et al. Adapting to the new demand of agriculture and constructing the innovation

- system of fertilizer field in China—Academician consulting report of the Chinese Academy of Sciences[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24 (2): 561—568. [赵玉芬, 赵秉强, 侯翠红, 等. 适应农业新需求, 构建我国肥料领域创新体系——中国科学院学部咨询报告[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (2): 561—568.]
- [12] Zhang Q S, Chu Y Y, Xue Y F, et al. Outlook of China's agriculture transforming from smallholder operation to sustainable production[J]. *Global Food Security*, 2020, 26: 100444.
- [13] Liu Z, Ying H, Chen M, et al. Optimization of China's maize and soy production can ensure feed sufficiency at lower nitrogen and carbon footprints[J]. *Nature Food*, 2021, 2 (6): 426—433.
- [14] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327 (5968): 1008—1010.
- [15] du Jardin P. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 196: 3—14.
- [16] Lü S, Feng C, Gao C M, et al. Multifunctional environmental smart fertilizer based on L-aspartic acid for sustained nutrient release[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64 (24): 4965—4974.
- [17] Tang Y F, Yang Y C, Cheng D D, et al. Multifunctional slow-release fertilizer prepared from lignite activated by a 3D-molybdate-sulfur hierarchical hollow nanosphere catalyst[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7 (12): 10533—10543.
- [18] Wang X Y, Yang Y C, Gao B, et al. Slow-released bio-organic-chemical fertilizer improved tomato growth: Synthesis and pot evaluations[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21 (1): 319—327.
- [19] Yakhin O I, Lubyantsev A A, Yakhin I A, et al. Biostimulants in plant science: A global perspective[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 7: 2049.
- [20] Jing J Y, Gao W, Cheng L Y, et al. Harnessing root-foraging capacity to improve nutrient-use efficiency for sustainable maize production[J]. *Field Crops Research*, 2022, 279: 108462.
- [21] Zhang D S, Lyu Y, Li H B, et al. Neighbouring plants modify maize root foraging for phosphorus: Coupling nutrients and neighbours for improved nutrient-use efficiency[J]. *New Phytologist*, 2020, 226 (1): 244—253.
- [22] Zhang D S, Zhang C C, Tang X Y, et al. Increased soil phosphorus availability induced by faba bean root exudation stimulates root growth and phosphorus uptake in neighbouring maize[J]. *New Phytologist*, 2016, 209 (2): 823—831.
- [23] Zhang L, Feng G, Declerck S. Signal beyond nutrient, fructose, exuded by an arbuscular mycorrhizal fungus triggers phytate mineralization by a phosphate solubilizing bacterium[J]. *The ISME Journal*, 2018, 12 (10): 2339—2351.
- [24] Zhang L, Xu M G, Liu Y, et al. Carbon and phosphorus exchange may enable cooperation between an arbuscular mycorrhizal fungus and a phosphate-solubilizing bacterium[J]. *New Phytologist*, 2016, 210 (3): 1022—1032.
- [25] Zhang L, Zhou J C, George T S, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi conducting the rhizosphere bacterial orchestra[J]. *Trends in Plant Science*, 2022, 27 (4): 402—411.
- [26] Wang X, Whalley W R, Miller A J, et al. Sustainable cropping requires adaptation to a heterogeneous rhizosphere[J]. *Trends in Plant Science*, 2020, 25 (12): 1194—1202.
- [27] Wen Z H, Li H B, Shen Q, et al. Tradeoffs among root morphology, exudation and mycorrhizal symbioses for phosphorus-acquisition strategies of 16 crop species[J]. *New Phytologist*, 2019, 223 (2): 882—895.
- [28] Wen Z H, White P J, Shen J B, et al. Linking root exudation to belowground economic traits for resource acquisition[J]. *New Phytologist*, 2022, 233 (4): 1620—1635.
- [29] Giehl R F H, von Wirén N. Root nutrient foraging[J]. *Plant Physiology*, 2014, 166 (2): 509—517.
- [30] Meier M, Liu Y, Lay-Pruitt K S, et al. Auxin-mediated root branching is determined by the form of available nitrogen[J]. *Nature Plants*, 2020, 6 (9): 1136—1145.
