



张越, 高游慧, 陈颖, 白秀梅, 刘雪连, 王小芬. 农用酵素对沙土、酸性土和盐碱土的改良效果研究[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(6): 177-186.
ZHANG Yue, GAO Youhui, CHEN Ying, BAI Xiumei, LIU Xuelian, WANG Xiaofen. Effects of agricultural Jiaosu on the improvement of sandy soil, acidic soil and saline-alkali soil[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(6): 177-186.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.06.18

农用酵素对沙土、酸性土和盐碱土的改良效果研究

张越¹ 高游慧² 陈颖¹ 白秀梅¹ 刘雪连¹ 王小芬^{2*}

(1. 北京大北农集团 饲用微生物工程国家重点实验室, 北京 100194;

2. 中国农业大学 农学院, 北京 100193)

摘要 为探究农用酵素对土壤的改良效果, 通过盆栽试验利用农用酵素对沙土、酸性土及盐碱土进行为期 30 d 的短期改良, 通过测定土壤理化性质和微生物组成, 对农用酵素作为土壤改良剂的可行性进行评价。结果表明: 对于沙土, 农用酵素可使其 pH 由 9.63 降至 6.42, 有机质含量提高 8 倍, 土壤中氮磷钾的含量也均有所提升, 农用酵素中的有益微生物 (*Lactobacillus* 和 *Acetobacter*) 成为土壤优势细菌菌群, 同时显著降低了真菌的多样性; 对于酸性土, 农用酵素对其 pH 影响不大, 但土壤有机质及氮磷钾含量增加, 酵素中有益微生物可在酸性土中有效定殖; 对于盐碱土, 农用酵素可有效降低其 pH (由 10.37 降至 7.77), 增加土壤养分含量, 施用农用酵素后土壤中 *Acetobacter*、*Kocuria*、*Planococcus* 和 *Alkalibacterium* 的相对丰度较高, 从而抑制了土壤病原真菌的生长。未来农用酵素可针对不同土壤的突出问题进行改良以提高土壤品质。

关键词 农用酵素; 土壤改良; 沙土; 酸性土; 盐碱土

中图分类号 X712

文章编号 1007-4333(2024)06-0177-10

文献标志码 A

Effects of agricultural Jiaosu on the improvement of sandy soil, acidic soil and saline-alkali soil

ZHANG Yue¹, GAO Youhui², CHEN Ying¹, BAI Xiumei¹, LIU Xuelian¹, WANG Xiaofen^{2*}

(1. Beijing Da Bei Nong Group State Key Laboratory of Forage Microbiology Engineering, Beijing, 100194, China;

2. College of Agronomy and Biotechnology, China Agriculture University, Beijing 100193, China)

Abstract To explore the effect of agricultural Jiaosu on soil improvement, this study investigated the short-term improvement of sandy soil, acidic soil, and saline-alkali soil using agricultural Jiaosu (AJ) through laboratory potted cultivation for a period of 30 days. The feasibility of AJ as soil amendments was evaluated by measuring the physicochemical properties and microbial composition of soil samples. The results showed that: AJ can reduce the pH of sandy soil from 9.63 to 6.42, increase the content of organic matter by 8 times, and increase the content of soil nutrient (nitrogen, phosphorus, and potassium). The beneficial microorganisms in AJ, *Lactobacillus* and *Acetobacter*, become the dominant bacterial community, while the fungal diversity is significantly reduced; For acidic soil, AJ has little effect on its pH, but its soil organic matter and nitrogen, phosphorus, and potassium content are increased. Similarly, the beneficial microorganisms in AJ can effectively colonize in acidic soil; For saline alkali soil, AJ can effectively reduce its pH (from 10.37 to 7.77) and increase soil nutrient content. The relative abundance of *Acetobacter*, *Kocuria*, *Planococcus*, and *Alkaliberium* in the soil is higher after the application of AJ, which inhibits the

收稿日期: 2023-12-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD1300600)

第一作者: 张越 (ORCID: 0000-0003-3726-5654), 博士研究生, E-mail: 13001167789@163.com

通讯作者: 王小芬 (ORCID: 0000-0003-3543-1073), 教授, 主要从事生物质资源农用转化研究, E-mail: wxiaofen@cau.edu.cn

growth of soil pathogenic fungi. In the future, the agricultural Jiaosu can be used to improve soil quality by targeting prominent issues in different soils.

Keywords agricultural Jiaosu; soil improvement; sandy soil; sour soil; saline alkali soil

近年来,工业发展迅猛,我国农业走上高投入高产发展之路。由此引发了多种环境问题,如土壤肥力下降、水资源污染和大气雾霾渐重等,农业发展面临重大阻碍^[1]。而土壤作为农业的基础,是整个生态系统不可缺少的基本要素,是人类社会经济发展的重要资源。近年来农药化肥的乱用滥用,造成全球土壤板结、重金属污染、沙漠化扩大和酸碱失衡、有益微生物减少等多重问题^[2]。我国的土壤问题尤为严峻,西北地区荒漠化严重,沙土面积逐渐扩大,沙土保水保肥能力差;南方地区降雨多,常年湿热,酸土易形成,土壤缺乏营养元素,植物难以生长;内蒙古地区耕地盐碱化严重,部分土地为重盐碱地,板结严重^[2]。可见我国土壤的生态可持续发展已受到威胁,故采用环境友好型农业技术改良土壤是亟待解决的重大课题^[3-5]。

施用有机改良剂可以改善土壤的理化和生物学性质^[6],农用酵素就是其中之一^[7]。农用酵素是将糖、有机废弃物和水按照1:3:10(质量比)的比例在密闭容器中发酵3个月以上经过滤得到的一种棕黄色有酸味的发酵产品^[8-9]。农用酵素以有机废弃物为底物经过微生物发酵形成复杂且稳定的具有多元功能的生态系统,它含有大量作物需要的营养物质,如氨基酸、葡萄糖、维生素与矿物元素,还包括调节作物生长的植物激素、抗菌物质、益生菌及其代谢产物等^[10-12]。有研究表明,农用酵素对土壤中的钾素、磷素、氮素和有机质的提高有一定效果^[13-15]。长期施用还可增加土壤中蚯蚓数量,能有效改善土壤孔隙度等物理性质,从而使土质疏松,土壤结构得到改良^[16-17]。此外,农用酵素能一定程度改善菠菜、辣椒、草莓和水稻等多种作物农艺指标,提高产品品质^[18-21]。上述试验均以常规土壤为对象,而关于农用酵素对问题土壤的改良效果的研究报道匮乏。此外,农用酵素作为微生物发酵产品,施用后对土壤微生物的影响还罕有研究。因此,农用酵素对土壤的改良机制更不明晰。本研究以沙土、酸土和盐碱土为研究对象,通过对土壤理化性质、微生物组成测定评价农用酵素对3种土壤的改良效果,并通过生物信息学技术分析并明确农用酵素对土壤的改良机理,旨在探究农用酵素改良

