

杨 华, 陈莎莎, 冯哲叶, 等. 土壤微生物与有机物料对盐碱土团聚体形成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 2080–2085.

YANG Hua, CHEN Sha-sha, FENG Zhe-ye, et al. Combined effects of soil microbes and organic matter on aggregate formation in saline-alkali soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10): 2080–2085.

土壤微生物与有机物料对盐碱土团聚体形成的影响

杨 华, 陈莎莎, 冯哲叶, 邓照亮, 李 真, 王世梅*

(南京农业大学资源与环境科学学院/江苏省固体有机废弃物资源化高技术重点实验室, 南京 210095)

摘 要: 为了研究不同来源的微生物群落和不同类型的有机物料对盐碱土团聚体形成的影响, 采用土培实验, 接种不同来源的微生物群落(青海盐碱土或黄棕壤制备土壤悬液)到盐碱土中, 并添加腐熟的有机肥或半腐熟的有机物料(玉米秸秆和牛粪)。土样在常温下培养 45、90 d 后, 测定土壤相关指标。结果表明, 各处理之间, 在 pH 值下降、土壤团聚体形成及微生物数量等方面, 接种土著微生物及添加半腐熟有机物料处理(SS+MS-CD)的效果最好。该处理土壤 pH 值下降幅度最明显, 与对照相比降低了 0.6 个单位, 且土壤团聚体形成效果优于其他处理, 形成了 0.62% 的大团聚体(>2 mm), 而其他处理均未形成>2 mm 的大团聚体, 并增加了小团聚体(2~0.25 mm)的形成比例。该处理亦显著提高了土壤酶活性及土壤呼吸强度。实验结果为制备盐碱土改良措施提供了理论参考。

关键词: 青海盐碱土; 改良; 土壤团聚体; 土壤微生物; 有机物料

中图分类号: S152 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)10-2080-06 doi:10.11654/jaes.2017-0379

Combined effects of soil microbes and organic matter on aggregate formation in saline-alkali soil

YANG Hua, CHEN Sha-sha, FENG Zhe-ye, DENG Zhao-liang, LI Zhen, WANG Shi-mei*

(College of Resources and Environmental Sciences/Key Laboratory for Organic Solid Waste Utilization of Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Saline-alkali soil is widely distributed in China. The saline-alkali properties of this soil are the primary factors affecting agricultural management. Promoting the formation of soil macro-aggregates is a key step for the improvement of saline-alkali soil. In this study, experiments were conducted to investigate the effects of adding various microbial communities and multiple types of organic matter on formation of soil aggregates in saline-alkali soil. The microbial communities were prepared in soil suspension of saline-alkali and yellow brown soil. In addition, decomposed organic or semi-decomposed organic matter were provided by inoculating maize straw and cow dung. Soil samples were cultured at room temperature for 45 or 90 days. The results showed that treatment with indigenous microorganisms plus semi-decomposed organic matter(SS+MS-CD) resulted in the greatest improvement in aggregate formation among all treatments. For example, aggregates of more than 2 mm were increased to 0.62%, whereas no aggregates of more than 2 mm formed in the other treatments. Additionally, the contents of 0.25~2 mm aggregates increased to 14.3%~23.9% from 0.5% of CK. Moreover, the pH value decreased around 0.6 pH units, and the population of microorganisms was significantly elevated. Furthermore, the treatment significantly improved the soil enzyme activities and soil respiration intensities. These findings provide insights into the promising applications of saline-alkali soil in agriculture.

Keywords: saline-alkali soil in Qinghai; improvement; soil aggregates; soil microorganism; organic matter

盐碱土又称盐渍土, 包括盐土、碱土及各种盐化和碱化土壤, 多分布于我国华北、东北与西北内陆的干旱、半干旱地区以及少数滨海地区。我国盐碱地分布面积大、范围广, 土地利用率低是制约当地农业和

经济社会可持续发展的重要因素之一^[1]。目前, 盐碱土改良利用主要采用农业、水利工程、物理、化学与生物措施等, 多年的研究证实, 以生物措施最为有效且可治本^[2]。生物措施首先是种植耐盐植物, 近来研究表

收稿日期: 2017-03-16 录用日期: 2017-06-21

作者简介: 杨 华(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤微生物与土壤修复研究。E-mail: 2014103042@njau.edu.cn

* 通信作者: 王世梅 E-mail: smwang@njau.edu.cn

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB150504); 国家自然科学基金项目(41671256)

