

不同有机物料对盐碱土的淋洗效果研究

王舒华¹, 陈爽¹, 王悦¹, 李圆宾¹, 徐璐瑶¹,
王强², 李莹飞², 薛鹏飞², 焦加国¹, 李辉信¹, 胡锋¹

(1.南京农业大学资源与环境科学学院,江苏省有机固体废物资源化协同创新中心,
南京 210095;2.山东博华高效生态农业科技有限公司,山东 滨州 256500)

摘要: 主要通过土柱模拟试验探究不同有机物料对渗滤液的盐分和可溶性有机碳(DOC)以及不同深度土壤盐分、有机质和微生物生物量碳氮的影响,设置有机硅功能肥(WO)、颗粒状有机物料(YP)、粉末状有机物料(GG)、颗粒状有机物料和粉末状有机物料各 50%(YG)以及不添加有机物料(CK)共 5 个处理。结果表明,有机物料的添加提高了渗滤液的 EC 值及水溶性 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 Na⁺ 含量,YP 处理的渗滤液盐基离子含量最高,而 WO 处理的渗滤液中 DOC 含量最低;与 CK 处理相比,WO 处理显著提高各深度土层的水溶性 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 K⁺ 含量,显著降低各深度土层的 pH、交换性 Na⁺、碱化度(ESP)和 0—20 cm 土层的水溶性 Na⁺ 和钠吸附比(SAR),但其他有机物料的处理对 pH、EC 值和盐分等无显著影响;淋洗作用使表层土壤(0—20 cm)盐分向土壤深层移动,淋洗结束后,各处理的土壤 EC 值、水溶性总盐、交换性 Na⁺ 和 ESP 随着土层深度的增加而升高;与 CK 处理相比,GG 和 YG 处理显著提高 0—20 cm 土层的有机质含量,分别提高 23.97% 和 20.53%。研究结果为有机物料的添加对盐碱地淋洗过程中盐分和有机质的变化提供了理论的数据参考。

关键词: 有机物料; 盐碱土; 土柱淋洗

中图分类号: S154.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0376-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.06.050

Study on Leaching Effect of Different Organic Materials on Saline-alkali Soil

WANG Shuhua¹, CHEN Shuang¹, WANG Yue¹, LI Yuanbin¹, XU Luyao¹,

WANG Qiang², LI Yingfei², XUE Pengfei², JIAO Jiaguo¹, LI Huixin¹, HU Feng¹

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Jiangsu

Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210095; 2.Shandong Bohua High Efficiency Ecological Agriculture Science & Technology Co., Ltd., Binzhou, Shandong 256500)

Abstract: In this study, the effects of different organic materials on the salinity and dissolved organic carbon (DOC) of leachate and the salinity, organic matter and microbial carbon and nitrogen in different depths of soil were studied by soil column simulation test, including five different treatments: organic silicon functional fertilizer (WO), particle organic materials (YP), powder organic materials (GG), 50% particle organic materials and 50% powder organic materials mixed respectively (YG) and no organic materials (CK). The results showed that the addition of organic materials increased the EC value and water-soluble Ca²⁺, Mg²⁺ and Na⁺ concentration in the leachate. The contents of salt ions leached by YP treatment were the highest, but the content of DOC in the leachate treated by WO was the lowest. Compared with CK treatment, WO treatment significantly increased the water-soluble Ca²⁺, Mg²⁺ and K⁺ contents in each depth of soil layer, significantly reduced the pH, exchangeable Na⁺, exchangeable solium percentage (ESP) in each depth of soil layer, and water-soluble Na⁺, sodium absorption ratio (SAR) in 0—20 cm soil layer, but there was no significant difference in pH, EC and salinity between other organic materials and CK treatment. Leaching moved the soil salt from the surface (0—20 cm) to the deeper layers. After leaching, EC value, water-soluble total salt, exchangeable Na⁺ and ESP increased with the increase of soil depth. Compared with CK treatment, GG and YG treatment significantly increased the content of organic matter in 0—20 cm soil layer by 23.97% and

收稿日期: 2021-05-25

资助项目: 山东省重点研发计划项目(2019JZZY020614)

第一作者: 王舒华(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事盐碱地的改良研究。E-mail: 2019803182@njau.edu.cn

通信作者: 焦加国(1981—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤生态学的研究。E-mail: jiaguojiao@njau.edu.cn

20.53%, respectively. These results could provide a theoretical data reference for the changes of salt and organic matter in the process of saline-alkali soil leaching with the addition of organic materials.

Keywords: organic materials; saline-alkali soil; soil column leaching

黄河三角洲地区是我国盐渍土较集中的区域,现有盐渍土 $1.67 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占黄河三角洲后备土地资源的 34.73%, 并且盐渍土以每年 $1.3 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 的速度增加^[1-2], 土地的盐碱化严重制约着该区域农业的可持续发展。有机物料比如堆肥、生物有机肥、秸秆、生物质炭、腐殖酸等, 在盐碱地上的应用已经得到广泛的研究。有机物料的施用可以改善土壤的物理、化学特性以及微生物群落组成、多样性和功能性^[3], 但是不同的有机物料对盐碱土的改良机制不同。有机物料可以通过增加土壤有机质、改善团聚体微结构、有效增加有机碳的封存, 促进盐分淋失来改良盐碱地^[4]; 有机物料的施用还可以通过提高土壤剖面的 CO_2 分压, 降低土壤溶液的 pH, 增加原生 CaCO_3 矿物溶解^[5], 提高土壤中 Ca^{2+} 的含量, 或者其本身含有 Ca^{2+} , 通过 Ca^{2+} 替换土壤胶体吸附的 Na^+ , 降低土壤的碱度^[6]。腐植酸作为土壤和沉积物有机质的主要成分之一, 在结构稳定过程中发挥着重要作用。腐植酸可以通过释放 H^+ , H^+ 和 OH^- 离子生成 H_2O , 降低土壤 pH, 改善土壤结构, 提高土壤渗透性, 促进 Na^+ 的淋洗, 从而降低土壤 EC 值^[7]。添加腐殖酸还可以改良黏质盐土水分特性, 提高土壤的保水持水能力, 降低土壤含盐量^[8]。有机硅功能肥能促进土壤团粒结构形成, 增加土壤孔隙度, 加速盐分

