



# 绿色肥料缘起、现状与发展趋势

武志杰<sup>1,2</sup>✉, 张丽莉<sup>1,2</sup>, 石元亮<sup>1,2</sup>, 魏占波<sup>1,2</sup>, 李东坡<sup>1,2</sup>, 宫平<sup>1,2</sup>, 李杰<sup>1,2</sup>, 张蕾<sup>1,2</sup>, 王玲莉<sup>1,2</sup>, 武开阔<sup>1,2</sup>, 薛妍<sup>1,2</sup>, 宋玉超<sup>1,2</sup>, 崔磊<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; <sup>2</sup>中国科学院绿色肥料工程实验室, 沈阳 110016; <sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**“创新、协调、绿色、开放、共享”的新发展理念是“十四五”乃至更长时期内我国发展思路、方向和着力点的集中体现。农业的绿色发展是贯彻新发展理念的重要环节,对形成人与自然和谐共生、保障食品安全和营造宜居环境均具有重要的作用。肥料作为最大的外源投入品和生产资料,对农产品数量、质量和农业生态环境作用巨大,影响深远,在农业绿色发展中具有举足轻重的地位。然而传统肥料的不合理施用造成了土壤质量退化、环境污染、农产品品质下降等问题,迫切需要肥料产品的转型和升级,绿色投入品的研制应运而生,而“绿色肥料”也在这个大背景下被提出。绿色肥料概念或定义:应用质量安全原料,低碳环保工艺,采用物理-化学-生物改性增效技术生产和使用的,具有养分高效均衡、减排环保、培肥地力沃土功能的一类肥料。绿色肥料种类主要分为以下五类:养分高效型绿色肥料;固碳培肥型绿色肥料;增效及提高养分转化效率型绿色肥料;养分均衡型绿色肥料;增值型绿色肥料。如何实现化肥的绿色转型、有机肥资源高效低成本利用,主要有四方面建议。(1)依靠市场机制,加强顶层设计,构建肥料绿色制造新体系;(2)以养分资源综合管理为核心,促进有机-大量元素-中微量元素肥料平衡协调发展;(3)充分发挥科研平台作用,大力发展智能化绿色肥料产品;(4)融合现代传感和信息技术,全面推进绿色高效的精准施肥。本文就绿色肥料提出的背景、概念和内涵、种类、特征进行概述,并对未来发展方向进行探讨,以期对今后我国肥料产业的绿色转型和农业的绿色发展提供借鉴。

**关键词:** 绿色肥料; 养分均衡; 培肥土壤; 环境友好

## Origin, Present Situation and Development Trend of Green Fertilizer

WU ZhiJie<sup>1,2</sup>✉, ZHANG LiLi<sup>1,2</sup>, SHI YuanLiang<sup>1,2</sup>, WEI ZhanBo<sup>1,2</sup>, LI DongPo<sup>1,2</sup>, GONG Ping<sup>1,2</sup>, LI Jie<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, WANG LingLi<sup>1,2</sup>, WU KaiKuo<sup>1,2</sup>, XUE Yan<sup>1,2</sup>, SONG YuChao<sup>1,2</sup>, CUI Lei<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016; <sup>2</sup>Engineering Laboratory for Green Fertilizers, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016; <sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract:** The new development concept of "innovation, coordination, green, openness and sharing" is the centralized reflection of China's development concept, direction and focus in the 14th Five-Year Plan and even in the longer term. The green development of agriculture is an important part of the implementation of the new development concept, which plays an important role in forming a harmonious coexistence between human beings and nature, ensuring food safety and creating a livable environment. Fertilizer, as the largest exogenous input and production material, plays a significant role and has a profound impact on the quantity and quality of agricultural products and the agricultural ecological environment, and plays a pivotal role in the green development of agriculture. However, the improper application of traditional fertilizers has caused the degradation of soil quality, environmental pollution and

收稿日期: 2022-05-13; 接受日期: 2022-08-26

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA28090200)、兴辽英才计划高水平创新团队项目(XLYC2008019)、国家自然科学基金(31971531)、辽宁省揭榜挂帅项目(2021JH1/10400039)、王宽诚率先人才计划“产研人才扶持项目”(2022-5)

联系方式: 武志杰, E-mail: wuzj@iae.ac.cn

degradation of agricultural products, which urgently requires the transformation and upgrading of fertilizer products, and the development of green inputs has come into being. Green fertilizer concept and definition is: the application of quality and safety of raw materials, low-carbon environmental protection process, the use of physical - chemical - biological modification and efficiency technology production and use, with efficient and balanced nutrients, emission reduction and environmental protection, fertilization of fertile soil function of a class of fertilizers. The types of green fertilizers are mainly divided into the following five categories: nutrient-efficient green fertilizers, carbon-fixing and fertilizing green fertilizers, efficiency-enhancing and nutrient conversion efficiency green fertilizers, nutrient-balanced green fertilizers, and value-added green fertilizers. How to realize the green transformation of chemical fertilizers and the efficient and low-cost utilization of organic fertilizer resources? there are four main suggestions: (1) Rely on market mechanisms, strengthen top-level design, and build a new system of green fertilizer manufacturing; (2) Take the integrated management of nutrient resources as the core, and promote the balanced and coordinated development of organic-mass-element-micro-element fertilizers; (3) Fully play the role of scientific research platforms, and greatly develop intelligent green fertilizer products; (4) Integrate modern sensing and information technology to thoroughly promote green and efficient precision fertilization. This paper provided an overview of the background, concept, types and characteristics of green fertilizers proposed, and discussed the future development direction, in order to provide insight into the green transformation of China's fertilizer industry and the green development of agriculture in the future.

**Key words:** green fertilizer; nutrition balance; soil fertility improving; environmental friendly

## 1 绿色肥料提出的背景

肥料是一种重要的农业生产资料，是关乎粮食安全、生态安全与资源可持续利用等重大国计民生问题的战略物资。20 世纪以来，粮食单产的 1/2、总产的 1/3 来自于肥料的贡献，肥料在保障我国粮食安全上发挥着重要且不可替代的作用<sup>[1]</sup>。但传统肥料只关注作物所需大量养分（尤其氮素）的供给，长期大量的传统肥料不合理施用造成了土壤质量退化、环境污染、农产品品质下降等一系列问题<sup>[2]</sup>。解决这些问题需要肥料产品的转型和升级，需要肥料在满足作物生长营养需求的基础上，同时具有培肥地力、减少环境污染、保证农产品品质的功效。其核心和实质在于调控产品中养分的去向，使其更多地被作物吸收、留在土壤养分库容中，从而减少向环境中的释放<sup>[3-4]</sup>。

据 2021 年中国统计年鉴 (<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2021/indexch.htm>) 显示，1978 年以来我国农用化肥施用量快速增加，2015 年农用化肥施用量达到顶峰，从年施用量 884 万吨增加至 6 022.6 万吨，之后农业农村部组织开展化肥使用量零增长行动，化肥使用量逐年下降，2020 年农用化肥施用量减少至 5 250.7 万吨，氮肥、磷肥和钾肥施用量快速下降，而复合型肥料的施用量逐年上升，占比增加。20 世纪，美国、欧洲各国以及日本等发达国家，也经历了一个化肥施用量不断增加而后下降的过程。如美国，在 20 世纪 70 年代以前化肥用量和粮食产量快速增长，环境污染加剧，农村供水硝态氮超标率 6%，之后采取了精准

施肥技术、施肥装备智能化（3S 技术）、施肥管理法制化、开发缓控释肥料等一系列措施，实现化肥用量零增长，同时环境污染得到有效改善。

20 世纪 90 年代，欧洲、加拿大、日本、美国相继出现“环境标志计划行动”，在全面评价企业的环境表现时，将资源利用、资源再使用、人类健康与安全、环境负荷、可持续性指标的得分值以颜色表示，以“绿色”代表环境评价得分最高，这是绿色理念提出的国际背景<sup>[5]</sup>。2015 年 10 月 29 日，习近平在党的十八届五中全会第二次全体会议上的讲话鲜明提出了“创新、协调、绿色、开放、共享”的新发展理念。新发展理念符合我国国情，顺应时代要求，对破解发展难题、增强发展动力、厚植发展优势具有重大指导意义。绿色发展注重的是解决人与自然和谐问题。我国资源约束趋紧、环境污染、生态系统退化的问题十分严峻，人民群众对清新空气、干净饮水、安全食品、优美环境的要求越来越强烈。为破解经济发展与环境质量相矛盾的难题，绿色投入品的研制应运而生，而“绿色肥料”也在这个大背景下被提出。

## 2 绿色肥料的定义和内涵

目前，国内外明确提出绿色肥料的定义和概念的文章尚不多见。浙江大学黄立章认为：绿色肥料又称环境友好型肥料或环境协调型肥料，其可理解为：利用现代技术来设计和生产能够最大限度减少肥料对人类健康的危害、减轻环境污染而又能维持相对高的农产品质量和品质的肥料品种。它必须满足最少资源和

能源消耗、最轻环境污染且具有最大的养分可循环利用特征<sup>[6]</sup>。张福锁院士提出了绿色智能肥料的概念,他认为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、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。绿色肥料种类主要分为以下五类:1、养分高效型绿色肥料;2、固碳培肥型绿色肥料;3、增效及提高养分转化效率型绿色肥料;4、养分均衡型绿色肥料;5、增值型绿色肥料。

绿色肥料产业体系是在肥料的原料、生产、产品、流通、施用全链条的“五位一体”。即质量安全的绿色原料、低碳环保的绿色生产、环境友好的绿色产品、节能降耗的绿色流通,以及精准轻简的绿色施肥。因此,绿色肥料概念或定义为应用质量安全原料,低碳环保工艺,采用物理-化学-生物改性增效技术生产和使用的,具有养分高效均衡、减排环保、培肥地力沃土功能的一类肥料。

### 3 绿色肥料研究进展

#### 3.1 养分高效型绿色肥料

为了适应现代农业的需要,化肥正向复合型、专用型和多功能型发展,复合高效、全面精准和环境友好是世界肥料发展的总趋势,然而养分资源高效利用仍是肥料发展追求的核心,养分高效型肥料将为我国化肥减量增效提供强有力的技术支撑。稳定性肥料和包膜肥料是传统意义上的养分高效型的绿色肥料。

稳定性肥料是指生产过程中加入了脲酶抑制剂和(或)硝化抑制剂的肥料,有四大类:稳定性复合氮肥,稳定性尿素,稳定性复合肥和稳定性掺混肥。目前,国家已先后颁布了《稳定性肥料》行业标准和国家标准,并于2018年7月实施(GB/T 35113—2017)。

国际上对抑制剂的研究起源于20世纪50、60年代,80年代国际上筛选了一批脲酶抑制剂,主要包括磷酸胺类、醌类、多羟酚类等,硝化抑制剂双氰胺(DCD)也得以在农业上推广<sup>[7]</sup>。90年代,美国研发了Agrotain产品,其活性成分是NBPT。DMPP(3,4-二甲基吡唑磷酸盐)也是在此期间由德国BASF公司研制并注以商标ENTEC,至今仍被广泛应用于农业生产实践<sup>[8]</sup>,近10年来,德国BASF和欧洲化工Euro

