

我国新型肥料产业发展战略研究

丁文成, 何萍, 周卫*

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室 / 农业农村部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081)

摘要: 肥料产业服务于农业生产, 尿素、磷铵、氯化钾和复合肥等传统化肥产品的大量投入对保障粮食安全发挥了至关重要的作用。随着我国农业发展方式从资源消耗型向绿色可持续型转变, 发展新型高效肥料产业, 提升肥料产品对粮食安全与生态环境安全的协同保障作用, 是现阶段国家农业绿色发展的一个关键举措。新型肥料类型主要有缓/控释肥料、增值肥料、水溶肥料、商品有机肥、微生物肥料等, 相比于常规施肥, 施用新型肥料普遍能够提高作物产量和养分利用效率, 增产率范围为 4.6%~17.5%, 氮肥利用率提高 16.8%~52.3%, 农田土壤氨挥发损失量可降低 7.2%~50.7%, N_2O 排放降低 8.1%~40.8%, 氮淋溶损失降低 16.5%~43.8%, 氮径流损失降低 22.1%~45.4%。经过几十年的跟踪和创新, 我国新型肥料形成了产业化, 新型肥料总产量已位居世界前列。但由于新型肥料产业起步晚, 几乎所有类型的新型肥料生产均存在原创核心技术缺乏, 产品特性与农业需求匹配性不高, 施肥技术和装备发展滞后, 以及监管体系薄弱等问题。为推动新阶段新型肥料产业结构绿色高效转型升级, 未来我国的新型肥料产业发展战略核心包括以下 4 个方面: 1) 以农业需求为导向, 提升肥料产品与生产需求的匹配度; 2) 肥料增效技术由注重养分供给向土壤环境、作物吸收和有效供给综合调控发展, 肥料增效材料向高效、环保和价廉方向发展, 肥料产品向营养、土壤改良和抗逆等多功能发展; 3) 注重最大限度地利用资源, 降低能耗, 通过大型肥料生产设备的优化和改造, 力争实现新型肥料由二次加工到一次生产的突破, 实现新型肥料生产的绿色低碳转型; 4) 建立健全肥料生产、销售和使用全链条监管体系, 保障新型肥料产业的高质量健康发展。

关键词: 新型肥料; 养分增效技术; 产业短板; 发展战略

Development strategies of the new-type fertilizer industry in China

DING Wen-cheng, HE Ping, ZHOU Wei*

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences / State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China / Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081)

Abstract: The fertilizer industry is the backbone of agriculture. Traditional fertilizers like urea, ammonium phosphate, potassium chloride, and compound fertilizers are heavily invested and play a key role in making sure China has enough food. As China's agricultural development shifts away from resource consumption and toward green and sustainable development, new-type and high-efficiency fertilizers capable of achieving food security and environmental security become a major demand for green agricultural development. New-type fertilizers in China include slow/controlled-release fertilizer, value-added fertilizer, water-soluble fertilizer, commercial organic fertilizer, and bio-fertilizer. Compared to traditional fertilization, applying new-type fertilizers increases crop yields and nitrogen (N) use efficiency by 4.6%–17.5% and 16.8%–52.3%, and reduces ammonia volatilization, N_2O emission, N leaching, and N runoff by 7.2%–50.7%, 8.1%–40.8%, 16.5%–43.8%, and 22.1%–45.4%, respectively. After decades of research and development, China's new-type fertilizer achieves

收稿日期: 2022-12-07 接受日期: 2023-01-07

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目(2022-XY-98); 国家自然科学基金青年科学基金项目(32102492); 农田智慧施肥项目; 国家水稻产业技术体系。

联系方式: 丁文成 E-mail: dingwencheng@caas.cn; * 通信作者 周卫 E-mail: zhouwei02@caas.cn

industrialization and global leadership in production. However, this innovation was met with some limitations, including the short development period of the new-type fertilizer industry, the lack of original core technologies, the low match between fertilizer product characteristics and agricultural requirements, the lagging development of fertilizer application technology and equipment, and the need to improve administrative systems, policies, and laws. The following strategies should be focused on to achieve the transformation and upgrading of the new-type fertilizer industry towards the overall goal of green and high efficiency in the new stage: 1) bridging the gap between fertilizer properties and agricultural practices; 2) increasing fertilizer efficiency by shifting focus from nutrient supply to soil environment and crop absorption. This can be achieved by developing environmentally friendly and cost-effective additives containing plant growth stimulants and soil remediation materials; 3) maximizing resource use and reducing energy consumption during fertilizer processing and preventing new-type fertilizer production from secondary processing; 4) constructing a whole-chain supervision system covering production, marketing, and application of new-type fertilizer to ensure green production, quality retracing, and efficient use.

Key words: new-type fertilizer; value-adding technology; limitation in new-type fertilizer industry; upgrading of procession green development strategy

肥料是作物生产的物质基础, 全球每年化肥农用消费量在 2 亿 t (N+P₂O₅+K₂O 养分量) 左右^[1], 对粮食增产的贡献率达 40% 以上^[2], 在保障全球粮食安全方面发挥着不可替代的作用。尤其是近年来食品短缺人口比例大幅度提高, 据联合国粮农组织估算, 全球食品短缺人口总数为 7.2~8.1 亿^[3], 全球粮食安全正面临严峻挑战, 更亟需依赖肥料的高效施用以支撑作物高产。我国是世界最大的化肥生产国和消费国, 氮肥、磷肥和钾肥的生产量分别占全球总量的 26%、30% 和 14%, 消费量分别占 23%、21% 和 26%^[4], 其中氮肥和磷肥产业不仅满足国内需求, 而且为全球肥料供应提供了重要支撑。1980 年至 2020 年, 我国粮食单产和总产分别从 2734 kg/hm² 和 3.2 亿 t 增长到 5734 kg/hm² 和 6.7 亿 t, 而农用化肥用量从 1269 万 t 增长到 5251 万 t^[4], 化肥的投入在粮食增产中发挥着巨大的作用。全国化肥试验网开展的 5000 多个肥效试验证明, 我国化肥的增产率在 50% 左右^[5]。然而, 传统肥料养分利用率低, 过量施肥导致土壤退化、大气和水体污染以及生物多样性降低等问题^[6-11], 对生态环境安全产生了巨大威胁。因此, 传统化肥产品和施肥技术难以实现粮食安全与生态环境安全的协同, 发展新型肥料产业是农业绿色可持续发展的必然选择。

新型肥料研发是运用有效养分高效化产品创新的理论与技术, 将传统氮肥、磷肥、钾肥、复合肥等产品转型升级, 使其营养功能得到提高或使之具有新的特性和功能, 或通过开发新资源、利用新理论、新方法和新技术等, 开发肥料新产品类型, 以

实现稳定高效、绿色增产、环境友好等目标^[12]。当前, 新型增效肥料主要包括缓/控释肥料、增值肥料、水溶肥料、商品有机肥、微生物肥料等产品类型。近年来, 在全球尺度开展的多项 Meta 分析研究表明, 相比于传统化肥施用, 不同类型的新型肥料可以在增加作物产量的同时, 提高肥料利用率, 减少养分损失^[13-16]。尽管如此, 目前市售各类新型肥料产品的施用效果仍存在较大不确定性, 这主要是由于很多新型肥料产品的农艺原理研究不足, 其养分高效化程度依然有待提高, 加之产品研发技术和养分配方未与不同类型农作物、土壤或气候的差异化需求实现精准匹配, 制约了新型肥料产业的快速发展。新型肥料相对于传统肥料而言是相对的概念, 是长期处于发展过程之中的肥料, 因此亟需调研新形势下我国农业发展的需求和新型肥料产业的发展水平, 为新型肥料产品的研发应用和产业发展提供方向。

近年来, 我国化肥产业转型升级取得了积极进展, 新型肥料产品研发水平有了明显提高, 但仍存在技术创新不足、资源消耗和环境排放较高、产品结构 with 农业需求匹配度不高、产品发展方向不够明确等问题。本文立足农业绿色发展的国家重大需求和国际肥料科技前沿, 通过对我国新型肥料产业现状、总体水平和最新进展进行总结和分析, 重点阐述缓/控释肥料、增值肥料、水溶肥料、商品有机肥、微生物肥料等主要新型肥料技术的创新与突破, 阐明制约我国肥料产品高效应用的技术瓶颈和肥料产业高质量发展的关键问题, 提出适应我国养

分资源禀赋特征和农业生产现实需求的肥料产业高质量发展发展的技术途径与对策建议。

1 新型肥料发展的必要性

1.1 传统肥料过量施用造成资源浪费和环境污染

我国大宗化肥消费结构的 90% 以上依然是传统化肥产品, 如尿素、磷铵、氯化钾和复合肥等^[12], 其中氮和磷养分利用率相对较低, 且易损失到大气和水体中造成环境污染。酰胺态氮肥(尿素)在氮肥消费中占比达 64%, 氮素易氨挥发损失, 导致我国主要粮食作物(小麦、玉米和水稻)的氮肥利用率仅有 26%~37%^[17]。我国磷肥利用率仅有 10%~20%^[18-19]。磷酸二铵、磷酸一铵在磷肥中占比分别为 44% 和 41%, 由于其水溶性磷含量较高, 施入土壤后易与钙、镁、铁等结合形成难溶性盐, 导致磷素的有效性降低。钾肥品种以氯化钾和硫酸钾为主, 占比达 83%, 钾肥利用率也仅有 40%~50%^[19]。传统化肥施用模式下肥料养分利用率低, 作物高产建立在肥料高投入的基础上, 通过过量施肥以保证作物养分充足供应的现象普遍存在。我国农田氮肥和磷肥的平均施用量分别为 N 191 kg/hm² 和 P₂O₅ 73 kg/hm², 是世界平均水平的 2.6 和 2.4 倍^[1]。因此大量化肥养分积累在土壤或损失到环境中, 造成了资源浪费和环境污染。我国农田每年约有 760 万 t 活性氮、21 万 t 磷以及 1.3 亿 t 温室气体(以 CO₂ 计)排放到大气和水体环境中(图 1)^[20-25], 成为地表水体富营养化、地下水硝酸盐超标、PM2.5 形成以及全球变暖的重要来源, 高产施肥的环境矛盾突显。传统肥料的局限性越来越突出, 全面建立新型高效肥料产品体系, 推动传统肥料产业的转型升级, 是农业绿色可持续发展的必然要求。

1.2 新型肥料是实现化肥减量增效的有效途径

新型肥料的研制生产不仅包括养分增效技术和生产工艺创新, 还充分考虑与农艺措施发展匹配融合, 因而是更加优质、高效和环保的肥料产品。当前我国新型肥料产品类型主要包括缓/控释肥料、增值肥料、水溶肥料、商品有机肥、微生物肥料等, 其通过优化养分供应、强化根系吸收、增强作物抗逆、调节体内代谢等过程, 获得更高的肥料养分效率, 协调作物高产与环境保护的矛盾。依据生产工艺和用途, 新型肥料产品养分的高效机理不尽相同。缓/控释肥通过减缓或控制养分释放速率, 最大限度的实现养分供应与作物不同生长阶段养分需求

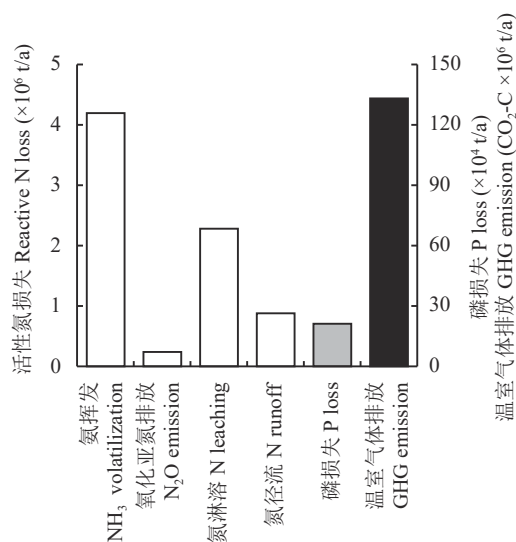


图 1 我国农田每年氮、磷损失量及温室气体排放量估算
Fig. 1 The estimation of annual nitrogen and phosphorus losses and greenhouse gas (GHG) emissions from Chinese farmlands

协同, 从而提高肥料的利用率并降低各种途径的养分损失^[26]。根据养分缓释原理的不同, 可将缓/控释肥细分为包膜肥料、稳定性肥料、脲醛类肥料等。增值肥料是将腐殖酸、海藻酸、氨基酸等生物活性增效载体与传统化学肥料科学配伍, 通过综合调控“肥料-作物-土壤”系统改善肥效^[27]。水溶肥的特点是不论固态还是液态产品, 其所有成分必须完全水溶, 以满足喷灌、滴灌、无土栽培、叶面施肥的需求, 通过水肥一体化, 实现少量多次施肥, 获得高肥料利用率^[28]。水溶肥产品分为大量元素水溶肥、中量元素水溶肥、微量元素水溶肥、含腐殖酸水溶肥、含氨基酸水溶肥、有机水溶肥料等。商品有机肥是将畜禽粪便、动植物残体、农产品或食品加工的废弃物通过工厂化加工、无害化处理制成的肥料产品。商品有机肥解决了传统有机肥养分含量低, 运输困难, 就地消纳需要很高的环境容量等问题。施用商品有机肥可为作物提供稳定的养分供应, 减少养分的环境损失, 不同程度地改善土壤理化性质, 增加土壤肥力, 提高作物品质^[29]。微生物肥料的主要特征是添加了具有固氮、溶磷、解钾等功能微生物菌剂, 或添加了能够通过代谢活动产生刺激素的有益微生物, 具有促进作物利用土壤中的低有效态养分, 或拮抗病原微生物减少作物病害发生等功能^[30]。

