中国农业大学学报 2024,29(6):187-196
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

符明清,范鹤龄,张丽,李昌珍,张荣萍. 液态农用酵素及其不同组分对原生和农田土壤的改良效果[J]. 中国农业大学学报,2024,29(06):187-196.
FU Mingqing, FAN Heling, ZHANG Li, LI Changzhen, ZHANG Rongping. Improvement effects of liquid agricultural Jiaosu and its different components on arable and native soils[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(06): 187-196.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.06.19

液态农用酵素及其不同组分对原生和农田土壤的改良效果

符明清[1] 范鹤龄[1,2] 张 丽[1] 李昌珍[1] 张荣萍[1*]

(1. 海南大学 热带农林学院,海口 570228;
2. 绵阳市农业科学研究院 作物特色资源创制及应用四川省重点实验室,四川 绵阳 621023)

摘 要 为探索液态农用酵素及其不同组分对原生和农田土壤的改良效果,通过离心分离液态农用酵素,得到上清液和酵素菌液。利用土壤室内培养法,以无菌水(CK)为对照,分别用上清液(T1)、酵素菌液(T2)、液态农用酵素(T3)处理原生和农田土壤,从土壤团聚体、酶活性、理化性质、微生物方面评估不同处理对2种土壤的改良效果。结果表明:1)与CK相比,T1和T3处理下,第14天原生土壤蔗糖酶活性分别显著增加了501.67%和2 173.5%($P<0.05$),第21天农田土壤蔗糖酶活性分别显著增加了896.5%和1 484.49%($P<0.05$)。2)T1处理下原生土壤和T3处理下农田土壤的pH分别从6.75和6.8(第0天)增加至7.49和6.94(第28天);与CK相比,第21天,T3处理下农田土壤电导率显著增加了10.13%($P<0.05$),第28天,T3处理下原生土壤电导率显著增加了29.68%($P<0.05$)。3)与CK相比,T2处理下原生土壤的放线菌和农田土壤的细菌数量分别显著增加了415.71%和1 137.84%($P<0.05$);T1处理下农田土壤的放线菌数量显著增加了81.69%($P<0.05$);T3处理下原生土壤的真菌数量显著增加了44.44%($P<0.05$)。4)与CK相比,原生土壤在T1、T2和T3处理下>2.00 mm粒级团聚体分别显著增加了35.25%、39.80%和35.77%($P<0.05$);T1处理下农田土壤中0.30~1.00 mm粒级团聚体显著增加了77.65%($P<0.05$);T2处理下原生土壤的土壤团聚体平均质量直径MWD和土壤几何平均直径GMD分别显著增加了17.38%和22.55%($P<0.05$)。5)液态农用酵素中对原生和农田土壤起到改良作用的主要是其上清液。6)电导率与土壤脲酶活性呈显著正相关($P<0.05$),与土壤蔗糖酶活性呈极显著正相关($P<0.001$);pH与MWD和GMD呈极显著正相关($P<0.001$)。综上,液态农用酵素能够快速激活原生和农田土壤,提高土壤酶活性和团聚体稳定性,其中酵素中的上清液发挥了主要作用。

关键词 农用酵素;土壤酶活;土壤团聚体;土壤改良

中图分类号 S15 **文章编号** 1007-4333(2024)06-0187-10 **文献标志码** A

Improvement effects of liquid agricultural Jiaosu and its different components on native and arable soils

FU Mingqing[1], FAN Heling[1,2], ZHANG Li[1], LI Changzhen[1], ZHANG Rongping[1*]

(1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China;
2. Crop Characteristic Resources Creation and Utilization Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang Academy of Agricultural Sciences, Mianyang 621023, China)

Abstract In order to explore the improvement effects of liquid agricultural Jiaosu and its different components on native soil and arable soil, liquid agricultural Jiaosu were separated by centrifugation and the supernatant and enzyme bacterial solution were obtained. Using soil indoor cultivation method, sterile

收稿日期:2023-11-30
基金项目:海南省自然科学基金项目(323RC419)
第一作者:符明清(ORCID:0009-0003-6428-951X),硕士研究生,E-mail:23210901000090@hainanu.edu.cn
通讯作者:张荣萍(ORCID:0009-0006-0255-384X),副教授,主要从事热带作物栽培与耕作研究,E-mail:990837@hainanu.edu.cn

water（CK）as the control, native soil and arable soi were treated with the supernatant of Jiaosu（T1）, microorganism solution of Jiaosu（T2）and liquid agricultural Jiaosu（T3）, respectively. The improvement effects of the different treatments on the two soils were evaluated in terms of soil aggregates, enzyme activities, physical and chemical properties and microorganisms. The results showed that: 1）Compared with CK, sucrase activity of negative soil was significantly increased by 501.67% and 2 173.5%（$P<0.05$）on day 14 under T1 and T3 treatments, and the sucrase activity of arable soil was significantly increased by 896.5% and 1 484.49% on day 21, respectively（$P<0.05$）. 2）The pH of native soil under T1 treatment and arable soil under T3 treatment increased from 6.75 and 6.8（day 0）to 7.49 and 6.94（day 28）, respectively. Compared with CK, the conductivity of arable soil under T3 treatments was significantly increased by 10.13%（$P<0.05$）on day 21, and the conductivity of negative soil under T3 treatment was significantly increased by 29.68%（$P<0.05$）on day 28. 3）Compared to CK, the actinomycetes of negative soil and bacteria of arable soil under T2 treatment significantly increased by 415.71% and 1 137.84%, respectively（$P<0.05$）. The actinomycetes of arable soil under T1 treatment significantly increased by 81.69%（$P<0.05$）, and the number of fungi in the native soil under T3 treatment significantly increased by 44.44%（$P<0.05$）. 4）Compared with CK, the number of aggregates more than 2 mm grain size in the native soil significantly increased by 35.25%, 39.80% and 35.77% under T1, T2, and T3 treatment, respectively（$P<0.05$）. The number of fungi in the arable soil under T1 treatment ranged 0.3 to 1 mm particle-size aggregates increased significantly by 77.65%（$P<0.05$）. The average mass diameter of soil aggregates MWD and geometric mean diameter of soil GMD of native soil under T2 treatment increased significantly by 17.38% and 22.55%, respectively（$P<0.05$）. 5）The supernatant of liquid agricultural Jiaosu played an important role in the native soil and arable soil. 6）The conductivity was significantly and positively correlated with soil urease（$P<0.05$）and soil sucrase activity（$P<0.001$）, and pH was significantly and positively correlated with MWD and GMD（$P<0.001$）. In conclusion, liquid agricultural enzymes can rapidly activate native and arable soils and improve soil enzyme activity and agglomerate stability, and its supernatant plays a major role.

