

不同改良剂对盐碱地土壤微生物与加工番茄产量的影响

屈忠义 孙慧慧 杨 博 高晓瑜 王利明 王丽萍

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 在田间试验区设置对照组(CK)、有机肥复配脱硫石膏(T1)、生物炭(T2)及脱硫石膏(T3)4个处理,分析不同改良剂对中度盐碱地表层20 cm内土壤微生物数量、理化性质及加工番茄产量的影响,从而确定最适宜的改良剂。结果表明:各改良剂均能降低土壤电导率和pH值,提高土壤有机质、水解氮、速效磷、速效钾含量,并提高加工番茄产量,其中生物炭处理对加工番茄产量的影响最为显著,较对照处理增加了55.96%;各处理的土壤细菌和放线菌数量在整个生育期内均呈抛物线形变化,最大值均出现在开花着果-着果盛期,土壤真菌数量在全生育期呈下降趋势;施加生物炭、脱硫石膏、有机肥复配脱硫石膏均可增加土壤细菌、放线菌、真菌数量,其中细菌和放线菌数量均以生物炭处理的增幅最大,较对照组分别增加了1.6~7.8倍和2.0~6.1倍;土壤耕层细菌、放线菌数量均与土壤pH值和电导率呈负相关,与土壤有机质、水解氮、速效磷、速效钾含量呈正相关,说明土壤微生物数量随土壤盐渍化程度的增加呈减少趋势,与大部分土壤养分之间具有很好的正相关性,且细菌和放线菌数量多的土壤,其土壤理化性质较好,作物产量也较高,因此可以将土壤细菌和放线菌数量作为评价土壤健康状况的重要生物指标。综上所述,生物炭处理(T2,22.5 t/hm²)最有利于降低中度盐碱地土壤电导率和pH值,促进土壤微生物的生长繁殖,提高土壤养分及加工番茄的产量。

关键词: 盐碱地; 改良剂; 微生物数量; 理化性质; 产量

中图分类号: S156.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)04-0311-08

OSID:



Effects of Different Amendments on Soil Microorganisms and Yield of Processing Tomato in Saline Alkali Soil

QU Zhongyi SUN Huihui YANG Bo GAO Xiaoyu WANG Liming WANG Liping

(Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: Through the field plot experiment design control group (CK), organic fertilizer combined with desulfurized gypsum (T1), biochar (T2) and desulfurized gypsum (T3) four treatments, the effects of different improvers on the quantity of soil microorganism, physical and chemical properties and the yield of processing tomatoes were analyzed, and the best improver was determined. The results showed that all amendments could reduce soil EC and pH value, increase soil organic matter, hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium and increase the yield of processing tomatoes. Among them, biochar treatment had the most significant effect on improving the yield of processing tomatoes, which increased by 55.96% compared with CK treatment. The number of bacteria and actinomycetes in the soil of each treatment showed a parabolic change, the maximum values appeared in the flowering and fruiting period, and the number of soil fungi showed a downward trend in the whole growth period. The application of biochar, desulfurized gypsum and organic fertilizer compound with desulfurized gypsum can increase the number of bacteria, actinomycetes and fungi in soil, among which the increase of bacteria and actinomycetes in biochar treatment was the largest, which was 1.6~7.8 times and 2.0~6.1 times higher than that of CK treatment, respectively. The number of bacteria and actinomycetes in topsoil was negatively correlated with soil EC and pH value, and positively correlated with soil organic matter, hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium. The above results showed that the number of soil microorganisms was decreased with the increase of soil salinization degree, which had good positive correlation with most soil nutrients. In addition, the soil with a large number of bacteria and

收稿日期: 2020-07-14 修回日期: 2020-09-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779117, 51809142)

作者简介: 屈忠义(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事节水理论与农田水土环境效应研究, E-mail: quzhongyi@imau.edu.cn

actinomycetes had better physical and chemical properties and higher crop yield, so the number of soil bacteria and actinomycetes can be regarded as an important biological index for evaluating soil health. To sum up, biochar treatment (T_2 , 22.5 t/hm^2) was the most beneficial to reduce the EC and pH value of moderate saline alkali soil, promote the growth and reproduction of soil microorganisms, improve soil nutrients and the yield of processing tomatoes.

Key words: saline alkali soil; amendment; quantity of microorganism; physicochemical property; yield

0 引言

土壤是微生物最好的天然培养基,具有微生物所必需的营养和微生物生长繁殖、生命活动所需的各种条件。微生物几乎参与土壤中的一切生物及生物化学反应。微生物群落能迅速对周围环境变化作出反应。因此,土壤中微生物的数量反映了土壤肥力水平,对植被生长发育起到重要作用。有研究表明,土壤微生物数量是一种更有效、反应更灵敏的评价土壤质量的指标^[1]。

根据联合国教科文组织和粮农组织不完全统计,全世界盐碱地面积为 9.54 亿 hm^2 ,我国约为 9900 万 hm^2 ^[2]。盐碱土壤的改良及改良前后土壤性质的变化一直是研究追踪的热点。内蒙古作为我国西北最大的灌区,现有盐碱地约 26.7 万 hm^2 ,且耕地次生盐渍化面积每年都在增加^[3],农业的可持续发展受到阻碍,亟需对盐碱地进行改良。改良措施涉及工程、物理、化学、农艺等方面。研究表明,脱硫石膏在降低土壤容重、pH 值和土壤电导率^[4],增加微生物量^[5],提高土壤肥力及作物产量等方面具有积极作用^[6];定期施用有机肥可提高土壤有机碳含量,改善土壤理化性质,从而提高作物产量^[7];生物炭具有巨大的表面积和多孔性质,在盐碱土中施入生物炭能改善土壤结构,提高土壤水肥利用效率^[8],从而提高作物产量^[9-10]。现阶段关于盐碱地改良和土壤微生物的研究成果很多^[5-6,11-12],但是将盐碱地改良剂与土壤微生物数量相结合的相关研究较少。本文以内蒙古河套地区中度盐碱地为研究对象,研究不同改良剂对中度盐碱地表层 20 cm 内作物生育期间土壤微生物群落、理化性质以及作物产量的影响,从生物因子和非生物因子的角度比较不同改良剂对盐碱地的改良效果,为盐碱地改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 5—10 月在内蒙古自治区杭锦旗三道桥澄泥村改盐增粮试验基地开展。该地区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市西部 ($106^\circ 54' \sim 106^\circ 55' \text{E}$, $40^\circ 49' \sim 40^\circ 50' \text{N}$, 海拔 $990 \sim 1003 \text{ m}$), 属中温带大陆性气候,冬长寒冷,夏短温热,蒸发强

