

不同施肥处理对鲁西北高产农田土壤真菌群落的影响

周晓琳, 王薇, 王玉霞, 赵同凯, 董艳芳, 杜梦杨, 刘佰霖, 王富建, 李洪杰*

(德州市农业科学研究院, 山东德州 253015)

摘要 通过在鲁西北潮土区高产农田 11 年有机肥替代化肥定位试验, 研究了有机肥部分替代化肥对小麦-玉米轮作体系中土壤养分及土壤真菌的影响。结果表明, 有机肥替代 50% 的 ONPK 处理显著提高了土壤养分、酶活性和真菌数量。土壤速效磷较 CK 和 NPK 处理分别升高 2.16 倍和 35.3%, 土壤全氮含量提高 42.4% 和 21.0%。ONPK 处理的有机质含量较 CK 和 NPK 处理分别提高了 55.2% 和 33.9%。冗余分析表明, 速效磷、有机质和全氮含量是有机肥替代后真菌群落组成变化的主要调控因素。土壤真菌数量以 ONPK 处理最高, 较 CK 和 NPK 处理分别增加了 90.0% 和 1.11 倍。土壤真菌优势群落依次为子囊菌门 (Ascomycota) (49.1%~62.9%)、接合菌门 (Zygomycota) (18.9%~38.5%)、担子菌门 (Basidiomycota) (5.9%~8.6%)、壶菌门 (Chytridiomycota) (2.1%~3.4%)。综上所述, 增施有机肥可通过调节真菌种间互作关系, 促进土壤养分累积, 最终实现土壤可持续生产能力。

关键词 不同施肥处理; 土壤养分; 土壤真菌

中图分类号 S154.3 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2023)03-0159-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.03.036

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Different Fertilization Treatments on Soil Fungal Communities in High-yield Farmland in Northwest Shandong Province

ZHOU Xiao-lin, WANG Wei, WANG Yu-xia et al (Dezhou Academy of Agricultural Sciences, Dezhou, Shandong 253015)

Abstract The effects of partial replacement of organic fertilizer on soil nutrients and soil fungi in wheat-maize rotation system were studied through 11-year positioning experiment in high-yield farmland in northwest Shandong Province. The results showed that the replacement of 50% ONPK treatment with organic fertilizer significantly increased soil nutrients, enzyme activities and fungi number. Compared with CK and NPK treatments, soil available P increased by 2.16 times and 35.3%, and soil total nitrogen increased by 42.4% and 21.0%, respectively. Compared with CK and NPK, the organic matter content of ONPK treatment increased by 55.2% and 33.9%, respectively. Redundancy analysis showed that the content of available phosphorus, organic matter and total nitrogen were the main regulatory factors for the change of fungal community composition after organic fertilizer replacement. The number of soil fungi in ONPK treatment was the highest, which increased by 90.0% and 1.11 times compared with CK and NPK treatment, respectively. The dominant communities of soil fungi were Ascomycota (49.1%~62.9%) and Zygomycota (18.9%~38.5%) Basidiomycota (5.9%~8.6%) and Chytridiomycota (2.1%~3.4%). In conclusion, increased application of organic fertilizer can promote soil nutrient accumulation by regulating the interspecific interaction of fungi, and ultimately achieve sustainable soil productivity.

Key words Different fertilization treatments; Soil nutrients; Soil fungi

真菌是土壤中最丰富的微生物之一, 是农田生态系统中主要的分解者, 在土壤能量流动、养分循环转化和控制作物病害等方面具有重要作用^[1]。土壤真菌对其生存环境变化极为敏感, 其多样性和群落组成受耕作、施肥和灌溉等田间管理措施的影响^[2]。

为了探讨不同施肥下土壤微生物的变化规律及其相互关系, 揭示减施化肥配施有机肥对土壤理化特性与真菌群落的影响, 笔者以不同施肥方式为处理, 研究有机肥部分替代化肥与土壤理化特性及真菌群落之间的关系, 为提高耕地土壤微生物学特性提供理论依据。