Project supported: The National Basic Research Program of China(2015CB150504); The National Natural Science Foundation of China(41671256)

明,耐盐植物可以降低盐碱土的含盐量、pH 值及 ESP, 增加土壤有机质和养分。Qadir 等通过种植苜蓿改良人工配制的盐碱土^[3],我国推广的耐盐植物有碱蓬、新疆杨、柽柳、苇状羊茅、油葵等^[4-5],同时施加有机物料及改碱肥料^[6]。我国在试验工作中也肯定了石膏改良碱化土的作用^[7],以及添加微生物菌剂等^[8-9]一系列措施。早期工作者研究微生物增加植物耐盐性,如 Abdala 等^[10]通过施用麦秆并接种分解纤维素的真菌,能增强生长在盐环境中豆科植物的固氮能力,增强其耐盐性。目前微生物和有机肥结合的方法在改良盐碱土时广泛使用。

土壤团聚体是指土壤粒径大小不同、颗粒形态不一、有着良好孔隙度的土壤团粒结构,一般认为大团聚体所占比例高是土壤肥沃的标志之一。盐碱土具有有机质含量低、微生物活性差、含盐多、pH 值高、易板结等特点,因而增加有机质含量、提高微生物活性、促进团聚体形成是盐碱土改良的重要步骤。在自然条件下,土壤中的盐碱成分难以转移,通过一定的农艺措施抑制盐碱成分向上运移,促进团聚体形成,是改良盐碱土的重要途径,而土壤有机质和微生物活性又是影响土壤团聚体形成的主要因素^[11]。国内农业科技工作者对如何改良盐碱土团聚体做了大量的工作,如:严慧峻等^[12]研究施用微生物复混肥可提高山东陵县潮土类轻度盐化盐碱土微生物生物量、土壤容重,减少土壤盐分及提高白菜的品质;宋玉珍^[13]研究利用微生物菌肥促进土壤团聚体形成,改善松嫩平原盐碱地土壤结构;孙宇婷等^[14]研究发现施腐熟的牛粪可以显著增加草甸碱土>0.25 mm 水稳性团聚体和有机质含量,碱土得到明显改善。但是目前对于青海种植枸杞地盐碱土的改良鲜有报道,本实验旨在通过土培试验研究不同来源的微生物群落与有机肥处理对青海盐碱土团聚体形成及酶活性的影响,为青海盐碱土改良及农业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

青海柴达木盐碱土(Saline-alkali soil, SS; 36°26' 36.1"N, 95°14'1.1"E; 海拔 2782 m): 去除表层 20 cm 盐壳层,取 20~45 cm 土层,周边植被有黑枸杞、罗布麻、芦苇等,于 2015 年 9 月 15 日采集。土壤理化性质:有机质 9.17 g·kg⁻¹,全 N 0.84 g·kg⁻¹,全 P 2.23 g·kg⁻¹,全 K 24.8 g·kg⁻¹,有效 P 0.23 g·kg⁻¹,有效 K 0.36 g·kg⁻¹,pH 8.9,电导率 3.50 mS·cm⁻¹。土壤风干磨碎过

0.25 mm 筛,备用。

南京傅家边草莓园黄棕壤(Yellow brown soil, YBS):去除表面杂质,取 5~20 cm 土层。土壤理化性质:有机质 13.96 g·kg⁻¹,全 N 0.79 g·kg⁻¹,全 P 2.3 g·kg⁻¹,全 K 22.9 g·kg⁻¹,有效 P 0.19 g·kg⁻¹,有效 K 0.25 g·kg⁻¹,pH 6.5,电导率 0.7 mS·cm⁻¹。

1.2 供试有机物料

玉米秸秆(Maize straw, MS):有机质 864.3 g·kg⁻¹,全 N 18.5 g·kg⁻¹,全 P 2.3 g·kg⁻¹,全 K 24 g·kg⁻¹。牛粪(Cow dung, CD):有机质 159 g·kg⁻¹,全 N 12.8 g·kg⁻¹,全 P 21.9 g·kg⁻¹,全 K 12.5 g·kg⁻¹。腐熟有机肥(Organic fertilizer, OF):有机质 442 g·kg⁻¹,全 N 44 g·kg⁻¹,全 P 23 g·kg⁻¹,全 K 12.8 g·kg⁻¹。腐熟有机肥购于江苏江阴联业生物科技有限公司。两者均风干磨碎过 0.25 mm 筛,备用。