国内外学者对各类新型肥料产品的农学和环境效应开展了大量田间试验和 Meta 分析, 初步明确了新型肥料在降低肥料投入, 提高作物产量和肥料利

用率,减少养分损失等方面的潜力(表1)。相比于等养分常规施肥处理,施用新型肥料能够普遍提高作物产量和养分利用效率,增产率范围为4.6%~17.5%,氮肥利用率提高16.8%~52.3%,农田土壤氨挥发损失量可降低7.2%~50.7%, N_2O 排放降低8.1%~40.8%,氮淋溶损失降低16.5%~43.8%,氮径流损失降低22.1%~45.4%。

值得注意的是,新型肥料实现其最佳增产减排效应应依赖合理的施用方法。例如,抑制剂型缓释肥料能够减少氮素的氨挥发和氧化亚氮排放损失,但Fan等^[41]、Li等^[13]和Xia等^[31]研究认为,添加硝化抑制剂的肥料促进了9%~29%的氨挥发。因此,新型肥料施用不当也存在降低作物产量或促进土壤养分环境损失的风险。因此,需要研究不同作物、土壤、气候条件下新型肥料适宜的产品,有针对性地进行肥料增效技术的改良创新。

2 我国新型肥料产业发展现状

肥料产业始终伴随着肥料产品的创新转型升级,依据肥料产品的性状,肥料产业的发展大致分为4个发展阶段:1)初始阶段,养分浓度低且有效性较差,主要产品有草木灰、骨粉或磷矿粉等;2)低浓度阶段,生产技术简单且养分含量仅在14%~25%,主要产品有氨水、碳铵、过磷酸钙等;3)高浓度阶段,养分浓度一般在40%以上,但存在养分易损失等缺点,主要产品有尿素、磷铵、氯化钾和高浓度复合肥等;4)绿色高效阶段,肥料产品具有养分高效、功能多元、环境友好等特点,代表性产品包括缓/控释肥料、水溶肥料、微生物肥料等^[12]。自20世纪50年代起,肥料产业逐渐从传统肥料品种向新型肥料过渡^[53]。欧美等发达国家率先开展了新型肥料产品的研发和在农业生产中的应用,美国最早研制硫包膜和聚合物包膜肥料,随后日本、德国等相继研发出生物易降解材料包膜、混合物包膜肥料^[54-57]。德国的硝化抑制剂产品DMPP、美国的脲酶抑制剂产品NBPT等已在全球农业中广泛应用^[58-59]。水肥一体技术最成熟、应用面积最大的是美国,以色列水溶肥市场占有率最高,达到90%^[60]。全世界有70多个国家生产和推广使用微生物肥料,欧美发达国家农业生产中微生物肥料的使用率在20%以上,美国和巴西大豆根瘤菌接种率达到了95%以上^[61-62]。我国新型肥料研发较晚,2000年以后,肥料新产品研究被列入国家863计划、科技支撑计划、重点研

发计划、成果转化基金项目等给予重点支持。农业农村部2015年印发的《到2020年化肥使用量零增长行动方案》指出,通过调整化肥使用结构,大力推广高效环保的新型肥料,使化肥利用率达到40%以上。同年,工业和信息化部印发的《关于推进化肥行业转型发展的指导意见》中指出要大力发展新型肥料,提出“到2020年我国新型肥料使用量占化肥总使用量的比重从不到10%提升到30%”。这些政策的实施有效促进了新型肥料技术的研发和产业化发展,我国已成为全球新型高效肥料研发的热点国家。据赵秉强等^[12]研究,我国当前正处于由高浓度化肥阶段向绿色高效肥料阶段转变的关键时期,特别是随着我国“双碳”和农业绿色发展战略的实施,推动了绿色肥料产业体系建设和快速发展的过程。

笔者基于中国知网(CNKI)数据库,以“新型肥料”、“缓控释肥”、“稳定性肥料”、“增值肥料”、“水溶肥”、“商品有机肥”、“微生物肥料”及其它相关的24个变种主题词进行检索,以年代范围2000—2022年精炼获得24502篇相关文献,并将所有文献记录导入VOSviewer软件中进行研究领域关键词聚类分析。从所有新型肥料相关研究的关键词(关键词共现频次 ≥ 30)聚类网络(图2)中可以看出,我国缓/控释肥的研究起步较早且研究较多,商品有机肥和微生物肥料研究侧重于生物有机肥的研究,水溶肥的研究主要与水肥一体化技术结合较多,而增值肥料的研究相对较少,在新型肥料整体研究领域中尚未形成明显的聚类。新型肥料的应用作物研究涵盖了粮食作物、蔬菜、果树和经济作物,水稻、玉米和小麦等主粮作物是主要研究对象。

新型肥料肥效研究主要集中在作物产量、经济效益和品质指标3个方面。近年来,研究人员利用Meta分析方法对缓/控释肥料和有机肥料的农学和环境效应的大量研究结果开展了系统的整合分析,基本肯定了其作物增产、养分增效和环境减排的潜力,而对水溶肥、微生物肥料、增值肥料等的增效机理和环境效应尚缺乏系统研究。国内科研机构和肥料企业在低成本、环保型缓/控释肥膜材和增效肥料载体研发、微生物高效菌株筛选、水溶肥核心磷原料生产技术等方面开展了大量基础性和前瞻性的工作,为我国新型肥料产业的快速发展奠定了基础。目前,我国已初步建立了新型增效肥料的理论、技术和产品体系,缓/控释肥料、稳定性肥料、脲醛类肥料、增值肥料等绿色高效肥料产品已经初步实现产业化。

表 1 与传统肥料相比新型肥料的农学和环境效应 (%)
Table 1 Agronomic and environmental effects of new-type fertilizers compared with conventional fertilizers

新型肥料类型 New-type fertilizer	增效机制 Ways of high efficiency	作物产量 Crop yield	氮肥利用率 N use efficiency	氨挥发 NH ₃ volatilization	N ₂ O排放 N ₂ O emission	氮淋溶 N leaching	氮径流 N runoff	检验方法 Test method	参考文献 References
缓控释肥料 Slow/controlled-release fertilizer	包膜型养分控释 Coated fertilizer controlled release	6.0±2.9	22.7±18.5	-50.7±19.3	-40.8±23.1	-43.8±33.8	-31.7	Meta分析 Meta analysis	[13, 31-34]
	脲醛类养分缓释 Urea aldehyde fertilizer slow release	11.0±5.8	52.3±9.1	-46.8±17.8				田间试验 Field experiment	[35-40]
	硝化/脲酶抑制 Nitrification/urease inhibitor	6.3±3.0	19.4±12.1	-18.8±43.8	-40.3±15.8	-16.5±50.6	-45.4	Meta分析 Meta analysis	[13, 31, 33-34, 41-42]
增值肥料 Value-added fertilizer	腐殖酸增效 Humic acid synergy	11.2±7.6	30.7±26.3	-7.2				田间试验 Field experiment	[14, 43-45]
	海藻酸增效 Alginate acid synergy	8.6±5.9	42.5±26.1	-25.8				田间试验 Field experiment	[45-47]
水溶肥料 Water-soluble fertilizer	水肥协同增效 Synergy of water and fertilizer	17.5±15.4	28.7±22.9					田间试验 Field experiment	[48]
商品有机肥 Commercial organic fertilizer	有机替代 Organic substitution	4.6±1.4	16.8±7.8	-46.7±19.1	-8.1±6.5	-23.2±8.3	-22.1±5.8	Meta分析 Meta analysis	[15, 49-51]
微生物肥料 Bio-fertilizer	微生物固氮/溶磷 N-fixing/P-solubilizing microorganism	13.7±4.6		-39.8				Meta分析 Meta analysis	[16, 33, 52]

注: 表中数据以等量传统肥料试验结果为对照计算的增幅, 数据为平均值±SD。
 Note: The data were expressed as mean ± SD, calculated using equivalent amounts of conventional fertilizers as control.

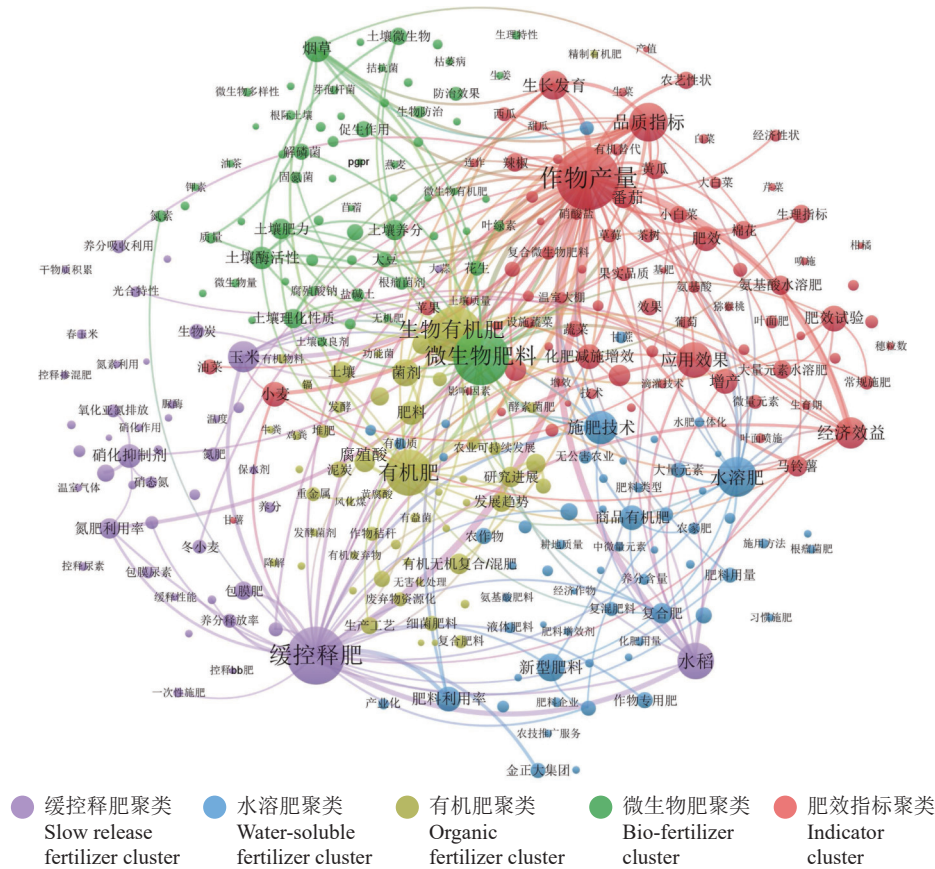


图 2 我国新型肥料相关研究领域聚类网络图

Fig. 2 The clusters and network of research fields related to new-type fertilizers in China

2.1 缓/控释肥料

缓/控释肥可根据作物需求规律缓慢释放养分，实现一次性施肥满足整个生长期的需求，是轻简化施肥技术的重要载体^[63]，已成为我国新型肥料发展的主导方向。我国缓/控释肥技术发展主要历经了3个阶段：第一阶段是始于20世纪70年代，开始探索研究长效肥料、脲甲醛肥料等缓释肥料；第二阶段是1980—2000年期间，小规模量产包裹型缓释肥和热塑型树脂包衣；第三阶段是2000年至今，实现了多种缓/控释肥产品的产业化，并出口海外^[64-65]。目前我国包膜缓释肥料技术经过引进、集成和创新，整体上已达到国际先进水平，在大田作物的应用技术领域达到国际领先水平。从缓/控释肥相关研究的关键词聚类网络图(附图1)来看，缓/控释肥的研究主要集中在控释肥料包膜材料的研究和稳定性肥料的抑制剂研究上，而脲醛类缓释肥料的研究相对较少。高效环保包膜材料研发取得了突破性进展，许秀成等^[66]研制出以钙镁磷肥、酸化磷矿粉、磷酸铵钾为包裹层的肥包肥型复合缓/控释肥料，在控制核心氮素释放的同时，包裹层含有的钾、钙、镁、硅等

元素也起到促进作物生长、改善土壤结构的作用。Xie等^[67]模仿荷叶特有的超疏水微纳米级凸起结构，利用磁性自组装方法制备包覆“空气外衣”的超疏水生物基控释肥料，液态水不能直接浸润其膜壳，只能以水蒸气扩散的方式缓慢进入，其养分控释期延长了约1倍，极大地增强了养分的全生育期供应能力。此外纤维素改性包膜材料、油脂改性包膜材料、改性水基聚合物包膜材料等的研发大幅度降低了缓/控释肥的成本，并提高了环保性。在稳定性肥料技术方面，研制开发出同时含有多种脲酶抑制剂和硝化抑制剂的尿素，解决了单一抑制剂作用时间短、氮肥转化释放过快的问题^[68]。在植物源新型抑制剂的开发上取得进展，发现芳香植物水浸提液和水稻根系分泌物等具有良好的脲酶或硝化抑制效果，对安全、高效、环境友好、来源充足的新型抑制剂研发具有重要意义^[69-70]。在生产工艺上，建立了无溶剂原位表面反应包衣控释技术工艺、水基树脂控释等技术工艺，实现控释肥生产过程的无溶剂、零排放，大大减少了环境污染。根据Orbit全球专利数据库获取的不同国家专利统计结果，我国获得的缓/控

