

中国生物肥料与有机肥料研究三十年：回顾与展望

张瑞福, 陈 玉, 孙新丽, 徐志辉, 缪有志, 张 楠, 刘东阳, 沈其荣*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏南京 210095)

摘要: 生物肥料与有机肥料是环境友好的绿色肥料, 在培肥耕地、改良土壤、提高农产品品质中发挥重要作用, 是支撑农业绿色发展、保障国家粮食安全的重要投入品。自 20 世纪中叶, 我国化肥工业的快速发展为促进粮食持续增产提供了充足的无机养分; 到 20 世纪 90 年代, 我国肥料投入中化肥占比达到最高, 有机肥料等的施用相应降至最低。对化肥的依赖导致了耕地质量退化、农田环境污染、农产品质量下降等一系列问题, 严重影响了我国耕地的可持续利用和农业可持续发展, 因此我国加大了对生物肥料与有机肥料的研究。三十年来, 我国生物肥料与有机肥料在基础研究、应用研究和产业化方面都取得了日新月异的进展。我国的生物肥料研究从最初的根瘤菌等固氮功能逐步扩展到溶磷解钾等活化养分功能, 进一步发展到消减土壤障碍与增强作物抗逆等非养分功能; 从单一菌种发展到多菌种及合成菌群, 产品类型从单纯的菌剂发展到生物有机肥和复合微生物肥料, 产业规模和技术水平显著提升。有机肥料研究从关注堆肥过程中的有机养分转化到提高堆肥效率的技术工艺和有害因子的消除与阻控等。近年来, 在“双碳”战略背景下, 清洁低碳堆肥以及通过施用有机肥快速提升土壤有机质、增加土壤固碳成为新的研究热点。本文对过去三十年我国生物肥料与有机肥料研究重点、代表性成绩、产业化路径等进行了全面回顾和总结, 新形势下国家农业发展重大战略需求以及科技的突破仍将支撑生物肥料和有机肥的快速发展, 由此提出了未来的一些研究重点。

关键词: 生物肥料; 有机肥料; 研究重点; 产业化

Biofertilizer and organic fertilizer research over thirty years in China: retrospect and prospect

ZHANG Rui-fu, CHEN Yu, SUN Xin-li, XU Zhi-hui, MIAO You-zhi, ZHANG Nan, LIU Dong-yang, SHEN Qi-rong*
(College of Resources and Environment Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: Biofertilizer and organic fertilizer are attributed to environmental-friendly green fertilizers because of their beneficial roles in improving farmland fertility and agricultural product quality, therefore, the application of biofertilizer and organic fertilizer are the key measurements for the green development of agriculture and the food security. The fast development of chemical fertilizer industry since the middle of last century provides substantial and cheap inorganic fertilizers for the sustained yield increasing. The proportion of chemical fertilizer in China's total nutrient input reached the peak, and the application of organic fertilizer went to the lowest in 1990s. The heavily relay on chemical fertilizer has caused a series of shortcomings, like the deterioration of farmland quality, the contamination of farmland and environment, and the decline of agricultural product quality, threatens the sustainable use of farmland and development of agriculture seriously. Thereby, Chinese government strengthens the research and policy support to biofertilizer and organic fertilizer, and great progresses have been made in the basic and applied research and industrialization of biofertilizer and organic fertilizer during the past thirty years. The biofertilizer function research in China has expanded from increasing nitrogen-fixation efficiency to phosphorus and potassium solubilization, and further developed to soil barrier reduction and crop stress resistance enhancement; biofertilizer products containing single strain have been replaced by those containing multi-strains and synthetic flora. And the product types have developed from simple bacteriotics to biofertilizers and composite

收稿日期: 2024-06-23 接受日期: 2024-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32172661)。

联系方式: 张瑞福 E-mail: rfzhang@njau.edu.cn; * 通信作者 沈其荣 E-mail: shenqirong@njau.edu.cn

microbial fertilizers. The industrial scale and technological level of biofertilizer production have been improved significantly. Organic fertilizer researches not only focus on the conversion of organic nutrients during composting process but also on the technologies improving the composting efficiency and the elimination and control of harmful factors. Under the background of “two-carbon” strategy in recent years, new hotspots have turned out on researching and application of clean and low-carbon organic fertilizers are required to rapidly improve soil organic matter content and carbon sequestration capacity. We reviewed the related research emphasis, representative achievements and the industrialization paths of biofertilizer and organic fertilizer in China for the past 30 years. The requirement of national strategy and the scientific breakthroughs will continue to support the development of biofertilizer and organic fertilizer under the new situation, and some research emphases are thus proposed in near future.

Key words: biofertilizer; organic fertilizer; research emphases; industrialization

肥料是粮食生产的重要保障。在漫长的人类历史中, 以农家肥为代表的有机肥料对提高作物产量、促进人口增长发挥着重要作用。化肥工业的兴起和发展使全球粮食生产能力快速提升, 传统的有机肥料逐渐退出肥料舞台, 作为有机肥原料的畜禽粪便和作物秸秆等农业废弃物被随地弃置而污染环境。到 20 世纪 90 年代, 我国农业生产养分投入中化肥占比达到历史最高。由于不合理的过量施用化肥, 尤其是化学氮肥, 导致耕地质量退化、农田环境污染、农产品质量下降等影响农业可持续发展的问题。为此, 我国加大了对生物肥料、有机肥料等绿色肥料的研究和政策支持, 生物与有机肥料从 20 世纪 90 年代逐渐开始进入规范化发展阶段, 并且随着我国保障粮食安全的需求以及农业生产中资源环境约束的矛盾逐渐加大, 生物与有机肥料在 21 世纪继续加快发展。尤其是党的十八大以来, 在国家粮食安全保障和农业绿色发展战略等国家重大需求驱动下, 在习近平生态文明思想指引下, 再加上科学技术的突破, 生物与有机肥料研究和产业发展取

得了重要进展, 研究水平整体进入国际前列。值此《植物营养与肥料学报》创刊 30 周年之际, 本文对我国生物与有机肥料 30 年来的研究进行分析总结, 并展望未来的研究重点。

1 我国生物与有机肥料研究和产业化在 20 世纪 90 年代逐渐步入正轨

随着我国化肥工业的蓬勃发展, 化肥以其养分含量高、起效快、施用方便等优点, 逐渐占据主流地位, 以农家肥为代表的有机肥料由于养分含量低、效果慢、施用成本高、有臭味等原因而逐渐消失, 到 20 世纪末, 我国养分投入几乎完全依靠化肥(图 1)。化肥的过量施用在保障粮食增产的同时也导致了一系列不利于土壤可持续利用和农业可持续发展的问題, 长期单一施用化学氮肥造成了土壤酸化板结, 土壤基础地力下降, 养分利用效率降低, 病虫害频发和农产品品质下降等一系列问题。在此背景下, 生物与有机肥的研究与应用逐渐受到重视, 我国生物与有机肥料研究与产业化开始提速, 逐渐

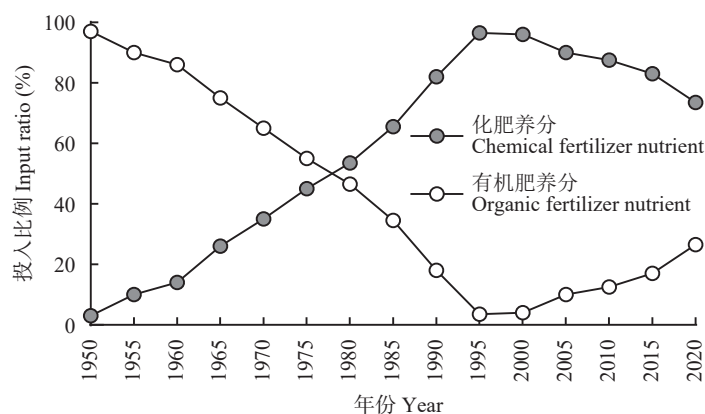


图 1 我国 70 年来化肥和有机肥养分投入比例变化

Fig. 1 The nutrient ratio from chemical and organic fertilizers in the past 70 years in China