淋洗, 增加有机质, 活化土壤养分^[9]。

本研究通过土柱模拟试验, 探究不同有机物料对盐碱土盐分、有机质等的影响, 试图筛选出最合适的土壤有机物料, 为黄河三角洲盐碱地的改良提供理论数据支撑和田间应用参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤 供试土壤来自山东省滨州市山东博华高效生态农业科技有限公司吕艺基地, 土地利用类型为设施蔬菜种植土, 属于石膏性盐土, 碳酸钙含量为 $(93.61 \pm 2.28) \text{ g/kg}$ 。土壤质地为壤质黏土, 砂粒(0.02~2 mm)、粉(砂)粒(0.02~0.002 mm)和黏粒($<0.002 \text{ mm}$)含量分别为 38.79%, 16.49% 和 44.72%, pH、EC 和水溶性总盐含量分别为 (8.55 ± 0.03) , $(361.00 \pm 9.42) \mu\text{S/cm}$ 和 $(1.07 \pm 0.03) \text{ g/kg}$, 全量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 含量分别为 (67.53 ± 0.77) , (14.96 ± 1.50) , (26.89 ± 0.81) , $(5.35 \pm 0.80) \text{ g/kg}$ 。

1.1.2 供试有机物料 选择不同类型的有机物料进行淋洗试验(表 1)。有机硅功能肥, 命名为 WO; 颗粒状有机物料, 命名 YP, 主要组成为麦饭石、腐殖酸、生物酶; 粉末状有机物料, 命名 GG, 主要组成为腐殖酸、有机硅; 50% 的 YP 和 50% 的 GG 混合, 组成 YG。

表 1 土壤有机物料的基本理化性质

指标	WO	YP	GG	YG
$\text{pH}_{5,1}$	5.05 ± 0.01	7.11 ± 0.02	11.42 ± 0	9.14 ± 0.01
$\text{EC}_{5,1}/(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	—	12.24 ± 0.03	8.75 ± 0.14	12.76 ± 0.22
全 $\text{Ca}^{2+}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	10.09 ± 0.67	16.40 ± 2.92	46.24 ± 2.37	33.22 ± 6.53
全 $\text{Mg}^{2+}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	1.94 ± 0.42	10.85 ± 1.46	1.48 ± 0.15	4.17 ± 0.82
全 $\text{K}^+ /(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	253.40 ± 9.61	25.86 ± 0.57	57.14 ± 2.16	41.66 ± 0.89
全 $\text{Na}^+ /(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	12.54 ± 0.89	76.12 ± 4.64	31.97 ± 3.81	52.35 ± 2.63
水溶性 $\text{Ca}^{2+}/(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	2.08 ± 0.06	14.43 ± 0.02	20.40 ± 1.53	6.59 ± 0.19
水溶性 $\text{Mg}^{2+}/(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	4.32 ± 0.11	11.80 ± 0.02	2.40 ± 0.14	1.15 ± 0.01
水溶性 $\text{K}^+ /(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	742.27 ± 4.83	26.66 ± 0.65	69.14 ± 3.67	84.57 ± 0.08
水溶性 $\text{Na}^+ /(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	21.91 ± 0.27	379.16 ± 0.89	53.18 ± 2.82	237.66 ± 1.21
$\text{SAR}/(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})^{1/2}$	12.25 ± 0.01	104.70 ± 0.33	15.76 ± 0.48	120.87 ± 2.18
有机质/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	115.98 ± 11.88	228.77 ± 20.12	568.72 ± 13.01	398.00 ± 9.38

注:“—”表示低于检测限, 表中数据为平均值 \pm 标准差。

1.2 试验设计

首先通过浸出试验, 探究质量分数分别为 0.1%, 0.3% 和 0.5% 的有机物料对土壤盐分浸出的影响。结果表明, 土壤有机物料的最佳用量为 0.3% (有机物料重量/土壤重量, 即为 7500 kg/hm^2), 据此布置土柱模拟试验。土柱模拟试验设置 WO (在 0—20 cm 土壤中添加 0.3% 的有机硅功能肥)、YP (在 0—20

cm 土壤中添加 0.3% 的颗粒状有机物料)、GG (在 0—20 cm 土壤中添加 0.3% 的粉末状有机物料)、YG (在 0—20 cm 土壤中添加 0.15% 的颗粒状有机物料和 0.15% 的粉末状有机物料) 以及 CK (不添加任何有机物料) 共 5 个处理, 每个处理 3 次重复。

定制的 PVC 管规格为直径 15 cm、高 90 cm, 且在垂直高度为 20, 40, 60 cm 处有直径为 3 cm 的小

孔,方便采样(试验过程中堵住小孔);PVC管底部有1个阀门,用来收集渗滤液。装入土壤前用凡士林将PVC管内侧涂抹均匀,以防止渗透过程中产生主流。在PVC管底部放置10cm石英砂作为过滤层,并覆盖2张滤纸,防止土壤与石英砂混合。

风干土过2mm筛,先在PVC管中装入土壤(20—60cm土层,无有机物料),然后在0—20cm处装入混合有不同有机物料的土壤。空白对照不添加任何有机物料。PVC管中土壤容重约 1.25 g/cm^3 。装土完成后,浇水4.5L,静置48h,使PVC管中的土壤达到田间持水量(33%左右)。

土柱模拟试验于2020年8月24日至10月8日在南京农业大学资源与环境科学学院温室进行,共培养42天,期间每3天用自来水淋洗1次。每次淋水体积根据当地降水量及灌水定额来确定^[10],共分14次进行淋洗,每次淋水体积约300mL。自来水的理化性质为:pH、EC和可溶性有机碳(DOC)分别为 (7.80 ± 0.15) , $(276.36\pm 27.95)\mu\text{S/cm}$ 和 $(10.03\pm 2.56)\text{ mg/L}$,水溶性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 含量分别为 (10.07 ± 0.56) , (0.86 ± 0.05) , (3.70 ± 0.21) , $(5.68\pm 0.59)\text{ mmol/L}$,钠吸附比(SAR)为 $(2.17\pm 0.25)(\text{mmol/L})^{1/2}$ 。

