

我国南北方生物肥料的应用现状与研究进展

郭嘉¹, 朱加楠¹, 潘钰¹, 姜超¹, 于冲¹, 奚新伟¹, 曹旭¹, 葛佳琪², 刘春燕³, 王玉霞^{1*}

¹黑龙江省科学院微生物研究所, 黑龙江 哈尔滨

²黑龙江省生物工程学会, 黑龙江 哈尔滨

³黑龙江省科学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2024年10月25日; 录用日期: 2024年12月20日; 发布日期: 2024年12月31日

摘要

生物肥料通常被称作微生物肥料或生物菌肥, 是一种含有活体微生物的肥料, 是推动我国农业可持续发展的绿色力量, 在提高土壤肥力、改善作物品质、减少环境污染等方面发挥着重要作用。中国南北方由于气候、土壤、作物种植结构的差异, 生物肥料的应用现状和研究方向也存在差异。本文综合分析了中国南北方生物肥料的应用现状、研究进展及存在的问题与挑战, 并对未来的发展趋势进行了展望。

关键词

生物肥料, 农业可持续发展, 南北方生物肥料, 生物肥现状, 生物肥进展

Application Status and Research Progress of Biofertilizers in the North and South of China

Jia Guo¹, Jianan Zhu¹, Yu Pan¹, Chao Jiang¹, Chong Yu¹, Xinwei Xi¹, Xu Cao¹, Jiaqi Ge², Chunyan Liu³, Yuxia Wang^{1*}

¹Institute of Microbiology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin Heilongjiang

²Heilongjiang Bioengineering Society, Harbin Heilongjiang

³Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin Heilongjiang

Received: Oct. 25th, 2024; accepted: Dec. 20th, 2024; published: Dec. 31st, 2024

*通讯作者。

文章引用: 郭嘉, 朱加楠, 潘钰, 姜超, 于冲, 奚新伟, 曹旭, 葛佳琪, 刘春燕, 王玉霞. 我国南北方生物肥料的应用现状与研究进展[J]. 微生物前沿, 2024, 13(4): 288-296. DOI: 10.12677/amb.2024.134030

Abstract

Biofertilizer, often called microbial fertilizer or bio-fertilizer, is a kind of fertilizer containing living microorganisms, which is a green force to promote the sustainable development of China's agriculture, and plays an important role in improving soil fertility, improving crop quality and reducing environmental pollution. Due to the differences in climate, soil, and crop cultivation structure between the north and south of China, there are differences in the application status and research direction of biofertilizers. This paper comprehensively analyzes the current status of biofertilizer application, research progress, and existing problems and challenges in China's north and south, and looks forward to the future development trend.

Keywords

Biofertilizers, Sustainable Agriculture, North and South Biofertilizers, Current Situation of Biofertilizers, Progress of Biofertilizers

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

本生物肥料, 又称微生物肥料, 是指以微生物的生命活动为核心, 使农作物获得特定肥料效应的一类肥料制品。目前涉及微生物的肥料产品分为三大类, 分别是微生物菌剂、复合微生物肥料以及生物有机肥[1]。生物肥料是一种环保且高效的土壤改良剂, 它通过微生物的作用来提升土壤的有机质含量, 从而改善土壤结构和增加其肥力。这种肥料不仅能提高化肥的利用效率, 减少化肥的用量, 还能有效降低农业生产的成本[2]。此外, 生物肥料还能减少农作物对硝态氮、重金属和农药的吸收, 有助于净化和修复土壤, 减少病害的发生, 提升农产品的品质和食品安全[3]。生物肥料是天然有机物质与现代生物技术的结合, 无污染、无公害, 其所含的菌剂能够加速有机物的分解, 为作物提供速效养分, 同时提高化肥的利用率和促进土壤潜在养分的活化。与化肥相比, 生物肥料提供了更全面的营养成分, 包括氮、磷、钾等主要元素, 以及钙、镁、硫、铁、硼、锌、硒、钼等微量元素, 还有丰富的有机物质、腐殖酸类物质和增效剂[4]。此外, 生物肥料在发酵过程中特别添加了具有特定功能的微生物菌种, 这些菌种不仅能够改善土壤的团粒结构, 增强土壤的透气性, 还能抑制或分解土壤中的有害菌, 有效控制土壤病害[5]。因此, 生物肥料能更有效地促进土壤中磷和钾的溶解和释放, 为植物生长提供更有利的条件。

