

李其胜, 杨 凯, 蒋伟勤, 等. 有机(类)肥料对作物产量、土壤养分及土壤微生物多样性的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(8): 1772-1783.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.08.018

# 有机(类)肥料对作物产量、土壤养分及土壤微生物多样性的影响

李其胜<sup>1</sup>, 杨 凯<sup>2</sup>, 蒋伟勤<sup>1</sup>, 贾艳艳<sup>1</sup>, 殷小冬<sup>1</sup>, 李 青<sup>1</sup>, 董青君<sup>1</sup>, 杨文飞<sup>1</sup>, 杜小凤<sup>1</sup>, 顾大路<sup>1</sup>

(1. 江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所, 江苏 淮安 223001; 2. 淮安市淮安区农业技术推广中心, 江苏 淮安 223232)

**摘要:** 过量的化肥施用导致土壤退化, 降低耕地生产力的可持续性。合理地培肥土壤是作物稳产、增产的关键, 为实现农业绿色可持续发展, 施用有机(类)肥料成为必然的趋势。本文综述了有机(类)肥料种类、制造工艺、产品标准以及施用有机(类)肥料对作物产量、作物养分利用率、土壤物理结构和养分含量的影响, 探讨了施用有机(类)肥料条件下农田土壤酶活性和微生物多样性的变化。分析了当前有机(类)肥料研究和推广应用存在的问题, 对有机(类)肥料在未来农业中的研究方向和应用进行了展望, 为实现绿色可持续性生产提供有益参考。

**关键词:** 有机(类)肥料; 作物产量; 土壤养分; 土壤酶; 微生物多样性

**中图分类号:** S141 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)08-1772-12

## Effects of organic-like fertilizers on crop yield, soil nutrients, and soil microbial diversity

LI Qi-sheng<sup>1</sup>, YANG Kai<sup>2</sup>, JIANG Wei-qin<sup>1</sup>, JIA Yan-yan<sup>1</sup>, YIN Xiao-dong<sup>1</sup>, LI Qing<sup>1</sup>, DONG Qing-jun<sup>1</sup>, YANG Wen-fei<sup>1</sup>, DU Xiao-feng<sup>1</sup>, GU Da-lu<sup>1</sup>

(1. Huaiyin Institute of Agricultural Sciences of the Xuhuai District of Jiangsu Province, Huai'an 223001, China; 2. Huai'an District Agricultural Technology Popularization Center, Huai'an 223232, China)

**Abstract:** Excessive fertilizer application leads to soil degradation and reduces the sustainability of cultivated land productivity. Reasonable soil fertilization is the key to stable and increase crop yield. In order to achieve green and sustainable development of agriculture, the application of organic-like fertilizers has become an inevitable trend. In this paper, the types, manufacturing processes, and product standards of organic-like fertilizers were analyzed, and the effects of applying organic-like fertilizers on crop yield, crop nutrient utilization efficiency, soil physical structure and nutrient content were reviewed, and the changes of soil enzyme activity and microbial diversity under application of organic-like fertilizers were discussed.

In view of the shortcomings in the current research and application of organic fertilizers, this article provided prospects for the research directions and applications in future agriculture, aiming to provide useful references for achieving green and sustainable production.

**Key words:** organic-like fertilizers; crop yield; soil nutrients; soil enzyme; microbial diversity

收稿日期: 2023-09-14

**基金项目:** 淮安市自然科学研究计划联合专项(HABL202229); 淮安市农业科学研究院发展基金项目(0022022001H); 江苏现代农业产业单项技术研发项目[CX(22)3127]; 江苏省自然科学基金项目(BK20200264); 淮安市农业科学研究院高层次引进人才科研启动发展基金项目(002201901413)

**作者简介:** 李其胜(1994-), 男, 河南焦作人, 硕士, 研究实习员, 主要从事农业资源利用及微生物肥料研究。(E-mail) qisheng-li12300@163.com。

**通讯作者:** 顾大路, (E-mail) gudalu666@aliyun.com

化肥施用对作物增产具有不可替代的作用<sup>[1]</sup>, 但过量施用化肥不仅会引起土壤酸化、团聚结构变

差、有机质含量下降,还会导致水体污染和大气污染<sup>[2-3]</sup>。此外,中国化肥养分的当季作物利用率明显低于国际平均水平,严重阻碍农业绿色发展<sup>[4]</sup>。随着《到2025年化肥减量化行动方案》的出台,进一步减少农用化肥施用总量,提高化肥利用率,同时加强推广有机肥替代化肥,增加有机肥资源还田量成为当前农业工作的重中之重<sup>[5]</sup>。

有机(类)肥料指的是一类包含有机物质的肥料,主要包括商品有机肥、有机无机复混肥、商品生物有机肥以及复合微生物肥料等产品<sup>[6]</sup>。据原农业部农技推广中心数据<sup>[7]</sup>显示,中国有机(类)肥料总投入比例从1949年的99.9%下降至2010年的10.0%,到2019年这一比例升至25.0%。相比化肥,有机(类)肥料富含作物生长发育所需的各种营养元素、有机质和活性物质,不仅可以提供更平衡的营养,供给更持续的养分,还能够有效缓解化肥滥用带来的环境问题<sup>[8-10]</sup>。

近几十年来,不合理的施肥方式导致了严重的土壤退化问题,如何培肥土壤、维持土壤健康成为当前农业科学研究的重中之重<sup>[11]</sup>。从长远角度考虑,利用有机(类)肥料培肥土壤对保障中国粮食安全、实现作物稳产增产以及农业的可持续发展具有重要

的意义<sup>[6,12]</sup>。因此,本文论述了施用有机(类)肥料对作物产量、土壤物理结构、土壤养分以及土壤微生物群落结构等方面的影响,并对有机(类)肥料在未来农业中的应用进行展望,旨在为科学施肥、实现农业可持续发展提供有益参考。

## 1 有机(类)肥料的制造工艺与产品标准

根据农业农村部现行标准《NY/T 525-2021》,有机肥是指以畜禽粪便、动植物残体、生活垃圾等有机废弃物为原料,经过发酵腐熟达到无害化标准的商品化有机肥料<sup>[13]</sup>。由沈其荣等编著的《中国有机(类)肥料》明确定义,有机无机复混肥料是指在有机物料的基础上加入无机肥料后制成的复混肥料,商品生物有机肥是指在有机物料的基础上加入某种或某些特定功能微生物菌种的肥料,复合微生物肥料是指在有机物料的基础上加入无机养分和微生物菌种的肥料<sup>[14]</sup>。表1列举了当前有机(类)肥料的制造工艺与产品标准,但在实际生产中,生产技术与工艺还比较薄弱,有机肥产品质量参差不齐,还需要进一步完善企业规模化生产技术,制定适合工厂化生产的技术规程。

表1 不同有机(类)肥料的制造工艺和产品标准

Table 1 Manufacturing processes and product standards for different organic fertilizers