步入正轨。

1.1 生物肥料研究以养分活化功能为主, 产业开始规范化发展

生物肥料是一类含有活的微生物的特定制品, 应用于农业生产中, 能够获得特定的肥料效应。制品中活的微生物对这种效应的产生起关键作用, 符合上述定义的制品均应归入微生物肥料^[1]。早期生物肥料的主要功能就是提供作物氮磷钾等养分, 国际上生物肥料的商业历史始于 1895 年的“nitragin”, 这是一种含有固氮根瘤菌菌株的制剂^[2]。20 世纪 50 年代, 溶磷细菌开始被用作生物肥料, 将土壤中的磷转化为可供植物利用的形态。我国生物肥料研究与应用起步于 20 世纪 50 年代初, 当时主要集中于大豆、花生和紫云英根瘤菌剂等产品研发。60 年代初, 陈华葵先生筛选出华葵根瘤菌等紫云英优良根瘤菌菌种, 建设了根瘤菌菌肥生产线, 开发了紫云英根瘤菌菌剂产品。通过推动绿肥种植和根瘤菌接种, 为中国水稻产量的提升做出了重要贡献。70 年代后期, 中国首次将根瘤菌的研究引入到分子生物学领域, 走在世界前列, 相关研究成果获 1986 年农业部科技进步一等奖^[3]。同期, 樊庆笙先生对根瘤菌的生理、生态和共生固氮体系进行深入研究。1987 年樊庆笙先生主持了“高效抗逆大豆根瘤菌构建”和“固氮基因重组”等国家级研究课题, 运用基因重组技术对根瘤菌进行了基因工程改造, 成功构建了高效、抗逆的大豆根瘤菌菌株, 显著提高了大豆在胁迫下的结瘤和固氮效率^[4]。20 世纪 90 年代, 化学氮肥的过量施用导致的一系列问题开始逐步显现。我国农业生产化肥利用率持续下降, 尤其是磷元素因易被土壤固定而利用率更低, 在固氮研究的基础上, 解磷菌研究逐渐增多。这期间我国先后选育了假单胞菌和多种芽孢杆菌组成的复合解磷菌剂。90 年代后期, 分子生物学技术开始在国内普及, 土壤细菌有机磷降解基因 *opaA* 和 *opd* 等相继被克隆, 一些磷酸盐调节基因 *phoA* 和 *phoB* 等的调控机制逐步被阐释, 解磷菌分子水平的研究成果也为解磷微生物肥料的制备提供了理论基础。

我国生物肥料产业与国外相比起步较晚, 在 20 世纪 90 年代之前, 我国生物肥料产业处于初级发展阶段, 仅有零星企业和产品。20 世纪 50 年代到 90 年代, 主要以根瘤菌接种剂的推广应用为主, 产品的剂型也由初期的试管或玻璃瓶装的琼脂剂型, 发展到后来用蛭石、草炭和其他基质进行吸附, 有效活菌数的含量也不断提高, 菌种经过筛选后, 其

作物促生效果也逐步提升^[5]。1995 年成立了农业部微生物肥料质量监督检验测试中心, 并由该中心负责微生物肥料产品市场准入登记和质量检测等工作, 1996 年原农业部将微生物肥料纳入国家检验登记管理范畴, 标志着我国生物肥料产业正式起步, 微生物肥料产品进入国家登记管理时代, 促进了企业技术研发, 生物肥料产业步入规范发展阶段^[6]。

1.2 商品化有机肥研究和产业加快起步

20 世纪 90 年代, 有机肥料的研究重点聚焦于堆肥过程中有机养分转化, 致力于通过引进和改良好氧与厌氧堆肥技术, 探索并优化堆肥原料复配比例和堆肥条件, 促进有机肥料养分的有效化。我国科学家揭示了好氧堆肥中氮素的矿化和挥发过程, 并通过堆肥条件的改进降低氮素损失。田间试验揭示了有机肥中氮素最终矿化为铵态氮的过程, 及其积累量与有效积温的关系, 对有机肥施用具有重要指导意义^[7]。基于有机肥速效养分含量不高的事实, 有机-无机肥配施技术在这一时期已开始受到关注, 有机-无机肥配施对碳、氮、磷等元素在土壤、微生物和作物间的周转规律的影响成为研究重点^[8-10]。此外, ¹⁵N 和 ¹³C 双标记技术的应用精确追踪了堆肥过程中以及有机肥施用后氮素和有机碳的动态变化, 推动了有机肥生产工艺的不断改进^[11]。

这一时期的研究为商业化有机肥的生产技术提高提供了理论指导, 为有机肥料产业的规范发展奠定了基础。20 世纪 90 年代, 随着有机肥生产技术的进步和社会主义市场经济的建立, 商品有机肥产业得到了快速发展。国家也出台了多项政策鼓励农业废弃物肥料化利用和有机肥产业发展, 如 1995 年, 原农业部在国务院 1988 年发布的“关于重视和加强有机肥料工作”指示的基础上, 发布了以积极制造、增施有机肥为核心的“沃土计划”, 并于当年夏季开始实施; 此外, 原农业部还推行了“绿色食品”和“无公害农产品”行动计划。这一时期我国商品有机肥的工业化生产工艺尚未完全成熟, 主要的生产技术包括: 1) 堆肥发酵 适宜于包括作物秸秆、畜禽粪便等在内的大部分农业废弃物, 生产时将物料调配至适宜的碳氮比和含水量进行自然好氧发酵, 企业根据自身场地和生产需求, 选择堆制成高堆静态发酵、堆成较小的条垛定期翻抛, 或在发酵槽内进行发酵。堆肥发酵简单易行, 可确保产品腐熟和质量稳定, 是大多数有机肥生产企业所采用的工艺; 不足之处是生产周期较长、占地面积大。2) 反应器发酵 适用于大部分农业废弃物, 将物料放置于参

数可控的发酵罐反应器内进行发酵。该技术发酵效率高、占地面积小、适宜工厂化生产,但固定资产投资和能耗高、处理量较小。3) 高温快速烘干 主要用于以畜禽粪便(如鸡粪)为原料的商品有机肥生产,其生产工艺是用高温气体对干燥滚筒中搅拌的新鲜粪便进行烘干。此方法能有效杀死粪便中的病原菌、虫卵等,周期短,易于工厂化生产;但能耗高、产品腐熟度差,且物料中部分有益微生物也被杀死。该时期经不同工艺生产的商品有机肥以粉剂为主,生产企业已开始初步尝试利用接种微生物加快堆肥进程,以及研发有机无机复混肥料^[12]。由于此时尚未制定有机肥料产品的国家或行业标准(仅有有机肥料中有机物、氮磷钾养分等指标测定的农业标准),市场上的有机肥产品整体质量参差不齐,有机肥企业也在探索中前行。

2 本世纪前十年我国生物与有机肥料研究和产业化发展迅速

进入 21 世纪以来,我国农业持续快速发展,肥料用量稳定增加,尤其是设施农业的急剧扩大和设施土壤的高强度利用引起了土壤板结、次生盐渍化,土传病害等土壤环境和健康质量退化问题,导致部分土壤的利用难以为继,土壤资源的可持续利用面临极大挑战,能为这些问题提供解决途径的生物与有机肥料研究和产业化也迎来了快速发展的黄金期。

2.1 生物肥料功能和产品类型逐渐多元化

基于我国农业生产实践需要,生物肥料的功能逐渐从养分活化向更多功能拓展,从豆科接种剂向非豆科接种剂、单一菌种向复合菌种、单养分功能向多养分功能、肥效功能向综合功能(如增强植物抗逆、拮抗土传病害、土壤污染修复、土壤生态功能调理等)发展。根际促生细菌如芽孢杆菌和假单胞菌分泌的脂肽类或聚酮类抗菌物质相继被鉴定,其中脂肽类化合物能抑制土传病原真菌生长并抑制真菌孢子萌发,聚酮类化合物能抑制土传病原细菌的生长。同时,根际有益菌还能在作物根表高效定殖,形成生物屏障。在经济作物田间应用中,利用根际促生细菌制成的生物肥料产品,能有效防控由于长期连作引发的黄瓜、西瓜、甜瓜和香蕉等枯萎病的发生。根际细菌能分泌包含 EPS (exopolysaccharides) 在内的大量胞外多聚物,研究发现胞外多聚物能促进土壤团聚、固持还原重金属以及吸附降解有机污染物,基于此可开发土壤污染修复生物肥料^[13]。例如,