土壤的可行性,并对其在农业上的应用提供科学依据和理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

劣质稷山板枣、红糖和水按照1:3:10(质量比)装于发酵罐中,混匀30℃恒温厌氧发酵3个月,固液分离后取液态部分用于后续土壤改良试验,其理化性质见表1。

沙土、酸土和盐碱土分别采集于新疆和田塔克拉玛干沙漠、江西南昌和内蒙古沙土苏尼特右旗,分别记做沙土(SS)、酸土(AS)和盐碱土(SaS)。将新鲜土样迅速转移到实验室,所有土样在室温下干燥,每日混匀确保水分散失;干燥后过4 mm筛获得均匀土样,随后置于20℃保存。对土样进行理化和生物学性质测定(表2)。

1.2 试验设计

本试验设置了5个处理,分别为:T1,清水(对照);T2,V(农用酵素):V(水)=1:250;T3,V(农用酵素):V(水)=1:500;T4,V(农用酵素):V(水)=1:750;T5,农用酵素原液,每个处理设7次重复。上述土壤按相同总固体含量(TS)置于盆中(下径58 mm×上径88 mm×盆高133 mm)。盆底铺有报纸,防止土壤流失并保持空气畅通。试验期间每隔2 d称重并及时补充水分保持含水量为60%。每隔5 d施用1次农用酵素,试验期间共处理6次,农用酵素用量共30 mL。试验期间室内平均温度为18~25℃。试验结束后土样混匀分为2份,一份风干后用于土壤基本理化性质测定,另一份经液氮处理后立即送样进行高通量测序。

1.3 测定指标

1)理化性质:利用Mettler Toledo(瑞士)的FE-20pH/Mv台式微量pH计(梅特勒,瑞士)按土水质量比1:5进行测定,土壤水分含量(Wc)测定采用恒温箱烘干法,电导率采用Mettler Toledo(瑞士)的FE-30电导率仪进行测定,全氮(TN)采用凯氏定氮法测定,全磷(TP)采用浓硫酸-钼锑抗比色法测定,全钾(TK)采用浓硫酸-火焰光度法测定,氨氮硝氮采用水杨酸-硫酸比色法,速效磷采用NaHCO₃-钼

表 1 农用酵素基本性质

Table 1 The main characteristic of agricultural Jiaosu

参数 Parameter	数值 Value	参数 Parameter	数值 Value
pH	3.48	钾质量浓度/(mg/L) Potassium mass concentration	1 123.5
乳酸质量浓度/(g/L) Lactic acid mass concentration	4.46	磷质量浓度(mg/L) Phosphorus mass concentration	30.98
丙酸质量浓度/(g/L) Propionic acid mass concentration	1.52	钙质量浓度/(mg/L) Calcium mass concentration	14.59
总有机酸质量浓度/(g/L) Total organic acid mass concentration	5.98	镁质量浓度/(mg/L) Magnesium mass concentration	10.45
乳酸菌计数/(CFU/mL) Lactic acid bacteria counts	5.70	锌质量浓度/(mg/L) Zinc mass concentration	2.40
醋酸菌计数/(CFU/mL) Acetobacter counts	4.95	铁质量浓度/(mg/L) Iron mass concentration	0.45
酵母菌计数/(CFU/mL) Yeast counts	3.78	总氨基酸质量分数/(mg/100 g) Total amino acid mass fraction	482
霉菌计数/(CFU/mL) Mould counts	0	乙醇质量浓度/(g/L) Ethanol mass concentration	0.80

表 2 原始土壤理化性质表

Table 2 The physical and chemical details of original soil

参数 Parameter	沙土 Sand soil	酸土 Acid soil	盐碱土 Saline-alkali soil
pH	9.63	4.65	10.37
电导率/(us/cm) Electrical conductivity	328.2	131.6	3 291
有机质质量分数/(g/kg) Organic matter mass fraction	3.05	44.25	33.91
全氮质量分数/(mg/kg) Total N mass fraction	0.21	1.25	0.78
全磷质量分数/(mg/kg) Total P mass fraction	325.16	204.77	196.69
全钾质量分数/(g/kg) Total K mass fraction	8.21	13.14	13.21

锑抗比色法,速效钾采用 NH₄OAc-火焰光度法测定,总碳(TC)采用重铬酸钾容量法测定。碳氮比(C/N)=TC/TN,有机质质量分数(g/kg)=有机碳×1.724。以上参考 Fernández-Delgado 等^[6]的方法进行测定。

2)高通量测序:土壤样品经液氮处理后送交上海派森诺生物科技有限公司完成高通量测序。主

要包括以下步骤:提取微生物总 DNA,目标片段 PCR 扩增,扩增产物回收纯化,扩增产物荧光定量,测序文库制备,上机测序。细菌通用引物为 338F 和 806R (ACTCCTACGGGAGGCAGCAG 和 GGACTACHVGGGTWTCTAAT),真菌通用引物为 ITS5F 和 ITS1R(GGAAGTAAAAGTCGTA ACAAGG 和 GCTGCGTTCTTCATCGATGC)。

1.4 数据处理

数据处理和统计分析使用 EXCEL、SPSS 20、Canoco for Windows 4.5 软件。使用 SPSS 23.0 进行单因素方差分析, $P<0.05$ 表示差异显著。