- [31] Remans T, Nacry P, Pervent M, et al. The *Arabidopsis* NRT1.1 transporter participates in the signaling pathway triggering root colonization of nitrate-rich patches[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103 (50): 19206—19211.
- [32] Zhao X, Dong Q Q, Ni S B, et al. Rhizosphere processes and nutrient management for improving nutrient-use efficiency in Macadamia production[J]. *HortScience*, 2019, 54 (4): 603—608.
- [33] Zhao X, Lyu Y, Jin K M, et al. Leaf phosphorus concentration regulates the development of cluster roots and exudation of carboxylates in *Macadamia integrifolia*[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 11: 610591.
- [34] Tian H Y, Liu Z G, Zhang M, et al. Biobased polyurethane, epoxy resin, and polyolefin wax composite coating for controlled-release fertilizer[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11 (5): 5380—5392.
- [35] Xie J Z, Yang Y C, Gao B, et al. Magnetic-sensitive nanoparticle self-assembled superhydrophobic biopolymer-coated slow-release fertilizer: Fabrication, enhanced

- performance, and mechanism[J]. *ACS Nano*, 2019, 13 (3): 3320—3333.
- [36] Heuchan S M, Fan B, Kowalski J J, et al. Development of fertilizer coatings from polyglyoxylate-polyester blends responsive to root-driven pH change[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67 (46): 12720—12729.
- [37] Hu P G, An J, Faulkner M M, et al. Nanoparticle charge and size control foliar delivery efficiency to plant cells and organelles[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(7): 7970—7986.
- [38] Liao Y Y, Huang Y X, Carvalho R, et al. Magnesium oxide nanomaterial, an alternative for commercial copper bactericides: Field-scale tomato bacterial spot disease management and total and bioavailable metal accumulation in soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55 (20): 13561—13570.
- [39] 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.
- [40] Mastronardi E, Tsai P K, Zhang X R, et al. Preparation and characterization of aptamer-polyelectrolyte films and microcapsules for biosensing and delivery applications[J]. *Methods*, 2016, 97: 75—87.
- [41] Guan S Q, Wang H B, Hou C H, et al. Research progress in new smart fertilizer[J]. *Modern Chemical Industry*, 2022, 42 (1): 46—50. [管士强, 王好斌, 侯翠红, 等. 智能新型肥料研究进展[J]. *现代化工*, 2022, 42 (1): 46—50.]
- [42] Li T, Lv S Y, Chen J, et al. Progress in polymer-based environment-responsive fertilizers[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2018 (3): 336—348. [李涛, 吕少瑜, 陈姣, 等. 高分子基环境响应性肥料的研究进展[J]. *高分子学报*, 2018 (3): 336—348.]
- [43] Wang Z, Hassan M U, Nadeem F, et al. Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: A meta-analysis[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 10: 1727.
- [44] Liu Z. Regularities of content and distribution of zinc in soils of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1994, 27 (1): 30—37. [刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. *中国农业科学*, 1994, 27 (1): 30—37.]
- [45] Wang Z. Evaluation of magnesium fertilizer on quality and efficiency improvement of economic crops in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. [王正. 镁肥对我国经济作物提质增效的效果评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2020.]
- [46] DeRosa M C, Monreal C, Schnitzer M, et al. Nanotechnology in fertilizers[J]. *Nature Nanotechnology*, 2010. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.2>.
- [47] Raliya R, Saharan V, Dimkpa C, et al. Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: Current state and future perspectives[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66 (26): 6487—6503.
- [48] Jin K M, Li H B, Li X Q, et al. Rhizosphere bacteria containing ACC deaminase decrease root ethylene emission and improve maize root growth with localized nutrient supply[J]. *Food and Energy Security*, 2021, 10 (2): 275—284.
- [49] Shen J B, Li C J, Mi G H, et al. Maximizing root/rhizosphere efficiency to improve crop productivity and nutrient use efficiency in intensive agriculture of China[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(5): 1181—1192.
- [50] Jing J, Rui Y, Zhang F, et al. Localized application of phosphorus and ammonium improves growth of maize seedlings by stimulating root proliferation and rhizosphere acidification[J]. *Field Crops Research*, 2010, 119 (2/3): 355—364.