2. 应用现状

自 20 世纪 40 年代起, 生物肥料的相关研究便拉开了序幕, 随着时间的推移, 这一领域经历了不断地创新与进步[6]。如今, 中国的生物肥料行业展现出了其特有的发展趋势。

首先, 在供需关系上, 可以看到生物肥料的产量和生产能力持续提高, 同时, 经过备案登记的产品数量也在年年攀升。具体来说, 2015 年, 我国微生物肥料产品的登记数量为 928 个, 而到了 2020 年, 这一数字激增至 8054 个。截至 2021 年 12 月 7 日, 累计登记的产品数量已经达到了 9414 个[7]。此外, 生物肥料的销售额和销售收入也在持续上升, 整个行业的供需关系保持了基本的平衡。目前来说, 中国生物肥料行业的整体运营状况保持良好, 企业数量呈现增长趋势[8]。尽管各企业的经营状况存在差异, 但

整体而言,行业的盈利能力正在逐步提高。然而,行业发展也存在痛点,如产品质量参差不齐、农民对生物肥料认知度和接受度不够高等。在进出口市场方面,中国生物肥料行业进出口状况良好。进口规模适中,进口价格水平较为稳定,产品结构丰富,进口来源国结构多元化[9]。出口规模也在不断扩大,出口价格水平有提升空间,产品结构不断优化,出口去向国结构广泛[10]。中国生物肥料产业链完整。上游包括微生物菌落和动植物残体等有机质,为生物肥料的生产提供了原材料。中游生物肥料制造企业众多,但以中小企业为主。下游主要应用于农业和种植业等领域。农业和肥料行业的发展对生物肥料有着重要影响。

其次,生物肥料能够显著提高作物产量[11]。中国农科院土壤肥料研究所人民日报客户端三农频道所提供的数据显示,生物肥料可使作物增产高达 20%~60%,同时改善作物和农产品的品质,使农民增收[12]。如山东烟台果农鲍忠才的果园在使用菌肥对土壤进行调理后,苹果卖价提高,产量也得到了提升;甘肃平凉果农王宏斌的果树在连续使用菌肥后,树势增强,果个变大,亩产接近 5000 斤[13]。再者,生物肥料有助于重构健康的土壤。它可以改善土壤结构,提高土壤有机质含量,增加土壤通透性,对土壤中的有害菌进行抑制或分解,为作物生长创造良好的土壤环境。我国具有丰富的微生物菌种资源和农业废弃物资源,为发展微生物肥料产业提供了保证[14]。目前我国微生物肥料生产企业总数有 1100 多家,年产总值达 200 亿元,生物肥料累积应用面积 2 亿亩以上[15]。但与我国化肥用量 1.3 亿吨比起来,目前仅仅千万余吨的量,只占化肥用量的 7%左右,市场占有率还极低,这也意味着我国微生物肥料不断创新和提高质量的发展空间巨大[16]。

2.1. 北方生物肥料应用

北方地区由于气候条件较为寒冷的限制,农业生产主要集中在春秋季,作物生长周期较短,对生物肥料的需求集中。生物肥料在北方的应用主要集中在提高土壤肥力、改善土壤结构、增加作物产量和品质等方面[17]。研究表明,长期施用微生物肥料可以恢复土壤团聚体的形成,起到疏松土壤、消除土壤压实、改善土壤结构的作用[18]。比如,北方寒地黑土连续施用土壤磷活化剂三年后,土壤容重下降 0.1~0.3,松土效果十分显著[19]。

此外,北方地区的生物肥料在不同区域和作物上均发挥着重要作用。例如在大棚草莓种植中,生物菌肥可促进草莓生长,增强植株抗病能力,提高草莓果型、色泽和甜度[20]。黄日静研究发现,在施用生物菌肥后,草莓植株生长健壮,病害明显减少,开花期提前,坐果率增加,产量明显提高[21]。在盐碱地治理方面,如河北省张家口市康保县,在常规施肥的基础上施用生物有机肥,底施 200 公斤/亩,具有提高土壤有机质,降低土壤盐碱化、提高产量的效果。处理后的马铃薯亩增产 392.37 公斤,增产率为 7.59% [22]。最为明显的是,在黑土地保护上,生物肥料也能通过增加土壤有机质含量,改善土壤结构,提高黑土地的肥力和可持续利用性[23]。

