

马顺圣,毛伟,李文西. 有机肥等氮量替代化肥对水稻产量、土壤理化性状及细菌群落的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(24):90-94.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.24.016

有机肥等氮量替代化肥对水稻产量、土壤理化性状及细菌群落的影响

马顺圣¹, 毛伟², 李文西²

(1. 扬州市职业大学/地理信息采集加工及应用教育部协同创新中心/江苏省种植养殖业安全环境技术及装备工程研究中心, 江苏扬州 225009;
2. 江苏省扬州市耕地质量保护站, 江苏扬州 225101)

摘要:研究不同有机肥氮等量替代化肥中氮对水稻产量及构成因素、土壤基本理化性状、土壤细菌群落特征的影响,为科学合理施肥提供理论依据。在江苏省仪征市肥料长期试验监测点进行试验,以当地习惯施肥为对照(M0),有机肥中氮等量替代10%(M10)、20%(M20)、30%(M30)、40%(M40)、50%(M50)化学肥料(尿素)中的氮,有机肥作为基肥一次性施入土壤。水稻成熟期取样测定水稻产量及产量构成因素、土壤理化性质和细菌群落结构特征。与当地习惯施肥相比,有机肥不同等氮量替代化肥后能够有效提高水稻产量,提高水稻单位面积穗数和千粒质量,降低穗粒数;增加水稻成熟期的土壤有机质、速效钾含量,使酸性土壤更趋向中性,降低土壤全磷、有效磷、铵态氮和硝态氮的含量;有机肥替代化肥后提高了土壤细菌的丰富度,土壤的变形菌门、放线菌门、拟杆菌门、硝化螺菌门的丰度有所提高,绿弯菌门与酸杆菌门均呈下降趋势。随着替代比例的提高,土壤中酸杆菌门的梭菌科和变形菌门黄杆菌科丰度先下降后上升,与作物产量变化趋势相反。与当地常规施肥相比,有机肥不同等氮量替代化肥后能够有效提高水稻产量,有机肥中氮替代10%和40%化肥中氮的增产效果较明显。

关键词:水稻;产量;有机肥等氮量替代化肥;土壤理化性状;土壤细菌群落

中图分类号:S511.06;S158 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)24-0090-05

水稻稳产高产关系到国家粮食安全^[1],化肥促进作物生长、增加作物产量的效果显著,是保证水稻高产稳产的基本途径。粮食产量约有40%的贡献率源于使用化肥,甚至更高^[2]。但由于肥料运筹结构不合理,导致土壤养分失衡,引起土壤有机质含量持续下降,土壤团粒结构比例下降,土壤生态劣变,土壤综合肥力和生产力下降^[3-5]。科学合理地施用有机肥,不仅可以为作物提供大量而平衡的营养物质,还可以有效地改良土壤性状,从而促进作物生长发育与高产优质的形成^[6-8]。有机肥替代部分化肥是今后一段时间内我国肥料结构变化发展的重要任务。

土壤微生物是土壤重要的组成部分,参与土壤中多种养分转化过程,在改善和维持良好的土壤结构、持续高效地转化与供给作物有效养分、促进作物生长发育、消除土壤有毒有害物质、维持土壤生

态系统结构与功能、保证土壤可持续生产能力等方面具有十分重要的作用^[9-11]。施肥是频繁的农田作业措施,高强度地向土壤中输入各种养分或能量物质,导致土壤微生物群落结构以及特定菌群产生变化^[12-15]。长期偏施化肥尤其是氮肥,造成土壤中参与氮素等养分转化的微生物数量及活性明显下降,致使土壤中可提供给作物的氮素等有效养分只能越来越依赖于施用的化肥^[16-18]。有机肥替代部分化肥不仅能有效改良土壤物理、化学和生物学性状,而且能维持甚至提高作物产量、改善农产品品质、协调高产与高环境风险的矛盾^[19-22]。本试验设置不同的有机肥替代化肥的比例,研究其对水稻生长、土壤基本理化性状和土壤细菌群落的影响,旨在明确有机肥等氮替代部分化肥的适宜用量及效果,为区域性“两减”战略实施提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验地点位于江苏省仪征市新集镇毛桥村(119°17'E、32°19'N)壮禾合作社生产基地内。试验田土壤为淤泥质水稻土,土壤全氮含量

