

我国绿色高效化肥产品创新与产业发展

赵秉强, 袁亮

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 农业农村部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081)

摘要: 绿色高效化肥因其供肥性好、利用率高、有利于协调作物高产施肥环境矛盾的特点, 受到国内外的高度关注。我国绿色高效化肥研发始于 20 世纪 70、80 年代。经过 40 多年的大力研发, 绿色高效化肥已经实现产业化, 年产 2000 万 t, 应用面积达 3300 多万 hm^2 (约 5 亿亩), 作物增产 100 多亿 kg, 节肥 200 多万 t。我国绿色高效化肥依据增产增效机理, 主要有 4 大类: 1) 以包膜技术优化养分释放和供应的包膜缓释肥料; 2) 利用脲酶抑制剂、硝化抑制剂调控氮肥在土壤中转化过程的稳定性肥料; 3) 尿素与醛类物质反应形成缩合物质, 减缓尿素溶解过程的脲醛肥料; 4) 将微量高效生物活性增效载体与化学肥料科学配伍, 通过综合调控“肥料-作物-土壤”系统改善肥效的增值肥料。今后我国绿色高效肥料的发展趋势: 1) “等量增产”/“减量增产”或“减量不减产”; 2) 增效途径向综合调控“肥料-作物-土壤”系统转变, 尤其重视调动作物根系的吸收功能; 3) 赋予肥料产品改善农产品品质、增强作物抗逆能力、保护和改良土壤等多元化功能; 4) 研发和使用具有生物活性, 且安全、环保、可降解的天然/植物源材料; 5) 通过学科交叉融合, 多策略、多机制、多途径提高肥料应用效果; 6) 研发高效肥料与常规肥料装置一体化生产技术, 实现大产能、低成本, 避免二次加工; 7) 在满足养分高效利用的同时, 还应满足集约化农业减少机械作业、轻减施肥的要求。

关键词: 绿色高效肥料; 缓释肥料; 稳定性肥料; 脲醛肥料; 增值肥料

Innovation and industrial development of green efficiency fertilizers in China

ZHAO Bing-qiang, YUAN Liang

(Institute of Agriculture Resource and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences /
Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

Abstract: Green efficiency fertilizers are characterized of controlled nutrient supply, higher nutrient-use efficiency, and low risk of environmental pollution, represent one of the development trends in global fertilizer industry. The research and development of green efficiency fertilizer in China started in 1970s and 1980s, after more than 40 years of rapid development, the green efficiency fertilizer has realized industrialized production. The annual output of green efficiency fertilizers have reached 20 million tons, and applied in more than 500 million mu (33 million hectare) of farmland, increasing crop yield by 10 billion kilograms and saving fertilizer input by 2 million tons. The green efficiency fertilizers in China can be classified into four categories, according to their yield and nutrient efficiency promotion paths: the slow-release fertilizer by controlling nutrient release through coating technology; the stabilized fertilizer by addition of urease inhibitors and/or nitrification inhibitors to regulate urea/N transformation; the urea formaldehyde fertilizer by addition/condensation reaction to form UF slow-release fertilizers to slow down the hydrolysis of urea in soil; and the value-added fertilizer in which bioactive organic synergists were added to coordinate the nutrient supply and absorption in the “fertilizer-crop-soil” system comprehensively. The green efficient fertilizer research and production in the near future should focus on the following aspects: 1) Increase yield with equal or less nutrient input, or maintain yield with less nutrient input. 2)

收稿日期: 2023-05-22 接受日期: 2023-08-28

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目 (2023YFD1700201)。

联系方式: 赵秉强 E-mail: zhaobingqiang@caas.cn

Integrated yield increase function through harmonious “fertilizer-crop-soil” system, at the core of stimulating the root absorption ability. 3) Fertilizers with multiple beneficial functions in crop quality, resistance to stress, conservation and remediation of soil. 4) Research and usage of degradable natural/plant-sourced materials with characteristics of bioactivity, safe to human and environment. 5) Increasing fertilizer efficiencies through the cross amalgamation of multiple disciplines, in multiple ways and mechanisms. 6) Trying to realize the simultaneous production of green efficiency fertilizers with common fertilizers device, to achieve high production capacity in low cost, avoiding the second procession. 7) Meeting the requirement of nutrient supply and simplified fertilization and mechanic operation at the same time.