Keywords agricultural Jiaosu; soil enzyme activity; soil aggregates; soil improvement

土壤是人类赖以生存与发展的基础，是人类从事农业生产的重要物质。目前，我国土壤存在着有机质含量低且分布不均、结构脆弱等质量问题[1]。同时，不合理的耕作制度以及化肥施用造成了土壤结构破坏、养分供应不均、微生物结构失调、农作物产量及品质下降等问题[2]。土壤改良修复是坚守我国18亿亩耕地红线的重要技术手段[3]。近年来，我国在改良土壤养分、增加土壤肥力、改善土壤酸化等方面均取得了一定的研究成果。例如，丁志峰等[4]研究表明，商品有机肥与生物质炭（或泥炭）配合施用可提高土壤保肥性，改善土壤养分的有效性；赵文瑞等[5]研究表明，海鲜炭壳可有效改良土壤酸化；佟玉洁等[6]研究表明，酵素可以提高土壤全氮和有机质含量，进而提高土壤肥力。

液态农用酵素是一种将作物植株、果皮、废果实等废弃物经过微生物发酵而成的发酵液，其具有较丰富的营养成分和代谢活性物质[7]。随着人们对安全、优质农产品的需求不断增加，对有机食品和绿色食品的消费需求也不断增长，同时，政府相关部门出台了化肥、农药减量政策，引导农业朝着更加可持续的方向发展。因此，农用酵素的开发与应用成为了研究者们关注的热点。农用酵素对土壤的物理性质、化学性质及生物学性状具有一定的影响[8]，如增加土壤养分和改善土壤微生物群落等[9-10]。文亚雄等[11]研究表明，施用农用酵素能够改良土壤结构，提高土壤有机质含量；任卓然等[12]研究表明，农用酵素能够增加土壤中有益菌数量，优化微生物种群结构。这些研究为农用酵素改良土壤的应用奠定了基础。目前，液态农用酵素对海南土壤的改良效果鲜有报道，且液态农用酵素不同组分对土壤的改良效果尚不清楚。因此，本研究旨在探究液态农用酵素及其不同组分（上清液、酵素菌液）对海南省原生和农田土壤的改良效果，以期为海南省土壤改良修复工作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验液态农用酵素的制作方法参考岛本农法[13]，

按照m(红糖)∶m(木麻黄树叶)∶m(水)=1∶3∶10进行发酵。试验土壤取样于海南省海口市(110°10′～110°41′E，19°32′～20°05′N)，分别采集0～20 cm土层的农田土壤(常年耕种用于农业生产的砖红壤)和原生土壤(未经过人为干预，自然形成并发育的砖红壤)。

1.2　试验设计

土壤培养前，将其风干并过2 mm筛。液态农用酵素不同组分的分离：液态农用酵素在12 000 r/min下离心15 min，收集上清液后，加入与上清液等体积的灭菌水与底部酵素菌混合均匀，得到酵素菌液。试验共设置4个处理：CK为灭菌水，T1为酵素上清液，T2为酵素菌液，T3为液态农用酵素。每个处理4个重复。2种风干过2 mm筛的土壤分别称取16份，每份200 g与60 g干燥的秸秆类有机质置于500 mL的培养瓶中，充分混合均匀，调节土壤含水量为田间持水量的60%(培养过程中用称重法补充水分)，于恒温培养箱中26 ℃条件下培养。试验共持续28 d，在第0、7、14、21、28天，按照不同处理分别取4 g土壤样品用于测定土壤酶活、pH及电导率，再分别加入20 mL处理液继续培养(第28天除外)，所有取样和添加处理液均在超净工作台中进行。第28天时，另取10 g土壤样品用于测定土壤微生物数量，剩余土壤样品用于测定土壤团聚体。

1.3　测定指标及方法

主要测定指标为：土壤脲酶、蔗糖酶、pH、电导率、微生物数量、团聚体、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)。土壤微生物数量的测定使用鲜土，其余指标的测定均使用风干土样。指标测定方法为：土壤脲酶采用苯酚钠比色法[14]；土壤蔗糖酶采用3,5二硝基水杨酸比色法[15]；土壤pH采用电位法(水土体积质量比2.5∶1)；土壤电导率使用电导率仪在水土体积质量比为5∶1下测定；土壤微生物数量的测定采用稀释平板法，细菌使用牛肉膏蛋白胨培养基，放线菌使用高氏一号培养基[16]，真菌使用孟加拉红培养基[17]；土壤团聚体的分离测定采用干筛法[18]，将风干土样置于孔径自上而下为2.00、1.00、0.30、0.15 mm套筛的最上层，手动上下振动2 min，30次/min；土壤团聚体平均质量直径(MWD)[19]和几何平均直径(GMD)[20]计算公式为：

$$\mathrm{MWD}=\sum_{i=1}^{n}X_iW_i$$

$$\mathrm{GMD}=exp\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}W_i\ln X_i}{\sum_{i=1}^{n}W_i}\right]$$

式中：W_i为第i粒径团聚体的质量占总团聚体的百分比，%；X_i为第i粒径团聚体的平均直径，mm；n为不同粒径团聚体的种类。

1.4　数据处理及统计分析

试验数据采用Microsoft Excel 2019软件进行整理，Data Processing System(DPS)软件进行差异显著性分析，Origin 2023软件进行绘图。