Chem公司在脲酶抑制剂NBPT和硝化抑制剂DMPP的基础上,研发出一种新型脲酶抑制剂LIMUS和硝化抑制剂DMPSA<sup>[9-10]</sup>。

20世纪60年代,中国科学院南京土壤研究所李庆奎团队开始从事硝化抑制剂研究。70年代,中国科学院沈阳应用生态研究所周礼恺团队针对硝化抑制剂DCD和脲酶抑制剂氢醌(HQ)开展了土壤酶、硝化、反硝化等方面的研究,80年代开展了脲酶抑制剂NBPT和PPD的研究,并在90年代研发了含有DCD的长效尿素和长效碳铵产品<sup>[11-12]</sup>。自90年代中后期以及进入21世纪以来,氮标记同位素示踪技术普遍被用来研究施用脲酶/硝化抑制剂后肥料氮的去向以及土壤氮素转化过程,更深入地揭示了抑制剂的抑制效果<sup>[13-14]</sup>。基于目前市场上最为常见的抑制剂NBPT<sup>[15-16]</sup>、DCD<sup>[17]</sup>、DMPP<sup>[18]</sup>和CP<sup>[19]</sup>,大量研究均报道脲酶/硝化抑制剂可在不同类型土壤上有效调控尿素和铵态氮肥施入土壤后的氮转化过程,因此稳定性肥料可促使氮肥肥效后移,提高作物氮肥利用率,保障不同区域作物后期养分供给<sup>[19-20]</sup>。

农业生态系统中温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O等)的排放,对全球气候变化的影响越来越受到重视,肥料氮施用就是温室气体产生的一个重要因素<sup>[21]</sup>。稳定性肥料在全球不同区域、不同作物上均有大量的应用,因此其对生态环境的影响也常被评价<sup>[10,22]</sup>。荟萃分析发现<sup>[23]</sup>,通过施用含有硝化抑制剂的稳定性肥料,可平均减少溶解的无机氮浸出48%、N<sub>2</sub>O排放44%和NO排放24%,但平均增加了NH<sub>3</sub>挥发20%,这相当于向环境释放的总氮量净减少16.5%,减轻了污染大气和水体环境的风险。当硝化抑制剂与脲酶抑制剂配施,则能显著减少氨挥发46.9%<sup>[24]</sup>和71.9%<sup>[25]</sup>,施用稳定性氮肥可显著减少稻田CH<sub>4</sub>排放<sup>[26]</sup>。

稳定性肥料产业技术战略联盟在全国七大地理区域进行了稳定性肥料施用效果试验<sup>[27]</sup>,统计分析了2014—2018年的研究结果,发现等养分条件下施用稳定性肥料显著增加粮食产量,而施用80%常规施肥量的稳定性肥料,在华南、西南、华中、华东、华北、西北、东北地区的增产率分别为1.62%、10.38%、1.78%、6.34%、8.35%、1.44%和0.09%,而氮肥的农学利用率(NAE)也显著提高,分别为78.24%、81.41%、49.22%、20.10%、38.96%和62.10%(无华北NAE数据),在大部分地区均有增产增收的效果。由此得知,在保障粮食产量安全的前提下,施用稳定性肥料可减少10%—20%氮肥养分,这将减少肥料资源的浪费,

如若大面积推广应用也可减少肥料施用和运输成本，达到低碳环保的效果。

包膜肥料是另一类养分高效型绿色肥料，它是指水溶性肥料颗粒表面包被一层半透性或难溶性膜，具有缓慢释放养分特性的一类肥料。主要有四类：硫包膜肥料，聚合物包膜肥料，热固性树脂包膜肥料，无机物包裹型肥料。也有学者把包膜肥料归纳为以下五类：复合型包膜肥料；超吸水性聚合物为外包膜层的复式多层包膜肥料；以低成本包膜材料制成的包膜肥料；环境友好型可降解型包膜肥料；智能型包膜肥料<sup>[28]</sup>。

20 世纪 50 年代后期，美国最早研发硫包膜尿素，并且是商业化最成功的控释包膜肥料。1967 年美国在加利福尼亚生产的缓控释肥，其包膜材料是醇酸树脂，该包膜技术可以很好地控制树脂膜的成分和厚度，因而对养分的控释性能好。此后，德国、加拿大、日本等国家也相继研发以不同聚合物包膜的肥料。1974 年，中国科学院南京土壤研究所和南京化工研究所合作研制出长效包膜碳铵，农田试验增产显著，但却未形成规模化生产。之后 10 年，我国缓控释肥料研究发展逐渐加速，以山东农业大学、郑州工业大学磷肥与复肥研究所等为代表，共开发出三类以肥包肥的复合肥料，在国内推广并远销美国。从 20 世纪 80 年代中期开始，北京市园科所与化工所、广州氮肥厂、北京化工大学、北京市农林科学院、中国农业大学、华南农业大学、中国科学院石家庄农业现代化研究所、沈阳应用生态研究所、南京土壤研究所、山东金正大公司等单位均开展了有机高分子聚合物包膜肥料的研制工作<sup>[25, 29-32]</sup>。自 2006 年以来，我国包膜肥料产业进入快速发展阶段，这一阶段形成了比较完备的产品系列，山东农业大学张民团队和华南农业大学樊小林团队研发了系列包膜控释肥和异粒变速控释肥，并通过合作研发、成果转化等实现产业化，涌现了一批优秀的生产企业。

施用包膜肥料可以提高养分利用率，氮肥利用率可提高 8%—15%，并可有效减少养分的地表径流、淋失和氮素挥发<sup>[33-35]</sup>。系列研究报道施用包膜肥料可以提高作物产量，在粮食、蔬菜、果树等作物上进行盆栽试验和田间试验的研究表明，与普通速效化肥相比均收到显著的增产增收效果<sup>[36-40]</sup>。

脲醛类肥料是指由尿素和醛类在一定条件下反应制得的有机微溶性缓释氮肥。脲醛类肥料主要包括脲甲酰胺类肥料（UF，以尿素和甲醛反应制得）、异丁叉

二脲（IBDU，以尿素和异丁醛反应制得）、丁烯叉二脲（CDU，以尿素和乙醛反应制得）等。其中，脲甲酰胺（UF）是最早应用于生产实践的缓释肥料，也是目前应用最多的脲醛类肥料，于 2017 年制定《脲醛缓释肥料》国家标准（GB/T 34763—2017）和《固态脲甲酰胺缓释肥料》国际标准（ISO 19670—2017）。

不同摩尔比的尿素与甲醛可以制成不同缩合度的脲甲酰胺，缩合度越高，产物分子链越长，水溶性越弱，在土壤中的释放速率越慢，释放期就越长<sup>[41]</sup>，土壤类型、pH、水分和温度均是影响脲甲酰胺分解和释放的因素<sup>[42-43]</sup>。根据缩合度，脲甲酰胺可以分为低聚度（2 个缩合度及以下）、中聚度（3—4 个缩合度）和高聚度脲甲酰胺（5 个缩合度及以上）。低聚度脲甲酰胺包含羟甲基脲、亚甲基二脲、二亚甲三脲。中聚度脲甲酰胺包含三亚甲基四脲（TMTU）和四亚甲基五脲（TMPU）。高聚度脲甲酰胺包含五甲基六脲及缩合度更高的甲基脲组分<sup>[41, 44-45]</sup>。根据组分，脲甲酰胺分为三类：（1）冷水可溶性组分（CWSN），该组分氮硝化速率较快，在几周至 3 月内可以矿化，主要包括未参加反应的尿素和低聚度脲甲酰胺；（2）热水可溶性组分（HWSN），为中聚度脲甲酰胺，该组分氮可在 6 个月内缓慢释放，其中被认为最有用的组分是三亚甲基四脲（TMTU）；（3）热水不溶组分（HWIN），为高聚度脲甲酰胺，一般认为该组分氮在土壤中无活性，释放期长达数年<sup>[45-47]</sup>。脲甲酰胺的氮素有效性用活性指数（activity index, AI）表征，是指冷水不溶氮（CWIN）中热水可溶氮（HWSN）所占的百分数，北美和中国制定的标准中均要求  $AI \geq 40$ <sup>[45, 48]</sup>。

国外对脲甲酰胺肥料的研究开始较早，早在 1884 年 Tollens 第一次报道了 Hölzer 研究分离出尿素和甲醛反应的最简单产物——一羟甲基脲<sup>[49-50]</sup>。1924 年，脲甲酰胺就作为化学物品在德国 IG Farben 公司（即现在的 Badische Anilin & Soda Fabrik A.G, BASF 公司）取得第一个专利，并在 1955 年左右实现脲甲酰胺缓释肥料商业化生产。1947 年美国 Rohner 和 Wood 公司取得了脲甲酰胺用作肥料的专利<sup>[51]</sup>，随后开始生产固体脲甲酰胺肥料；随后，美国 Scotts、欧洲凯米拉和日本住友等国的专业公司都开发了多种新产品，实现脲甲酰胺肥料的工业化生产<sup>[48]</sup>。

我国在 1971 年研制出脲甲酰胺缓释肥料，但之后的较长时间里发展缓慢，仅有少数研究机构和企业初步研究和生产脲甲酰胺<sup>[52-56]</sup>。2009 年 6 月 25 日在京召开的中国脲甲酰胺肥料技术（住商）高层论坛上，国内外

缓释肥行业的科研院校学者和知名企业专家就脲甲醛肥料的发展现状、产业化道路探索以及市场竞争能力分析等问题进行了深入探讨与技术交流,住商肥料青岛有限公司决定在全国 11 个农业大省推广缓控释肥料,时至今日,住商公司推广的脲甲醛型缓控释肥料占据我国脲甲醛复合肥市场的领先地位。

国外对脲甲醛在农业中的应用效果、作用机理和环境效应开展了大量研究,发现脲甲醛作为一种缓释氮肥,明显促进作物生长和提高氮肥利用率,还能显著减少  $\text{NH}_3$  排放<sup>[52-56]</sup>。国内则在近 15 年左右才开始详细探究脲甲醛在农业中的作用效果和机理,研究结果表明脲甲醛的施用能够明显提高作物产量和氮肥利用率<sup>[63-68]</sup>、改善作物品质<sup>[64-65]</sup>和减少氮素损失<sup>[67,69]</sup>。近年来,国内不少企业开始研发新的脲甲醛类肥料,例如,郑州高富肥料有限公司采用最新连续化工艺生产的聚脲甲醛肥料,用作基肥一次性施入土壤后,与传统复合肥料相比,在减氮 15%—30%的情况下,其增产效果还提高 5%—10%,氮表观利用率提高 8.1%—17.3%,且氮挥发降低 28.0%—42.63%,具有显著的经济、社会和环境效应<sup>[70-75]</sup>;此外,中北大学研制的磷酸盐改性脲甲醛缓控释肥能加速脲甲醛在土壤中的分解速度,更匹配作物生长所需<sup>[76]</sup>。