2.2. 排版规范的完整性

南方地区气候温暖湿润,农业生产周期长,作物种类繁多,对生物肥料的需求更为多样化。据报道,南方水稻种植区域微生物肥料的应用面积达到 4700 万亩,用量超过 10 万吨[24]。在南方,生物肥料的应用也十分广泛。在水稻种植区域,如生物肥料在广西烤烟上的应用,生物炭基有机肥具有含碳量高、改良土壤、缓释增肥、减少面源污染等优点,极适合于烟草等作物。2014 年贺州富川县施用高炭基有机肥产值 53713.5 元/hm²,较常规施肥产量增加 7599 元/hm²,上等烟比例高 5.1%,在大中城市周边区域,应用微生物肥料可提高农产品品质、减少土传病害的发生、增加农产品的经济价值[25]。在珠三角、长三角的污染耕地区域,正在探索应用微生物肥料抑制重金属、降低农药用量、保护生态环境的技术方法和措

施[26]。在广西地区,养土立命生物科技有限公司广西生产基地正式投产,为南方市场注入新的生物有机肥动力。该基地凭借原料、技术、区位和品牌优势,具备强大的市场供给能力,日均产量已达到 460 吨[27]。

3. 研究进展

3.1. 北方生物肥研究进展

北方生物肥料的研究主要集中在耐寒性微生物的筛选、微生物与土壤养分循环、微生物肥料与化肥的配合使用等方面。例如,已经有科学家们利用高通量测序技术,对比分析了在不同生长期和施肥处理下土壤细菌的多样性及其群落结构的演变,这为贺兰山东麓地区的酿酒葡萄园提供了健康种植和土壤管理的科学依据[28]。在生物有机肥的研究领域,研究已经从单纯提升固氮效率,扩展到了磷和钾的溶解能力,以及减少土壤障碍和提高作物的抗逆性,产品种类也从单一菌株发展到了多菌株和复合微生物肥料[29]。

在根瘤菌技术的研究方面,该技术在提高豆科植物产量上取得了显著成效。例如,大豆接种根瘤菌后,其产量可以提升 21.4%至 29.7% [30]。研究还发现,根瘤菌与土壤及豆科植物品种的有效配合,能够增强根瘤菌对土壤环境的适应性以及其固氮能力[31]。例如,施用根瘤菌剂能够在宿主植物的根部或茎部诱导形成特殊的根瘤,将大气中的氮转化为植物可利用的氨。同时,根瘤菌还能有效抑制豆根的腐烂,进一步提升作物产量。使用微生物肥料还能提升作物品质,例如添加 *Rhodopseudomonas_spp.* BL6 和 KL9 能够促进番茄的代谢活动,增加番茄果实的重量和番茄红素的含量[32]。此外,提高根瘤菌的保存期限和在土壤中的存活能力也是技术发展的重要方向。

生物有机肥施用对土壤 CO₂ 排放有着很大的影响。研究表明,有机肥施用总体上显著提高了农田土壤 CO₂ 排放量,分别提高了 50.6%和 36.3% [33]。因此,研究建议在中国北方采用无机肥 + 生物有机肥 + 缓释肥配施技术,不建议鸡粪大量施用及在灰漠土农田大量施用有机肥。至关重要的是,生物肥料的制造规模与技术水准均实现了显著地提高。在实现“双碳”目标的大环境下,开发和利用环保且低碳的有机肥料成为了研究的新趋势,这有助于迅速提升土壤中的有机质水平和增强土壤的碳储存能力。