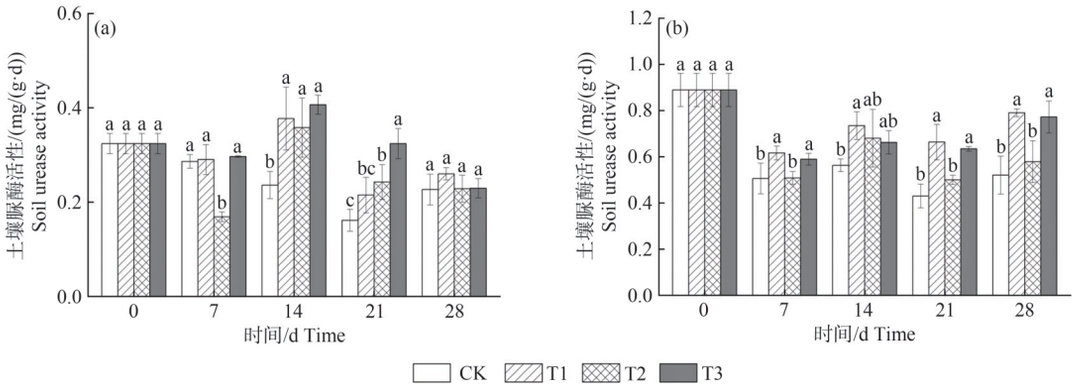
2　结果与分析

2.1　液态农用酵素及其不同组分对土壤脲酶和蔗糖酶活性的影响

由图1可知，与第0天相比，第14天T1、T2和T3处理的原生土壤脲酶活性增加，与CK相比分别显著增加了59.71%、51.65%和72.19%($P<0.05$)；但各处理下，农田土壤脲酶活性降低。由图2可知，T1和T3处理下，原生土壤蔗糖酶活性均高于第0天，呈现先升高后降低的趋势，均显著高于CK($P<0.05$)，其中第14天酶活性最高，与CK相比分别增加了501.67%和2 173.5%；农田土壤蔗糖酶活性均高于第0天(除第7天外)，呈现先升高后降低的趋势，且均显著高于CK($P<0.05$)(除第7天外)，其中第21天酶活性最高，与CK相比分别增加了896.5%和1 484.49%($P<0.05$)。综上，液态农用酵素及其上清液对原生和农田土壤蔗糖酶活性具有较好的改良效果。

2.2　液态农用酵素及其不同组分对土壤pH和电导率的影响

由图3可知，T1和T3处理下原生土壤的pH从6.75(第0天)分别增加至7.49和7.41(第28天)；T3处理下农田土壤的pH从6.8(第0天)增加至6.94(第28天)。由图4可知，T3处理下原生土壤电导率均高于第0天，呈现先升高后降低再升高的趋势，且均显著高于CK($P<0.05$)，其中第28天电导率最高，与CK相比增加了29.68%；与第0天相比，T1和T3处理下，第21天农田土壤电导率最高，与CK相比分别显著增加了8.83%和10.13%($P<0.05$)。综上，液态农用酵素及其上清液对原生土壤和农田土壤的pH和电导率具有较好的改良作用。



CK:灭菌水;T1:酵素上清液;T2:酵素菌液;T3:液态农用酵素。不同字母表示不同处理下差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。下同。

CK: Sterile water; T1: Supernatant of Jiaosu; T2: Microorganism solution of Jiaosu; T3: Liquid agricultural Jiaosu. Different letters represent different treatments significant differences ($P<0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P>0.05$). The same below.

图1 液态农用酵素及其不同组分处理的原生(a)和农田(b)土壤脲酶变化

Fig. 1 Changes in native (a) and arable (b) soils urease treated with liquid agricultural Jiaosu and its different components

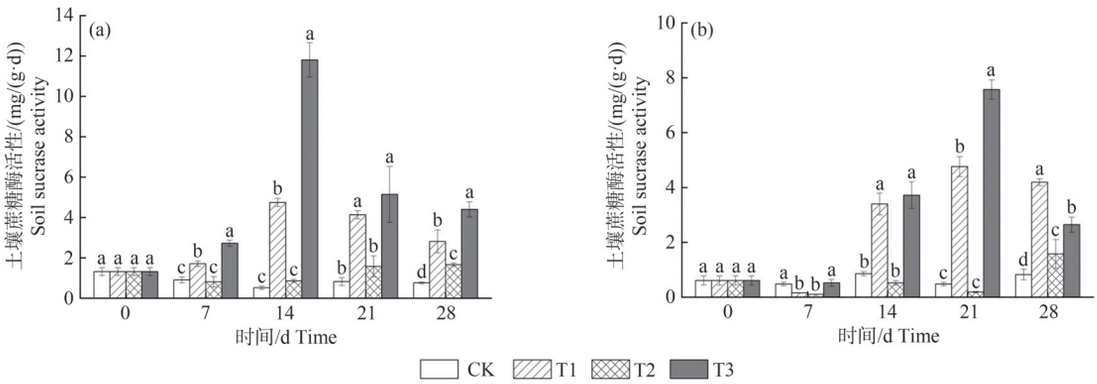


图2 液态农用酵素及其不同组分处理的原生(a)和农田(b)土壤蔗糖酶变化

Fig. 2 Changes in native (a) and arable (b) soils sucrase treated with liquid agricultural Jiaosu and its different components

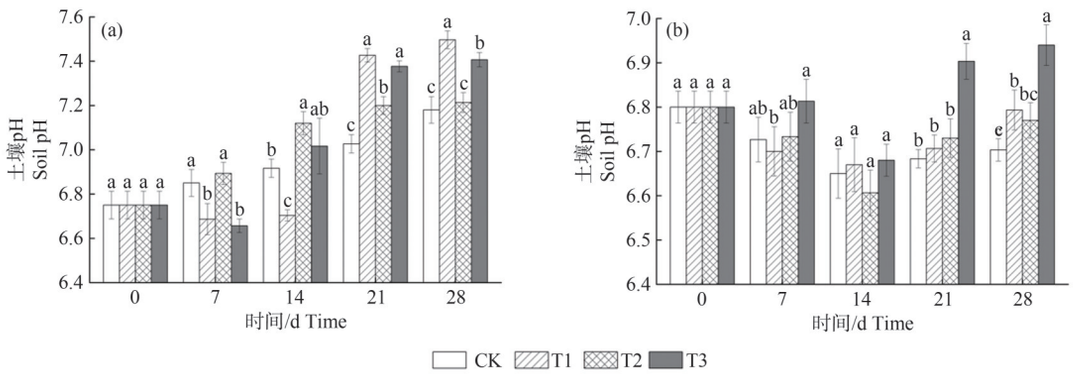


图3 液态农用酵素及其不同组分处理的原生(a)和农田(b)土壤pH变化

Fig. 3 Changes in native (a) and arable (b) soils pH treated with liquid agricultural Jiaosu and its different components

2.3 液态农用酵素及其不同组分对土壤微生物的影响

由图5可知,与CK相比,T2处理下原生土壤的放线菌和农田土壤的细菌数量分别显著增加了415.71%和1 137.84%($P<0.05$);T1处理下农田土壤的放线菌数量显著增加了81.69%($P<0.05$);