烈,年均降水量 136.5 mm ,年均蒸发量 1953.9 mm ,盐分表聚现象严重。年平均日照时数 3449.6 h ,年均气温 8.7°C ,昼夜平均温差 13.2°C ,年均无霜期 152 d 。生育期内日平均气温和日降雨量变化情况见图 1。

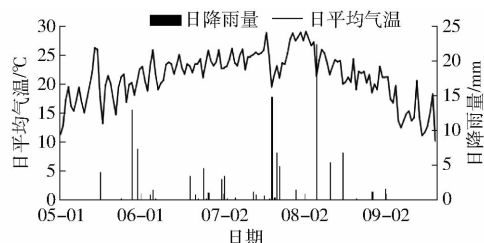


图 1 2018 年日平均气温与日降雨量变化情况

Fig. 1 Variation of average temperature and daily rainfall in 2018

经 HELOS/OASIS 型激光粒度仪测定,可知 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层土壤中黏粒、粉粒、砂粒含量(质量分数)分别为 7.69% 、 47.86% 、 44.45% ,属于粉壤土。土壤类型属于硫酸盐-氯化物型盐土(格拉波夫斯卡娅的划分标准),程度为中度盐碱土,土壤容重为 1.57 g/cm^3 ,pH 值为 8.62 ,电导率(EC)为 3.25 mS/cm ,土壤有机质质量比 14.32 g/kg ,速效磷质量比 8.75 mg/kg ,速效钾质量比 218.45 mg/kg ,碱解氮质量比 50.74 mg/kg 。作物生育期地下水埋深 1 m 左右。

1.2 供试材料

供试脱硫石膏为包头市第二热电厂产生的废弃脱硫石膏,其主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,pH 值为 8.08 ,根据房宸等^[13]研究结果并结合离子交换反应原理计算综合得出施用量为 37.5 t/hm^2 ;供试有机肥来自当地集中堆肥区(将羊粪进行好氧发酵而成),pH 值为 8.12 ,根据董芸雷等^[12]研究结果并参照当地农民经验综合得出脱硫石膏复配有机肥的施用量为 37.5 t/hm^2 ;试验供试生物炭为辽宁金和福农业开发有限公司的秸秆生物炭,基本理化性质:C 质量分数为 47.17% 、N 质量分数为 0.71% 、H 质量分数为 3.83% ,有机质质量比为 925.74 g/kg ,碱解氮质量比 159.15 mg/kg ,速效磷质量比 394.18 mg/kg ,速效钾质量比为 783.98 mg/kg ,pH 值为 9.04 ,根据高利华等^[14]研究成果得出最佳施用量为 22.5 t/hm^2 。

供试作物为加工番茄,品种为屯河 16 号,株距 35 cm ,行距 50 cm ,种植方式为一膜一带两行(图 2),于 5 月中旬进行移栽,全生育期 110 d 。

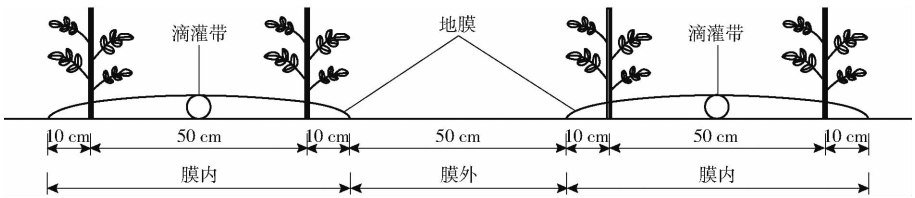


图 2 田间番茄及滴灌带布局示意图

Fig. 2 Layout of tomato and drip irrigation belt in field

1.3 试验设计与方法

试验设置对照 (CK)、有机肥复配脱硫石膏 (T1)、生物炭 (T2)、脱硫石膏 (T3) 4 个处理。每个小区面积为 90 m² (10 m × 9 m), 每个处理 3 次重复, 共 12 个小区, 小区四周设置 2 m 宽的保护行。各改良剂于 2017 年 4 月一次性均匀施于土壤表面, 用旋耕机均匀翻入耕层 0 ~ 20 cm。2018 年不再施加任何改良剂, 继续进行田间定位试验。生育期内灌水方式为地下水膜下滴灌, 由张力计控制灌水时间, TDR 进行校核, 灌水下限为 -25 kPa, 每次灌水定额为 225 m³/hm²。底肥的施用量为: 磷酸二铵 (P₂O₅ 质量分数为 39%) 375 kg/hm², 复合肥 (N、P₂O₅、K₂O 质量分数为 30%、5%、5%) 75 kg/hm², 生育期内追施尿素 (N 质量分数 46.67%) 225 kg/hm², 通过文丘里施肥器进行膜下滴灌随水施肥, 各小区其余田间管理保持一致。

1.4 测定指标与方法

在番茄各生育期 (苗期-开花着果期、开花着果-着果盛期、着果盛期-着果末期) 对各处理膜内分别取 0 ~ 20 cm 土层的土样 (采用 5 点取土的方法), 然后各处理土壤分别均匀混合, 分两份备用。一份带回实验室, 采用稀释涂布平板法培养微生物, 其中细菌使用牛肉膏蛋白胨培养基^[15], 稀释度选取 10⁻⁵、10⁻⁶、10⁻⁷, 37℃ 下倒置培养 24 h 后计数。放线菌使用高氏一号培养基^[15], 稀释度选取 10⁻⁴、10⁻⁵、10⁻⁶, 28℃ 下倒置培养 4 d 后计数。真菌使用马丁氏培养基^[15], 稀释度选取 10⁻³、10⁻⁴、10⁻⁵, 28℃ 下倒置培养 4 d 后计数。