Key words: green efficient fertilizer; slow-release fertilizer; stabilized fertilizer; urea aldehyde fertilizer; value-added fertilizer

粮食安全是“国之大者”。我国改革开放 40 多年来, 粮食总产由 1978 年的 3.05 亿 t 提高至 2021 年的 6.83 亿 t, 人均粮食产量由 208 kg 提高至 483 kg, 成绩举世瞩目。与此同时, 我国化肥用量由 1978 年的 884 万 t 提高到 2021 年的 5191 万 t, 增长近 6 倍, 粮食单产的 1/2、总产的 1/3 来自化肥的贡献, 化肥成为保障国家粮食安全的战略物质基础。过去 40 年, 我国绿色高效肥料科技创新, 推动化肥产业质量替代数量发展, 为保障作物增产、粮食安全以及协调高产施肥环境矛盾做出了重要贡献。

1 化肥产品创新

从理论上归纳, 化肥产品创新主要包括无效养分有效化和有效养分高效化两个过程^[1]。化肥无效养分有效化产品创新, 目标是将肥料资源中的无效养分形态转化为有效形态, 创制化肥新产品, 为植物提供有效养分; 化肥有效养分高效化产品创新, 目标是化肥产品养分不仅有效、可以被植物吸收利用, 而且要实现高效利用。过去 170 多年, 化肥无效养分有效化产品创新, 推动建立了以合成氨和湿法磷酸为代表的现代化肥产业技术和产品体系, 为世界农业发展和粮食安全做出了巨大贡献。然而, 无效养分有效化产品创新创制的尿素、磷铵、复合肥料等大宗传统产品, 存在损失性、固定性、移动性等性能短板, 效率低, 作物高产须建立在高量施肥基础之上, 高产施肥的环境矛盾突出。进入 20 世纪 50 年代以后, 化肥有效养分高效化产品创新日益受到重视, 其通过优化产品的养分释放、转化、移动, 减少养分损失和固定退化, 改善肥际和土壤环境, 调动根系的吸收功能等技术途径, 创制高效化肥新产品, 实现有效养分高效利用, 理论、产业技术和产品体系不断丰富和发展。

2 我国绿色高效化肥产品类型与产业发展

国外绿色高效化产品创制和产业化研究主要是从 20 世纪 60、70 年代开始的, 代表性产品有包膜缓释肥料、生化抑制稳定性肥料、合成微溶脲醛肥料等^[2]。我国从 20 世纪 70、80 年代开始研究长效碳铵、硝化/脲酶抑制剂及包裹型缓释肥料等高效化肥产品^[3-5], 但真正开始大量研究还是 20 世纪 90 年代以后的事情, 尤其是进入 2000 年以后, 包膜缓释肥料、包裹型肥料、稳定性肥料、脲醛肥料等在我国陆续实现产业化, 并在农业生产中逐渐发挥重要作用^[6]。2000 年以后, 我国发明增值肥料^[1], 经过 20 多年的发展, 打通了增值肥料理论-技术-产品-工艺-标准-推广产业链条, 形成增值肥料新产业。

根据增效原理、技术策略和产业途径的不同, 目前已经实现产业化的绿色高效化肥产品主要分为 4 大类型。

2.1 包膜缓释肥料

包膜缓释肥料主要以包膜技术方式, 通过优化化肥养分的释放和供应模式来改善肥效。控制养分释放的包膜材料主要有树脂、硫磺、枸溶性肥料和有机质材料等; 包膜的核心肥料通常为速溶性大颗粒尿素, 速溶性复合肥、钾肥等亦可作为核心, 制备相应的包膜缓释肥料, 但远不及包膜尿素普遍。

包膜缓释肥料 20 世纪 50 年代起源于欧美发达国家。我国从 20 世纪 70 年代开始研究包膜缓释肥料, 发展历程可分为 3 个阶段。第一阶段从 20 世纪 70 年代初到 80 年代初, 是缓释肥料探索起步阶段。开展的主要工作是探索研究和开发长效碳铵等缓释肥产品; 第二阶段从 20 世纪 80 年代到 2000 年, 是缓释肥料探索发展阶段, 缓释肥料开始实现小规