3.2. 南方研究进展

南方生物肥料的研究则更侧重于微生物肥料对作物生长的促进作用、微生物肥料与有机废弃物的资源化利用、微生物肥料对土壤污染的修复等方面。首先,施用生物有机肥及其基质处理分别显著增加了亚硝化螺菌属和酸杆菌属 *RB41* 的相对丰度,而不施肥处理则降低了亚硝化螺菌属的相对丰度[34]。通过对溶磷菌和促生菌的研究发现,目前在作物产量的提高和土壤磷素资源的有效利用方面取得了显著成效。例如,溶磷菌 *qzr14* 在黄瓜上的接种试验中,地上部干重可提高 98.46%、鲜重 57.01% [35]。其次,促生菌的应用范围也十分广泛,例如,将枯草芽孢杆菌 *BCL-8* 与克雷伯氏菌 *Rs-5* 结合使用,对防治棉花的立枯病非常有效,防治效果达到了 55.37%,并且使得棉花的产量提升了 10.51% [36]。再者,生物有机肥在提升作物的产量和品质方面也显示出了显著的成效。以玉米为例,使用生物有机肥后,其产量增加了 7.7%,而对于马铃薯来说,施用生物有机肥相比于不施用,产量的增长范围在 15.54%到 24.58%之间[37]。最后,生物有机肥还能提高作物的抗病性,如西瓜接种生物有机肥料后,产量比普通有机肥处理和当地习惯施肥处理产量分别提高了 14.5%和 17.9%。据报道,在南方的祁阳市,推广使用生物菌肥稻田已经取得了显著效果,已有计划进一步扩大推广面积[37]。与此同时,紫云英作为一种用于土壤改良的绿肥,不仅有助于降低化肥的使用量,还能提高稻谷的品质。中国农业科学院祁阳红壤站进行的研究,为南方稻田减少化肥和农药的使用提供了科学的支撑,这有助于推动我国农业向绿色、高效和可持续的发展方向前进[38]。

3.3. 对比研究

南北方生物肥料在使用程度、影响因素和产品效果等方面存在一定差异。首先,在使用程度上,北方地区由于气候相对干燥寒冷,土壤有机质含量较低,对生物肥料的需求逐渐增加,但农民对生物肥料的认知度和接受度还有待提高。南方地区由于经济作物种植较多,对农产品品质要求较高,生物肥料的应用相对广泛。其次,在影响因素方面,北方地区气候条件对生物肥料施用效果影响较大,施用生物有机肥的最佳温度是 $25^{\circ}\text{C}\sim 37^{\circ}\text{C}$,低于 5°C 或高于 45°C ,施用效果较差[39]。而南方地区气候温暖湿润,适合多种生物肥料的施用,但在污染耕地区域,需要考虑重金属污染等问题。最后,在产品效果方面,北方地区生物肥料在盐碱地治理、黑土地保护等方面效果显著,南方地区生物肥料在水稻种植、经济作物提质增效等方面表现突出。因此,通过对比南北方气候,土质的差异,可以为全国生物肥料的合理应用提供参考,再根据不同地区的气候、土壤和作物特点,选择合适的生物肥料产品和施用方法,以提高农业生产效益和生态环境质量[40]。

4. 生物肥料发展面临的问题

4.1. 生产技术和质量管控问题

在生物肥料领域,产品的质量标准与质量管控已成为行业发展的关键制约因素。生物肥料的生产流程涵盖微生物筛选、培养、发酵等多个复杂环节,每个环节都对生产条件和技术有着严格要求。例如,微生物筛选环节需要精准鉴别出具有高效固氮、解磷、解钾等功能的优良菌株,培养过程需严格控制温度、湿度、营养物质比例等条件,发酵阶段更要确保微生物在适宜的环境中大量繁殖且保持活性。然而,当前行业内的质量控制体系存在明显漏洞。一方面,质量标准不够完善,对于生物肥料中有效活菌数、杂菌率、养分含量等关键指标的规定不够细致准确,不同企业生产的产品在这些指标上差异较大。另一方面,质量控制手段有限,缺乏高效准确的检测方法和设备,无法及时发现和处理不合格产品。这种现状致使市场上生物肥料产品质量良莠不齐,严重影响了行业的信誉和发展[41]。

4.2. 应用效果的不确定性

4.2.1. 环境因素

生物肥料的应用效果受多种环境因素的综合影响。土壤类型方面,不同质地(如砂土保水保肥能力差,黏土通气性差)、酸碱度(酸性土壤可能抑制某些微生物活性,碱性土壤可能影响养分有效性)和肥力水平(贫瘠土壤和肥沃土壤微生物群落不同)的土壤对生物肥料的反应差异明显。气候条件上,温度、降水和光照等因素会影响微生物的生长繁殖和代谢活动。例如,低温可能使微生物活性降低,干旱会限制微生物的移动和养分转化,这些都会使生物肥料的效果大打折扣。

4.2.2. 作物自身因素

由于各种作物的根系结构和分泌物存在差异,对养分的需求种类和数量也不一样,会导致不同作物对生物肥料的反应不同。例如,豆科作物对固氮微生物的需求较大,而叶菜类作物可能更需要解磷微生物来促进叶片生长。此外,作物的不同生长阶段对生物肥料的需求和利用效率也不同,这增加了生物肥料应用效果的复杂性。