1 材料与方

1.1 试验地概况 试验于 2010 年 10 月在德州市德城区哨马营村进行。德州市属暖温带半湿润季风气候, 年平均气温 12.9℃, 年降水量 547.5 mm。供试土壤为非石灰性潮土, pH 8.3, 有机质含量 20.3 g/kg, 全氮 1.2 g/kg, 全磷 0.83 g/kg,

全钾 20.8 g/kg, 有效磷 (P_2O_5) 37.4 mg/kg, 速效钾 282 mg/kg。

1.2 试验设计 共设置 6 个处理, 分别是不施肥对照 (CK)、常规氮磷钾肥 (NPK)、猪粪 3 000 kg/hm²+70%NPK (NPKM)、猪粪 6 000 kg/hm²+50%NPK (ONPK)、秸秆还田+100%NPK (NPKJ)、秸秆还田+100%NPK+秸秆腐熟剂 150 kg/hm² (NPKF)。每处理重复 4 次, 随机区组排列, 共 24 个小区, 小区面积为 50 m² (10 m×5 m)。试验地冬小麦-夏玉米轮作种植, 一年两作, 小麦品种为济麦 22。玉米品种为郑单 958, 除氮肥 2 次追施外 (尿素底肥 1.3 kg, 返青追肥和拔节期追肥 2 次追肥均为 0.98 kg), 其余肥料均一次性底肥施入。供试氮肥为尿素 (N 46%), 磷肥为过磷酸钙 (P_2O_5 16%), 钾肥为硫酸钾 (K_2O 50%); 猪粪为江阴市联业生物科技有限公司生产, 猪粪养分含量为氮磷钾总养分 5%, 有机质 45%。经折算, 猪粪施用量分别为 3 000 和 6 000 kg/hm²。各小区施肥量见表 1。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤样品采集。 于 2021 年 10 月 20 日玉米收获后用土钻进行采土样, 供试土样为每个小区 0~20 cm 土层土壤。每个小区随机采 9 个样点充分混匀, 四分法保留 1 kg 左右土壤样品, 每个小区 3 次重复, 样品-70℃保藏。

1.3.2 土壤微生物数量及土壤养分测定方法。 采用稀释涂

基金项目 国家重点研发计划“黄淮海冬小麦化肥农药减施技术集成研究与示范”(2017YFD0201700); 国家自然科学基金“麦玉两熟体系作物秸秆钾转化特征与钾素补偿机制”(41877100)。

作者简介 周晓琳(1980—), 女, 山东德州人, 高级农艺师, 硕士, 从事植物营养与施肥技术研究。*通信作者, 高级农艺师, 硕士, 从事土壤肥料研究。

收稿日期 2022-03-28

布计数法对土壤微生物计数^[3]测定土壤中真菌数量。真菌用马丁氏培养基。对培养基进行 30 min 的 21 °C 灭菌,倒平板备用,平板接种后,放置在 30 °C 恒温箱倒置培养,5 d 后统计真菌数目。pH 采用 pH 计测定;全氮含量采用重铬酸钾-硫酸消化法测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定;速效磷含量采用碳酸氢钠法测定;速效钾含量采用醋酸铵-火焰光度计法测定^[4]。

表 1 各试验小区施肥量

Table 1 Fertilization amount of each test area 单位:kg

处理 Treatment	尿素 Urea	过磷酸钙 Calcium superphosphate	硫酸钾 Potassium sulphate	秸秆腐熟剂 Straw decompo- sition agent	猪粪有机肥 Pig manure organic fertilizer
CK	0	0	0	0	0
NPK	2.72	1.41	0.45	0	0
NPKM	1.91	0.98	0.32	0	14.99
ONPK	1.36	1.36	0.23	0	29.99
NPKJ	2.72	1.41	0.45	0	0
NPKF	2.72	0.70	0.45	0.75	0

