

张 奇, 张振华, 卢 信. 生物有机肥施用对黄泛冲积区贫瘠土壤养分、酶和微生物多样性的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(2): 325-335.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.02.011

## 生物有机肥施用对黄泛冲积区贫瘠土壤养分、酶和微生物多样性的影响

张 奇<sup>1,2</sup>, 张振华<sup>2,3</sup>, 卢 信<sup>2,3</sup>

(1.扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 3.农业部长江下游平原农业环境重点实验室, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 为了探究不同类型有机肥及施用量对黄泛冲积区贫瘠土壤的改良作用, 以江苏省滨海县黄泛冲积区贫瘠土壤为供试土壤, 研究了普通有机肥与生物有机肥分别在 0 kg/hm<sup>2</sup>、2 250 kg/hm<sup>2</sup>、4 500 kg/hm<sup>2</sup>、6 750 kg/hm<sup>2</sup> 施用量水平下对土壤的养分含量、土壤酶活性、生物多样性及玉米产量的影响。结果表明: 在一个生长季内, 相同施肥量水平下两种有机肥对土壤养分的作用效果无差异; 苗期施用有机肥的土壤中速效养分含量较对照有所提升, 且在一定范围内施肥量与土壤速效养分含量呈正相关关系。收获期各处理土壤蔗糖酶活性没有显著差异, 但生物有机肥 BOF2 处理脲酶和碱性磷酸酶活性均较对照 (CF) 显著提高。土壤脲酶活性与碱解氮、速效钾、有机质含量呈显著正相关关系; 土壤碱性磷酸酶活性与速效磷和速效钾含量呈显著正相关。施用普通有机肥及生物有机肥都可以提高土壤中微生物的丰富度, 而生物有机肥的提升效果更为显著。生物有机肥在施用量 2 250 kg/hm<sup>2</sup> 及以上时可显著改变土壤微生物种群结构, 而普通有机肥在施用量达 6 750 kg/hm<sup>2</sup> 时才会显著改变。生物有机肥 BOF3 (生物有机肥 6 750 kg/hm<sup>2</sup>) 处理与对照 (CF) 达到显著差异。可见, 施用有机肥, 特别是施用生物有机肥能改善黄泛冲积区贫瘠土壤养分性状, 提高土壤酶活及土壤微生物多样性, 最终实现作物增产的目的。

**关键词:** 生物有机肥; 土壤养分; 土壤酶活; 土壤生物多样性

**中图分类号:** S156.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)02-0325-11

## Effects of bioorganic fertilizer application on nutrient, enzyme activity, microbial diversity of the barren soil in Yellow River alluvial areas

ZHANG Qi<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhen-hua<sup>2,3</sup>, LU Xin<sup>2,3</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of organic fertilizers on the improvement of the barren soil in Yellow River alluvial region, the soil in Binhai County, Jiangsu province was used as experimental soil. Effects of common organic

and bioorganic fertilizer at different application levels (0 kg/hm<sup>2</sup>, 2 250 kg/hm<sup>2</sup>, 4 500 kg/hm<sup>2</sup>, 6 750 kg/hm<sup>2</sup>) on soil nutrient contents, enzyme activities, microbial diversity and maize yield were studied. The results showed that the application of two organic fertilizers produced similar effects on soil nutrients under the same application level in a growing season. The content of available nutrient in the soil applied with organic fertilizer at the seedling stage

收稿日期: 2019-08-09

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX(17)1001-4]; 国家重点研发计划项目 (2018YFD0800306)

作者简介: 张 奇 (1993-), 男, 安徽安庆人, 硕士, 主要从事土壤改良与修复研究。 (E-mail) 18752782205@163.com

通讯作者: 卢 信, (Tel) 025-84390581; (E-mail) lxdeng@126.com。  
张振华, (E-mail) zhenhuaz70@hotmail.com

was higher than that of the control, and there was a positive correlation between the fertilizer amount and the content of available nutrient in a certain range. No significant difference was found in soil invertase activities during harvest stage, but the enzyme activities in the treatment of bio-organic fertilizer BOF2 were significantly higher than those in control. Urease activities were positively correlated with the contents of alkaline hydrolytic nitrogen, available potassium and organic matter. The alkaline phosphatase activities were significantly correlated with the contents of available phosphorus and available potassium. The application of organic fertilizer and bio-organic fertilizer increased the abundance of microorganisms in the soil, and the bio-organic fertilizer was more effective. When the application amount of bio-organic fertilizer was 2 250 kg/hm<sup>2</sup> and above, the soil microbial population structure would be significantly changed. When the application amount of common organic fertilizer was 6 750 kg/hm<sup>2</sup>, the soil microbial population structure would be significantly changed. There was significant difference between the treatment of 6 750 kg/hm<sup>2</sup> BOF3 and the control. It can be concluded that the application of organic fertilizer in the barren soil in Yellow River alluvial area, especially the application of bio-organic fertilizer, can significantly improve soil nutrients, increase soil enzyme activities and soil microbial diversity, and ultimately achieve the purpose of increasing crop production.

**Key words:** bio-organic fertilizer; soil nutrients; soil enzyme activity; soil microbial diversity

截至 2014 年,中国的耕地面积仅为 1.585 5×10<sup>9</sup> hm<sup>2</sup>,远低于 2006 年设定的 1.8×10<sup>9</sup> hm<sup>2</sup> 耕地红线<sup>[1]</sup>。以江苏省为例,1999–2014 年耕地面积逐年减少<sup>[2]</sup>,城市化的推进促使耕地非农化面积日益扩大。寻求新的储备耕地,守住耕地红线,保证国家粮食安全迫在眉睫。黄河故道横贯江苏省北部的徐淮平原,沿线覆盖着 5~10 m 厚的黄泛沉积物,由于土质沙、通气性强、保水保肥性能差<sup>[3]</sup>,是典型的低产土壤。黄泛冲积区(弃耕)广泛分布于江苏省北部沿海地区,在全省耕地总面积中占比达 5% 左右,是苏北补充耕地的重要后备力量。因此,采用合理施肥、耕作措施,对改良该地区土壤理化性状以及提高土壤肥力具有重要意义。

有机肥是以动物粪便及植物枯落物为底物进行发酵生产出的一种肥料。而生物有机肥是在此基础上添加某些特定有益微生物而衍生出的一种新型有机肥。有机肥自身含有丰富的有机质和养分,合理施用有机肥可以显著改善贫瘠土壤的理化及生物性状<sup>[4-5]</sup>,从而解决贫瘠土壤肥效差、漏水漏肥的问题,提高土壤肥力,最终实现农业增产<sup>[6-7]</sup>。与普通有机肥相比,生物有机肥中还含有丰富的酵母菌、乳酸菌、纤维素分解菌和固氮菌等有益微生物和功能菌,这些微生物的存在能有效改善根系土壤环境,对土壤的改良效果更显著<sup>[8-9]</sup>。但目前中国农业生产中生物有机肥使用的并不多,主要原因包括菌种开发力度小,肥料成本高,普通群众对于生物有机肥的长期效应缺乏了解等。本研究的主要目的是探讨不同施用量条件下生物有机肥对黄泛冲积区贫瘠土壤养分、土壤酶活