释肥产品研发和生产工艺相关专利达 3135 项, 远超其它国家。在自动化连续化生产设备方面取得重大进展, 创建了树脂包膜、硫包膜、复合材料多层包膜工艺的控释肥料大规模生产线, 产能大幅度提升。我国已成为世界最大缓/控释肥生产和消费国, 树脂包膜尿素、硫包膜尿素、包裹型肥料、有机质包膜缓释肥料年产量分别达 50 万、10 万、15 万和 10 万 t, 各类脲醛肥料年产量 20 万 t, 每年应用面积约 330 万 hm^2 (0.5 亿亩), 增产 8~10 亿 kg, 节氮 3~5 万 t。

2.2 增值肥料

增值肥料利用有机生物活性增效载体 (腐殖酸、海藻酸、氨基酸等) 与氮、磷、钾传统化肥科学配伍后, 通过调控肥料养分在土壤中的释放、转化、移动、固定等过程, 优化肥料的供肥性, 从而提高肥料利用率^[7]。传统腐殖酸或海藻酸肥料, 以腐殖酸或海藻酸为主要原料, 通过掺入无机肥料制成, 但载体活性相对较低、用量大, 难以与化肥大型生产装置结合, 存在产能低、成本高和产业化推广难度大等问题^[71-72]。赵秉强^[73-74]通过腐殖酸结构性优化、海藻浓缩提取、氨基酸组合加工等技术, 开发高活性、专用型增效载体, 将增效载体添加量控制在 5% 以内, 尿素、磷铵、复合肥等大型生产装置的生产与增效载体添加一次完成, 突破了增值肥料生产普遍存在的二次加工、产能低、成本高的技术短板^[7]。研发的增值尿素、增值磷铵和增值复合肥等产品具有显著促进根系生长, 抑制土壤脲酶活性, 降低氨挥发损失, 改善磷、钾养分供应等效应^[75-77], 已发展成为全球产量最大的绿色肥料产品类型, 年产量 1500 万 t, 应用面积约 3000 万 hm^2 (4.5 亿亩), 增产 100 亿 kg, 推动了我国绿色肥料发展由长期跟踪国外转向自主创新引领, 为尿素、磷铵等大宗化肥产品绿色转型升级提供科技支撑^[27]。

2.3 水溶肥料

水溶肥泛指全部成分可溶于水的复合肥, 可以全部是氮磷钾化肥或中微量元素肥料, 也可以是含水溶性有机小分子的肥料。水溶肥是水肥一体化技术不可或缺的肥料类型, 全球水溶性肥料总消费量约为 800 万 t, 在发达国家主要用于大田作物、园林景观绿化植物和高尔夫球场的灌溉施肥及叶面施肥等^[78]。水肥一体技术最成熟、应用面积最大的是美国, 水溶肥达到化肥市场总量的 40%, 美国 25% 的玉米、60% 的马铃薯、33% 的果树均应用了水肥一

体化技术, 而以色列由于缺水是水溶肥和水肥一体化技术利用率最高的国家, 90% 以上的农田采用灌溉施肥, 温室作物全部采用灌溉施肥系统^[28, 78]。我国水溶肥产业起步于 20 世纪 80 年代中后期^[79], 其发展历程主要分为 3 个阶段: 1) 初步形成阶段, 以溶解性及配伍性好的无机盐类为原料配制叶面肥, 养分种类少、浓度低、应用效果不稳定; 2) 初步发展阶段, 随着对叶面营养机理研究深入, 叶面肥产品中开始添加中微量元素及螯合剂和表面活性剂等助剂, 养分种类、养分浓度和吸收效率得到较大提升。由于节水灌溉施肥技术发展滞后, 水溶肥产业发展较为缓慢; 3) 快速发展阶段, 随着喷灌、滴灌和无土栽培等技术的快速发展, 带动了水溶肥料的生产。在水溶肥中加入氨基酸、腐殖酸、海藻酸等有机活性物质, 水溶肥功能走向多元化。从近 20 年水溶肥相关研究的关键词聚类网络图 (附图 2) 也可以看出, 我国的水溶肥研究中大量元素水溶肥、中微量元素水溶肥、氨基酸水溶肥、腐殖酸水溶肥以及有机水溶肥各领千秋。张从军等^[80]利用粗磷酸螯合处理形成的磷酸一铵溶液, 与尿素、氯化钾、硫酸镁溶液以及腐殖酸溶液等配伍, 制备了含海藻酸提取物的大量元素全水溶性液体肥料。豆亚妮等^[81]利用微生物发酵技术从糠醛渣中提取腐殖酸, 通过与大量、中量、微量元素化合物进行螯合, 制成螯合态腐殖酸水溶肥。随着我国各类水溶肥料产品及其检测标准陆续颁布, 水溶肥料登记产品数量快速增加, 水溶肥相关专利申请达 3148 项。据中国化工信息中心统计, 我国水溶肥料年产量约 410 万 t, 水溶肥及水肥一体技术的推广应用面积约 1000 万 hm^2 (1.5 亿亩), 主要应用于西北的棉花、玉米和马铃薯, 华北的蔬菜、玉米和小麦, 西南的马铃薯、蔬菜和水果等作物上。在水溶肥生产工艺技术上, 突破了磷酸氨化过程复合螯合和固体肥料级聚磷酸铵 (APP) 聚合分布可控制备与工艺, 创制了原位螯合水溶性磷酸一铵和肥料级固体 APP 等产品, 具有成本低、溶解度高、螯合能力强、配伍性好等特点。虽然在国内高端水溶肥市场中, 来自以色列、美国等国的进口产品仍占据较高的市场份额, 但随着我国水溶肥和水肥一体技术的持续推进, 进口水溶肥市场占有率正在逐步减少^[28]。

2.4 商品有机肥

有机肥原料来源丰富, 包括畜禽粪尿、农业废弃物、沼液沼渣、海洋养殖业废弃物、泥炭、绿

肥、工业废弃物、餐厨垃圾等，其替代化肥的潜力巨大。以畜禽粪尿为例，我国畜禽粪尿总量达 31.6 亿 t，所含氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)养分资源总量分别达到 1478 万、901 万和 1454 万 t，如果按 75% 还田，考虑养分损失后，其养分输入量分别占氮、磷和钾肥用量的 34%、80% 和 57%^[82]。新型商品有机肥技术主要包括无害化处理技术、快速发酵技术、除臭技术、有机无机肥配伍技术、造粒工艺等。商品有机肥克服了有机肥原料养分含量低、运输成本高、施用量大等缺点，提升了农民使用的意愿，促进了商品有机肥的产业化发展。基于有机肥相关研究的关键词聚类网络图(附图 3)分析，近年来商品有机肥研究主要聚焦生物有机肥、有机无机复合/混肥等高效有机肥产品研发和应用，研究重点关注了有机替代实现化肥减量增效，生物有机肥优化土壤微生物群落结构缓解连作障碍的机理等。最具代表性的当属沈其荣等提出的全元生物有机肥产品，该产品具有满足当季作物养分需求、显著抑制土壤酸化、有效调控土壤微生物区系、持久性提高土壤肥力等功能，实现了作物当季高产优质、持续保育土壤的双重目标，在生物有机肥与土壤熏蒸联合防控土传病害综合技术方面取得突破，对防治黄瓜、西瓜和香蕉等作物枯萎病效果显著^[83-84]。农业农村部《开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案》、《畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020年)》等相关政策的出台，推动了我国有机肥产业的快速发展。目前，全国有机肥生产企业约 3700 家，有机肥相关专利数达到 2 万余项。商品有机肥施用量为 957 万 t，其中精制有机肥 318 万 t，有机无机复混肥料 422 万 t，生物有机肥 151 万 t^[85]。

2.5 微生物肥料

微生物肥料不同于其他肥料类型，不以为作物直接提供养分为目的，主要功效是促进养分吸收与利用，调控作物生长，增强植株抗逆性和抗病性，改良和修复土壤功能^[86-90]。微生物肥料通常利用固氮菌株加强土壤-作物体系的生物固氮能力^[91-92]；利用溶磷菌株代谢产生的磷酸酶、核酸酶等生物酶或草酸、琥珀酸、乳酸等有机酸，分解土壤中的难溶性磷酸盐，提高作物对土壤固定磷素的利用效率^[93-94]；利用解钾细菌分泌乙酸、酒石酸、草酸等有机酸，将难溶矿物质中的钾元素释放出来，提高土壤矿物钾的生物有效性^[95-96]。有机物料腐熟剂可提高还田作物秸秆或畜禽粪肥的腐解速率，解决自然条件下腐

解速度慢、肥效低等问题^[97]。全世界有 70 多个国家生产和推广使用微生物肥料，欧美发达国家农业生产中微生物肥料使用率在 20% 以上，美国和巴西大豆根瘤菌接种率达到 95% 以上^[61-62]。21 世纪以来我国微生物肥料技术取得了长足发展，微生物肥料使用的菌种不断增加，功能得到拓展，施用面积逐年增加。从微生物肥料相关研究的关键词聚类网络图(附图 4)来看，我国微生物肥料的研究主要集中在高效固氮、解磷以及功能性菌剂的鉴定，有机肥与功能菌株配合生产生物有机肥技术，“肥药兼效型”复合微生物肥料的研究。中国农业大学根瘤菌研究中心建成了国际上根瘤菌数量和宿主种类最多的根瘤菌资源库，并鉴定识别了一批耐低温盐碱等逆境条件的菌株^[98]。随着功能菌株收集和鉴定数量的增加，多功能菌群组合技术研究逐渐深入，特别是利用高通量技术在基因组学平台上筛选和构建高效微生物肥料菌株手段不断进步，促进了复合微生物肥料的开发。中国农业科学院、中国农业大学等单位筛选和构建了适应不同作物秸秆类型、不同地域、不同应用条件的多个高效秸秆腐解复合菌系，为不同功能菌种的组配和协同增效提供了一条有效途径^[61]。目前，我国微生物肥料生产企业达 3500 余家，登记微生物肥料产品超过 10000 个，年产量约 3000 万 t，应用面积达 3300 万 hm² (5 亿亩)^[99]，相关专利申请达 6010 项。

3 我国新型肥料高质量发展存在的问题

3.1 新型肥料行业起步晚，缺乏原创核心技术

我国各类新型肥料产品研发的起步阶段普遍晚于发达国家 30~50 年。美国早在 1924 年就研究开发了脲醛肥料，获得世界首个缓/控释肥料专利^[100]，荷兰和美国科学家在 19 世纪 90 年代就完成了固氮根瘤菌的菌株纯化分离和商业化应用，开创了微生物肥料产业的先河。而我国最早的缓释肥料—碳酸氢铵粒肥直到 20 世纪 60 年代末才研制成功^[100]，20 世纪 40 年代才开始根瘤菌接种剂的研究与田间应用^[30, 101]，国内水溶肥的研究和开发相比其他新型肥料更晚，美国 ECO-GREEN 和英国翠苒等进口产品占据了国内高端水溶肥市场的主导地位^[28]。经过几十年的技术引进、消化吸收和自主研发，我国肥料行业在理论基础、应用技术及生产工艺等方面取得了长足进步，但关键技术和理论几乎全部来自欧、美、

日等发达国家。目前我国生产的标志性包膜控释肥类型几乎都由国外研发。硫包膜尿素为 20 世纪 60 年代美国田纳西流域管理局国家肥料发展中心研制^[54], 由于工艺成熟、膜材便宜, 至今依然是包膜控释肥中生产量和销售量最大的品种^[57]。美国 Sierra Chemical 公司生产的 Osmocote 肥料是热固性树脂类包膜肥料的代表产品。日本在控释肥料研究上的突破得益于包膜材料上的创新, 窒素公司生产的 Nutricote 和 Meister 肥料是热塑性树脂类包膜肥料的代表产品, 也是发展最快的缓/控释肥料品种之一。我国肥料新产品多为跟踪和模仿, 缺少原创技术。国内稳定性肥料的研究和应用主要集中在抑制剂的配伍和效果, 抑制剂毫无例外地使用国际上比较成熟的双氰胺 (DCD)、3, 4-二甲基吡唑磷酸盐 (DMPP) 等硝化抑制剂产品以及 N-丁基硫代磷酸三胺 (NBPT)、氢醌 (HQ) 等脲酶抑制剂产品^[68]。美国、巴西是功能生物肥料技术领先的国家, 我国功能生物肥料虽然发展迅速, 但在功能肥料品种研究、发酵技术、高效菌种的创建等关键技术仍有一定差距。不可否认, 我国各类新型肥料有自己的特点, 部分产品在养分控制、肥效等方面也与国际先进水平相当, 但在包膜材料、胶结材料和酶抑制剂、水溶肥添加剂等领域尚未取得重大突破, 在国际上缺乏具有核心竞争力的独创产品。发达国家的新型肥料产品研发集中在企业, 在肥料增效新材料创制、大田效果试验方面投入大量人力、物力、财力和时间, 而我国肥料产业存在重应用、轻研究的问题, 新型肥料的增效机理研究相对薄弱, 农艺原理和技术在工业生产端应用研究不足, 产品往往未经大面积试验研究便急于推向市场, 导致实际施肥效果达不到预期。这一现象尤以微生物肥料为重, 多种微生物组合的作用机制研究严重欠缺, 限制了相关功能菌株的挖掘和高效应用^[102]。研究成果转化阶段也凸显关键技术储备不足的问题。一些肥料新产品在实验室或小试设备上完成了研发和试制, 并取得良好的效果, 但在中试、生产大型化等成果转化过程中出现工艺技术不过关、产品质量不达标、增效载体失活、设备不匹配等现象。例如稳定性肥料主要用于生产复合肥, 目前亟待突破氮肥抑制剂的保活添加工艺, 以减轻复合肥料生产中因高温导致稳定性肥料抑制剂失活的问题。