模产业化。开发的产品主要包括郑州大学研制的 Luxacote 包裹型缓释肥料和北京市农林科学院研制的热塑性树脂包衣缓释肥料等。1983 年开始, 郑州工学院许秀成等率先利用营养材料研究和开发了系列包裹型缓释肥料, 先后研制出钙镁磷肥包裹尿素(1983)、磷矿粉部分酸化包裹尿素(1991)、二价金属磷酸铵钾盐包裹尿素(1995) 3 类升级换代产品, 养分控制释放时间超过了 95 天, 突破了国内外营养材料包膜养分释放控制难度大的关键技术。建成年产万 t 生产能力的产业化生产线, 产品注册品牌为 Luxacote, 已出口美国、澳大利亚、新加坡、日本等国家, 成为国际知名缓释肥料品牌, 1999 年被《Fertilizer International》(国际肥料) 誉为“中国的首创—未来的肥料”。树脂包膜缓释肥研制, 起初, 我国主要借鉴日本经验。1992 年开始, 北京市农林科学院徐秋明等, 在国内率先系统开展了树脂包膜尿素研究。在借鉴日本技术的基础上, 在溶剂、包衣材料、设备等方面, 均有较大的改进和突破。研究筛选出低毒溶剂, 溶剂回收率 98% 以上; 包衣材料选用廉价的聚丙烯酰胺, 并进行降解改性; 建成年产能力 3000 t 的树脂包衣尿素生产线, 生产出养分控释期 30~200 天乃至更长时间的系列包衣尿素, 产品养分释放模型分为线型和“S”型, 产品于 2002 年获得国家重点新产品证书。第三阶段 2000 年以后, 是缓释肥料快速发展阶段。国家将新型肥料发展列入《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》, 科技部从“十五”计划开始, 通过 863 计划、科技支撑计划和重点研发计划等立项, 持续资助研发缓释肥料、专用复合肥料等绿色高效肥料, 极大地推动了我国绿色高效化肥产品创新发展, 使中国成为新型肥料研究的全球热点。缓释肥料各种包膜工艺不断创新, 无论是聚合物反应成膜还是溶剂型淀积成膜工艺, 都实现了连续化生产, 产能大幅度提高, 单套装置年产能超过万 t 乃至 5 万 t 以上, 树脂包膜尿素、硫包衣尿素、肥料包裹型缓释肥料等大面积实现产业化。我国的缓释肥料主要针对大田作物应用, 在玉米上率先实现缓释肥料一次性施肥, 在水稻、冬小麦上利用缓释肥料一次性施肥技术也取得了重要进展。我国目前的包膜缓释肥料技术经过引进、集成和创新, 整体上已经达到国际先进水平, 在缓释肥料大田作物应用技术领域达到国际领先水平。

在借鉴国外缓释肥料性能指标要求和测试方法的基础上, 我国制定和发布实施了树脂包衣缓释肥

料(HG/T 4215—2011, GB/T 23348—2009)、硫包衣尿素(HG/T 3997—2008, GB/T 29401—2012)、包裹型缓释肥料(HG/T 4217—2011) 化工行业标准或国家标准, 并制定了控释肥料(ISO 18644—2016) 和硫包衣尿素(ISO 17323—2015) 国际标准。农业农村部制定了缓释肥料登记要求的农业行业标准(NY 2267—2012), 并将缓释肥料作为新肥料产品纳入登记管理。目前, 我国树脂包膜尿素、硫包衣尿素、肥料包裹型缓释肥料、有机质包膜缓释肥料的年产量分别达到 60 万、10 万、15 万和 10 万 t, 总产量近百万 t, 缓释肥料通过掺混等形式进入大田施用, 每年应用面积约 330 万 hm^2 , 作物增产 8~10 亿 kg, 节约氮肥 3~5 万 t。绿色天然包膜材料筛选、改性及应用, 养分释放模式优化及精准、智能调控, 生产技术大产能、低成本、连续化、自动化控制, 产品与规模化大田作物应用场景匹配, 成为包膜缓释肥料未来发展的技术趋势。