性及微生物多样性的影响,为黄泛冲积区贫瘠土壤改良和耕地质量提升提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

盆栽试验土壤采自江苏省盐城市滨海县黄河湾公司大田,取深度为 0~20 cm 表层土,风干磨碎过 2 mm 筛,称取相同质量分别装盆。对处理前盆栽土壤基本性质进行测定,结果如表 1 所示。供试土壤为黄褐土,呈碱性,养分含量低,其中土壤有机质含量仅 5.57 g/kg。

表 1 盆栽土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

序号	指标	测定值	分级标准	等级
1	pH	8.90	>7.5	碱性
2	总氮(g/kg)	0.42	<0.5	六级
3	碱解氮(mg/kg)	40.53	30~60	五级
4	速效磷(mg/kg)	10.6	<19	三级
5	速效钾(mg/kg)	61.23	50~100	四级
6	有机质(g/kg)	5.57	<6	六级

### 1.2 玉米品种及肥料

试验所用普通有机肥和生物有机肥为南京宁粮生物有限公司生产,两种有机肥全氮、磷、钾含量一致,分别为全 N 3%、全磷(以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计)1%、全钾(以 K<sub>2</sub>O 计)2%,总养分≥5.0%。另外,普通有机肥有机质≥45%,腐殖质 25%;生物有机肥有机质≥

55%, 1 g 有效活菌数  $\geq 2.0 \times 10^7$ 。试验过程中所用追肥为绿聚能复合肥, 全氮、磷、钾含量分别为 20% (以 N 计)、14% (以  $P_2O_5$  计)、6% (以  $K_2O$  计)。供试玉米品种为黎乐 66。

### 1.3 试验设计

预试验结果表明:供试土壤非常贫瘠, 而有机肥养分释放慢, 如采用等 N 量试验设计, 纯有机肥处理作物生长会受到严重影响, 产量降低 70% 以上。因此, 本试验采用在正常施化肥的基础上, 增施有机肥的设计。试验共设置 7 个处理, 以单施化肥为对照, 施用量为  $750 \text{ kg/hm}^2$ ; 施用化肥加普通有机肥和生物有机肥各 3 种施用量处理 ( $2\ 250 \text{ kg/hm}^2$ 、 $4\ 500 \text{ kg/hm}^2$ 、 $6\ 750 \text{ kg/hm}^2$ ), 以上每个处理重复 3 次, 共 21 盆, 具体见表 2。试验采用内径为 26 cm、高 25 cm 的圆形塑料盆, 每盆装土 8 kg, 土层厚度为 20 cm, 每盆种植 2 株玉米。盆栽试验在江苏省农业科学院温室大棚内进行。

表 2 试验设计

Table 2 Design of experiment

处理 代号	处理	化肥(复合肥) 施肥量(g, 1 盆)
CF	单施化肥, 不施用有机肥	3.98
BOF1	生物有机肥 $2\ 250 \text{ kg/hm}^2$ , 即每盆 11.9 g	3.98
BOF2	生物有机肥 $4\ 500 \text{ kg/hm}^2$ , 即每盆 23.9 g	3.98
BOF3	生物有机肥 $6\ 750 \text{ kg/hm}^2$ , 即每盆 35.8 g	3.98
NOF1	普通有机肥 $2\ 250 \text{ kg/hm}^2$ , 即每盆 11.9 g	3.98
NOF2	普通有机肥 $4\ 500 \text{ kg/hm}^2$ , 即每盆 23.9 g	3.98
NOF3	普通有机肥 $6\ 750 \text{ kg/hm}^2$ , 即每盆 35.8 g	3.98

### 1.4 栽培管理

1.4.1 水分管理 在移栽玉米之前, 每盆先浇水至土壤田间最大持水量, 然后选取事先育好的大小、长势均一的玉米苗移栽到盆中, 每盆 2 株。此后, 每 2~3 d 灌溉 1 次, 每次均浇至田间最大持水量。

1.4.2 施肥管理 在玉米移栽前分别将化肥和有机肥按照不同处理要求与土壤进行混合作为基肥, 抽穗期根据田间施肥量每盆追施 2 g N (相当于  $375 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$ )。

1.4.3 采样和测定方法 试验过程中, 分别在玉米苗期和收获期采集土壤样品, 测定土壤基本理化性质, 收获期加测土壤酶活性和微生物多样性。土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法外加加热法测定<sup>[10]</sup>。

土壤总氮含量采用凯氏定氮法测定<sup>[11]</sup>。土壤总磷含量采用钼锑抗比色法测定<sup>[12]</sup>。土壤总钾含量采用坩埚消煮乙酸铵浸提法测定<sup>[13]</sup>。土壤碱解氮含量采用碱解扩散吸收法测定<sup>[14]</sup>。土壤速效磷含量测定: 采用  $H_2SO_4-HCl$  浸提, 钼锑抗比色法测定<sup>[15]</sup>。土壤速效钾含量测定: 采用  $NH_4-AC$  浸提, 原子吸收分光光度法测定<sup>[16]</sup>。土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶活性的测定分别参照丰骁等<sup>[17]</sup>、李朝英等<sup>[18]</sup>和石春芳等<sup>[19]</sup>的方法。土壤生物多样性测定: 试剂盒提取土壤 DNA 后采用高通量测序 *16s rRNA* 方法进行测定, 检测合格的土壤样品 DNA 经过 PCR 扩增、混样、建库, 采用 Illumina Hiseq 2500 高通量测序平台基因 V4 区对样品进行测序, OTU 聚类 and 物种分类, 分析微生物多样性和群落结构等。

### 1.5 统计分析

数据处理及分析和图形制作采用 Excel2003、Origin8.0 和 Spss16.0 完成。用 R 语言分析微生物多样性数据, 运用 Canoco 软件进行环境因子对微生物群落结构影响程度的统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物有机肥对土壤养分的影响

结果(表 3)显示: 与 CF 处理相比, 玉米苗期和收获期 BOF 处理和 NOF 处理的土壤有机质含量均显著提高。其中 BOF3 处理土壤有机质含量最高, 在苗期和收获期分别较对照 (CF 处理) 提升了 34.36% 和 59.7%。总体而言, 土壤中的有机质含量在收获期比苗期有了进一步的提升。与 CF 处理相比, BOF、NOF 处理土壤全氮含量有一定的提升。收获期全氮含量较苗期有所上升。苗期 BOF 与 NOF 处理土壤碱解氮含量分别与 CF 处理有显著性差异, 且同种有机肥下施肥量与土壤中碱解氮含量呈正相关关系。所有处理中 NOF3 处理的碱解氮含量最高, 与 CF 处理相比增加了 54.79%。收获期土壤碱解氮含量显著下降, 除 BOF1 处理外 BOF、NOF 处理与 CF 处理相比均无显著性差异。造成这一现象的原因可能是由于有机肥及生物有机肥中的碱解氮基本被消耗完全, 后期碱解氮含量逐渐趋于和 CF 处理相同。由于施肥处理时间短, 所以对土壤中碱解氮含量提升存在短暂性, 并不能使其保持在一个相对稳定的范围内, 波动较大。苗期各处理土壤中全磷含量除 BOF3 处理外, 其他处理与 CF 处理相比