目前, 我国各类新型肥料通过引进和集成创新实现了产业化, 新型肥料产量已经走在了世界的前列, 但由于起步较晚, 产品仍缺乏领先的核心技

术, 创新能力依然较弱, 涉及重大自主知识产权的技术较少, 亟待新型肥料科学的持续创新与突破。

3.2 肥料特性与农业需求的多样性匹配度不高

我国不同农业生态区的资源禀赋与种植制度复杂多样, 各区域农田管理措施的不同, 加剧了与之匹配的新型高效肥料产品开发和高效应用的困难程度, 以致某些新型肥料产品在不同区域土壤和作物上表现出差异化的应用效果。张蕾等^[42]在全国 7 大区域的大田试验结果表明, 稳定性肥料在不同区域的增产效果变异较大 (5.0%~16.3%), 提出土壤养分含量和 pH 是影响稳定性肥料肥效的主要因素。Ding 等^[50]的研究表明, 有机肥替代化肥可以提高长江中下游和华南地区的早、中、晚稻产量, 但对东北地区一季稻的增产效果不显著, 提出温度是影响有机养分释放的关键因素。Li 等^[13]在全球尺度的 Meta 分析发现, 包膜缓/控释肥在蔬菜上的增产率为 7.1%, 在水稻上的增产率为 4.7%, 而在小麦/玉米体系上无显著增产效果, 说明单一化的包膜养分控释技术不能与所有作物的养分需求特征相匹配。而对于微生物肥料的施用效果, Schütz 等^[16]的研究表明, 气候和功能菌群是主要影响因素, 干旱气候下微生物肥料的增产效果明显优于大陆性气候 (20.0% vs 8.5%)。Verlinden 等^[43]的研究表明, 腐殖酸肥料在番茄上的增产率为 17%, 但在玉米上增产效果不显著, 甚至有减产的风险。以上研究均证明, 如果肥料产品的特性与土壤、作物条件变化或其他栽培技术更替的匹配性不足, 就很难达到预期的增产、增效或增收效果。不同的作物养分需求规律不同, 需要配施不同养分供应特性的肥料产品, 而且需要结合特定的土壤和气候条件才能够高效地供应养分, 而目前以农业差异化需求为导向的肥料生产市场和供应体系并不完善, 市面上新型肥料产品的作物和区域针对性缺乏, 且缺乏科学的施用指导, 导致部分肥料品种田间应用效果不佳^[103]。总之, 我国农业生产实际需求的多样性决定了新型肥料产品研发和应用必须因地制宜, 才能真正实现高产高效。

3.3 新型肥料施肥技术与装备有待提升

高效施肥技术在测土配方施肥、精准施肥、轻简智能施肥等方向取得了长足进展^[104-106]。这些推荐施肥技术主要以传统化学肥料为研究对象, 针对不同作物提出了施肥量、施肥时期和施肥位置等关键施肥技术参数, 是基于传统肥料产品的养分供应特征开展的系统研究。相比于传统化肥产品, 新型肥

料通过控制养分释放和转化过程或通过功能微生物促进土壤养分释放等方式提高了养分利用效率,因此其养分供应过程存在较大变异,传统的高效施肥技术并不能完全套用在新型肥料上。在施肥技术难以匹配不同肥料养分的差异化供应特征的情况下,很多新型肥料产品并没有发挥出增产效果,还直接增加了农民在化肥方面的支出,降低了农民的认同感和购买使用意愿。与新型肥料特性相匹配的施肥技术仍待发展完善,如果不能持续突破各类新型肥料的高效施肥技术瓶颈,施肥技术将成为新型肥料产业快速发展的障碍。

机械化施肥是现代农业发展的重要趋势,通过机械深施、滴灌施肥、种肥同播等机械化、自动化、智能化施肥方式达到科学精准施肥,是节约劳力、保肥增效的关键措施。欧美等发达国家由于工业起步早,对施肥机械的研究较系统深入,针对肥料种类和特性的不同,形成了一套完整的施肥机械装备体系,主要分为固态化肥施肥机、固态厩肥施肥机、液态化肥施肥机、液体厩肥施肥机等^[107]。我国施肥机械化发展比较迅速,从撒肥机到智能变量施肥机,从粗放的施肥方式到精细化作业,我国的施肥机械化有了长足的进步和发展^[108-109]。然而,目前整个肥料的生产 and 施用过程仍是肥料生产适应施肥机械的模式为主,肥料产品与施肥机械、农艺间的匹配严重不足。不同肥料的剂型包括颗粒状、粉状、液态状等,当前我国施肥机械化技术和装备的整体水平能够满足以颗粒状为主的传统化肥的施肥作业要求,对于颗粒状的包膜肥、稳定性复合肥、脲醛肥料、增值肥料等新型肥料也基本能够满足其施肥作业需求。然而,对于粉状、液态状等其他性状的新型肥料产品,在机械化施肥装备的研发和应用的过程中仍存在很多困难和瓶颈。对于微生物肥料,特别是一些农用微生物菌剂,如根瘤菌菌剂、光合细菌菌剂、有机物料腐熟剂等,其产品多是粉状形态,而适用于粉状肥料的相关配套施肥装备的研发在国内仍处于起步阶段,由于缺乏合适的施肥机械目前仍以人工撒施为主。我国有机肥施用机械化普及度不高,农家肥的施用基本还停留在人工撒施阶段^[110]。由于有机肥养分含量低,产品密度小,即使加工成精制商品有机肥,其等养分投入下的体积仍是复合肥的30倍左右,因此常规施肥装备难以用于商品有机肥的机械化施肥作业,而且有机肥粉状的肥效要优于颗粒,但是缺少专业的施肥机械,也不得不做成颗粒便于人工撒施,这也是导致有机

肥施用效率降低和成本投入增加的主要原因^[111]。我国水溶肥相对于国外使用时间较晚,相应的施肥装备发展历程较短,但由于近年来经济作物和设施农业规模的不断扩大,水肥一体化技术装备处于快速发展阶段,目前智能化和数字化的水肥一体化装备还十分欠缺,难以根据作物生长发育期与气象要素的关系判断养分需求,做到实时精准供肥,以降低肥料投入成本,另外,利用低空无人机搭载水溶肥进行作物关键生育期追肥也是发挥水溶肥优势的关键发展方向,但目前市场规模较小,具有较大发展空间。近年来,施肥装备技术研究多集中在机械深施、种肥同播、变量施肥等热点技术方面,而这些研究大多只局限于关键技术或关键部件方面,针对整体施肥装备统筹考虑的较少,更缺少针对不同新型肥料特性在生产中成熟可用的机具^[107]。因此,亟需开展面向未来农业肥料新产品和施肥技术的前瞻性施肥机械和装备研究。

3.4 肥料监管薄弱,市场发展混乱

肥料作为重要的农业生产资料,其质量和安全关系重大。长期以来,我国肥料养分含量不足、有毒有害物质超标、随意添加违规成分、隐性风险成分不可预见、假冒伪劣产品屡禁不止、包装标识不规范、故意夸大宣传等产品质量及安全问题屡见不鲜。通过对全国7个区域236个商品有机肥生产企业开展随机调查和取样,分别对有机质、总养分、酸碱度及含水量技术指标进行了检测和统计分析,结果表明,整体有机肥质量技术指标合格率仅为20.3%^[112]。然而,我国尚无一部专门规范和指导肥料生产经营和使用行为的法律法规,这与我国作为世界最大的肥料生产国和消费国的地位极不相称。农业部门开展肥料执法监管的法律依据薄弱,有关依据只有农业农村部2000年发布的《肥料登记管理办法》,其为规范肥料行业的发展做出了贡献。但是,肥料登记管理制度法律地位不高,只对肥料新产品进行登记管理,对存在质量问题的假劣肥料无法进行管理,对肥料价格、肥料市场调剂指导等更无依据实施管理,导致肥料管理和执法处于一种半空白状态。因此,迫切需要提高肥料登记管理的法律定位,推进肥料立法,从而规范肥料市场,推动肥料产业高质量发展。我国肥料的生产、流通、进口分别归属不同部门监管,各监管部门职责存在交叉和空白,由于缺乏信息共享平台和协同配合的联动工作机制,导致肥料监管力度不足。同时我国肥料产业标准尚未形成统一完善的标准体系。由于相关的

监管部门根据各自需求制定相关的标准, 各自发布了多项国家标准和行业标准, 如国家市场监督管理总局、国家标准化委员会主管的 GB 和 GB/T 系列国家标准, 工业和信息化部主管的 HG/T 化工行业标准, 农业农村部颁布的 NY/T 农业行业标准, 国家质量监督检验检疫总局主管的 SN/T 出入境行业检验检疫标准等。目前关于缓/控释肥料、水溶肥料、稳定性肥料、脲醛肥料、腐殖酸肥料、有机-无机复混肥料等一系列新型肥料的国家标准、行业标准已经陆续颁布实施, 但是由于标准的制定部门不同, 部分标准存在交叉、重复甚至不一致的情况。比如腐殖酸类肥料有 8 个产品 9 个标准, 各标准中的术语、定义及计算方法均存在不一致情况。而且一些新型肥料相关标准尚未完善, 如水溶肥广泛运用于水肥一体技术, 但目前与水溶肥配套的滴灌系统技术标准缺失。标准缺少或不统一等问题阻碍了新型肥料产品生产、流通和使用的有效监管, 不利于新型肥料产业的健康快速发展。

4 新型肥料发展战略

施肥主体存在利益矛盾, 农民施肥关心收益, 而国家关注粮食安全和生态环境保护。因此, 需要通过肥料科技创新, 大力发展养分效率高、环境友好型的肥料, 将农民利益和国家利益统一起来。随着农业资金投入的大幅增加和农村劳动力的转移, 农业规模化经营进程加快, 对肥料产品和施肥技术提出了新的要求, 这也是肥料产业技术进步和创新发展的新机遇和挑战^[113]。为推动新型肥料产业高质量发展, 肥料产品研发将以绿色增产为主要目标, 在满足农业生产对肥料产品性能的关键需求的基础上, 肥料增效技术途径向高效化、专用化、功能化、精准化和低碳化等方向综合发展, 更加重视学科交叉与融合、产品研发与产业化实现结合^[114]。

4.1 肥料研发应用以农业需求为导向

传统肥料产业发展由工业生产主导, 主要关注产品规模及养分浓度等问题, 其产品结构和养分结构单一、与作物-土壤-气候匹配性差、养分利用效率低, 难以高效地满足农业生产的实际需求, 导致环境污染、耕地质量下降、农产品品质降低等问题。随着我国现代农业技术和农业生产结构及农业生产组织的改革与完善, 适应农业生产需求的肥料将会成为产业发展的主要方向^[119]。农业的需求特征与不同区域土壤、种植体系、农业生产规模、施肥技

术与装备以及经济社会发展条件等因素密切相关, 因此肥料的供应需求也呈多元化。1) 我国气候环境、土壤类型、作物种类、种植模式复杂多样, 区域尺度变异性大, 要求肥料养分供应规律与其匹配。粮食作物生产可在优化大量元素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, 且注重养分速效与缓效的协同。设施栽培的蔬菜瓜类、重要经济作物及西北严重干旱缺水的大田粮油作物生产适用水肥一体化技术, 要求配施“高浓度、水溶性、均衡营养、配伍高稳定性”的新型水溶性肥料产品。同时, 肥料供应需要适应区域特点, 例如东北地区的玉米等粮食作物生产以机械化一次性施肥为主, 迫切需要研发非水溶性、多养分元素共存、养分释放周期长且适用于机械施肥装备的新型缓/控释肥料品种, 而且缓/控释肥包膜材料的设计和研发需要满足旱田和水田等不同土壤条件。西北、东北等干旱寒冷区域在有机物料还田情况下, 应重视研发应用具有抗旱、耐低温特性的有机物料腐熟菌剂等特色微生物菌剂产品^[99]。北方石灰性土壤通常缺乏微量元素铁和锌, 而南方酸性土壤通常缺乏中量元素钙和镁等^[115-116], 另外一些农产品有特殊着色要求, 针对新型肥料配方设计就需要大量、中量及微量元素协同配伍, 并针对性地添加氨基酸、海藻酸和腐殖酸等生物活性物质, 实现肥料产品全面高效化和专用化。2) 施肥方式和施肥技术的发展呈现多元化, 如侧深施肥、种肥同播等机械施肥, 基于飞防技术的喷雾施肥, 用于滴灌、喷灌等的水肥一体化施肥等, 要求肥料产品的性状、溶解性、颗粒强度、粒径等各方面特性与之相匹配, 满足肥料施用过程中的一些关键需求, 如种肥同播不烧苗、一次性施肥不脱肥、管道化施肥溶解快、机械化施用不堵管等。作物机械侧深施肥需要肥料硬度达到特定标准, 机械化收获作业对肥料产品促进作物抗倒伏、集中成熟等有特殊要求, 水肥一体化技术要求水溶肥溶解度达到要求, 且肥料酸碱性和灌溉水的酸碱性匹配^[103]。当前新型肥料产品相关特性的研发尚滞后于快速发展的农业施肥方式和施肥技术^[117], 需要进一步探索和完善。3) 面向未来农业需求开展前瞻性肥料研发。充分考虑未来国家需求、农业需求、农民需求、农业生产体制变化、气候变化、肥料资源状况, 以及可能面对的制约国家粮食安全和生态安全的重大生产问题, 开展更加高效、更加增产的肥料新产品研发, 极端气候条件、逆境条件下的肥料及施肥技术研究, 将信息技术、智慧农业技