土壤固氮菌产生的 EPS 可增加难溶有机污染物的分散性,增强疏水性污染物与细胞之间的亲和力,促使污染物更容易被降解^[14]。此外,根际有益细菌的代谢产物还能诱导作物的水杨酸和茉莉酸途径相关基因的表达,激活作物的系统抗性^[15]。增强植物抗逆、拮抗土传病害、土壤污染修复的生物肥料产品逐渐上市应用,生物肥料的产品类型进一步丰富^[16]。

在此期间,生物肥料标准体系逐步完善,生物肥料产业逐步形成规模。2000 年以来,农业部陆续出台了 30 多个微生物肥料标准,构建了由基础标准、菌种安全标准、产品标准、方法标准和技术规程 5 大体系的微生物肥料标准核心架构,为生物肥料产业的有序、快速发展提供了强有力的支撑^[6]。具有促生、抗逆和抗病的根际促生细菌如芽孢杆菌、假单胞菌、放线菌和黄杆菌等得到了广泛应用,其中芽孢杆菌的生物肥料登记产品迅速增多。在产品形式上,新增了生物有机肥和复合微生物肥产品类型,发挥生物肥料与有机肥料和化肥的协同增效作用。生物有机肥的简单生产方式是将腐熟有机肥与特定功能微生物进行混合,为了提高功能微生物的数量及其与有机肥的相容性,研发了通过添加营养进行二次固体发酵的生产技术,提高了生物有机肥品质,强化了添加菌种的环境适应能力^[5]。复合微生物肥料以功能微生物为核心,同时包含有机、无机物质和微量元素为基质载体组成的复混型生物活性肥料,在生产工艺上将功能微生物和它的活性代谢物用载体吸附后,再通过与粉碎的有机、无机物质以及作物必需的中微量元素和其他添加物复配造粒成型^[16]。至此,我国生物肥料产业形成了微生物菌剂、生物有机肥、复合微生物肥 3 大类、12 个品种的产品格局。

这一时期,一些对生物肥料产业有巨大推动作用的政策陆续实施。2009 年国务院颁布《促进生物产业加快发展的若干政策》(国办发【2009】45 号)。该文件将生物肥料列为绿色农用生物制品的重要产品,从政策、金融和管理等多方面给予支持。2009 年国家发改委启动了《绿色农用生物产品高技术产业化专项》(发改办高技【2009】536 号)。国务院 2010 年颁布的《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》(国发【2010】32 号),将生物肥料列为生物产业的主要产品之一,并提出“建设现代生物产业体系和生物安全保障体系,加快推进生物产业高端化、规模化、国际化发展,为国民经济和社会可持续发展做出更大贡献”的总目标。这些政策的实

施是国家支持生物肥料产业的具体体现,更为生物肥料产业的高速发展奠定了基础。

2.2 有机肥料研究以提质增效为主要目标

随着我国农业的持续发展和养殖业集约化程度的加大,我国成为了世界上农业废弃物产生量最多的国家,但综合利用率不高,环境污染严重。农业污染已成为制约农业可持续发展的重要因素,大量的作物秸秆和畜禽粪便被随意弃置不仅严重破坏了农业生态环境,也造成了资源的极大浪费。另外,有机肥料生产原料中的有害因子也成为关注的热点,以农业废弃物为载体的有害因子涉及生物污染和非生物污染,囊括传统污染和新型污染,种类繁多,环境效应复杂,安全控制机理不明,严重制约了农业废弃物的有效利用和有机肥料的发展。因此本世纪前十年,农业废弃物的高效无害化处理是有机肥研究的主要方向,这期间发展了包括高效接种剂、有害物质消减、昆虫转化在内的多种新技术。

传统的有机肥生产工艺堆肥周期长、过程不易控制、难以在短期内消耗如此巨大体量的有机废弃物。因此,需要开发高效的堆肥接种剂,进行堆肥过程的人工调控。我国科学家研发出适合于畜禽粪便、食用菌下脚料、酒糟、中药渣堆肥快速升温的系列微生物“起爆剂”,使用该“起爆剂”后,固体有机废弃物堆肥发酵启动时间缩短至 48 h 以内,并能够促进堆肥快速升温 and 合成腐殖质,效率提高 40%^[17]。此外,通过研究堆肥过程纤维素类物质的降解机理及其主要成分变化规律,分离筛选了具有纤维素酶活性的嗜热细菌,建立了人工快速腐熟畜禽粪便的菌群。

重金属、抗生素、抗性细菌和抗生素抗性基因(antibiotic resistance genes, ARGs)是农业废弃物携带的主要有害因子。有机肥中的 ARGs 及抗生素通过施肥进入土壤后,前者可通过基因转移进入土壤微生物群落,后者可对土壤细菌产生选择压力,从而导致抗性微生物在农田土壤中的持久存在。ARGs 伴随抗性细菌的增殖在环境中滞留、传播和扩散,并可通过基因移动元件(mobile genetic elements, MGEs)将抗性水平转移进入人体或动物致病菌,甚至产生“超级细菌”,降低现有抗生素的疗效。因此,这一时期有机肥中有害因子的消除开始受到关注,传统的堆肥技术并不能有效地消除重金属类有害物质,仅仅是通过降低重金属活性或生物有效性,使其向钝化形态转化。而抗生素等有机污染物主要通过调整堆肥的温度、含水率、C/N、pH 等方式来降低有害因子的生物有效性^[16]。因此,在本世纪初,对各类

有害因子的浓度、形态、载量、影响因素及环境效应和归趋的全面研究与协同治理的工作逐渐增加,同时对新型有害因子的预警体系、有害因子的赋存状态与环境归趋等污染特征及传统的资源化利用过程中污染因子的消长机制的研究逐渐增多,但仍缺乏深入了解。

这一时期为解决有机废弃物含水率高及堆肥品质提升的问题,引入了通过微生物和昆虫的联合作用将有机废弃物“定向地”转化为虫体蛋白和虫粪有机肥的生物转化技术,即昆虫转化堆肥技术。我国很早就开展了用家蝇处理猪粪的研究,但直到本世纪初才开始研究用蝇蛆处理畜禽粪便污染的生物技术,研究表明,每生产 1 t 活体蝇蛆,可处理利用环境中 7 t 以上的猪粪等。昆虫转化技术具有改善堆体生化特性,保留堆体中有益的养分物质,消减病原菌、臭气、渗滤液以及温室气体排放等方面的能力,逐渐得到广泛的应用。并根据一般昆虫幼虫阶段食腐、周期短等特性,这一时期主要开发出黑水虻堆肥和蝇蛆堆肥两种昆虫转化堆肥技术。

有机肥产业方面,税收优惠与工艺升级助推有机肥行业百花齐放,突飞猛进。进入 21 世纪后,我国养殖业集约化程度越来越高,环境压力逐渐增加,同时土壤基础地力日趋下降、障碍因子频发,对有机肥产品的需求更加强烈。在此背景下,国家对商品有机肥的政策支持力度不断加大。2002 年,原农业部颁布了有机肥料行业标准(NY525—2002),标志着商品有机肥流通正式进入标准化时代。2004 年,原农业部颁布了生物有机肥行业标准(NY884—2004),促进了此类产品的快速发展。2004 年起,中央一号文件多次提出鼓励增施有机肥,改良土壤、培肥地力。自 2009 年起,原农业部、财政部连续 5 年制定《土壤有机质提升补贴项目实施指导意见》,开展有机肥补贴试点^[18]。2008 年,财政部、国家税务总局重磅发布《关于有机肥产品免征增值税的通知》(【2008】56 号),对生产销售和批发、零售有机肥及生物有机肥产品免征增值税^[19]。

在 21 世纪前十年,随着新世纪我国科学技术的快速发展,商品有机肥的生产技术也有了长足的进步,特别在生产装备方面不断突破,促使产品的工业化生产更加标准化、规模化^[20]。该阶段商品有机肥的生产工艺主要归纳为 3 种^[21]: 1) 条垛式堆肥 将混合好的堆肥原料堆成条垛,通过机械周期性地翻抛进行发酵。有机肥企业与科研单位合作,在仿制基础上进一步自主研发,生产出集粉碎、供水和水