1.3.3 土壤真菌高通量分析。使用 PowerSoil DNA Isolation Kit 土壤 DNA 提取试剂盒 (Mo Bio Laboratories) 从样本中提取真菌总 DNA, -80 °C 下储存。使用 New England Biolabs 公司的 NEB Next Ultra TM DNA Library Prep Kit for Illumina 试剂盒构建文库, 然后进行 Qubit 定量和文库检测, 最后使用 MiSeq 进行上机测序^[5]。对有效数据进行 OTUs (Operational Taxonomic Units) 聚类 and 物种分类分析, 并将 OTU 和物种注释结合, 从而得到每个样品的 OTUs 和分类谱系的基本分析结果。采用 Mothur 软件计算细菌的 Chao1 指数和 Shannon 指数^[6]。

1.4 数据分析 采用 Excel 2003 进行数据的统计分析和作图, 用 DPS 7.5 进行差异显著性分析。用 Canoco4.5 软件对土壤细菌相对丰度和基本理化性质作冗余分析 (Redundancy analysis, RDA), 分析相关关系。

2 结果与分析

2.1 不同施肥方式对鲁西北高产农田土壤养分的影响 从表 2 可以看出, NPK 处理 pH 最低, NPKM 处理与 ONPK 处理 pH 差异不显著, 但均高于 NPK 处理。不同施肥处理的有效磷、速效钾含量随施肥处理中有机肥比例增加而增加, NPK 处理最低, ONPK 处理最高, 其中 ONPK 处理有效磷含量较 CK 和 NPK 处理分别提高 2.16 倍和 35.3%, 速效钾含量较 CK 和 NPK 处理分别提高 34.9% 和 10.8%, 全氮含量较 CK 和 NPK 处理分别提高了 42.4% 和 21.0%, 有机质含量较 CK 和 NPK 处理分别提高了 55.2% 和 33.9%。说明有机肥对提高土壤有效磷、速效钾、全氮、有机质有明显效果。

2.2 不同施肥方式对土壤真菌数量和多样性的影响 由表 3 可知, ONPK 处理真菌数量最高, 较 CK 和 NPK 处理分别增加了 90.1% 和 1.11 倍, NPKJ、NPKM 处理真菌数量次之, 分别比对照增加了 75.4% 和 65.8%, 说明施用有机肥和秸秆还

田能够显著提高土壤中可培养真菌的数量。

表 2 不同施肥方式对鲁西北高产农田土壤养分的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on soil nutrients of high-yield farmland in northwest Shandong

处理 Treatment	pH	有效磷 Available phosphorus mg/kg	速效钾 Available potassium mg/kg	全氮 Total nitrogen g/kg	有机质 Organic matter g/kg
CK	8.91 a	13.40 e	235 e	0.85 c	14.5 e
NPK	8.42 ab	31.31 d	286 d	1.00 b	16.8 d
NPKM	8.44 ab	38.23 b	300 b	1.16 a	17.9 cd
ONPK	8.62 a	42.35 a	317 a	1.21 a	22.5 a
NPKJ	8.72 a	36.80 c	287 d	1.15 a	19.5 c
NPKF	9.01 a	36.93 c	290 c	1.16 a	21.2 b

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between different treatments ($P < 0.05$).

Chaol 丰富度指数和 Shannon 多样性指数能进一步确定施肥对土壤微生物的影响。二者可以较好地反映土壤中微生物种群的丰富度和多样性^[7]。由表 3 可知, NPK 处理真菌丰富度指数最大, 比对照提高了 6.1%, 其次是 ONPK 和 NPKM 处理, 分别比对照提高了 5.1% 和 4.0%, NPKJ、NPKF 丰富度指数较低, 可能是秸秆还田对真菌丰富度有影响; NPKF、ONPK 处理物种多样性指数最大, 分别比对照提高了 4.0% 和 3.3%。说明施用有机肥和秸秆还田能够显著提高土壤中可培养真菌的数量, 且对真菌多样性影响较大。

表 3 不同施肥方式对土壤真菌数量和多样性的影响

Table 3 Effects of different fertilization methods on the number and diversity of soil fungi

处理 Treatment	真菌数量 Number of fungi $\times 10^4$ CFU/g	Chaol 指数 Chaol index	Shannon 指数 Shannon index
CK	3.42±0.31 e	4 553.63 f	8.20 d
NPK	3.08±0.31 f	4 829.13 a	8.27 c
NPKM	5.67±0.51 c	4 735.35 c	8.18 e
ONPK	6.50±0.40 a	4 786.81 b	8.47 b
NPKJ	6.00±0.73 b	4 637.77 e	7.92 f
NPKF	5.50±0.41 d	4 698.33 d	8.53 a

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between different treatments ($P < 0.05$).