收稿日期:2021-10-06

基金项目:江苏省重点研发计划(编号:BE2018362);江苏省高等学校
校优秀科技创新团队项目(编号:苏教科[2021]1号)。

作者简介:马顺圣(1972—),男,江苏兴化人,博士,主要从事“三农”
及农业生态资源研究。E-mail:1609630715@qq.com。

0.52 g/kg、有机质含量为 13.57 g/kg、有效磷含量为 22.3 mg/kg、速效钾含量为 82.4 mg/kg, pH 值 6.13。

1.2 试验设计

试验采用稻麦轮作的种植方式。2018 年 5 月收获小麦后移栽水稻, 10 月水稻收获后测产并采集土壤样品。试验采取有机氮(有机肥中氮)等量替代化肥氮(尿素)、不设磷和钾等量替代处理, 以当地习惯施肥(M0, 不施用有机肥)为对照, 设置有机氮依次替代 10% (M10)、20% (M20)、30% (M30)、40% (M40) 和 50% (M50) 化肥氮等处理。试验共设 6 个处理, 每个处理重复 3 次, 计 18 个小区, 小区面积 132 m², 每个小区独立排灌, 小区间用水泥田埂隔开, 确保肥、水不互串, 试验区外设置保护行。试验用有机肥为南京某企业以猪粪为主要原料生产的宁粮牌普通有机肥, 养分含量(以干物质计)为 N 1.92%、P₂O₅ 1.53%、K₂O 1.61%。无机肥料为普通市售尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 4.5%)和氯化钾(K₂O 60%)。肥料分为基肥和追肥, 基肥在播种前 7 d 一次性施入土壤, 施用量为 N 270 kg/hm²、P₂O₅ 45 kg/hm²、K₂O 69 kg/hm²。拔节期、孕穗期各施用等量追肥 1 次, 追肥总用量为 N 160 kg/hm²、P₂O₅ 40 kg/hm²、K₂O 65 kg/hm²。有机氮替代基肥中的化学氮, 有机肥在基肥施用中以撒施的形式与无机肥一次性施入土壤后旋耕均匀。各项大田管理措施按照当地常规田间管理方式进行。

1.3 测定与分析

1.3.1 水稻产量及其构成 水稻成熟期各小区随机取 20 穴进行考种, 测定有效穗数、穗粒数、千粒质量。产量为各小区随机收割 20 m² 水稻, 晒干、脱粒、风干后称质量, 计算产量。

1.3.2 土壤理化性状 采用鲍士旦提出测试分析方法测定土壤有机质、全氮、铵态氮、硝态氮、全磷、速效磷和有效钾含量^[23]。土壤 pH 值和电导率(EC)采用纯净水浸提(土水比 1:2.5)后仪器直接测定。

1.3.3 土壤细菌群落分析 2018 年 10 月采集水稻成熟期耕层(0~15 cm)土壤样品, 鲜样过 2 mm 筛后保存于 -80 °C 冰箱中, 测定土壤细菌群落特征。土壤总 DNA 的提取使用 PowerSoil DNA 提取试剂盒(MoBio Laboratories, Inc., 美国), DNA 提取土壤样品中微生物 DNA。用 338 F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')为引物, 扩增细菌 16S rRNA

基因的 V3~V4 区域。在 Illumina MiSeq 平台进行测序(上海美吉生物医药科技有限公司)。

1.4 数据统计分析

水稻产量及其构成、土壤理化性质数据采用 SPSS 21.0 进行统计分析, 采用 Duncan's 新复极差法对数据进行多重比较($P < 0.05$)。测序数据分析通过 Majorbiobiocloud 平台进行(<http://www.i-sanger.com>), 经过平台分析所得的有效序列根据 97% 的相似度归类, 采用 student's *t* test 方法对细菌多样性进行计数, 采用非度量多维尺度分析(NMDS)方法比较不同处理样本间的细菌群落组成相似度。