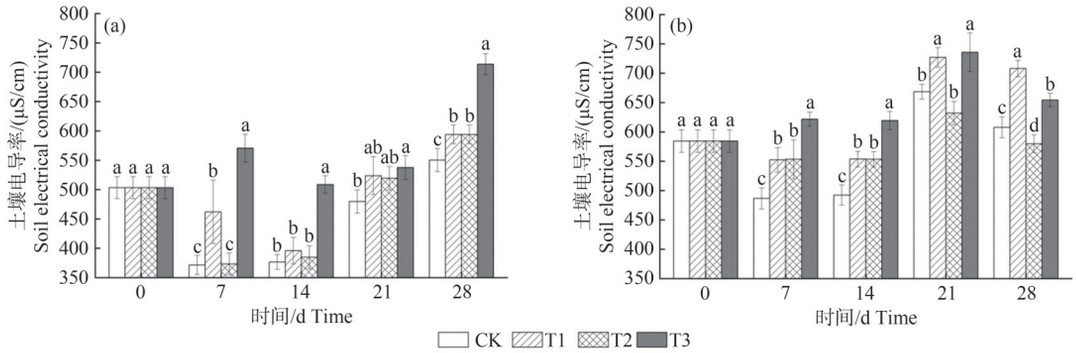


图 4　液态农用酵素及其不同组分处理的原生(a)和农田(b)土壤电导率变化

Fig. 4　Changes in native (a) and arable (b) soils electrical conductivity treated with liquid agricultural Jiaosu and its different components

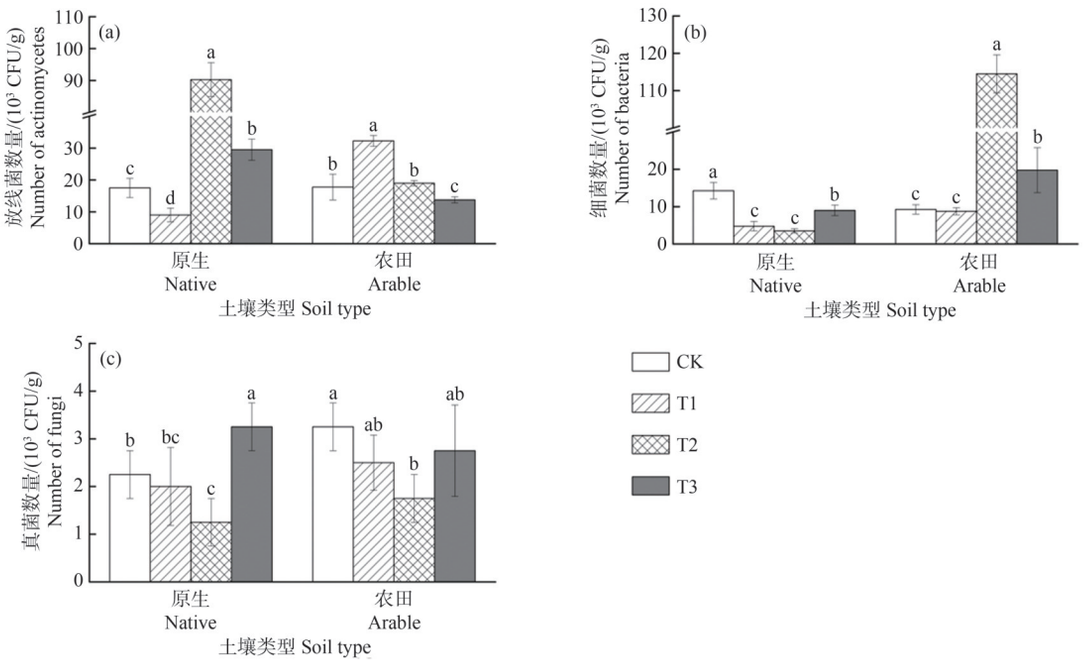


图 5　液态农用酵素及其不同组分对土壤放线菌(a)、细菌(b)及真菌(c)的影响

Fig. 5　Effects of liquid agricultural Jiaosu and its different components on actinomycetes (a)、bacteria (b) and fungus (c) in soils

T3处理下，原生土壤的放线菌和真菌数量分别显著增加了68.57%和44.44%($P<0.05$)，农田土壤的细菌数量也显著增加了113.51%($P<0.05$)。综上，液态农用酵素及其不同组分对原生和农田土壤的微生物具有一定的改良效果，且液态农用酵素不同组分对2种土壤的微生物影响不同。

2.4　液态农用酵素不同组分对土壤团聚体稳定性的影响

由图6可知，不同处理下原生和农田土壤团聚体主要集中在0.30～1.00 mm；与CK相比，T1、T2和T3处理下原生土壤>2.00 mm粒级团聚体分别显著增加了35.25%、39.80%和35.77%($P<0.05$)，T1和T2处理下原生土壤<0.15 mm粒级团聚体分别显著降低了18.69%和20.60%($P<0.05$)；与CK相比，T1处理下农田土壤0.30～1.00 mm粒级团聚体显著增加了77.65%($P<0.05$)，<0.15 mm和0.15～0.30 mm粒级团聚体分别显著降低了54.30%和46.52%($P<0.05$)。由图7可知，与CK相比，T1、T2和T3处理下原生土壤的GMD分别显著增加了20.58%、22.55%和13.25%($P<0.05$)；T1和T2处理下原生土壤MWD分别显著增加了16.46%和17.38%($P<0.05$)；T1处理下农田土壤GMD增加

了0.88%，但T1、T2和T3处理下农田土壤MWD显著降低（$P<0.05$）。综上，液态农用酵素及其上清液处理土壤能改变土壤团聚体结构，改善土壤团聚体的稳定性，且2种土壤团聚体结构变化不同。