1.3 样品的采集与测定

1.3.1 渗滤液和土壤样品的采集 在试验过程中每次淋水后的第3天收集渗滤液,共收集14次渗滤液;试验结束后,进行破坏性采样,分别采集0—20,20—40,40—60cm土层的土壤。土壤分为2部分:一部分作为鲜样,过10目筛后放入4℃冰箱保存;一部分进行风干,分别过10,20,100目的孔筛,待测。

1.3.2 渗滤液和土壤的测定 土壤理化性质测定方法参照《土壤农化分析》^[11]进行;土壤pH和EC使用玻璃电极酸度计和电导率测定仪测定;水溶性盐基离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Na^+)采用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES)测定;DOC采用碳氮分析仪测定;水溶性总盐采用电导法测定;阳离子交换量(CEC)采用乙酸钠—火焰光度法测定;交换性 Na^+ 采用 $\text{NH}_4\text{OAc-NH}_4\text{OH}$ 火焰光度法测定;土壤有机质采用重铬酸钾容量法—外加热法测定;土壤微生物生物量碳/氮(MBC/MBN)测定方法为:土壤样品用氯仿熏蒸24h后用 $0.5\text{ mol/L K}_2\text{SO}_4$ 浸提,根据熏蒸土壤和未熏蒸土壤测定的碳/氮量的差值和提取效率估算土壤微生物生物量碳/氮。

碱化度(ESP)和钠吸附比(SAR)的计算公式:

$$\text{ESP} = \frac{\text{可交换性 Na}^+}{\text{CEC}} \times 100\%; \text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}}$$

1.4 数据统计及分析

试验数据利用Microsoft Excel 2016、SPSS 20.0软件进行统计分析,用Microsoft Excel 2016进行图表制作,采用Duncan检验法($p < 0.05$)进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同有机物料施用条件下渗滤液EC、盐分、SAR和DOC的动态变化

2.1.1 不同有机物料施用条件下渗滤液EC的动态变化 添加有机物料处理的渗滤液EC值普遍高于CK处理(图1)。各处理渗滤液的EC值在整个淋洗周期里出现相同的趋势,即在刚开始时EC急剧下降(1~2次淋洗),中期下降趋势变缓(3~11次淋洗),最后趋于平稳(12~14次淋洗)。与第1次淋洗相比,最后1次淋洗WO、YP、GG、YG和CK处理的渗滤液EC值降幅分别为79.46%,79.58%,83.59%,80.44%和82.72%。

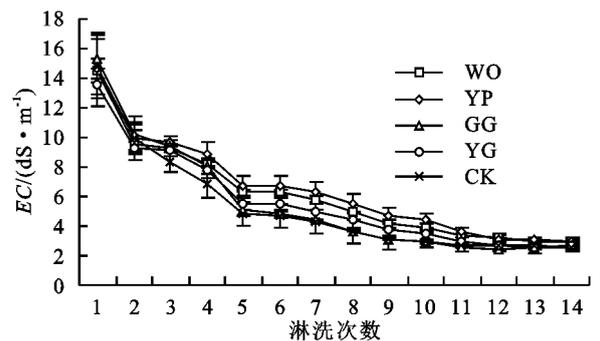


图1 不同有机物料施用条件下渗滤液EC的动态变化

2.1.2 不同有机物料施用条件下渗滤液盐分和SAR的动态变化 整体而言,整个淋洗周期内YP处理的渗滤液 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 含量最高,其次为WO处理,再次为YG处理,GG处理和CK处理相当(图2)。随淋洗次数的增加,各处理渗滤液 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 含量逐渐下降,并且在第12次淋洗后趋于平稳。与第1次淋洗相比,最后1次淋洗各处理渗滤液 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 含量的降幅分别为87.95%~89.69%,74.82%~81.61%,72.96%~84.25%,46.84%~55.68%。

由图3可知,在前11次淋洗,CK处理渗滤液的SAR值最高,其次为GG处理,YP处理最低。但是在第12次淋洗后,YP处理渗滤液的SAR迅速升高,而CK处理的SAR在各个处理中降到最低。在最后1次淋洗,各处理渗滤液SAR值大小顺序为 $\text{WO} > \text{YP} > \text{YG} > \text{GG} > \text{CK}$,与第1次淋洗相比(SAR值在 $3.53\sim 3.61(\text{cmol/L})^{1/2}$),SAR值有所增加。

2.1.3 不同有机物料施用条件下渗滤液DOC的动态变化 由图3可知,在整个灌溉淋洗周期,不同处理之间的渗滤液中DOC的变化趋势相似,即在淋洗

前期为下降较快(前 3 次淋洗),然后趋于平稳。

在整个淋洗过程中,WO、YP、GG、YG 和 CK 处理的渗滤液 DOC 变化范围分别为 206.79~396.66, 249.57~499.46, 248.99~405.60, 256.82~448.93,

245.29~421.93 mg/L。在整个淋洗周期,在各个处理的渗滤中,WO 处理的 DOC 含量最低,且每次渗滤液的 DOC 值都小于 CK 处理,YP 处理的 DOC 含量最高。