1.3 土壤悬液制备

将采集的青海盐碱土及南京傅家边黄棕壤,分别取 1 kg 土样过 2 mm 筛,水土比为 1:1 进行浸泡,每隔 0.5 h 用玻璃棒搅拌 1 次,浸泡 2 h 并静置后,取上层土壤悬液。将收集好的土壤悬液(主要是利用其中的微生物做接种剂)放入三角瓶,备用。外源微生物标记为 YBS,土著微生物标记为 SS。

1.4 实验设计及土培试验

将风干磨碎过 0.25 mm 筛的盐碱土(1 kg)装入容积为 1300 mL 组培瓶中。组培瓶底部垫 1 cm 厚石英砂,盐碱土与石英砂之间用纱网隔离,盖好瓶盖,包扎好,送至江苏喜悦辐照科技有限公司溧水原子能辐射中心进行⁶⁰Co 照射灭菌。将有机物料玉米秸秆粉(MS)、牛粪(CD)、腐熟有机肥(OF)风干,磨碎,过 0.25 mm 筛,均在 121 °C 灭菌 30 min,备用。按接种土壤悬浮液及施加有机物料不同,设置 7 个处理:盐碱土(CK);盐碱土+外源微生物(YBS);盐碱土+土著微生物(SS);盐碱土+3%有机肥(OF);盐碱土+外源微生物+3%有机肥(YBS+OF);盐碱土+土著微生物+3%有机肥(SS+OF);盐碱土+土著微生物+3%半腐熟有机肥(MS:CD=2:1)(SS+MS-CD)。每个处理 3 次重复。

按实验设计,在无菌条件下将有机物料及土壤悬液分别接入土样,已测定盐碱土的最大持水率为 18%,接入该土壤最大持水率 60%的土壤悬液^[15],其余处理补接无菌水,室温培养。培养周期分别为 45 d 和 90 d,取距离表层 2~7 cm 土样,测定土壤 pH 值和 EC 值,并用稀释涂布法测定其中细菌、放线菌、真菌数量。培养 90 d 后,采用 LI-8100 CO₂ 测定仪对每个

处理进行土壤呼吸强度(CO_2)的测定,每个样品每次测定 3 min;不同处理的土壤蔗糖酶(S-SC)及土壤脲酶(S-UE)活性采用酶试剂盒法测定,试剂盒购自苏州科铭生物技术有限公司;同时采用湿筛法筛分土壤团聚体,测定不同粒径土壤团聚体组成^[16]。土壤筛分为:大团聚体(>2 mm)、小团聚体(2~0.25 mm)、微团聚体(0.25~0.053 mm)、黏砂粒(<0.053 mm)4个粒径。

1.5 数据处理与统计

用 SPSS18.0、Excel2007 软件对数据进行统计分析,以 Duncan 单因素方差分析法进行差异显著性分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

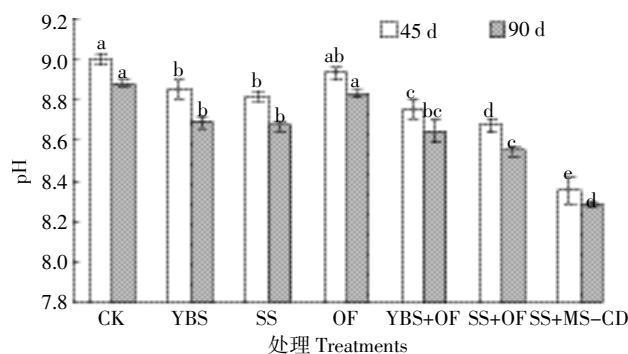
2.1 接种土壤微生物及施加有机物料对盐碱土 pH 值和 EC 值的影响

不同处理对盐碱土 pH 值的影响见图 1。接种土壤微生物和施加有机物料的各处理与 CK 相比,土壤的 pH 值均呈下降趋势,各处理中,土培时间 90 d 的土样 pH 值均低于培养 45 d 的土样,但 pH 值降低幅度不大。接种外源微生物(YBS)和土著微生物(SS)二者之间差异性不显著,而接种土壤微生物+有机物料处理(YBS+OF,SS+OF)效果明显好于仅接种微生物(YBS,SS)处理。接种土著微生物+有机肥(SS+OF)的处理 pH 值下降效果优于接种外源微生物+有机肥(YBS+OF)的处理,而施加半腐熟有机肥的处理(SS+MS-CD)效果又优于施加有机肥(SS+OF)的处理,其相较 CK 的 pH 值下降超过 0.6。这说明接种微生物及施加有机物料可以降低土壤 pH 值,改良盐碱土,尤其添加未腐熟的有机物料,效果更好。