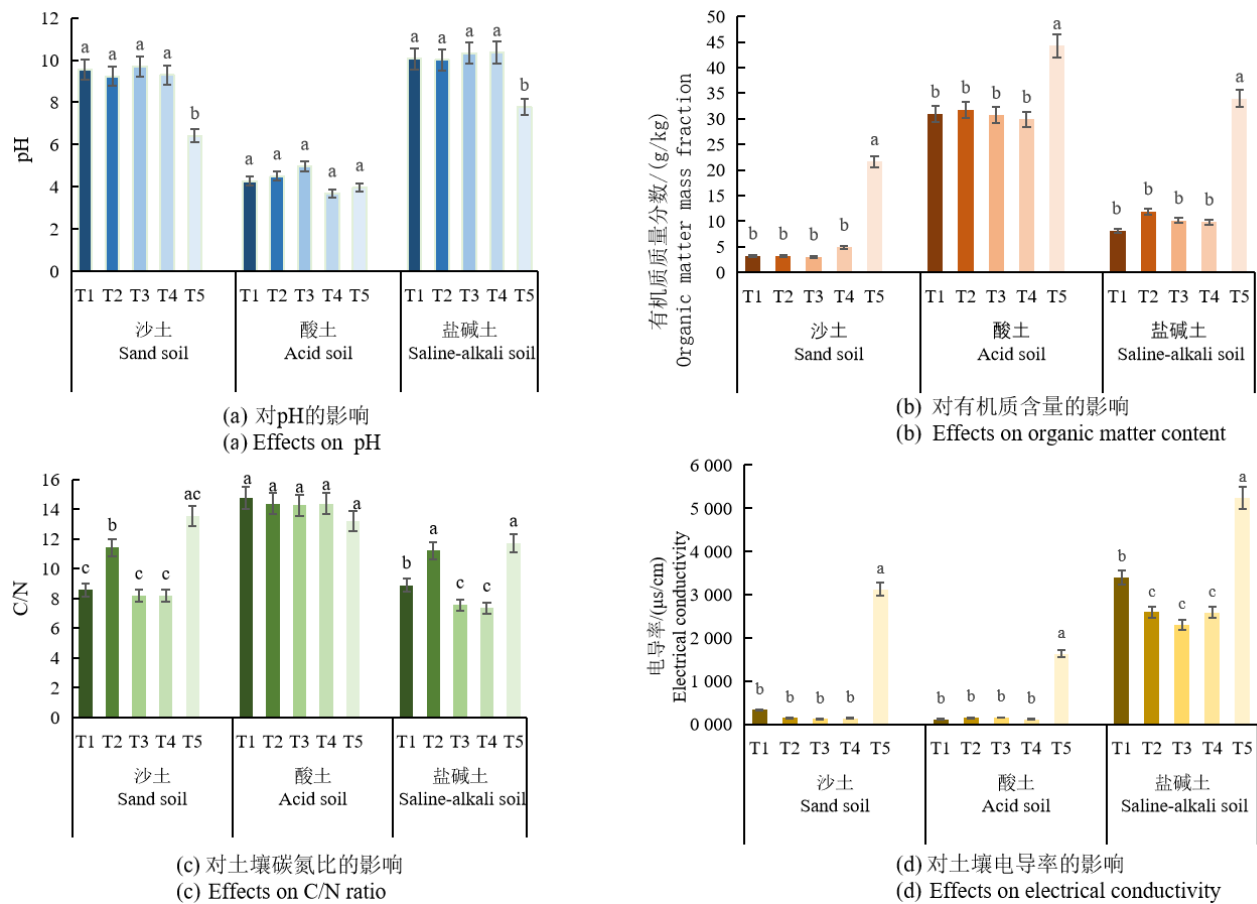
2 结果与讨论

2.1 农用酵素对土壤理化性质的影响

2.1.1 农用酵素对土壤基本性质的影响

农用酵素对土壤 pH 的影响与土壤类型相关(图 1(a))。沙土和盐碱土原始 pH 均较高,施用未稀释的农用酵素可显著降低其 pH($P<0.05$)。但对试验前 pH 仅有 4.65 的酸土影响并不显著($P>0.05$)。与 CK 相比,农用酵素稀释 250、500 和 750 倍对 3 种土壤的 pH 的影响不显著($P>0.05$),而原液对 pH 的影响较为明显($P<0.05$)。沙土与盐碱土原始的 pH 分别为 9.63 和

10.37,经过农用酵素原液为期 1 个月的短暂改良后 pH 分别降至 6.42 和 7.77,这与前人的研究结果相似^[22-23]。农用酵素经发酵后体系中含有大量有机酸,pH 值在 4 以下($\text{pH}=3.48$),表现出强烈的酸性性质,施用于土壤后能与土壤中的碱性成分发生反应,有效降低土壤的 pH。由图 1(b)可知,农用酵素对土壤有机质含量的影响与 pH 规律基本相同。相较于 CK,稀释 250、500 和 750 倍处理间差异不显著($P>0.05$)。农用酵素原液表现特殊,可显著提高 3 种土壤的有机质含量($P<0.05$)。原始沙土中有机质质量分数最低,仅为 3.05 g/kg,农用酵素将其提高了近 8 倍,高达 21.64 g/kg。这是由于农用酵素以红枣为发酵底物,并添加了适量的红糖,酵素本身有机质含量比较高,直接施用于土壤可使土壤中的碳含量增高,有机质含量也随之增加^[15,24]。农用酵素对土壤碳氮比的影响与土壤类型相关性不明显(图 1(c))。



T1 代表空白对照; T2、T3 和 T4 分别代表 $V(\text{农用酵素}):V(\text{水})=1:250, 1:500, 1:750$; T5, 农用酵素原液。下同。
T1 represents blank control; T2, T3, and T4 represent $V(\text{agricultural Jiaosu}):V(\text{water})$ water in a ratio of 1:250, 1:500, and 1:750 by volume, respectively; T5, agricultural Jiaosu stock solution. The same below.