2.2 稳定性肥料

稳定性肥料是指经过一定工艺向肥料中加入脲酶抑制剂和(或)硝化抑制剂, 施入土壤后能通过脲酶抑制剂抑制尿素的水解, 和(或)通过硝化抑制剂抑制铵态氮的硝化, 使肥效期得到延长的一类含氮肥料(包括含氮的二元或三元肥料和单质氮肥)^[7]。脲酶抑制剂主要通过抑制土壤脲酶的活性, 减缓尿素在土壤中的水解速率, 降低土壤中铵离子的浓度和氨的分压, 减少氨挥发损失; 硝化抑制剂主要是抑制亚硝化细菌的活性, 减缓铵离子(NH_4^+)向硝态氮(NO_3^-)的转化速度, 减少反硝化过程中温室气体(N_2O 和 NO)的排放, 减低硝酸盐(NO_3^-)的淋失风险。

国外从 20 世纪 50 年代开始开发脲酶/硝化抑制剂类产品, 应用广泛的脲酶抑制剂类产品主要有氢醌(HQ)、N-丁基硫代磷酸三胺(NBPT)等, 硝化抑制剂类产品主要为双氰胺(DCD)、3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)等^[2]。我国从 20 世纪 60 年代开始重视研究稳定性肥料, 中国科学院南京土壤研究所率先开展了硝化抑制剂的研究。之后, 中国科学院沈阳应用生态研究所从 20 世纪 70 年代开始研究氢醌(HQ)作为脲酶抑制剂如何提高氮肥利用率, 在盘锦化肥厂、大庆化肥厂等通过添加脲酶抑制剂生产稳定性尿素, 并且应用到大田作物上^[8]。特别是进入 2000 年以来, 中国科学院沈阳应用生态研究所开发出一批新型脲酶抑制剂和硝化抑制剂, 应用在尿素、复合(混)肥中, 生产稳定性肥料, 大面积实现

了产业化,并且制定了《稳定性肥料》化工行业标准(HG/T 4135—2010)和国家标准(GB/T 35113—2017),规范了相关定义术语,统一了检验方法,从而规范了稳定性肥料市场,标志着我国稳定肥料产业的发展步入了一个新的阶段。目前全国已有50余家化肥企业从事稳定性肥料生产和推广,年产量达到200多万t,应用面积超过约333万hm²(5000万亩),作物增产10亿kg,节约氮肥6~8万t。稳定肥料未来技术趋势,一是开发廉价、绿色、高效、性能稳定的脲酶抑制剂和硝化抑制剂;二是解决生化抑制剂与肥料产品和工艺结合后的性能衰减问题;三是提高稳定性肥料产品在不同类型土壤、气候条件下效果的稳定性;四是探索稳定性肥料产品走向作物专用高效化的技术途径。

2.3 脲醛类肥料

脲醛类肥料是尿素与醛类的缩合物,主要有脲甲醛(UF)、异丁叉二脲(IBDU)、丁烯叉二脲(CDU)等,其中最常见的是脲甲醛(UF)。脲醛类肥料的溶解性较尿素显著降低,具有缓效长效性,有利于减少氮的损失。在我国,将脲醛类肥料称作脲醛缓释肥料(urea aldehyde slow release fertilizer)(HG/T 4137—2010、GB/T 34763—2017),定义为由尿素和醛类在一定条件下反应制得的有机微溶性氮缓释肥料。

国际上,德国于1924年Badische Anilin和Soda-Fabrik AG取得了第一个制造脲醛肥料的专利,1955年投入工业化生产。德国1924年发表了用乙醛和尿素制备丁烯叉二脲(CDU)的专利,1962年完成肥料制备流程。日本三菱株式会社于1961—1962年提出了尿素和异丁醛反应制备异丁叉二脲(IBDU)的专利,1964年开始,在日本市场上有少量脲醛肥料销售。在20世纪90年代初期以前,世界缓/控释肥料仍以微溶性尿素反应物为主,占到50%以上。欧洲传统使用微溶性含氮化合物缓释肥料,其比例占到缓/控释肥消费量的70%以上。该类肥料因养分释放速度受土壤水分、pH、微生物等因素的影响较大,且售价高,主要用于草坪、苗圃、庭园绿化等非农领域,在大田作物上应用较少。我国对脲醛肥料的研究始于20世纪70年代。早在1971年前后,中国科学院南京土壤研究所采用脲醛树脂为材料,制得了少量包膜肥料样品,但之后发展不快。20世纪90年代,研究者又重新开始审视发展脲醛肥料的意义^[9-10],尤其进入2000年以后,随着国内新型肥料研