分散失等功能为一体的自走式翻抛机,与 20 世纪 90 年代的高堆静态堆肥或铲车翻堆相比,显著提高了翻堆效率和质量。条垛式堆肥设备运行简便、堆体升温迅速、发酵均匀彻底,但易受气候环境影响、臭气不易控制、占地面积大;整体上更适宜在南方空气湿度较大的区域进行生产。2) 槽式堆肥 堆肥原料在类似“槽”的水泥墙内进行发酵;槽壁上方铺设轨道并安装可对物料进行搅拌的翻堆机;槽的底部一般铺设曝气管道。槽式堆肥工艺的主要特点是处理量大、机械化程度高、水分散失慢等;但主要缺点是操作复杂、固定资产投资成本高以及臭气不易控制等;一般在我国空气干燥的北方地区应用较多。3) 反应器发酵 常见的堆肥反应器包括筒仓式、滚筒式、槽式和塔式等类型。该阶段堆肥反应器集进出料、曝气、搅拌和除臭等功能于一体,装置的各项功能和指标都有了明显提升。反应器堆肥工艺自动化程度和发酵效率高、不受气候环境影响、臭气易控制、占地面积小;但也存在着能耗高、单体处理量小等不足;一般比较适宜养殖场配置以处理产生的畜禽粪便。除 3 种常规堆肥工艺以外,部分企业开始尝试覆膜堆肥工艺,即用特定的膜材料覆盖堆体,并在底部或侧面通过通风系统供氧。覆膜堆肥的保温和保水效果较好、臭气散发少、占地面积和投入小;但可能存在着堆体局部供氧不足、潮湿地区水分散发慢等问题。膜材料是覆膜堆肥的核心,常规的塑料膜等材料在透水透气性上不能完全满足生产需求,而近年来新兴的 ePTFE 材料(聚四氟乙烯为原料经膨化拉伸并夹持在两层聚氨酯基材膜中)具有高坚固性、透水选择性(堆体水蒸气可蒸发而外界雨水无法进入)、气体选择性(堆肥中的硫化氢等臭气无法透出)等特点,且结合智能系统监控堆体发酵参数并进行反馈,大大提高了发酵效率。

在堆肥设备与工艺升级的基础上,有机肥生产企业开始广泛接种具有快速起爆、木质纤维素降解等功能的腐熟菌剂(有机物料腐熟菌剂执行行业标准 NY 609—2002),以加快物料升温、纤维素/半纤维素/木质素分解和腐殖化过程,从而提高堆肥效率与质量^[22]。针对有机肥生产过程中产生的臭气和环保问题,龙头企业逐步开始配备臭气收集装置和基于化学、生物处理等不同策略的除臭设备,保障了有机肥生产过程中的环境清洁。

除了原料发酵工艺和生产过程控制的快速升级和标准化以外,21 世纪前十年我国在有机肥料新型产品研发方面也突飞猛进。有机肥企业逐渐完善了

造粒工艺,研制出施用更加方便、特别适宜于大面积平原机械化撒施的颗粒性有机肥产品,与此相配套的有机肥撒施设备也逐渐得到广泛应用^[23];有机无机肥料复混工艺更加成熟,有机无机复混肥开始在有机肥市场中占据较大比例[有机-无机复混肥料行业标准(NY 481—2002)于 2002 年颁布]。

在国家各项优惠政策鼓励和生产工艺升级的影响下,我国有机肥行业在本世纪前十年进入了如火如荼的发展阶段,有机肥企业如雨后春笋般出现,产品生产规模和产值也不断攀升。据 2002 年调查统计,我国有 500 多家有机肥料生产企业,总产能约为 500 多万 t(实际产量 200 多万 t),各类产品 506 个,其中常规商品有机肥、有机无机复混肥和生物有机肥产品分别占比 31%、58% 和 11%;生产企业主要分布在广东、江苏、山东等经济发达和资源丰富的地区,约占全国 2/3^[24]。至 2008 年,全国共有商品有机肥企业 3021 家,年设计总产能 4742 万 t,年实际产量近 2500 万 t;大部分企业的年产量在 1 万 t 左右,年产量大于 2 万 t 的企业不足所有企业数量的 1/5。在各类型产品方面,常规商品有机肥企业 1723 家,有机肥生产量 1115 万 t;有机无机复混肥料企业 1011 家,有机无机复混肥料产量 920 万 t;生物有机肥企业 270 家,生物有机肥产量 345 万 t^[20]。有机肥的年销售额也从 2004 年的 35 亿元左右快速增长至 2010 年的 320 亿元左右。

3 国家需求与技术突破驱动我国生物与有机肥料近十多年深入发展

党的十八大以来,我国实施了农业绿色发展、美丽乡村建设、“双碳”等一系列与农业和生态环境有关的重大战略,对生物与有机肥料的需求更为紧迫;另外,国内外在微生物组学、合成生物学等技术上的突破,也为生物与有机肥料的深入发展提供了技术支撑,我国生物与有机肥料近十多年获得了深入发展。

3.1 生物肥料研究和产业化进入全新发展阶段

近十多年来,中国科学家在生物肥料基础研究方面取得了许多世界领先的成果,涵盖了根瘤菌共生固氮、丛枝菌根真菌与宿主互作及解磷、非共生益生菌根际定殖及功能发挥,以及作物微生物组与合成菌群等多个方面,推动我国生物肥料进入一个全新的发展阶段。

我国科学家在揭示根瘤菌与豆科植物共生的分

子机制方面取得了显著进展,揭示了豆科植物中 SHR-SCR 干细胞程序如何响应根瘤菌信号,促进根皮层细胞分裂,从而实现与根瘤共生的机制^[25]。利用单核转录组技术,对苜蓿根部进行了高分辨率的时空分析,揭示了共生菌感知与响应的分子机制^[26]。此外,还发现了光诱导大豆茎部活性物质能够调节植物根系对根瘤菌的感知,促进根瘤形成,显著提高固氮效率^[27]。我国科学家发现大豆根瘤的能量状态感受器蛋白在不同结瘤能量状态下,调控糖酵解中间产物在共生固氮和植物细胞自身利用方向的分配^[28]。这些研究有助于改良根瘤菌-豆科植物共生体系,提高豆科植物的固氮效率。我国科学家通过基因编辑精准调控根瘤数量,实现了碳氮平衡的高效固氮,从而在大田种植条件下大幅提高大豆的产量和蛋白含量,提出了“优化结瘤固氮促进高产优质”的精准育种新思路^[29]。

菌根真菌 (AMF) 与宿主植物的相互作用在磷吸收中发挥着重要作用。我国科学家通过基因组分析,揭示了 AMF 在磷饥饿条件下与植物的相互作用机制^[30]。传统上认为,植物转移给 AMF 的主要营养物质是碳水化合物,然而我国科学家证明植物通过合成脂肪酸来维持菌根定殖^[31]。此外,还发现植物分泌溶菌素促进与 AMF 的共生,提升植物吸收土壤磷的能力^[32]。这些研究成果为菌根真菌生物肥料的研究和应用提供了坚实的理论支撑。

非共生根际益生菌是我国生物肥料的主要生产菌种,尤其是根际益生芽孢杆菌。在非共生根际益生菌方面,我国科学家同样取得了引人注目的成就,系统揭示了贝莱斯芽孢杆菌根际初始粘附、趋化、定殖、抗病的分子机制^[33-35],为提高生物肥料的促生效果提供了重要指导。针对联合固氮生物肥料高效固氮和泌氮的难题,我国科学家对多种联合固氮菌进行了筛选和研究,例如,揭示了施氏假单胞菌的固氮基因特征,并发现新型调控非编码 RNA 对固氮能力的影响,提供了优化固氮菌基因调控新思路^[36]。此外,发现圆柏类芽孢杆菌在氨存在下仍能有效固氮,显著提高了土壤氮素利用效率,促进了作物的生长发育^[37]。