图 1 农用酵素对土壤基本理化性质的影响

Fig. 1 Effects of dilution ratio of agricultural Jiaosu on the basic physicochemical properties of soil

高浓度农用酵素(原液及250倍稀释液)可提高沙土和盐碱土的碳氮比(C/N)($P<0.05$),但对酸土影响并不显著($P>0.05$)。这可能与沙土中总碳含量较低,盐碱土中高碳低氮的土壤性质有关,农用酵素的使用引入了大量的碳源,从而提升了这2种土壤的碳氮比^[25-26]。而对于碳含量较高的酸土,农用酵素并未展现出可提高其碳氮比的效果($P>0.05$)。土壤电导率是土壤提取液中的阴离子和阳离子的总和,代表了土壤的含盐量^[22]。与CK相比,稀释后的农用酵素不会引起土壤电导率的改变,而原液的施用显著增加了3种土壤的电导率($P<0.05$)。这可能是农用酵素中含大量离子,自身电导率较高的原因(图1(d))。

2.1.2 农用酵素对土壤养分含量的影响

土壤养分分为植物生长提供必须的营养元素,是

评价土壤的重要指标^[5]。农用酵素对土壤养分含量的影响见表3。对沙土而言,与CK相比,仅有农用酵素原液可显著增加土壤TN和TP的含量($P<0.05$),对其他指标(TK、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、AP和AK)含量的影响不大($P>0.05$),这与前人的研究结果一致^[27]。对酸土而言,农用酵素原液可显著提高TN、TP和TK的含量($P<0.05$)。值得注意的是4种不同稀释倍数的农用酵素对土壤中AP含量具有显著提升作用($P<0.05$)。对于盐碱土,与CK相比,未稀释的农用酵素可提高盐碱土土壤中TP和TK的含量($P<0.05$),高浓度的农用酵素(原液和250倍稀释)对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量有明显提升作用($P<0.05$),但同时会导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的降低^[18]。农用酵素对3种土壤的AK无显著影响($P>0.05$)。

表3 农用酵素稀释倍数对土壤养分质量分数的影响
Table 3 Effect of dilution ratio of agricultural Jiaosu on the mass fraction of soil nutrients

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	总氮/ (g/kg) TN	总磷/ (mg/kg) TP	总钾/ (g/kg) TK	铵态氮/ (mg/kg) $\text{NH}_4^+\text{-N}$	硝态氮/ (mg/kg) $\text{NO}_3^-\text{-N}$	有效磷/ (mg/kg) AP	有效钾/ (g/kg) AK
沙土 Sand soil	T1	0.23 b	292.99 b	8.32 a	56.07 a	3.21 a	35.25 a	1.33 a
	T2	0.28 b	235.85 b	8.97 a	50.88 a	3.57 a	36.85 a	1.34 a
	T3	0.16 c	242.61 b	8.85 a	55.21 a	3.48 a	37.28 a	1.34 a
	T4	0.18 c	220.69 b	9.12 a	52.07 a	3.44 a	36.97 a	1.34 a
	T5	0.93 a	638.78 a	10.18 a	54.25 a	3.62 a	37.25 a	1.34 a
酸土 Acid soil	T1	1.15 b	194.84 b	13.50 b	52.37 a	10.22 a	9.37 b	1.09 a
	T2	1.20 b	210.48 b	13.91 b	54.21 a	9.97 a	10.12 a	1.09 a
	T3	1.11 b	199.36 b	14.45 a	53.66 a	9.83 a	10.06 a	1.09 a
	T4	1.07 b	116.14 b	13.90 b	53.98 a	10.11 a	9.83 a	1.09 a
	T5	1.94 a	617.08 a	15.11 a	54.25 a	10.07 a	10.25 a	1.09 a
盐碱土 Saline-alkali soil	T1	0.76 b	225.76 b	14.82 b	55.83 a	3.75 b	2.77 b	1.01 a
	T2	0.76 b	233.48 b	15.34 b	55.27 a	3.98 a	3.23 a	1.01 a
	T3	0.74 b	208.48 b	14.85 b	54.21 b	3.78 b	3.13 a	1.01 a
	T4	0.76 b	210.63 b	14.87 b	54.05 b	3.76 b	3.00 a	1.01 a
	T5	1.88 a	391.71 a	19.75 a	54.25 b	4.02 a	3.33 a	1.01 a

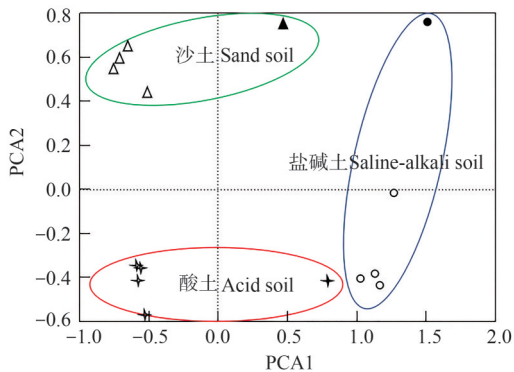
注: T1代表空白对照; T2、T3和T4分别代表V(农用酵素):V(水)=1:250、1:500、1:750; T5, 农用酵素原液。下同。

Note: T1 represents blank control; T2, T3, and T4 represent V (agricultural Jiaosu) : V (water) in a ratio of 1:250, 1:500 and 1:750 by volume, respectively; T5, agricultural Jiaosu stock solution. The same below.

2.1.3 农用酵素对土壤理化性质的主成分分析

不同稀释倍数农用酵素对3种土壤化学性质的综合影响见图2。3种类型的土壤可以很好的分离聚类,这说明农用酵素对土壤的改良效果与土壤性

质相关性较高。但每组中有一个实心样本(农用酵素原液)与其他几个空心样本(稀释后的农用酵素)距离很远,这说明农用酵素对土壤的改良效果较为显著。



实心代表未稀释的农用酵素施用后的土壤样本。

Solid represents soil samples after application of undiluted agricultural Jiaosu.

图2 农用酵素对土壤理化性质影响的主成分分析

Fig. 2 Principal component analysis of the effects of agricultural Jiaosu on soil physical and chemical properties

2.2 农用酵素对土壤微生物的影响

2.2.1 农用酵素对土壤细菌的影响

为了探究农用酵素对土壤细菌多样性的影响，选取对土壤理化性质影响最为显著的农用酵素原液处理进行高通量测序。沙土、酸土和盐碱土的空白对照和未稀释的农用酵素处理后的土壤样本分别记作SS1、SS2、AS1、AS2、SaS1和SaS2。

Chao1和ACE是评估群落中OTU总数的指标，数值越大代表物种总数越多，丰富度越高^[13]。农用酵素施用后，Chao1和ACE均有所下降，这说明农用酵素会降低土壤丰富度^[28]。Shannon指数越大，表示物种的多样性越高；而Simpson数值范围在0~1之间，Simpson值为0，则表示物种多样性最小。由表4可知农用酵素处理后Shannon和Simpson均降低，说明物种丰度及均匀度均降低^[12, 29]。

表4 农用酵素对土壤细菌总数和多样性的影响

Table 4 Effects of agricultural Jiaosu on the total number and diversity of soil bacteria