种类	制造工艺	固体产品标准	液体产品标准
商品有机肥	粉碎、搅拌、发酵、除臭、脱水、粉碎、造粒、干燥等	有机质含量 $\geq 30\%$ ,总养分( $N+P_2O_5+K_2O$ )含量 $\geq 4\%$ ,水分含量 $\leq 30\%$ , pH 5.5~8.5,种子发芽指数( $GI$ ) $\geq 70\%$ ,机械杂质含量 $\leq 0.5\%$ ,粪大肠菌群数(个,1 g) $\leq 100$ ,蛔虫卵死亡率 $\geq 95\%$ ,总砷(As)含量(以烘干基计) $\leq 15$ mg/kg,总汞(Hg)含量(以烘干基计) $\leq 2$ mg/kg,总铅(Pb)含量(以烘干基计) $\leq 50$ mg/kg,总镉(Cd)含量(以烘干基计) $\leq 3$ mg/kg,总铬(Cr)含量(以烘干基计) $\leq 150$ mg/kg	-
有机无机复混肥	腐熟堆肥、添加化肥、混料、粉碎、筛分、造粒等	总养分( $N+P_2O_5+K_2O$ )含量 $\geq 15\%$ ,有机质含量 $\geq 20\%$ ,水分含量 $\leq 12\%$ , pH 5.5~8.5,粪大肠菌群数(个,1 g) $\leq 100$ ,蛔虫卵死亡率 $\geq 95\%$ ,砷及其化合物含量(以As计) $\leq 50$ mg/kg,汞及其化合物含量(以Hg计) $\leq 5$ mg/kg,铅及其化合物含量(以Pb计) $\leq 150$ mg/kg,镉及其化合物含量(以Cd计) $\leq 10$ mg/kg,铬及其化合物含量(以Cr计) $\leq 500$ mg/kg	-
商品生物有机肥	腐熟堆肥、粉碎、调节pH、接种功能菌、搅拌、烘干、造粒等	有效活菌数( $\times 10^8$ CFU/g) $\geq 0.2$ ,有机质含量 $\geq 40\%$ ,水分含量 $\leq 30\%$ , pH 5.5~8.5,有效期(月) $\geq 6$ ,粪大肠菌群数(个,1 g) $\leq 100$ ,蛔虫卵死亡率 $\geq 95\%$ ,总砷(As)含量(以烘干基计) $\leq 15$ mg/kg,总汞(Hg)含量(以烘干基计) $\leq 2$ mg/kg,总铅(Pb)含量(以烘干基计) $\leq 50$ mg/kg,总镉(Cd)含量(以烘干基计) $\leq 3$ mg/kg,总铬(Cr)含量(以烘干基计) $\leq 150$ mg/kg	-
复合微生物肥料	腐熟堆肥、粉碎、调节pH、添加化肥、接种功能菌、搅拌、烘干、造粒等	有效活菌数( $\times 10^8$ CFU/g) $\geq 0.2$ ,总养分( $N+P_2O_5+K_2O$ )含量8%~25%,有机质含量 $\geq 20\%$ ,杂菌率 $\leq 30\%$ ,水分含量 $\leq 30\%$ , pH 5.5~8.5,有效期(月) $\geq 6$ ,粪大肠菌群数(个,1 g) $\leq 100$ ,蛔虫卵死亡率 $\geq 95\%$ ,总砷(As)含量(以烘干基计) $\leq 15$ mg/kg,总汞(Hg)含量(以烘干基计) $\leq 2$ mg/kg,总铅(Pb)含量(以烘干基计) $\leq 50$ mg/kg,总镉(Cd)含量(以烘干基计) $\leq 3$ mg/kg,总铬(Cr)含量(以烘干基计) $\leq 150$ mg/kg	有效活菌数( $\times 10^8$ CFU/g) $\geq 0.5$ ,总养分( $N+P_2O_5+K_2O$ )含量6%~20%,杂菌率 $\leq 15\%$ , pH 5.5~8.5,有效期(月) $\geq 3$ ,粪大肠菌群数(个,1 g) $\leq 100$ ,蛔虫卵死亡率 $\geq 95\%$ ,总砷(As)含量(以烘干基计) $\leq 15$ mg/kg,总汞(Hg)含量(以烘干基计) $\leq 2$ mg/kg,总铅(Pb)含量(以烘干基计) $\leq 50$ mg/kg,总镉(Cd)含量(以烘干基计) $\leq 3$ mg/kg,总铬(Cr)含量(以烘干基计) $\leq 150$ mg/kg

2 施用有机(类)肥料对作物产量和养分利用率的影响

作物产量不仅受品种特性、生物和非生物环境胁迫的影响,也依赖于施肥管理措施<sup>[15]</sup>。施肥会影响植株的养分吸收和干物质积累,进而影响作物产量和品质<sup>[16]</sup>。有机(类)肥料在补充土壤养分、提高作物产量和改善果实品质等方面具有特殊的作用<sup>[17-19]</sup>。表 2 列举了 23 例施用有机(类)肥料较全量化肥处理下作物产量、氮肥利用率及果实品质变化的研究结果,涵盖了不同试验年限(1~39 年)、不同作物类型、不同有机肥种类和施用量等试验因素,可以看出,与施用全量化肥处理相比,施用有机肥或

者生物有机肥均能提高作物产量和植株氮素利用率,增幅分别为 0~51.00%、17.68%~59.76%。不同有机肥种类及不同施用量对作物增产效应不同。其中,王文赞等<sup>[20]</sup>通过连续 5 年田间试验发现,有机肥替代部分化肥可显著提高苹果产量,以有机肥替代化肥比例为 25%最为适宜。关静等<sup>[21]</sup>通过 17 年长期定位试验发现,有机无机肥配施处理能使水稻产量构成因素在较高的水平上协调统一,即通过增加水稻的穗数、穗粒数和千粒质量等提高水稻产量。也有学者<sup>[22-23]</sup>认为,添加生物炭的商品有机肥可减少养分的流失。李夏等<sup>[24]</sup>通过盆栽试验证明,施用稻壳炭基有机肥能显著提升番茄产量。

表 2 施用有机(类)肥料较施用全量化肥处理下作物产量、品质及氮素利用率的变化  
Table 2 Changes in crop yield, quality and nitrogen use efficiency under the treatment of applying organic-like fertilizers compared with those under the treatment of applying full amount fertilizers

施肥方式	有机肥种类	施用量 (t/hm <sup>2</sup> )	种植作物	产量增幅 (%)	氮素利用 率增幅 (%)	维生素 C 含量增幅 (%)	可溶性糖 含量增幅 (%)	糖酸比 增幅 (%)	试验年限 (年)	参考 文献
有机肥替代化肥	猪粪沼液	27.50	小麦	16.18	18.26				1	[25]
	羊粪	5.40	荔枝	5.80		9.79	2.97	7.05	3	[26]
	羊粪	3.00	甜瓜	0.52	17.68				2	[27]
	-	35.25	苹果	28.42		3.48	3.13	8.84	5	[20]
	猪粪	7.50	柑橘	19.50		6.20	4.60	9.01	2	[28]
	蚓粪	4.97	水稻	14.81	38.13				2	[18]
有机无机肥配施	秸秆	1.50	玉米	0.55					3	[29]
	牛粪	30.00	小麦	20.66	59.76				7	[30]
	牛粪	30.00	小麦	23.10					6	[31]
	牛粪	30.00	小麦	24.58					3	[32]
	秸秆、猪粪	12.55	玉米	11.38					5	[33]
	猪厩肥	27.00	玉米	19.40	45.68				39	[15]
有机无机复混肥替代化肥	复混肥	0.60	花生	7.10	21.00				1	[34]
	复混肥	0.92	水稻	7.14					2	[35]
生物有机肥替代化肥	生物有机肥	2.70	荔枝	4.80		34.89	15.94	41.06	3	[26]
	生物有机肥	6.00	甜菜	12.29					2	[36]
	生物有机肥	6.00	黄瓜	18.70	32.68	10.86	5.46		1	[37]
	生物有机肥	0.45	小麦	4.81	41.45				1	[38]
	生物有机肥	6.00	黄瓜	17.20	42.39	9.14	18.02		1	[37]
	生物有机肥	-	杧果	0			11.02	18.76	2	[39]
	生物有机肥	-	杧果	51.00			14.96	23.62	2	[39]
复合微生物肥料替代化肥	复合微生物肥料	0.60	花生	9.30	23.50				1	[34]
	复合微生物肥料	-	苹果	11.11		3.71	10.75	29.21	3	[40]