作物微生物组技术的进步,推动我国生物肥料发展进入一个全新的阶段。自 2016 年美国提出国家微生物组计划后,我国也相应推出了包括农业微生物组计划在内的多领域微生物组计划,为开发生态稳定的合成菌群生物肥料奠定了理论基础。我国科学家发现籼稻根系富集的氮代谢功能细菌显著改善

了其在有机氮条件下的生长,此外也证明玉米根系分泌的黄酮类化合物能够促进草酸杆菌科细菌在根际的富集,从而增强玉米在缺氮条件下的生长^[38-39]。基于作物微生物组研究,在合成菌群生物肥料开发方面取得了显著进展,例如,我国科学家构建了一个由高度抗铝菌株组成的合成菌群,能够降低土壤中的铝毒性,提高水稻的抗逆性^[40]。基于“核心菌株攻敌、其他成员增效”的独特合作模式与作用机制,构建了抑制玉米种传镰刀菌的合成菌群,具有巨大的科研价值和应用前景^[41]。

这些基础研究成果不仅在学术上具有重要意义,也为解决农业生产问题提供了新的方案。基于这些基础研究的突破,创新生物肥料的应用前景更加广阔,推动了绿色可持续农业的发展,并为实现“双碳”战略目标提供了坚实的科学支撑。农业绿色发展是关乎国计民生的重大需求,已成为未来农业发展的必然趋势。而以高效、生态、可持续和高附加值为标志的现代绿色农业生产离不开安全、环保、高效的生物肥料保驾护航。党的十八大以来十多年是生物产业发展的黄金期,生物肥料基础研究实力迅速提高,国内生物肥料生产能力逐年提升,菌种种类和产品种类逐渐增多。生物肥料成果“克服土壤连作生物障碍的微生物有机肥及其新工艺”获 2015 年度国家技术发明奖二等奖,代表我国生物肥料研究和产业化进入新的水平。2014 年发布的《关于简并增值税税率政策的通知》(财税【2014】57 号)和国家税务总局第 36 号公告等,规定生物有机肥免增值税、其他生物肥料产品按照生物制品收 3% 增值税,为生物肥料产业发展提供了财税支持。2015 年原农业部制定了《到 2020 年化肥施用量零增长行动方案》,明确生物肥料是实现该行动的重要替代品,其作用也越来越凸显,对保障国家粮食安全、农产品质量和农业生态安全具有十分重要的意义。2015 年以后的中央一号文件中均提出大力推广生物肥。这些利好的政策与措施,推动我国生物肥料产业的高速发展。当前,我国每年生物肥料应用面积累计近 3 亿 hm^2 (45 亿亩),基本覆盖所有作物,在“药肥双减”的政策背景下,生物肥料已切实成为实现粮食丰产、稳产的重要保障。

3.2 有机肥料研究聚焦生产过程的低碳清洁和快速培肥土壤的机制

近十多年来,有机肥料的研究更加注重生产过程的清洁低碳、腐殖化过程的调控与强化、应用后土壤有机质快速提升机制等科学问题,取得了显著

的研究成果, 也有力的支撑了有机肥产业的技术进步。

好氧堆肥所产生的二氧化碳、氧化亚氮、甲烷是全球温室气体的主要排放源之一。研究较多的减排措施包括堆肥理化参数调节、添加堆肥改良剂以及开发先进的堆肥工艺。在调节堆肥理化参数方面, 降低含水率、提高堆体孔隙度能够增加堆体氧含量, 从而减少氧化亚氮和甲烷的生成; 在添加堆肥改良剂方面, 接种微生物菌剂例如固氮菌后, 可以显著降低氨挥发以及其他含氮氧化合物的排放。研究发现, 将生物炭、沸石以及木醋液混合使用可以分别减少 34%~47%、50%~61% 和 79%~81% 的 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放量, 这是由于添加剂的吸附性和与木醋结合的生物过滤效应^[42]。添加堆肥干重 0.2% 的双氰胺和 10% 的磷石膏影响硝化过程进一步降低 N_2O 排放^[43]。由于生物炭具有疏松多孔、吸附性强的性质, 添加 10% (w/w) 生物炭能改善曝气, 降低产甲烷菌活性^[44]。维苏威石的添加使有机质降解的相关酶活性增强, 与生成 CH_4 相关的辅酶活性减弱, 减少了 33.6% 的 CH_4 累计排放量^[45]。高剂量亚硒酸盐的添加也能减少 N_2O 的排放^[46]。添加堆肥干重 3.3%~6.6% 的过磷酸钙能减少 22.2%~27.7% 的 N_2O 和 22.4%~62.9% 的 CH_4 排放量^[47]。在改良堆肥工艺方面, 封闭式堆肥技术相较于传统好氧堆肥有利于收集处理温室气体。近年来兴起的分子膜覆盖堆肥技术, 甲烷排放下降了 40%, 氨排放减少 20%~30%, 堆体产生的水汽在半透膜内表面生成水膜能阻挡氨气的外逸, 使其返回堆体供异养型固氮微生物利用, 减少 N_2O 的生成^[48]。

高温好氧堆肥实质是有机物转化和腐殖质合成的过程, 堆肥中稳定腐殖质含量高低直接决定了堆肥质量, 强化堆肥的腐殖化过程、提高有机肥腐殖质含量一直是有机肥研究的重要目标, 更是近十多年的研究热点。强化堆肥腐殖化的调控技术包含优化堆肥条件、使用功能添加剂和新兴辅助策略等。堆肥条件如含水率、碳氮比、供氧量、pH、温度、堆肥物料的选择决定了堆肥腐熟进程, 综合调控下有助于实现腐殖质的高效积累^[49]。一些功能添加剂, 如常规调理剂、微生物菌剂、无机材料和外源腐殖质前体等, 能够增加腐殖质生成效率^[49-53]。此外, 辅助策略如超高温预处理堆肥 (HPC)^[54]、超高温堆肥 (HTC)^[55]、电厂辅助好氧堆肥 (EAC)、分子膜堆肥技术等, 在促进腐殖质快速形成方面发挥作用。目前总结有 6 个关于腐殖质形成的相关假说, 即微生物合成假说、木质素-多酚假说、木质素假说、糖-胺

缩合假说、多酚假说和细胞自溶假说^[50, 56-59]。然而, 目前对腐殖质形成的途径与机制理解依然有限, 对堆肥腐殖质形成过程中的关键微生物转化和酶化学合成机制的认知更是缺乏, 这一科学问题仍将是有机肥料研究的重要课题。

施用有机肥的主要目的是提高土壤有机质含量、改良土壤结构。然而, 有机肥施用后在土壤中不稳定, 易氧化, 土壤有机质含量提升速度慢。近十多年, 有机肥施用后土壤有机质提升的机制也成为研究关注点。有机肥等外源碳引起激发效应 (priming effect), 刺激土壤旧有机碳 (soil organic carbon, SOC) 的分解, 但新碳的补充显著高于旧 SOC 损失, 从而促进土壤 SOC 积累^[60], 这一现象在草地生态系统尤为明显^[61]。有机肥施用不仅改善了土壤团聚体结构, 还通过增强有机物-铁结合和降低酚氧化酶活性, 激活了“铁门”和“酶锁”机制, 从而在稻麦轮作系统中启动一种有利于土壤 SOC 固存的正反馈循环^[62]。金属矿物的螯合作用是土壤有机碳稳定和固存的重要机制之一。有机肥施用能够促进 CaCO_3 向可交换钙的转化, 形成有机物-钙复合物, 改善土壤大团聚体结构^[55, 63]; 同时促进土壤中短程有序 (short-range-ordered, SRO) 矿物的形成, 调节有机矿物复合体的组装^[55, 64]; 此外, 还能刺激非晶质矿物 (Fe, Mo 和 V 等) 和芳香碳组分的形成, 无论土壤类型如何, 这都有助于提高土壤的长期 SOC 固存能力^[65]。除此之外, 有机肥施用能够增加土壤微生物残体含量, 微生物周转效应中微生物的碳源利用效率是外源输入碳向土壤稳定有机碳转化的关键驱动因素^[66]。