作为一种微溶的有机缓释氮肥,脲甲醛兼具速效和缓释养分、释放期可控、肥效长久稳定、利用率高和环境污染少等特点。与普通氮肥相比,脲甲醛肥料具有两大优势,一是氮肥利用率高,显著减少氮挥发等氮损失造成的环境影响,具有环保优势;二是可实现一次性施肥或者减少 1—2 次追肥,具有显著的经济效应。但是,由于生产成本和商品价格较高,目前脲甲醛缓释肥料以脲醛缓释复合肥料或掺混肥料为主,在农业中主要应用于附加值较高的经济作物中,如花卉,高尔夫草坪及观赏性植物等,只有很小的比例用于大田农业生产。通过改进生产工艺降低其生产成本和精准调控其释放周期,未来脲甲醛缓释肥料在农业中的应用具有显著优势和广阔空间。

### 3.2 固碳培肥型绿色肥料

2020 年我国碳排放量约占全球 1/3,近 10 多年来一直高居世界第一(据世界银行统计)。我国决定力争于 2030 年前将二氧化碳排放达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和,即“双碳”目标。与此同时,我国近几年出台系列文件以促土壤培肥,提升地力和粮食产能。因此,固碳培肥型肥料应运而生,其未来发展将有助于我国顺利达成“双碳”目标和保障我国

农田丰产增效。笔者将生物炭基肥料和有机肥料归类到固碳培肥型肥料之中。

炭基肥料是以生物炭为基质,添加氮、磷、钾等养分中的一种或者几种,采用化学方法和(或)物理方法混合制成的肥料(NY/T3041—2016 生物炭基肥料,2016)。生物炭基肥料主要包括炭基无机肥料、炭基有机肥料和炭基有机无机复合肥料(NY/T3041—2016 生物炭基肥料,2016; NY/T3618—2020 生物炭基有机肥,2020)<sup>[77]</sup>。

生物炭是以作物秸秆等农林植物废弃物为原料,在绝氧或者有限供氧条件下,400—700 °C 热裂解得到的稳定的固体富碳产物(NY/T3041—2016 生物炭基肥料,2016)<sup>[78-79]</sup>。生物炭的利用历史悠久,在 20 世纪 60 年代,荷兰科学家 Wim Sombroek 在巴西的亚马孙流域发现了生物黑炭,当地的人们将燃烧后的木头、陶瓷残渣、秸秆等富碳物质添加到土壤中,这种特殊的“黑土壤”(Terra Preta),当地人称其为“印第安人黑土”,含有丰富的生物炭及其他有机物质,具有很强恢复土壤生产力的能力<sup>[80-82]</sup>。国际上对生物黑炭的研究兴起于 2006 年左右<sup>[78]</sup>,国内对生物炭的研究兴起于 2011 年左右<sup>[79,83-85]</sup>。生物炭具有高 pH、有机碳丰富、孔隙结构发达、比表面积大、吸附能力强、保水能力强、功能基团丰富、稳定存在等特点<sup>[83,86]</sup>。以沈阳农业大学陈温福团队为代表的科研团队的研究表明,生物炭通过降低容重、提高总孔隙度、提高持水量等来改善土壤物理结构,通过提高土壤 pH、阳离子交换量、有机碳含量等来优化土壤化学性质,通过提高微生物数量、活性和改变群落结构来调控土壤生物学性质<sup>[83,87]</sup>。另外,生物炭还具有缓解气候变化、固碳减排的环境功能<sup>[88-92]</sup>。此外,生物炭的强吸附性能使其具备缓释肥料养分的功能,并通过补充、吸附和活化土壤养分而提高土壤肥力<sup>[83,86]</sup>。

生物炭与肥料混施或复合后对作物生长及产量几乎都表现为正效应,这源于肥料消除了生物炭养分低的缺陷,而生物炭赋予肥料养分缓释性能的互补和协同作用<sup>[93]</sup>。因此,以生物炭为载体的炭基肥料应运而生并发展迅速<sup>[84,94]</sup>。生物炭肥料同时吸收了生物炭和肥料的优势<sup>[95]</sup>,炭基肥料在具备常规化肥功能的基础上还具备缓释肥效、增加土壤碳含量、减少  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  等温室气体排放、吸附养分和减少养分损失、提高肥料利用率、改良土壤结构、平衡土壤盐分等特点<sup>[93,95]</sup>。多项研究表明,炭基肥显著增加多种作物产量<sup>[95-97]</sup>、促进植物氮代谢<sup>[96,98-99]</sup>和改善作物品质<sup>[99-100]</sup>。

炭基肥是近 10 年来肥料行业出现的新型产品,目前国内产能最大的生物炭基肥企业为三聚环保子公司北京三聚绿能科技有限公司,该公司年产能达到 50 万吨,另外施可丰化工股份有限公司在未来几年也有希望将年产能扩大至 100 吨。

有机肥料是指来源于植物和/或动物,经过发酵腐熟的含碳有机物料,其功能是改善土壤肥力、提供植物营养、提高作物品质(《有机肥料》行业标准, NY/T 525—2021)。有机肥料主要包括传统有机肥(人畜禽粪便、秸秆、绿肥)、普通商品有机肥、无机有机复合肥、生物有机肥、复合微生物肥料、全元生物有机肥这 5 类<sup>[101]</sup>。自古以来,有机肥在农业生产中就占有重要及主导地位<sup>[102-103]</sup>,但在 1909 年随着合成氨方法的建立和应用,化肥越来越多地应用于农业生产中。20 世纪 70 年代之前,我国主要以传统的有机肥为主,70—80 年代转变为传统的有机与化肥并重,80 年代以后传统的有机肥投入急剧下降,而化肥施用急剧上升,到了 20 世纪末和 21 世纪初,我国传统的有机肥养分投入量只占总养分投入量的 10% 左右<sup>[104]</sup>。我国从 2016 年开始出台“化肥零增长”和“有机肥替代化肥”政策,之后有机肥占肥料的比重逐年增加,相关的研究和应用也逐年增加<sup>[105-110]</sup>。目前,我国有机肥行业处于复苏阶段,市场规模由 2016 年 733.3 亿元增至 2019 年 1013.7 亿元,年均复合增长率为 11.4%,2020 年有机肥产量达 1 560 万吨,需求达 1 515 万吨。

国内以沈其荣院士为首的团队在 20 世纪 90 年代开始有机肥研发与应用方面的研究<sup>[111-115]</sup>,在有机肥、氨基酸液体和生物有机肥、连作障碍微生物有机肥、中药渣有机肥、城市污泥肥料化等的产品研发、生产技术和产业化开发方面取得了一系列突破性的成果,构建了多种商品有机肥和生物有机肥的全产业链研发、生产和推广模式,尤其在抗病菌和生物有机肥的研发方面处于国际领先地位<sup>[105,116-120]</sup>。

不同有机肥表现出不同的功能特性<sup>[101]</sup>,传统有机肥和商品有机肥存在养分释放缓慢,无法满足植物对养分的快速需求的特点,加之植物生长过程中面临各种逆境胁迫。因此,目前添加有各种功能生防菌的生物有机肥、复合微生物肥料、全元生物有机肥成为有机肥领域中的研究和应用热点<sup>[121]</sup>,相较于无机化肥,有机肥能显著提高土壤肥力,改善土壤物理性状,缓解土壤酸化,增加土壤有效养分,维持土壤养分平衡,提高土壤生物和生物化学特性,优化土壤微生物群落

的结构组成<sup>[122]</sup>,同时能够改良作物根际生态环境、改善作物的营养品质并抑制病虫害发生<sup>[123]</sup>。然而有机肥(主要来源于畜禽粪便)的长期过量施用会增加土壤重金属和有机污染物(抗生素和激素)含量,加大作物吸收积累重金属和有机污染物的风险。另外,有机肥还可能促进土壤温室气体(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>等)的排放,加重温室效应<sup>[122-124]</sup>,对 NO<sub>2</sub> 排放的作用效果没有定论,积极和消极的作用均有报道<sup>[124-126]</sup>。

### 3.3 增效及提高养分转化效率型绿色肥料

增效及提高养分转化效率型绿色肥料是指能够应用于农业生产中的含有特定微生物活体的制品,通过其中所含微生物的生命活动,增加植物养分的供应量或促进植物生长,提高产量,改善农产品品质及农业生态环境,也常被叫做生物肥料、菌肥、菌剂等。

生物肥料的研究应用起始于 1895 年德国推出的“Nitragin”根瘤菌接种剂并应用于豆科植物<sup>[127]</sup>。到 20 世纪 30、40 年代,美国、澳大利亚、英国等国家都建立了自己的根瘤菌接种剂产业并取得明显成效。20 世纪 60 年代以后世界各国都加强了对生物肥料的研究,并取得了一定的进展。国际上已有 70 多个国家生产、应用和大力推广生物肥料,主要分布在亚洲、南美洲、欧洲和非洲等国家。我国早在 50 年代就开始了微生物肥料的研究,迄今已有 80 多年历史。代表和奠基人有张宪武先生、陈华癸院士和樊庆笙先生等。历经了单一营养菌种、复合营养菌种、营养菌种与生防促生菌种复合的三大发展阶段。经过多年的试验和研究已经取得了很大的进展,在长期的农业生产应用中取得了较好的效果<sup>[128]</sup>。

生物肥料具有提供或活化养分、产生促进作物生长活性物质、促进有机物料腐熟、改善农产品品质、增强作物抗逆性、改良和修复土壤等功效。如南京农业大学沈其荣院士团队研究的木霉全元生物有机肥,通过调控植物根系与土壤微生物的互作来达到根系促生、解毒和免疫的作用<sup>[129]</sup>。目前我国生物肥料年产量约 3 000 万吨,年生产总值超 400 亿元。截至 2020 年 11 月,获得农业农村部登记的微生物肥料产品有 9 078 个,有效登记证 8 185 个,微生物肥料的功能多样特点与国家绿色农业发展相吻合,是发展绿色农业之必需品。当前来看,在我国微生物肥发展的现阶段,功能菌种和技术产品创新,成为微生物肥料产业发展中急需解决的关键问题,未来微生物肥料新技术产品研发方向将分为修复菌剂对土壤健康维护和修复、微生物肥料对作物增产增效(减肥增效)、应用微生物肥

料提升农产品质量、增强作物抗逆性功能、低温等特色腐熟菌剂资源化利用五个方向,向满足绿色农业需求的“绿色、优质”的方向发展。

### 3.4 养分均衡型绿色肥料

作物对不同的必需养分吸收量存在较大差别,但是这种量的比例关系对特定作物却是相对固定的,被称为养分平衡比例或简称为养分平衡。养分均衡型肥料增产的机理是最小养分率的作用结果。当土壤中缺乏某种营养元素时,只增加其他营养元素的数量会起到相反的作用,而施用缺乏的营养元素会改变原有养分平衡状态,明显提高其他营养元素肥料的利用率,达到增产增收、改善农产品品质的作用。