另一份土样, 经自然风干、过筛后, 土水比 1:5

浸提法, 用酸度计和电导仪直接读出土壤的 pH 值和电导率 (EC); 采用碱解扩散法测定土壤水解氮含量^[16], 采用联合浸提-比色法测定速效磷和速效钾含量^[17], 采用重铬酸钾容量法测定有机质含量^[18]。

1.5 数据分析与处理

利用 Microsoft Excel 2016 软件对数据进行计算处理, 用 Origin 2017 进行绘图; 用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析和相关性分析, 采用 LSD 方法进行显著性检验 ($P < 0.05$); 用 CANOCO 5 软件对微生物群落进行冗余分析 (RDA), 并作图。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂对土壤理化性质的影响

2.1.1 不同改良剂对土壤 pH 值和电导率的影响

土壤 pH 值是制约土壤微生物活动和作物生长的主要因素之一, 是土壤理化性质和土壤肥力特征的综合反映^[19]。由图 3a (图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同) 可知, 番茄生育期内土壤 pH 值在 7.61 ~ 8.39 之间, 呈碱性, 与 CK 处理相比, T1 和 T3 处理 pH 值显著降低, 分别降低了 3.00% ~ 5.51% 和 2.87% ~ 8.50%, T2 处理在苗期-开花着果期不显著, 在开花着果期-着果末期显著降低, 降低了 3.52% ~ 4.73%。

土壤盐分是影响作物生长发育和微生物活动的主要障碍因子之一。过多的土壤盐分会导致土壤透气和透水性差、表层易板结、养分低等, 严重影响作物的生长发育, 造成作物缺苗或死亡, 使作物产量直接减产。由图 3b 可知, 与对照 (CK) 处理相比, 施加改良剂均能降低土壤 EC, 在苗期-开

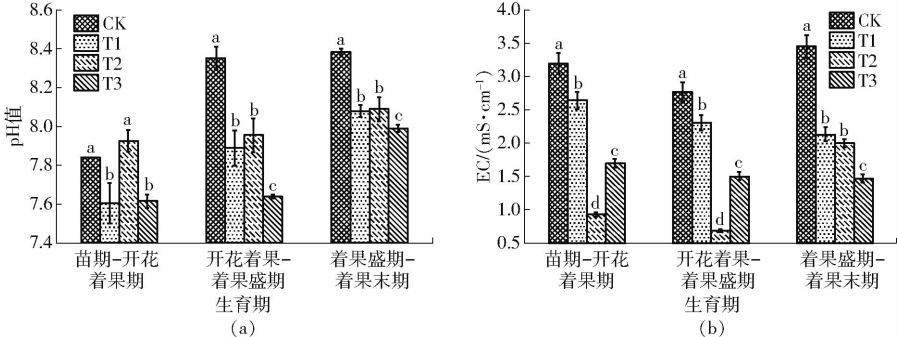


图 3 不同改良剂对盐碱地表层 20 cm 土壤 pH 值和 EC 的影响

Fig. 3 Effects of different amendments on pH value and EC of 20 cm soil in saline alkali land

花着果期和开花着果-着果盛期,T2 处理较对照(CK)处理降低最大,分别降低了 70.94% 和 75.20%,在着果盛期-着果末期,T3 处理较对照(CK)处理降低最大,降低了 57.42%。主要是因为脱硫石膏通过 Ca^{2+} 把交换性 Na^{+} 置换出来,通过灌溉带走 Na^{+} ,减少土壤盐分;而生物炭通过降低土壤容重,提高土壤渗透性,促进灌溉对土壤盐分的淋洗,从而降低土壤盐分。

2.1.2 不同改良剂对土壤养分的影响

土壤养分是反映土壤质量和土壤生产力的重要指标,为作物生长发育和土壤微生物活动提供必要的营养物质。由图 4 可知,施加改良剂能增加土壤中有机质、水解氮、速效磷及速效钾含量。

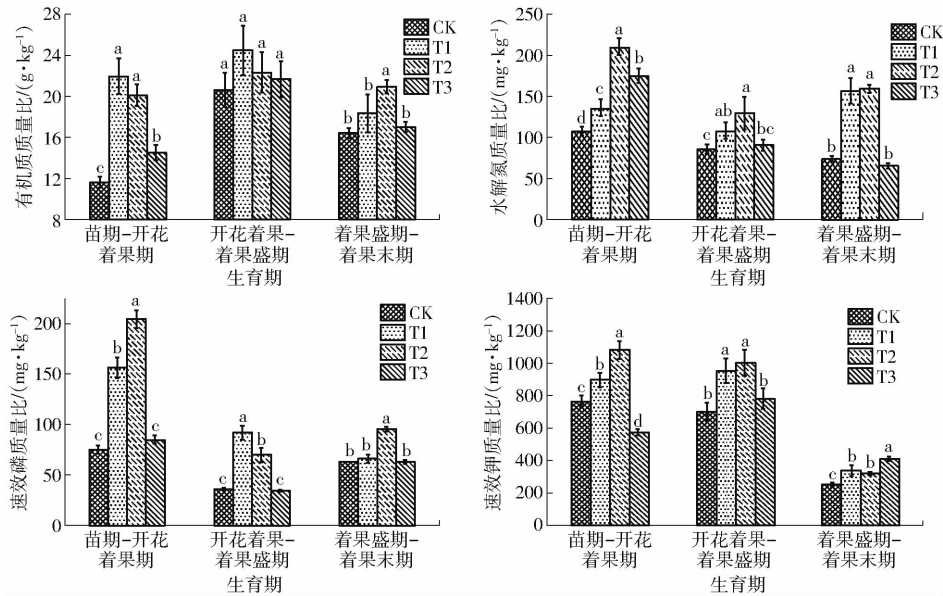


图 4 不同改良剂对盐碱地表层 20 cm 土壤养分的影响

Fig.4 Effects of different amendments on soil nutrients in 20 cm of saline alkali soil

在苗期-开花着果期,T1、T2、T3 处理有机质含量均显著高于对照(CK)处理,且 T1 处理增加最多,增加了 88.88%,在开花着果-着果盛期,各处理差异性不显著,在着果盛期-着果末期,T2 处理显著增加,较对照(CK)处理增加了 28.04%,说明不同改良剂对土壤有机质作用的时间不一致。T2 处理的土壤水解氮、速效磷、速效钾含量均较对照(CK)处理显著增加,分别增加了 53.53% ~ 116.63%、84.97% ~ 295.22%、25.10% ~ 43.22%。因此,在作物生育期内,各改良剂均改善土壤理化性质,增加土壤表层养分。