生物有机肥和复合微生物肥料是兼具有机肥和微生物功能的新型肥料,具有长效、速效、增效的作用,起到了养分控释的作用<sup>[41-42]</sup>。从表2中可以看出,相比全量化肥,施用生物有机肥或复合微生物肥料可明显提升果实可溶性糖含量、维生素C含量和糖酸比等品质指标,增幅分别为5.46%~18.02%、3.71%~34.89%、18.76%~41.06%。其中,田露等<sup>[36]</sup>的田间试验结果表明,生物有机肥替代化肥较全量化肥处理在不同程度上提高了甜菜产量和种植效益,可能是因为生物有机肥料的施用能有效补充土壤养分和有机质,同时有益功能菌的引入会抑制病原菌的繁殖,减少其对作物生长的限制,从而提升产量。此外,卢云峰等<sup>[43]</sup>和王继雯等<sup>[44]</sup>的盆栽试验结果均表明,施用复合微生物肥料可以促进作物生长,改善其生物学性状,还能有效减少小麦孢囊线虫发病率。

作物对肥料的利用效率是评价可持续农业的重要指标<sup>[45]</sup>。提高肥料利用率对维持生态系统生产力,减少地表径流污染具有重要的作用<sup>[18]</sup>。蒲瑶瑶等<sup>[45]</sup>的田间大棚试验结果表明,与单施化肥相比,有机无机肥配施能显著提高西瓜产量、光合性能以及肥料利用率,其中蚯蚓粪配施化肥作用效果最为显著。有学者<sup>[46]</sup>认为,适宜的有机无机肥配施能够保证作物的稳产增产,同时显著增加水稻氮素累积量,提高水稻氮素利用效率。有机肥的施用也可以提高作物根系活力,促进根系对养分的吸收利用并向籽粒转移,从而提高作物产量<sup>[47]</sup>。

### 3 施用有机(类)肥料对土壤物理性质和养分有效性的影响

#### 3.1 施用有机(类)肥料对土壤物理性质的影响

土壤物理性质反映了土壤的水热状况及供给养分、协调环境的能力<sup>[27]</sup>。前人研究表明,增施有机肥可显著降低土壤容重,增加深层土壤中根系的分布,促进植株对养分的吸收,实现作物高产<sup>[48]</sup>。一般认为,施用有机肥降低土壤容重的原因可能是由于有机肥含有大量的有机质,施入土壤中能起到稀释的作用,同时有机质分解会产生腐殖酸等具有多孔特性的物质,从而增加土壤孔隙度<sup>[27,32]</sup>。生物有机肥中含有大量活性微生物,长期施用有助于促进土壤生物生命活动,加快营养物质转化,从而降低土壤容重,改善田间持水量等物理指标<sup>[49]</sup>。

稳定性良好的团聚体能够协调土壤中的水、肥、气、热,对土壤孔隙结构的维持和稳定起重要作用<sup>[50]</sup>。研究表明,施用有机肥可以提升土壤大团聚体的比例,增强土壤团聚体的稳定性,维持较好的土壤物理结构<sup>[51]</sup>。土壤有机质与土壤团聚体的形成密不可分,有机质分解产生的腐殖质能增加黏土颗粒的疏水性,有助于土壤团粒之间的聚合<sup>[52]</sup>。Annabi等<sup>[53]</sup>的研究结果表明,每2年施用1次城市固体废物堆肥可以使土壤团聚体的稳定性提高29.3%,从而有利于提高土壤的抗水蚀能力。张勇等<sup>[54]</sup>的研究结果表明,施用有机肥或生物有机肥均增加了粒径大于2 mm的水稳性团聚体含量,降低团聚体破坏率。综上所述,施用有机肥或生物有机肥有助于土壤团聚结构的形成,提高土壤物理结构的稳定性。

#### 3.2 施用有机(类)肥料对土壤pH、有机碳和养分含量的影响

土壤pH是表征土壤质量和肥力的重要参数之一<sup>[55]</sup>。农田土壤pH与作物产量、土壤养分有效性、土壤微生物群落变化密切相关,明确施肥对其的影响至关重要。表3列举了施用有机(类)肥料较全量化肥处理下耕层土壤(0~20 cm)pH、有机碳及养分含量变化的研究结果,可以看出,与施用全量化肥处理相比,施用有机肥或者生物有机肥均能改善土壤pH、提高土壤有机质、全氮和速效养分含量。施用有机肥对土壤pH的影响主要取决于土壤初始pH以及有机物料的特性。一般认为,有机肥能够有效改良土壤pH是因为有机肥中含有大量呈胶体状的腐殖质,当土壤处于酸性时,土壤中氢离子( $H^+$ )会与腐殖质胶体中的盐基离子进行交换<sup>[56]</sup>,从而提高土壤pH;当土壤处于碱性时,土壤中氢氧根离子( $OH^-$ )又可与腐殖质上吸附的氢离子( $H^+$ )结合生成水,降低土壤pH。胡天睿等<sup>[57]</sup>的试验结果表明,有机肥替代化肥可以降低土壤交换性酸和交换性铝含量,提高土壤阳离子交换量,从而有效防治红壤酸化,其中以有机肥替代40%化肥的处理效果最佳。此外,胡诚等<sup>[58-59]</sup>发现,在碱性土壤中施用生物有机肥能有效降低pH,起到中和作用。

土壤有机碳含量的变化受到许多管理措施的影响,例如施肥、秸秆还田和耕作方式等。由表3可以看出,与施全量化肥相比,施用有机(类)肥料可以显著增加土壤有机碳含量,增幅为4.35%~182.23%,



表 3 施用有机(类)肥料较施用全量化肥处理下土壤 pH、有机碳及养分含量的变化  
Table 3 Changes in soil pH, organic carbon content, and nutrient content under the treatment of applying organic-like fertilizers compared with those under the treatment of applying full amount fertilizers

施肥方式	有机肥种类	施用量 (t/hm <sup>2</sup> )	土壤类型	pH 增幅	有机碳 含量增幅 (%)	全氮含 量增幅 (%)	速效氮 含量增幅 (%)	速效磷 含量增幅 (%)	速效钾 含量增幅 (%)	试验年限 (年)	参考 文献
有机肥替代化肥	猪粪沼液	27.50	潮土	0.54	4.35	14.56	27.20	5.08	36.36	1	[25]
	牛粪	68.00	-	0.90	37.50	14.29	-20.00			1	[26]
	羊粪	5.40	红壤	1.31	10.20	41.74	-19.83	29.77	52.27	3	[25]
	蚓粪	4.97	潮土	0.06	25.09	10.20		32.95	0	2	[18]
	猪粪	15.00	-	0.97	39.60	54.70		30.10	36.90	2	[28]
	猪粪	28.00	黄泥田	0.48	41.77	20.92	30.28	175.39	30.22	28	[60]
	牛粪	135.00	褐土		38.17	158.42	166.68	737.59		24	[61]
有机无机肥配施	鸡粪	75.00	棕壤	0.16	182.23	199.25	25.00			8	[56]
	秸秆	8.10	黄壤	0.15	20.82	22.94		52.00	10.06	3	[62]
	牛粪	30.00	土垫旱耕人为土		19.16	30.84	58.27	147.02	39.29	3	[32]
	秸秆、猪粪	12.55	中层黑土	0.08	15.50		10.64	47.38	8.63	5	[33]
	牛粪	45.00	褐土		23.48	54.17	67.84	167.86		24	[61]
	鸡粪	22.50	黄壤土	-0.28	12.50		120.00	15.00	12.00	14	[63]
	猪粪	-	黄绵土	0.03	17.67	5.66	31.88	35.51	38.94	1	[64]
有机无机复混肥替代化肥	复混肥	0.60	潮土	-0.32	6.65	12.30		11.74	18.36	1	[34]
	复混肥	0.92	砖红壤	0.20	18.90	-13.64	2.56	49.81	91.40	2	[35]
生物有机肥替代化肥	生物有机肥	6.00	栗钙土		27.22		31.62	44.10	22.93	2	[36]
	生物有机肥	2.70	红壤	0.81	17.10	44.30	-20.96	24.43	20.45	3	[25]
	生物有机肥	15.00	-	-0.36	71.53	80.25	72.06	200.06	186.60	7	[58]
	生物有机肥	7.50	-	-0.34	47.81	48.15	51.13	73.21	92.94	7	[58]
	生物有机肥	0.45	潮褐土		4.39					1	[38]
	生物有机肥	10.00	潮土		27.98					2	[65]
	生物有机肥	20.00	潮土		42.94					2	[65]
复合微生物肥料	复合微生物肥料	0.60	潮土	-0.31	8.85	12.30		14.89	18.68	1	[34]