术融入到新产品、新技术、新装备研发,为未来农业生产提供科技储备。

4.2 肥料增效技术实现“养分-土壤-作物-环境”系统的综合调控

化肥特别是氮、磷肥投入经过几十年连续增长,我国农业已走过了仅凭施用单一元素化肥或常规复合肥增产增收的阶段,进入了多营养元素协同供应提质增效、绿色发展的新时代,这对肥料产品的创新提出了更高要求^[118]。因此,新型肥料功能需要不断拓展,通过产品创新融入更多的增效途径,实现“养分-土壤-作物-环境”系统的综合调控。

4.2.1 营养功能从提高单一养分的有效性向大、中、微量元素综合调控转变 我国缓/控释肥多是以氮元素为核心的肥料,钾肥或者复合肥中钾的缓/控释研究相对较少,未来缓/控释肥不仅调控氮素释放,也要注重其他大、中、微量元素增效的调控技术^[119]。微生物肥料既要提升主流的固氮、溶磷、解钾菌剂的效果,也要研发钙、镁、铁、硅等难溶性养分的活化菌剂,如生物硅肥等,通过改善土壤养分的均衡供应实现肥料提升作物品质的潜力^[99]。

4.2.2 产品创新从单纯注重养分浓度调控向同时注重改善土壤环境和根系吸收拓展 新型肥料的效应由养分浓度、土壤环境和根系吸收能力3个主要因素决定。新型肥料产品研发不仅要优化肥料养分供应,而且要重视改善土壤环境,活化土壤固持养分,强化根系主动吸收养分的能力。作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。通过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,以及关键微生物或物质在作物生长过程中所起到的核心调控作用^[120-122],明确功能菌种及组合应用后对土壤理化性质和生物肥力的影响,构建其与土壤环境的耦合评价技术,并在此基础上研发和应用新型生物有机肥、微生物菌剂或复合微生物肥料,招募土壤中有益微生物构建功能高效稳定的菌群结构,培肥土壤、改善土壤养分供应结构,提升土壤质量和健康。优化腐殖酸类、海藻酸类、氨基酸类等增效载体与氮、磷、钾等化肥配伍技术,通过调控肥料养分在土壤中的释放、转化、移动、损失、固定等过程,进一步优化肥料的供肥性,提高肥料利用率。另外,利用一些特定材料对土壤环境变化(如土壤pH、温度、湿度等)下形状、渗透速率、识别性能和释放性能等自身性质响应敏感的特点,利用养分分隔与共存、纳米微粒与稳定悬浮、敏感材料与

靶向调控等技术,研发环境响应敏感型智能肥料,从而控制肥料养分根据土壤环境变化和作物不同的生长阶段来智能精准释放^[123-127]。

4.2.3 肥料产品功能从养分供应向调控“营养、调理、植保”多元化发展 肥料新产品赋予其改善农产品品质、增强作物抗逆能力、保护和改良土壤等功能,是新型肥料产品功能拓展的重要趋势。集约化、商品化为导向的作物生产对土壤的利用强度高于以往,肥料产品的提质增效作用,不仅需要充分的养分供应,还需要健康的土壤和活跃的植物次生代谢,才能在高产的同时,提升需要的产品品质。已有研究发现,一些有机物料的添加可赋予肥料产品额外的功能,提高作物对旱、冷、热、酸、碱、盐、病、虫、连作障碍等的抗逆能力。例如,腐殖酸、氨基酸、海藻酸等生物活性物质可影响植物生长的原生代谢和次生代谢过程,对养分的有效性有双向调控效应,通过与常规肥料配伍,既调控作物生长环境,又改善作物的养分吸收、同化和利用状况。把固氮和活化土壤养分的菌剂与生防促生菌剂复合,开发具有三效合一的“肥药兼效型”复合微生物肥料,缓解连作引起的土传病害。

4.2.4 研发绿色环保肥料增效材料,降低环境风险

随着我国可持续农业的推进,在满足肥料产品关键性能的前提下,减少肥料中具有潜在环境副作用的成分,应成为新型肥料研发的主攻方向之一。现有一些缓/控释肥、商品有机肥等新型肥料产品因缺乏绿色环保的原料、增效材料或助剂存在一定环境污染风险。例如,包膜肥料中的有机高分子聚合物是土壤微塑料污染的重要来源,聚合物塑料微胶囊粒径小、难以清除,长期施用导致微塑料在土壤中大量累积^[128]。聚合物包膜过程中添加的芳香烃类有毒溶剂在肥料中不可避免的有残留,进入土壤后会缓慢降解释放。长期施用硫包膜肥料会引起硫在土壤中的残留累积,可能造成土壤酸化^[129]。采用无害化处理不完全的原料生产的商品有机肥,不同程度地存在重金属、抗生素、微塑料污染风险^[130-133]。因此,加强肥料原料的无害化处理技术攻关,重视安全、环保、可降解的天然/植物源材料(如植酸类、海洋生物提取物、氨基酸类、微生物发酵代谢物等),以及新型改性天然高分子材料(如油脂改性、纤维素改性材料等)等高效、环保、价廉的肥料增效剂研发,是新型肥料绿色发展和应用的关键突破点。

4.3 新型肥料生产工艺体系向绿色低碳转型

绿色高效新型肥料产品的创制与产业化,不仅

是我国“双碳”战略和农业绿色可持续发展的要求,也是新型肥料推广的重要基础。高效、低碳、环保的新型肥料制造技术体系,需要整个化肥生产周期的材料环保化、加工低碳化及产品可商业化的有机结合。首先,研究生产原料的绿色低碳生产、高效活化和全量利用技术,以大幅提升矿产资源的肥料化效率。例如,尝试利用太阳能、风能、海洋能等清洁能源为主的“绿氨”技术生产新型肥料的核心氮养分,实现合成氨的低碳或零碳排放^[134-135]。创新中、低品位磷矿养分的全量化综合利用技术,采用高温活化技术综合利用磷尾矿和渣酸,创制含中微量元素的水溶性磷酸一铵、肥料级聚磷酸铵、聚磷酸钙镁、有机磷铵等绿色新型肥料产品^[118]。突破低品位固体钾矿资源的加工和利用技术以及有机钾肥生产技术,利用钾长石、霞石、白云母等非水溶性钾资源制取钾盐。其次,针对肥料增效材料或助剂的合成加工,或与原料肥反应过程中存在的产能消耗和污染排放增加等问题,研究更价廉、更高效、更安全的生产工艺,具体到缓/控释肥,实现生产过程的无溶剂、低排放和零排放是包膜材料和工艺创新发展的重要方向^[136]。再次,新型肥料的生产多为传统氮肥、磷肥、钾肥或复合肥的二次加工,存在能耗大、资源浪费、成本高、产能低等问题,制约了大规模产业化^[12],亟需通过技术创新,对传统肥料大型生产装置进行改造升级,兼顾养分精准配伍,增效剂或助剂添加,结合新材料应用,将新型肥料的生产由常规的原料肥二次加工转向矿产原料的直接活化加工,构建低废、低排、低耗的智能化肥料加工和生产等关键技术体系。赵秉强团队通过研发微量高效载体,利用大型化肥生产装置,成功地一次性生产出含海藻、氨基酸等活性成分的增效尿素,由于避免了二次加工,该产品突破了新型肥料产品产能低、成本高的技术短板,全面推动了尿素、磷铵、复合肥等大宗化肥高效化和产品绿色升级^[7]。最后,优化提升现有产业化技术工艺,研发智能化自动控制系统及生产设备控制单元、设备密封技术等,开发连续化自动控制工艺和设备,建立连续化、自动化、智能化、标准化、产业化生产技术体系。

4.4 加强新型肥料统一监管体系建设

新型肥料生产、销售和使用环节都需要科学合理的监管体系。首先,要推进新型肥料立法工作,建立科学统一的新型肥料产业技术标准,明确肥料监管部门职责,加强肥料生产经营管理和违法处

罚。其次,完善新型肥料使用登记与备案制度,完善登记肥料品种目录清单,建立负面清单制度,严格登记要求。再次,加强新型肥料监管机制建设,从产、供、销、用等方面建立全链条监管机制,推动监管执法向基层延伸,重点加强无害化生产监管,整治无证肥料生产经营主体流窜造假售假,提高不法企业与商贩的违法成本,建立不同部门之间信息共享和沟通机制,开展联合监管、联合执法、联合惩戒,做到肥料监管工作不越位不失位。最后,探索新型肥料生产企业产销报备制度和农产品生产主体肥料施用报备制度,建设肥料生产、销售、储存、出口、施用等全链条大数据信息共享与监管平台,尝试建立肥料产品的追溯监管体系,加大政府主管部门对新型肥料生产和使用的调控力度。通过全方位强化完善肥料监管体系,规范新型肥料技术发展方向和产品质量水准。

总之,推动新型肥料产业的高质量快速发展,需要以我国特色农业需求为导向,根据不同区域农业生产条件,系统分析作物、土壤、气候及施肥技术装备等对肥料产品养分配比、形态和特性的需求,通过大数据智能算法进行产品定向设计,聚焦全面营养、减量增效、土壤改良、环保友好的多元化功能性肥料研发,重视学科间深度交叉融合,将植物营养、栽培、育种、植保、生理、微生物、化工、材料等多学科综合增效技术策略融入到肥料产品中,增强其与农业生产的匹配性,不断提升产品应用效果、拓展产品功能。加强新型肥料生产过程中高效低耗、绿色环保、低碳低排的原料开发和技术应用,促进肥料产业转型升级。在实际农业生产过程中,综合各种肥料的优点,因地制宜制定合适的施肥方案,推动高效肥料新产品落地,实现作物高产、土壤培肥、环境保护和资源可持续利用协调发展。加强新型肥料生产、销售和使用全链条统一监管体系建设,为新型肥料产业高质量健康发展保驾护航。

补充材料:

附图 1~4 见《植物营养与肥料学报》网页上该文的“资源附件”(http://www.plantnutrifert.org/article/doi/10.11674/zwyf.2022669)。

参考文献:

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). FAOSTAT database collections[DB/OL]. https://www.fao.org/faostat/en/#data/RFN, 2020-12-11.

- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). FAO statistical pocketbook: World food and agriculture 2015[R]. <https://www.fao.org/3/i4691e/i4691e.pdf>, 2016-03-05.
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The state of food security and nutrition in the world 2021: The world is at a critical juncture[EB/OL]. <https://www.fao.org/state-of-food-security-nutrition/en/>, 2021-12-12.
- [4] 国家统计局. 年度统计数据[DB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01,2020-05-06>. National Bureau of Statistics. Annual statistics[DB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01,2020-05-06>.
- [5] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国化肥区划[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1986. Institute of Soils and Fertilizers, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Regional planning of Chinese chemical fertilizers[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1986.
- [6] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327: 1008-1010.
- [7] Suding K N, Collins S L, Gough L, *et al.* Functional-and abundance-based mechanisms explain diversity loss due to N fertilization[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, 102(12): 4387-4392.
- [8] Gu B, Sutton M A, Chang S X, *et al.* Agricultural ammonia emissions contribute to China's urban air pollution[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(5): 265-266.
- [9] Le C, Zha Y, Li Y, *et al.* Eutrophication of lake waters in China: Cost, causes, and control[J]. *Environmental Management*, 2010, 45(4): 662-668.
- [10] Stocker T F, Qin D, Plattner G. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013: The physical science basis[M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [11] Behera S N, Sharma M, Aneja V P, *et al.* Ammonia in the atmosphere: A review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(11): 8092-8131.
- [12] 赵秉强, 袁亮. 化肥产品创新驱动产业转型升级[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(4): 726-731. Zhao B Q, Yuan L. Innovation in chemical fertilizer products driving industrial transformation and evolution[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(4): 726-731.
- [13] Li T Y, Zhang W F, Yin J, *et al.* Enhanced-efficiency fertilizers are not a panacea for resolving the nitrogen problem[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(2): e511-e521.
- [14] Rose M T, Patti A F, Little K R, *et al.* A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances: Practical implications for agriculture[J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 124: 37-89.
- [15] Zhang X Y, Fang Q C, Zhang T, *et al.* Benefits and trade-offs of replacing synthetic fertilizers by animal manures in crop production in China: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(2): 888-900.
- [16] Schütz L, Gattinger A, Meier M, *et al.* Improving crop yield and nutrient use efficiency via biofertilization—A global meta-analysis [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 8: 2204.
- [17] Quan Z, Zhang X, Fang Y T, *et al.* Different quantification approaches for nitrogen use efficiency lead to divergent estimates with varying advantages[J]. *Nature Food*, 2021, 2(4): 241-245.
- [18] 冯媛媛. 主要粮食作物磷肥利用率与土壤有效磷含量的定量关系分析[D]. 湖北荆州: 长江大学硕士学位论文, 2019. Feng Y Y. An analysis of the relationship between phosphorus use efficiency and soil Olsen-P in the wheat, rice, corn land[D]. Jingzhou, Hubei: MS Thesis of Yangtze University, 2019.
- [19] 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. 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.
- [20] 生态环境部. 第二次全国污染源普查公报[R]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html, 2020-06-09. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Bulletin of the second national survey of pollution sources [R]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html, 2020-06-09.
- [21] Liu W W, Zhang G, Wang X K, *et al.* Carbon footprint of main crop production in China: Magnitude, spatial-temporal pattern and attribution[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 1296-1308.
- [22] Aliyu G, Luo J F, Di H J, *et al.* Nitrous oxide emissions from China's croplands based on regional and crop-specific emission factors deviate from IPCC 2006 estimates[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 547-558.
- [23] Gao S S, Xu P, Zhou F, *et al.* Quantifying nitrogen leaching response to fertilizer additions in China's cropland[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 211: 241-251.
- [24] Hou X K, Zhan X Y, Zhou F, *et al.* Detection and attribution of nitrogen runoff trend in China's croplands[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 234: 270-278.
- [25] Ma R Y, Zou J W, Han Z Q, *et al.* Global soil-derived ammonia emissions from agricultural nitrogen fertilizer application: A refinement based on regional and crop-specific emission factors[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(13): 855-867.
- [26] Geng J B, Sun Y B, Zhang M, *et al.* Long-term effects of controlled release urea application on crop yields and soil fertility under rice-oilseed rape rotation system[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 65-73.
- [27] 赵秉强, 袁亮, 李燕婷, 等. 增值肥料概论[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020. Zhao B Q, Yuan L, Li Y T, *et al.* Overview of value-added fertilizer [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2020.
- [28] 金波. 水溶肥发展现状和存在问题的研究[J]. *盐科学与化工*, 2020, 49(11): 1-2.

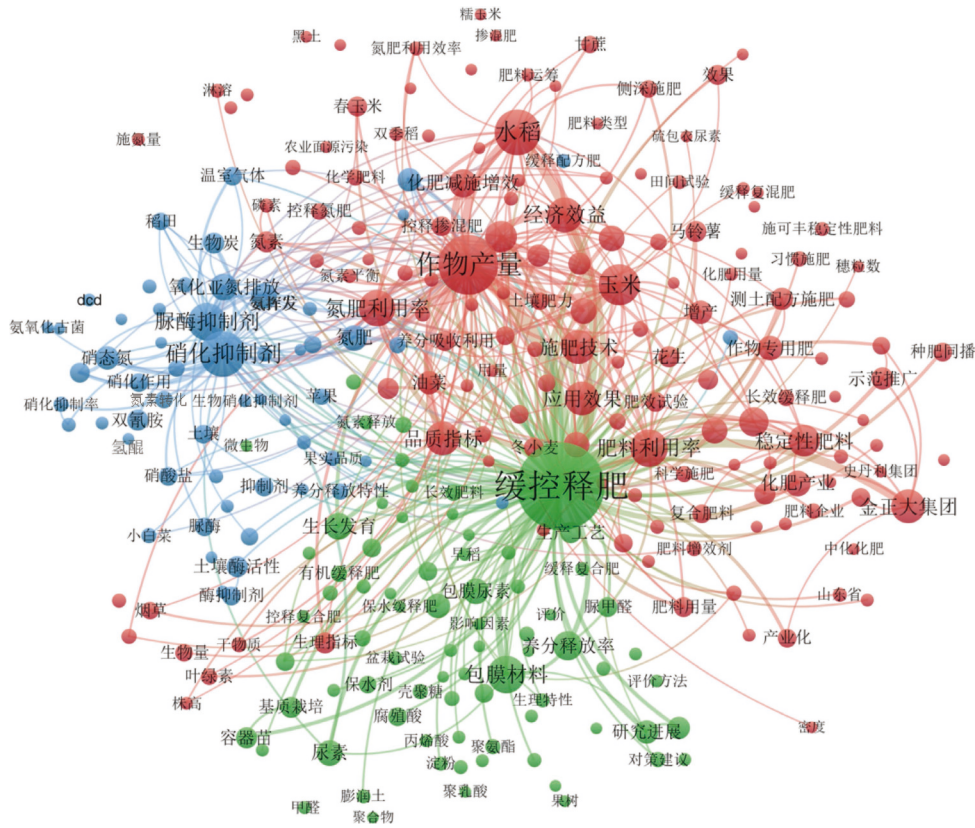
- Jin B. Development status and existing problems of water soluble fertilizer[J]. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2020, 49(11): 1-2.
- [29] 杜为研, 唐杉, 汪洪. 我国有机肥资源及产业发展现状[J]. *中国土壤与肥料*, 2020, (3): 210-219.
- Du W Y, Tang S, Wang H. The status of organic fertilizer industry and organic fertilizer resources in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020, (3): 210-219.
- [30] 周法永, 卢布, 顾金刚, 等. 我国微生物肥料的发展阶段及第三代产品特征探讨[J]. *中国土壤与肥料*, 2015, (1): 12-17.
- Zhou F Y, Lu B, Gu J G, *et al.* Chinese microbial fertilizer features in its developmental stages and a discuss on the third-generation product innovation[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015, (1): 12-17.
- [31] Xia L L, Lam S K, Chen D L, *et al.* Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution? A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(5): 1917-1925.
- [32] Yang M, Zhu X Q, Bai Y, *et al.* Coated controlled-release urea creates a win-win scenario for producing more staple grains and resolving N loss dilemma worldwide[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 288: 125660.
- [33] Sha Z P, Liu H J, Wang J X, *et al.* Improved soil-crop system management aids in NH₃ emission mitigation in China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 289: 117844.
- [34] 郝胜磊, 蔡廷瑶, 冯小杰, 等. 新型肥料对全球三大粮食作物产量和土壤生物学活性影响的meta分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(9): 1496-1505.
- Hao S L, Cai T Y, Feng X J, *et al.* Effects of new fertilizers on the yield and soil biological activity of three major food crops: A global meta-analysis[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(9): 1496-1505.
- [35] 赵蒙, 曾科, 姚元林, 等. 聚脲甲醛缓释肥对太湖稻麦轮作体系氨挥发及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(1): 55-63.
- Zhao M, Zeng K, Yao Y L, *et al.* Effects of polyurea-formaldehyde on ammonia volatilization and yields under rice-wheat rotation in Taihu region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1): 55-63.
- [36] 姜珊珊, 庞炳坤, 张敬沙, 等. 减氮及不同肥料配施对稻田CH₄和N₂O排放的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(5): 1741-1750.
- Jiang S S, Pang B K, Zhang J S, *et al.* Effects of reduced nitrogen and combined application of different fertilizers on CH₄ and N₂O emissions in paddy fields[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(5): 1741-1750.
- [37] 周华敏, 陈宝成, 王晓琪, 等. 脲醛缓释肥不同配比对小麦生长及土壤氮素养分的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 179-185.
- Zhou H M, Chen B C, Wang X Q, *et al.* Effect of different proportions of urea formaldehyde slow-release nitrogen fertilizer on wheat growth and soil nitrogen nutrients[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1): 179-185.
- [38] 韩蔚娟, 王寅, 陈海潇, 等. 黑土区玉米施用新型肥料的效果和环境效应[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 307-311.
- Han W J, Wang Y, Yang H X, *et al.* Study on the effect of new-type fertilizer application on spring maize production and its environmental impact on black soil area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 307-311.
- [39] 倪露, 白由路, 杨俐苹, 等. 不同组分脲甲醛缓释肥的夏玉米肥料效应研究[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(17): 3370-3379.
- Ni L, Bai Y L, Yang L P, *et al.* The effect of urea-formaldehyde fertilizer under different components by summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(17): 3370-3379.
- [40] 周丽平, 杨俐苹, 白由路, 等. 不同氮肥缓释化处理对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1449-1457.
- Zhou L P, Yang L P, Bai Y L, *et al.* Comparison of several slow-released nitrogen fertilizers in ammonia volatilization and nitrogen utilization in summer maize field[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6): 1449-1457.
- [41] Fan D J, He W T, Smith W N, *et al.* Global evaluation of inhibitor impacts on ammonia and nitrous oxide emissions from agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(17): 5121-5141.
- [42] 张蕾, 王玲莉, 房娜娜, 等. 稳定性肥料在中国不同区域的施用效果及施用量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(2): 215-230.
- Zhang L, Wang L L, Fang N N, *et al.* Effect of stabilized fertilizer in different regions of China and the suitable application rate[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(2): 215-230.
- [43] Verlinden G, Pycke B, Mertens J, *et al.* Application of humic substances results in consistent increases in crop yield and nutrient uptake[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2009, 32(9): 1407-1426.
- [44] 张祥, 梁济, 李接励, 等. 腐殖酸肥料对小麦氮素吸收利用的影响[J]. *化肥工业*, 2019, 46(3): 61-66.
- Zhang X, Liang J, Li J L, *et al.* Effect of humic acid fertilizer on nitrogen absorption and utilization of wheat[J]. *Chemical Fertilizer Industry*, 2019, 46(3): 61-66.
- [45] 朱荣, 柳丽丽, 齐永波, 等. 稻田氨挥发和水稻产量对增效复合肥减氮施用的响应[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(9): 1935-1943.
- Zhu R, Liu L L, Qi Y B, *et al.* Responses of ammonia volatilization and grain yield to nitrogen reduction with synergistic compound fertilizer in a paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9): 1935-1943.
- [46] 李金鑫, 李絮花, 刘敏, 等. 海藻酸增效复混肥料在冬小麦上的施用效果[J]. *中国土壤与肥料*, 2020, (1): 153-159.
- Li J X, Li X H, Liu M, *et al.* Effect of alginate compound fertilizer on growth and yield of winter wheat[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020, (1): 153-159.
- [47] 周勇明, 商照聪, 宝德俊, 等. 海藻酸尿素对夏玉米产量和氮肥利用率的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014, (3): 23-26.
- Zhou Y M, Shang Z C, Bao D J, *et al.* Effect of applying alginic acid urea on summer maize yield and N use efficiency[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014, (3): 23-26.
- [48] 李传哲, 许仙菊, 马洪波, 等. 水肥一体化技术提高水肥利用效率研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2017, 33(2): 469-475.
- Li C Z, Xu X J, Ma H B, *et al.* Research advances in fertigation technology improving water and fertilizer use efficiency[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 33(2): 469-475.