早在 20 世纪 30 年代养分均衡型肥料就已经应用到农业领域且发展迅速。目前,主要生产和施用养分均衡型肥料的国家有美国、英国、法国等 20 多个国家<sup>[130]</sup>,如德国 BASF 公司的“全元素肥料”、以色列海法保利丰、含镁钾等产品。我国养分均衡型肥料的研究起步于 20 世纪 50 年代,主要经历了无机盐类通用型中微量元素肥料、螯合态中微量元素肥料等发展阶段。例如,过磷酸钙除含磷外,还含有植物所必需的 Ca、Mg、S、Fe、Zn、Cu、Mn 等,能够为作物生长提供其所需的中微量元素<sup>[131]</sup>。

农作物所需的营养元素处于土壤这一复杂体系中,各元素之间既可以相互促进,又能够产生拮抗。在养分均衡型肥料的生产过程中,需要提高养分利用率和肥料间的配伍合理性。例如,大量元素 K 与中量元素 Mg 即表现为拮抗作用,随着 K 浓度的增加会抑制植物对 Mg 的吸收。 $\text{NO}_3^-$ -N 与  $\text{Cl}^-$  之间也存在着相互抑制的拮抗作用;此外, $\text{NH}_4^+$ -N 浓度升高时会抑制植株对  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  的吸收<sup>[132]</sup>。大量元素 N、P、K 之间,N 能促进 P 和 K 的吸收<sup>[133]</sup>。

随着人们生活水平的提高,人们对农产品品质有了越来越高的要求,中微量元素可以有效地改善农产品品质,发展养分均衡型肥料尤为重要。在产品开发过程中,应根据作物不同时期的养分需求规律、土壤肥力现状及肥料利用率(受养分种类和土壤地质的影响)开发一系列有针对性的肥料配方。比如苗期和开花期,需要高磷配方,小果期需要高氮配方,大果期需要高氮高钾配方,果实上色期需要高钾配方等。因此,需要加大研究工作的力度,推动最佳平衡施用技术研制,生产出科技含量高、质优价廉、具有较强竞争力的均衡型肥料产品;开发中、微量元素在内的配方施肥技术等。

### 3.5 增值型绿色肥料

增值肥料是将安全环保的有机生物活性增效载体与化肥肥料科学配伍,通过综合调控“肥料-作物-土壤”系统改善肥效的肥料增值产品<sup>[134]</sup>。增值肥料主要技术特点包括:(1)载体增效制肥;(2)增效载体通常为天然/植物源物质,安全环保;(3)综合调控“肥料-作物-土壤”系统增效;(4)增效载体微量高效;(5)与大型化肥生产装置结合一体化生产,可实现对“肥料-作物-土壤”系统综合调控,达到“促吸收、降活性、优供应、减损失”的目的,赋予产品有效养分高效化利用特征。增值肥料的增效载体主要包括腐殖酸类(风化酶、褐煤)、海藻酸类(褐藻海藻酸)、氨基酸类(谷氨酸、聚谷氨酸),这些增效载体属于植物激素的范畴,但是增值肥料又不同于植物激素类肥料,增值肥料更注重增效载体对肥料的增值作用,不偏重其对植株的生长调节和刺激作用<sup>[134]</sup>。增值化肥种类主要有氮肥(尿素、复合肥)、磷肥(磷酸一铵、磷酸二铵)和钾肥<sup>[2]</sup>,代表性增值氮肥产品有海藻酸增值尿素、辛腐酸增值尿素、海藻酸增值复合肥、聚合谷氨酸增值尿素,代表性增值磷肥产品有海藻酸增值磷铵<sup>[134]</sup>。

增值肥料是中国农业科学院赵秉强研究团队从 2000 年开始,经过 20 余年的研发,形成的继缓/控释肥料、稳定性肥料、脲甲醛类肥料后发明的绿色高效肥料产品。目前,增值肥料在国内十余家肥料企业实现产业化,系列增值肥料行业标准的实施标志着增值肥料新产业的形成,年产能 1 500 万吨,推广 0.3 亿公顷(4.5 亿亩)<sup>[134]</sup>。

海藻酸增值尿素、腐殖酸增值尿素、谷氨酸增值尿素均可显著提高作物产量、促进作物吸收氮养分、提高氮肥表观利用率和显著降低肥料氮损失<sup>[135]</sup>。最新研究表明,葡萄糖改性尿素可延缓尿素水解,提高尿素氮肥利用率,是一种优良的新型增值肥料<sup>[136]</sup>。在不同类型的增值肥料中,腐殖酸类增值肥料的产品最多,相关的研究也最多。腐殖酸尿素施用后能缓冲土壤 pH、抑制脲酶活性和减少氨挥发,通过减缓土壤铵态氮向硝态氮的转化来延缓尿素的释放,并增加尿素氮在土壤中的留存,明显提高玉米和小麦的产量和地上部干物质质量以及作物对氮的利用率<sup>[137]</sup>。腐殖酸还能促进磷在土壤中的横向和纵向迁移,提高腐殖酸磷肥的有效性<sup>[138]</sup>。增值肥料对环境效应的作用效果研究较少,仅有少数研究表明增值尿素显著降低脲酶活性和降低土壤氨挥发<sup>[139]</sup>。未来应该加

强增值肥料作用机理和环境效应方面的研究，为增值肥料的科学利用和生态应用提供理论支撑。同时，在开发增值肥料新品种和增值肥料的提质增效方面也应该加大研究力度，加快推进增值肥料服务于农业生产的步伐和程度。

## 4 强化绿色肥料发展的建议

中国化肥生产量约占全球的 1/4，产值占全球的 1/3。化肥为全球粮食增产做出了 50% 以上的贡献，在发展中国家化肥的增产作用更大，在粮食增产方面的贡献可以达到 60% 左右。因此，化肥是粮食高产的最大功臣。我国的有机废弃物资源总量有 60 多亿吨，其蕴含着 18 亿吨有机质，是一笔巨大的财富。如何实现化肥的绿色转型、有机肥资源高效低成本利用，笔者提出以下四点思路和建议。

### 4.1 依靠市场机制，加强顶层设计，构建肥料绿色制造新体系

为了有效增加化肥供应，保障粮食安全，我国在 20 世纪 80—90 年代对化肥价格进行了调控，在能源价格、铁路运输、税收等方面给予化肥企业优惠。但目前化肥产业产能已严重过剩，并形成了肥料供给侧企业“多、小、杂”的局面。应适时建立合理的市场机制，深化肥料供给侧改革，淘汰落后产能；应加强顶层设计，从肥料“原料质量安全、资源节约；制造工艺低碳节能、生态环保；产品安全高效、环境友好；流通过程布局合理、减排高效；施用科学合理、精准变量”五个方面全面绿色化，优化企业绿色产业链；规范市场贸易、进出口、政策法规等管理体系，制定颁布绿色肥料行业和国家标准；建立农村生态环境保护制度，从源头、过程和末端全链条管控养分资源，保障农业绿色发展。

### 4.2 以养分资源综合管理为核心，促进有机-大量-中微量元素肥料平衡协调发展

从农业生态系统观点出发，综合利用所有自然和化工、生物合成的植物养分资源，通过有机肥与化肥的精准配伍、土壤培肥与土壤保护、生物固氮、植物改良措施，综合协调农业生产系统中养分的投入产出平衡，调节养分供应与利用强度，实现养分资源高效利用。通过合理利用有机养分资源（有机肥+秸秆+绿肥等），加强和支持厩肥沤制、生物有机肥补充、秸秆还田、粮草轮作，用有机肥养分替代 30% 化肥养分，实现有机无机相结合，以耕地内在养分替代外来化肥养分投入。优化氮、磷、钾数量及形态配比，促进大

量元素与中微量元素的区域性“适地适作”配伍，发挥营养元素形态互作增效优势，适应现代农业发展需要，引导肥料产品优化升级。

### 4.3 充分发挥科研平台作用，大力发展智能化绿色肥料产品

基于各级绿色肥料研制与开发平台，联合国内相关研究机构，加强国内外学术交流与合作，攻克绿色肥料产业链核心技术。深入研究肥料原料有害物质去除及提高资源利用效率高新技术，创新先进高效煤气化技术、高端湿法磷酸精制技术等低碳环保制造工艺，探究“养分供需”与“精准控释”规律，深化不同区域、不同作物的需肥规律和土壤供肥能力研究，筛选合成新型环境友好生化抑制剂、包膜材料、微生物菌剂、肥料助剂等新材料，集成创新精准控释技术，创制稳定性肥料、微生物肥料、缓控释肥料、炭基肥料、有机-无机复合肥料、增值肥料、功能性肥料等新产品。

### 4.4 融合现代传感和信息技术，全面推进绿色高效的精准施肥

智能精准的施肥技术是基于作物品种特性、根际土壤养分供应能力、肥料养分释放规律等关键要素，利用实时动态的养分分析技术和智能装备，实现养分供应与需求的无限吻合。以美国为代表的农业发达国家已经开始研制智能化、变量化的施肥技术，并已经取得了一定的进展。利用大数据、GPS、新一代智能传感器等技术和设备，开发出实时在线调控多种肥料的高效变量施肥机具。而我国对核心智能化控制系统自主研发能力较弱，高精准性及适用性施肥机械研究较少，且所集成的产品自动化及智能化程度低，应用示范面积小，并未在生产中推广应用。未来将需加大精准实时养分传感器研制以及大数据、云计算等新技术的集成应用。建立农田肥料限量投入指标体系，研制精准施肥系统与水肥一体化智能体系、有机类肥料及液体肥料高效施用机械等绿色施肥技术与装备。