发热潮的到来,脲醛类肥料研发进入快车道。2008年7月,原化工部经济技术委员会化肥组组长任宏业与许秀成、林葆等国内化工、农业专家,共同向国家提出“关于发展化肥工业,提高我国粮食增产潜力的建议”,建议中提出增加脲甲醛生产装置,发展脲甲醛缓释肥料^[11-12]。2009年6月25日,中国化工信息中心组织国内部分专家,针对脲醛类肥料在中国未来研究和发展作了专题研讨。与会专家肯定了脲醛肥料的作用效果,但要将其应用于大田作物上,价格问题是重要的制约因素^[12]。因此,结合大田作物的需肥规律,建议将脲甲醛部分替代尿素或其他水溶性氮源,形成速缓相济的供氮模式,既满足作物对氮素缓释长效的需求,也利于降低肥料价格。例如,日本三井东压肥料生产的UF尿素组合、硫酸钾、磷铵复合肥料17-17-13,其中9%的N由UF提供,用作水稻基肥;北京海依飞科技公司及郑州乐喜施磷复肥技术研究推广中心以UF全部或部分代替尿素生产的高利用率根际肥、大粒化成肥、包裹型复合肥,分别出口马来西亚、日本、澳大利亚,用于油棕种植、蔬菜及花卉栽培^[12]。日本住商肥料(青岛)有限公司在中国农业市场推广以脲甲醛为缓释剂的复合肥料。我国发布了《脲醛缓释肥料》化工行业标准(HG/T 4137—2010)和国家标准(GB/T 34763—2017),适用于由尿素和醛类反应制得的脲甲醛(UF/MU)、异丁叉二脲(IBDU)和丁烯叉二脲(CDU),也适用于肥料中掺有一定量脲醛缓释肥料的脲醛缓释氮肥、脲醛缓释复合肥料、脲醛缓释掺混肥料。在此基础上,制定了《固态脲醛缓释肥料》国际标准(ISO 19670—2017)。目前,我国各类脲醛肥料年产量约20万t,以脲醛缓释复合肥料或掺混肥料为主,每年应用约33万hm²(500万亩),作物增产0.5~1.0亿kg,节约氮肥0.5万t。根据区域特点、作物类型开发专用型脲醛类肥料,研究脲醛类肥料与其他肥料的配伍增效技术,降低脲醛肥料的生产成本和价格是未来技术趋势。

2.4 增值肥料

增值肥料是利用载体增效制肥技术,将微量高效生物活性增效载体与化学肥料科学配伍,通过综合调控“肥料—作物—土壤”系统改善肥效的一类高效产品(可简称为含微量有机生物活性增效载体的一类高效肥料)。增值肥料是继缓/控释肥料、稳定性肥料、脲醛类肥料之后发明的新一代绿色高效肥料产品类型。

增值肥料属于中国发明^[1]。针对高效肥料普遍存在二次加工、产能低、成本高、产业化推广难度大等问题,从2000年开始,中国农业科学院新型肥料团队致力于利用腐植酸、海藻提取物、氨基酸等天然/植物源材料,开发绿色安全、高生物活性、肥料专用型增效载体,载体微量添加(5%左右)至常规化肥中,即可实现对“肥料-作物-土壤”系统的高效综合调控,大幅度改善肥效,开辟了生物活性载体增效制肥技术新途径,发明增值肥料新技术。研发的系列生物活性增效载体、增值肥料产品及其制备技术获30多项发明专利授权,形成增值肥料专利群^[13-19],并获得了5项中国专利优秀奖。增值肥料的主要技术特点:1)生物活性载体增效制肥。增值肥料利用环保安全的有机生物活性增效载体与肥料科学配伍制备高效化肥产品;2)增效载体绿色环保安全。增值肥料的增效载体主要由腐植酸类、海藻提取物、氨基酸类、糖类天然/植物源材料制成,绿色安全,不对植物、土壤、环境造成危害和产生负面影响;3)综合调控“肥料-作物-土壤”系统增效。增值肥料从系统角度出发,除了调控肥料减损失、防固定和优化供肥性外,还重视促根和调动根系吸收养分的能力,并对大中微量元素综合调控,活化土壤中的营养元素;4)生物活性增效载体微量高效。增效载体具有高生物活性,在肥料中的添加量一般为5%(有效成分)左右,基本不影响肥料的养分含量;5)增值肥料与大型化肥生产装置结合一体化生产。增值肥料利用微量高效载体增效制肥技术,与尿素、磷铵、复合肥等大型化肥生产装置结合一体化、大产能、低成本生产,避免二次加工,突破了高效肥料普遍存在的产能低、成本高的产业化技术短板。