2 结果与分析

2.1 不同处理水稻产量及产量构成因素

有机肥等氮量替代化肥显著影响水稻产量。表 1 可以看出, M0 水稻产量为 9 064.5 kg/hm², 有机肥等氮量替代 10%~50% 化肥后, 水稻产量在 8 203.5~10 096.5 kg/hm² 范围内波动, 平均为 9 210.0 kg/hm², 水稻产量明显增加。M10、M40 处理水稻产量显著高于 M0 处理, M20、M30 处理水稻产量显著低于 M0 处理。进一步分析水稻产量构成因素发现, M0 处理穗数和千粒质量明显小于有机肥等氮量替代化肥处理的平均值, 但是穗粒数变化特征与穗数和千粒质量相反。M0 处理的穗数显著小于 M30、M40 处理, 显著大于 M10 处理; M0 处理的穗粒数显著小于 M10 处理, 显著大于 M30、M40 处理; M0 处理的千粒质量显著小于 M40 处理。说明 M10、M40 处理有利于提高水稻产量。

表 1 有机肥等氮量替代化肥对水稻产量及其构成因素的影响

处理	穗数 (万/hm ²)	穗粒数 (粒/穗)	千粒质量 (g)	产量 (kg/hm ²)
M0	289.5 ± 4.5c	122.3 ± 2.1b	25.6 ± 0.5b	9 064.5 ± 157.5b
M10	268.5 ± 6.0d	137.9 ± 1.4a	26.8 ± 0.5ab	9 931.5 ± 91.5a
M20	277.5 ± 10.5cd	119.1 ± 1.5bc	26.1 ± 0.2ab	8 581.5 ± 228.0c
M30	310.5 ± 3.0ab	104.1 ± 1.6d	25.4 ± 0.2b	8 203.5 ± 84.0c
M40	318.0 ± 7.5a	116.9 ± 1.7c	27.3 ± 0.6a	10 096.5 ± 145.5a
M50	292.5 ± 4.5bc	121.9 ± 1.3bc	26.3 ± 0.5ab	9 382.5 ± 126.0b

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。表 2 同。

2.2 不同处理土壤理化性状

有机肥等氮量替代化肥显著影响土壤性状。从表 2 可以看出, 水稻收获后, M20 处理土壤全氮含量最高, 为 0.608 g/kg, 显著高于 M10、M40、M50 处

理,与 M0 处理差异不显著;M40 处理土壤的铵态氮最高,为 18.9 mg/kg,显著高于其他各处理;M50 处理(31.2 mg/kg)、M0 处理(30.4 mg/kg)土壤的硝态氮含量较高,显著高于 M30 处理(其土壤的硝态氮含量最低,为 18.2 mg/kg)。各处理中,M0 处理土壤的全磷(0.925 g/kg)和有效磷(22.5 mg/kg)含量最高,有机肥等氮量替代化肥各处理间差异不显著。M30 处理土壤的速效钾含量最高,为 104.1 mg/kg;M10 处理土壤的速效钾含量最低,为 72.1 mg/kg。

表 2 有机肥等氮量替代化肥对土壤性质的影响

处理	全氮含量 (g/kg)	铵态氮含量 (mg/kg)	硝态氮含量 (mg/kg)	全磷含量 (g/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	有机质含量 (g/kg)	pH 值
M0	0.502 ± 0.042ab	15.0 ± 1.2b	30.4 ± 0.5a	0.925 ± 0.092a	22.5 ± 4.1a	84.5 ± 6.7cd	13.9 ± 0.2b	6.09 ± 0.04e
M10	0.433 ± 0.031b	8.8 ± 0.5d	23.6 ± 0.9b	0.757 ± 0.045b	19.5 ± 4.2a	72.1 ± 3.0d	17.2 ± 0.2a	6.19 ± 0.02d
M20	0.608 ± 0.046a	12.0 ± 0.8c	24.0 ± 1.0b	0.761 ± 0.051b	19.7 ± 2.3a	99.5 ± 5.9ab	16.0 ± 0.4a	6.64 ± 0.02a
M30	0.538 ± 0.021ab	13.9 ± 1.0bc	18.2 ± 0.6c	0.897 ± 0.032ab	19.7 ± 1.6a	104.1 ± 2.6a	17.1 ± 0.6a	6.33 ± 0.04bc
M40	0.432 ± 0.047b	18.9 ± 0.1a	24.1 ± 0.6b	0.791 ± 0.024ab	19.2 ± 1.9a	84.4 ± 4.0cd	17.1 ± 0.2a	6.31 ± 0.02c
M50	0.493 ± 0.019b	12.7 ± 0.2c	31.2 ± 1.2a	0.870 ± 0.032ab	19.5 ± 1.3a	89.7 ± 1.5bc	15.9 ± 0.6a	6.40 ± 0.01b