2.2 不同改良剂对可培养土壤微生物数量的影响

2.2.1 不同改良剂对土壤细菌数量的影响

土壤细菌占土壤微生物总数的 70% ~ 90%,且细菌数量是反映土壤肥力的一个生物学标志^[20],对表 1 数据进行纵向比对可知,各处理下,加工番茄整

在全生育期内,各处理表层土壤水解氮含量均相对比较稳定,这可能是因为该试验采用的是膜下滴灌随水施肥且注重在需肥较大的生育期多次少量适时适量追肥,从而保证土壤水解氮能有效并平稳供应。速效磷和速效钾含量在苗期-开花着果期高于着果盛期-着果末期,这是因为前期植株生长发育需要的养分较少,消耗量小于积累量,使得速效磷和速效钾含量增加,但随着生育期的增加,植株的生长发育需要消耗大量养分,消耗量大于积累量,使得后期养分含量减少,且速效钾在番茄着果盛期-着果末期明显降低,是由于着果成熟时需要大量钾导致。各处理土壤有机质含量在开花着果-着果盛期最多。

个生育期土壤细菌数量呈先升高后降低的抛物线趋势,在开花着果-着果盛期达到最高值,这是由于该时期土壤的水热盐条件更利于细菌的生长,到着果末期土壤养分和气温相对下降,细菌数量也随之下降。对表 1 数据进行横向比对可知,各个生育期下,施加改良剂均能增加土壤细菌数量,且 T2 处理增加最多,较对照处理(CK)增加了 1.6 ~ 7.8 倍,表明施加不同改良剂能改善土壤理化性质,促进细菌的生长繁殖。

2.2.2 不同改良剂对土壤放线菌数量的影响

放线菌受土壤通气性的影响较大,对表 2 数据进行纵向比对可知,各处理下,表层土壤放线菌数量在全生育期均呈抛物线形变化,最高值出现在开花着果-着果盛期。对表 2 数据进行横向比对可知,各个生育期下,施加不同改良剂的土壤放线菌数量均显著高于对照(CK)处理,其中,T2 处理增加最

表 1 不同改良剂对盐碱地表层 0 ~ 20 cm 土壤细菌数量的影响

Tab.1 Effect of different amendments on quantity of bacteria in 0 ~ 20 cm soil of saline alkali surface layer					cfu/g
生育期	CK	T1	T2	T3	
苗期-开花着果期	4. 20 × 10 ^{6c}	9. 90 × 10 ^{6b}	1. 63 × 10 ^{7a}	9. 10 × 10 ^{6b}	
开花着果-着果盛期	9. 80 × 10 ^{6c}	6. 80 × 10 ^{7b}	8. 60 × 10 ^{7a}	1. 33 × 10 ^{7c}	
着果盛期-着果末期	6. 10 × 10 ^{6c}	1. 04 × 10 ^{7b}	1. 60 × 10 ^{7a}	8. 90 × 10 ^{6b}	

注：同一生育期内数据不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0. 05$) ,下同。

表 2 不同改良剂对盐碱地表层 0 ~ 20 cm 土壤放线菌数量的影响

Tab.2 Effect of different amendments on quantity of actinomycetes in 0 ~ 20 cm soil of saline alkali surface layer					cfu/g
生育期	CK	T1	T2	T3	
苗期-开花着果期	4. 80 × 10 ^{5c}	1. 64 × 10 ^{6b}	3. 43 × 10 ^{6a}	1. 18 × 10 ^{6b}	
开花着果-着果盛期	1. 80 × 10 ^{6c}	3. 59 × 10 ^{6b}	5. 45 × 10 ^{6a}	3. 05 × 10 ^{6b}	
着果盛期-着果末期	6. 50 × 10 ^{5c}	2. 79 × 10 ^{6ab}	3. 30 × 10 ^{6a}	2. 42 × 10 ^{6b}	

多,增加 2. 0 ~ 6. 1 倍,这主要是因为生物炭本身具有巨大表面积和孔隙度,为放线菌提供足够生存空间和氧气,且生物炭可作为放线菌生长繁殖的 C 源。

2. 2. 3 不同改良剂对土壤真菌数量的影响

真菌在腐殖质的形成和团聚体稳定过程中起重要作用。对表 3 数据进行纵向比对可知,在 4 种处理下,土壤真菌数量在全生育期呈下降趋势,苗期-开花着果期真菌数量最大,到着果末期数量降至最低值。这是因为真菌多数适应于中性偏酸性环境。对表 3 数据进行横向比对可知,各个生育期下,施加不同改良剂的土壤真菌数量均高于对照(CK)处理,

且在苗期-开花着果期和着果盛期-着果末期,T2 处理显著增加,较对照(CK)处理分别增加了 32. 9% 和 269. 9% ;在开花着果-着果盛期,T1 处理显著增加,增加了 30. 4% 。这是因为生物炭施入盐碱土中能改善土壤结构,为土壤真菌提供良好的生长繁殖栖息地,有效吸附土壤真菌,为其提供载体,而有机肥复配脱硫石膏不仅能增加土壤有机质,对土壤的 pH 值也有较好的降低作用,进而增加土壤真菌数量。综上所述,在作物生育期内,各改良剂均能增加土壤微生物数量,且对土壤微生物主要类群的数量调节作用不一致。

表 3 不同改良剂对盐碱地表层 0 ~ 20 cm 土壤真菌数量的影响

Tab.3 Effect of different amendments on quantity of fungi in 0 ~ 20 cm soil of saline alkali surface layer					cfu/g
生育期	CK	T1	T2	T3	
苗期-开花着果期	2. 52 × 10 ^{5b}	2. 72 × 10 ^{5ab}	3. 35 × 10 ^{5a}	2. 66 × 10 ^{5ab}	
开花着果-着果盛期	1. 25 × 10 ^{5b}	1. 63 × 10 ^{5a}	1. 39 × 10 ^{5ab}	1. 32 × 10 ^{5ab}	
着果盛期-着果末期	2. 46 × 10 ^{4d}	7. 40 × 10 ^{4b}	9. 10 × 10 ^{4a}	4. 62 × 10 ^{4c}	