均无显著性差异。相比之下,收获期土壤中总磷含量显著提高,BOF、NOF 处理的全磷含量与 CF 处理相比显著提高。除 NOF3 处理外,苗期各处理土壤中的速效磷含量无显著差异。虽然各处理土壤速效磷含量差异不显著,但可以看出,随着有机肥及生物有机肥施肥量的增加,土壤中速效磷含量也会随之增加。与苗期相比,收获期土壤中的速效磷含量显著下降。收获期除 BOF2 处理与 CF 处理存在显著性差异外,其他处理与 CF 处理无显著性差异。土

壤全钾含量的测定结果表明,苗期除 NOF3 处理与 CF 处理有显著性差异外,其他处理与 CF 处理无显著性差异。收获期 NOF1、NOF2 处理全钾含量与 CF 处理之间存在显著性差异,其中 NOF1 处理全钾含量最高,较 CF 处理增加 30.74%。苗期各处理土壤中速效钾含量无显著性差异。收获期 BOF2 处理土壤速效钾比 CF 处理显著性增加,其他处理与 CF 处理差异不显著。

表 3 不同有机肥对玉米苗期及收获期土壤养分的影响

Table 3 Effects of different organic fertilizers on soil nutrients during maize seedling and harvest stages

时期	处理	碱解氮 (mg/kg)	全氮 (g/kg)	速效磷 (mg/kg)	全磷 (g/kg)	速效钾 (mg/kg)	全钾 (g/kg)	有机质 (g/kg)
苗期	CF	52.8±1.8e	0.45±0.00b	14.2±0.6b	0.053±0.004ab	84.9±11.0a	1.16±0.03b	8.01±0.29d
	BOF1	59.9±1.8d	0.46±0.01b	14.4±0.9b	0.052±0.008ab	89.1±10.4a	1.20±0.06ab	9.73±0.42cd
	BOF2	75.4±1.2bc	0.46±0.03b	15.7±0.4b	0.048±0.004ab	94.1±2.1a	1.21±0.04ab	11.20±0.68bc
	BOF3	81.7±4.7b	0.48±0.05ab	15.4±0.6b	0.045±0.003b	92.2±7.1a	1.20±0.01ab	12.20±0.73ab
	NOF1	68.8±2.9c	0.45±0.04b	16.8±2.4ab	0.068±0.016a	108.0±14.0a	1.23±0.04ab	8.10±0.60d
	NOF2	82.1±5.5b	0.49±0.02ab	16.9±0.4ab	0.061±0.010ab	100.0±5.4a	1.28±0.10ab	10.60±0.91bc
	NOF3	99.1±1.4a	0.53±0.021a	19.5±3.2a	0.051±0.020ab	109.0±25.0a	1.29±0.02a	13.00±1.32a
收获期	CF	40.5±0.5b	0.56±0.02ab	9.6±0.5b	0.043±0.020b	95.6±5.0b	1.94±0.14b	10.50±0.30c
	BOF1	45.7±2.8a	0.60±0.05a	9.5±0.3b	0.088±0.003a	95.4±3.2b	2.23±0.09ab	15.70±0.88a
	BOF2	43.5±0.1ab	0.56±0.02ab	11.3±0.2a	0.080±0.006a	113.0±2.0a	2.05±0.22ab	16.10±0.73a
	BOF3	41.5±0.7b	0.59±0.03a	10.0±1.1ab	0.098±0.005a	100.0±11.0ab	2.39±0.24ab	16.80±0.79a
	NOF1	41.3±1.5b	0.49±0.06b	9.2±1.1ab	0.098±0.011a	92.5±10.5b	2.54±0.25a	13.10±0.16b
	NOF2	41.7±1.3b	0.56±0.01ab	9.2±0.8b	0.074±0.018a	91.5±8.4ab	2.48±0.21a	11.10±0.74c
	NOF3	43.7±1.3ab	0.57±0.02a	10.3±0.2ab	0.086±0.005a	103.0±2.3ab	2.33±0.28ab	13.80±0.22b

各处理见表 2。同列中同一时期不同小写字母表示不同处理间差异在 0.05 水平上显著。

## 2.2 生物有机肥对土壤酶活性的影响

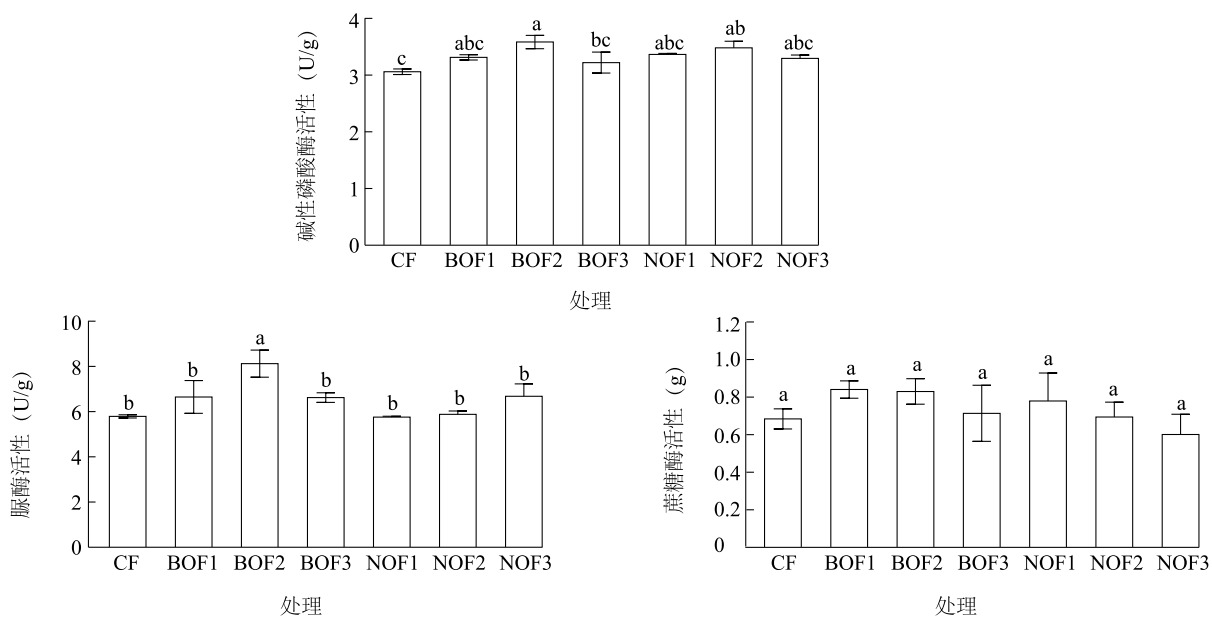
玉米收获期分别测定了土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性,测定结果如图 1 所示。所有处理中仅 BOF2 处理的脲酶活性显著高于 CF 处理。与脲酶活性相似,有机肥处理有提高土壤碱性磷酸酶活性的趋势,但仅 BOF2 处理的碱性磷酸酶活性显著高于 CF 处理。各处理间土壤蔗糖酶活性均无显著性差异,但施用有机肥仍具有提高土壤蔗糖酶活性的趋势,表明生物有机肥对土壤酶活性有一定的促进作用<sup>[20-21]</sup>。将 3 种酶活性与各项土壤指标测定结果进行相关分析,结果表明,土壤脲酶活性与土壤碱解氮、速效钾和有机质含量呈显著相关,土壤碱性磷酸酶活性与土壤速效磷、速效钾含量具有显著相关性,土壤蔗糖酶活性与各项土壤理化指标均不存在显著相关性(表 4)。