4.2.3. 作用机制的复杂性

生物肥料的作用机制涉及微生物与土壤、作物之间的多种相互作用。微生物在土壤中不仅参与养分转化,还会分泌植物激素影响作物生长,同时对土壤结构也有改善作用。然而,这些复杂的作用过程受多种因素干扰,使得生物肥料的效果在时间和空间上都存在不稳定性。比如,在同一块田地的不同区域,

由于土壤微环境的差异，生物肥料的效果可能不同，而且在一个生长季内，前期和后期的效果也可能出现波动。

4.3. 市场与推广问题

4.3.1. 市场与推广问题

很多农民对生物肥料缺乏足够了解，仍然习惯使用传统化学肥料。他们不熟悉生物肥料的作用原理、使用方法和优势，对生物肥料的肥效存在疑虑，担心使用后不能保证作物产量。

4.3.2. 市场竞争混乱

由于质量标准不统一和监管难度大，市场上生物肥料产品鱼龙混杂。一些不良企业以次充好，虚假宣传产品效果，扰乱了市场秩序，使得优质的生物肥料产品在市场竞争中难以脱颖而出，影响了整个行业的健康发展。

4.3.3. 价格因素限制

生物肥料的生产成本相对较高，这导致其市场价格往往高于传统化学肥料。对于大多数以追求经济效益为主要目标的农民来说，价格因素成为他们选择生物肥料的重要障碍，限制了生物肥料在农业生产中的大规模推广应用。

5. 中国南北方生物肥料未来发展趋势

针对 3.1、3.2 和 3.3 中所提到的生物肥料相关问题，需要加强生物肥料的技术研发和质量控制，提高其应用效果的稳定性和持久性，推动生物肥料行业的健康发展。同时，也需要加强生物肥料的田间试验和示范推广，将基础研究与用用研究相结合，保证生物肥料应用效果的确定性，提高农民对生物肥料的认知和接受度。

尤其是随着农业的可持续发展，生物肥料将在节约化肥资源、绿色和有机农业、土壤环境修复等方面因地制宜的发挥出更大的作用。未来，生物肥料的研究需要综合运用多学科技术手段，从分子水平到生态系统水平，全面揭示氮素循环的机制和影响因素。同时，也需要加强生物肥料的产业化和市场化，提高生物肥料的普及率和应用效果。生物肥料作为一种新型、环保、高效的肥料形式，具有环境友好，无毒、无害、无污染，可用于生产无公害、环保、绿色有机农作物，还能减少温室气体排放高达 40%~50% 等显著功效，在未来农业发展中前景广阔[42]。

5.1. 向着节约化肥资源方向发展

随着化肥过量使用带来的环境问题日益严重，生物肥料作为替代或减少化肥使用的重要手段，将在未来得到越来越广泛地应用。这是因为生物肥料能够更高效的提高土壤肥力，减少化肥的使用量，降低农业生产成本，实现农业的可持续发展。

5.2. 向着绿色和有机农业需要发展

随着人们对食品安全和健康的重视，绿色和有机农业的发展越来越受到关注。生物肥料作为绿色和有机农业的重要组成部分，能够提高作物的抗病性和抗逆性，减少农药的使用，提高农产品的品质 and 安全性。

5.3. 向着修复土壤环境的需要发展

随着土壤污染的日趋严重，生物肥料在土壤的修复过程中扮演着关键角色。使用生物肥料能够优化

土壤结构,提升土壤中的有机质水平,增强土壤的持水能力和透气性,进而帮助恢复受损的土壤环境。

未来,生物肥料的发展趋势十分明显。一方面,随着全球对环保、高效农业生产方式的日益重视,生物肥料的市场需求将持续增长。预计到2026年,中国生物肥料市场规模将达到约24亿美元,全球生物肥料市场规模预计2026年将达到约240亿美元[43]。同时,技术革新为生物肥料产业的发展开辟了新的可能性。随着新型微生物菌种的开发、生产工艺的优化以及环保技术的融入,生物肥料的制造效率和产品品质都实现了显著的提高。一些企业已经利用基因工程技术,培育出能够高效固氮、解磷、解钾微生物菌种,实现了大大提高肥料利用率。