- [49] Ding W C, He P, Zhang J J, *et al.* Optimizing rates and sources of nutrient input to mitigate nitrogen, phosphorus, and carbon losses from rice paddies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120603.
- [50] Ding W C, Xu X P, He P, *et al.* Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2018, 227: 11–18.
- [51] Wei Z B, Ying H, Guo X W, *et al.* Substitution of mineral fertilizer with organic fertilizer in maize systems: A meta-analysis of reduced nitrogen and carbon emissions[J]. *Agronomy*, 2020, 10(8): 1149.
- [52] Schmidt J E, Gaudin A C M. What is the agronomic potential of biofertilizers for maize? A meta-analysis[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2018, 94(7): 1–9.
- [53] Trenkel M E. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient efficiency in agriculture (2nd edition)[M]. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010.
- [54] Tennessee Valley Authority. Production of slow release nitrogen fertilizers by improved method of coating urea with sulfur[P]. The United States: US3903333A. 1975–09–02.
- [55] 刘宝存, 徐秋明, 邹国元, 等. 缓控释肥料理论与实践[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009.
Liu B C, Xu Q M, Zou G Y, *et al.* The theory and practice of the slow/controlled fertilizers[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2009.
- [56] 陈冠霖, 赵其国, Danso P O, 等. 包膜型缓/控释肥料研究现状及其在功能农业中的应用展望[J]. *肥料与健康*, 2021, 48(3): 1–6.
Chen G L, Zhao Q G, Danso P O, *et al.* A review of coated slow/controlled release fertilizer and its application in functional agriculture [J]. *Fertilizer & Health*, 2021, 48(3): 1–6.
- [57] 高璐阳, 王怀利, 王晓飞, 等. 我国发展缓控释肥的意义及前景[J]. *磷肥与复肥*, 2015, 30(4): 14–17.
Gao L Y, Wang H L, Wang X F, *et al.* The significance and prospect of slow/controlled release fertilizer development in China [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2015, 30(4): 14–17.
- [58] Modolo L V, De Souza A X, Horta L P, *et al.* An overview on the potential of natural products as ureases inhibitors: A review[J]. *Journal of Advanced Research*, 2015, 6(1): 35–44.
- [59] Zerulla W, Barth T, Dressel J, *et al.* 3, 4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP)-a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture—An introduction[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34(2): 79–84.
- [60] 周鹏, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 我国大量元素水溶肥料产业发展现状[J]. *现代化工*, 2013, 33(4): 9–14.
Zhou L, Lu J W, Li X K, *et al.* Development of water-soluble fertilizers containing nitrogen, phosphorus and potassium industry in China[J]. *Modern Chemical Industry*, 2013, 33(4): 9–14.
- [61] 张瑞福, 颜春荣, 张楠, 等. 微生物肥料研究及其在耕地质量提升中的应用前景[J]. *中国农业科技导报*, 2013, 15(5): 8–16.
Zhang R F, Yan C R, Zhang N, *et al.* Studies on microbial fertilizer and its application prospects in improving arable land quality[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15(5): 8–16.
- [62] 郑立伟, 闫洪波, 张丽, 等. 微生物肥料发展及作用机理综述[J]. *河北省科学院学报*, 2020, 37(1): 61–67.
Zheng L W, Yan H B, Zhang L, *et al.* A review on development and mechanism of microbial fertilizer[J]. *Journal of the Hebei Academy of Sciences*, 2020, 37(1): 61–67.
- [63] 刘兆辉, 吴小宾, 谭德水, 等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3827–3839.
Liu Z H, Wu X B, Tan D S, *et al.* Application and environmental effects of one-off fertilization technique in major cereal crops in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3827–3839.
- [64] 刘宁, 孙振涛, 韩晓日, 等. 缓/控释肥料的研究进展及存在问题[J]. *土壤通报*, 2010, 41(4): 1005–1009.
Liu N, Sun Z T, Han X R, *et al.* Research progress and existing problems on slow/controlled release fertilizers[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(4): 1005–1009.
- [65] 范东升, 赵彦梁, 燕子红. 缓控释肥有机包膜材料的研究进展与趋势[J]. *喀什大学学报*, 2020, 41(6): 37–41.
Fan D S, Zhao Y L, Yan Z H. Research progress and trend of organic envelop materials of sustained release fertilizer[J]. *Journal of Kashi University*, 2020, 41(6): 37–41.
- [66] 许秀成, 李荫萍, 王好斌. 包裹型缓释/控制释放肥料专题报告第一报: 概念区分及评判标准[J]. *磷肥与复肥*, 2000, 15(3): 1–6.
Xu X C, Li D P, Wang H B. A special report on coated slow/controlled release fertilizer—Part 1: Definitions and evaluation[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2000, 15(3): 1–6.
- [67] 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.
- [68] 武志杰, 石元亮, 李东坡, 等. 稳定性肥料发展与展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1614–1621.
Wu Z J, Shi Y L, Li D P, *et al.* The development and outlook of stabilized fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1614–1621.
- [69] 史云峰, 张摇帆, 徐小雄, 等. 30种芳香植物水浸提液对尿素水解和硝化作用的抑制效果[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(12): 3440–3446.
Shi Y F, Zhang Y F, Xu X X, *et al.* Inhibitory effects of aqueous extracts of thirty aromatic plants on urea hydrolysis and nitrification [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(12): 3440–3446.
- [70] Sun L, Lu Y F, Yu F W, *et al.* Biological nitrification inhibition by rice root exudates and its relationship with nitrogen-use efficiency [J]. *New Phytologist*, 2016, 212(3): 646–656.
- [71] 杨志福. 腐植酸有效施用条件和施用方法[A]. 郑平. 煤炭腐植酸的生产和应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991: 287–288.
Yang Z F. Conditions and methods of effective application of humic acid[A]. Zheng P. Production and application of coal humic acid[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1991: 287–288.
- [72] 梁太波, 王振林, 刘兰兰, 等. 腐植酸尿素对生姜产量及氮素吸收、同化和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 903–909.
Liang T B, Wang Z L, Liu L L, *et al.* Effects of humic acid urea on yield and nitrogen absorption, assimilation and quality of ginger[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, 13(5): 903–909.
- [73] 赵秉强. 新型肥料[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

- Zhao B Q. New fertilizers[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [74] 赵秉强. 传统化肥增效改性提升产品性能与功能[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 1-7.
- Zhao B Q. Modification of conventional fertilizers for enhanced property and function[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(1): 1-7.
- [75] 张水勤, 袁亮, 李伟, 等. 腐植酸尿素对玉米产量及肥料氮去向的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1207-1214.
- Zhang S Q, Yuan L, Li W, *et al.* Effects of humic acid urea on maize yield and the fate of fertilizer nitrogen[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(5): 1207-1214.
- [76] 周丽平, 袁亮, 赵秉强, 等. 不同用量风化煤腐殖酸对玉米根系的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(2): 285-292.
- Zhou L P, Yuan L, Zhao B Q, *et al.* Response of maize roots to different additive amounts of weathered coal humic acids[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(2): 285-292.
- [77] 马明坤, 袁亮, 李燕婷, 等. 不同磺化腐殖酸磷肥提高冬小麦产量和磷素吸收利用的效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(3): 362-369.
- Ma M K, Yuan L, Li Y T, *et al.* The effect of sulfonated humic acid phosphate fertilizer on enhancing grain yield and phosphorus uptake and utilization in winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(3): 362-369.
- [78] 冯先明, 王保明, 彭全, 等. 我国水溶肥的发展概况与建议[J]. 现代化工, 2018, 38(1): 6-11.
- Feng X M, Wang B M, Peng Q, *et al.* Development situation and suggestions on China's water-soluble fertilizer[J]. *Modern Chemical Industry*, 2018, 38(1): 6-11.
- [79] 傅送保, 李代红, 王洪波, 等. 水溶性肥料生产技术发展[J]. 磷肥与复肥, 2013, 28(5): 46-50.
- Fu S B, Li D H, Wang H B, *et al.* Development of production technology of water-soluble fertilizer[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2013, 28(5): 46-50.
- [80] 张从军, 曹广峰. 含海藻酸水溶肥生产技术[J]. 化肥工业, 2015, 42(5): 18-19, 24.
- Zhang C J, Cao G F. Production technology of water soluble fertilizer containing alginate[J]. *Chemical Fertilizer Industry*, 2015, 42(5): 18-19, 24.
- [81] 豆亚妮, 张院萍, 崔刚. 利用糠醛渣制备含腐植酸螯合态水溶肥料的技术[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(29): 41-43.
- Dou Y N, Zhang Y P, Cui G. Study on preparation of humic acid soluble fertilizer by using furfural residue[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(29): 41-43.
- [82] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国畜禽粪尿中养分资源数量及利用潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1131-1148.
- Song D L, Hou S P, Wang X B, *et al.* Nutrient resource quantity of animal manure and its utilization potential in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1131-1148.
- [83] 刘珊珊, 夏萌, 胡夏茹, 等. 石灰碳铵熏蒸联合生物有机肥对香蕉枯萎病和细菌群落的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4189-4196.
- Liu S S, Xia M, Hu X R, *et al.* Effects of lime and ammonium carbonate fumigation coupled with bio-organic fertilizer application on banana fusarium wilt and bacterial community[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12): 4189-4196.
- [84] 沈宗专, 孙莉, 王东升, 等. 石灰碳铵熏蒸与施用生物有机肥对连作黄瓜和西瓜枯萎病及生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(10): 3351-3359.
- Shen Z Z, Sun L, Wang D S, *et al.* Effects of lime-ammonium bicarbonate fumigation and biofertilizer application on *Fusarium* wilt and biomass of continuous cropping cucumber and watermelon[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(10): 3351-3359.
- [85] 刘善江, 薛文涛, 苗万有, 等. 有机肥料行业的特点与发展趋势[J]. 蔬菜, 2018, (12): 26-29.
- Liu S J, Xue W T, Miao W Y, *et al.* Characteristics and development trend of organic fertilizer industry[J]. *Vegetables*, 2018, (12): 26-29.
- [86] Yuan Q, Druzhinina I S, Pan X, *et al.* Microbially mediated plant salt tolerance and microbiome-based solutions for saline agriculture[J]. *Biotechnology Advances*, 2016, 34(7): 1245-1259.
- [87] Itelima J U, Bang W J, Sila M D, *et al.* A review: Biofertilizer- A key player in enhancing soil fertility and crop productivity[J]. *Microbiology and Biotechnology Reports*, 2018, 2(1): 22-28.
- [88] Mayak S, Tirosh T, Glick B R. Plant growth-promoting bacteria confer resistance in tomato plants to salt stress[J]. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2004, 42(6): 565-572.
- [89] Etesami H, Maheshwari D K. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 156: 225-246.
- [90] 李俊, 姜昕, 马鸣超, 等. 我国微生物肥料产业需求与技术创新[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (2): 1-5.
- Li J, Jiang X, Ma M C, *et al.* Development demand and technical innovation for bio-fertilizer industry in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019, (2): 1-5.
- [91] Sahoo R K, Ansari M W, Dangar T K, *et al.* Phenotypic and molecular characterisation of efficient nitrogen-fixing *Azotobacter* strains from rice fields for crop improvement[J]. *Protoplasma*, 2014, 251: 511-523.
- [92] Ahmadi-Rad S, Gholamhoseini M, Ghalavand A, *et al.* Foliar application of nitrogen fixing bacteria increases growth and yield of canola grown under different nitrogen regimes[J]. *Rhizosphere*, 2016, 2: 34-37.
- [93] Chen Y P, Rekha P D, Arun A B, *et al.* Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 34(1): 33-41.
- [94] Laheurte F, Berthelin J. Effect of a phosphate solubilizing bacteria on maize growth and root exudation over four levels of labile phosphorus[J]. *Plant and Soil*, 1988, 105(1): 11-17.
- [95] Shanware A S, Kalkar S A, Trivedi M M. Potassium solubilisers: Occurrence, mechanism and their role as competent biofertilizers[J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2014, 3: 622-629.
- [96] 林启美, 饶正华, 孙焱鑫, 等. 硅酸盐细菌的筛选及其对番茄营养的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(1): 59-62.
- Lin Q M, Rao Z H, Sun Y X, *et al.* Identification of a silicate-