## 2.3 生物有机肥对土壤生物多样性的影响

### 2.3.1 土壤原核微生物物种丰度

为便于分析比较,将同种有机肥的 3 个水平处理 OTU 数值整合绘制 Venn 图(图 2)。如图 2 所示,3 种处理产生 OTU 总数为 8 831 个,其中共同包含的 OTU 数为 4 476,占总 OTU 数量的 50.69%。其中,CF 处理共得到 6 489 个 OTU,NOF 处理共得到 6 311 个 OTU,BOF 处理共得到 7 150 个 OTU。CF 处理中特有的 OTU 为 558 个,占总 OTU 数量的 8.60%;NOF 处理中特有的 OTU 为 705 个,占总 OTU 数量的 11.17%;BOF 处理中特有的 OTU 为 925 个,占总 OTU 数量的 12.94%。表明 3 个处理组原核微生物的群落结构差异较大。分别将 3 个处理两两比较发现,NOF 处理和 BOF 处理共有的 OTU 为 5 188 个;NOF 处理和 CF 处理共有的 OTU 最少,为 4 898 个;BOF 处理和 CF 处理共有的 OTU 最多,为 5 513 个。





各处理见表 2。不同小写字母表示不同处理间差异在 0.05 水平上显著。

图 1 不同有机肥对土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性的影响

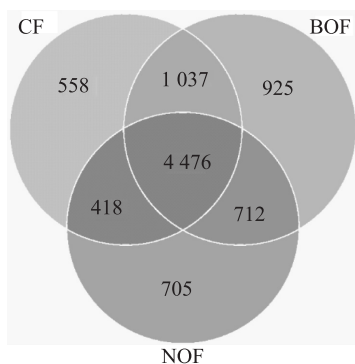
Fig.1 Effects of different organic fertilizers on soil urease, sucrase and alkaline phosphatase activities

表 4 土壤酶活性与土壤各养分指标的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of soil enzyme activities and nutrient indicators

土壤酶	碱解氮	全氮	速效钾	全钾	速效磷	全磷	有机质
脲酶	0.454 *	0.217	0.486 *	-0.125	0.486 *	0.249	0.513 *
碱性磷酸酶	0.119	-0.239	0.468 *	-0.073	0.468 *	0.378	-0.304
蔗糖酶	-0.042	-0.099	-0.084	-0.074	-0.084	-0.109	0.291

\* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。



各处理见表 2。

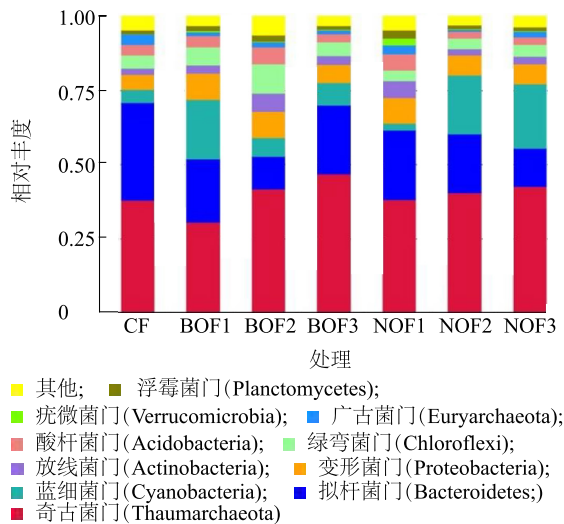
图 2 不同有机肥施用条件下土壤微生物 Venn 图

Fig.2 Soil microbial Venn diagram under different organic fertilizer application conditions

2.3.2 土壤原核微生物群落组成及相对丰度 门分类水平上,不同有机肥处理下原核微生物群落组成及相对丰度见图 3。从图 3 可知,7 个处理土壤原核

微生物群落在门水平上的组成基本相同,但平均相对丰度所占比例有所不同。各处理中原核微生物类群相对丰度排名前 10 的有奇古菌门(Thaumarchaeota,占 39.81%)、拟杆菌门(Bacteroidetes,占 20.65%)、蓝细菌门(Cyanobacteria,占 11.79%)、变形菌门(Proteobacteria,占 7.30%)、绿弯菌门(Chloroflexi,占 5.19%)、放线菌门(Actinobacteria,占 3.49%)、酸杆菌门(Acidobacteria,占 3.72%)、广古菌门(Euryarchaeota,占 1.91%)、疣微菌门(Verrucomicrobia,占 0.59%)和浮霉菌门(Planctomycetes,占 1.61%),它们占总类群的93.79%~97.18%。其中,奇古菌门、拟杆菌门和蓝细菌门为优势菌群,分别占 3 个处理平均相对丰度 10%以上,其他 7 个菌门的平均相对丰度较低,所占比例均小于 10.0%。统计分析结果显示,当有机肥用量达4 500 kg/hm<sup>2</sup>及以上时,土壤中奇古菌门相对丰度与 CF 处理相比有所

增加,但仅 BOF3 处理中奇古菌门的相对丰度显著高于 CF 处理。绿弯菌门在 BOF2 处理与 CF、BOF3、NOF1、NOF2、NOF3 处理平均相对丰度达到显著差异水平( $P<0.05$ )外,其他菌门在 7 个处理中均未有明显差异( $P>0.05$ )。以上结果表明,与其他处理相比,施用生物有机肥 6 750 kg/hm<sup>2</sup> 显著增加了奇古菌门、绿弯菌门的相对丰度,其他原核微生物门的相对丰度在 7 个处理间尚未有明显差异。



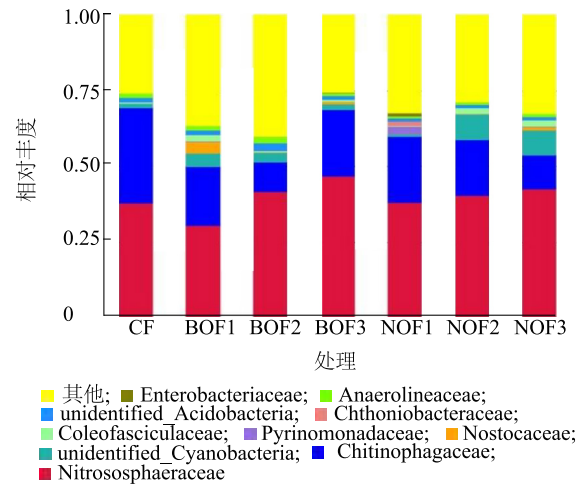
各处理见表 2。

图 3 不同有机肥施用条件下土壤微生物群落在门水平上的组成及相对丰度

Fig.3 Composition and relative abundance of soil microbial communities at the phylum level under different organic fertilizer application conditions