6. 结论

中国南北方生物肥料的应用现状和研究进展表明,生物肥料在提高土壤肥力、改善作物品质、减少环境污染等方面具有重要作用[44]。未来,随着农业可持续发展的需要,生物肥料将在节约化肥资源、绿色和有机农业、土壤环境修复等方面发挥更大的作用。同时,也需要加强生物肥料的技术研发和质量控制,提高其应用效果的稳定性和持久性,推动生物肥料行业的健康发展。总之,生物肥料在未来农业发展中具有重要地位,其市场前景广阔,将为保障粮食安全、保护生态环境、促进农业可持续发展做出更大贡献。

基金项目

黑龙江省省属科研业务费(2023SSKY004-03)。

参考文献

- [1] 郑立伟. 生物有机肥对甜瓜连作土壤的改良效果研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北经贸大学, 2020.
- [2] Zhang, R., Wu, J., Yang, C., Li, H., Lin, B., Gao, Y., *et al.* (2023) Response of Water Stress and Bacterial Fertilizer Addition to the Structure of Microbial Flora in the Rhizosphere Soil of Grapes under Delayed Cultivation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **54**, 2609-2624. <https://doi.org/10.1080/00103624.2023.2234947>
- [3] 陈慧君. 微生物肥料菌种应用与效果分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- [4] 周北羽. 生物有机肥在林业育苗中的促长作用机理研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
- [5] 李玉华. 生物有机肥生产问题研究[J]. 南方农机, 2018, 49(23): 84+89.
- [6] 尹迪. 农业可持续发展中的土壤肥料问题分析和对策[J]. 农家科技, 2024(13): 136-138.
- [7] 2023-2028 年中国微生物肥料行业市场发展监测及投资前景展望报告[EB/OL]. https://www.huaon.com/channel/jingpin/845561.html#report_contents, 2022-10-25.
- [8] 耿培云. 微生物菌肥在设施蔬菜上的应用进展及前景分析[J]. 中国果菜, 2024, 44(4): 63-66+79.
- [9] 武杞蔓, 张金梅, 李玥莹, 等. 有益微生物菌肥对农作物的作用机制研究进展[J]. 生物技术通报, 2021, 37(5): 221-230.
- [10] 张贾宇, 徐宏佳, 司文会. 微生物肥在土壤改良与病虫害防治中的研究现状与展望[J]. 现代园艺, 2024, 47(17): 63-68.
- [11] Islam, S.S., Billah, A.T.M.M., Hasan, A.K., Karim, R. and Khomphet, T. (2023) Evaluating the Impact of Trichoderma Biofertilizer and Planting Dates on Mustard Yield Performance Using the Infocrop Growth Model. *PLOS ONE*, **18**, e0285482. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285482>
- [12] 郑彬. 浙江省商品有机肥应用对策研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江农林大学, 2017.
- [13] 十年产量翻一番, 这种肥料正在崛起! [EB/OL]. http://country.cnr.cn/gundong/20170906/t20170906_523937343.shtml, 2017-09-06.
- [14] 赵玉谨. 发酵鱼类下脚料制备微生物肥料的菌种筛选及工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 舟山: 浙江海洋学院, 2015.