其中,吕真真等<sup>[60]</sup>通过试验发现,有机肥替代化肥处理能明显提高土壤有机碳储量,从而增加土壤阳离子交换能力,维持土壤碳平衡。总体来看,有机碳含量增幅表现为高量有机肥>低量有机肥。魏夏新等<sup>[66]</sup>的试验结果表明,相比施用其他有机物料,施用生物有机肥更有利于提高洞庭湖双季稻区土壤微生物碳含量和可溶性有机碳含量。在水稻-小麦轮作系统中施用 32 年农家肥后,0~15 cm 土层的有机碳含量相比于施用化肥处理增加了 17%<sup>[67]</sup>。就可持续性来讲,通过测定 40 年施用有机肥后的表层土壤有机碳含量发现,只有施用农家肥的土壤能够维

持 40 t/hm<sup>2</sup>的土壤有机碳含量,而施用液体有机肥和化肥处理的土壤有机碳含量分别减少了 23%和 43%<sup>[68]</sup>。

从表 3 中可以看出,施用有机(类)肥料较施用全量化肥能明显增加土壤全氮含量,增幅为 5.66%~199.25%,施用有机肥会增加土壤易氧化有机氮库,当植物在生长过程中土壤矿质氮供应不足时,土壤微生物通过矿化作用将有机氮矿化为无机氮供作物吸收利用<sup>[69]</sup>。然而,土壤氮素矿化在短期内是非常有限的。长期施用有机肥存在一个累积效应,一般在 4 到 5 年后这种效应才会显现出来<sup>[70]</sup>。前人<sup>[71]</sup>

研究结果表明,有机无机肥配施作为氮肥高效管理的关键施肥措施,通过增加土壤有机质为参与氮循环的微生物提供碳源,直接或间接调控土壤氮循环关键环节,提高氮肥利用率。土壤有机磷各组分含量可通过施用有机肥来增加,但各组分增加的幅度主要受土壤类型和有机肥种类的影响<sup>[72]</sup>。施用猪粪、紫云英绿肥、稻草等有机物料能显著提高活性有机磷、中活性有机磷和中稳性有机磷等组分含量<sup>[72]</sup>。此外,磷素的有效性还会受到碳磷比的影响<sup>[73]</sup>。施用有机(类)肥料较施用全量化肥还显著增加土壤速效磷和速效钾含量,增幅分别为5.08%~737.59%、0~186.60%(表3),可能是因为有机肥分解产生的有机酸不仅可以酸溶、络合土壤磷,也能通过其阴离子的交换影响土壤对磷的吸附与解吸,还能通过促进解磷微生物增殖而活化土壤磷<sup>[74]</sup>。余炜敏等<sup>[75]</sup>通过田间试验得出,施用有机肥或生物有机肥均可以提高菜地土壤活性磷和中等活性磷含量,施用生物有机肥效果更佳。河北潮土区小麦-玉米轮作体系中,秸秆还田可显著增加土壤缓效钾和速效钾含量,增强土壤的供钾能力,有助于缓解土壤钾素的亏缺状况<sup>[76]</sup>。长期施用有机肥或者有机无机复混肥均可以促进土壤自然钾素的释放<sup>[77]</sup>。在红壤双季玉米生产中,有机无机肥配施和有机肥单施的钾素盈余量均随年限的延长而逐渐降低<sup>[78]</sup>。魏晓兰等<sup>[79]</sup>通过盆栽试验发现,生物有机肥可以活化土壤中不溶态的磷、钾,将生物有机肥与化肥混合施用有助于提升土壤氮、磷、钾的供给,改善小白菜产量和提高肥料利用率。

铁(Fe)、锰(Mn)、铜(Cu)、锌(Zn)是植物生长所必需的微量元素<sup>[80]</sup>。土壤中植物可利用态微量元素的限制已经成为制约作物产量和品质的关键因素之一<sup>[81]</sup>。有机肥的施用不仅能够提供植物生长所需的微量元素,同时还可以改善土壤微量元素状况,Whiting等<sup>[82]</sup>和贝凯月等<sup>[80]</sup>通过试验发现,有机肥替代部分化肥较单施化肥明显增加设施土壤有效态Fe、Mn、Cu的含量。有机肥施入土壤后,大量的有机质与锌发生螯合反应进而增加锌的有效性,且有效态锌含量随有机肥施用量增加而增加<sup>[83]</sup>。生物有机肥不仅可以改善作物产量和品质,还能提高微量元素的有效性,如肖雪<sup>[84]</sup>对库尔勒香梨园土壤的研究结果表明,与施用全量化肥相比,增施生物有机肥处理的土壤中有有效态Mn、Cu、Zn含量显著提

高。

## 4 施用有机(类)肥料对土壤酶活性及微生物多样性的影响

### 4.1 施用有机(类)肥料对土壤酶活性的影响

表4列举了施用有机(类)肥料较施用全量化肥处理下耕层土壤(0~20 cm)酶活性变化的研究结果,可以看出,与施用全量化肥处理相比,施用有机肥或者生物有机肥可以提升土壤蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性,增幅分别为0~107.01%、0~94.44%、2.74%~100.00%。有机物料的长期投入提高了土壤腐殖质的含量,不仅增加土壤微生物的碳源,促进微生物繁殖,还显著增加土壤酶的保护性位点,进一步刺激酶活性提高<sup>[85-86]</sup>。有学者发现,在施用有机物料后,常常检测到其对土壤微生物活性的“遗余效应”(即长期受某一种特定因素的影响形成特定的微生物特性,当这一因素的影响终止后,其对微生物所产生的作用影响后续功能的发挥),这也进一步延长了植物养分的可获得性<sup>[11]</sup>。Ginting等<sup>[87]</sup>试验结果也表明,与施用化肥相比,施用4年堆肥和粪肥后的“遗余效应”促使土壤微生物量增加了20%~40%。此外,Luo等<sup>[88]</sup>的荟萃分析结果表明,施用有机物料可以通过提高与碳、氮、磷循环相关的胞外酶活性来促进有机质的降解以及养分矿化,进而维持或提高农田土壤肥力和功能潜力。

表4中孙家骏等<sup>[89]</sup>的田间试验结果表明,生物有机肥中的有机物料可以增加土壤微生物的碳源,促进酶活性提高。此外,生物有机肥中还含有固氮、溶磷、解钾菌等微生物功能菌,可以活化土著微生物,刺激胞外酶增多。然而,过量施用生物有机肥可能会抑制土壤酶活性,不利于土壤氮素、磷素的累积<sup>[90-91]</sup>。研究结果表明,施用复合微生物肥料可以显著提高草地土壤过氧化氢酶和脲酶活性,且腐殖酸微生物肥料效果优于其他复合微生物肥料<sup>[92]</sup>。闫瑞瑞等<sup>[93]</sup>的研究结果也表明,施用微生物菌剂与复合微生物肥料有助于提升草甸土壤养分含量、微生物碳含量和酶活性,提高了生态系统稳定性。