2.3 不同处理土壤细菌群落结构特征

有机肥等氮替代部分化肥后,改变了土壤细菌群落结构。从 2018 年水稻成熟期所采集的 6 个处理 18 个土壤样品,获得总共 976 932 个高质量 16S rRNA 序列,这些序列按 97% 的相似度被划分为 4 921 个 OTU。从图 1 可以看出,各处理共享 2 363 个 OTU,共享的 OTU 约占总 OTU 的 50%。M10、M20、M30、M40、M50 处理中分别发现独有 54、12、3、25、7 个 OTU,表明肥料运筹中不同量有机肥等氮替代对土壤细菌群落特征有影响。

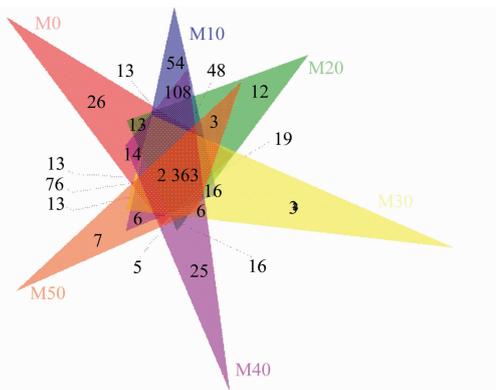


图 1 有机肥等氮量替代化肥后土壤细菌群落 OUT 维恩图

Chao 指数反映了土壤细菌的丰富度,Simpson 指数反映了土壤细菌的多样性。从图 2 - A 可知,随着有机肥等氮量替代比例的增加,Chao 指数整体呈下降的趋势,在使用 50% 有机肥时,Chao 指数最

有机肥等氮量替代化肥各处理土壤有机质含量和 pH 值显著高于 M0 处理,有机肥等氮量替代化肥处理间的土壤有机质含量差异不显著,而 M10、M20 处理土壤 pH 值差异不显著,但显著高于 M30、M40、M50 处理。表明有机肥等氮量替代化肥总体上增加了种植水稻后的土壤有机质、速效钾含量,使土壤 pH 值更趋向中性,降低了土壤全磷、有效磷、铵态氮和硝态氮的含量,对土壤全氮含量无明显影响。

低,小于 M0 处理。从图 2 - B 可以看出,土壤细菌 Simpson 指数随有机肥等氮替代比例的增加呈先下降后上升的趋势。以处理 M40 为最高,其次为 M30 与 M50 处理,而 M10 和 M20 处理的 Simpson 指数则小于 M0 处理。表明适量的有机肥等氮替代化肥可提高稻田土壤细菌的丰富度和多样性。

有机肥等氮量替代化肥对土壤细菌群落组成产生显著影响。从图 3 - A 可以看出,变形菌门(Proteobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)、酸杆菌门(Acidobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidetes)所占丰度较高,在各样品中占总比例 80% 以上。其中,变形菌门平均丰度约为 40%。与 M0 处理相比,有机肥等氮量替代化肥各处理的土壤中的变形菌门、放线菌门和拟杆菌门的丰度均有所提高;而绿弯菌门和酸杆菌门则在有机肥处理后呈下降趋势。硝化螺旋菌门(Nitrospirae)所占丰度也随有机肥的施用而增加。从图 3 - B 可以看出,酸杆菌门的梭菌科所占丰度最高,占总序列的 30.0% ~ 5.5%,其中 M0 和 M50 处理中梭菌科高于其他处理。变形菌门黄杆菌科所占比例也是 M0、M50 处理较高。