- [15] 陈传武. 生物肥料, 能否“四两拨千斤”? [J]. 中国石油和化工, 2016(11): 50-52.
- [16] 付浩然, 李婷玉, 曹寒冰, 等. 我国化肥减量增效的驱动因素探究[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 561-580.
- [17] 吴科生, 车宗贤, 包兴国, 等. 长期翻压绿肥对提高灌漠土土壤肥力和作物产量的贡献[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(6): 1134-1144.
- [18] 饶越悦, 周顺利, 黄毅, 等. 秸秆富集深层还田对农田土壤质量影响的研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(10): 1579-1587.
- [19] 王安琪. 农业有机固废堆肥及其应用效果与机制研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2022.
- [20] 李鹏程, 苏学德, 王晶晶, 等. 腐植酸肥与菌肥配施对果园土壤性质及葡萄产量、品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(1): 121-126.
- [21] 黄日静. 喷施 5 种肥料对“章姬”草莓生长结果的影响[C]//辽宁草莓科学技术研究院. 草莓研究进展(IV). 北京: 中国农业出版社, 2015: 249-250.
- [22] 赵霞, 付忠卫, 李文伟, 等. 盐碱地开展“小麦秸秆还田 + 有机肥料”模式对张掖市制种玉米产量及耕地质量影响试验[J]. 农业科技与信息, 2021(20): 16-18+21
- [23] 白子明, 刘家富, 舒坤良. 农户有机肥施用行为与意愿悖离的实证研究[J]. 玉米科学, 2023, 31(4): 181-88.
- [24] 宋琪, 周杨, 朱红惠, 等. 微生物肥料研究领域发展现状与趋势[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(3): 783-792.
- [25] 耿少武, 陈岗, 董继翠, 等. 不同种类腐殖酸水溶性肥对烤烟产质量的影响[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(4): 156-160.
- [26] 尚翠. 微生物有机肥对烟田土壤养分调节和烟草品质改善的研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [27] 惠庆亮, 刘鹏, 牛书玉, 等. 规模养猪场微生物巢技术的应用——以山东省黄泥湾农业科技有限公司为例[J]. 养殖与饲料, 2021, 20(2): 11-13.
- [28] 刘平静, 肖杰, 孙本华, 等. 长期不同施肥措施下土细菌群落结构变化及其主要影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 307-315.
- [29] 梁晓琳, 孙莉, 张娟, 等. 利用 *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9 研制复合微生物肥料[J]. 土壤, 2015, 47(3): 558-563.
- [30] 苗阳阳. 外源物质对苜蓿内生根瘤菌运移定殖的影响研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- [31] da Silva Santos, M., de Andrade, A.P., dos Santos Araújo, F., de Lucena Alcântara Bruno, R., de Medeiros, A.N., de Lima Valença, R., *et al.* (2022) Rhizobacteria from Root Nodules of Brazilian Native Legumes Promote-Growth Sorghum Bicolor L. under Drought Conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **54**, 586-596. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2118301>
- [32] Geng, Y., Yuan, Y., Miao, Y., Zhi, J., Huang, M., Zhang, Y., *et al.* (2021) Decreased Nitrous Oxide Emissions Associated with Functional Microbial Genes under Bio-Organic Fertilizer Application in Vegetable Fields. *Pedosphere*, **31**, 279-288. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(20\)60075-3](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(20)60075-3)
- [33] 齐鹏, 王晓娇, 姚一铭, 等. 不同耕作方法和施氮量对旱作农田土壤 CO₂ 排放及碳平衡的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(1): 96-106.
- [34] 鲁桂栋. 不同施肥方案对猕猴桃土壤地力和果实质量的影响[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [35] 范延辉, 王君, 尚帅, 等. 两株根际真菌的耐盐, 溶磷, 促生效果及其分类鉴定[J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 127-134.
- [36] 赵雅峰, 李春, 沈乾炜, 等. 产酸克雷伯氏菌 Rs-5 与枯草芽孢杆菌组合 BCL-8 复配对棉花的解盐促生作用[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(12): 6103-6105.
- [37] 庞勋, 梁冉, 刘继国, 等. 生物有机肥对农田土壤特性, 作物产量与品质影响的研究进展[J]. 土壤科学, 2023, 11(2): 100-106.
- [38] 赵昶, 孔祥智, 仇焕广. 农业经营规模扩大有助于化肥减量吗——基于全国 1274 个家庭农场的计量分析[J]. 农业技术经济, 2021(4): 110-121.
- [39] 晁赢, 付钢锋, 阎祥慧, 等. 有机肥对作物品质, 土壤肥力及环境影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2022, 38(29): 103-107.
- [40] 江志阳, 李汝会, 陈欣. 肥料与“碳中和”的生态策略[J]. 肥料与健康, 2022, 49(1): 6-10.
- [41] 张云广, 张隽信, 张浩然. 一种复合菌种生物有机肥的制备方法[P]. 中国专利, CN201811167792.6. 2024-10-25.

-
- [42] Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, P., Das, B., Ghosh, A., *et al.* (2016) Biofertilizers: A Potential Approach for Sustainable Agriculture Development. *Environmental Science and Pollution Research*, **24**, 3315-3335. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8104-0>
- [43] 曹雨润, 王晓丽, 张欣雅. 碳中和背景下中国绿色经济的发展趋势[J]. 产业创新研究, 2022(3): 17-19.
- [44] 许莲波. 农作物施肥“减肥增效”策略研究[J]. 农村实用技术, 2024(2): 84-85.