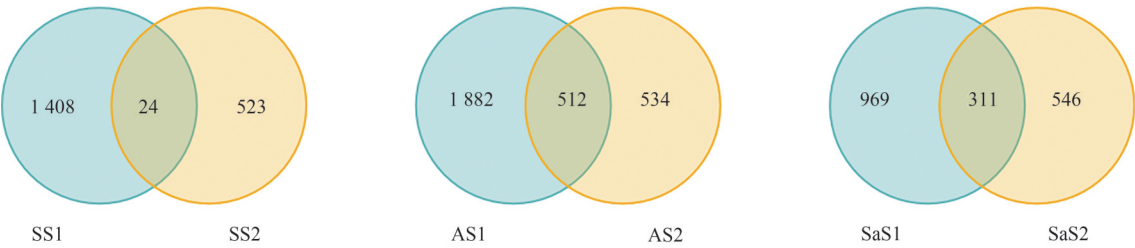
模型 Model	SS1	SS2	AS1	AS2	SaS1	SaS2
Chao1	1 475	547	2 453. 51	1 046	1 280	857
ACE	1 527	547	2 434. 31	1 046	1 280	857
Simpson	0. 928	0. 884	0. 997	0. 537	0. 994	0. 915
Shannon	6. 42	5. 42	9. 87	3. 55	8. 77	5. 85

注：SS1、SS2、AS1、AS2、SaS1和SaS2分别为沙土、酸土和盐碱土的空白对照和未稀释的农用酵素处理后的土壤样本。下同。

Note: SS1, SS2, AS1, AS2, SaS1, and SaS2 are blank controls and undiluted soil samples treated with agricultural Jiaosu for sand soil, acid soil, and saline-alkali soil, respectively. The same below.

Venn图可反映出样品间共有和特有的OUT数目，可直观的表现出样品间OUT的重叠情况^[13]。如图3所示，SS1与SS2、AS1与AS2、SaS1与SaS2的OTU重叠数为分别为24、512和311，说明24、

512和311个OUT是参与农用酵素改良沙土、酸土和盐碱土过程中主要细菌。此外，农用酵素的施用导致土壤特有的OUT数目降低，这也进一步说明农用酵素会降低土壤中微生物多样性^[29]。



图上数字表示样品中OUT的数量。

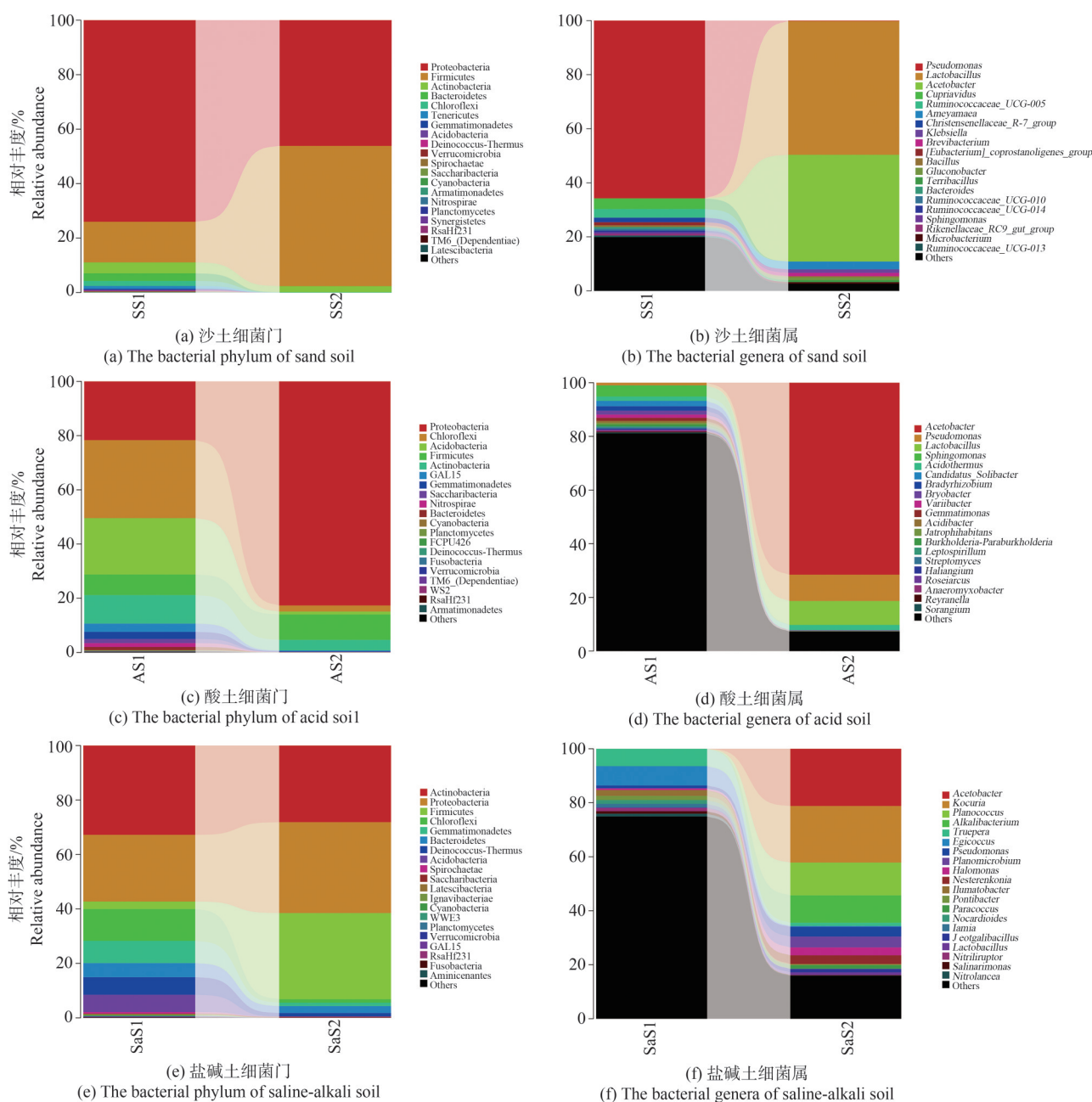
The numbers on the graph represent the number of OUT in the sample.