2. 3 不同改良剂对加工番茄产量的影响

不同改良剂对加工番茄产量的影响见图 5,加工番茄产量介于 31. 73 ~ 49. 49 t/hm²,通过单因素方差分析发现,施加改良剂对加工番茄产量影响显著 ($P < 0. 05$) ,且施加各改良剂处理的产量较对照(CK)处理均增加,其中 T2 处理的产量增加最多,增加了 55. 96% ,其次为 T1、T3 处理,分别增加了 31. 63%、33. 99% 。

2. 4 土壤微生物群落的冗余分析

将土壤微生物群落与土壤理化性质进行冗余分析(RDA),评估土壤环境因子、各处理、微生物群落之间的关系,结果见图 6。土壤细菌、放线菌数量与土壤有机质、速效钾、速效磷、水解氮含量均呈一定的正相关关系,与 EC、pH 值呈负相关关系;土壤真菌数量与 pH 值呈负相关,与其他环境因子呈一定

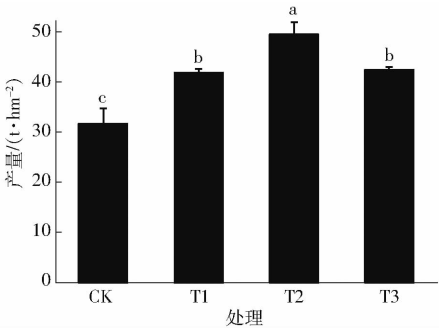


图 5 不同改良剂对加工番茄产量的影响

Fig.5 Effects of different amendments on yield of processing tomatoes

的正相关关系。同时,还可以从 RDA 分析中看出微生物群落受土壤因子影响程度不同。其中,土壤速效钾、有机质含量和 EC 是贡献率最大的 3 个理化因素,共解释了 95. 7% 的群落变化,因此土壤盐

分和土壤速效钾、有机质是影响各处理表层土壤微生物群落分布的主控环境因子。RDA 分析还显示,不同改良剂处理下土壤微生物群落组成存在差异,T3 处理与对照的群落结构相似性高于 T1 和 T2 处理,其中 T2 处理较对照对土壤微生物群落结构的影响最为明显。以上表明 3 种改良剂均可改善盐碱地土壤理化性质,为微生物提供良好的生存条件,同时土壤微生物作为土壤养分的主要分解者,分解土壤中的养分,二者相辅相成,为植物生长提供必要的营养,从而增加作物产量。

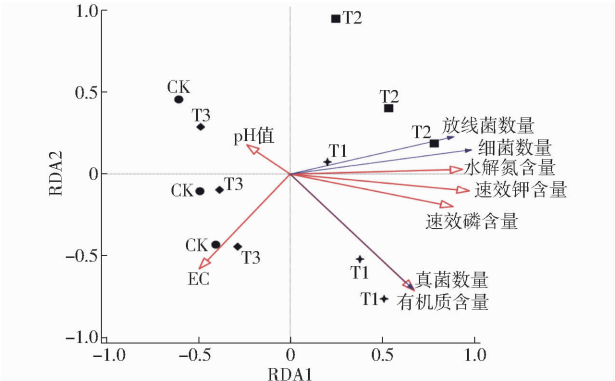


图 6 土壤微生物群落与土壤理化性质的冗余分析
Fig. 6 Redundancy analysis of soil microbial community and physical and chemical properties

3 讨论

盐碱地土壤结构性、通气性和透水性差,孔隙度小,表层土壤易结皮,使得植物生长受到限制。一方面,盐碱地中存在大量的易于淋失的 Na^+ 和 K^+ ,交换性钠增大了团聚体变湿时破碎或崩解的趋势,崩解团聚体释放的黏粒和粉粒在剖面中向下淋洗时,堵塞了土壤孔隙,这是盐碱地渗透性差的主要原因;另一方面,干旱地区强蒸发量使得土壤盐分表聚,作物根区积累盐分,不能很好地生长。本研究表明,施加脱硫石膏和脱硫石膏复配有机肥均能降低土壤 pH 值,这与刘淑芹等^[5]、屈忠义等^[21]、邹璐^[6]研究结果一致。在作物初期,生物炭处理土壤 pH 值较对照(CK)处理增加,但随着时间的延长,土壤 pH 值较对照(CK)处理减少,这与 VAN ZWIETEN 等^[9]研究不一致,可能是由于生物炭本身呈碱性,施入土壤中初始较对照(CK)处理有所增加,但随着生物炭与土壤发生反应,使得生物炭产生正、负电荷,提高土壤阳离子交换量,使碱化度减小,进而降低土壤 pH 值。田间试验还表明,施加脱硫石膏、生物炭、脱硫石膏复配有机肥均能降低土壤 EC,增加土壤有机质、水解氮、速效磷、速效钾含量,这与张瑶等^[22]研究结果一致。脱硫石膏通过 Ca^{2+} 把交换性 Na^+ 置换出来,通过灌溉将 Na^+ 淋洗至深层,降低表层土壤

盐分,同时脱硫石膏中含有大量的 S 在土壤中经氧化作用生成 H_2SO_4 ,可促进土壤 P、K 等的溶解,增加土壤养分含量^[6];有机肥本身作为一种含有机物质的肥料,不仅可以为作物提供一定无机和有机的养分,对土壤养分也有提高^[23];生物炭可以改善土壤结构,增加土壤孔隙度,提高土壤储水能力,降低土壤盐分^[24];同时生物炭可以增加土壤阳离子交换量,有效吸附盐碱地土壤中的养分,降低土壤中氮、磷、钾的淋溶损失,提高土壤保肥能力,改善土壤养分的空间分布^[25]。