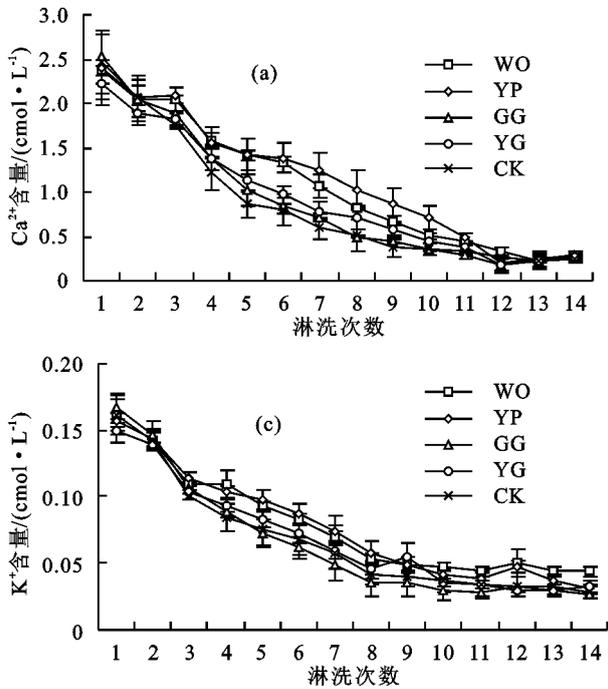


图 2 不同有机物料施用条件下渗滤液的水溶性盐基离子的动态变化

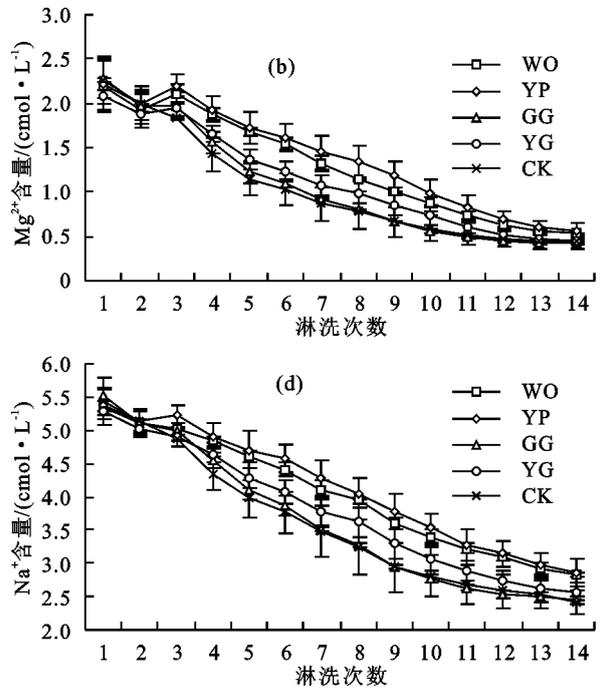


图 3 不同有机物料施用条件下渗滤液 SAR 和 DOC 的动态变化

2.2 不同有机物料施用对土壤盐分和基本理化性质的影响

2.2.1 不同有机物料施用条件下土壤 pH 和 EC 的变化

由表 2 可知,经过淋洗,与 CK 处理相比,WO 处理显著降低不同深度土层的 pH ($p < 0.05$)。由于淋溶作用,除 WO 处理,其他各处理 0—20 cm 土层的 pH 均相应显著低于 20—40, 40—60 cm 土层。对于土壤 EC 而言,与 CK 处理相比,WO 处理显著提高 0—20, 20—40, 40—60 cm 土层的 EC 值,但其他处理无显著影响。土壤 EC 值随着土层深度增加而增加。淋洗结束时,WO、YP、GG、YG 和 CK 处理 0—20 cm 土层 EC 值较初始值降幅分别为 48.28%, 55.07%, 52.85%, 51.77 和 56.80%。

2.2.2 不同有机物料施用条件下土壤盐分的变化

(1) 不同有机物料对土壤水溶性盐分的影响。淋

洗后土壤水溶性总盐的变化趋势与土壤 EC 一样,与 CK 处理相比,WO 处理显著提高不同深度土层的水溶性总盐 ($p < 0.05$) (图 4a)。各处理 0—20 cm 土层的水溶性总盐均相应显著低于 20—40, 40—60 cm 土层。淋洗结束时,WO、YP、GG、YG 和 CK 处理的 0—20 cm 土层土壤水溶性总盐较初始值分别下降 48.62%, 55.46%, 53.22%, 52.13 和 57.19%。

与 CK 处理相比,WO 处理显著提高各深度土层的水溶性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 含量(图 5), 0—20, 20—40, 40—60 cm 土层增幅分别为 11.42%, 56.79% 和 86.58%, 32.81%, 109.90% 和 142.43%, 189.71%, 81.82% 和 72.73%。但 WO 处理的水溶性 Na^{+} 含量在 0—20 cm 土层显著降低,而在 20—40, 40—60 cm 土层显著增加。淋洗结束时,与初始值相比,各处理土壤水溶性 Mg^{2+} 、 K^{+} 含量降幅最大,分别为 46.32%~

77.86%, 55.77%~86.49%, 水溶性 Na^+ 含量降幅为 4.05%~75.19%; 而水溶性 Ca^{2+} 含量较初始时均有所提高, 增幅为 32.73%~147.55%。

淋洗使各处理不同深度土层的 SAR 较初始值相

比有所降低(图 4b)。淋洗结束时, WO、YP、GG、YG 和 CK 处理的 0—20 cm 土层 SAR 值与初始值相比, 降幅为 54.93%~76.99%, 且各处理 0—20 cm 土层的 SAR 值显著低于 20—40, 40—60 cm 土层。