增值肥料的发明改变了过去单纯依靠调控肥料营养功能改善肥效的技术策略,开启了“肥料-作物-土壤”系统综合调控增效的技术新途径,为推动我国尿素、磷铵、复合肥大宗化肥产业绿色转型升级提供产品和产业技术支撑。2011年3月20日,锌腐酸增值尿素、海藻酸增值尿素、聚合谷氨酸增值尿素在瑞星集团大型尿素装置上实现产业化,同年11月1日,瑞星集团股份有限公司在山东省质量技术监督局备案了我国第一个增值尿素企业标准《海藻液改性尿素》(Q/3700DRX 002—2011)。2012年12月5日,化肥增值产业技术创新联盟在北京成立,推动增值肥料产业化步入快车道,联盟的成立载入了中国氮肥工业发展60周年大事记(1958—2018)。

2012年5月,增值复合肥技术在中农舜天应用并实现产业化;2013年3月,在中海化学湖北大峪口化工有限责任公司30万t/年磷铵装置上首次成功实现了锌腐酸增值磷铵产业化;2014年5月,锌腐酸增值复合肥料在吴华骏化集团年产20万t高塔生产装置上实现产业化;2015年7月20日,腐植酸、海藻酸、氨基酸增值肥料被列入工业和信息化部《关于推进化肥行业转型发展的指导意见》(工信部原〔2015〕251号),增值肥料发展上升为国家战略。2015年12月,江西开门子肥业股份有限公司海藻酸增值复合肥料在年产20万t大型高塔生产装置上实现产业化;2017年5月,海藻酸增值磷铵在贵州开磷集团股份有限公司年产20万t磷铵装置上实现产业化;2017年1月22日至3月7日,云南水富云天化有限公司产能80万t/年的大型尿素装置上实现10万t锌腐酸增值尿素连续不间断生产,创造增值尿素一次性不间断生产最高产量的世界纪录,载入中国氮肥工业发展60周年大事记(1958—2018)。2017年4月1日,含腐植酸尿素(HG/T 5045—2016)、含海藻酸尿素(HG/T 5049—2016)、海藻酸类肥料(HG/T 5050—2016)、腐植酸复合肥料(HG/T 5046—2016)4项增值肥料国家化工行业标准正式实施;2020年1月1日,含腐植酸磷酸一铵、磷酸二铵(HG/T 5514—2019)、含海藻酸磷酸一铵、磷酸二铵(HG/T 5515—2019)2项增值磷铵产品国家化工行业标准正式实施;2022年4月1日,肥料增效剂-腐植酸(HG/T 5931—2021)及肥料增效剂-海藻酸(HG/T 5932—2021)2项增值肥料增效载体产品国家化工行业标准正式实施。系列增值肥料国家行业标准的发布实施,标志着增值肥料形成新产业。化肥绿色增值技术入选中国农业农村十大新技术(2021)。

迄今,增值肥料在中海化学、中化化肥、宜化集团、瑞星集团、开门子肥业、骏化集团、云天化、贵州磷化集团、安徽六国化工等国内数十家大型企业实现产业化,我国增值肥料年产量达1500万t,居全球之首^[20];形成了系列增值肥料知名品牌(锌腐酸、聚氨锌、天野、金沙江、大黑牛、力普加、黑力旺、东平湖等增值尿素,美麟美、翔燕、富岛、开磷海藻酸、锌硼酸等增值磷铵,聚安锌、开门子海藻酸、恩宝海藻酸、六国安锌、骏化锌腐酸等增值复合肥料);增值肥料年推广应用2600多万hm²,作物增产80多亿kg,农民增收150亿元,增值肥料已经成为全球产量最大的绿色高效肥料产品类型,为我国化肥减施增效、农业高质量绿色发展做出了