本文试验结果表明,生物炭、脱硫石膏、脱硫石膏复配有机肥均有利于土壤细菌、放线菌、真菌的生长繁殖,增加作物产量,其中生物炭的优势更加突出,这与文献[5, 26–29]研究结果相似。生物炭具有丰富的微孔结构,比表面积大,吸附能力强,表面官能团丰富,施入土壤后,可降低土壤容重,促进土壤微团聚体的形成,改善土壤结构,为土壤微生物提供庇护场所,促进微生物群落的繁衍生息,同时生物炭含有植物生长所必需的大量元素和中微量元素,可为作物生长发育提供必要的补充,增加作物产量^[30–31];有机肥能够增加根系的分泌物,提供给土壤微生物更多的能源物质,从而提高土壤微生物量,同时增加作物产量^[32];脱硫石膏能降低土壤 pH 值和 EC,增加土壤通气性,改善土壤微生物生长繁殖环境,促进微生物生长^[6]。本研究也表明,表层土壤在作物全生育期内土壤细菌和放线菌数量呈抛物线形,在开花着果–着果盛期最高,这与隋虹杰等^[33]和沈鹏飞^[34]研究一致。施加不同改良剂时土壤耕层微生物数量变化不一致,产生这种差异的主要原因是改良剂本身性质造成的,不同改良剂之间其物理性质和养分不同,且本身含有的微生物菌群不同。

本研究通过冗余分析表明,土壤细菌、放线菌数量与土壤养分含量呈正相关,与土壤 EC 和 pH 值呈负相关,土壤真菌数量与 pH 值呈负相关,与其他环境因子呈一定的正相关关系,这与时唯伟等^[35]、李凤霞等^[32]结论相符。说明土壤微生物群落在一定程度上能反映土壤肥力水平,土壤中细菌和放线菌数量高,表明土壤性质和肥水条件好,作物产量高,可以作为评价土壤健康的生物指标。同时土壤微生物与土壤肥力和土壤健康也是相辅相成的,土壤微生物作为土壤养分的主要分解者,通过分解有机物等养分获得自身所需营养物质的同时,为植物生长发育提供必要的营养,进而增加作物产量。分析也表明,土壤速效钾、有机质含量和 EC 是土壤微生物群落生长繁殖的关键因素,这与 IBKWE 等^[36]研究结果一致,土壤微生物随着土壤盐渍化程度的增加

呈减少的趋势,土壤微生物与大部分土壤养分之间具有很好的相关性^[37]。盐碱土壤板结严重,使得土壤孔隙度降低,不利于好氧微生物活动和繁殖,因此通过施加生物炭、脱硫石膏、有机肥能改善土壤理化性质,增加土壤孔隙度,降低土壤盐分和 pH 值,增加土壤养分,从而改善土壤中微生物生长环境,增加土壤中细菌、放线菌、真菌数量,而土壤微生物的增加又反作用于土壤结构,改善土壤理化性质,形成良性循环,最终实现改良盐碱的目的,同时添加这些改良剂能增加土壤中的养分含量,促进作物的生长发育,增加作物产量。

河套灌区作为我国西北最大的灌区,改良盐碱地对该地区的农业发展和生态环境具有重要意义。生物炭施入土壤中,不仅能改善土壤性质,为作物生长提供一定的营养补充,减少化肥的投入和环境污染,而且原材料生产成本低、来源广泛^[8]。脱硫石膏作为燃煤电厂的副产物,施入盐碱地后,不仅能减小土壤 pH 值和盐分含量,而且能减少对环境的二次污染^[4]。而有机肥作为一种含有机物质的肥料,不仅可以为作物提供一定的无机和有机养分,改善土壤理化性质,而且和脱硫石膏、秸秆等复配效果更好^[12]。因此本试验主要在河套灌区施加这 3 种改良剂,研究对盐碱地耕层 20 cm 土壤微生物数量、理化性质及加工番茄产量的影响,结果显示生物炭更有

利于促进盐碱地土壤微生物的生长繁殖,改善土壤理化性质,增加土壤养分含量,提高加工番茄的产量。

4 结论

(1)施加改良剂均能降低生育期盐碱地土壤电导率和 pH 值,增加土壤有机质、水解氮、速效磷、速效钾含量,其中生物炭(T2)处理在降低土壤电导率、增加土壤养分方面效果较为显著。

(2)在整个生育期内,各处理的土壤细菌和放线菌数量均呈抛物线形变化,最大值均出现在开花着果-着果盛期,土壤真菌数量在全生育期呈下降趋势,苗期-开花着果期最多。在同一生育期内,施加生物炭、脱硫石膏、脱硫石膏复配有机肥均可增加盐碱地土壤细菌、放线菌和真菌数量,其中细菌和放线菌数量均以生物炭(T2)处理的增幅最大,较对照组(CK)分别增加了 1.6~7.8 倍和 2.0~6.1 倍。

(3)施加各改良剂均能显著提高番茄的产量,其中生物炭(T2)处理的产量增加最多,较对照组增加了 55.96%。

(4)土壤耕层细菌、放线菌数量均与土壤 pH 值和 EC 呈负相关,与土壤有机质、水解氮、速效磷、速效钾含量呈正相关,土壤真菌数量与土壤 pH 值呈负相关,与土壤有机质、水解氮、速效磷、速效钾含量呈正相关。