科水平上,不同施肥处理下原核微生物群落的组成及相对丰度如图 4 所示。在科水平上,7 个处理中原核微生物类群的平均相对丰度均小于 75.0%,其中 Nitrososphaeraceae 科是 7 个处理共同的优势菌群(占 30.58%以上),在 BOF3 处理中的相对丰度最高,为 46.88%;其次是 Chitinophagaceae 科(占 9.85%以上),在 CF 处理中的相对丰度最高,为 31.50%。与门水平相比,科水平下未被分类的原核微生物类群占 25%以上。在 7 种处理的土壤样品中,未分类的原核微生物成了重要的类群之一,说明随着分类的细化,相关数据库中可用信息量越来越少,同时也说明土壤中含有一定数量的潜在原核微生物类群。以上结果表明,施用有机肥,尤其是生物有机肥可显著增加土壤中 Nitrososphaeraceae 科的

相对丰度,且随着施用量的增加其相对丰度呈增加的趋势。

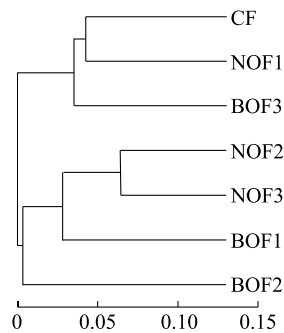


各处理见表 2。

图 4 不同有机肥施用条件下土壤微生物群落在科水平上的组成及相对丰度

Fig.4 Composition and relative abundance of soil microbial communities at the family level under different organic fertilizer application conditions

使用 Qiime 软件计算 Unifrac 距离,并基于 Weighted Unifrac 方法构 UPGMA 样品聚类树,对 7 个处理的土壤微生物群落构成的相似性进行聚类分析,并将聚类结果与各样品在门水平上的物种相对丰度进行整合展示(图 5)。结果表明,7 个处理可分为 2 大类,其中 CF、NOF1、BOF3 处理的土壤原核微生物群落组成聚于一类,在聚类关系上趋同性较强,而在这一大类中,CF 处理和 NOF1 处理属于同一亚类,亲缘关系最近,BOF3 处理则单独为一亚类,与 CF 处理和 NOF1 处理亲缘关系略远。BOF2、BOF1、NOF2 处理和 NOF3 处理土壤微生物群落组成趋于一大类,在聚类关系上趋同性较强,其中 BOF1、NOF2 处理和 NOF3 处理属于同一亚类,NOF2 和 NOF3 同属一个分支,而 NOF1 处理为另一个分支;BOF2 单独为一个亚类。表明不同有机肥及其施用量对土壤微生物种群结构的影响存在差异,普通有机肥施用量达到 4 500 kg/hm<sup>2</sup> 及以上才会对土壤微生物种群结构产生明显影响,而生物有机肥用量为 2 250 kg/hm<sup>2</sup> 时就可显著改变土壤微生物种群结构。然而,BOF3 处理结果出现反常,可能是由于取样过程中空间分布的不均匀性及复杂性造成的。



各处理见表 2。

图 5 不同有机肥施用处理下土壤微生物群落相似性聚类树

Fig.5 Soil microbial community similarity clustering tree under different organic fertilizer application treatments

2.3.3 土壤原核微生物多样性 Chao1 指数和 ACE 指数表征物种的丰富度,其值越高表明原核微生物群落的物种丰富度越高;Shannon 指数和 Simpson 指数表征微生物多样性程度,Shannon 指数越高表明原核微生物群落的多样性越高,Simpson 指数与之相反;Coverage 是指各样本文库的覆盖率<sup>[22-24]</sup>。

表 5 不同有机肥施用下土壤原核微生物群落的多样性指数

Table 5 Diversity index of soil prokaryotic microbial community under different organic fertilizer application conditions

处理	Chao1 指数	ACE 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	覆盖率
CF	1 653.824±52.414b	1 700.896±85.440bc	6.278±0.915a	0.968±0.008a	0.987±0.003ab
BOF1	1 933.986±256.814ab	1 960.542±223.660ab	7.188±0.230a	0.970±0.005a	0.987±0.002ab
BOF2	2 171.851±141.618a	2 173.504±139.220a	7.477±0.209a	0.971±0.005a	0.986±0.003ab
BOF3	1 848.630±99.233ab	1 925.588±82.930ab	6.709±0.132a	0.960±0.001a	0.989±0.003ab
NOF1	1 260.957±44.534c	1 367.498±305.710c	6.151±0.957a	0.968±0.020a	0.993±0.004a
NOF2	1 937.015±146.785ab	1 995.703±145.690ab	6.374±0.413a	0.952±0.015a	0.985±0.002b
NOF3	2 110.168±156.287a	2 119.706±157.340a	6.431±1.040a	0.948±0.025a	0.987±0.004ab

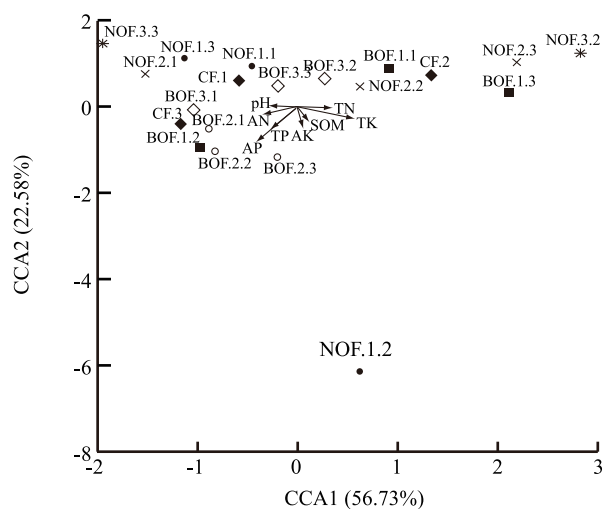
各处理见表 2。同列不同小写字母表示不同处理间差异在 0.05 水平上显著。

2.3.4 土壤微生物群落组成与土壤环境因子的相关性 为分析不同施肥方式下土壤生境中微生物群落与土壤环境因子间的关系,以微生物群落在门水平上的相对丰度数据为物种数据,土壤理化性质数据为土壤环境变量,采用 Canoco 软件进行 CCA 分析,其排序结果如图 6 所示。第 1 排序轴(PC1)对土壤微生物群落变化贡献率最大,达到 56.73%;第 2 排序轴(PC2)仅贡献了土壤微生物群落变化的 22.58%。PC1 和 PC2 两个主成分对微生物群落总变异贡献率为 79.31%,在对微生物群落变异的解释中起主导作用。其中, pH ( $r = -0.9984$ )、速效