不同处理对盐碱土 EC 变化的影响见图 2。随着培养时间增加,各处理 EC 值均有下降,尤其是接种土著微生物+半腐熟有机肥(SS+MS-CD)处理与 CK 相比,下降最为显著。添加腐熟有机肥处理(OF, YBS+OF, SS+OF)的 EC 值高于未添加和添加半腐熟有机肥处理,可能与腐熟有机肥的盐分有关。

2.2 接种土壤微生物及施加有机物料对盐碱土团聚体形成的影响

不同处理土样培养 90 d 后筛分土壤团聚体,结果见图 3。只添加有机肥(OF)处理与 CK 之间差异不明显,而接种土壤微生物及添加有机物料各处理与 CK 相比显著降低了黏砂粒(<0.053 mm)的比例,增加了小团聚体(2~0.25 mm)的形成,CK 的小团聚体的含量为 0.5%,各处理(YBS, SS, YBS+OF, SS+OF, SS+



不同小写字母表示同一时间不同处理的差异显著($P<0.05$)。下同
Different smalls letters mean significant difference among different treatments in the same times at 5% level. The same below

图1 接种土壤微生物及施加有机物料盐碱土 pH 值的变化
Figure 1 The pH value variation of saline-alkali soil with soil microorganisms and organic matters application

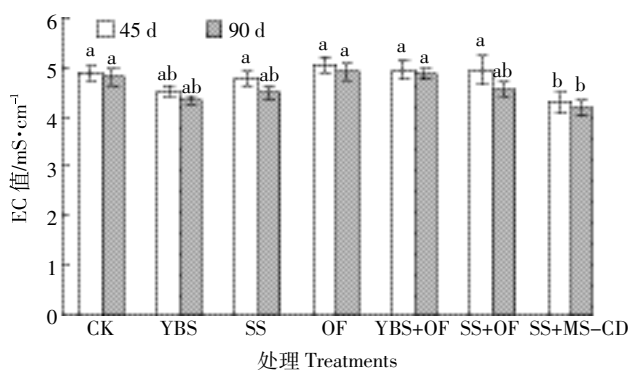
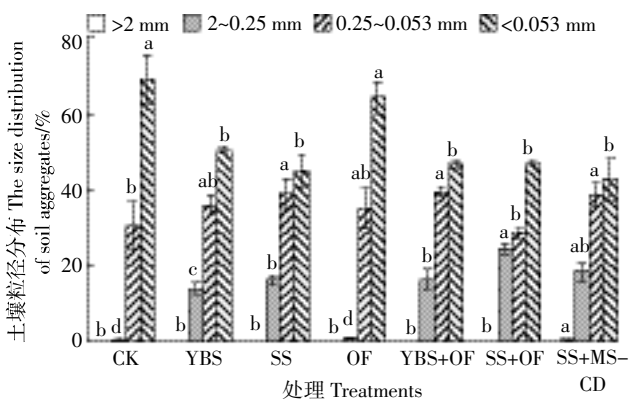


图2 接种土壤微生物及施加有机物料盐碱土 EC 值的变化
Figure 2 The EC variation of saline-alkali soil with soil microorganisms and organic matters application

MS-CD)小团聚体的含量分别提高到14.3%、15.7%、15.1%、23.9%、17.9%,且添加有机肥处理(SS+OF)的小团聚体比例增加最多。只有接种土著微生物及半腐熟有机肥处理(SS+MS-CD)形成了>2 mm的大团聚体,其所占比例为0.62%。由此可见,土壤微生物与有机肥尤其半腐熟有机肥共同作用,促进了团聚体的形成,尤其是显著促进了大团聚体的形成,CK和OF的处理微团聚体比例非常高,0.25~0.053 mm和<0.053 mm团聚体之和接近100%,可见即使添加了有机肥,缺少土壤微生物的作用,大团聚体难以形成。