2.3 不同施肥方式对土壤真菌门水平多样性的影响 由图 1 可知, 各施肥处理优势菌群为子囊菌门 (Ascomycota) (49.1%~62.9%)、接合菌门 (Zygomycota) (18.9%~38.5%)、担子菌门 (Basidiomycota) (5.9%~8.6%)、壶菌门 (Chytridiomycota) (2.1%~3.4%)。各施肥处理真菌相对丰度比不施肥对照均有所增加。其中 CK 和 NPK 真菌在门水平极为相似, NPKF 和 NPKJ 在 P-Necocallimastigomycota 处有差别, NPKM 与 ONPK 门水平非常相似。

2.4 不同施肥方式对土壤真菌结构的影响 非度量多维定标方法 (NMDS) 是一种非线性模型排序方法, 克服了线性模型的不足。主要是将多维空间中的研究对象简化到低维空间进行定位、分析和分类, 同时保持对象之间原有的关系^[8]。

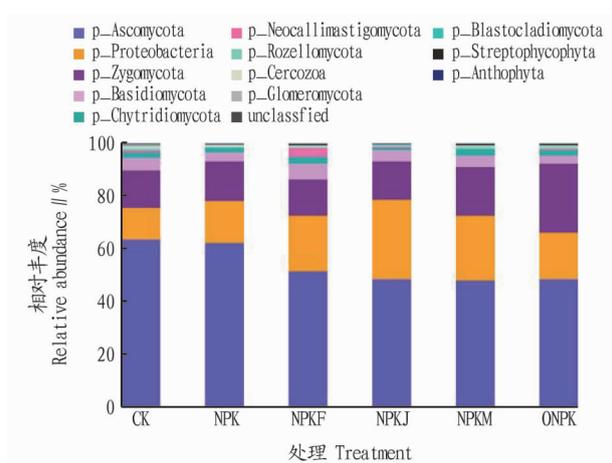


图 1 各处理土壤细菌门水平的群落结构

Fig. 1 Community structure at the level of soil bacterial phyla in each treatment

由图 2 可知, NPKF、NPKJ 处理相缠较大, 说明秸秆还田处理的真菌群落特征相似程度一致, ONPK 与 NPKM 处理有一定相似性。其他处理群落分布独立, 表明不同施肥处理间差异较大, 由此可知, 真菌群落分布特征与不同施肥处理具有相关性, 其中真菌群落 NPKF、NPKJ 处理相似性最高, 其次 ONPK 与 NPKM 较为相似, CK、NPK 处理真菌群落差异较大。

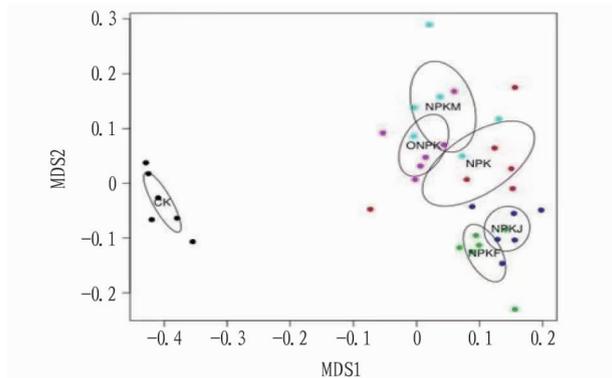
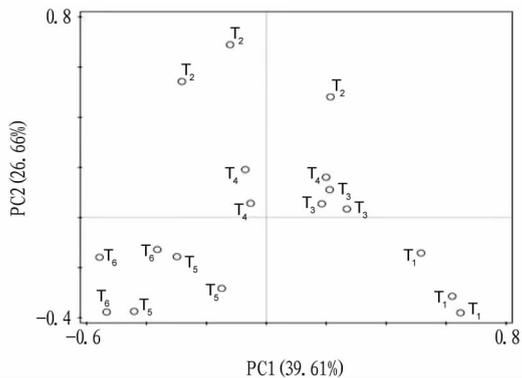