### 4.2 施用有机(类)肥料对土壤微生物多样性的影响

土壤微生物及其控制的生物过程对于维护农业生态系统的长期稳定性具有十分重要的作用<sup>[94]</sup>。土壤微生物群落是土壤生物区系中最重要的功能组

分,对环境变化非常敏感,对土壤生态系统变化和环境胁迫反应强烈<sup>[95]</sup>。研究结果表明,粪肥以及其他有机物料对土壤微生物活性和多样性的积极影响远高于其他管理措施(如保护性耕作)<sup>[11,56]</sup>。从表 4 中可以看出,与施用全量化肥相比,施用有机(类)肥料可以明显增加土壤真菌多样性和细菌多样性,增幅分别为0.30%~138.79%、0~156.64%。有研究结果<sup>[43,96-97]</sup>表明,变形菌门细菌和酸杆菌门细菌在土壤养分循环、有机质降解等过程中发挥着至关重

要的作用,而施用有机肥或有机无机复混肥可以提高这些土著优势微生物的丰度,增加土壤微生物的香农指数和物种丰度指数。白震等<sup>[96]</sup>在种植玉米的农田土壤上的研究结果表明,单施猪粪有机肥或猪粪有机肥配施化肥均有效地增加土壤氮磷钾养分含量,提高土壤细菌、真菌磷脂脂肪酸(PLFA)含量。Dong 等<sup>[98]</sup>通过试验也发现,有机肥替代化肥较不施肥处理微生物总 PLFA 含量增加 85%。

表 4 施用有机(类)肥料较施用全量化肥处理下土壤酶活性及微生物多样性的变化

Table 4 Changes in soil enzyme activity and microbial diversity under the treatment of applying organic-like fertilizers compared with those under the treatment of applying full amount fertilizers

施肥方式	有机肥种类	施用量 (t/hm <sup>2</sup> )	土壤类型	蔗糖酶 活性增幅 (%)	脲酶 活性增幅 (%)	磷酸酶 活性增幅 (%)	真菌群落 香农多样 性指数增 幅(%)	细菌群落 香农多样 性指数增 幅(%)	试验年限 (年)	参考 文献
有机肥替代化肥	猪粪	—	潮土	0	15.00	10.80		0	1	[89]
	菌渣	—	—	68.75	94.44			67.90	2	[90]
	稻壳炭基	0.30	沙壤土	107.01	38.63	47.16			1	[24]
	污泥炭基	0.30	沙壤土	22.44	31.45	7.76			1	[24]
	猪粪	7.50	—					20.56	2	[28]
	猪粪	15.00	—					42.09	2	[28]
	羊粪	5.40	红壤				13.11	3.09	3	[26]
有机无机肥配施	牛粪	30.00	土垫旱耕人为土	8.21	2.71	2.74			3	[32]
	秸秆	7.22	中层黑土	32.14	4.55	100.00			5	[33]
	牛粪	67.50	褐土			91.67			24	[61]
	秸秆	—	黄壤土				51.29	98.00	14	[63]
	鸡粪	22.50	黄壤土				61.63	64.53	14	[63]
	秸秆、鸡粪	22.50	黄壤土				138.79	156.64	14	[63]
有机无机复混肥替代化肥	复混肥	0.92	砖红壤	21.54	0	5.31	0.30	0.31	2	[35]
生物有机肥替代化肥	生物有机肥	2.70	红壤				9.83	10.31	3	[26]
	羊粪有机肥	6.00	栗钙土	38.61	63.20	33.44			2	[36]
	生物有机肥	0.45	潮褐土					2.33	1	[38]
	生物有机肥	—	潮土	30.00	29.20	31.4		0.64	1	[89]
	生物有机肥	10.00	潮土	3.91	10.34	6.50			2	[65]
	生物有机肥	20.00	潮土	7.25	18.57	24.39			2	[65]
	生物有机肥	—	沙壤土				29.17		2	[39]
	生物有机肥	—	沙壤土				70.83		2	[39]

与土壤氮循环相关的各种转化过程及其速率受微生物群落的调控,这些过程主要包括有机氮矿化、硝化、反硝化、硝酸盐还原过程<sup>[11]</sup>。马龙等<sup>[99]</sup>发

现,有机肥或玉米秸秆替代化肥均通过调控反硝化功能基因 *NirS* 和硝酸盐异化还原成铵功能基因 *NirB* 丰度减弱硝酸盐淋溶,并促进硝酸盐异化还原



成铵态氮供作物吸收利用,保护土壤氮素。张英等<sup>[97]</sup>的研究结果表明,施用不同有机肥均可以提高土壤细菌群落多样性,其中羊粪有机肥处理下变形菌门菌相对丰度较高,而猪粪有机肥处理下厚壁菌门菌相对丰度最高。除了细菌,有机肥施用还显著影响土壤真菌多样性及群落组成。王静等<sup>[100]</sup>的长期定位试验结果表明,有机肥配施磷肥较单施化肥有效地提高了甘薯根际土壤真菌数量和香农多样性指数。已有研究表明,长期秸秆还田和施用有机肥会增加农田土壤中子囊菌门真菌的相对丰度,并提高了根际土壤的真菌群落多样性<sup>[101]</sup>。

研究结果表明,施用生物有机肥可以明显降低病原真菌的相对丰度,增加根际土壤细菌和放线菌数量,有效降低土传病害的发生<sup>[102]</sup>。孔跃等<sup>[103]</sup>在番茄种植中施用生物有机肥后,番茄品质得到显著提升,番茄病害降低,土壤有机质含量增加。生姜连作地在施用有机肥或生物有机肥后,土壤细菌、真菌、放线菌的数量增加,细菌群落多样性指数和胞外酶活性显著增加,并且生姜枯萎病发病率明显下降<sup>[104]</sup>。生物有机肥或复合微生物肥料均含有促生或防病的功能菌,当施入土壤中,功能菌通过产生一种或多种抗生物质抵御植物病原菌侵害<sup>[102]</sup>。此外,施用生物有机肥会增加土壤细菌多样性,较高的细菌多样性占据了土壤生态系统更多的生态位,阻止病原菌进一步繁殖生存,从而有效减少土传病害的发生<sup>[105]</sup>。任胜林<sup>[106]</sup>在种植百合的连作土壤中发现,施用含枯草芽孢杆菌菌株 HQWBH1 的生物有机肥可以显著降低百合枯萎病发病率,防控效果达 77% 以上,还可以提高百合根际土壤中细菌和放线菌数量,降低尖孢镰刀菌数量,改善百合根际土壤微环境。

## 5 有机(类)肥料的作用机制

有机(类)肥料能够通过各种机制直接或间接地改善农田土壤性质,增加作物产量。施用商品有机肥或生物肥料会带来大量的有机质,增加土壤碳储量,促进碳循环和有机碳各组分周转。微生物对碳有效性的响应能显著影响土壤氮循环和磷循环<sup>[11]</sup>,加快有机态氮、磷向无机态氮、磷的转化,增加土壤氮储量和磷的生物有效性。作物产量与土壤微生物功能潜力和多功能稳定性有关<sup>[11]</sup>,有机(类)肥料可以通过提高养分的有效性促进作物产量的增

加,同时也能通过提高土壤酶活性和微生物多样性来维持作物生产力。此外,有机(类)肥料可以通过增加腐殖质调节土壤酸碱度,改善土壤结构。因此,在实际生产中,使用有机(类)肥料培肥土壤有利于保持土壤功能稳定,维持较高的农田生产力。