- [51] Ma Q H, Zhang F S, Rengel Z, et al. Localized application of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ plus P at the seedling and later growth stages enhances nutrient uptake and maize yield by inducing lateral root proliferation[J]. *Plant and Soil*, 2013, 372 (1/2): 65—80.
- [52] Jing J, Zhang F, Rengel Z, et al. Localized fertilization with P plus N elicits an ammonium-dependent enhancement of maize root growth and nutrient uptake[J]. *Field Crops Research*, 2012, 133: 176—185.
- [53] Li X L. Root morphology and gene expression in response to heterogeneous nitrogen in maize[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. [李雪莲. 异质性氮素调控玉米根系形态与基因表达的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.]
- [54] 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.]
- [55] 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.
- [56] Zhang S G, Fu X J, Tong Z H, et al. Lignin-clay nanohybrid biocomposite-based double-layer coating materials for controllable-release fertilizer[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8 (51): 18957—18965.
- [57] Feng C, Lü S Y, Gao C M, et al. “smart” fertilizer with temperature- and pH-responsive behavior via surface-initiated polymerization for controlled release of nutrients[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2015, 3 (12): 3157—3166.
- [58] Habibagahi A, Mébarki Y, Sultan Y, et al. Water-based

- oxygen-sensor films[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2009, 1 (8): 1785—1792.
- [59] Li T, Lü S, Yan J, et al. An environment-friendly fertilizer prepared by layer-by-layer self-assembly for pH-responsive nutrient release[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11 (11): 10941—10950.
- [60] 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.
- [61] Zhang G L, Zhou L L, Cai D Q, et al. Anion-responsive carbon nanosystem for controlling selenium fertilizer release and improving selenium utilization efficiency in vegetables[J]. Carbon, 2018, 129: 711—719.
- [62] 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.
- [63] Yoon H Y, Phong N T, Joe E N, et al. Crop root exudate composition-dependent disassembly of lignin-Fe-hydroxyapatite supramolecular structures : A better rhizosphere sensing platform for smart fertilizer development[J]. Advanced Sustainable Systems, 2021, 5 (8): 2100113.
- [64] Benício L P F, Constantino V R L, Pinto F G, et al. Layered double hydroxides: New technology in phosphate fertilizers based on nanostructured materials[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5 (1): 399—409.
- [65] Case D R, Gonzalez R, Zubieta J, et al. Synthesis, characterization, and cellular uptake of a glycylglycine chelate of magnesium[J]. ACS Omega, 2021, 6 (49): 33454—33461.
- [66] Ashida Y, Arashiba K, Nakajima K, et al. Molybdenum-catalysed ammonia production with samarium diiodide and alcohols or water[J]. Nature, 2019, 568 (7753): 536—540.
- [67] Muzammil I, Kim Y N, Kang H, et al. Plasma catalyst-integrated system for ammonia production from H₂O and N₂ at atmospheric pressure[J]. ACS Energy Letters, 2021, 6 (8): 3004—3010.
- [68] Zhao R B, Xie H T, Chang L, et al. Recent progress in the electrochemical ammonia synthesis under ambient conditions[J]. EnergyChem, 2019, 1 (2): 100011.
- [69] Casali L, Mazzei L, Shemchuk O, et al. Novel dual-action plant fertilizer and urease inhibitor : Urea-Catechol cocrystal. characterization and environmental reactivity[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7 (2): 2852—2859.
- [70] Woodward E E, Edwards T M, Givens C E, et al. Widespread use of the nitrification inhibitor nitrpyrin: Assessing benefits and costs to agriculture, ecosystems, and environmental health[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55 (3): 1345—1353.
- [71] Wang H B, Hou C H, Wang Y Y, et al. Inorganic coated controlled release compound fertilizer and industrialized application[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39 (6): 557—564. [王好斌, 侯翠红, 王艳语, 等. 无机包裹型缓释复合肥料及其产业化应用[J]. 武汉工程大学学报, 2017, 39 (6): 557—564.]

(责任编辑：卢 萍)