参 考 文 献

- [1] LIU X, LINDEMANN W C, WHITFORD W G, et al. Microbial diversity and activity of disturbed soil in the northern Chihuahuan desert[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(3): 243-249.
- [2] 张俊伟. 盐碱地的改良利用及发展方向[J]. *农业科技与信息*, 2011(4): 63-64.
ZHANG Junwei. Improvement, utilization and development direction of saline alkali land [J]. *Agricultural Science and Technology and Information*, 2011(4): 63-64. (in Chinese)
- [3] 张敏. 内蒙古西部地区未利用地开发利用潜力研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学, 2015.
ZHANG Min. The potential of exploitation and utilization of unused land in the western area of Inner Mongolia[D]. Huhhot: Inner Mongolia Normal University, 2015. (in Chinese)
- [4] 刘娟, 张风华, 李小东, 等. 滴灌条件下脱硫石膏对盐碱土改良效果及安全性的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(11): 87-93.
LIU Juan, ZHANG Fenghua, LI Xiaodong, et al. Effect of flue gas desulfurization gypsum on the saline soil improvement and security under drip irrigation[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(11): 87-93. (in Chinese)
- [5] 刘淑芹, 罗振兴, 高晨光. 脱硫石膏改良盐碱地对水稻土壤理化性质和微生物数量的影响[J]. *白城师范学院学报*, 2016, 30(5): 17-22.
LIU Shuqin, LUO Zhenxing, GAO Chenguang. Effects of desulfurized gypsum on the number of microbial flora of saline alkali soil and the physical and chemical properties in paddy soil[J]. *Journal of Baicheng Normal University*, 2016, 30(5): 17-22. (in Chinese)
- [6] 邹璐. 盐碱地施用脱硫石膏对土壤理化性质和油葵生长的影响[D]. 北京:北京林业大学, 2012.
ZOU Lu. Effects of desulfurized gypsum application on saline alkali soil physical and chemical properties and growth parameters of oil-sunflower[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012. (in Chinese)
- [7] ZHANG H, XU M, ZHANG F. Long-term effects of manure application on grain yield under different cropping systems and ecological conditions in China[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2008, 147:31-42.
- [8] 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对土壤水肥利用效率与番茄生长影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11): 2187-2193.
LI Changjian, QU Zhongyi, GOU Mangmang, et al. Effects of biochar amendment on soil water and nutrient utilization efficiencies and tomato growth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2187-2193. (in Chinese)
- [9] VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of paper mill waste on agronomic performance and soil fertility [J]. *Plant Soil*, 2010, 327(1-2): 235-246.
- [10] HOSSAIN M K, STREZOV V, CHAN K Y, et al. Nelsona agronomic properties of waste water sludge biochar and bio availability

- of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. Chemosphere, 2010, 78(9): 1167–1171.
- [11] 屈忠义, 高利华, 李昌见, 等. 秸秆生物炭对玉米农田温室气体排放的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 111–118.
QU Zhongyi, GAO Lihua, LI Changjian, et al. Impacts of straw biochar on emission of greenhouse gas in maize field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 111–118. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161215&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.015. (in Chinese)
- [12] 董芸雷, 妥德宝, 李彬, 等. 脱硫石膏和有机肥不同施用量改良河套灌区盐碱化土壤田间试验研究[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2013, 26(3): 299–302.
DONG Yunlei, TUO Debao, LI Bin, et al. Field experiment study of the improvement of saline alkali soil in Hetao irrigation area by different dosage of desulfurization gypsum and organic fertilizer[J]. Journal of Hainan Normal University (Natural Science), 2013, 26(3): 299–302. (in Chinese)
- [13] 房宸, 苏德荣, 端韞文, 等. 脱硫石膏与灌溉耦合对滨海盐碱土化学性质的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 59–63.
FANG Chen, SU Derong, DUAN Yunwen, et al. Effects of coupling of fgd gypsum and irrigation on chemical properties of harbor front saline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5): 59–63. (in Chinese)
- [14] 高利华, 屈忠义. 膜下滴灌条件下生物炭对土壤水热肥效应的影响[J]. 土壤, 2017, 49(3): 614–620.
GAO Lihua, QU Zhongyi. Effects of biochar on soil water-heat-fertility behavior effect under mulched drip irrigation[J]. Soils, 2017, 49(3): 614–620. (in Chinese)
- [15] 李振宏, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 中华人民共和国农业部. 中性、碳性土壤铵态氮、有效磷、速效钾的测定联合浸提—比色法: NY/T 1848—2010 [S]. 北京: 标准出版社, 2010.
- [18] 中华人民共和国农业部. 土壤检测第6部分: 土壤有机质的测定: NY/T 1121.6—2006 [S]. 北京: 标准出版社, 2006.
- [19] US Salinity Laboratory Staff. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils [Z]. US Department of Agriculture Handbook, 1954.
- [20] 路怡青. 保护性耕作对潮土酶活, 微生物群落及肥力的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
LU Yiqing. Effects of conservation tillage on fluvo-aquic soil enzyme activity and soil microbial community and soil fertility [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [21] 屈忠义, 胡敏, 王丽萍, 等. 不同改良措施对盐渍化土壤水热碳与葵花产量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 268–275.
QU Zhongyi, HU Min, WANG Liping, et al. Effects of different improvement measures on hydrothermal carbon and sunflower yield in salinized soil[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 268–275. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200331&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.031. (in Chinese)
- [22] 张瑶, 屈忠义, 丁艳宏, 等. 不同土壤改良剂对盐渍化农田土壤改良及温室气体排放的影响[J]. 节水灌溉, 2019(12): 36–41, 47.
ZHANG Yao, QU Zhongyi, DING Yanhong, et al. Effects of different soil amendment on soil amelioration and greenhouse gas emission in salinization farmland[J]. Water Saving Irrigation, 2019(12): 36–41, 47. (in Chinese)
- [23] 韩晓增, 王凤仙, 王凤菊, 等. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 66–71.
HAN Xiaozeng, WANG Fengxian, WANG Fengju, et al. Effects of long-term organic manure application on crop yield and fertility of black soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(1): 66–71. (in Chinese)
- [24] 王凡, 屈忠义, 李昌见, 等. 生物炭对砂壤土氮素淋失的影响试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7): 71–74.
WANG Fan, QU Zhongyi, LI Changjian, et al. Effect of biochar on nitrogen leaching in a sandy loam soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(7): 71–74. (in Chinese)
- [25] 吴昱, 刘慧, 杨爱峥, 等. 黑土区坡耕地施生物炭对水土流失的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 287–294.
WU Yu, LIU Hui, YANG Aizheng, et al. Influences of biochar supply on water and soil erosion in slopping farm-land of black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 287–294. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180534&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.034. (in Chinese)
- [26] 施河丽, 向必坤, 彭五星, 等. 有机无机肥料配施对植烟土壤养分及细菌群落结构的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(4): 58–66.
SHI Heli, XIANG Bikun, PENG Wuxing, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on fluecured tobacco soil nutrients and bacterial community structure[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(4): 58–66. (in Chinese)
- [27] 刘中良, 郑建利, 孙哲, 等. 土壤改良剂对设施番茄土壤微生物群落、品质及产量的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(增刊1): 394–398.
LIU Zhongliang, ZHENG Jianli, SUN Zhe, et al. Effects of soil amendments on soil microbial communities, quality and yield of tomato in protected house[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(Sup.1): 394–398. (in Chinese)
- [28] 郭梨锦, 曹凑贵, 张枝盛, 等. 耕作方式和秸秆还田对稻田表层土壤微生物群落的短期影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1577–1584.
GUO Lijin, CAO Cougui, ZHANG Zhisheng, et al. Short-term effects of tillage practices and wheat-straw returned to rice fields on topsoil microbial community structure and microbial diversity in central China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(8): 1577–1584. (in Chinese)