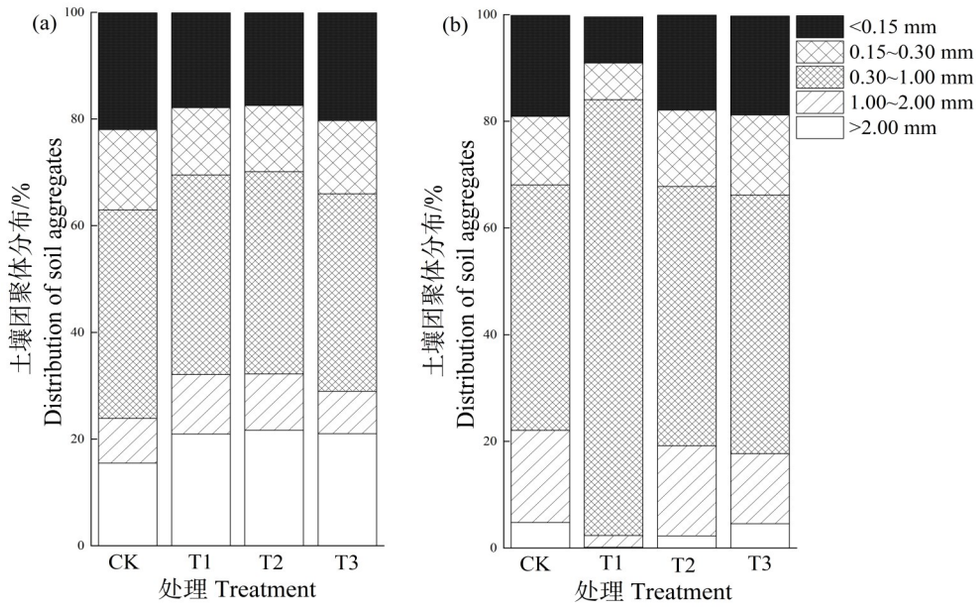


图6 液态农用酵素及其不同组分对原生(a)和农田(b)土壤团聚体的影响

Fig. 6 Effects of liquid agricultural Jiaosu and its different components on soil aggregates in native (a) and arable (b) soils

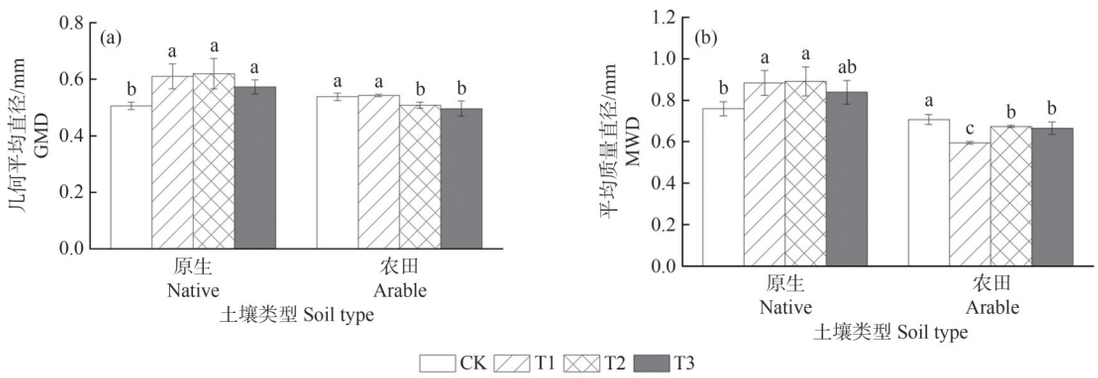


图7 液态农用酵素及其不同组分对土壤GMD(a)和MWD(b)的影响

Fig.7 Effects of liquid agricultural Jiaosu and its different components on soil GMD (a) and MWD (b)

2.5 液态农用酵素及其不同组分下的主成分分析

由图8可知，在原生土壤中，主成分1(PC1)的贡献率为45.2%，主成分2(PC2)的贡献率为26.2%，累计贡献率为71.4%；T1处理大部分处于PC1和PC2的正半轴，表明在原生土壤改良中，T1处理起主要作用。在农田土壤中，主成分1(PC1)的贡献率为46.9%，主成分2(PC2)的贡献率为27.0%，累计贡献率为73.9%；T1处理大部分处于PC1和PC2的正半轴，表明在农田土壤改良中，T1处理起主要作用。综上，液态农用酵素中的上清液在原生和农田土壤的改良中均起到重要作用，对土壤的改良效果较好。

2.6 不同效应指标的相关性分析

由图9可知，电导率与土壤蔗糖酶活性呈极显著正相关（$P<0.001$），与土壤脲酶活性、真菌数量呈显著正相关（$P<0.05$）；土壤脲酶活性与GMD、MWD、pH呈极显著负相关（$P<0.01$）；放线菌数量与GMD呈极显著正相关（$P<0.01$），与MWD呈显著正相关（$P<0.05$），与真菌数量呈显著负相关

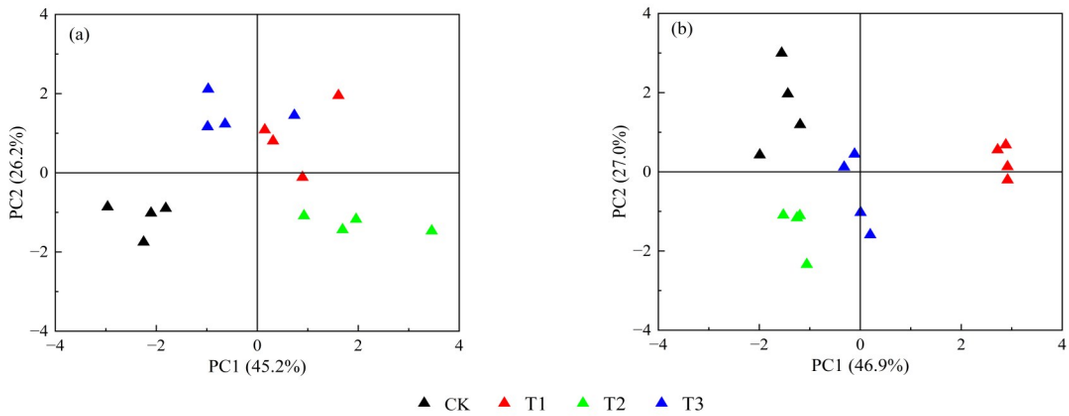
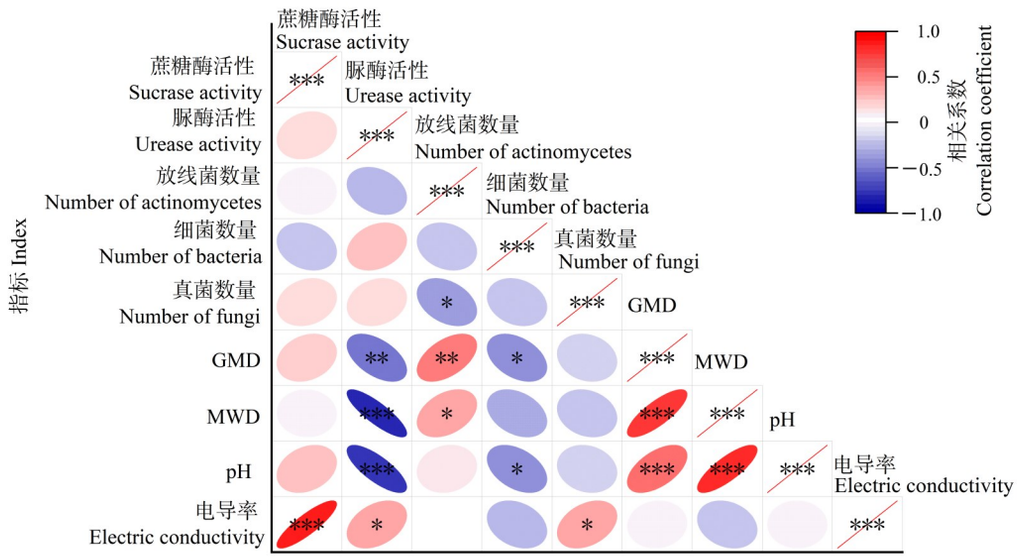