## 6 研究展望

中国人口不断增长,人均耕地面积不断减少,并且农业机械化程度低。因此,尽管粮食产量不断提高,中国粮食供给仍然面临着巨大挑战。近年来,化肥的过量施用导致农田土壤退化,耕地质量下降,长此以往必将影响作物产量和品质,不利于农业的可持续发展。为维持农田生产力,通过养分优化管理以减少化学肥料施用、提高养分利用率以及维持土壤肥力和功能已成为中国农业生产的迫切需求。

中国有机肥资源丰富,来源包括畜禽粪便、作物秸秆、果蔬残余、蘑菇渣以及餐厨废弃物等<sup>[107-116]</sup>。中国在施用有机(类)肥料方面有着悠久的历史,国家也一直大力扶持和推广有机(类)肥料,但目前还难以实现有机(类)肥料的大面积推广和应用。因此,今后需加强以下几个方面的研究:

第一,加强有机(类)肥料的理论基础研究,提升肥料品质。高温堆肥是有机物料腐熟的重要过程,堆肥过程中容易造成养分流失,应当加强在堆肥过程中如何固持养分、减少氮素损失的相关研究。加强对微生物肥料作用机理的深入研究,如微生物与植物互作机理研究等。此外,还需要研究菌株的贮存条件以及在根系的定殖能力和竞争能力等。

第二,加强有机(类)肥料生产设备技术研发。针对当前有机肥生产技术落后等问题,采用先进设备和现代化管理,优化有机(类)肥料生产工艺,可以有效降低生产成本,提高生产效率,增加生产效益。

第三,加强有机(类)肥料资源开发利用。通过构建“资源-产品-再生资源-产品”种养结合循环农业模式,许多废弃物和残留物如农作物残渣、食品加工废弃物等都能变成有机肥料。同时需加强畜牧养殖法规和饲料检验方面的管理,从源头减少重金属和抗生素进入养殖业,减少畜禽粪便作为有机肥可能带来的环境污染。

第四,明确有机(类)肥料大量元素和中微量元素养分释放规律。针对不同土壤类型和作物需求,



开展有机(类)肥料的类型选择和应用技术研究,以扩大其施用范围,建立起高效的有机肥施用技术;建立土壤肥力与有机肥施用相关数据库,从理化性质和微生物角度全面了解有机肥培肥土壤效果。

第五,高效微生物功能菌种的筛选。发展生物肥料有助于实现绿色高效农业,应针对性筛选高适应性的具有拮抗土传病原菌功能的微生物、具有促生功能的微生物和促进堆肥发酵的微生物。此外,大多数单一菌种由于受环境条件的制约、微生物之间的相互作用等因素影响,其使用效果往往不稳定,将不同菌株混合构建多功能菌群,有助于解决单菌环境适应性差和效果不稳定的问题,更好地发挥防控植物病害、促进植物生长的效果。在此基础上,利用优良功能菌株开发出高效微生物肥料和生物有机肥。

#### 参考文献:

- [1] 张福锁,申建波,危常州,等. 绿色智能肥料:从原理创新到产业化实现[J]. 土壤学报,2022,59(4):873-887.
- [2] CHEN Z M, DING W X, LUO Y Q, et al. Nitrous oxide emissions from cultivated black soil: a case study in Northeast China and global estimates using empirical model[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2014, 28(11):1311-1326.
- [3] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968):1008-1010.
- [4] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
- [5] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部关于印发《到2025年化肥减量化行动方案》的通知[EB/OL]. (2022-11-18) [2023-9-14]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202212/t20221201\\_6416398.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202212/t20221201_6416398.htm).
- [6] 杨兴明,徐阳春,黄启为,等. 有机(类)肥料与农业可持续发展和生态环境保护[J]. 土壤学报,2008,45(5):925-932.
- [7] 中国国家统计局. 中国有机肥施用量数据集[CP]. [2023-9-14]. <https://data.stats.gov.cn/>.
- [8] 陶磊,褚贵新,刘涛,等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报,2014,34(21):6137-6146.
- [9] LUO G W, LI L, FRIMAN V P, et al. Organic amendments increase crop yields by improving microbe-mediated soil functioning of agroecosystems: a meta-analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 124:105-115.
- [10] SEUFERT V, NAVIN R, FOLEY J A. Comparing the yields of organic and conventional agriculture[J]. Nature, 2012, 485(7397):229-232.
- [11] 罗功文. 有机培肥下土壤微生物群落及其功能特征的变化与机制研究[D]. 南京:南京农业大学,2020.
- [12] 龚雪蛟,秦琳,刘飞,等. 有机类肥料对土壤养分含量的影响[J]. 应用生态学报,2020,31(4):1403-1416.
- [13] 杨丽,李慧媛,柴小粉. 有机肥质量标准与关键生产技术研究综述[J]. 中国农业信息,2017(22):81-86.
- [14] 沈其荣. 中国有机(类)肥料[M]. 北京:中国农业出版社,2021.
- [15] 刘玉颖,戴健,杨劲峰,等. 长期不同培肥措施下玉米产量稳定性及棕壤氮素累积分布特征[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(5):823-834.
- [16] 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.
- [17] 杨凯,吴倩,蒲瑶瑶,等. 熏蒸条件下有机肥部分替代化肥对西瓜光合和氮代谢酶活性的影响[J]. 土壤通报,2020,51(4):905-911.
- [18] 李其胜,赵贺,汪志鹏,等. 有机肥替代部分化肥对稻麦轮作土壤养分利用和酶活性的影响[J]. 土壤通报,2020,51(4):912-919.
- [19] 杨凯,董青君,李其胜,等. 餐厨垃圾替代化肥对白菜和西兰花光合、抗氧化性及品质的影响[J]. 农业环境科学学报,2021,40(5):934-942.
- [20] 王文赞,韩建,倪玉雪,等. 有机肥替代化肥氮对苹果产量、品质及温室气体排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(3):437-448.
- [21] 关静,周静,徐青丹,等. 红壤性水稻土长期定位有机-无机肥配施对早稻产量构成与品质的影响[J]. 中国农学通报,2008(2):238-241.
- [22] ARIF M, ILYAS M, RIAZ M, et al. Biochar improves phosphorus use efficiency of organic-inorganic fertilizers, maize-wheat productivity and soil quality in a low fertility alkaline soil[J]. Field Crops Research, 2017, 214:25-37.
- [23] MIG A S, MARA L C, MARA S, et al. Agronomic evaluation of biochar, compost and biochar-blended compost across different cropping systems: perspective from the european project FERTIPLUS[J]. Agronomy, 2019, 9(5). Doi:103390/agronomy9050225.
- [24] 李夏,汪玉瑛,吕豪豪,等. 炭基有机肥对设施番茄生长及其土壤性质的影响[J]. 农业环境科学学报,2023,42(3):568-577.
- [25] 肖倩,武升,刘莹,等. 不同有机养分替代化肥对小麦产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响[J]. 农业环境科学学报,2023,42(10):2291-2300.
- [26] 安祥瑞,江尚焘,谢昶琰,等. 减施化肥配施有机肥对荔枝园土壤微生物区系的影响[J]. 应用生态学报,2022,33(4):1099-1108.
- [27] 胡国智,闫森,熊韬,等. 适宜有机肥氮替代化肥氮比例提高甜瓜养分吸收、产量和品质[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(2):260-268.
- [28] 俞巧钢,孙万春,叶静,等. 有机肥替代化肥对橘园土壤培肥及果实产量品质的影响[J]. 农业资源与环境学报,2023,40