表 5 是不同有机肥施用下土壤原核微生物的多样性指数。从表 5 可以看出,7 个处理文库覆盖率均在 98%以上,能够较为全面地反映不同耕作措施下土壤原核微生物群落的种类和结构。统计分析结果显示,7 个处理的 Shannon 指数和 Simpson 指数差异不显著,表明本研究中施用有机肥未显著改变原核微生物群落的多样性。对于丰富度指数 Chao1 和 ACE 而言,7 个处理土壤环境原核微生物群落丰富度由高到低排序为: BOF2 > NOF3 > NOF2 > BOF1 > BOF3 > CF > NOF1。不同施肥处理对原核微生物群落物种丰富度的影响程度均不同,与对照相比,除 NOF1 处理外,施用有机肥增加了土壤原核微生物群落的丰富度,其中 BOF2 处理和 NOF3 处理使得土壤中原核微生物群落的丰富度比对照显著提高。对于同一种有机肥而言,随着施用量增加土壤微生物群落的丰富度和多样性呈逐渐增加趋势;而在相同施用量水平下,生物有机肥对土壤原核微生物群落的多样性和丰富度的提高幅度要大于普通有机肥,但 BOF3 处理除外。

氮 ( $r = -0.9492$ )、全钾 ( $r = 0.9448$ )、全氮 ( $r = 0.9964$ )与第 1 排序轴的相关性较高,速效钾 ( $r = -0.9698$ )、有机质 ( $r = -0.8580$ )、速效磷 ( $r = -0.8061$ )、全磷 ( $r = -0.8088$ )与第 2 排序轴的相关性较高。表明土壤 pH 以及全氮、速效钾、速效氮、全钾、有机质含量对土壤原核微生物群落遗传多样性的变化起着重要作用。

7 个处理的样本中,BOF2.1、BOF2.2、BOF2.3、BOF1.2、CF3、BOF3.1、NOF3.1 相距较近,说明这 7 个样本的群落结构相近;NOF3.3、NOF2.1、NOF1.3 相距较近,说明这 3 个样本的群落结构相近;



■ BOF1; ○ BOF2; ◇ BOF3; ◆ CF; • NOF1; × NOF2; \* NOF3  
各处理见表2。TN:全氮;TK:全钾;TP:全磷;SOM:土壤有机质;  
AK:速效钾;AP:速效磷;AN:速效氮。

图6 门水平下不同有机肥施用处理的土壤原核微生物群落与土壤理化因子的典型对应分析

Fig.6 Canonical correspondence analysis of prokaryotic microbial community and soil physical and chemical factors under different organic fertilizer application conditions at phylum level

NOF1.1、CF1、BOF3.3、BOF3.2、NOF2.2、BOF1.1、CF2相距较近,说明这7个样本的群落结构相近;BOF1.3、NOF2.3、NOF3.2相距较近,说明这3个样本的群落结构相近。CF1、CF2、CF3相距较远,NOF2.1、NOF2.2、NOF2.3相距较远;NOF3.1、NOF3.2、NOF3.3相距较远,NOF1.1及NOF1.3与NOF1.2相距较远,BOF1.1及BOF1.3与BOF1.2相距较远,说明取样过程中空间分布的不均匀及复杂性也会影响原核微生物的群落结构。BOF2.1、BOF2.2、BOF2.3相距较近,BOF3.1、BOF3.2、BOF3.3相距较近,说明BOF2和BOF3这2个处理的3个样本群落结构均很相近,空间分布相对均匀,变异性低。总体而言,施用普通有机肥处理土壤样本之间的微生物群落结构变异较大,且与对照的微生物群落结构相近;施用生物有机肥的土壤样本之间微生物群落结构相似度高,生物有机肥施用量达到4 500 kg/hm<sup>2</sup>可一定程度改变土壤原核微生物群落结构,但仍存在结构的相似性。

土壤微生物类群中,以细菌居多,通常能占70%~90%,其种类繁多,功能多样,具有最为丰富的遗传多样性。不同耕作施肥方式对土壤微生物群

落结构、种类、数量存在一定的影响。采用高通量测序技术对土壤原核微生物16S rRNA基因的V4高变区进行扩增测序分析,结果表明,7种处理在97%的相似度水平上,共产生8 831种属分类水平的原核微生物,此外测序还发现了许多未被分类的原核微生物,需通过深度测序或利用其他先进手段对微生物进行更细致地分类研究。在门分类水平上,土壤主要优势菌群为奇古菌门(Thaumarchaeota,占39.81%)、拟杆菌门(Bacteroidetes,占20.65%)和蓝细菌门(Cyanobacteria,占11.79%),其中奇古菌门的丰度最高。

## 2.4 生物有机肥对玉米生物指标及产量的影响

收获期测量玉米的株高及茎粗,陈NOF1处理,其他处理间未发现显著差异。对于玉米产量,BOF3处理与CF处理间存在显著差异,除此以外其他的BOF处理与NOF处理组虽产量较CF处理高,且随着施肥量的增加而提高,但无显著差异。在同等有机肥施肥量的条件下,生物有机肥的增产效果更显著(表6)。

表6 收获期肥料对植株生物性指标及产量的影响

Table 6 Effects of fertilizer on biological indicators and yield of plants during harvest period

处理	株高 (cm)	茎粗 (cm)	产量 (g, 1盆)
CF	123.83±5.75ab	13.67±1.92ab	101.43±2.60b
BOF1	120.33±2.52ab	14.85±0.71a	114.60±10.09ab
BOF2	122.33±7.11ab	14.87±0.71a	120.09±12ab
BOF3	125.33±9.58a	14.82±0.532a	130.00±14.18a
NOF1	111.17±7.08b	12.44±0.99b	101.76±12.69ab
NOF2	124.00±2.78ab	15.46±0.53a	108.63±21.03ab
NOF3	133.50±10.90a	15.11±0.62a	110.08±6.13ab

各处理见表2。同列不同小写字母表示不同处理间差异在0.05水平上显著。

## 3 讨论

有机质含量是衡量土壤肥力的重要指标<sup>[25-27]</sup>。其疏松多孔而又吸水的特性可以用来改善土壤的物理性质,调节土壤的水气平衡<sup>[28-29]</sup>。有机质在自然环境中常以胶膜的形式存在,这有利于阴阳离子的吸附,从而提高土壤的缓冲性。有机质作为养分转化的动力,其对于生态系统也同样具有显著的作用<sup>[30-31]</sup>。通过采集盆栽试验苗期与收获期土壤,分



析基本养分指标后发现:当有机肥及生物有机肥的施用量达到4 500 kg/hm<sup>2</sup>及以上时,均可显著提高土壤中有机的含量;在玉米苗期,相同的施用量条件下2种有机肥对于土壤中有机的含量的提升效果相近,但到了收获期生物有机肥对土壤有机的提升作用更加显著。王立刚等7年的试验结果显示长期施用生物有机肥能显著提高土壤有机质含量,且提升效果较普通有机肥更为明显<sup>[32]</sup>。刘国伟研究了长期施用生物有机肥对土壤理化性质影响,结果表明施用生物有机肥能显著提高土壤有机质含量,且随着时间的推移有机质含量会稳定在一个较高的含量范围<sup>[33]</sup>。