图 8　液态农用酵素及其不同组分处理的原生(a)和农田(b)土壤主成分分析

Fig. 8　Principal component analysis of native (a) and arable (b) soils treated with liquid agricultural Jiaosu and its different components



*表示在 0.05 水平上差异显著；**表示在 0.01 水平上差异显著；***表示在 0.001 水平上差异显著。

* means significant difference at 0.05 level; ** means significant difference at 0.01 level; *** means significant difference at 0.001 level.

图 9　不同效应指标的相关性分析

Fig. 9　Correlation analysis of different effect indicators

($P<0.05$)；细菌数量与 GMD、pH 呈显著负相关($P<0.05$)；GMD 与 MWD、pH 呈极显著正相关($P<0.001$)；MWD 与 pH 值呈极显著正相关($P<0.001$)。

3　讨　论

液态农用酵素中的有益微生物，可以改善土壤微生物环境，酵素在发酵过程中产生的有机酸和活性酶可改善土壤理化性质，增加土壤肥力[21]。本研究中，T1 处理下原生土壤和 T3 处理下农田土壤的 pH 分别从 6.75 和 6.8(第 0 天)增加至 7.49 和 6.94(第 28 天)；第 28 天，与 CK 相比，T3 处理下原生土壤电导率显著增加了 29.68%，这可能是因为液态农用酵素上清液中的有机酸对土壤的 pH 起到了一定的缓冲作用。张越等[22]研究表明，农用植物酵素富含有机质和有机酸等成分，具有一定酸碱缓冲能力，能够有效改善土壤的 pH；有机质还可与液态农用酵素中的多糖等物质共同调控土壤团粒结构及 pH 等理化性质，并通过调控微生物来增加土壤酶活性、平衡微生物丰度和组成。本研究中，与 CK 相

比，T3处理下，第14天原生土壤蔗糖酶活性显著增加了2 173.5%，第21天农田土壤蔗糖酶活性显著增加了1 484.49%。谢亚军等[23]研究表明，农用酵素可提高土壤酶活性，与本研究结果相符。范鹤龄等[24]研究表明，液态农用酵素对土壤微生物多样性具有一定的影响；赵峥等[25]研究表明，液态酵素能够显著影响土壤微生物。本研究中，与CK相比，T2处理下，原生土壤的放线菌数量和农田土壤的细菌数量分别显著增加了415.71%和1 137.84%，T1处理下农田土壤的放线菌数量显著增加了81.69%，T3处理下原生土壤的真菌数量显著增加了44.44%。这可能是液态农用酵素改善了微生物的生存环境，从而促进土壤微生物活性增加[26]。康利允等[7]研究表明，酵素液肥可显著增加土壤细菌、真菌、放线菌数量，这与本研究结果一致。综上，液态农用酵素能够显著增加土壤微生物数量，且液态农用酵素中酵素菌和上清液的作用效果因土壤类型而异。由于极端环境存在大量不可培养的微生物，因此，本研究利用传统的平板培养法培养微生物只能反应少数微生物的信息，所测结果存在较大误差[27]，后续可结合高通量测序技术，更客观的反应液态农用酵素对土壤微生物的影响。

不同粒级团聚体对于不同养分储存的总量和响应程度不同[28]，本研究中，养分含量不同的原生和农田土壤团聚体变化存在差异。与CK相比，原生土壤在T1、T2和T3处理下>2.00 mm粒径团聚体分别显著增加了35.25%、39.80%和35.77%。刘亚龙等[29]研究表明，多糖和微生物残体在土壤颗粒间胶结团聚过程中发挥重要的作用。因此，原生土壤>2.00 mm粒径团聚体增加，可能是因为原生土壤是未经人工干预、粘性较强的砖红壤，养分含量较低，液态用酵素及其上清液中的多糖、有机酸以及酵素菌分泌物等物质使原生土壤的粘性增强。本研究中，与CK相比，T1处理下农田土壤中0.30～1.00 mm粒级团聚体含量显著增加了77.65%。这可能是因为农田土壤长期用于农业生产，质地较为疏松且具有一定的养分，另外，在团聚体形成过程中，分解有机物料与团聚体粒径分布有着较大的关系[29]，因此，液态农用酵素上清液中的多糖类物质与农田土壤中的有机质共同作用降低了农田土壤粘性，增加了土壤养分含量，导致<0.15 mm和>2.00 mm粒级团聚体向0.30～1.00 mm转移。

本研究中，与CK相比，T1、T2和T3处理下原生土壤GMD分别显著增加了20.58%、22.55%和13.25%，T1和T2处理下，原生土壤MWD分别显著增加了16.46%和17.38%，说明液态农用酵素及其上清液和酵素菌液可增加原生土壤团聚体稳定性。Liu等[30]研究表明，蚯蚓堆肥和腐植酸肥料可增加土壤团聚体稳定性，这与本研究结果相似。相关性分析发现，放线菌与土壤GMD呈极显著正相关，与MWD呈显著正相关。因此，土壤团聚体粒径分布的改变可能与土壤微生物变化具有一定的联系。土壤pH与GMD、MWD呈极显著正相关；电导率与蔗糖酶活性呈极显著正相关，与脲酶活性、真菌数量呈显著正相关。因此，从本研究推测，液态农用酵素对土壤起到改良作用可能是通过增加土壤pH值和电导率，从而提高土壤酶活性，增加土壤微生物数量，改变土壤团聚体的粒径分布和土壤团聚体稳定性。