- (4):755-762.
- [29] 温廷臣,张曰东,袁 亮,等.商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响[J].中国农业科学,2018,51(11):2136-2142.
- [30] 王书停,李文广,蔡慧芳,等.有机无机肥配施对旱地冬小麦产量和氮素吸收利用的影响[J].农业资源与环境学报,2023,40(2):393-402.
- [31] 张 然,史 雷,马 龙,等.有机无机肥配施对旱地冬小麦产量及土壤物理性质的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):325-330.
- [32] 梁 路,马 臣,张 然,等.有机无机肥配施提高旱地麦田土壤养分有效性及酶活性[J].植物营养与肥料学报,2019,25(4):544-554.
- [33] 侯建勋,张水梅,袁静超,等.玉米秸秆源有机物料对黑土养分有效性及酶活性的提升效应[J].植物营养与肥料学报,2021,27(4):610-618.
- [34] 孙鹰翔,王明伟.有机无机复混肥对花生生长和品质的影响[J].土壤,2019,51(5):910-915.
- [35] 杨 旭,刘海林,黄艳艳,等.有机无机复混肥施用量对热带水稻微生物群落和酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(4):619-629.
- [36] 田 露,苏文斌,郭晓霞,等.化肥减施下生物有机肥对连作甜菜耕层土壤质量及产量的影响[J/OL].生态学杂志,2023(42):1-11.[2023-11-29].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230506.1702.006.html>.
- [37] 张俊峰,颜建明,张玉鑫,等.生物有机肥部分替代化肥对日光温室黄瓜产量、品质及肥料利用率的影响[J].中国蔬菜,2020(6):58-63.
- [38] 李 皓,甄怡铭,张子旋,等.减氮配施有机物质对麦田土壤性质和小麦产量的影响[J].水土保持学报,2022,36(2):166-172.
- [39] 江尚焘,栗 晗,彭海英,等.有机肥替代部分化肥对芒果丛枝菌根真菌群落的影响[J].应用生态学报,2023,34(2):481-490.
- [40] 师海斌,马亚军,张 璐,等.减量施氮配施复合微生物肥料对旱地苹果产量、品质的影响[J].陕西农业科学,2023,69(2):87-91.
- [41] 张 苗,施娟娟,曹亮亮,等.添加三种外源蛋白研制生物有机肥及其促生效果[J].植物营养与肥料学报,2014,20(5):1194-1202.
- [42] 孙 超.复合微生物肥料 F25 对渭北苹果园土壤环境及苹果产量品质的影响研究[D].西安:西北大学,2017.
- [43] 卢云峰,许 航,段华泰,等.叶面喷施含 *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9 复合微生物液体肥料的肥效研究[J].土壤,2019,51(5):903-909.
- [44] 王继雯,赵俊杰,刘 莉,等. M-14 复合生物肥料抗小麦孢囊线虫及增产效果[J].中国生物防治学报,2016,32(5):676-680.
- [45] 蒲瑶瑶,吕秀敏,邹梦成,等.熏蒸条件下有机肥部分替代化肥对西瓜生长及养分利用的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):306-311.
- [46] 刘红江,蒋华伟,孙国峰,等.有机-无机肥不同配施比例对水稻氮素吸收利用率的影响[J].中国土壤与肥料,2017(5):61-66.
- [47] 李絮花,杨守祥,于振文,等.有机肥对小麦根系生长及根系衰老进程的影响[J].植物营养与肥料学报,2005,11(4):467-472.
- [48] 蔡红光,袁静超,闫孝贡,等.不同培肥措施对土壤物理性状及无机氮的影响[J].土壤通报,2017,48(2):445-453.
- [49] 曲成闯,陈效民,韩召强,等.生物有机肥对潮土物理性状及微生物量碳、氮的影响[J].水土保持通报,2018,38(5):70-76.
- [50] 李春越,常 顺,钟凡心,等.种植模式和施肥对黄土旱塬农田土壤团聚体及其碳分布的影响[J].应用生态学报,2021,32(1):191-200.
- [51] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等.不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J].生态学报,2010,30(4):1035-1041.
- [52] 张 瑞,王鸿飞,吴怡慧,等.化肥与有机肥配施对设施土壤团聚体稳定性及其有机碳、全氮含量的影响[J].中国土壤与肥料,2023(2):1-9.
- [53] ANNABI M, HOUOT S, FRANCOU F, et al. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(2):413-423.
- [54] 张 勇,徐 智,邓亚琴,等.有机类肥料部分替代化肥条件下新垦红壤团聚体变化特征及其与土壤养分供应的关系[J].西南农业学报,2021,34(12):2685-2690.
- [55] 孟红旗,刘 景,徐明岗,等.长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J].土壤学报,2013,50(6):1109-1116.
- [56] 王 莹,周 珺,孙德龙,等.不同量化肥与有机肥配施对设施番茄栽培土壤硝化潜势和 pH 的影响[J].植物营养与肥料学报,2023,29(4):602-613.
- [57] 胡天睿,蔡泽江,王伯仁,等.有机肥替代化学氮肥提升红壤抗酸化能力[J].植物营养与肥料学报,2022,28(11):2052-2059.
- [58] 胡 诚,曹志平,罗艳蕊,等.长期施用生物有机肥对土壤肥力及微生物生物量碳的影响[J].中国生态农业学报,2007,15(3):48-51.
- [59] 李佳乐,梁泳怡,刘文杰,等.有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗生长和土壤环境的影响[J].应用生态学报,2022,33(2):431-438.
- [60] 吕真真,吴向东,侯红乾,等.有机-无机肥配施比例对双季稻田土壤质量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):904-913.
- [61] 陈浩宁,周怀平,文永莉,等.长期不同施肥下褐土养分及酶活性的生态化学计量特征[J].植物营养与肥料学报,2022,28(6):972-983.
- [62] 李其胜,张顺涛,赵 贺,等.化肥减量配施有机物料对油菜地土壤线虫群落结构的影响[J].生态学杂志,2021,40(12):3970-3981.
- [63] 郭振威,李永山,陈梦妮,等.长期秸秆还田和施用有机肥对连