## 参考文献 References

- [1] 赵玉芬, 尹应武. 我国肥料使用中存在的问题及对策. 科学通报, 2015, 60(36): 3527-3534.  
ZHAO Y F, YIN Y W. Key scientific problems on establishing green fertilizer ensurance system. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(36): 3527-3534. (in Chinese)
- [2] 赵秉强. 传统化肥增效改性提升产品性能与功能. 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. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 1-7. (in Chinese)
- [3] WU K K, GONG P, BAI W, ZHANG Z, WEI Z B, YU C X, SONG Y C, XUE Y, ZHANG L L. Effect of mixed inhibitor application on N<sub>2</sub>O production pathways in paddy soil. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(7): 1913-1923.
- [4] YU C X, XIE X S, YANG H Z, YANG L J, LI W T, WU K K, ZHANG W M, FENG C, LI D P, WU Z J, ZHANG L L. Effect of straw and inhibitors on the fate of nitrogen applied to paddy soil. *Scientific Reports*, 2020, 10: 21582. doi:10.1038/s41598-020-78648-w.
- [5] 侯翠红, 许秀成, 王好斌, 赵玉芬. 绿色肥料产业体系构建及其科学问题. *科学通报*, 2015, 60(36): 3535-3542.
- HOU C H, XU X C, WANG H B, ZHAO Y F. Establishment of green fertilizer industrial system and its scientific problems. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(36): 3535-3542. (in Chinese)
- [6] 黄立章, 石伟勇, 吴建富. 控释肥料的研究动态与展望. *江西农业大学学报(自然科学)*, 2002, 24(5): 727-730.
- HUANG L Z, SHI W Y, WU J F. Dynamic and prospect on the research of controlled release fertilizers. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2002, 24(5): 727-730. (in Chinese)
- [7] AMBERGER A. Research on dicyandiamide as a nitrification inhibitor and future outlook. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1989, 20(19/20): 1933-1955.
- [8] ZERULLA W, BARTH T, DRESSEL J, ERHARDT K, VON LOCQUENGIEN K H, PASDA G, RÄDLE M, WISSEMEIER A. 3, 4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP) - a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture - An introduction. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34(2): 79-84.
- [9] MODOLO L V, DE SOUZA A X, HORTA L P, ARAUJO D P, DE FÁTIMA Â. An overview on the potential of natural products as ureases inhibitors: a review. *Journal of Advanced Research*, 2015, 6(1): 35-44.
- [10] RECIO J, VALLEJO A, LE-NOË J, GARNIE J, GARCÍA-MARCO S, ÁLVAREZ J M, SANZ-COBENA A. The effect of nitrification inhibitors on NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O emissions in highly N fertilized irrigated Mediterranean cropping systems. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 427-436.
- [11] 王小彬, L D Bailey, C A Grallt, K K Klein. 关于几种土壤脲酶抑制剂的作用条件. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(3): 211-218.
- WANG X B, BAILEY L D, GRALLT C A, KLEIN K K. The acting conditions of some urease inhibitors in soils. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(3): 211-218. (in Chinese)
- [12] 卢婉芳, 陈苇, 王德仁. 脲酶抑制剂(NBPT)对提高尿素氮利用率的研究. *中国农学通报*, 1990, 6(2): 23-25.
- LU W F, CHEN W, WANG D R. Study on urease inhibitor (NBPT) to improve urea nitrogen utilization rate. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 1990, 6(2): 23-25. (in Chinese)
- [13] 陈苇, 卢婉芳. 稻田脲酶抑制剂对<sup>15</sup>N-尿素去向的影响. *核农学报*, 1997, 11(3): 151-156.
- CHEN W, LU W F. Effect of paddy urease inhibitors on fate of <sup>15</sup>N urea. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 1997, 11(3): 151-156. (in Chinese)
- [14] XU X K, ZHOU L K, VAN CLEEMPOT O, WANG Z J. Fate of urea-15N in a soil-wheat system as influenced by urease inhibitor hydroquinone and nitrification inhibitor dicyandiamide. *Plant and Soil*, 2000, 220: 261-270.
- [15] LIU G Y, YANG Z P, DU J, HE A L, YANG H H, XUE G Y, YU C W, ZHANG Y T. Adding NBPT to urea increases N use efficiency of maize and decreases the abundance of N-cycling soil microbes under reduced fertilizer-N rate on the North China Plain. *PLoS ONE*, 2020, 15(10): e0240925.
- [16] 周旋, 吴良欢, 戴锋, 董春华. 生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田稻季氨挥发的影响. *农业环境科学学报*, 2018, 37(2): 399-408.
- ZHOU X, WU L H, DAI F, DONG C H. Effects of combined biochemical inhibitors and fertilization models on ammonia volatilization in yellow clayey paddy field. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2): 399-408. (in Chinese)
- [17] NING J F, AI S Y, CUI L H. Dicyandiamide has more inhibitory activities on nitrification than thiosulfate. *PLoS One*, 2018, 13(8): e0200598.
- [18] 俞巧钢, 符建荣. 含 DMPP 抑制剂尿素的氨挥发特性及阻控对策研究. *农业环境科学学报*, 2009, 28(4): 744-748.
- YU Q G, FU J R. Ammonia volatilization loss character of urea with DMPP addition and its controlling strategy. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4): 744-748. (in Chinese)
- [19] 李学红, 李东坡, 武志杰, 崔磊, 肖富容, 张可, 李永华, 郑野, 张金明, 崔永坤. 添加 NBPT/DMPP/CP 的高效稳定性尿素在黑土和褐土中的施用效应. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(6): 957-968.
- LI X H, LI D P, WU Z J, CUI L, XIAO F R, ZHANG K, LI Y H, ZHENG Y, ZHANG J M, CUI Y K. Effects of stabilized urea

- containing NBPT/DMPP/CP on nitrogen use efficiency and maize yield in black and cinnamon soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(6): 957-968. (in Chinese)
- [20] 王静, 王允青, 张凤芝, 吴萍萍, 叶寅, 万水霞, 吕国安, 郭熙盛. 脲酶/硝化抑制剂对沿淮平原水稻产量、氮肥利用率及稻田氮素的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 211-216.
- WANG J, WANG Y Q, ZHANG F Z, WU P P, YE Y, WAN S X, LÜ G A, GUO X S. Effects of urease/nitrification inhibitors on yield and nitrogen utilization efficiency of rice and soil nitrogen of paddy field in plain along the Huaihe River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 211-216. (in Chinese)
- [21] DELGADO J A, MOSIER A R. Mitigation alternatives to decrease nitrous oxides emissions and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25(5): 1105-1111.
- [22] 武志杰, 石元亮, 李东坡, 卢宗云, 魏占波, 张丽莉, 宫平, 王玲莉, 房娜娜, 李杰, 李忠, 薛妍, 宋玉超. 稳定性肥料发展与展望. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1614-1621.
- WU Z J, SHI Y L, LI D P, LU Z Y, WEI Z B, ZHANG L L, GONG P, WANG L L, FANG N N, LI J, LI Z, XUE Y, SONG Y C. The development and outlook of stabilized fertilizers. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1614-1621. (in Chinese)
- [23] QIAO C L, LIU L L, HU S J, COMPTON J E, GREAVIER T L, LI Q L. How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input. *Global Change Biology*, 2015, 21(3): 1249-1257.
- [24] BYRNE M, TOBIN J, FORRESTAL P, DANAHER M, NKWONTA C, RICHARDS K, CUMMINS E, HOGAN S, O'CALLAGHAN T. Urease and nitrification inhibitors—as mitigation tools for greenhouse gas emissions in sustainable dairy systems: a review. *Sustainability*, 2020, 12(15): 6018.
- [25] 孙祥鑫, 李东坡, 武志杰, 崔亚兰, 韩梅, 李永华, 杨德福, 崔永坤. 持续施用缓/控释尿素条件下水土土壤  $\text{NH}_3$  挥发与  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1901-1909.
- SUN X X, LI D P, WU Z J, CUI Y L, HAN M, LI Y H, YANG D F, CUI Y K. Characteristics of ammonia volatilization and nitrous oxide emission from a paddy soil under continuous application of different slow/controlled release urea. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(6): 1901-1909. (in Chinese)
- [26] WU K K, GONG P, ZHANG L L, WU Z J, XIE X S, YANG H Z, LI W T, SONG Y C, LI D P. Yield-scaled  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  emissions as affected by combined application of stabilized nitrogen fertilizer and pig manure in rice fields. *Plant Soil and Environment*, 2019, 65(10): 497-502.
- [27] 张蕾, 王玲莉, 房娜娜, 石晓雨, 武志杰, 张丽莉, 石元亮. 稳定性肥料在中国不同区域的施用效果及施用量. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(2): 215-230.
- ZHANG L, WANG L L, FANG N N, SHI X Y, WU Z J, ZHANG L L, SHI Y L. Effect of stabilized fertilizer in different regions of China and the suitable application rate. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(2): 215-230. (in Chinese)
- [28] 柳丽敏, 张思虹, 支云飞, 陕绍云, 贾庆明. 包膜肥料最新研究进展. *现代化工*, 2018, 38(7): 26-30.
- LIU L M, ZHANG S H, ZHI Y F, SHAN S Y, JIA Q M. Latest research progress of coated fertilizer. *Modern Chemical Industry*, 2018, 38(7): 26-30. (in Chinese)
- [29] ZHANG S G, YANG Y C, GAO B, LI Y C, LIU Z G. Superhydrophobic controlled-release fertilizers coated with bio-based polymers with organosilicon and nano-silica modifications. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(37): 19943-19953.
- [30] MA X X, CHEN J Q, YANG Y C, SU X R, ZHANG S G, GAO B, LI Y C. Siloxane and polyether dual modification improves hydrophobicity and interpenetrating polymer network of bio-polymer for coated fertilizers with enhanced slow release characteristics. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 350: 1125-1134.
- [31] LIU J L, YANG Y C, GAO B, LI Y C, XIE J Z. Bio-based elastic polyurethane for controlled-release urea fertilizer: Fabrication, properties, swelling and nitrogen release characteristics. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 528-537.
- [32] 张桥, 樊小林. 我国控释肥料生产应用现状与发展对策. *广东农业科学*, 2005, 32(1): 52-53.
- ZHANG Q, FAN X L. Status and countermeasures on production and application of Controlled Released Fertilizers. *Guangdong Agricultural Science*, 2005, 32(1): 52-53. (in Chinese)
- [33] PAN B B, LAM S K, MOSIER A, LUO Y Q, CHEN D L. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 232: 283-289.
- [34] 奚振邦. 试论缓释氮肥及其农业化学评价. *磷肥与复肥*, 2003, 18(5): 1-5.
- XI Z B. Approach to slow release nitrogen fertilizer and its agrochemical evaluation. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003,