目前, 我国有机肥产业呈现出蓬勃发展的态势。随着农业绿色发展和高标准农田建设的推进, 有机肥作为环保、高效的肥料类型, 其市场需求持续增长。政府也出台了一系列政策来支持有机肥产业的发展, 包括财政和税收支持、设立生产质量奖励制度、加强质量监测体系等。有机肥的主要原料来源于养殖、种植和农产品加工和生活废弃物, 这些原料富含有机质和多种营养元素, 为有机肥生产提供了丰富的物质基础。在供需布局方面, 有机肥行业关注原材料供应的稳定性、生产加工的效率和成本控制, 以及销售渠道的拓展和客户关系管理等方面。有机肥在农业、林业、园林绿化等领域的应用也越来越广泛, 这为企业提供了广阔的市场空间。此外, 科技创新也是推动有机肥产业发展的重要因素。利用科技手段改进生产工艺和质量控制, 提高产品的稳定性和效果, 以及开发深加工产品以

满足不同农作物的需求,都是有机肥产业未来的发展方向。总体而言,我国有机肥产业在政策支持和市场需求的双重推动下,正迎来高速发展的机遇,随着技术的不断进步和 market 需求的持续增长,有机肥产业有望为我国农业的绿色发展做出更大的贡献。

4 生物与有机肥料未来研究展望

4.1 新时期保障国家粮食安全和生态文明建设对生物与有机肥料需求更大

习近平总书记指出:“粮食安全是‘国之大者’”,“耕地是粮食生产的命根子,是中华民族永续发展的根基”,“解决粮食安全问题,关键在于藏粮于地、藏粮于技,要害是种子和耕地两个问题”。我国耕地地力低,中低产田占全国耕地面积的 70%,障碍退化耕地占比高达 40%,粮食生产能力面临着下降的风险。我国耕地土壤有机质含量平均值为 18.63 g/kg,仅为世界平均水平的 57%,远远低于发达国家和南美部分发展中国家,耕地基础地力对粮食生产的贡献率仅为 50%,远低于美国的 80%。提升耕地质量、建设高标准农田、保障国家粮食安全是新时期国家重大战略需求,将进一步推动有机肥料的研究与应用。

2024 年中央一号文件明确提出,要加强农村生态文明建设,持续打好农业农村污染治理攻坚战,加强农业废弃物资源化利用。我国是世界上农业废弃物产出量最大的国家,目前我国畜禽粪便年产量 38 亿 t、农作物秸秆年产量 9 亿 t。这些农业废弃物资源折算成氮磷钾养分约 6000 万 t,若将农业废弃物的有机养分资源充分利用,预计可替代我国 50%~70% 的化肥养分。进一步通过科技创新大幅提高农业废弃物生产有机肥料的利用率,不仅保护了农村生态环境,而且减少化肥使用,提高耕地质量。

发展有机肥料是助力我国“双碳”目标实现的迫切需要,增施有机肥料是增加农田土壤碳汇最关键的可行途径。农业土壤具有巨大的固碳减排潜力,在助力实现“双碳”目标中扮演重要角色。据测算,如果我国 1.2 亿 hm^2 (18 亿亩) 耕地每年通过施用有机肥料,耕层土壤有机碳每年递增 0.1%,每年可以固定 15 亿 t 左右的 CO_2 ,农业土壤可为我国实现碳中和贡献约 15% 的碳汇份额。

我国现有生物肥料生产企业近 4000 家,年产量超过 3500 万 t,年产值达 400 亿元以上,已经成为肥料家族的重要成员,在部分替代化肥、推动农业绿色发展方面发挥了重要作用。然而,生物肥料在

我国整体肥料产业中占比较低,与欧美发达国家及巴西、阿根廷等国约 20% 占比相比,我国生物肥料产业发展空间巨大。制约我国生物肥料产业发展的主要瓶颈包括优异生产菌种匮乏、新型功能生物肥料产品缺乏等。我国提出在“十四五”时期,生物技术和生物产业加快发展,生物经济成为推动高质量发展的强劲动力,要求通过推动生物农业产业发展提高农业生产效率,发展绿色农业。随着我国农业发展对“绿色化”的需求逐步提高,生物肥料技术与产业发展也呈现加快趋势。

4.2 生物与有机肥料未来研究重点

我国农业绿色发展实践和当今科技的快速发展为生物与有机肥料的研究提供了难得的机遇。为攻克生物与有机肥料研究中的一些难点和卡脖子技术,今后一段时期生物与有机肥料的研究应在以下方面继续加强。

1) 有机肥料生产原料中有害因子的阻控与消减。针对农业废弃物中重金属、塑料、残留抗生素、耐药基因、病原菌、致病病毒、害虫虫卵、杂草种子等有毒物质和有害生物的快速识别检测和高效消减机理不清、技术缺乏等问题,研究不同污染物及有害生物的赋存形态、传播机制、演化规律,开发快速识别与检测技术,建立有毒物质与有害生物数据库,揭示重金属、塑料、残留抗生素的毒理效应、生物转化与调控机制,研究有害因子高效消减技术,实现农业废弃物中有害因子消减的重大理论与技术突破。

2) 农业废弃物好氧堆肥过程中有机碳固存机制与腐殖质定向调控。在实现农业“双碳”目标和有机肥提质增效需求驱动下,堆肥过程中固碳减排和腐殖化过程的定向调控仍然是重要的目标。在基础研究方面,进一步阐释有机废弃物好氧堆肥中有机碳转化、固存、腐殖化过程的微生物学机制,在技术上,研究定向调控的技术途径。

3) 有机肥料的土壤固碳效应与机制。针对有机肥料施用后土壤固碳效率不高,有机碳累积规律不明确及其周转的微生物机制不明晰等问题,聚焦土壤微生物主导的有机质分解、转化和固定过程,通过研究有机肥料的土壤固碳培肥效应,提出有机肥料施用后的土壤有机质快速提升与稳定维持的技术途径,实现耕地地力和土壤碳库有效提升的重大突破。

4) 新型功能生物肥料研究。针对我国盐碱、酸化等障碍土壤多、高温干旱等农业灾害天气频繁等农业生产限制因素,充分利用微生物提高作物耐盐

碱、干旱、高温、寒潮、酸化等非生物胁迫的能力,在传统的以养分活化功能之外,研发增强作物抵抗非生物胁迫的新型功能生物肥料产品,实现增强作物抗逆新型功能生物肥料产业化,提高我国盐碱、酸化等障碍耕地作物产量,保障灾害天气下作物稳产。

5) 适合水肥一体化施用的新型生物与有机肥料研究。水肥一体化是今后农业水肥管理的发展趋势,既能节省施肥成本,又能充分发挥水肥协同效应,提高肥料利用效率,在生产实践中越来越普及。水肥一体化的前提是肥料的完全水溶性,这对有机肥和生物有机肥是个挑战,需要攻克水溶性有机质高效制取技术。

参 考 文 献:

- [1] 陈华葵. 微生物和土壤的实效肥沃性[J]. 中国农业科学, 1953, (5): 214–217.
Chen H K. Microbial and edaphic effective fertility[J]. Agricultural Science in China, 1953, (5): 214–217.
- [2] Singh M, Singh D, Gupta A, *et al.* Plant growth promoting rhizobacteria: Application in biofertilizers and biocontrol of phytopathogens[A]. Singh A K, Kumar A, Singh P K. PGPR amelioration in sustainable agriculture: Food security and environmental management[M]. Cambridge, MA: Elsevier, 2019.
- [3] 李季伦. 我国生物固氮研究的现状和对策: 科技进步与学科发展[A]. “科学技术面向新世纪”学术年会论文集[C]. 北京: 中国科学技术协会, 1998.
Li J L. Research status and countermeasures of biological nitrogen fixation in China: Scientific and technological progress and discipline development[A]. Proceeding of the annual conference “Science and Technology Facing the New Century” [C]. Beijing: China Association for Science and Technology, 1998.
- [4] 樊庆笙. 固氮微生物学[M]. 北京: 农业出版社, 1993.
Fan Q S. Microbiology of nitrogen fixation[M]. Beijing: Beijing Agriculture Press, 1993.
- [5] 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.
- [6] 沈德龙, 李俊, 姜昕. 我国微生物肥料产业现状及发展方向[J]. 中国农业信息, 2014, (18): 41–43.
Shen D L, Li J, Jiang X. Current situation and development direction of microbial fertilizer industry in China[J]. *China Agricultural Information*, 2014, (18): 41–43.
- [7] 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[J]. 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[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1992, 15(1): 59–64.
- [8] 沈其荣, 余玲, 刘兆普, 茆泽圣. 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[J]. 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[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31(3): 287–294.
- [9] 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[J]. 土壤通报, 1994, 25(7): 11–15.
Shen Q R, Xu H, Xu S R, Cao C Y. Conversion of organic-inorganic fertilizer nutrients in paddy soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1994, 25(7): 11–15.
- [10] 王岩, 沈其荣, 史瑞和, 黄东迈. 有机、无机肥料施用后土壤生物量 C、N、P 的变化及 N 素转化[J]. 土壤学报, 1998, 35(2): 227–234.
Wang Y, Shen Q R, Shi R H, Huang D M. Changes of soil microbial biomass C, N and P and the N transformation after application of organic and inorganic fertilizers[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(2): 227–234.
- [11] 沈其荣, 殷士学, 杨超光, 陈巍. ^{13}C 标记技术在土壤和植物营养研究中的应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 98–105.
Shen Q R, Yin S X, Yang C G, Chen W. Application of ^{13}C labeling technique to soil science and plant nutrition[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2000, 6(1): 98–105.
- [12] 沈中泉, 袁家富. 商品性有机肥料工厂化生产研究动态[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 117–122.
Shen Z Q, Yuan J F. Study on industrial process on commercial organic fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 1998, 4(2): 117–122.
- [13] 张铭, 蔡鹏, 吴一超, 等. 细菌胞外聚合物: 基于土壤生态功能的视角[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 308–323.
Zhang M, Cai P, Wu Y C, *et al.* Bacterial extracellular polymeric substances: From the perspective of soil ecological functions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(2): 308–323.
- [14] Gauri S S, Mandal S M, Pati B R. Impact of *Azotobacter* exopolysaccharides on sustainable agriculture[J]. *Applied Microbiology Biotechnology*, 2012, 95(2): 331–338.
- [15] Lee S M, Kong H G, Song G C, Ryu C M. Disruption of *Firmicutes* and *Actinobacteria* abundance in tomato rhizosphere causes the incidence of bacterial wilt disease[J]. The ISME Journal, 2021, 15(1): 330–347.
- [16] 沈其荣. 中国有机(类)肥料[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
Shen Q R. Organic-based fertilizer in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021.
- [17] 沈其荣, 刘东阳, 杨兴明, 等. 农业废弃物的快速堆肥菌剂及其生产有机肥的方法: CN200910233577.6[P]. 2010–04–21.
Shen Q R, Liu D Y, Yang X M, *et al.* Rapid composting agent for agricultural waste and method for producing organic fertilizer: CN200910233577.6[P]. 2010–04–21.
- [18] 郑利杰, 王波. 我国商品有机肥发展瓶颈及策略研究[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(3): 38–41.
Zheng L J, Wang B. Research on development bottleneck of commercial organic fertilizer in China[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2017, 42(3): 38–41.
- [19] 符纯华, 单国芳. 我国有机肥产业发展与市场展望[J]. 化肥工业, 2017, 44(1): 9–13.
Fu C H, Shan G F. Development of organic fertilizer industry in

- China and market outlook[J]. *Chemical Fertilizer Industry*, 2017, 44(1): 9–13.
- [20] 杨帆, 李荣, 崔勇, 段英华. 我国有机肥料资源利用现状与发展建议[J]. *中国土壤与肥料*, 2010, (4): 77–82.
Yang F, Li R, Cui Y, Duan Y H. Utilization and development strategy of organic fertilizer resources in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010, (4): 77–82.
- [21] 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
Li J, Peng S P. Practical manual for composting engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [22] 孙晓华, 罗安程, 仇丹. 微生物接种对猪粪堆肥发酵过程的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(5): 557–559.
Sun X H, Luo A C, Qiu D. Effect of inoculant on composting process of swine manure[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2004, 10(5): 557–559.
- [23] 李洁, 吴明亮, 汤远菊, 龚昕. 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(自然科学版)*, 2013, 39(1): 97–100.
Li J, Wu M L, Tang Y J, Gong X. Research status and development trend of organic fertilizer machinery[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2013, 39(1): 97–100.
- [24] 杨帆, 马常宝. 我国有机肥料利用现状及发展前景[A]. 第五届全国绿色环保肥料新技术、新产品交流会[C]. 北京: 中国腐植酸工业协会, 2005.
Yang F, Ma C B. Present situation and developmental prospect of organic fertilizer utilization in China[A]. The fifth national green fertilizer new technology, new products exchange meeting[C] Beijing: China Humic Acid Industry Association, 2005.
- [25] Dong W T, Zhu Y Y, Chang H Z, *et al.* An SHR-SCR module specifies legume cortical cell fate to enable nodulation[J]. *Nature*, 2021, 589: 586–590.
- [26] Liu Z J, Yang J, Long Y P, *et al.* Single-nucleus transcriptomes reveal spatiotemporal symbiotic perception and early response in *Medicago*[J]. *Nature Plants*, 2023, 9(10): 1734–1748.
- [27] Wang T, Guo J, Peng Y Q, *et al.* Light-induced mobile factors from shoots regulate rhizobium-triggered soybean root nodulation[J]. *Science*, 2021, 374: 65–71.
- [28] Ke X L, Xiao H, Peng Y Q, *et al.* Phosphoenolpyruvate reallocation links nitrogen fixation rates to root nodule energy state[J]. *Science*, 2022, 378: 971–977.
- [29] Zhong X B, Wang J, Shi X L, *et al.* Genetically optimizing soybean nodulation improves yield and protein content[J]. *Nature Plants*, 2024, 10(5): 736–742.
- [30] Shi J C, Zhao B Y, Zheng S, *et al.* A phosphate starvation response-centered network regulates mycorrhizal symbiosis[J]. *Cell*, 2021, 184(22): 5527–5540.
- [31] Jiang Y N, Wang W X, Xie Q J, *et al.* Plants transfer lipids to sustain colonization by mutualistic mycorrhizal and parasitic fungi[J]. *Science*, 2017, 356: 1172–1175.
- [32] Yu H M, Bai F X, Ji C Y, *et al.* Plant lysin motif extracellular proteins are required for arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2023, 120(27): e2301884120.
- [33] Feng H C, Lü Y, Krell T, *et al.* Signal binding at both modules of its dCache domain enables the McpA chemoreceptor of *Bacillus velezensis* to sense different ligands[J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2022, 119(29): e2201747119.
- [34] Xu Z H, Shao J H, Li B, *et al.* Contribution of bacillomycin D in *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9 to antifungal activity and biofilm formation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, 79(3): 808–815.
- [35] Xu Z H, Mandic-Mulec I, Zhang H H, *et al.* Antibiotic bacillomycin D affects iron acquisition and biofilm formation in *Bacillus velezensis* through a Btr-mediated FeuABC-dependent pathway[J]. *Cell Reports*, 2019, 29(5): 1192–1202.
- [36] Zhan Y H, Yan Y L, Deng Z P, *et al.* The novel regulatory ncRNA, NfiS, optimizes nitrogen fixation via base pairing with the nitrogenase gene *nifK* mRNA in *Pseudomonas stutzeri* A1501[J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2016, 113(30): E4348–E4356.
- [37] Li Q, Zhang H W, Song Y, *et al.* Alanine synthesized by alanine dehydrogenase enables ammonium-tolerant nitrogen fixation in *Paenibacillus sabinae* T27[J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2022, 119(49): e2215855119.
- [38] Zhang J Y, Liu Y X, Zhang N, *et al.* *NRT1.1B* is associated with root microbiota composition and nitrogen use in field-grown rice[J]. *Nature Biotechnology*, 2019, 37(6): 676–684.
- [39] Yu P, He X M, Baer M, *et al.* Plant flavones enrich rhizosphere *Oxalobacteraceae* to improve maize performance under nitrogen deprivation[J]. *Nature Plants*, 2021, 7(4): 481–499.
- [40] Liu C, Jiang M T, Yuan M M, *et al.* Root microbiota confers rice resistance to aluminium toxicity and phosphorus deficiency in acidic soils[J]. *Nature Food*, 2023, 4(10): 912–924.
- [41] Xun W B, Ren Y, Yan H, *et al.* Sustained inhibition of maize seed-borne *Fusarium* using a *Bacillus*-dominated rhizospheric stable core microbiota with unique cooperative patterns[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(5): 2205215.
- [42] Jiang Y, Xie Q J, Wang W X, *et al.* *Medicago* AP2-Domain transcription factor WRI5a is a master regulator of lipid biosynthesis and transfer during mycorrhizal symbiosis[J]. *Molecular Plant*, 2018, 11(11): 1344–1359.
- [43] Luo Y M, Li G X, Luo W H, *et al.* Effect of phosphogypsum and dicyandiamide as additives on NH₃, N₂O and CH₄ emissions during composting[J]. *Journal of Environmental Science*, 2013, 25(7): 1338–1345.
- [44] 袁永康. 外加电场及生物炭强化低温厌氧发酵产甲烷研究[D]. 河南郑州: 河南农业大学硕士学位论文, 2024.
Yuan Y K. Study on enhancement of methane production by low temperature anaerobic digestion with electric field and biochar[D]. Zhengzhou, Henan: MS Thesis of Henan Agricultural University, 2024.
- [45] Jiang J S, Wang Y, Liu J, *et al.* Exploring the mechanisms of organic matter degradation and methane emission during sewage sludge composting with added vesuvianite: Insights into the prediction of microbial metabolic function and enzymatic activity[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 286: 121397.
- [46] Ren X N, Wang Z Y, Zhao M X, *et al.* Role of selenite on the nitrogen conservation and greenhouse gases mitigation during the goat manure composting process[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 838: 155799.
- [47] 罗一鸣, 李国学, Schuchardt F, 等. 过磷酸钙添加剂对猪粪堆肥温