表 2 土壤基本理化性质的变化

指标	初始值(淋洗前土壤含量)	处理组	淋洗后土壤含量			均值	与初始值之比
			0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm		
pH	8.55±0.03	WO	8.33±0.07Ba	8.42±0.02Da	8.37±0.14Ba	8.37	0.98
		YP	8.52±0.01Ab	8.70±0.01Ca	8.74±0.03Aa	8.65	1.01
		GG	8.53±0.05Ab	8.83±0.03Aa	8.73±0.06Aa	8.70	1.02
		YG	8.56±0.03Ab	8.77±0.03Ba	8.81±0.02Aa	8.71	1.02
		CK	8.53±0.07Ac	8.67±0.03Cb	8.83±0.03Aa	8.68	1.02
$EC/(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	361.00±9.42	WO	186.70±18.90Ab	348.33±16.21Aa	426.33±52.58Aa	320.46	0.89
		YP	162.17±2.79Bc	227.00±5.35Bb	249.67±4.50Ba	212.94	0.59
		GG	170.20±5.34ABc	215.67±4.64Bb	257.00±24.75Ba	214.29	0.59
		YG	174.10±7.96ABb	233.33±9.03Ba	250.33±7.76Ba	219.26	0.61
		CK	155.97±4.97Bc	209.53±10.37Bb	242.67±2.06Ba	202.72	0.56
$CEC/(\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1})$	36.69±0.48	WO	32.82±0.69Aa	34.91±1.74Aa	33.86±0.96Aa	33.85	0.92
		YP	34.40±1.36Aa	35.20±0.49Aa	34.77±1.64Aa	34.79	0.95
		GG	35.72±1.88Aa	33.71±2.01Aa	35.00±1.51Aa	34.81	0.95
		YG	34.45±1.12Aa	34.02±0.83Aa	34.47±0.63Aa	34.31	0.94
		CK	35.42±0.93Aa	35.07±0.15Aa	35.30±0.68Aa	35.26	0.96
交换性 Na^+ / ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.09±0.23	WO	0.25±0.02Bc	0.57±0.03Cb	0.71±0.08Ba	0.51	0.47
		YP	0.37±0.14ABb	0.97±0.04ABa	1.19±0.13Aa	0.84	0.78
		GG	0.46±0.02Ac	0.97±0.08ABb	1.23±0.04Aa	0.89	0.82
		YG	0.52±0.01Ac	1.09±0.03Ab	1.30±0.07Aa	0.97	0.89
		CK	0.44±0.05Ac	0.88±0.07Bb	1.16±0.09Aa	0.83	0.76
ESP/%	2.97±0.65	WO	0.77±0.08Bc	1.62±0.12Cb	2.11±0.21Ba	1.50	0.51
		YP	1.08±0.43ABb	2.76±0.12Ba	3.44±0.47Aa	2.43	0.82
		GG	1.28±0.08Ac	2.89±0.26ABb	3.51±0.13Aa	2.56	0.86
		YG	1.51±0.08Ac	3.19±0.08Ab	3.78±0.20Aa	2.83	0.95
		CK	1.39±0.09Ac	2.50±0.20Bb	3.29±0.22Aa	2.39	0.81
有机质/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	27.46±2.99	WO	19.77±1.02Bb	22.84±1.52Aa	23.64±0.67Aa	22.08	0.80
		YP	20.68±0.81Ba	22.30±1.18Aa	22.98±1.98Aa	21.99	0.80
		GG	27.23±0.88Aa	23.40±2.39Aa	23.46±0.98Aa	24.70	0.90
		YG	26.48±0.58Aa	21.95±1.45Ab	21.61±0.51Ab	23.35	0.85
		CK	21.97±1.30Ba	21.50±0.31Aa	22.18±1.12Aa	21.88	0.80

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示不同处理同一深度土层间差异显著($p<0.05$);同行不同小写字母表示同一处理不同深度土层间差异显著($p<0.05$)。

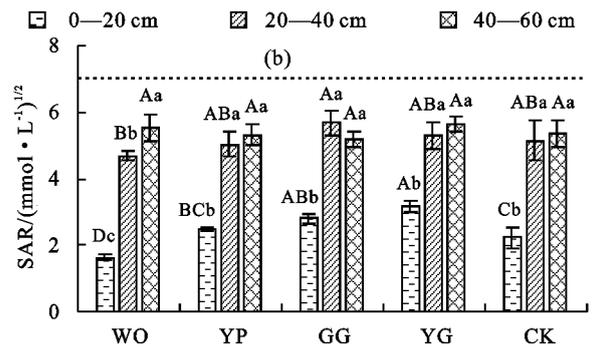
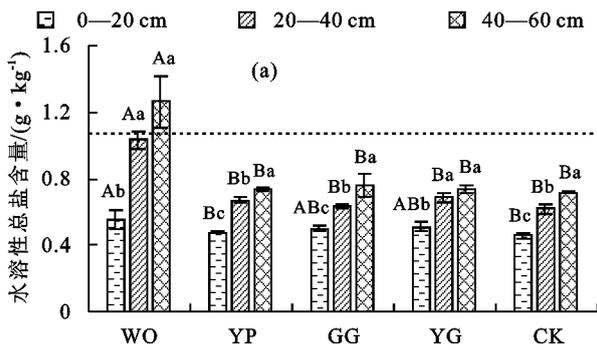
(2) 不同有机物料对土壤 CEC、交换性 Na^+ 和 ESP 的影响。由表 2 可知, 添加有机物料的处理组与 CK 处理相比各深度土层的 CEC 无显著的差异。但淋洗使各处理不同深度土层的 CEC 有所下降。土壤 ESP 的变化趋势与土壤交换性 Na^+ 的变化趋势相似。与 CK 处理相比, WO 处理中 0—20, 20—40, 40—60 cm 深度土层的交换性 Na^+ 和 ESP 分别显著降低 41.96%, 35.64%, 38.60% 和 44.39%, 35.15%, 35.88%, 而其他添加有机物料的处理较 CK 处理相比差异不显著。各处理中土壤的交换性 Na^+ 和 ESP 随土层深度的增加而增加。

(3) 不同有机物料施用条件下土壤有机质和微生物生物量碳氮的变化。由表 2 可知, 淋洗降低各处理的土壤有机质。与 CK 处理相比, GG 处理和 YG 处理显著提高 0—20 cm 土层的有机质含量, 分别提高 23.97% 和 20.53%。淋洗结束后, 各处理的 3 个深度土层的有机质平均含量大小为 GG>YG>WO>YP>CK, 平均值分别为 24.70, 23.35, 22.08, 21.99, 21.88 g/kg。

由图 6 可知, 对于 0—20 cm 土层, 与 CK 处理相比, WO 和 YG 处理中 MBC 分别提高 2.75% 和 9.22%, MBN 分别提高 7.852% 和 44.55%, 但差异不