3 讨论与结论

施肥能够有效改良培肥土壤,提升土壤供肥能力,增加农作物产量,是农业稳产高产的有效手

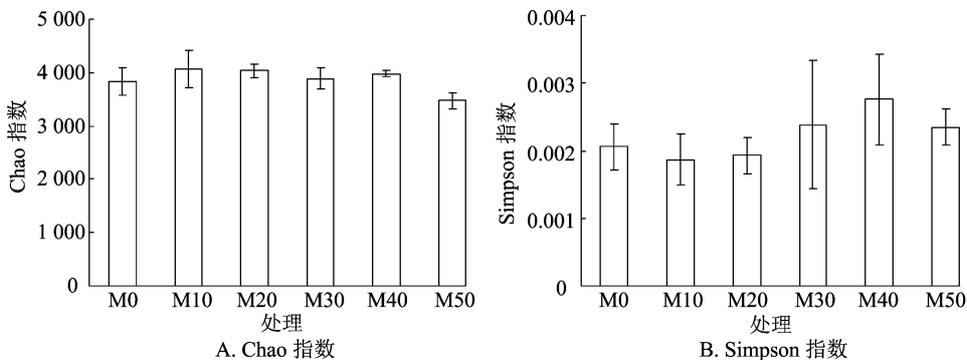
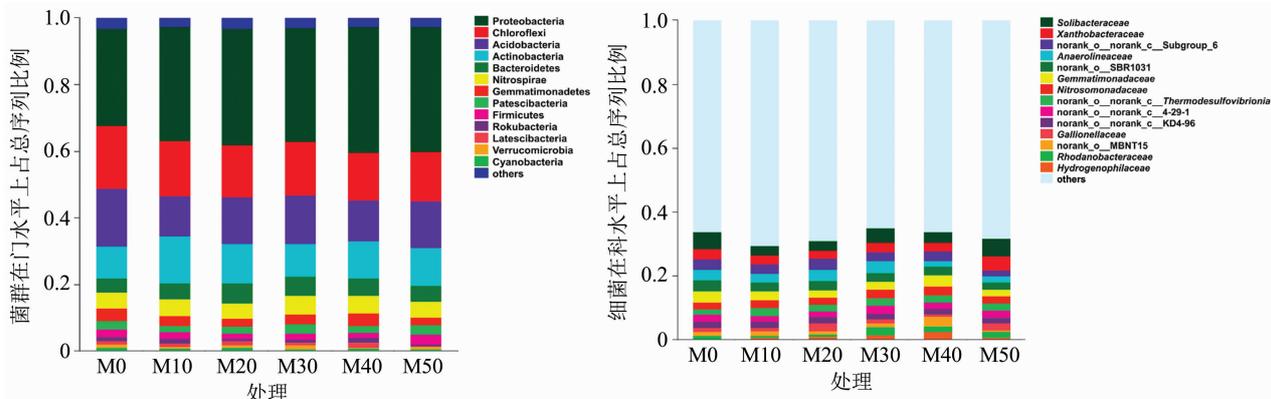


图2 有机肥等氮量替代化肥对土壤细菌群落丰富度和多样性的影响



门水平上序列比例低于 1% 以及科水平上序列比例低于 2% 的菌群被归为其他。Proteobacteria—变形菌门；Chloroflexi—绿弯菌门；Acidobacteria—酸杆菌门；Actinobacteria—放线菌门；Bacteroidetes—拟杆菌门；Nitrospirae—硝化螺旋菌门；Gemmatimonadetes—芽单胞菌门；Patescibacteria—骸骨细菌门；Firmicutes—厚壁菌门；Roku bacteria—罗库细菌门；Latescibacteria—迟发细菌门；Verrucomicrobia—疣状菌病门；Cyanobacteria—蓝藻门；others—其他。Solibacteraceae—梭菌科；Xanthobacteraceae—黄杆菌科；Anaerolineaceae—厌氧绳菌科；Gemmatimonadaceae—芽单胞菌科；Nitrosomonadaceae—亚硝化单胞菌科；Gallionellaceae—鸡血藤科；Rhodanobacteraceae—红细菌科；Hydrogenophilaceae—喜氢藻科