图 2 各处理土壤细菌基于差异 OTU 的 NMDS 分析

Fig. 2 NMDS analysis of soil bacteria in each treatment based on difference OTU

2.5 不同施肥方式土壤真菌 OTU 水平上主成分分析 (PCA) 基于玉米季 ITS 真菌的高通量测序结果, 在 OTU 水平上的 PCA 分析见图 3。结果显示, 施肥对土壤真菌群落结构产生了明显的影响。各处理与 CK 处理菌落结构差异显著, NPKM 和 ONPK 相似, NPKJ 和秸秆还田+氮磷钾+秸秆腐熟剂(NPKF)处理相似, CK 和 NPK 处理分别与其他处理差异显著。说明有机替代对土壤真菌群落结构有明显改善, 且有机替代比例不同真菌群落结构也明显不同; 与 NPK 相比秸秆还田对真菌群落结构的影响最大, 增施秸秆腐熟剂对真菌群落结构的影响较小。

2.6 不同施肥方式高产农田土壤养分和真菌的相关性 为了研究土壤养分和真菌群落之间的关系, 通过冗余分析探讨了土壤养分指标与细菌群落之间的关系。由图 4 可知, CK

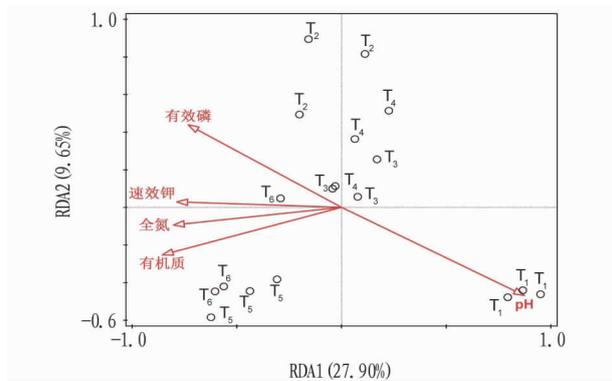


注: T₁. CK; T₂. NPK; T₃. NPKM; T₄. ONPK; T₅. NPKJ; T₆. NPKF。

图 3 不同施肥方式土壤真菌 OTU 水平上主成分分析 (PCA)

Fig. 3 Principal component analysis (PCA) of different fertilization methods on OTU level of soil fungi

受土壤 pH 影响较为明显, 因此其土壤微生物群落结构与其他处理差异显著; 但 NPKJ、NPKF 和 NPKM、ONPK 真菌群落结构多样性与土壤化学性质相关性低于 NPK, 说明全量氮磷钾肥能显著影响真菌群落结构。



注: T₁. CK; T₂. NPK; T₃. NPKM; T₄. ONPK; T₅. NPKJ; T₆. NPKF。

图 4 土壤细菌群落结构与土壤理化性状的 RDA 分析

Fig. 4 RDA analysis of soil bacterial community structure and soil physical and chemical properties

3 讨论

3.1 不同施肥方式对高产农田土壤养分含量的影响 刘彦伶等^[9]研究发现, 施用有机肥显著提高土壤养分含量, 特别是有机肥替代 50% 化肥配施提升最为明显。柴彦君等^[10-11]研究结果表明, 有机肥中大量的腐殖酸对土壤改良具有重要作用, 特别是对土壤速效磷、速效钾等速效养分含量的提高具有重要作用。其中有机肥替代 50% 化肥 (ONPK) 处理显著提高了土壤速效钾、速效磷、全氮、有机质的含量, 分别比 NPK 处理提高了 10.8%、35.3%、21.0% 和 33.9%。说明有机肥施用可以改善土壤养分状况, 这可能是施用有机肥提高了土壤微生物活性, 土壤有机碳库增加, 土壤有机质的转化加快, 进而增加了土壤中速效养分含量^[12]。