显著。各处理在不同深度土层之间的 MBC 和 MBN

之间无显著的差异。



注:图中虚线代表初始值,即淋洗前土壤的理化值;图柱上方不同大写字母表示不同处理同一深度土层间差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示同一处理不同深度土层间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 4 不同有机物料施用对土壤水溶性总盐和 SAR 的影响

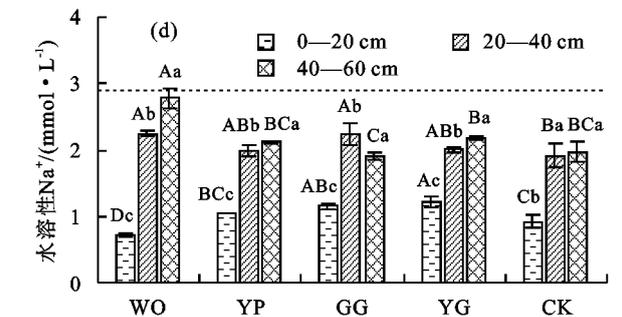
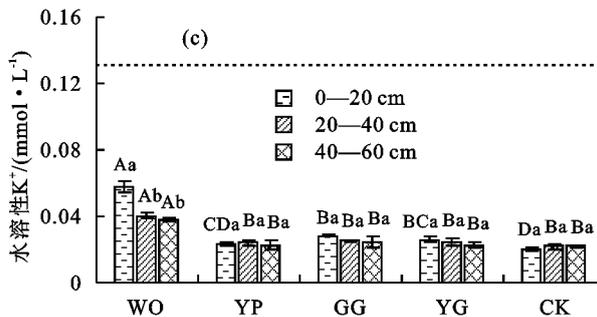
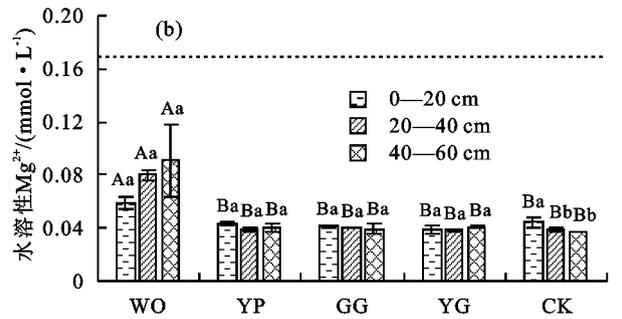
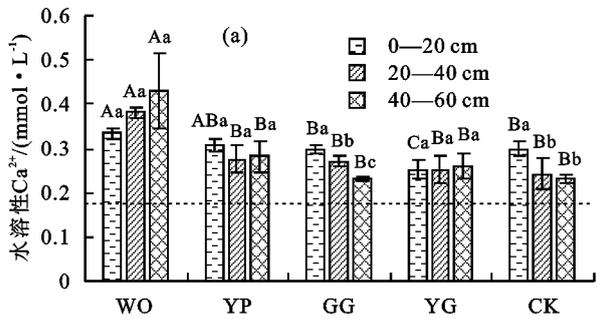


图 5 不同有机物料施用对土壤水溶性盐基离子的影响

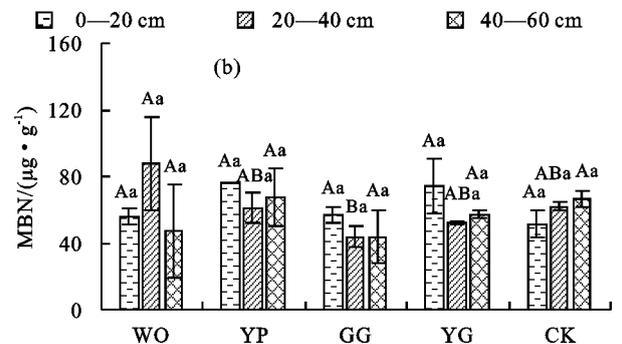
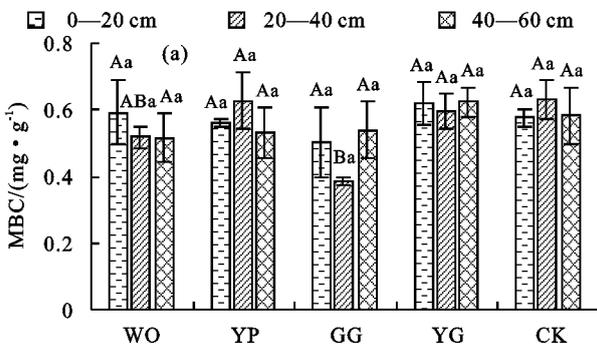


图 6 不同有机物料施用对土壤 MBC 和 MBN 的影响

3 讨论

3.1 不同有机物料对渗滤液 EC、盐分和 DOC 的影响

3.1.1 不同有机物料对渗滤液盐分的影响 本研究中,添加有机物料的处理组中渗滤液 EC 值和水溶性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^{+} 含量均有所增加,与 Chaganti 等^[12]的研究结果一致。这可能是因为有机物料的矿化作用,将有机物质固定的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 释放至渗滤液中^[13],且有机物料可有效提高二价离子替换 Na^{+}

的土壤交换位点并阻止 Na^{+} 进入土壤交换位点^[14]。有机物料的添加还可能促进团聚体的形成,有利于盐分的淋洗;并且有机物料本身含有盐分,也可能会导致渗滤液中盐分含量升高,而 EC 值是反映可溶性盐总量的重要指标,所以 EC 值随着盐分含量的升高而增加。本试验中,对于水溶性 K^{+} ,除 GG 处理外,其他有机物料的处理渗滤液中 K^{+} 含量普遍高于 CK 处理,可能是由于有机物料本身含有的钾元素被释放出

来,导致渗滤液中水溶性 K^+ 含量升高。GG 本身的钾含量高于 YP 处理,但是渗滤液中的水溶性 K^+ 含量低于 YP 处理,可能是由于 GG 为粉状,比表面积大,有利于吸附 K^+ 。黄瑞瑞^[15]研究表明,添加腐殖酸在有效提高土壤持水性能的同时也增加了土壤对盐分的吸附量。综合而言,YP 处理渗滤液的盐分最多,其次为 WO 处理。