图3 农用酵素原液及清水施用后土壤微生物OUT的Venn图

Fig. 3 Venn analysis of soil microbial OUT after application of agricultural Jiaosu stock solution and clean water

为了进一步探究农用酵素土壤改良过程中细菌的变化,本研究筛选丰度 $>1\%$ 的前20种细菌并对其丰度进行比较(图4)。SS1和SS2(沙土)中的主要细菌门相同,但酵素改良后,Proteobacteria降低,Fimicutes上升;属水平上,对照组(SS1)中以*Pseudomonas*为主,农用酵素改良后则以

*Lactobacillus*和*Acetobacter*为优势菌群。对于酸土,对照组(AS1)在门水平上以Proteobacteria,Chloroflexi,Acidobacter,Fimicutes,Actinobacter为主,但施用酵素后(AS2),物种多样性下降,Proteobacteria和Fimicutes为优势菌群;属水平上,施用农用酵素后*Lactobacillus*,*Acetobacter*,



SS1、SS2、AS1、AS2、SaS1和SaS2分别为沙土、酸土和盐碱土的空白对照和未稀释的农用酵素处理后的土壤样本。

SS1, SS2, AS1, AS2, SaS1, and SaS2 are blank controls and undiluted soil samples treated with agricultural Jiaosu for sandy soil, acidic soil, and saline alkali soil, respectively.

图4 农用酵素改良后土壤细菌群落组成

Fig. 4 Composition of soil bacterial community after agricultural Jiaosu improvement

Pseudomonas 占优势地位。对于盐碱土,主要微生物类群在农用酵素改良前后变化不显著,但 *Fimicutes* 有所增加;属水平上,农用酵素施用后 *Acetobacter*, *Kocuria*, *Planococcus*, *Alkalibacterium* 相对丰度较高。

2.2.2 农用酵素对土壤真菌的影响

农用酵素处理对土壤真菌的影响是颠覆性的。图5是农用酵素处理后微生物的丰度等级曲线,其中折线在横轴上的长度反映了该样本中 OTU 数的多少,代表了群落的丰富度,折线越长,该样本中的 OTU 数越多。折线的平缓程度则反映了群落组成

的均匀度,折线越平缓,群落组成的均匀度越高;折线越陡峭,则群落中各 OTU 间的丰度差异越大,均匀度越低。由图5可知,农用酵素使用后,3种土壤真菌的 OTU 丰度等级曲线横轴上的投影变少且较为陡峭,这说明酵素的施用对土壤中真菌的群落组成影响较为显著,显著降低了土壤中真菌的丰富度和均匀度。之前的研究发现农用酵素对农业病原真菌确有抑制作用,如灰葡萄孢菌(*Botrytis cinerea*)及尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)等,这说明农用酵素可对真菌危害较大的土壤进行生物防控^[7, 10]。

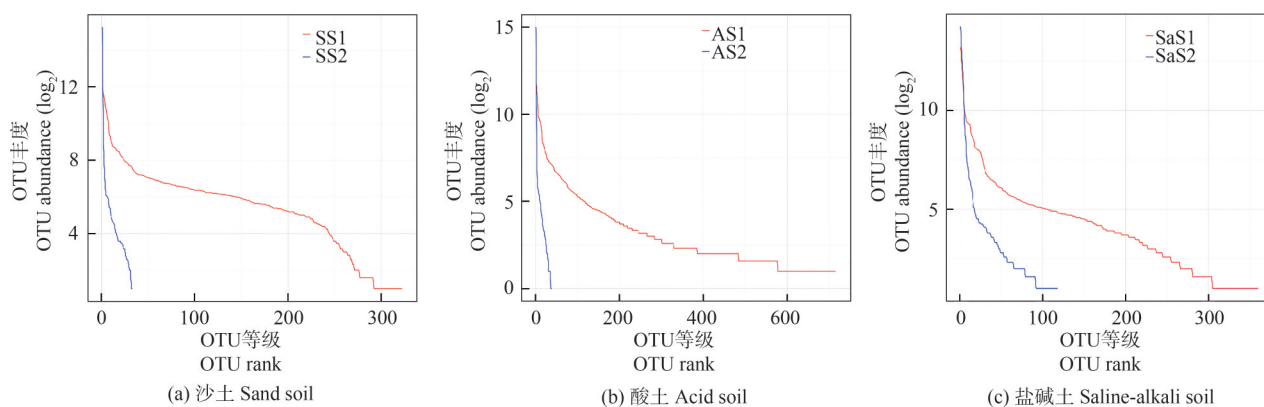


图5 农用酵素改良后真菌 OTU 丰度等级曲线

Fig. 5 OUT abundance grade curve of fungi improved by agricultural Jiaosu

2.3 土壤性质和微生物间的冗余(RDA)分析

由图6可知,对照组(SS1、AS1和SaS1)与处理组(SS2、AS2和SaS2)分布于坐标轴两侧,这说明农用酵素原液的施用对3种土壤(沙土、酸性土和盐碱土)性质的影响显著。其中,pH与对照组呈正相关,TN、TK、TP、AK、AP、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、OM、C/N、EC与处理组呈正相关,这说明农用酵素的施用降低了土壤pH的同时增加了土壤中养分的含量。农用酵素以有机废弃物为发酵底物,发酵成熟后含有大量的有机酸和氮磷钾等植物所需要的养分,施用于土壤后会导致土壤pH降低和养分含量的提升。土壤酸碱性是影响土壤养分及养分有效性的重要因素之一,大量的研究表明偏中性(pH=6.5~7.0)的土壤中养分有效性最高^[14]。图6显示pH与土壤养分等理化性质呈负相关关系,这是因为强酸性的农用酵素施用于土壤后可使初始pH较高的土壤的酸碱性有效降低,这会增强土壤养分有效性。此外,土壤养分的结构与微生物的组成息息相

关。图6显示TP对土壤微生物群落结构影响最大,与 *Ascomycota*, *Firmicutes*, *Proteobacteria*, *Rozellomycota* 呈