合理的土壤养分状态是保证作物良好生长的前提<sup>[34-35]</sup>,氮是土壤中养分供给三大元素之一。本试验结果显示,BOF处理与NOF处理组的碱解氮含量均呈苗期上升、收获期下降的趋势,这与作物生长周期对氮元素的需求相吻合。处理组内施肥量与土壤中的含氮量呈正相关,这与苏娜等相关研究结果一致<sup>[36]</sup>。磷是作物生长过程中必不可少的元素,有研究结果显示施用有机物料能降低土壤对磷的固定,提高有效磷的含量<sup>[37]</sup>。本研究结果显示,苗期BOF处理与NOF处理较CF处理速效磷含量均有一定程度的提升,但各处理之间并未出现显著差异。钾元素在土壤中的含量较高,但随着粮食产量的不断提升,中国土壤中的钾元素逐渐出现亏缺现象,以往的研究结果也显示适当提高土壤中的钾含量对增产有促进作用<sup>[38]</sup>。在本研究中,苗期各处理间速效钾含量无显著差异,收获期仅BOF2处理与CF处理间存在显著差异。可见施用有机肥对土壤氮、磷、钾含量均有不同程度的提升作用,其中对土壤氮的影响最为明显。等量的生物有机肥与普通有机肥在养分上对土壤的作用效果差异并不明显,但可以发现施肥量与土壤中各种养分含量有一定的正相关关系。在对作物产量进行测定时发现,BOF3处理的产量与CF处理具有显著差异。

环境中的各种生物在其代谢过程中会产生不同的代谢产物,其中就包括酶。酶能催化一系列的化学反应,推动土壤的代谢<sup>[39]</sup>。在实际生产实践中常用脲酶的活性来评定土壤中氮的供给能力<sup>[40]</sup>。本研究中对脲酶活性的分析结果表明,土壤脲酶活性与土壤有机质含量存在正相关关系,这与以往的试验结果相吻合<sup>[41-42]</sup>。对脲酶进行单独分析后发现,

BOF2处理脲酶活性显著高于CF处理和NOF处理,由此可以推测,短期条件下生物有机肥能提高脲酶的活性,这与相关研究结果一致<sup>[43]</sup>。前人研究结果表明,土壤中C/N比越低越有利于有机的积累。本研究结果显示,土壤脲酶活性与碱解氮含量呈显著正相关关系,与全氮含量呈一定正相关,因此生物有机肥通过提高土壤脲酶活性从而增加土壤氮含量,降低C/N比进而促进土壤有机的积累。土壤碱性磷酸酶是一种水解性酶,它能加速土壤脱磷,提高土壤磷素的有效性,试验结果表明速效磷含量与碱性磷酸酶的活性存在正相关关系。对收获期土壤速效磷的测定结果显示BOF2处理的含量最高,各处理与CF处理比较仅有BOF2处理存在显著差异。有相关研究结果显示有效磷过高会对磷酸酶起到抑制作用<sup>[44]</sup>,所以以磷酸酶活性作为参考评价土壤肥效时应考虑是否存在抑制的现象。

微生物在其生长代谢过程中会对土壤的各项性质产生影响,土壤理化性质的变化也会直接或间接影响土壤微生物群落结构的组成<sup>[45-47]</sup>。因此微生物多样性被认为是评价自然或人为干扰引起土壤变化的重要指示因子<sup>[48-49]</sup>。本研究结果显示,施用生物有机肥能有效提高土壤微生物的丰富度,其中奇古菌门所占比例最高,这与苏婷婷<sup>[50]</sup>等的研究结果相一致。奇古菌门在自然界中的碳氮循环中起到非常重要的作用<sup>[51-52]</sup>。在本研究中,生物有机肥施用量为4 500 kg/hm<sup>2</sup>以上时微生物丰富度会显著提高,菌群数量增加,这有利于提高土壤微生物活性,进而促进整个土壤生态的平衡稳定<sup>[53-54]</sup>。有研究结果显示,土壤有机质含量与微生物数量呈极显著相关关系<sup>[55]</sup>。试验结果显示,收获期较苗期土壤的有机质含量有一定的提升,原因可能是施肥后期生物有机肥中的生物成分提高了土壤中的微生物数量,使得微生物将无机物合成为有机物,转化有机物的作用增强。因此,微生物和土壤有机质之间具有相互促进作用和协同发展的关系。黄泛冲积区自生土壤的养分贫瘠,微生物数量较少及群落组成相对单一,通过施用生物有机肥可以有效提高当地土壤生物的多样性,从根本上改善土壤微环境,从而改良土壤,提升地力。

施用普通有机肥和生物有机肥均可提高土壤有机质和氮、磷、钾养分的含量,且随着施用量的增加作用更加明显。相同施肥量水平下2种有机肥对土

壤养分的影响差异不大。与普通有机肥相比,生物有机肥对土壤酶活性有更好的提升作用,且随着施用量的增加土壤酶活性随之增加。施用普通有机肥及生物有机肥可以不同程度增加土壤中微生物的丰富度,而生物有机肥对土壤微生物的影响更为显著。生物有机肥与普通有机肥均具有使作物增产的效果,其中生物有机肥增产效果更加显著,当施用量达 6 750 kg/hm<sup>2</sup>时产量显著高于对照。可见,黄泛冲积区贫瘠土壤在施用有机肥,特别是施用生物有机肥后土壤理化性状可显著改善,土壤酶活及土壤微生物多样性也随之提高,最终实现增产的目的。