3.2 不同施肥方式对高产农田土壤真菌群落多样性的影响 土壤微生物代谢所需养料包括有机肥、秸秆, 使得土壤微生物丰富度和多样性得到提高^[13-16]。Chen 等^[17]、Francioli 等^[18]研究发现, 有机肥的施用可显著提高土壤细菌群落的

多样性,对真菌群落多样性的影响不显著,这与该研究结果有所不同。该研究结果表明,施用有机肥和秸秆还田能够显著提高土壤中可培养真菌的数量。其中 ONPK 处理真菌数量最高,较 CK 和 NPK 处理分别增加了 90.0% 和 1.11 倍, NPKJ、NPKM 处理真菌数量次之,分别比对照增加了 75.4% 和 65.8%。

Alpha 多样性指数分析表明,NPK 处理真菌丰富度指数最大,比对照提高了 6.1%,其次是 ONPK 和 NPKM 处理,分别比对照提高了 5.1% 和 4.0%,NPKJ、NPKF 丰富度指数较低,可能是秸秆还田对真菌丰富度有影响;NPKF、ONPK 处理物种多样性指数最大,分别比对照提高了 4.0% 和 3.3%。同时,CK、NPKM、ONPK、NPKF 处理的真菌多样性仍保持较高水平。亲缘关系显示,NPKM 和 ONPK、NPKJ 和 NPKF 亲缘关系较近,而 CK、NPK 的亲缘关系较远。

4 结论

经过连续 11 年的施肥,发现作物病原真菌在无肥对照土壤中数量较大,有机肥施用后有效抑制了土壤中真菌的种群密度。这与武晓森^[19]研究结果一致。相比于单施化肥,配施秸秆还田土壤有机质和碱解氮分别提升 9.20% 和 12.03%。综上所述,有机替代和秸秆还田在维持粮食产量的同时,能够有效提高土壤微生物代谢活性,能有效维持土壤微生态平衡性,减少土壤养分的流失,提高了土壤可持续利用的能力。

参考文献

- [1] FINLAY B J. Global dispersal of free-living microbial eukaryote species [J]. *Science*, 2002, 296(5570): 1061-1063.
- [2] MUELLER G M, SCHMIT J P. Fungal biodiversity: What do we know? What can we predict? [J]. *Biodiversity and conservation*, 2007, 16(1): 1-5.
- [3] 沈萍, 范秀容, 李广武. 微生物学实验 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 1999: 214-215.

(上接第 158 页)

不断施入,玉米茎秆穿刺强度先增后降,以 B₃ 和 B₄ 处理最高,表明硅肥用量要适宜。

4 结论

该研究结果表明,如果硅肥施用量合理对玉米植株株高影响不大,但对植株的穗位高和重心高起到一定的改善作用,同时增强玉米茎秆的强度,从而降低植株发生茎秆倒伏的风险,减少玉米籽粒产量的损失。该试验条件下,春玉米嫩单 22 推荐的施磷量为 45 kg/hm²,硅量应在 90~150 kg/hm²。但在玉米大田生产中,应考虑到所种地块土壤中磷、硅的含量,确定适宜磷肥和硅肥用量。