- 18(5): 1-5. (in Chinese)
- [35] 胡迎春, 韩云良, 施成晓, 宋端朴, 李雨泽, 温晓霞, 秦晓梁, 廖允成. 氮肥减量下缓释肥和尿素配施对黄土高原春玉米氮素利用和产量效益的影响. 西北农业学报, 2019, 28(7): 1068-1078.
- HU Y C, HAN Y L, SHI C X, SONG D P, LI Y Z, WEN X X, QIN X L, LIAO Y C. Improving nitrogen use efficiencies, yields and profits for spring maize by using mixtures of slow-release fertilizer and normal urea in loess plateau. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2019, 28(7): 1068-1078. (in Chinese)
- [36] 王茂莹, 漆增连, 代兴龙, 贺明荣, 董元杰. 不同缓/控释尿素对小麦生长及氮素利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(4): 643-653.
- WANG M Y, QI Z L, DAI X L, HE M R, DONG Y J. Effects of different slow/controlled release urea on wheat growth and nitrogen utilization. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(4): 643-653. (in Chinese)
- [37] 邵蕾, 张民, 陈学森, 王丽霞. 控释氮肥对土壤和苹果树氮含量及苹果产量的影响. 园艺学报, 2007, 34(1): 43-46.
- SHAO L, ZHANG M, CHEN X S, WANG L X. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on yield and nitrogen content of soil and apple tree. *Acta Horticulturae Sinica*, 2007, 34(1): 43-46. (in Chinese)
- [38] 张海军, 武志杰, 李荣华, 刘春萍. 控释氮肥对土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  及番茄产量和质量的影响. 土壤通报, 2004, 35(1): 30-34.
- ZHANG H J, WU Z J, LI R H, LIU C P. Ammonium and nitrate of soil and yield and quality of tomato as influenced by the application of controlled release nitrogen fertilizer. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(1): 30-34. (in Chinese)
- [39] 于立芝, 李东坡, 俞守能, 邹积华, 马涛, 武志杰. 缓/控释肥料研究进展. 生态学杂志, 2006, 25(12): 1559-1563.
- YU L Z, LI D P, YU S N, ZOU J H, MA T, WU Z J. Research advances in slow/controlled release fertilizers. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(12): 1559-1563. (in Chinese)
- [40] 关瑞, 张民, 诸葛玉平, 娄燕宏, 王会, 潘红, 韩飞, 何伟. 控释氮肥一次性基施提高谷子产量和氮素利用率. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 639-646.
- GUAN R, ZHANG M, ZHUGE Y P, LOU Y H, WANG H, PAN H, HAN F, HE W. Single basal application of controlled release nitrogen fertilizer improve yield and nitrogen use efficiency of foxtail millet. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4): 639-646. (in Chinese)
- [41] 许秀成, 李葭萍, 王好斌. 脲甲醛肥料在我国发展的可行性. 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. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2009, 24(6): 5-7. (in Chinese)
- [42] TLUSTOS P, BLACKMER A M. Release of nitrogen from ureaform fractions as influenced by soil pH. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(6): 1807-1810.
- [43] FAN X H, LI Y C. Nitrogen release from slow-release fertilizers as affected by soil type and temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74: 1635-1641.
- [44] 吕云峰. 脲甲醛缓释肥料. 磷肥与复肥, 2009, 24(6): 8-10.
- LÜ Y F. Urea-formaldehyde slow release fertilizers. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2009, 24(6): 8-10. (in Chinese)
- [45] 黄丽娜, 魏守兴. 脲甲醛肥料合成及应用研究现状. 农学学报, 2015, 5(7): 76-80.
- HUANG L N, WEI S X. The status research on synthesis and application of urea formaldehyde fertilizer. *Journal of Agriculture*, 2015, 5(7): 76-80. (in Chinese)
- [46] FULLER W H, CLARK K G. Microbiological studies on urea-formaldehyde preparations. *Soil Science Society of America Journal*, 1948, 12(C): 198-202.
- [47] 赵秉强. 新型肥料. 北京: 科学出版社, 2013.
- ZHAO B Q. *New Fertilizers*. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [48] 张文辉, 丁巍巍, 张勇, 张峻炜, 梅丹丹. 脲甲醛缓释肥料的研究进展. 化工进展, 2011, 30(S1): 437-441.
- ZHANG W H, DING W W, ZHANG Y, ZHANG J W, MEI D D. Research advances on urea-formaldehyde slow-release fertilizer. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2011, 30(S1): 437-441. (in Chinese)
- [49] TOLLENS B. Ueber einige derivate des formaldehyds. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 1884, 17: 653-659.
- [50] TOLLENS B. Ueber den methylen-harnstoff. *Berichte Der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 1896, 29(3): 2751-2752.
- [51] TRENKEL M E. *Improving Fertilizer Use Efficiency-Controlled-Release and Stabilized Fertilizers in Agriculture*. Paris: IFA, 1997.
- [52] 朱永绥. 脲醛复合肥的生产方法: CN1138728C. 2004-02-18.
- ZHU Y S. Method for producing urea-formaldehyde compound fertilizer: CN1138728C. 2004-02-18. (in Chinese)
- [53] 邢礼军, 李亚星, 徐秋明, 王幼珊, 倪小会. 一种脲醛控释肥料的合成方法: CN1218907C. 2005-09-14.

- XING L J, LI Y X, XU Q M, WANG Y S, NI X H. Synthesis of urea-formaldehyde controlled releasing fertilizer: CN1218907C. 2005-09-14. (in Chinese)
- [54] 宋湛谦, 李建法, 高宏. 改性脲醛土壤稳定剂及其制备方法: CN1257250C. 2006-05-24.
- SONG Z Q, LI J F, GAO H. Modified urea formaldehyde soil stabilizer and its preparing method: CN1257250C. 2006-05-24. (in Chinese)
- [55] 谷佳林, 李亚星, 徐秋明, 杨宜斌, 衣文平. 一种脲醛泡沫植物栽培基质及其制备方法: CN101134803B. 2010-12-08.
- GU J L, LI Y X, XU Q M, YANG Y B, YI W P. Urea-formaldehyde foam plant cultivation substrate and method for preparing the same: CN101134803B. 2010-12-08. (in Chinese)
- [56] 赵福军, 李子芬, 傅送保, 姚光前, 梁明初, 曲均峰, 郭涛, 王亮亮. 一种低醛长效脲醛缓释肥的制备方法: CN101353270B. 2012-07-25.
- ZHAO F J, LI Z F, FU S B, YAO G Q, LIANG M C, QU J F, GUO T, WANG L L. Preparation of low aldehyde long-acting urea-formaldehyde slow release fertilizer: CN101353270B. 2012-07-25. (in Chinese)
- [57] SIMSIMAN G V, DEDATTA S K, MOOMAW J C. Sources of nitrogen and methods of application for flooded rice: I. comparison of two methods of applying slow release and standard fertilizer materials. *The Journal of Agricultural Science*, 1967, 69(2): 189-196.
- [58] HADAS A, PELED A, KAFKAFI U. Ureaform as a nitrogen fertilizer for bananas. *Experimental Agriculture*, 1976, 12: 121-128.
- [59] CARTER M F, VLEK P L G, TOUCHTON J T. Agronomic evaluation of new ureaforms for flooded rice. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(4): 1055-1060.
- [60] ALEXANDER A, HELM H U. Ureaform as a slow release fertilizer: a review. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung Und Bodenkunde*, 1990, 153(4): 249-255.
- [61] ELLIOT J, FOX T. Ammonia volatilization following fertilization with urea or ureaform in a thinned loblolly pine plantation. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78: 1469-1473.
- [62] CHALK P M, CRASWELL E T, POLIDORO J C, CHEN D L. Fate and efficiency of <sup>15</sup>N-labelled slow- and controlled-release fertilizers. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 102(2): 167-178.
- [63] 黄丽娜, 樊小林. 脲甲醛肥料对小白菜产量和氮肥利用率的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(11): 42-46, 52.
- HUANG L N, FAN X L. Effects of urea-formaldehyde fertilizer on yield of Chinese cabbage and its nitrogen use efficiency. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2012, 40(11): 42-46, 52. (in Chinese)
- [64] 唐拴虎, 张发宝, 黄旭, 陈建生, 徐培智. 缓/控释肥料对辣椒生长及养分利用率的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 986-991.
- TANG S H, ZHANG F B, HUANG X, CHEN J S, XU P Z. Effects of slow/controlled release fertilizers on the growth and nutrient use efficiency of pepper. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 986-991. (in Chinese)
- [65] 刘兵. 脲甲醛缓控释肥料在大田作物上应用效应及产业化发展途径研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2006.
- LIU B. Effect of the slow-control-released fertilizer urea-formaldehyde on the field crops and further industrial approach[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2006. (in Chinese)
- [66] 杨军芳, 黄少辉, 邢素丽, 袁维翰, 刘枫, 颜秀芳, 贾良良, 刘学彤. 脲甲醛缓释肥在冬小麦上的肥料效应研究. *河北农业科学*, 2017, 21(5): 47-52.
- YANG J F, HUANG S H, XING S L, YUAN W H, LIU F, YAN X F, JIA L L, LIU X T. Study on effect of urea formaldehyde slow-release fertilizer on winter wheat. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2017, 21(5): 47-52. (in Chinese)
- [67] 周丽平, 杨俐苹, 自由路, 卢艳丽, 王磊. 夏玉米施用不同缓释化处理氮肥的效果及氮肥去向. *中国农业科学*, 2018, 51(8): 1527-1536. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2018.08.010.
- ZHOU L P, YANG L P, BAI Y L, LU Y L, WANG L. Effects of different slow-released nitrogen fertilizers on summer maize and nitrogen fate in the field. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(8): 1527-1536. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2018.08.010. (in Chinese)
- [68] 倪露, 自由路, 杨俐苹, 卢艳丽, 王磊, 周丽平. 不同组分脲甲醛缓释肥的夏玉米肥料效应研究. *中国农业科学*, 2016, 49(17): 3369-3378. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2016.17.011.
- NI L, BAI Y L, YANG L P, LU Y L, WANG L, ZHOU L P. The effect of urea-formaldehyde fertilizer under different components by summer maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(17): 3369-3378. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2016.17.011. (in Chinese)
- [69] 林清火, 刘海林, 杨凯, 华元刚, 茶正早, 罗微. 脲醛缓释肥料棒氮素缓释特性研究. *中国土壤与肥料*, 2018(4): 153-158.
- LIN Q H, LIU H L, YANG K, HUA Y G, CHA Z Z, LUO W. Study on nitrogen slow release characteristics of urea formaldehyde slow release fertilizer rods. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(4):