随着淋洗次数的增加,渗滤液的 EC 值和水溶性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 含量不断下降,因为土壤中的可溶性盐分随着水分的运行从土壤表层向深层逐渐移动,进入到渗滤液中,随着淋洗的进行,土壤中可迁移的盐分含量下降,渗滤液的 EC 值和盐基离子含量也下降并趋于平衡。Wang 等^[10]的室内模拟试验结果表明,灌溉引起的淋溶降低不同深度土层中的盐分,而反复灌溉后可迁移的离子含量降低。

3.1.2 不同有机物料对渗滤液 DOC 的影响 土壤 DOC 是指以有机态形式存在于土壤溶液有机物中的碳。本试验中,WO 处理的渗滤液中 DOC 含量最低,表明淋洗损失的有机碳含量最少。且各处理渗滤液 DOC 含量在第 1 次淋洗时达到最大值,说明土壤淋洗首先会将一部分易溶解有机碳释放出来,随着淋洗次数的增加,土壤可以解吸出来的可溶性有机碳越来越少,因此,渗滤液 DOC 逐渐趋于稳定。胡琴^[2]的不同灌水量对盐碱地水盐及有机碳迁移影响的研究结果表明,在整个淋溶周期中不同灌水量处理的土柱淋溶液有机碳含量均表现为先升高后下降,并且认为土壤在灌水后首先淋洗掉一部分易溶解的有机碳;张艳艳^[16]研究表明,淋溶初期,淋出液 DOC 中腐殖化程度较小、团聚化程度较低的小分子物质较容易发生淋失迁移;王红霞^[17]对土壤 DOC 迁移淋溶特征的研究中,有机肥处理组的淋出液中 DOC 的含量变化显著大于对照和化肥处理,这与有机肥提取液含有丰富的可溶性有机物有关。

3.2 不同有机物料对土壤 pH、EC、盐分、有机质和微生物生物量碳氮的影响

3.2.1 不同有机物料对土壤 pH、EC 和盐分的影响

本试验中,与其他处理相比,WO 处理显著降低各深度土层 pH,可能是有机硅功能肥 pH 呈酸性,有利于中和碱性土壤。但其他添加有机物料的处理组中 20—40,40—60 cm 土层 pH 较初始值有所升高,可能是由于有机物料的组分不同导致。有研究^[18]表明,有机物料的施用可以降低土壤含盐量、SAR 和 pH。但王琳琳^[19]研究表明,绿色废弃物堆肥、草炭和混合改良剂(绿色废弃物堆肥、草炭和糠醛渣混合)3 种有机物料导致盐碱土土壤 pH 增加,可能是由于这些有机物料具有较高的基本阳离子含量。本试验中,YP、GG 和 YG 的主要成分是腐殖酸,腐殖酸是一种带负电的胶体,并且是一种弱酸,能与土壤中各种

阳离子结合,形成腐植酸—腐植酸盐缓冲系统,调节土壤酸碱度^[20]。本研究中,加入腐殖酸性肥料的处理组与 CK 处理相比土壤 pH 无显著变化,这与王倩姿等^[21]的研究结果相似,可能是由于本试验中加入的腐殖酸性肥料的 pH 偏高,有机物料 YP 呈弱碱性,GG 和 YG 呈强碱性,并且室内培养时间较短,有机物料的 pH 调节作用还没充分发挥出来。

综合来看,本试验各有机物料处理中,有机硅功能肥(WO)处理对于盐碱土的改良效果最好,显著提高各深度土层水溶性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 含量,显著降低 0—20 cm 土层的水溶性 Na^+ 、SAR 和各深度土层的交换性 Na^+ 和 ESP。这可能是由于有机硅功能肥呈酸性,可促进土壤难溶性盐分尤其是碳酸盐的溶解;另一方面,该处理中有机质固定的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 通过矿化释放出来,且有机硅功能肥还有丰富的钾元素,有利于替换土壤胶体吸附的 Na^+ ,从而降低土壤交换性 Na^+ 含量。毛涛^[22]研究表明,有机硅大量元素水溶肥和有机硅水溶缓释复合肥配合施用后,耕层土壤(0—20 cm)的脱盐率达到 4.34%~5.78%。土壤 SAR 是表征土壤盐碱化的一个重要指标。本试验中,与 CK 处理相比,腐殖酸处理组(YP 处理、GG 处理和 YG 处理)中土壤 SAR 值有所上升,这与张乐等^[23]的研究结果恰好相反。这可能是因为施用腐殖酸的种类不同,本试验中腐殖酸性有机物料含有的盐分较高,导致土壤的水溶性 Na^+ 含量升高,从而使 SAR 值也升高。

淋洗对土壤剖面的盐分有浸出作用,模拟降雨的灌溉和淋洗过程能有效降低土壤盐分含量^[24]。王鹏山^[25]研究表明,淋洗之后土柱土壤的全盐含量显著下降,不同水量淋洗下,表层土壤均已降到较低的值,并随着土层的加深,含盐量逐渐上升。本研究中,淋洗促进表层(0—20 cm)土壤盐分随着水分向土壤深层运移。各处理中,不同深度土层的 4 种可溶性盐基离子中,只有 Ca^{2+} 高于初始值,可能是由于土壤中碳酸钙含量丰富,淋洗有利于部分碳酸盐的溶解。

3.2.2 不同有机物料对有机质和微生物生物量碳氮的影响

淋洗导致各处理不同深度土层的有机质含量较初始值相比有所降低。而有机物料的添加可以增加土壤有机质含量。王涵^[26]研究表明,4 种有机物料(有机肥、生物有机肥、有机无机复合肥、发酵菌糠)均能够有效提高土壤有机质含量,并降低土壤 pH 和水溶性盐含量。Sastre-Conde 等^[27]研究结果表明,淋洗降低土壤养分水平,基于有机物的一些特性,特别是可以提供碳、氮、磷等营养物质,在淋洗后的土壤中配合施用有机物料有利于盐碱地的修复。