2.3 接种土壤微生物及施加有机物料盐碱土中微生物数量变化

各处理土样培养 90 d,实验中没有计数出真菌,仅计数出细菌及少量的放线菌(表1)。培养 90 d 时,单一接种微生物的 2 个处理(YBS, SS)细菌数量为 $1 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$,添加有机肥又接种微生物的处理(YBS+OF, SS+OF),其微生物数量高于单一接种微生物(YBS, SS)处理。土样中接种外源微生物(YBS)的微生物数



不同小写字母表示同一粒径不同处理的差异显著($P<0.05$)
Different smalls letters mean significant difference among different treatments in the same aggregates at 5% level

图 3 接种土壤微生物及施加有机物料土壤团聚体粒径分布
Figure 3 The particle size distribution of soil aggregates with soil microorganisms and organic matters application

量略高于接种土著微生物处理(SS)的微生物数量,说明黄棕壤中的微生物多样性丰富^[17],有一些种群能适应盐碱土的环境而生存,虽然 2 种处理(YBS、SS)土壤中微生物数量差异显著,但是数量均较低。但接种微生物又添加有机肥的处理之间有明显差异,接种土著微生物(SS+OF)比接种外源微生物(YBS+OF)细菌数量高一个数量级,放线菌数量也有差异,说明盐碱土中的土著微生物比外源微生物能更好地适应盐碱环境而存活下来。添加半腐熟物料处理(SS+MS-CD)的细菌数量高于腐熟有机肥处理(SS+OF),可能与肥料特性相关,新鲜肥料更易被微生物分解。培养 90 d 后,添加有机物料的处理(SS+OF,SS+MS-CD)的细菌数量达到 10^6 cfu·g⁻¹,放线菌达到 10^2 cfu·g⁻¹。

从图 1、图 3 及表 1 可知,细菌数量和水稳性大团聚体在 3 种有机物的接种处理(YBS+OF,SS+OF,SS+MS-CD)中均高于仅接种土壤微生物(SS,YBS)处理及只添加有机肥处理(OF)和 CK,且这 3 种处理的土壤 pH 值也均低于 SS、YBS、OF 和 CK 处理。主要是因为土壤团聚体结构-土壤有机质组分-微生物群落之间存在耦合作用,盐碱土本身有机质含量少,pH 值高,真菌不易存活,且一般细菌亦难以定殖。添加外源有机物,土壤微生物在分解有机物的过程中可产生各种有机酸,使土壤中阴离子溶解度增加,有利于脱盐,土壤条件得到改善,pH 值下降,细菌大量生长,据此可解释为什么添加有机物料处理的土壤细菌数量和大团聚体数量高于 CK,pH 值小于 CK。

2.4 不同处理对土壤酶活性的影响

不同处理土样培养 90 d 后,测定与碳氮循环相

表 1 不同处理条件下盐碱土壤中微生物数量变化
Table 1 The numbers of microorganism in saline-alkali soil with the different treatments

处理 Treatments	细菌 Bacteria/ ×10 ⁴ cfu·g ⁻¹	放线菌 Actinomycete/cfu·g ⁻¹	真菌 Fungi
CK	0.008±0.001e	0±0e	—
YBS	9.8±1.21c	175±4.52c	—
SS	1.67±0.87d	80±2.08d	—
OF	0.01±0.002e	0±0e	—
YBS+OF	16.7±0.87b	180±3.35b	—
SS+OF	112±2.89a	350±2.02b	—
SS+MS-CD	231±5.02a	480±3.55a	—

注:不同小写字母表示不同处理的差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different smalls letters mean significant difference among different treatments at 5% level. The same below.

关的土壤酶活性,结果见表 2。从土壤酶对不同处理措施的响应来看,蔗糖酶敏感性较低,脲酶则表现出较高的敏感性。添加有机肥(OF)以及单一接种土壤微生物(SS,YBS)的处理与 CK 差异不显著,接种土壤微生物及添加有机肥及半腐熟有机肥处理(YBS+OF,SS+OF,SS+MS-CD)的土壤蔗糖酶活性高于其他 3 个处理。各处理的土壤脲酶活性均高于 CK,添加有机肥(OF)与 CK 脲酶活性无差异,接种 2 种土壤微生物处理(YBS,SS)的脲酶活性与对照相比差异显著,均是 CK 的 1.5 倍左右,而接种土壤微生物及添加有机肥及半腐熟有机肥处理(YBS+OF,SS+OF,SS+MS-CD)的土壤脲酶活性则比 CK 分别提高了 124.5%、138.4%和 278.5%。