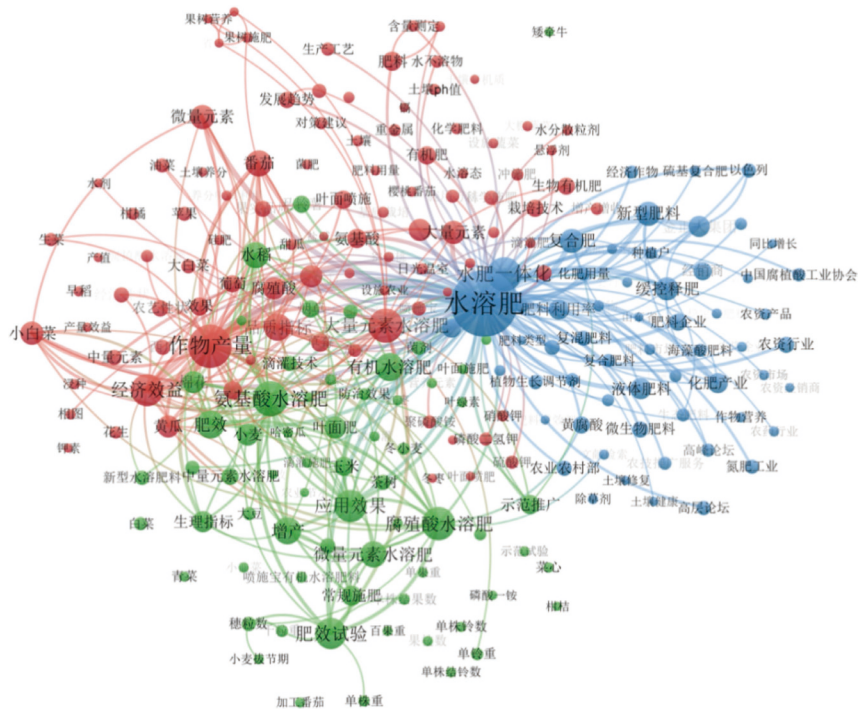
- dissolving bacterium and its effect on tomato[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(1): 59–62.
- [97] Indumathi D. Microbial conversion of vegetable wastes for biofertilizer production[J]. *Journal of Biotechnology and Biochemistry*, 2017, 3(2): 43–47.
- [98] 陈文新, 汪恩涛. 中国根瘤菌[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Chen W X, Wang E T. Chinese rhizobia[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [99] 李俊, 姜昕, 马鸣超. 新形势下微生物肥料产业运行状况及发展方向[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(12): 2108–2114.
Li J, Jiang X, Ma M C, *et al.* Situation and development direction for microbial fertilizer industry in the near future of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(12): 2108–2114.
- [100] 翟彩娇, 崔士友, 张蛟, 等. 缓/控释肥发展现状及在农业生产中的应用前景[J]. *农学学报*, 2022, 12(1): 22–27.
Zhai C J, Cui S Y, Zhang J, *et al.* Development status of slow/controlled release fertilizers and their application prospects in agricultural production[J]. *Journal of Agriculture*, 2022, 12(1): 22–27.
- [101] 仝倩倩, 祝英, 崔得领, 等. 我国微生物肥料发展现状及在蔬菜生产中的应用[J]. *中国土壤与肥料*, 2022, (4): 259–266.
Tong Q Q, Zhu Y, Cui D L, *et al.* The development status of microbial fertilizer in China and its application in vegetable planting[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022, (4): 259–266.
- [102] 王景超, 于晓菲, 商姗姗. 我国微生物肥料研究现状及其在作物上的应用进展[J]. *农业与技术*, 2022, 42(1): 34–37.
Wang J C, Yu X F, Shang S S. A review of biofertilizer study and its application on crops in China[J]. *Agriculture and Technology*, 2022, 42(1): 34–37.
- [103] 张卫峰, 李增源, 李婷玉, 等. 化肥零增长: 呼吁肥料产业链革新[J]. *蔬菜*, 2018, (5): 1–9.
Zhang W F, Li Z Y, Li T Y, *et al.* Zero increase of chemical fertilizers: Calling on reformation of fertilizer industry chain[J]. *Vegetables*, 2018, (5): 1–9.
- [104] 何萍, 徐新朋, 周卫, 等. 肥料养分推荐原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
He P, Xu X P, Zhou W, *et al.* Principles and application of fertilizer nutrient recommendation[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [105] 白由路, 杨俐苹, 金继运. 测土配方施肥原理与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
Bai Y L, Yang L P, Jin J Y. Principles and practices of soil test and fertilizer formula[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.
- [106] 白由路. 精准施肥实施技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020.
Bai Y L. Precision fertilization implementation technology[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2020.
- [107] 付宇超, 袁文胜, 张文毅, 等. 我国施肥机械化技术现状及问题分析[J]. *农机化研究*, 2017, 39(1): 251–255.
Fu Y C, Yuan W S, Zhang W Y, *et al.* Present situation and problem analysis of the technology of fertilizer mechanization in China[J]. *Journal of Mechanization Research*, 2017, 39(1): 251–255.
- [108] 王秀, 赵春江, 孟志军, 等. 精准变量施肥机的研制与试验[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(5): 114–117.
Wang X, Zhao C J, Meng Z J, *et al.* Design and experiment of variable rate fertilizer applicator[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(5): 114–117.
- [109] 陈广大, 王悦刚, 陈思睿, 等. 基于ARM的精确变量施肥控制系统的设计[J]. *中国农机化学报*, 2013, 34(4): 130–133.
Chen G D, Wang Y G, Chen S R, *et al.* The design of precise variable rate fertilizer control system based on ARM[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2013, 34(4): 130–133.
- [110] 李洁, 吴明亮, 汤远菊, 等. 有机肥施肥机械的研究现状与发展趋势[J]. *湖南农业大学学报*, 2013, 39(1): 97–100.
Li J, Wu M L, Tang Y J, *et al.* Research status and development trend of organic fertilizer applicators[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 2013, 39(1): 97–100.
- [111] 白由路. 国内外施肥机械的发展概况及需求分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2016, (3): 1–4.
Bai Y L. Analysis of the development and the demands of fertilization machinery[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016, (3): 1–4.
- [112] 王甲辰, 田有国, 李季, 等. 全国7个区域商品有机肥质量现状分析及启示[J]. *中国土壤与肥料*, 2022, (2): 175–180.
Wang J C, Tian Y G, Li J, *et al.* Analysis on the quality and enlightenment of commodity organic fertilizer in different regions of China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022, (2): 175–180.
- [113] 白由路. 我国肥料产业面临的挑战与发展机遇[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 1–8.
Bai Y L. Challenges and opportunities of fertilizer industry in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(1): 1–8.
- [114] 赵秉强. 化肥有效养分高效化产品创新的技术趋势[J]. *磷肥与复肥*, 2020, 35(6): 刊首语.
Zhao B Q. The technological development trend of innovative fertilizer products by enhancing effective nutrients[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2020, 35(6): preclusion.
- [115] 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.
Liu Z. Regularities of content and distribution of zinc in soils of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1994, 27(1): 30–37.
- [116] 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.
- [117] 冯尚善, 崔荣政, 王臣. 我国新型肥料产业发展现状及展望[J]. *磷肥与复肥*, 2020, 35(10): 1–3.
Feng S S, Cui R Z, Wang C. Development status and prospect of new-type fertilizer industry in China[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2020, 35(10): 1–3.
- [118] 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.
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.
- [119] 王超, 杨子明, 焦静, 等. 包膜控释肥及其膜材的研究进展[J]. *高分子通报*, 2020, (9): 37–42.
Wang C, Yang Z M, Jiao J, *et al.* A review of controlled release

- fertilizer and coating materials[J]. *Chinese Polymer Bulletin*, 2020, (9): 37–42.
- [120] 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.
- [121] 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.
- [122] 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.
- Zhang W F, Yi J J, Zhang F S. Annual report of China fertilizer development research 2016[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2017.
- [123] Li T, Lv 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: 10941–10950.
- [124] Niu Y, Ke R, Yang T. pH-responsively water-retaining controlled-release fertilizer using humic acid hydrogel and nano-silica aqueous dispersion[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2020, 20(4): 2286–2291.
- [125] Hill M R, MacKrell E J, Forsthoefel C P. Biodegradable and pH-responsive nanoparticles designed for site-specific delivery in agriculture[J]. *Biomacromolecules*, 2015, 16(4): 1276–1282.
- [126] 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.
- 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.
- [127] 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.
- [128] Katsumi N, Kusube T, Nagao S, Okochi H. Accumulation of microcapsules derived from coated fertilizer in paddy fields[J]. *Chemosphere*, 2021, 267: 129185.
- [129] 隋常玲, 张民. 控释肥硫膜降解对微域土壤性质的影响[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(8): 2050–2058.
- Sui C L, Zhang M. Effects of sulfur-coating residual degradation of controlled-release fertilizers on the soil properties of fertilized microsite[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(8): 2050–2058.
- [130] 武升, 邢素林, 马凡凡, 等. 有机肥施用对土壤环境潜在风险研究进展[J]. *生态科学*, 2019, 38(2): 219–224.
- Wu S, Xing S L, Ma F F, *et al.* Review on potential risk of soil environment from organic fertilizer application[J]. *Ecological Science*, 2019, 38(2): 219–224.
- [131] 杨威, 狄彩霞, 李季, 等. 我国有机肥原料及商品有机肥中四环素类抗生素的检出率及含量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(9): 1487–1495.
- Yang W, Di C X, Li J, *et al.* Detection rate and concentration of tetracycline antibiotics in organic fertilizers raw materials and commercial products in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(9): 1487–1495.
- [132] 骆永明, 周倩, 章海波, 等. 重视土壤中微塑料污染研究防范生态与食物链风险[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(10): 1021–1030.
- Luo Y M, Zhou Q, Zhang H B, *et al.* Pay attention to research on microplastic pollution in soil for prevention of ecological and food chain risks[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(10): 1021–1030.
- [133] Zhang J J, Wang X X, Xue W T, *et al.* Microplastics pollution in soil increases dramatically with long-term application of organic composts in a wheat–maize rotation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 356: 131889.
- [134] The Royal Society. Ammonia: Zero-carbon fertiliser, fuel and energy store[R]. <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/green-ammonia/green-ammonia-policy-briefing.pdf>. [2020].
- [135] Wang F, Harindintwali J D, Yuan Z, *et al.* Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality[J]. *The Innovation*, 2021, 2(4): 100180.
- [136] 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.
- Hou C H, Xu X C, Wang H B, *et al.* Establishment of green fertilizer industrial system and its scientific problems[J]. *China Science Bulletin*, 2015, 60(36): 3535–3542.



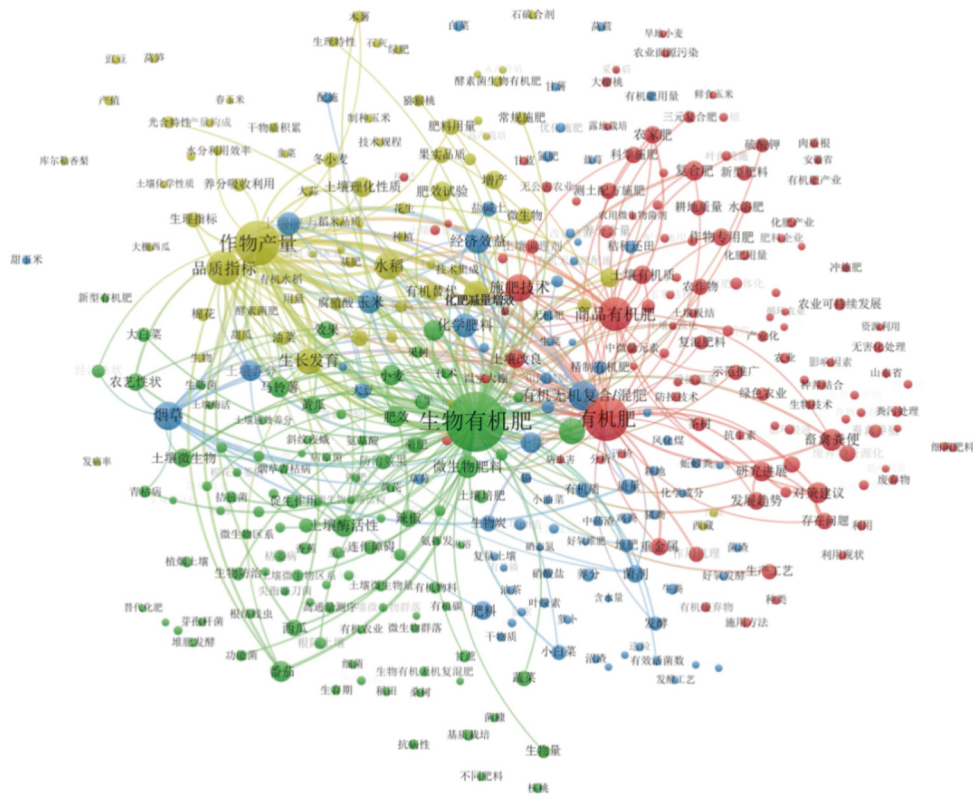
附图 1 我国缓/控释肥相关研究领域聚类网络图

Supplementary figure 1 The clusters and network of research fields related to slow/controlled-release fertilizers in China



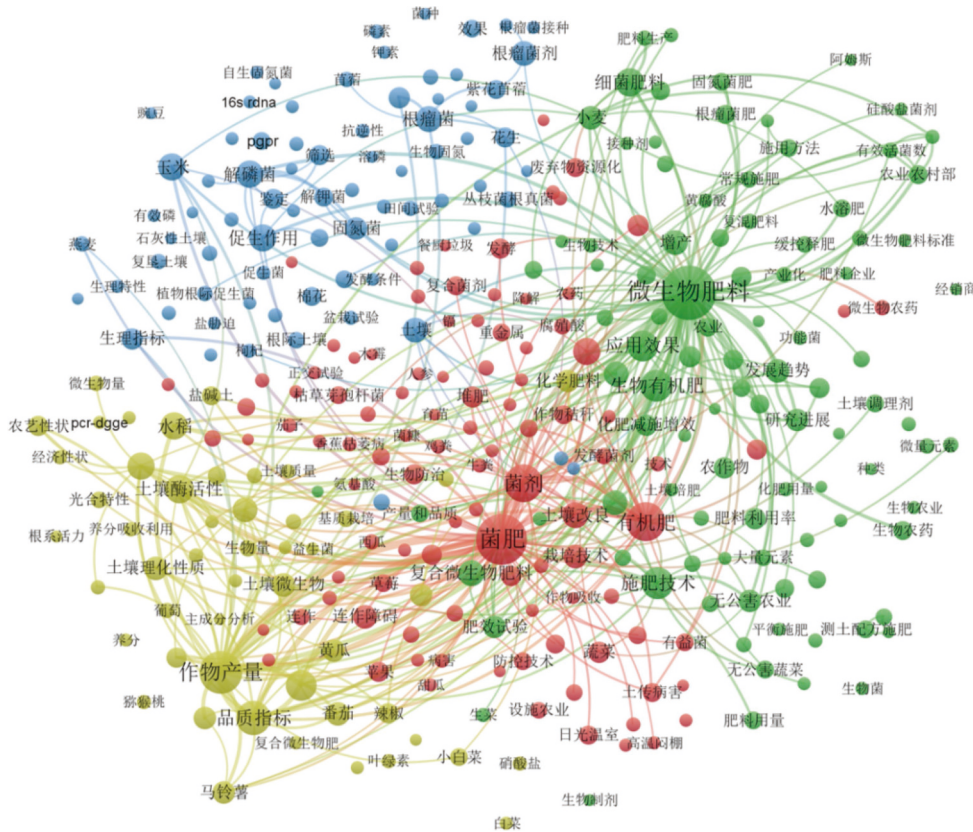
附图 2 我国水溶肥相关研究领域聚类网络图

Supplementary figure 2 The clusters and network of research fields related to water-soluble fertilizers in China



附图 3 我国有机肥相关研究领域聚类网络图

Supplementary figure 3 The clusters and network of research fields related to organic fertilizers in China



附图 4 我国微生物肥料相关研究领域聚类网络图

Supplementary figure 4 The clusters and network of research fields related to bio-fertilizers in China