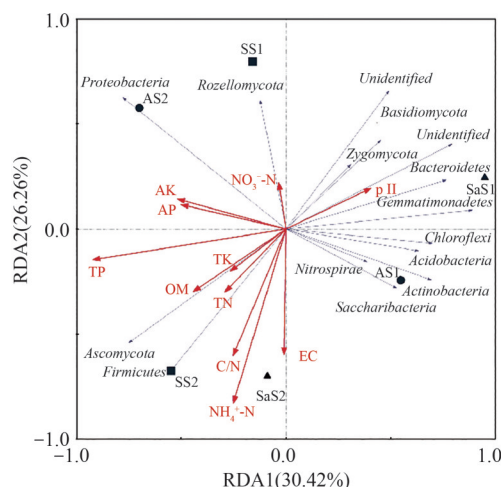


图6 土壤理化性质和微生物间的 RDA 分析

Fig. 6 RDA analysis of soil physicochemical properties and microbial interactions

正相关,与 *Chloroflexi*, *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, *Basidiomycota*, *Bacteroidetes*, *Gemmatimonadetes*, *Saccharibacteria*, *Nitrospirae* 呈负相关。综上,可推测出农用酵素通过降低土壤pH、增加土壤养分含量和定殖酵素有益微生物来达到改良土壤的目的。

3 结 论

农用酵素是经过微生物发酵形成的复杂而稳定的具有多元功能的生态系统, $\text{pH} < 4$, 且含有大量作物需要的营养物质, 可作为土壤改良剂应用。本研究共得出以下结论: 1) 农用酵素对酸土、沙土和盐碱土有明显改良作用, 可平衡土壤酸碱性、提高土壤养分(氮磷钾)及有机质含量, 此外, 农用酵素中的有益微生物可在土壤中有效定殖。2) 在本试验条件下, 除施用农用酵素原液外, 稀释倍数对土壤改良效果有限, 仅个别处理($V(\text{农用酵素}): V(\text{水}) = 1: 250$)可增加沙土和盐碱土的碳氮比; 此外, 稀释后的农用酵素会使土壤的电导率降低。3) 农用酵素对土壤中的真菌具有强力抑制作用, 可用于对土壤病原真菌的生物防控。综上, 农用酵素可作为土壤改良剂, 针对土壤不同的突出问题进行改良, 以提高土壤品质, 具有广泛的应用前景。

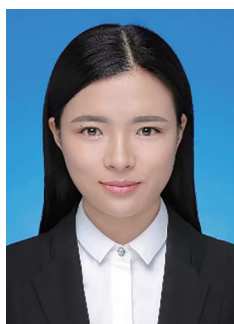
参考文献 References

- [1] Meng F Q, Qiao Y H, Wu W L, Smith P, Scott S. Environmental impacts and production performances of organic agriculture in China: A monetary valuation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 188: 49-57
- [2] Seufert V, Ramankutty N, Foley J A. Comparing the yields of organic and conventional agriculture [J]. *Nature*, 2012, 485(7397): 229-232
- [3] Fan S X, Zuo J C, Dong H Y. Changes in soil properties and bacterial community composition with biochar amendment after six years [J]. *Agronomy*, 2020, 10(5): 746
- [4] Edesi L, Talve T, Akk E, Vösa T, Saue T, Loide V, Vettik R, Plakk T, Tamm K. Effects of acidified pig slurry application on soil chemical and microbiological properties under field trial conditions [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 202: 104650
- [5] Rodríguez-Berbel N, Ortega R, Lucas-Borja M E, Solé-Benet A, Miralles I. Long-term effects of two organic amendments on bacterial communities of calcareous mediterranean soils degraded by mining [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 271: 110920
- [6] Fernández-Delgado J M, Fabiani G, Mazzier T, Schönegger D, Pietramellara G, Gómez-Brandón M, Insam H. Reclamation of acid soils with biomass ashes from pyrolytic wood liquefaction [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2020, 11(9): 5067-5078
- [7] Gao Y H, Zhang Y, Cheng X Q, Zheng Z H, Wu X H, Dong X H, Hu Y

- G, Wang X F. Agricultural Jiaosu: An eco-friendly and cost-effective control strategy for suppressing *Fusarium* root rot disease in *Astragalus membranaceus* [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 823704
- [8] 方晟, 毛建卫, 单之初, 毛旻晨, 李好好. 植物源作物酵素营养液研究进展及发展建议 [J]. *农业工程*, 2017, 7(4): 181-186
- Fang S, Mao J W, Shan Z C, Mao Y C, Li H H. Research progress and development suggestions on plant-derived enzyme nutrient solution [J]. *Agricultural Engineering*, 2017, 7(4): 181-186 (in Chinese)
- [9] 许蓬娟, 李悠悠, 孙梓翔. 酵素在生物作用中的研究进展 [J]. *食品与发酵科技*, 2015, 53(1): 83-85, 97
- Xu P J, Li Y Y, Sun Z X. The research development of enzyme in the biological role [J]. *Food and Fermentation Science & Technology*. 2017, 53(1): 83-85, 97 (in Chinese)
- [10] Zhang Y, Gao Y H, Zheng Z H, Meng X Y, Cai Y F, Liu J B, Hu Y G, Yan S D, Wang X F. A microbial ecosystem: Agricultural Jiaosu achieves effective and lasting antifungal activity against *Botrytis cinerea* [J]. *AMB Express*, 2020, 10(1): 216
- [11] 马倩颖. 浅析环保酵素在家居和农业上的应用 [J]. *科技风*, 2018(5): 150
- Ma Q Y. Brief analysis the application of environmental protection enzymes to home and agriculture [J]. *Technology Wind*, 2018(5): 150 (in Chinese)
- [12] 欧阳传德, 陈琴琴. 浅议自制环保酵素在农业生产中的应用 [J]. *安徽农学通报*, 2017, 23(23): 53-54
- Ouyang C D, Chen Q Q. Discussion on the application of self-made environmental protection enzyme in agricultural production [J]. *Anhui Agriculture Science Bulletin*, 2018, 23(23): 53-54 (in Chinese)
- [13] 李方志, 王殷, 李丝丝, 杨汝兰, 杜北, 杨琴, 赵敏慧. 环保酵素对土壤钾素的改良效果 [J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(17): 168-169
- Li F Z, Wang Y, Li S S, Yang R L, Du B, Yang Q, Zhao M H. The improvement effects of garbage enzyme on soil potassium [J]. *Anhui Agriculture Science*, 2016, 44(17): 168-169 (in Chinese)
- [14] 李方志, 杨琴, 杨汝兰, 杜北, 王殷, 李丝丝, 赵敏慧. 环保酵素对土壤中有氮、全氮及有机质改良效果的研究 [J]. *玉溪师范学院学报*, 2016, 32(4): 42-47
- Li F Z, Yang Q, Yang R L, Du B, Wang Y, Li S S, Zhao M H. Effects of garbage enzyme hydrolysis of nitrogen, total nitrogen and organic matter on the soil improvement [J]. *Journal of Yuxi Normal University*, 2016, 32(4): 42-47 (in Chinese)
- [15] 李方志, 李丝丝, 王殷, 杨汝兰, 杜北, 杨琴, 赵敏慧. 环保酵素改良土壤中有有机质与磷素的探索性研究 [J]. *环境科学导刊*, 2016, 35(5): 65-69
- Li F Z, Li S S, Wang Y, Yang R L, Du B, Yang Q, Zhao M H. Study on improving soil organic matter and phosphorus by garbage enzymes [J]. *Environmental Science Survey*, 2016, 35(5): 65-69 (in Chinese)
- [16] 佟玉洁. 自制环保酵素改善土壤肥力试验研究 [J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(26): 119-121
- Tong Y J. Test research of soil fertility improved by self-made garbage enzyme [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(26): 119-121 (in Chinese)
- [17] 王广印, 马新立, 张全, 韩世栋. 有益菌对有机质的分解作用及对蔬菜的增产效应 [J]. *广东农业科学*, 2006, 33(10): 45-46
- Wang G Y, Ma X L, Zhang T, Hang S D. Effects of useful microorganism on decomposing organic matter and increasing vegetable