图3 水稻成熟期土壤样品中细菌门水平(左)和科水平(右)的分布

段^[4]。为了追求高产,造成过量施用化肥现象普遍存在,继而导致矿质养分利用率和生产率下降^[24]。化学肥料肥效快,能够快速促进作物生长;有机肥料营养元素齐全,有利于培肥土壤,提升作物品质。生产上将有机肥料和无机肥料配合施用能够充分发挥化学肥料的瞬时作用和有机肥料的持久性,通过系统改善土壤理化性质和供肥能力来增加农作物产量^[25]。本研究以等氮量替代为原则,在水稻基肥运筹中将不同量有机肥替代化学肥料(尿素),结果表明,与当地常规施肥相比,有机肥不同等氮量替代化肥后能够有效增加水稻产量。从产量构成因素看,有机肥等氮量替代化肥后可有效提高水稻成穗率和千粒质量,这是水稻增产的直接原因。有机肥与无机肥配合施用影响作物产量。研究结果表明,有机肥长期替代 20% ~ 40% 的化肥后,能获得与常规化肥施用量处理相持平的作物产量^[26]。稻麦轮作条件下,有机肥或有机无机复合肥替代部分化肥能够在保证水稻和小麦产量的基础上有效

改善土壤结构^[12]。肥料运筹中有机肥替代化肥需要在一定范围内才能发挥有益作用^[27]。本研究也发现,有机肥中的氮替代 10% 和 40% 化肥中的氮最有利于水稻产量的提升。有机肥与无机肥配合施用能够提高土壤的速效养分含量,调控土壤与化肥养分的释放强度和速率,使作物在各生育阶段得到均衡稳定持续的养分供给,从而促进作物生长,提高结实率和产量^[28]。本研究结果显示,有机肥等氮量替代化肥增加了种植水稻后的土壤有机质和速效钾含量,提高了土壤 pH 值,使土壤更趋向中性;同时降低了土壤全磷、速效磷、铵态氮和硝态氮的含量。

土壤微生物多样性与土壤生态系统的功能息息相关。通常情况下,土壤微生物多样性越高,土壤功能越完整,生态系统越稳定。本研究结果显示,有机肥等氮量替代部分化肥后,土壤变形菌门、放线菌门和拟杆菌门的丰度有所提高,而绿弯菌门和酸杆菌门呈下降趋势,这与前人的研究结果^[12]一致。变形菌门和放线菌门比例的提高能够在一定

程度上改善土壤生态功能。本研究还发现,有机肥等氮量替代化学氮肥可提高土壤细菌的丰富度,但对细菌群落的均匀度影响规律不明显。这可能是不同细菌种类对有机肥添加,以及土壤养分变化的响应程度差异所致^[16]。在本试验中,硝化螺菌门所占丰度也随有机肥的施用而增加。有机肥替代比例在10%~40%处理土壤中酸杆菌门梭菌科和变形菌门黄杆菌科丰度降低,可能与作物产量更高、根系吸收养分更多存在一定的关系。

适量的有机肥替代化肥不但能够有效提升土壤肥力、增加作物产量,而且能够大量消纳种养固体废弃物,对种植业和养殖业绿色发展,建构循环农业模式等至关重要。今后研究中需要进一步探究不同类型有机肥在不同作物、不同土壤类型中的用量,为农业绿色发展提供有力支撑。

有机肥等氮量替代化肥增加了种植水稻后的土壤有机质和速效钾含量,使酸性土壤更趋向中性,降低了土壤全磷、有效磷、铵态氮和硝态氮的含量,提高了土壤变形菌门、放线菌门和拟杆菌门的丰度,降低了绿弯菌门和酸杆菌门细菌丰度。与当地常规施肥相比,有机肥不同等氮量替代化肥后能够有效提高水稻产量,有机肥中氮替代10%和40%化肥中氮的增产效果较明显。

参考文献:

- [1] 陈立云,肖应辉,唐文帮,等. 超级杂交稻育种三步法设想与实践[J]. 中国水稻科学,2007,21(1):90-94.
- [2] 石元亮,王玲莉,刘世彬,等. 中国化学肥料发展及其对农业的作用[J]. 土壤学报,2008,45(5):852-864.
- [3] 韩天富,马常宝,黄晶,等. 基于Meta分析中国水稻产量对施肥的响应特征[J]. 中国农业科学,2019,52(11):1918-1929.
- [4] 唐继伟,徐久凯,温延臣,等. 长期单施有机肥和化肥对土壤养分和小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(11):1827-1834.
- [5] 谢钧宇,彭博,王仁杰,等. 长期不同施肥对壤土大团聚体中有机碳组分特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(7):1073-1083.
- [6] 夏昕. 长期施肥对红壤旱地和水田有机碳形态结构及微生物群落的影响[D]. 南京:南京农业大学,2015.
- [7] 陈红金,章日亮,吴春艳. 长期施用有机肥对稻田的改良培肥效应[J]. 浙江农业科学,2019,60(8):1356-1359.
- [8] 董琦,薛世通,董泽鹏,等. 施肥对黄土母质生土稻田产量及品质的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2019,39(4):47-51.
- [9] 沈仁芳,赵学强. 土壤微生物在植物获得养分中的作用[J]. 生态学报,2015,35(20):6584-6591.
- [10] 俞冰倩,朱琳,魏巍. 我国盐碱土土壤微生物研究及其展望[J]. 土壤与作物,2019,8(1):60-69.
- [11] 胡亚杰,韦建玉,卢健,等. 枯草芽孢杆菌在农作物生产上的应用研究进展[J]. 作物研究,2019,33(2):167-172.
- [12] 赵军,李勇,冉炜,等. 有机肥替代部分化肥对稻麦轮作系统产量及土壤微生物区系的影响[J]. 南京农业大学学报,2016,39(4):594-602.
- [13] 唐海明,李超,肖小平,等. 有机肥氮投入比例对双季稻田根际土壤微生物量碳、氮和微生物熵的影响[J]. 应用生态学报,2019,30(4):1335-1343.
- [14] Zhao J, Ni T, Li J, et al. Effects of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 99: 1-12.
- [15] Li F, Chen L, Zhang J B, et al. Bacterial community structure after long-term organic and inorganic fertilization reveals important associations between soil nutrients and specific taxa involved in nutrient transformations[J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8:187.
- [16] 任灵玲,李秀玲,刘灵芝. 不同施肥方式下土壤氢氧化细菌的群落特征[J]. 中国生态农业学报,2019,27(1):11-19.
- [17] 张苗苗,王伯仁,李冬初,等. 长期施加氮肥及氧化钙调节对酸性土壤硝化作用及氨氧化微生物的影响[J]. 生态学报,2015,35(19):6362-6370.
- [18] 周晶,姜昕,马鸣超,等. 长期施肥对土壤肥力及土壤微生物的影响[J]. 中国土壤与肥料,2016(6):8-13.
- [19] 欧杨虹,徐阳春,沈其荣. 有机氮部分替代无机氮对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 江苏农业学报,2009,25(1):106-111.
- [20] Li R, Tao R, Ling N, et al. Chemical, organic and bio-fertilizer management practices effect on soil physicochemical property and antagonistic bacteria abundance of a cotton field: Implications for soil biological quality[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 167: 30-38.
- [21] Zhang M, Yao Y L, Tian Y H, et al. Increasing yield and N use efficiency with organic fertilizer in Chinese intensive rice cropping systems[J]. Field Crops Research, 2018, 227: 102-109.
- [22] 陈志杰. 基于防病促生的土壤功能微生物群落构建及培养条件优化[D]. 海口:海南大学,2018.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [24] 闫湘,金继运,梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J]. 土壤,2017,49(6):1067-1077.
- [25] 劳秀荣,孙伟红,王真,等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报,2003,40(4):618-623.
- [26] 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.
- [27] 李太魁,寇长林,郭战玲,等. 有机氮替代部分无机氮对砂姜黑土冬小麦产量及氮肥利用率的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(5):97-101.
- [28] Ye L, Zhao X, Bao E C, et al. Bio-organic fertilizer with reduced rates of chemical fertilization improves soil fertility and enhances tomato yield and quality[J]. Scientific Reports, 2020, 10:177.