- [35] 庞小峰. 生命体吸收的红外光的非热生物效应的研究[J]. 物理, 2001, 30(9): 525 – 532.
PANG Xiaofeng. Non-thermal biological effect of infrared light absorbed by living systems[J]. Physics, 2001, 30(9): 525 – 532. (in Chinese)
- [36] LI S, AZIZI A, KIRK S R, et al. An explanation of the unusual strength of the hydrogen bond in small water clusters[J]. International Journal of Quantum Chemistry, 2020, 120(19): e26361.
- [37] STAROWICZ M, ZIELINSKI H. How Maillard reaction influences sensorial properties (color, flavor and texture) of food products? [J]. Food Reviews International, 2019, 35(8): 707 – 725.
- [38] 祁岩龙, 冯怀章, 于洋, 等. 美拉德反应研究进展及在食品工业中的应用[J]. 食品工业, 2018, 39(3): 248 – 252.
QI Yanlong, FENG Huaizhang, YU Yang, et al. Progress and application of Maillard reaction in food industry[J]. The Food Industry, 2018, 39(3): 248 – 252. (in Chinese)
- [39] 胡燕, 陈忠杰, 李斌. 美拉德反应产物的功能特性和安全性研究进展[J]. 食品工业, 2016, 37(10): 258 – 262.
HU Yan, CHEN Zhongjie, LI Bin. Progress of functional properties and safety of Maillard reaction products[J]. The Food Industry, 2016, 37(10): 258 – 262. (in Chinese)
- [40] 吴相钰, 陈守良, 葛明德. 陈阅增普通生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 221 – 227.
- [41] CHO A. To physicists' surprise, a light touch sets tiny objects aquiver[J]. Science, 2005, 309 (5733): 366.
- [42] 徐昕, 金雪莹, 高浩然, 等. 耦合光学微腔的频率调谐过程分析[J]. 物理学报, 2020, 69(18): 251 – 258.
XU Xin, JIN Xueying, GAO Haoran, et al. Analysis of frequency tuning process of dual coupled optical microcavities[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(18): 251 – 258. (in Chinese)
- [43] 许飞, 朱江转, 高云静, 等. 蔗糖溶液折射率与浓度关系的理论和实验探究[J]. 大学物理, 2020, 39(1): 45 – 47, 56.
XU Fei, ZHU Jiangzhuang, GAO Yunjing, et al. Theoretical and experimental study of the relation between refractive index and concentration of sucrose solution[J]. College Physics, 2020, 39(1): 45 – 47, 56. (in Chinese)
- [44] ALI A, BIDHURI P, MALIK N A, et al. Density, viscosity, and refractive index of mono-, di-, and tri-saccharides in aqueous glycine solutions at different temperatures[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2019, 12(7): 1684 – 1694.

(上接第 318 页)

- [29] 韩光明, 陈全求, 张淑芳, 等. 生物炭对不同连作年限棉田土壤微生物数量的影响[J]. 棉花科学, 2017, 39(5): 7 – 12.
HAN Guangming, CHEN Quanqiu, ZHANG Shufang, et al. Effects of biochar on soil microbial population in cotton fields with different continuous cropping years [J]. Cotton Sciences, 2017, 39(5): 7 – 12. (in Chinese)
- [30] 王荣梅, 杨放, 许亮, 等. 生物炭在新疆棉田的应用效果研究[J]. 地球与环境, 2014, 42(6): 757 – 763.
WANG Rongmei, YANG Fang, XU Liang, et al. The effects of biochar application in the cotton fields of Kashgar oasis, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China[J]. Earth and Environment, 2014, 42(6): 757 – 763. (in Chinese)
- [31] 勾芒芒, 屈忠义, 杨晓, 等. 生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 137 – 142.
GOU Mangmang, QU Zhongyi, YANG Xiao, et al. Study on the effects of biochar on saving water, preserving fertility and tomato yield[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 137 – 142. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140122&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.022. (in Chinese)
- [32] 李凤霞, 郭永忠, 王学琴, 等. 不同改良措施对宁夏盐碱地土壤微生物及苜蓿生物量的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(30): 49 – 55.
LI Fengxia, GUO Yongzhong, WANG Xueqin, et al. Effect of different soil improvement measures on microbial diversity and alfalfa biomass in saline alkali soil in Ningxia[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(30): 49 – 55. (in Chinese)
- [33] 隋虹杰, 成慧娟, 王立新, 等. 不同覆膜方式对高粱生长发育和土壤微生物的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(15): 133 – 138.
SUI Hongjie, CHENG Huijuan, WANG Lixin, et al. Influences of different mulching methods on sorghum growth and soil microorganism[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(15): 133 – 138. (in Chinese)
- [34] 沈鹏飞. 不同覆盖措施对渭北苹果园土壤理化性质及微生物群落结构的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
SHEN Pengfei. Effects of different mulching measures on soil physical and chemical properties, microbial community characteristics in Weibei apple orchard[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
- [35] 时唯伟, 支月娥, 王景, 等. 土壤次生盐渍化与微生物数量及土壤理化性质研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 166 – 170.
SHI Weiwei, ZHI Yuee, WANG Jing, et al. Secondary salinization of greenhouse soil and its effects on microbe number and soil physico-chemical properties[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 166 – 170. (in Chinese)
- [36] IBEKWE A M, POSS J A, GRATAN S R, et al. Bacterial diversity in cucumber (*Cucumis sativus*) rhizosphere in response to salinity, soil pH, and boron[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42(4): 567 – 575.
- [37] 罗安程, 孙羲. 施肥对红壤中微生物区系和无机磷溶解及有机磷矿化的影响[J]. 土壤通报, 1995(2): 73 – 75.
LUO Ancheng, SUN Xi. Effects of fertilization on microflora, dissolution of inorganic phosphorus and mineralization of organic phosphorus in red soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1995(2): 73 – 75. (in Chinese)