4 结 论

液态农用酵素能迅速激活土壤，改变土壤微生物群落结构和数量，增强土壤团聚体稳定性，调节土壤酶活性、pH和电导率，从而实现对原生和农田土壤的改良修复；液态农用酵素中的上清液对原生和农田土壤的改良起到重要作用。

参考文献 References

[1] 李长江，丛海涛，李青梅，李勇，张国平，陈为峰. 不同土壤调节剂对新增耕地土壤质量以及玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料，2023(9)：50-58
Li C J, Cong H T, Li Q M, Li Y, Zhang G P, Chen W F. Effects of different soil conditioner on soil quality and maize yield on new cultivated land[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(9): 50-58 (in Chinese)

[2] 决超，杨囡君，王盛荣. 化肥配施微生物菌肥及改良基质对土壤团聚体有机碳及微生物菌群结构的影响[J]. 江苏农业科学，2023，51(19)：237-244
Jue C, Yang N J, Wang S R. Effects of chemical fertilizer combined with microbial fertilizer and improved substrate on soil aggregate organic carbon and microbial community structure [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(19): 237-244 (in Chinese)

[3] 魏金海. 我国农田土壤质量存在的问题及提升建议[J]. 河南农业，2022(34)：18-19
Wei J H. Problems existing in farmland soil quality in China and suggestions for improvement[J]. *Agriculture of Henan*, 2022(34): 18-19 (in Chinese)

[4] 丁志峰，陈宇航，徐秋桐，章明奎. 组合调理剂对南方低丘新垦耕地肥力质量提升效果研究[J]. 江西农业大学学报，2023，45(4)：994-1005
Ding Z F, Chen Y H, Xu Q T, Zhang M K. Effect of combined conditioner

on improving fertility quality of newly cultivated land in southern low hills[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2023, 45(4): 994-1005 (in Chinese)

[5] 赵文瑞,张文娟,胡慧,宋钰洁,王海厚,杨莹莹,卞子怡,王聪,赵宽. 海鲜壳生物质炭对酸性土壤的改良效果与机制探究[J]. 土壤,2023,55(5):1080-1087
Zhao W R, Zhang W J, Hu H, Song Y J, Wang H H, Yang Y Y, Bian Z Y, Wang C, Zhao K. Improvement effects and mechanisms of seafood shell biochars on acidic soils[J]. *Soils*, 2023, 55(5): 1080-1087 (in Chinese)

[6] 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)

[7] 康利允,李晓慧,高宁宁,梁慎,常高正,李海伦,王慧颖,徐小利,赵卫星. 酵素液肥改良设施甜瓜连作土壤质量的效应[J]. 中国瓜菜,2021,34(11):63-67
Kang L Y, Li X H, Gao N N, Liang S, Chang G Z, Li H L, Wang H Y, Xu X L, Zhao W X. Effects of enzyme liquid fertilizer on soil quality in continuous cropping of muskmelon[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2021, 34(11): 63-67 (in Chinese)

[8] Varshini S V, Jayanthi C. Organic liquid manures and bio-fertilizers: A tool for soil and crop productivity[J]. *Agricultural Reviews*, 2020, 41(4): 387-392

[9] 范鹤龄,王浩晨,陈伟益,陆建明,孙雪冰,朱清,李长江,张荣萍. 酵素对热区土壤理化性状和作物生长的影响[J]. 中国农学通报,2021,37(22):76-83
Fan H L, Wang H C, Chen W Y, Lu J M, Sun X B, Zhu Q, Li C J, Zhang R P. Effects of jiaosu on soil physical and chemical properties and crop growth in tropical region [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(22): 76-83 (in Chinese)

[10] 蒋玉新,彭善章,徐瑞华. 开展酵素农法水稻种植的实践与思考[J]. 乡村科技,2021,12(24):84-86
Jiang Y X, Peng S Z, Xu R H. Practice and thinking on developing rice planting by jiaosu farming method [J]. *Rural Science and Technology*, 2021, 12(24): 84-86 (in Chinese)

[11] 文亚雄,谭石勇. 酵素菌技术及我国酵素菌肥料应用现状[J]. 湖南农业科学,2016(1):112-114
Wen Y X, Tan S Y. BYM technology and BYM fertilizer application status in China[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2016(1): 112-114 (in Chinese)

[12] 任卓然,古维娜,王茹颖,杨灵婧,刘克思. 环保酵素改良土壤系统的研究进展[J]. 湖南农业科学,2021(5):111-114
Ren Z R, Gu W N, Wang R Y, Yang L J, Liu K S. Research progress on improving soil system by garbage enzymes [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2021(5): 111-114 (in Chinese)

[13] 岛本邦彦. 岛本微生物农业应用法[M]. 郑重,编译. 名古屋:日本磐亚株式会社,1996
Komuhiko S. *Shimamoto Microbial Agriculture Application Method* [M]. Zheng Z, Translation and compilation. Nagoya: JapanPanya Kabuskiki Kaisha, 1996 (in Chinese)

[14] 潘语卓,邱泽龙,王伟虎,康健龙,万潮政,石蕊,陆艺引,肖世豪,鲁美娟,杨文亭. 黑麦草和苕子混合翻压还田对土壤酶活性和养分的短期影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(16):230-239
Pan Y Z, Qiu Z L, Wang W H, Kang J L, Wan C Z, Shi R, Lu Y Y, Xiao S H, Lu M J, Yang W T. Short-term effect of ryegrass and hairy vetch mixture returning to field on soil enzyme activity and nutrient [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(16): 230-239 (in Chinese)

[15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986
Guan S Y. *Soil Enzymes and Their Research Methods*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986 (in Chinese)

[16] 申佳丽,安明远,魏彦凤,张文文,游宏建,杨海波,马兰,曹云娥. 三种不同土壤改良剂对黄瓜根际微生物数量和群落代谢功能多样性的影响[J]. 微生物学通报,2022,49(5):1651-1663
Shen J L, An M Y, Wei Y F, Zhang W W, You H J, Yang H B, Ma L, Cao Y E. Effects of three different soil amendments on the number and metabolic function diversity of rhizospheric microorganisms of cucumber [J]. *Microbiology China*, 2022, 49(5): 1651-1663 (in Chinese)