- 153-158. (in Chinese)
- [70] 黄巧义, 张木, 黄旭, 唐拴虎, 张发宝, 逢玉万, 易琼, 李苹, 付弘婷. 聚脲甲醛缓释氮肥一次性基施在双季稻上的应用效果. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3996-4006. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2018.20.017.
- HUANG Q Y, ZHANG M, HUANG X, TANG S H, ZHANG F B, PANG Y W, YI Q, LI P, FU H T. Effect of one-off application of poly urea-formaldehyde fertilizer under reduced N rate on double cropping rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3996-4006. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2018.20.017. (in Chinese)
- [71] 范立春, 孙磊, 王丽华, 姬景红, 高中超, 刘双全, 王爽. 聚脲甲醛(MU)缓释氮肥一次性基施在水稻上的应用效果. 黑龙江农业科学, 2019(10): 34-41.
- FAN L C, SUN L, WANG L H, JI J H, GAO Z C, LIU S Q, WANG S. Effects of one-off application of poly urea formaldehyde (MU) fertilizer under reduced N rate on rice. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2019(10): 34-41. (in Chinese)
- [72] 赵蒙, 曾科, 姚元林, 张敏, 杜林岚, 田玉华, 胡建民, 尹斌. 聚脲甲醛缓释肥对太湖稻麦轮作体系氮挥发及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 55-63.
- ZHAO M, ZENG K, YAO Y L, ZHANG M, DU L L, TIAN Y H, HU J M, YIN B. Effects of polyurea-formaldehyde on ammonia volatilization and yields under rice-wheat rotation in Taihu Region. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1): 55-63. (in Chinese)
- [73] 吕金岭, 王小非, 李太魁, 寇长林. 不同施肥方式下砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田氨挥发特征及排放系数. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1869-1879.
- LÜ J L, WANG X F, LI T K, KOU C L. Ammonia emission characteristics and emission coefficients of wheat and corn rotation cropland under different fertilization methods in lime concretion black soil. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(12): 1869-1879. (in Chinese)
- [74] 吕金岭, 寇长林, 于冬梅. 聚脲甲醛缓释肥与尿素不同配比对潮土小麦产量及氮肥利用率的影响. 磷肥与复肥, 2021, 36(6): 45-48.
- LÜ J L, KOU C L, YU D M. Effects of different ratios of polyurea formaldehyde slow-release fertilizer and urea on wheat yield and nitrogen utilization efficiency in fluvo-aquic soil. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2021, 36(6): 45-48. (in Chinese)
- [75] 胡建民, 苗俊艳, 许秀成. 脲甲醛缓释肥料的研究进展与聚脲甲醛缓释肥料新工艺介绍. 磷肥与复肥, 2021, 36(11): 18-20.
- HU J M, MIAO J Y, XU X C. Research progress of urea formaldehyde slow release fertilizer and new production technology of poly methylene urea slow release fertilizer. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2021, 36(11): 18-20. (in Chinese)
- [76] 席瑶瑶, 赵贵哲, 刘亚青. 磷酸盐改性脲甲醛缓释控释肥的制备及性能研究. 广东农业科学, 2022, 49(2): 54-63.
- XI Y Y, ZHAO G Z, LIU Y Q. Study on preparation and performance of phosphate modified urea formaldehyde slow-controlled release fertilizer. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2022, 49(2): 54-63. (in Chinese)
- [77] 原鲁明, 赵立欣, 沈玉君, 尚书旗, 孟海波. 我国生物炭基肥生产工艺与设备研究进展. 中国农业科技导报, 2015, 17(4): 107-113.
- YUAN L M, ZHAO L X, SHEN Y J, SHANG S Q, MENG H B. Progress on biochar-based fertilizer production technology and equipment in China. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2015, 17(4): 107-113. (in Chinese)
- [78] LEHMANN J, GAUNT J, RONDON M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 403-427.
- [79] 孟军, 张伟明, 王绍斌, 徐正进, 陈温福. 农林废弃物炭化还田技术的发展与前景. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(4): 387-392.
- MENG J, ZHANG W M, WANG S B, XU Z J, CHEN W F. Development and prospect of carbonization and returning technology of agro-forestry residue. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2011, 42(4): 387-392. (in Chinese)
- [80] MARRIS E. Putting the carbon back: black is the new green. *Nature*, 2006, 442(7103): 624-626.
- [81] RENNER R. Rethinking biochar. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41: 5932-5933.
- [82] TENENBAUM D J. Biochar: carbon mitigation from the ground up. *Environmental Health Perspectives*, 2009, 117(2): A70-A73.
- [83] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324-3333. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2013.16.003.
- CHEN W F, ZHANG W M, MENG J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3324-3333. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2013.16.003. (in Chinese)
- [84] 陈温福, 张伟明, 孟军, 徐正进. 生物炭应用技术研究. 中国工程科学, 2011, 13(2): 83-89.
- CHEN W F, ZHANG W M, MENG J, XU Z J. Researches on biochar

- application technology. *Engineering Sciences*, 2011, 13(2): 83-89. (in Chinese)
- [85] 孟军, 陈温福. 中国生物炭研究及其产业发展趋势. *沈阳农业大学学报(社会科学版)*, 2013, 15(1): 1-5.  
MENG J, CHEN W F. Biochar in China: status quo of research and trend of industrial development. *Journal of Shenyang Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2013, 15(1): 1-5. (in Chinese)
- [86] CHEN W F, MENG J, HAN X R, LAN Y, ZHANG W M. Past, present, and future of biochar. *Biochar*, 2019, 1(1): 75-87.
- [87] 罗松平. 喀斯特黄壤养分化学计量和微生物群落对生物炭添加的响应[D]. 重庆: 西南大学, 2021.  
LUO S P. Response of nutrient stoichiometry and microbial community of Karst yellow soil to biochar addition[D]. Chongqing: Southwest University, 2021. (in Chinese)
- [88] ZHANG A, CUI L Q, PAN G, LI L Q, HUSSAIN Q, ZHANG X H, ZHENG J W, CROWLEY D. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139: 469-475.
- [89] SHRESTHA G, TRAINA S, SWANSTON C. Black carbon's properties and role in the environment: a comprehensive review. *Sustainability*, 2010, 2: 294-320.
- [90] ZHANG A F, LIU Y M, PAN G X, HUSSAIN Q, LI L Q, ZHENG J W, ZHANG X H. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. *Plant and Soil*, 2012, 351(1/2): 263-275.
- [91] BRASSARD P, GODBOUT S, RAGHAVAN V. Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: key parameters and mechanisms involved. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181: 484-497.
- [92] LI Y F, HU S D, CHEN J H, MÜLLER K, LI Y C, FU W J, LIN Z W, WANG H L. Effects of biochar application in forest ecosystems on soil properties and greenhouse gas emissions: a review. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(2): 546-563.
- [93] 何绪生, 张树清, 余雕, 耿增超, 高海英. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究. *中国农学通报*, 2011, 27(15): 16-25.  
HE X S, ZHANG S Q, SHE D, GENG Z C, GAO H Y. Effects of biochar on soil and fertilizer and future research. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(15): 16-25. (in Chinese)
- [94] 高海英, 陈心想, 张雯, 何绪生, 耿增超. 生物炭和生物炭基氮肥的理化特征及其作物肥效评价. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(4): 69-78, 85.  
GAO H Y, CHEN X X, ZHANG W, HE X S, GENG Z C. Physicochemical properties and efficiencies of biochar and biochar-based nitrogenous fertilizer. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2013, 41(4): 69-78, 85. (in Chinese)
- [95] 黄庆, 刘忠珍, 朱根发, 魏岚, 黄连喜, 李翔, 黄玉芬, 陈伟盛. 生物质炭基肥料及作物施用技术研究进展. *广东农业科学*, 2021, 48(1): 26-34.  
HUANG Q, LIU Z Z, ZHU G F, WEI L, HUANG L X, LI X, HUANG Y F, CHEN W S. Research progress in biochar-based fertilizer and its application technology for crops. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2021, 48(1): 26-34. (in Chinese)
- [96] 乔志刚. 不同生物质炭基肥对不同作物生长、产量及氮肥利用率的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.  
QIAO Z G. Effects of different biochar fertilizer on growth, yield and nitrogen utilizing rate of different crops[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [97] 杨芳芳. 盐碱胁迫下炭基有机肥对甜菜生长及其根际土壤特性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.  
YANG F F. Effects of biochar-based organic fertilizer on sugar beet growth and rhizosphere soil property under saline alkali stress[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [98] 金丹丹, 宫亮, 李波, 曲航, 孙文涛, 张文忠. 2种缓/控释肥对滨海盐碱地区水稻产量及氮代谢的影响. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 334-339.  
JIN D D, GONG L, LI B, QU H, SUN W T, ZHANG W Z. The effects of two slow/controlled release fertilizers on the productivity and nitrogen metabolism of rice in coastal saline-alkaline regions. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 334-339. (in Chinese)
- [99] 陈婧婷. 密度、炭基有机肥、氮肥交互作用对甜菜 (*Beta Vulgaris* L.) 氮素同化代谢的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.  
CHEN J T. Effects of density, carbon-based organic fertilizer and nitrogen fertilizer interaction on nitrogen assimilation metabolism in sugar beet (*Beta vulgaris* L.)[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [100] 张志浩. 生物炭基肥对三种类型植烟土壤微生物多样性及烤烟生长的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019.  
ZHANG Z H. Effects of biochar based fertilizers on microbial diversity and growth of flue-cured tobacco in three types of tobacco

- planting solis[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [101] 龚雪蛟, 秦琳, 刘飞, 刘东娜, 马伟伟, 张厅, 刘晓, 罗凡. 有机类肥料对土壤养分含量的影响. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1403-1416.
- GONG X J, QIN L, LIU F, LIU D N, MA W W, ZHANG T, LIU X, LUO F. Effects of organic manure on soil nutrient content: a review. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1403-1416. (in Chinese)
- [102] LATHROP E C. The organic nitrogen compounds of soils and fertilizers. Journal of the Franklin Institute, 1917, 183(2): 169-206.
- [103] HUNTLEY E E, BARKER A V, STRATTON M L. Composition and uses of organic fertilizers. Agricultural Uses of By-Products and Wastes, 1997, 668: 120-139.
- [104] 杨兴明, 徐阳春, 黄启为, 徐茂, 梁永红, 胡江, 冉炜, 沈其荣. 有机(类)肥料与农业可持续发展和生态环境保护. 土壤学报, 2008, 45(5): 925-932.
- YANG X M, XU Y C, HUANG Q W, XU M, LIANG Y H, HU J, RAN W, SHEN Q R. Organic-like fertilizers and its relation to sustainable development of agriculture and protection of eco-environment. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 925-932. (in Chinese)
- [105] 卢云峰, 许航, 斯天任, 高凯悦, 沈宗专, 李荣, 沈其荣. SQR9 复合微生物液体肥对玉米、白菜促生效果研究. 中国农学通报, 2019, 35(24): 29-35.
- LU Y F, XU H, SI T R, GAO K Y, SHEN Z Z, LI R, SHEN Q R. Growth promoting effect of sqr9 compound microbial liquid fertilizer on maize and cabbage. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(24): 29-35. (in Chinese)
- [106] 张奇, 张振华, 陈雅玲, 卢信. 施用生物有机肥对土壤特性、作物品质及产量影响的研究进展. 江苏农业科学, 2020, 48(15): 71-76.
- ZHANG Q, ZHANG Z H, CHEN Y L, LU X. Research progress on effects of application of bio-organic fertilizer on soil characteristics, crop quality and yield. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(15): 71-76. (in Chinese)
- [107] 刘珊珊, 夏萌, 胡夏茹, 王云舟, 李春雨, 陶成圆, 沈宗专, 张楠, 李荣, 沈其荣. 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. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4189-4196.
- LIU S S, XIA M, HU X R, WANG Y Z, LI C Y, TAO C Y, SHEN Z Z, ZHANG N, LI R, SHEN Q R. Effects of lime and ammonium carbonate fumigation coupled with bio-organic fertilizer application on banana fusarium wilt and bacterial community. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4189-4196. (in Chinese)
- [108] 安祥瑞, 江尚焘, 李焕苓, 秦献泉, 胡小璇, 陈廷速, 谢昶琰, 徐阳春, 董彩霞, 沈其荣. 减施化肥配施有机肥对荔枝生长、产量品质及肥料利用率的影响. 土壤, 2021, 53(6): 1174-1184.
- AN X R, JIANG S T, LI H L, QIN X Q, HU X X, CHEN T S, XIE C Y, XU Y C, DONG C X, SHEN Q R. Effects of reduced chemical fertilizer with organic fertilizer application on growth, yield, quality and fertilizer utilization rate in *Litchi*. Soils, 2021, 53(6): 1174-1184. (in Chinese)
- [109] 安祥瑞, 江尚焘, 谢昶琰, 徐阳春, 董彩霞, 沈其荣. 减施化肥配施有机肥对荔枝园土壤微生物区系的影响. 应用生态学报, 2022, 33(4): 1099-1108.
- AN X R, JIANG S T, XIE C Y, XU Y C, DONG C X, SHEN Q R. Effects of reducing chemical fertilizers combined with organic fertilizers on soil microbial community in litchi orchards. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(4): 1099-1108. (in Chinese)
- [110] 王孝芳, 梅新兰, 黄大鹏, 徐大兵, 杨天杰, 韦中, 徐阳春, 沈其荣. 生物炭载体联合有益菌防控番茄土传青枯病的效果研究. 土壤学报, 2022, 59(2): 536-544.
- WANG X F, MEI X L, HUANG D P, XU D B, YANG T J, WEI Z, XU Y C, SHEN Q R. Effects of probiotics with biochar as carrier inhibiting tomato soil-borne bacterial wilt. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(2): 536-544. (in Chinese)
- [111] 沈其荣, 史瑞和, 裴保义, 张耀栋. 有机肥氮素的矿化特征及其对水稻生长发育的影响. 江苏农业科学, 1990, 18(6): 34-36, 39.
- SHEN Q R, SHI R H, PEI B Y, ZHANG Y D. Mineralization characteristics of organic fertilizer nitrogen and its effect on rice growth and development. Jiangsu Agricultural Sciences, 1990, 18(6): 34-36, 39. (in Chinese)
- [112] 沈其荣, 沈振国, 史瑞和. 有机肥氮素的矿化特征及与其化学组成的关系. 南京农业大学学报, 1992, 15(1): 59-64.
- SHEN Q R, SHEN Z G, SHI R H. The characteristics of mineralization of nitrogen in organic manure and its relation to chemical composition of organic manure. Journal of Nanjing Agricultural University, 1992, 15(1): 59-64. (in Chinese)
- [113] 沈其荣, 徐慧, 徐盛荣, 曹翠玉. 有机-无机肥料养分在水田土壤中的转化. 土壤通报, 1994, 25(S1): 11-15, 66.
- SHEN Q R, XU H, XU S R, CAO C Y. Transformation of organic-inorganic fertilizer nutrients in paddy soil. Chinese Journal of Soil Science, 1994, 25(S1): 11-15, 66. (in Chinese)