参考文献

- [1] 张月玲, 王宜伦, 谭金芳, 等. 氮硅配施对夏玉米抗倒性和产量的影响

- [4] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-35.
- [5] 尹承苗, 王功帅, 李园园, 等. 连作苹果园土壤真菌的 T-RFLP 分析 [J]. *生态学报*, 2014, 34(4): 837-846.
- [6] 高文慧, 郭宗昊, 高科, 等. 生物炭与粪肥对大豆根际土壤细菌和真菌群落的影响 [J]. *生态环境学报*, 2021, 30(1): 205-212.
- [7] DAS S N, SARMA P V S R N, NEERAJA C, et al. Members of *Gammaproteobacteria* and *Bacilli* represent the culturable diversity of chitinolytic bacteria in chitin-enriched soils [J]. *World journal of microbiology & biotechnology*, 2010, 26(10): 1875-1881.
- [8] 何璐. 基于 NMDS 的聚类分析在新疆行业数据中的应用 [D]. 乌鲁木齐: 新疆财经大学, 2017.
- [9] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 长期不同施肥处理对黄壤性水稻土理化性质的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(19): 294-298.
- [10] 柴彦君, 黄利昆, 董越勇, 等. 沼液施用量对毛竹林地土壤理化性质及碳储量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(8): 214-220.
- [11] LYNCH M D J, NEUFELD J D. Ecology and exploration of the rare biosphere [J]. *Nature reviews microbiology*, 2015, 13(4): 217-229.
- [12] CAI Z J, WANG B R, XU M G, et al. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of Southern China [J]. *Journal of soils and sediments*, 2015, 15(2): 260-270.
- [13] DOAN T T, BOUVIER C, BETTAREL Y, et al. Influence of buffalo manure, compost, vermicompost and biochar amendments on bacterial and viral communities in soil and adjacent aquatic systems [J]. *Applied soil ecology*, 2014, 73: 78-86.
- [14] SRADNICK A, MURUGAN R, OLTMANNS M, et al. Changes in functional diversity of the soil microbial community in a heterogeneous sandy soil after long-term fertilization with cattle manure and mineral fertilizer [J]. *Applied soil ecology*, 2013, 63: 23-28.
- [15] 唐海明, 肖小平, 李超, 等. 冬季覆盖作物秸秆还田对双季稻田根际土壤微生物群落功能多样性的影响 [J]. *生态学报*, 2018, 38(18): 6559-6569.
- [16] 李秀英, 赵秉强, 李絮花, 等. 不同施肥制度对土壤微生物的影响及其与土壤肥力的关系 [J]. *中国农业科学*, 2005, 38(8): 1591-1599.
- [17] CHEN C, ZHANG J N, LU M, et al. Microbial communities of an arable soil treated for 8 years with organic and inorganic fertilizers [J]. *Biology and fertility of soils*, 2016, 52(4): 455-467.
- [18] FRANCIOLI D, SCHULZ E, LENTENDU G, et al. Mineral vs. organic amendments: Microbial community structure, activity and abundance of agriculturally relevant microbes are driven by long-term fertilization strategies [J]. *Frontiers in microbiology*, 2016, 7: 1-6.
- [19] 武晓森. 小麦-玉米轮作体系中不同施肥制度对土壤微生物特性的影响 [D]. 保定: 河北农业大学, 2014.

[J]. *玉米科学*, 2012, 20(4): 122-125.

- [2] 谭杰. 钾肥对川中丘区玉米钾素利用及抗倒能力和产量的影响 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
- [3] 刘仲发, 勾玲, 赵明, 等. 遮荫对玉米茎秆形态特征、穿刺强度及抗倒伏能力的影响 [J]. *华北农学报*, 2011, 26(4): 91-96.
- [4] 朱从桦, 张嘉莉, 王兴龙, 等. 硅磷配施对低磷土壤春玉米干物质积累、分配及产量的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(6): 725-735.
- [5] 胡克伟, 关连珠, 颜丽, 等. 施硅对水稻土磷素吸附与解吸特性的影响研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(2): 214-218.
- [6] 范存留, 杨国涛, 范永义, 等. 钾、硅肥处理对杂交水稻 III 优 838 抗倒伏性的作用研究 [J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(4): 623-631.
- [7] 孙兵, 肖明纲, 迟立勇, 等. 不同氮素梯度下硅钾互作对寒地粳稻倒伏抗性的影响 [J]. *黑龙江农业科学*, 2016(5): 34-40.
- [8] 程瑞祥, 从德峰, 王振宇, 等. 施用硅钙混肥对玉米抗倒伏性的影响 [J]. *杂粮作物*, 2008, 28(3): 205-206.
- [9] 王娜, 李凤海, 王志斌, 等. 不同耐密型玉米品种茎秆性状对密度的响应及与倒伏的关系 [J]. *作物杂志*, 2011(3): 67-70.
- [10] 李珂清, 王茂辉, 聂金泉, 等. 不同硅肥用量与栽插苗数对水稻生长发育和产量的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(22): 28-31.