- 室气体和氨气减排的作用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 235–242.
- Luo Y M, Li G X, Schuchardt F, *et al.* Effects of additive superphosphate on NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during pig manure composting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22): 235–242.
- [48] Xiong J P, Su Y, He X Q, *et al.* Effects of functional-membrane covering technique on nitrogen succession during aerobic composting: Metabolic pathways, functional enzymes, and functional genes[J]. Bioresource Technology, 2022, 354: 127205.
- [49] Sun Q H, Wu D, Zhang Z C, *et al.* Effect of cold-adapted microbial agent inoculation on enzyme activities during composting start-up at low temperature[J]. Bioresource Technology, 2017, 244: 635–640.
- [50] Wang X G, Tian L, Li Y X, *et al.* Effects of exogenous cellulose-degrading bacteria on humus formation and bacterial community stability during composting[J]. Bioresource Technology, 2022, 359: 127458.
- [51] Wu J Q, Qi H S, Huang X N, *et al.* How does manganese dioxide affect humus formation during bio-composting of chicken manure and corn straw[J]. Bioresource Technology, 2018, 269: 169–178.
- [52] Wu J Q, Wei Z M, Zhu Z C, *et al.* Humus formation driven by ammonia-oxidizing bacteria during mixed materials composting[J]. Bioresource Technology, 2020, 311: 123500.
- [53] Duan M L, Zhang Y H, Zhou B B, *et al.* Effects of *Bacillus subtilis* on carbon components and microbial functional metabolism during cow manure-straw composting[J]. Bioresource Technology, 2020, 303: 122868.
- [54] Cao Y, Wang J D, Huang H Y, *et al.* Spectroscopic evidence for hyperthermophilic pretreatment intensifying humification during pig manure and rice straw composting[J]. Bioresource Technology, 2019, 294: 122131.
- [55] Huang X L, Jia Z X, Guo J J, *et al.* Ten-year long-term organic fertilization enhances carbon sequestration and calcium-mediated stabilization of aggregate-associated organic carbon in a reclaimed Cambisol[J]. Geoderma, 2019, 355: 113880.
- [56] Gao X T, Tan W B, Zhao Y, *et al.* Diversity in the mechanisms of humin formation during composting with different materials[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(7): 3653–3662.
- [57] Zhang Y C, Yue D B, Ma H. Darkening mechanism and kinetics of humification process in catechol-Maillard system[J]. Chemosphere, 2015, 130: 40–45.
- [58] Wei Z M, Mohamed T A, Zhao L, *et al.* Microhabitat drive microbial anabolism to promote carbon sequestration during composting[J]. Bioresource Technology, 2022, 346: 126577.
- [59] Sun Y, Ren X N, Pan J T, *et al.* Effect of microplastics on greenhouse gas and ammonia emissions during aerobic composting[J]. Science of the Total Environment, 2020, 737: 139856.
- [60] Liang J Y, Zhou Z G, Huo C F, *et al.* More replenishment than priming loss of soil organic carbon with additional carbon input[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 3175.
- [61] Shi T S, Collins S L, Yu K L, *et al.* A global meta-analysis on the effects of organic and inorganic fertilization on grasslands and croplands[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 3411.
- [62] Jia Z X, Huang X L, Li L N, *et al.* Rejuvenation of iron oxides enhances carbon sequestration by the ‘iron gate’ and ‘enzyme latch’ mechanisms in a rice-wheat cropping system[J]. Science of the Total Environment, 2022, 839: 156209.
- [63] Wan D, Ma M K, Peng N, *et al.* Effects of long-term fertilization on calcium-associated soil organic carbon: Implications for C sequestration in agricultural soils[J]. Science of the Total Environment, 2021, 772: 145037.
- [64] Yu G H, Xiao J, Hu S J, *et al.* Mineral availability as a key regulator of soil carbon storage[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(9): 4960–4969.
- [65] Zhao Z B, He J Z, Geisen S, *et al.* Protist communities are more sensitive to nitrogen fertilization than other microorganisms in diverse agricultural soils[J]. Microbiome, 2019, 7: 33.
- [66] Gao Y Q, Huang J Q, Reyt G, *et al.* A dirigent protein complex directs lignin polymerization and assembly of the root diffusion barrier[J]. Science, 2023, 382: 464–471.

作者简介:

张瑞福, 南京农业大学钟山首席教授, 博士生导师, 现任南京农业大学资源与环境科学学院院长。主要从事根际微生物与生物肥料、农业有机废弃物微生物降解转化与有机肥料研究。在国际著名期刊发表 SCI 论文 130 余篇, 受邀在 *FEMS Microbiology Reviews*、*Current Opinion in Microbiology* 等期刊撰写综述, 论文总被引 12000 余次, 12 篇论文被 ESI 列为高被引论文, 入选 2022、2023 年度科睿唯安全球高被引科学家。先后担任农业农村部农业微生物资源收集保藏重点实验室主任、中国农业微生物菌种保藏管理中心主任、江苏省固体有机废弃物资源化高新技术研究重点实验室副主任、中国微生物学会常务理事及监事、微生物资源专委会主任、中国土壤学会理事、中国植物营养与肥料学会理事及生物与有机肥专委会主任、农业部肥料评审委员会委员及 *International Biodeterioration & Biodegradation*、*Journal of Integrative Agriculture* 编委等。



沈其荣, 中国工程院院士, 现任南京农业大学学术委员会主任和国家有机(类)肥料产业技术创新战略联盟理事长。长期从事有机(类)肥料和土壤微生物研究与推广工作, 技术工艺被全国 666 家企业采用, 为中国有机(类)肥料产业发展做出了突出贡献; 以施用全元生物有机肥为核心技术的防控土传病害综合技术体系效果显著, 为经济作物产业可持续发展提供了技术支撑。在 *Nature Biotechnology*、*Nature Communications*、*Science Advances*、*The ISME Journal*、*Microbiome*、*Plant Cell Environment*、*Environment Science & Technology*、*Soil Biology & Biochemistry* 等国际学术权威刊物上发表论文。先后获得光华工程科技奖、全国创新争先奖、中华农业英才奖、做出突出贡献的中国博士学位获得者等荣誉称号。