- [114] 沈其荣, 余玲, 刘兆普, 菲泽圣. 有机无机肥料配合施用对滨海盐土土壤生物量态氮及土壤供氮特征的影响. 土壤学报, 1994, 31(3): 287-294.
- SHEN Q R, YU L, LIU Z P, MAO Z S. Effects of combining application of organic and inorganic nitrogen fertilizers on biomass nitrogen and nitrogen-supplying characteristics of coastal saline soil. Acta Pedologica Sinica, 1994, 31(3): 287-294. (in Chinese)
- [115] 沈其荣, 王瑞宝, 王岩, 徐国华, 余玲. 堆肥制作中的生物化学变化特征. 南京农业大学学报, 1997, 20(2): 51-57.
- SHEN Q R, WANG R B, WANG Y, XU G H, YU L. Biochemical characteristics of composting. Journal of Nanjing Agricultural University, 1997, 20(2): 51-57. (in Chinese)
- [116] 韦中, 沈宗专, 杨天杰, 王孝芳, 李荣, 徐阳春, 沈其荣. 从抑病土壤到根际免疫: 概念提出与发展思考. 土壤学报, 2021, 58(4): 814-824.
- WEI Z, SHEN Z Z, YANG T J, WANG X F, LI R, XU Y C, SHEN Q R. From suppressive soil to rhizosphere immunity: towards an ecosystem thinking for soil-borne pathogen control. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4): 814-824. (in Chinese)
- [117] SUN Y M, WANG M, MUR L A J, SHEN Q R, GUO S W. Unravelling the roles of nitrogen nutrition in plant disease defences. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(2): 572.
- [118] RAZA W, LING N, ZHANG R F, HUANG Q W, XU Y C, SHEN Q R. Success evaluation of the biological control of *Fusarium* wilts of cucumber, banana, and tomato since 2000 and future research strategies. Critical Reviews in Biotechnology, 2017, 37(2): 202-212.
- [119] ZHANG R F, VIVANCO J M, SHEN Q R. The unseen rhizosphere root-soil-microbe interactions for crop production. Current Opinion in Microbiology, 2017, 37: 8-14.
- [120] 于亚楠, 邬海燕, 王盼星, 丁明月, 马行聪, 姜斯琪, 蔡枫, 沈其荣, 陈巍. 木霉生物有机肥应用于滨海盐土甘蓝种植的生物效应. 土壤学报, 2022, 59(4): 1112-1124.
- YU Y N, WU H Y, WANG P X, DING M Y, MA X C, JIANG S Q, CAI F, SHEN Q R, CHEN W. Biological effect of Trichoderma-enriched biofertilizers on cabbage cultivation in coastal saline soil. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(4): 1112-1124. (in Chinese)
- [121] 范丙全. 我国生物肥料研究与应用进展. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1602-1613.
- FAN B Q. Advances in biofertilizer research and development in China. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(6): 1602-1613. (in Chinese)
- [122] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展. 生态环境学报, 2016, 25(1): 175-181.
- NING C C, WANG J W, CAI K Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: a review. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(1): 175-181. (in Chinese)
- [123] 武升, 邢素林, 马凡凡, 甘曼琴, 张俊森, 马友华. 有机肥施用对土壤环境潜在风险研究进展. 生态科学, 2019, 38(2): 219-224.
- WU S, XING S L, MA F F, GAN M Q, ZHANG J S, MA Y H. Review on potential risk of soil environment from organic fertilizer application. Ecological Science, 2019, 38(2): 219-224. (in Chinese)
- [124] WALLING E, VANEECKHAUTE C. Greenhouse gas emissions from inorganic and organic fertilizer production and use: a review of emission factors and their variability. Journal of Environmental Management, 2020, 276: 111211.
- [125] AGUILERA E, LASSALETTA L, SANZ-COBENA A, GARNIER J, VALLEJO A. The potential of organic fertilizers and water management to reduce N<sub>2</sub>O emissions in Mediterranean climate cropping systems. A review. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 164: 32-52.
- [126] LAZCANO C, ZHU-BARKER X, DECOCK C. Effects of organic fertilizers on the soil microorganisms responsible for N<sub>2</sub>O emissions: A review. Microorganisms, 2021, 9(5): 983.
- [126] 陈文新, 汪恩涛. 中国根瘤菌. 北京: 科学出版社, 2011.
- CHEN W X, WANG E T. Rhizobia in China. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [128] 刘鹏, 刘训理. 中国微生物肥料的研究现状及前景展望. 农学学报, 2013, 3(3): 26-31.
- LIU P, LIU X L. Current research status and prospect of microbial fertilizer in China. Journal of Agriculture, 2013, 3(3): 26-31. (in Chinese)
- [129] XIONG W, SONG Y Q, YANG K M, GU Y A, WEI Z, KOWALCHUK G A, XU Y C, JOUSSET A, SHEN Q R, GEISEN S. Rhizosphere protists are key determinants of plant health. Microbiome, 2020, 8(1): 27.
- [130] 杜瑞敏, 朱基琛, 籍婷婷, 侯翠红, 王好斌. 中微量元素肥料的研究现状及展望. 河南化工, 2018, 35(4): 3-6.
- DU R M, ZHU J C, JI T T, HOU C H, WANG H B. Research status and prospect of medium and trace element fertilizer. Henan Chemical Industry, 2018, 35(4): 3-6. (in Chinese)
- [131] 张丹, 张卫峰, 季玥秀, 肖艳, 陈新平, 张福锁. 我国中微量元素



- 肥料产业发展现状. 现代化工, 2012, 32(5): 1-5.
- ZHANG D, ZHANG W F, JI Y X, XIAO Y, CHEN X P, ZHANG F S. Development of medium and trace element fertilizer industry in China. Modern Chemical Industry, 2012, 32(5): 1-5. (in Chinese)
- [132] 刘勤, 赖辉比, 曹志洪. 不同供硫水平下烟草硫营养及对 N、P、Cl 等元素吸收的影响. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 63-68.
- LIU Q, LAI H B, CAO Z H. Effect of sulphate rates supplied on sulphur metabolism and n, p and cl absorption in tobacco. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(1): 63-68. (in Chinese)
- [133] 王东, 于振文, 樊广华, 潘庆民. 硫素对冬小麦品质和产量的影响. 山东农业科学, 2000, 32(6): 10-12.
- WANG D, YU Z W, FAN G H, PAN Q M. Effect of sulfur on quality and yield of winter wheat. Shandong Agricultural Sciences, 2000, 32(6): 10-12. (in Chinese)
- [134] 赵秉强. 增值肥料概论. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020.
- ZHAO B Q. Overview of Value-Added Fertilizer. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2020. (in Chinese)
- [135] 袁亮, 赵秉强, 林治安, 温延臣, 李燕婷. 增值尿素对小麦产量、氮肥利用率及肥料氮在土壤剖面中分布的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 620-628.
- YUAN L, ZHAO B Q, LIN Z A, WEN Y C, LI Y T. Effects of value-added urea on wheat yield and N use efficiency and the distribution of residual N in soil profiles. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(3): 620-628. (in Chinese)
- [136] 张英强, 袁亮, 张水勤, 李燕婷, 王立艳, 赵秉强. 葡萄糖改性尿素的反应特征及其对尿素转化率的影响. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(2): 325-333.
- ZHANG Y Q, YUAN L, ZHANG S Q, LI Y T, WANG L Y, ZHAO B Q. Reaction characteristics of glucose-modified urea and its effects on the urea conversion rate. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(2): 325-333. (in Chinese)
- [137] 张水勤. 不同腐植酸级分的结构特征及其对尿素的调控[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- ZHANG S Q. Structural characteristics of different humic acid fractions and their regulation on urea[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [138] 景建元, 袁亮, 张水勤, 李燕婷, 赵秉强. 腐植酸磷肥中的腐殖酸对磷迁移的影响及机理. 中国农业科学, 2021, 54(23): 5032-5042. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2021.23.009.
- JING J Y, YUAN L, ZHANG S Q, LI Y T, ZHAO B Q. Effects and mechanism of humic acid in humic acid enhanced phosphate fertilizer on fertilizer-phosphorus migration. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(23): 5032-5042. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2021.23.009. (in Chinese)
- [139] 孙凯宁, 袁亮, 李絮花, 林治安, 赵秉强. 增值尿素对氨挥发和土壤脲酶活性的影响. 山东农业科学, 2010, 42(6): 60-62, 71.
- SUN K N, YUAN L, LI X H, LIN Z A, ZHAO B Q. Effects of value-added urea on ammonia volatilization and soil urease activity. Shandong Agricultural Sciences, 2010, 42(6): 60-62, 71. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)