2.5 不同处理对土壤呼吸强度的影响

各处理的呼吸强度(CO₂ 浓度值)与 CK 相比,除 OF 处理外显著增加(图 4)。YBS,SS,YBS+OF,SS+OF,SS+MS-CD 各处理的土壤 CO₂ 浓度较 CK 分别提高 28.6%、24.2%、35.7%、37.8%、40.6%,呼吸强度的强弱次序是 SS+MS-CD>SS+OF>YBS+OF>YBS>SS。表 1、

表 2 不同处理对土壤蔗糖酶和脲酶活性的影响
Table 2 The effects on the activities of soil invertase and urease with the different treatments

处理 Treatments	蔗糖酶 Invertase/ mg·g ⁻¹ ·24 h ⁻¹	脲酶 Urease/ μg·g ⁻¹ ·24 h ⁻¹
CK	2.61±0.09b	72.01±4.22d
YBS	2.64±0.03b	112.04±8.73c
SS	2.78±0.09b	121.96±7.40c
OF	2.69±0.09b	83.01±3.11d
YBS+OF	2.87±0.21ab	161.65±13.21b
SS+OF	2.89±0.22ab	171.65±3.09b
SS+MS-CD	3.10±0.17a	272.55±39.68a

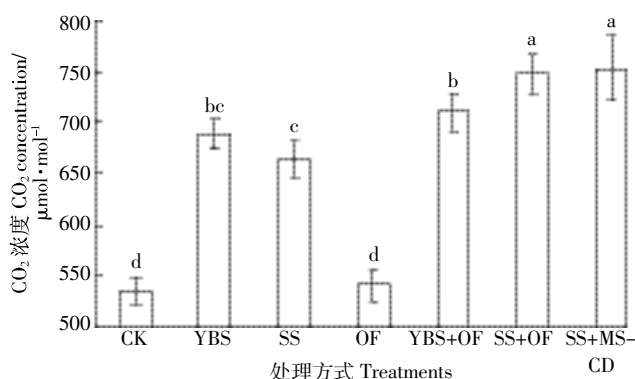


图4 不同处理对土壤呼吸强度的影响

Figure 4 The variation of soil respiration with the different treatments

图4结果说明土壤的呼吸活动和微生物数量密切相关,微生物数量越多,土壤呼吸越强烈,土壤排放的CO₂浓度就越高,反之亦然。

3 讨论

为比较不同来源的土壤微生物群落对盐碱土团粒结构形成的影响,本实验设置了2种土壤悬液(土壤微生物类群)处理:一是青海盐碱土,其微生物数量少,且群落结构简单,前期计数发现该盐碱土中细菌数量仅有 $10^2 \sim 10^3$ 个·g⁻¹;二是南京黄棕壤,微生物数量多,且微生物群落多样性丰富^[17],前期计数该土壤细菌数量为 $10^8 \sim 10^9$ 个·g⁻¹,且放线菌、真菌数量为 $10^4 \sim 10^5$ 个·g⁻¹。从图1、图3及表1可见,仅接种不同的土壤微生物群落处理,土壤pH值虽有所下降,但降幅较小,仅为0.2个单位,且2种土壤悬液处理对土壤大团聚体形成及土壤蔗糖酶及脲酶活性的影响,差异均不显著,2种土壤悬液接种的土壤均未检出真菌群落,说明较高的pH值(>8.3)环境不适合真菌生长。

CK虽然用无菌水保持土壤含水量,但仍然检出了少量细菌及酶活,可能是培养周期长及补水过程中空气中微生物降落所致。SS+OF及YBS+OF处理中均检出少量放线菌,SS+OF处理中的数量略高于YBS+OF,放线菌主要是丝状微生物,文献报道丝状菌更有利于大团聚体的形成^[18],此结果与YBS+OF处理较SS+OF处理大团聚体比例略高相对应。文倩等^[19]研究表明细菌及代谢产物如胞外多糖等其他有机化合物对土壤粘粒起胶结作用,在形成小团聚体方面起主要作用,曹良元^[20]亦发现微生物主要靠丝状菌将土壤颗粒彼此机械地缠绕在一起而形成大团聚体。本实验结果说明,环境条件是微生物存活及生长的主要因素,黄棕壤中虽然含有丰富的微生物,但其生存环境不

同,大部分微生物难以适应盐碱环境,即使加入有机肥,其效果也没有添加有机肥接种土著微生物的处理效果好。因此,改良盐碱土最好是从耐盐碱的环境中筛选功能微生物再回接土壤。