[17] 林书震,李小龙,李红丽,詹义忠,芦阿虔,田艳华,王岩. 烟株生长过程中土壤微生物的变化特征[J]. 中国土壤与肥料,2019(5):14-24
Lin S Z, Li X L, Li H L, Zhan Y Z, Lu A Q, Tian Y H, Wang Y. The variation of characteristics of soil microorganism during the growth of tobacco plants[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(5): 14-24 (in Chinese)

[18] 郑凤君,王雪,李生平,刘晓彤,刘志平,卢晋晶,武雪萍,席吉龙,张建诚,李永山. 免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应[J]. 中国农业科学,2021,54(3):596-607
Zheng F J, Wang X, Li S P, Liu X T, Liu Z P, Lu J J, Wu X P, Xi J L, Zhang J C, Li Y S. Synergistic effects of soil moisture, aggregate stability and organic carbon distribution on wheat yield under no-tillage practice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(3): 596-607 (in Chinese)

[19] 冯文瀚,李金彪,周聪,蒋翔鹤,陈金林. 不同林龄鹅掌楸人工林土壤团聚体及其有机碳状况[J]. 中南林业科技大学学报,2021,41(2):133-141
Feng W H, Li J B, Zhou C, Jiang X H, Chen J L. Soil aggregates and organic carbon status of *Liriodendron chinense* plantation at different ages [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2021, 41(2): 133-141 (in Chinese)

[20] 邓伟明,唐梦天,郭玉栋,池哲伟,黄期,邝曦芝,蔡昆争,田纪辉. 生物炭与磷肥添加对红壤团聚体及其磷组分分布的影响[J]. 土壤通报,2023,54(2):352-363
Deng W M, Tang M T, Guo Y D, Chi Z W, Huang Q, Kuang X Z, Cai K Z, Tian J H. Effects of biochar and phosphorus application on red soil aggregates and their phosphorus components distribution [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(2): 352-363 (in Chinese)

[21] 刘庆松,叶璇,孙洪庆,马越,白东清. 环保酵素的生物活性及在农业生产中的应用[J]. 南方农业,2021,15(32):232-234
Liu Q S, Ye X, Sun H Q, Ma Y, Bai D Q. Biological activity of environmental enzymes and its application in agricultural production[J]. *South China Agriculture*, 2021, 15(32): 232-234 (in Chinese)

[22] 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)

[23] 谢亚军,陈晓萍,倪亮,孙新强,石伟勇. 基于辅酶Q10发酵液的有机液肥对小白菜生长和土壤酶活性的影响[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2011,37(5):545-550
Xie Y J, Chen X P, Ni L, Sun X Q, Shi W Y. Effects of organic liquid fertilizer made by coenzyme Q10 fermentation broth on pakchoi(*Brassica campestris*) growth and soil enzyme activities [J]. *Journal of Zhejiang University*: Agriculture and Life Sciences, 2011, 37(5): 545-550 (in Chinese)

[24] 范鹤龄,朱清,孙雪冰,张丽,李长江,陈萍,黄小龙,张荣萍. 不同农用酵素

的微生物多样性和群落结构[J]. 中国农业科技导报,2022,24(11):179-189
Fan H L, Zhu Q, Sun X B, Zhang L, Li C J, Chen P, Huang X L, Zhang R P. Microbial diversity and community structure of different agricultural jiaosu [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(11):179-189 (in Chinese)

[25] 赵峥,褚长彬,周德平,王庆峰,吴淑杭. 葡萄废果酵素肥对葡萄园土壤细菌多样性的影响[J]. 果树学报,2020,37(8):1207-1217
Zhao Z, Chu C B, Zhou D P, Wang Q F, Wu S H. Effects of ferment fertilizer from waste grape berry on soil bacterial diversity in vineyards [J]. *Journal of Fruit Science*, 2020, 37(8):1207-1217 (in Chinese)

[26] 韩剑宏,刘泽霞,张连科,李玉梅,姜庆宏,王维大. 生物炭和环保酵素对盐碱化土壤特性的影响[J]. 生态环境学报,2019,28(5):1029-1036
Han J H, Liu Z X, Zhang L K, Li Y M, Jiang Q H, Wang W D. Effects of biochar and environmental enzymes on the characteristics of salinized soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(5):1029-1036 (in Chinese)

[27] 蔡晨秋,唐丽,龙春林. 土壤微生物多样性及其研究方法综述[J]. 安徽农业科学,2011,39(28): 17274-17276,17278
Cai C Q, Tang L, Long C L. Soil microbial diversity and its research methods [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(28): 17274-17276, 17278 (in Chinese)

[28] 冯浩亮,韩晓增,陆欣春,陈旭,严君,邹文秀. 有机培肥影响土壤团聚体形成与稳定的研究进展[J]. 土壤与作物,2023,12(4):393-400
Feng H L, Han X Z, Lu X C, Chen X, Yan J, Zou W X. Research progress on the formation and stability of soil aggregates by organic fertilization [J]. *Soils and Crops*, 2023, 12(4):393-400 (in Chinese)

[29] 刘亚龙,王萍,汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制:研究进展与展望[J]. 土壤学报,2023,60(3):627-643
Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3):627-643 (in Chinese)

[30] Liu M L, Wang C, Liu X L, Lu Y C, Wang Y F. Saline-alkali soil applied with vermicompost and humic acid fertilizer improved macroaggregate microstructure to enhance salt leaching and inhibit nitrogen losses [J]. *Applied Soil Ecology*, [2023-11-20]. DOI: 10.1016/j.apsoil.2020.103705

责任编辑:申青苗

第一作者简介: 符明清,硕士研究生。现就读于海南大学作物学专业,主要研究方向为热带作物绿色高产高效栽培与耕作。曾获得国家励志奖学金、海南大学研究生一等学业奖学金等。以第三作者发表SCI收录论文1篇。

通讯作者简介: 张荣萍,博士,海南大学热带农林学院副教授、硕士生导师,海南省拔尖人才。主要从事热带作物绿色高产高效栽培与耕作、土壤改良、生物防治等方面的教学和研究。多年来主持和参与多项国家级、省部级自然科学和教育教学研究项目,在重要学术期刊发表论文40余篇,申请专利3项,参编教材或专著5部。近5年主持和参加国家基金项目2项、海南省自然基金项目2项,作为通讯作者发表学术论文10余篇,其中SCI收录2篇。