- 作棉田土壤化学性质及微生物数量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(11): 177-186.
- [64] 马悦欣, 刘乐彤, 唐 锐. 猪粪有机肥对红富士苹果产量及品质的影响[J]. 果树学报, 2023, 40(8): 1559-1571.
- [65] 曲成闯, 陈效民, 张志龙, 等. 施用生物有机肥对黄瓜连作土壤有机碳库和酶活性的持续影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 3147-3154.
- [66] 魏夏新, 熊俊芬, 李 涛, 等. 有机物料还田对双季稻田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2373-2380.
- [67] KUKAL S S, REHANA R, BENBI D K. Soil organic carbon sequestration in relation to organic and inorganic fertilization in rice-wheat and maize-wheat systems [J]. Soil & Tillage Research, 2008, 102(1): 87-92.
- [68] NARDI S, MORARI F, BENTI A, et al. Soil organic matter properties after 40 years of different use of organic and mineral fertilizers[J]. European Journal of Agronomy, 2004, 21(3): 357-367.
- [69] 陈香碧, 胡亚军, 秦红灵, 等. 稻作系统有机肥替代部分化肥的土壤氮循环特征及增产机制[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 1033-1042.
- [70] LEROY B, BOMMELE L, REHEUL D, et al. The application of vegetable, fruit and garden waste (VFG) compost in addition to cattle slurry in a silage maize monoculture: Effects on soil fauna and yield[J]. European Journal of Soil Biology, 2006, 43(2): 91-100.
- [71] 左明雪, 孙 杰, 徐如玉, 等. 丛枝菌根真菌与有机肥配施对甜玉米根际土壤氮素转化及氮循环微生物功能基因的影响[J]. 福建农业学报, 2020, 35(9): 1012-1025.
- [72] 陈利军, 蒋瑞霖, 王浩田, 等. 长期施用有机物料对旱地红壤磷组分及磷素有效性的影响[J]. 土壤, 2020, 52(3): 451-457.
- [73] 赵少华, 宇万太, 张 璐, 等. 土壤有机磷研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2189-2194.
- [74] 叶会财, 李大明, 柳开楼, 等. 不同有机培肥方式对红壤性水稻土磷素的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(2): 374-380.
- [75] 余炜敏, 梁嘉伟, 王荣萍, 等. 不同有机肥对菜地根际土壤磷素形态及蔬菜生长的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(32): 90-94.
- [76] 柴如山, 安之冬, 马 超, 等. 我国主要粮食作物秸秆钾养分资源量及还田替代钾肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 201-211.
- [77] 张会民, 徐明岗, 吕家珑, 等. 长期施肥对水稻土和紫色土钾素容量和强度关系的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 640-645.
- [78] 柳开楼, 黄 晶, 叶会财, 等. 长期施钾对双季玉米钾素吸收利用和土壤钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12): 2235-2245.
- [79] 魏晓兰, 吴彩姣, 孙 玮, 等. 减量施肥条件下生物有机肥对土壤养分供应及小白菜吸收的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 40-44.
- [80] 贝凯月, 向春阳, 赵 秋, 等. 有机肥替代化肥对设施蔬菜土壤有效态 Fe、Mn、Cu 含量的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(6): 148-154.
- [81] JONES D L, CROSS P, WITHERS P J A, et al. Nutrient stripping: the global disparity between food security and soil nutrient stocks[J]. Journal of Applied Ecology, 2013, 50(4): 851-862.
- [82] WHITING S N, DESOUZA M P, TERRY N. Rhizosphere bacteria mobilize Zn for hyperaccumulation by *Thlaspi caerulescens*. [J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(15): 3144-3150.
- [83] 茹淑华, 张国印, 李虎群, 等. 禽粪有机肥对土壤主要养分和微量元素锌累积的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(S2): 157-162.
- [84] 肖 雪. 施用生物有机肥对库尔勒香梨园土壤微量元素有效性及果实品质的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
- [85] 李其胜, 杨 凯, 汪志鹏, 等. 稻-油轮作下有机替代对土壤胞外酶活性及多功能性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 345-352.
- [86] PASCUAL J A, GARCIA C, HERNANDEZ T. Lasting microbiological and biochemical effects of the addition of municipal solid waste to an arid soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 30(1): 1-6.
- [87] GINTING D, KESSAVALOU A, EGHBALL B, et al. Greenhouse gas emissions and soil indicators four years after manure and compost applications. [J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(1): 23-32.
- [88] LUO G W, LI L, FRIMAN V P, et al. Organic amendments increase crop yields by improving microbe-mediated soil functioning of agroecosystems: a meta-analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 124: 105-115.
- [89] 孙家骏, 付青霞, 谷 洁, 等. 生物有机肥对猕猴桃土壤酶活性和微生物群落的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 829-837.
- [90] 万连杰, 何 满, 田 洋, 等. 有机肥替代化肥比例对槲栎生长发育、产量和土壤生物学特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(4): 675-687.
- [91] 秦 秦, 宋 科, 孙丽娟, 等. 生物有机肥与化肥减量配施对稻田土壤酶活性和土壤肥力的影响[J]. 上海农业学报, 2022, 38(1): 21-26.
- [92] 权国玲, 谢开云, 全宗永, 等. 复合微生物肥料对羊草草原土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(2): 27-36.
- [93] 闫瑞瑞, 卫智军, 乌仁其格, 等. 微生物肥料对呼伦贝尔打孔羊草草甸草原土壤微生物及酶活性的影响研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(4): 597-604.
- [94] 郭奇峰, 陆扣萍, 毛霞丽, 等. 长期不同施肥对农田土壤养分与微生物群落结构的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(5): 150-156.
- [95] 王青霞, 李美霖, 陈喜靖, 等. 秸秆还田下氮肥运筹对水稻各生育期土壤微生物群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 935-944.
- [96] 白 震, 张 明, 宋斗妍, 等. 不同施肥对农田黑土微生物群落的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3244-3253.
- [97] 张 英, 武淑霞, 雷秋良, 等. 不同类型粪肥还田对土壤酶活性

- 及微生物群落的影响[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1175-1184.
- [98] DONG W Y, ZHANG X Y, DAI X Q, et al. Changes in soil microbial community composition in response to fertilization of paddy soils in subtropical China [J]. Applied Soil Ecology, 2014, 84: 140-147.
- [99] 马 龙, 高 伟, 栾好安, 等. 有机肥/秸秆替代化肥模式对设施菜田土壤氮循环功能基因丰度的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(10): 1767-1778.
- [100] 王 静, 袁 洁, 王 磊, 等. 施肥方法对甘薯根际土壤真菌群落的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(5): 876-888.
- [101] 陈梦妮, 李永山, 王 慧, 等. 麦田土壤真菌多样性对麦玉轮作长期秸秆还田和配施有机肥的响应[J]. 微生物学通报, 2023, 50(6): 2481-2496.
- [102] 朱 震, 张国漪, 徐阳春, 等. 产脂肽菌株发酵生物有机肥的生物防治与促生作用研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 104-110.
- [103] 孔 跃, 于福庆, 孙祥武, 等. 生物有机肥对西红柿生长及品质影响效应初探[J]. 华北农学报, 2007, 22(S1): 111-114.
- [104] 张碧波, 廖林正. 生姜青枯病的生态防治研究[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2005, 27(3): 305-308.
- [105] 陈德乐, 王兴祥, 张亚楠, 等. 持续施用生物有机肥对花生产量和根际细菌群落的影响[J]. 土壤, 2021, 53(3): 537-544.
- [106] 任胜林. 防控百合枯萎病专用生物有机肥研制及其效应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [107] 弥明言, 杜 超, 温小珊, 等. 液态有机肥灌溉施用对南方橘园红壤磷素累积及流失风险的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(22): 223-233.
- [108] 刘中良, 高俊杰, 陈 震, 等. 氮肥减量配施有机肥对大白菜产量、品质及氮肥利用率的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(11): 1138-1144.
- [109] 姜立康, 周 霞. 替代补偿、有效市场对果菜农有机肥替代化肥行为的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(5): 1374-1381.
- [110] 李 虹, 高华军, 吕洪坤, 等. 有机肥和品种互作对土壤微生物群落及雪茄烟叶生长和产量的影响[J]. 南方农业学报, 2022, 53(6): 1552-1559.
- [111] 潘亚杰, 朱晓辉, 常会庆, 等. 秸秆有机肥替代化学氮肥对菠菜生长和氮利用率的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(3): 650-656.
- [112] 王光梅, 胡兵辉. 有机肥施用量和干旱时期对番茄产量及品质的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(4): 1040-1049.
- [113] 廖逸宁, 郭素娟, 王芳芳, 等. 有机-无机肥配施对板栗园土壤肥力及根系功能性状的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(5): 84-92.
- [114] 姚童言, 黄绵松, 宋亚康, 等. 长期施用菇渣与化肥对潮土地区玉米和小麦产量及稳定性的影响[J]. 生物加工过程, 2021, 19(1): 79-84.
- [115] 范之馨, 王艮梅, 张焕朝, 等. 添加有机肥对滨海盐渍土壤溶解性有机碳特征的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(1): 15-24.
- [116] 李佳璠, 宋梦圆, 许盟盟, 等. 不同有机肥处理对番茄生长、产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(12): 173-180.

(责任编辑: 陈海霞)