盐碱土有机质含量少,肥力低,实验结果表明,将土壤微生物与有机肥加入土壤的效果较单一接种土壤微生物处理的效果好。前人研究亦表明^[21],通过有机质培肥自然土壤,可以改善土壤结构,促进土壤团聚体的形成,提高土壤酶活性。汪景宽等^[22]研究不同肥力棕壤及团聚体中酶活性发现高肥力酶活性显著高于低肥力棕壤相应的酶活性。这与本实验结果基本一致。实验发现,施加有机肥接种不同微生物的处理在促进大团聚体形成(>0.25 mm)和提高土壤酶活性方面,高于其他处理。因为有机物料是微生物在盐碱土中代谢的物质基础,微生物分解有机质,降低pH值,从而进行定殖。随着微生物数量增加,土壤酶活性和呼吸强度均得到提高。Aoyama等^[23]研究施入无机肥料和有机质对土壤团聚体中有机无机复合体的影响,发现牛圈粪有利于大团聚体的形成,说明土壤团粒形成离不开有机物料。有研究表明当新鲜有机残渣进入土壤后,它们即成为微生物活动的场所和团聚体的核心^[24]。因为腐熟后的有机肥矿化度高,故腐熟有机肥对盐碱土的改良作用,不如经微生物实时分解的有机秸秆和牛粪的作用显著,而秸秆的分解过程正是微生物大量形成的时期,投入到土壤中半腐熟肥料更加利于土壤中微生物的生长,同时土壤团聚体的稳定性还与有机质的性质有关,新鲜的易被微生物直接分解利用的有机质对团聚体的形成更有利。

4 结论

(1)添加半腐熟有机肥和接种土著微生物处理的pH值和EC值下降效果优于其他处理,说明施用半腐熟有机肥和接种土著微生物有效降低pH值和EC值。

(2)添加有机肥和接种微生物处理的定殖微生物数量增长最快,从而促进>0.25 mm团聚体的形成,团聚体形成同时提高了微生物酶活性和呼吸强度。

(3)接种外源微生物与土著微生物相比,接种土著微生物的大团聚体形成比例高于外源微生物处理;从肥料来看,添加半腐熟处理大团聚体比例略高于腐熟有机肥处理。说明耐盐碱的土著微生物与半腐熟有机物料(如牛粪、秸秆等)联合施用效果较好,可作为青海盐碱土改良的备选措施。

参考文献:

- [1] 魏博娴. 中国盐碱土的分布与成因分析[J]. 水土保持应用技术, 2012(6):27-28.
WEI Bo-xian. The distribution of saline soil and analysis of forming reasons[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2012(6):27-28.
- [2] 宋玉民, 张建峰, 刑尚军, 等. 黄河三角洲重盐碱地植被特征与植被恢复技术[J]. 东北林业大学学报, 2003, 31(6):87-89.
SONG Yu-min, ZHANG Jian-feng, XING Shang-jun, et al. Features of plant community and its restoration techniques in Yellow River delta region[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2003, 31(6):87-89.
- [3] Qadir M, Steffens D, Yan F, et al. Sodium removal from a calcareous saline-sodic soil through leaching and plant uptake during phytoremediation[J]. *Land Degradation & Development*, 2003, 14(3):301-307.
- [4] 赵可夫, 范海, 江行玉, 等. 盐生植物在盐渍土壤改良中的作用[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(1):31-35.
ZHAO Ke-fu, FAN Hai, JIANG Xing-yu, et al. Improvement and utilization of saline soil by planting halophytes[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2002, 8(1):31-35.
- [5] 肖克飏. 宁夏银北地区耐盐碱植物改良盐碱土机理及试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2013.
XIAO Ke-biao. Experimental study on mechanism of halophyte remediation in saline-alkali soil in the north region of Yinchuan City Ningxia Province[D]. Yangling:North West Agriculture and Forestry University, 2013.
- [6] Tejada M, Garcia C, Gonzalez J L, et al. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38:1413-1421.
- [7] 李焕珍, 徐玉佩, 杨伟奇, 等. 脱硫石膏改良强度苏打盐渍土效果的研究[J]. 生态学杂志, 1999(1):25-29.
LI Huan-zhen, XU Yu-pei, YANG Wei-qi, et al. Study on effect of using sulfur-removal gypsum as an amendment to the heavy soda saline-alkali soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999(1):25-29.
- [8] Rao D L N, Burns R G. The influence of blue-green algae on the biological amelioration of alkali soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, 11:306-312.
- [9] 李旭霖, 刘庆花, 柳新伟, 等. 不同改良剂对滨海盐碱地的改良效果[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2):220-224.
LI Xu-lin, LIU Qing-hua, LIU Xin-wei, et al. Improving effect of different amendment treatments in coastal saline-alkali soil[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(2):220-224.
- [10] Abdala M H, Omar S A. Wheat straw and cellulolytic fungi application increases nodulation, nodule efficiency and growth of fenugreek (*Trigonella foenum-graceum* L.) grown in saline soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 26(1):58-65.
- [11] 程丽娟, 来航线, 李素俭, 等. 微生物对土壤团聚体形成的影响[J]. 西北农业大学学报, 1994, 22(4):93-97.
CHENG Li-juan, LAI Hang-xian, LI Su-jian, et al. Effect of microorganism upon the formation of soil aggregates[J]. *Journal of Northwest Agriculture University*, 1994, 22(4):93-97.
- [12] 严慧峻, 逢焕成, 李玉义, 等. 微生物复混肥对盐碱土及白菜品质改良的影响[J]. 土壤肥料科学, 2008, 24(12):270-273.
YAN Hui-jun, PANG Huan-cheng, LI Yu-yi, et al. Effects of mixed microorganism fertilizer on improvement of saline soil and Chinese cabbage quality[J]. *Soil Fertilizer Science*, 2008, 24(12):270-273.
- [13] 宋玉珍. 微生物肥料在松嫩平原盐碱地造林中的应用研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2009.
SONG Yu-zhen. Study on application of microbiological fertilizer afforestation on Songnen plain saline alkali land[D]. Harbin:Northeast Forestry University, 2009.
- [14] 孙宇婷, 周连仁, 孟庆峰, 等. 长期施用有机肥对草甸碱土水稳性团聚体及其碳氮分配的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(1):6-10.
SUN Yu-ting, ZHOU Lian-ren, MENG Qing-feng, et al. Effects of long-term manure application on distribution of soil water-stable aggregated organic carbon and nitrogen in meadow alkaline soils[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(1):6-10.
- [15] Howard D M, Howard P J A. Relationships between CO₂ evolution, moisture content and temperature for a range of soil types[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25:1537-1546.
- [16] Bossuyt H, Denef K, Six J, et al. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability[J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 16:195-208.
- [17] 沈婷. 拮抗放线菌 B04 分离鉴定及其固体发酵制剂对草莓根腐病生防效应研究[D]. 南京农业大学, 2016.
SHEN Ting. Identification, solid-state fermentation and biocontrol effects of *Streptomyces hygroscopicus* B04 on strawberry root rot[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University, 2016.
- [18] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(4):665-676.
- [19] 文倩, 关欣. 土壤团聚体形成研究进展[J]. 干旱地区研究, 2004, 21(4):434-438.
WEN Qian, GUAN Xin. Progress in the study on soil aggregates formation[J]. *Arid Zone Research*, 2004, 21(4):434-438.
- [20] 曹良元. 土壤团聚体组成及耕作方式对微生物区系分布的影响[D]. 重庆:西南大学, 2010.
CAO Liang-yuan. Distribution of microbial community in soil aggregates and under different tillage pattern[D]. Chongqing:Southwest University, 2010.
- [21] Changey K, Swift R S. Studies on aggregate stability: II The effect of humic substances on the stability of reformed soil aggregate[J]. *European Journal of Soil Science*, 1986, 37:337-343.
- [22] 汪景宽, 汤方栋, 张继宏, 等. 不同肥力棕壤及其微团聚体中酶活性比较[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(2):185-189.
WANG Jing-kuan, TANG Fang-dong, ZHANG Ji-hong, et al. Enzyme activities in fractions of micro-aggregates in brown earths with different fertility levels in Liaoning Province[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2000, 31(2):185-189.
- [23] Aoyama M, Angers D A, N' Dayegamiye A. Particulate and mineral associated organic matter in stable aggregates as affected by fertilizer and manure applications[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1999, 79:295-302.
- [24] 邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J]. 生态学报, 2006, 26(2):365-372.
QIU Li-ping, ZHANG Xing-Chang, ZHANG Jin-ai. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long term fertilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2):365-372.