### 参考文献:

- [1] 张泽林. 浅析“18 亿亩耕地红线”政策的现实意义[J]. 赤子(上中旬), 2017(3): 162.
- [2] 宋雨婷. 经济增长、城镇化与耕地非农化关系的计量分析——以江苏省为例[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(15): 2975-2978.
- [3] 李慧, 王芳, 赵庚星, 等. 黄泛平原区不同土地利用方式下的土壤养分状况分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 154-158.
- [4] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 175-181.
- [5] 王利辉. 不同来源有机肥及其配合施用对土壤性质的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2007.
- [6] 周伟红. 有机肥对土壤培肥和作物产量的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
- [7] 张运龙. 有机肥施用对冬小麦-夏玉米产量和土壤肥力的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [8] 沈德龙. 我国生物有机肥的发展现状及展望[J]. 中国土壤与肥料, 2007(6): 1-5.
- [9] 何蔚娟. 生物有机肥生产问题研究[J]. 陕西农业科学, 2018, 64(6): 90-92.
- [10] 李婧. 土壤有机质测定方法综述[J]. 分析试验室, 2008(S1): 154-156.
- [11] 张薇, 付昀, 李季芳, 等. 基于凯氏定氮法与杜马斯燃烧法测定土壤全氮的比较研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(35): 172-175.
- [12] 钱君龙, 张连弟, 乐美麟. 过硫酸盐消化法测定土壤全氮全磷[J]. 土壤, 1990(5): 258-262.
- [13] 王敏. 碱熔-火焰光度法测定土壤全钾应注意的问题[J]. 辽宁林业科技, 2016(6): 75-76.
- [14] 夏栋, 潘家荣, 张博, 等. 土壤速效氮两种测定方法的测定值相关性研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2010, 32(2): 95-97.
- [15] 程乐明, 陈良, 刘建雷, 等. 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷的注意事项[J]. 现代农业科技, 2009(3): 205.
- [16] 郝卓敏. 土壤速效钾的测定[J]. 昭乌达蒙族师专学报(自然科学版), 2000(3): 81-82.
- [17] 丰骁, 段建平, 蒲小鹏, 等. 土壤脲酶活性两种测定方法的比较[J]. 草原与草坪, 2008(2): 70-72.
- [18] 李朝英, 郑路. 基于 DNS 比色法的土壤蔗糖酶检测条件选择[J]. 中国农学通报, 2016, 32(27): 171-176.
- [19] 石春芳, 王志勇, 冷小云, 等. 土壤磷酸酶活性测定方法的改进[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(7): 48-49.
- [20] 唐海滨, 廖超英, 刘莉丽, 等. 蔬菜大棚土壤脲酶、过氧化氢酶活性与土壤养分的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 165-168.
- [21] 李素俭, 李新平, 刘瑞丰, 等. 商洛药源基地土壤脲酶、磷酸酶和土壤养分的关系研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 227-230.
- [22] PITTA D W, PARMAR N, PATEL A K, et al. Bacterial diversity dynamics associated with different diets and different primer pairs in the rumen of Kankrej cattle[J]. PLoS One, 2014, 9(11): e111710.
- [23] SUN R B, ZHANG X X, GUO X S, et al. Bacterial diversity in soils subjected to long-term chemical fertilization can be more stably maintained with the addition of livestock manure than wheat straw[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 88: 9-18.
- [24] 曹辉, 李燕歌, 周春然, 等. 炭化苹果枝对苹果根区土壤细菌和真菌多样性的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(17): 3413-3424.
- [25] 鲁艳红. 长期施肥条件下红壤性水稻土有机质特征及其与土壤质量的关系[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011.
- [26] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 513-519.
- [27] 郑曼迪, 熊黑钢, 乔娟峰, 等. 基于综合光谱指数的不同程度人类干扰下土壤有机质含量预测[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(5): 1048-1056.
- [28] 刘效东, 乔玉娜, 周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J]. 植物生态学报, 2011, 35(12): 1209-1218.
- [29] 单秀枝, 魏由庆, 严慧峻, 等. 土壤有机质含量对土壤水力学参数的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 1-9.
- [30] GREEN J L, HOLMES A J, WESTOBY M, et al. Spatial scaling of microbial eukaryote diversity[J]. Nature, 2004, 432: 747-750.
- [31] NACHIMUTHU G, KING K, KRISTIANSEN P, et al. Comparison of methods for measuring soil microbial activity using cotton strips and a respirometer[J]. Journal of Microbiological Methods, 2007, 69(2): 322-329.
- [32] 王立刚, 李维炯, 邱建军, 等. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究[J]. 土壤肥料, 2004(5): 12-16.
- [33] 刘国伟. 长期施用生物有机肥对土壤理化性质影响的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [34] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2809-2819.
- [35] 张德喜, 吴卿. 不同耕作方式对农田土壤养分含量及土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 234-237.
- [36] 苏娜, 杨丽娟, 周崇俊, 等. 有机肥与氮肥配施对设施土壤中

- 碱解氮含量的影响[J].安徽农业科学,2006(24):6542-6543.
- [37] 姬兴杰,熊淑萍,李春明,等.不同肥料类型对土壤酶活性与微生物数量时空变化的影响[J].水土保持学报,2008,22(1):123-133.
- [38] 章永松,林咸永,倪吾钟.有机肥对土壤磷吸附-解吸的直接影响[J].植物营养与肥料学报,1996,2(3):200-205.
- [39] 张亦驰,李 林,史喜林,等.土壤钾素形态及有效性的研究进展[J].吉林农业科学,2013,38(6):52-54.
- [40] 李 华,陈英旭,梁新强,等.土壤脲酶活性对稻田面水氮素转化的影响[J].水土保持学报,2006,20(1):55-58.
- [41] 李琰琰,刘国顺,向金友,等.氮营养水平对植烟土壤养分含量及土壤酶活性的影响[J].中国烟草学报,2011,17(2):39-43.
- [42] 焦晓光,隋跃宇,张兴义.土壤有机质含量与土壤脲酶活性关系的研究[J].农业系统科学与综合研究,2008(4):494-496.
- [43] 田小明,李俊华,王 成,等.连续3年施用生物有机肥对土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响[J].土壤,2014,46(3):481-488.
- [44] 张建林,陆 欣,王申贵.有机物料配比施用对土壤碱性磷酸酶活性的影响[J].土壤通报,2001(2):75-79.
- [45] 厉桂香,马克明.土壤微生物多样性海拔格局研究进展[J].生态学报,2018,38(5):1521-1529.
- [46] 金圣爱,黄少辉,刘建伟,等.石灰氮-花生壳闷棚技术对设施土壤生物及黄瓜产量的影响[J].山东农业科学,2018,50(1):91-94.
- [47] 路 璐,何 燕.不同林分土壤中氨氧化微生物的群落结构和硝化潜势差异及其驱动因子[J].南方农业学报,2018,49(11):2169-2176.
- [48] 李 桥.基于高通量测序技术下土壤微生物群落结构的研究[D].济南:山东师范大学,2014.
- [49] 孙 波,赵其国,张桃林,等.土壤质量与持续环境 III.土壤质量评价的生物学指标[J].土壤,1997(5):225-234.
- [50] 苏婷婷,徐 宸,周鑫斌,等.生物有机肥对新整理烟田古菌群落组成的影响[J].中国烟草学报,2016,22(6):91-97.
- [51] 张丽梅,贺纪正.一个新的古菌类群——奇古菌门(Thaumarchaeota)[J].微生物学报,2012,52(4):411-421.
- [52] PRESTON C M, WU K Y, MOLINSKI T F, et al. A psychrophilic crenarchaeon inhabits a marine sponge: *Cenarchaeum symbiosum* [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1996, 93: 6241-6246.
- [53] DORAN J W, SARRANTONIO M, LIEBIG M A. Soil health and sustainability[J]. Advances in Agronomy, 1996, 56(8):1-54.
- [54] IBEKWE A M, KENNEDY A C, FROHNE P S, et al. Microbial diversity along a transect of agronomic zones[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2002, 39(3):183-191.
- [55] 张迎春,颜建明,李 静,等.生物有机肥部分替代化肥对莴笋及土壤理化性质和微生物的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):196-205.

(责任编辑:张震林)