有机物料的施用,有利于改善盐碱地土壤结构,增加碳固存,提高微生物活动。Luo 等^[28]的盐碱土水稻种植田间试验结果表明,农家堆肥处理显著增加总 PLFAs 和微生物群落;Wu 等^[29]研究表明,有机

物料可以提高土壤微生物量、线虫丰度和螨虫丰度。但本试验中,添加有机物料的处理组并没有提高土壤MBC和MBN,可能是有机物料不同导致^[30],且由于试验培养时间短,有机物料还没有充分发挥其作用。

4 结论

有机物料的添加可以提高渗滤液EC值和水溶性Ca²⁺、Mg²⁺和Na⁺含量;与CK处理相比,WO处理的各深度土层水溶性Ca²⁺、Mg²⁺和K⁺显著增加,增幅达11.42%~189.71%,而土壤pH、交换性Na⁺和ESP显著降低,其他有机物料无显著变化。综合而言,本试验中有机硅功能肥对于盐碱地的改良效果最好;淋洗使表层0—20 cm土壤盐分向土壤深层移动。与CK处理相比,GG处理和YG处理显著提高0—20 cm土层的有机质含量,分别提高23.97%和20.53%。

参考文献:

- [1] 李贻学,东野光亮,李新举.黄河三角洲盐渍土可持续利用对策[J].水土保持学报,2003,17(2):55-58.
- [2] 胡琴.灌溉水量对盐碱地有机碳及水盐运移影响研究[D].山东泰安:山东农业大学,2019.
- [3] Cesarano G, De Filippis F, La Storia A, et al. Organic amendment type and application frequency affect crop yields, soil fertility and microbiome composition[J].Applied Soil Ecology,2017,120:254-264.
- [4] Liu M L, Wang C, Liu X L, et al. 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,2020,156:e103705.
- [5] Li F H, Keren R. Calcareous sodic soil reclamation as affected by corn stalk application and incubation: A laboratory study[J].Pedosphere,2009,19(4):465-475.
- [6] 王德领,诸葛玉平,杨全刚,等.3种改良剂对滨海盐碱地土壤理化性状及玉米生长的影响[J].农业资源与环境学报,2021,38(1):20-27.
- [7] 孙在金,黄占斌,陆兆华.不同环境材料对黄河三角洲滨海盐碱化土壤的改良效应[J].水土保持学报,2013,27(4):186-190.
- [8] 夏立娟.腐殖酸对粘质盐土水分特性的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2019.
- [9] 有机硅功能肥治理技术让盐碱地成良田[J].中国粉体工业,2020(1):37-38.
- [10] Wang S T, Feng Q, Zhou Y P, et al. Dynamic changes in water and salinity in saline-alkali soils after simulated irrigation and leaching [J].PLoS One, 2017, 12(11):e0187536.
- [11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2010.
- [12] Chaganti V N, Crohn D M. Evaluating the relative contribution of physiochemical and biological factors in ameliorating a saline-sodic soil amended with composts and biochar and leached with reclaimed water[J].Geoderma,2015,259/260:45-55.
- [13] Jalali M, Ranjbar F. Effects of sodic water on soil sodicity and nutrient leaching in poultry and sheep manure amended soils[J].Geoderma,2009,153(1):194-204.
- [14] Chaganti V N, Crohn D M, Šimůnek J. Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline-sodic soil with moderate SAR reclaimed water[J].Agricultural Water Management,2015,158:255-265.
- [15] 黄瑞瑞.腐殖酸对滨海粘质盐土脱盐效果的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2019.
- [16] 张艳艳.胶州湾滨海湿地土壤溶解性有机碳淋溶特征研究[D].山东青岛:青岛大学,2016.
- [17] 王红霞.土壤中溶解性有机碳、氮及其迁移淋溶特性研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [18] 冀拯宇,周吉祥,张贺,等.不同土壤改良剂对盐碱土壤化学性质和有机碳库的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(8):1759-1767.
- [19] 王琳琳.天津滨海盐土隔盐修复、有机改良及造林效果评估[D].北京:北京林业大学,2014.
- [20] 黄占斌,张博伦,田原宇,等.腐植酸在土壤改良中的研究与应用[J].腐植酸,2017(5):1-4,25.
- [21] 王倩姿,王玉,孙志梅,等.腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果[J].应用生态学报,2019,30(4):1227-1234.
- [22] 毛涛.有机硅肥料配施对张掖市盐碱地甜菜生产的影响试验初报[J].甘肃农业科技,2019(6):15-18.
- [23] 张乐,徐平平,李素艳,等.有机—无机复合改良剂对滨海盐碱地的改良效应研究[J].中国水土保持科学,2017,15(2):92-99.
- [24] Wang J, Yuan G D, Lu J, et al. Leaching of salt-affected soil amended by leonardite[J].Physical Geography,2020,42(3):226-239.
- [25] 王鹏山.不同淋洗方式下滨海盐渍土改良效果研究[D].北京:北京林业大学,2012.
- [26] 王涵.不同有机物料对滨海盐碱土改良效果的研究[D].长春:吉林农业大学,2018.
- [27] Sastre-Conde I, Carmen Lobo M, Icela Beltran-Hernandez R, et al. Remediation of saline soils by a two-step process: Washing and amendment with sludge[J].Geoderma,2015,247:140-150.
- [28] Luo S S, Wang S J, Tian L, et al. Aggregate-related changes in soil microbial communities under different ameliorant applications in saline-sodic soils[J].Geoderma,2018,329:108-117.
- [29] Wu Y P, Li Y F, Zheng C Y, et al. Organic amendment application influence soil organism abundance in saline alkali soil[J].European Journal of Soil Biology,2013,54:32-40.
- [30] Wu Y P, Li Y F, Zhang Y, et al. Responses of saline soil properties and cotton growth to different organic amendments[J].Pedosphere,2018,28(3):521-529.