- production[J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2006, 33(10): 45-46
- [18] 杨园媛, 贾圣青, 杨辉, 张明科. 土壤调理剂与酵素施用对土壤理化性质及甘蓝产量的影响[J]. *蔬菜*, 2020(2): 14-19
- Yang Y Y, Jia S Q, Yang H, Zhang M K. Effects of soil conditioners and enzyme application on soil physical and chemical properties and yield of cabbage[J]. *Vegetable*, 2020(2): 14-19
- [19] 冯筠洋. 环保酵素施用对土地与植物生长状况的影响研究[J]. *化工设计通讯*, 2017, 43(10): 185, 188
- Feng Y Y. Effects of environmental enzyme application on land and plant growth [J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2017, 43(10): 185, 188 (in Chinese)
- [20] 李洁, 周娴, 郝小燕, 应英, 许学. 植物酵素对大棚黄瓜生长及产量的影响[J]. *中国食物与营养*, 2014, 20(12): 29-32
- Li J, Zhou X, Hao X Y, Ying Y, Xu X. Effect of plant enzyme on growth and yield of greenhouse *Cucumis sativus* [J]. *Food and Nutrition in China*, 2014, 20(12): 29-32 (in Chinese)
- [21] 曹颖. 环保酵素的制作及在草莓种植上应用[J]. *科技应用*, 2016(6): 32
- Cao Y. The production of environmentally friendly enzymes and their application in strawberry cultivation [J]. *Technology Applications*, 2016(6): 32
- [22] 张立超. 环保酵素改良滨海盐碱性土壤的应用研究[J]. *资源节约与环保*, 2019(3): 8
- Zhang L C. Study on the application of environmental protection enzymes to improve coastal saline-alkaline soil [J]. *Resource Conservation and Environmental Protection*, 2019(3): 8 (in Chinese)
- [23] 韩剑宏, 刘泽霞, 张连科, 李玉梅, 姜庆宏, 王维大. 环保酵素对盐碱土关键化学性质的影响[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(3): 126-131
- Han H J, Liu Z X, Zhang L K, Li Y M, Jiang Q H, Wang W D. Effect of garbage enzyme on key chemical properties of Saline-alkali soil [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(3): 126-131 (in Chinese)
- [24] 刘可成. 酵素型微生物土壤活化剂对茶园土壤生态及茶树生长的影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014
- Liu K C. Soil microbial enzymes activator research on the effect of tea garden soil ecological and tea growth [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [25] Tong Y J, Liu B G. Test research of different material made garbage enzyme's effect to soil total nitrogen and organic matter [J]. *IOP conference series. Earth and environmental science*, 2020, 510(4): 042015
- [26] Ibell P T, Xu Z H, Blumfield T J. Effects of weed control and fertilization on soil carbon and nutrient pools in an exotic pine plantation of subtropical Australia [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(6): 1027-1038
- [27] 徐新, 刘博然, 杜艳, 许月, 王双, 黄苗苗, 唐薇, 宋宇. 竹叶酵素制备及其在土壤改良中的应用[J]. *世界竹藤通讯*, 2019, 17(2): 44-47
- Xu X, Liu B R, Du Y, Xu Y, Wang S, Huang M M, Tang W, Song Y. Bamboo leaf enzyme preparation and its application in soil improvement [J]. *World Bamboo and Rattan*. 2019, 17(2): 44-47
- [28] Ravinthiran S S. The implementation of garbage enzyme system on organic waste in Melaka [R]. Melaka: University Teknikal Malaysia Melaka, 2016
- [29] 张越, 赵宇宾, 蔡亚凡, 刘小平, 胡跃高, 王小芬. 农用植物酵素的生态效应研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(3): 25-35
- Zhang Y, Zhao Y B, Cai Y F, Liu X P, Hu Y G, Wang X F. Ecological effects of plant Jiaosu for agriculture: A review [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(3): 25-35 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 张越, 中共党员, 农学博士。现任大北农集团饲用微生物工程国家重点实验室研发经理, 主要研究方向为饲用微生物资源的挖掘及替抗产品的开发。目前共发表论文共10余篇, 其中以第一作者发表SCI论文2篇、EI论文2篇, 申请专利2项。



通讯作者简介: 王小芬, 博士, 中国农业大学农业与生物技术学院教授, 博士生导师。中国生物发酵协会酵素分会理事, 山东高密市、山西怀仁市等地畜禽粪便整县推进首席科学家。研究方向为作物秸秆和畜禽粪便资源化。参与科技部国家“十三五”重点研发项目(2019YFC0408700)和国家“十四五”重点研发项目(2021YFD1901103-1), 担任子课题项目负责人。曾获中国城市环境卫生协会科学技术奖、中国城市环境卫生协会科技进步国家一等奖、全国农业专业学位研究生教育指导委员会实践教学成果奖以及全国农业专业学位研究生教育指导委员会国家一等奖。发表SCI论文40余篇, 参与编写《农业原理》。