重要贡献。以增值肥料为核心的黄淮海小麦玉米绿色肥料减排减碳增产技术入选农业农村部粮油生产主推技术(2022)。增值肥料未来技术趋势,一是提升产品与区域“土壤-作物-气候”农田应用场景的匹配性,使增值肥料产品由通用型走向专用高效化;二是建立安全化、标准化、大产能增值肥料生产技术,使产业技术由依靠经验走向标准化;三是建立产品-生产-施用全产业链绿色评价和标准体系,促进增值肥料产业绿色健康发展。

3 绿色高效化肥技术趋势

推动绿色高效化肥产业技术升级发展,需要从增效理论、产品创制、产业技术、产品应用等领域开展系统性创新研究,未来技术趋势:

1) 绿色增产。高效肥料较常规肥料“等量增产”/“减量增产”或“减量不减产”,利于协调作物高产施肥的环境矛盾。作物增产既是化肥产品创新的目标,也是实现产品养分高效利用的途径。增产与肥料高效利用是同步和统一的,养分高效利于作物增产,作物增产又促进了对肥料养分的高效利用,二者相辅相成、互为前提。绿色肥料增产才能增效、增产拉动增效、增产就能增效。

2) 增效途径综合化。高效肥料产品创制由过去单一调控肥料营养功能增效的技术策略,向综合调控“肥料-作物-土壤”系统增效的策略转变,尤其重视调动作物根系的吸收功能,更大幅度提高肥料利用率。

3) 产品功能多元化。化肥有效养分高效化产品创新,重视赋予肥料新产品改善农产品品质,增强作物抗逆能力,保护和改良土壤等功能,提升功能与改善肥效是协调统一的。

4) 增效材料绿色化。研发增效材料是创制绿色高效肥料的重要环节,重视利用具有生物活性、安全、环保、可降解的天然/植物源材料在高效肥料创制所需膜材料、增效材料中的应用,是重要趋势。

5) 学科交叉融合。产品创新需要融入更多的增效技术策略,学科交叉融合的重要性日益凸显。通过工科与农科结合,化学、化工、材料融合,吸收栽培、育种、植保、生理、信息、生物技术等领域的知识,使产品创新实现多策略、多机制、多途径综合调控增效,显著提升产品效果。

6) 大产能、低成本生产。为避免二次加工、产能低、成本高的技术短板,高效肥料与常规肥料大

型生产装置相结合一体化生产,实现大产能、低成本,加速成果转化,成为绿色高效肥料产业化技术的重要趋势。

7) 重视满足农业生产对高效产品性能的多样化需求。绿色肥料在满足养分高效利用的同时,还应满足种肥同播不烧苗,一次性施肥不脱肥,管道化施肥溶解快,蔬菜种植肥效快,机械化施用不堵管等肥料施用中的一些重要技术需求。另外,绿色肥料还应满足机械化收获作业对作物抗倒伏、集中成熟等特殊需求,以及农产品着色、货架寿命等商品性需求。

总之,发展绿色高效肥料,以绿色增产为总目标,通过多学科交叉、多策略集成、多途径调控,实现产品功能化、高效化、绿色化,满足农业生产的多样化需求,为推动农业绿色发展做贡献。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Trenkel M E. Slow-and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient efficiency in agriculture (second edition)[M]. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010.
- [3] 许秀成,李荫萍,王好斌. 包裹型缓释/控制释放肥料专题报告[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.
- [4] 赵秉强,张福锁,廖宗文,等. 我国新型肥料发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 536-545.
Zhao B Q, Zhang F S, Liao Z W, *et al*. Research on development strategies of fertilizer in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2004, 10(5): 536-545.
- [5] 赵秉强. 新型肥料[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Zhao B Q. New fertilizer[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [6] 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.
- [7] 武志杰,等. 稳定性肥料[A]. 赵秉强. 新型肥料[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Wu Z J, *et al*. Stable fertilizer[A]. Zhao B Q. New fertilizer[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [8] 武志杰,陈利军. 缓释/控释肥料: 原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Wu Z J, Chen L J. Slow release/controlled release fertilizers: Principles and applications[M]. Beijing: Science Press, 2003.

- [9] 田玉. 脲甲醛缓释氮肥的进展[J]. 四川教育学院学报, 1995, 11(2): 108-111.
Tian Y. Progress of urea formaldehyde slow-release nitrogen fertilizer [J]. Journal of Sichuan College of Education, 1995, 11(2): 108-111.
- [10] 郭振铎, 于曦, 刘彤, 等. 高效缓释化肥甲醛脲[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 1998, 18(4): 41-44.
Guo Z D, Yu X, Liu T, *et al.* High efficiency slow-release fertilizer formaldehyde urea[J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 1998, 18(4): 41-44.
- [11] 伍宏业, 许秀成, 林葆, 等. 关于发展化肥工业, 提高我国粮食增产潜力的建议[J]. 化学工业, 2009, 27(8): 13-18.
Wu H Y, Xu X C, Lin B, *et al.* Increasing China grain yield by developing fertilizer industry[J]. Chemical Industry, 2009, 27(8): 13-18.
- [12] 许秀成, 李葭萍, 王好斌. 脲甲醛肥料在我国发展的可行性[J]. 磷肥与复肥, 2009, 24(6): 5-7.
Xu X C, Li D P, Wang H B. The feasibility of development for urea-formaldehyde fertilizers in China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2009, 24(6): 5-7.
- [13] 赵秉强, 李燕婷, 李秀英, 等. 双控复合型缓释肥料及其制备方法: 中国, ZL200510051250.9[P]. 2006-09-06.
Zhao B Q, Li Y T, Li X Y, *et al.* Double-controlled compound slow-release fertilizer and its preparation method: China, ZL200510051250.9 [P]. 2006-09-06.
- [14] 赵秉强, 李燕婷, 林治安, 等. 一种腐植酸复合缓释肥料及其生产方法: 中国, ZL200810239733.5[P]. 2009-05-13.
Zhao B Q, Li Y T, Lin Z A, *et al.* A kind of humic acid compound slow-release fertilizer and its production method: China, ZL200810239733.5 [P]. 2009-05-13.
- [15] 袁亮, 赵秉强, 李燕婷, 等. 一种海藻增效尿素及其生产方法与用途: 中国, ZL201110402369.1[P]. 2012-06-27.
Yuan L, Zhao B Q, Li Y T, *et al.* A seaweed-enhanced urea and its production method and application: China, ZL201110402369.1[P]. 2012-06-27.
- [16] 袁亮, 赵秉强, 李燕婷, 等. 一种发酵海藻液肥料增效剂及其生产方法与用途: 中国, ZL201210215693.7[P]. 2012-10-03.
Yuan L, Zhao B Q, Li Y T, *et al.* A kind of fermented seaweed liquid fertilizer booster and its production method and application: China, ZL201210215693.7[P]. 2012-10-03.
- [17] 赵秉强, 袁亮, 李燕婷, 等. 一种腐植酸尿素及其制备方法: 中国, ZL201210086696.5[P]. 2013-10-23.
Zhao B Q, Yuan L, Li Y T, *et al.* A kind of humic acid urea and its preparation method: China, ZL201210086696.5[P]. 2013-10-23.
- [18] 袁亮, 李燕婷, 赵秉强, 等. 一种聚合氨基酸肥料助剂及其制备方法: 中国, ZL20140027295.1[P]. 2014-05-14.
Yuan L, Li Y T, Zhao B Q, *et al.* A polymeric amino acid fertilizer auxiliary and its preparation method: China, ZL20140027295.1[P]. 2014-05-14.
- [19] 赵秉强, 袁亮, 李燕婷, 等. 一种腐植酸增效磷铵及其制备方法: 中国, ZL201310239009.3[P]. 2013-09-04.
Zhao B Q, Yuan L, Li Y T, *et al.* A kind of humic acid-enhanced ammonium phosphate and its preparation method: China, ZL201310239009.3[P]. 2013-09-04.
- [20] 新华社. 我国增值肥料产量居全球之首[EB/OL]. (2020-01-11). https://www.gov.cn/xinwen/2020-01/11/content_5468347.htm
Xinhua News Agency. China's value-added fertilizer production number one in the world [EB/OL]. (2020-01-11). https://www.gov.cn/xinwen/2020-01/11/content_5468347.htm