

淹水条件下改良剂对苏打盐化 草甸土的洗盐效应

张明聪^{1,2}, 周 伟³, 石礼文¹, 王承昊¹,
杜吉到^{1,2}, 吴耀坤⁴, 张玉先¹

(1. 黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 黑龙江省盐碱地改良工程技术研究中心, 黑龙江 大庆 163319;
3. 大庆市启隆农业科技有限公司, 黑龙江 大庆 163000; 4. 黑龙江省农业科学院大庆分院, 黑龙江 大庆 163319)

摘 要:为明确改良剂在苏打盐化草甸土不同深度土层的改良效果,采用室内淋溶土柱的试验方法,设置 S0、S1、S2、S3、S4 和 S5(每个土柱横截面积 0.0113 m²)分别施用改良剂 0.00、0.01、0.05、0.10、0.50 g 和 1.00 g,折合成公顷用量分别为 0.0、8.9、44.3、88.5、442.5 kg·hm⁻²和 885.1 kg·hm⁻²)6 个处理,分析淹水条件下不同改良剂用量对苏打盐化草甸土的洗盐效应。结果表明,与未施改良剂处理(S0)相比,S3、S4 和 S5 处理显著降低不同土层(0~30 cm)土壤容重(降幅 3.88%~8.87%)、增加土壤孔隙度(增幅 3.82%~9.38%)、降低土壤 pH 值(降幅 2.36%~8.05%);S2、S3、S4 和 S5 处理显著提高 20~40 cm 土壤水分入渗量,增幅 55.9%~294.6%($P<0.05$);施用改良剂处理交换性 Na⁺含量在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层显著降低,降幅 4.84%~56.5%($P<0.05$),20~30 cm 和 30~40 cm 土层中增幅 1.09%~17.1%;S3、S4 和 S5 处理 0~10 cm 土层电导率显著降低,降幅 49.0%~60.4%($P<0.05$),20~40 cm 土层显著增加,增幅 3.68%~19.8%($P<0.05$);S2、S3、S4、S5 处理 10~20 cm 土层碳酸根含量显著降低,降幅 5.98%~23.4%($P<0.05$),S3、S4、S5 处理 0~30 cm 土层碳酸氢根含量降幅 1.49%~18.0%;S2、S3、S4 和 S5 处理显著提高 0~30 cm ≥ 0.25 mm 水稳性团聚体,增幅达 16.4%~161.7%($P<0.05$);S3、S4 和 S5 处理 0~30 cm 土层 MWD 显著增加,增幅达 5.78%~161.7%($P<0.05$)。针对本次供试土壤盐渍化程度,综合改良效果及改良剂施用量,改良剂适宜用量为每个土柱 0.10 g(88.5 kg·hm⁻²)(S3 处理),可达到最优淋洗效果。

关键词:改良剂;洗盐效应;苏打盐化草甸土;淹水;淋溶

中图分类号:S156 **文献标志码:**A

Effects of a soil ameliorant on the desalting of soda-salinized meadow soil under flooding condition

ZHANG Mingcong^{1,2}, ZHOU Wei³, SHI Liwen¹, WANG Chenghao¹,
DU Jidao^{1,2}, WU Yaokun⁴, ZHANG Yuxian¹

(1. College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China;

2. Research Center of Saline and Alkali Land Improvement Engineering Technology in Heilongjiang
Province, Daqing, Heilongjiang 163319, China;

3. Daqing Qilong Agricultural Science and Technology Limited Company, Daqing, Heilongjiang 163000, China;

4. Daqing Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Daqing, Heilongjiang 163316, China)

Abstract: Understanding the relationship between the soil ameliorants and soda-salinized meadow soil was crucial for improving its effect on different depths of soil layers. The study investigated the effects of the soil ameliorants on desalting soda-salinized meadow soil under flooding condition, we conducted a simulated leaching soil column experiment in laboratory, six ameliorants application rates, 0.00, 0.01, 0.05, 0.10, 0.50, and 1.00 g to each

收稿日期:2019-09-12

修回日期:2020-03-18

基金项目:黑龙江省大学生创新创业训练计划项目(201810223039);黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(PTJH201901);大庆市指导性科技计划项目(zd-2019-78);黑龙江八一农垦大学博士科研启动基金(XYB2014-04);国家现代农业产业技术体系(CARS-04-01A)

作者简介:张明聪(1983-),男,黑龙江哈尔滨人,博士,主要从事土壤改良相关研究。E-mail: zhangmingcong @ 163.com

通信作者:张玉先(1968-),男,教授,主要从事大豆逆境栽培生理和轮作体系研究。E-mail: zyx_lyx@126.com

soil column (cross-sectional area 0.0113 m^2), equivalent to the 0.0, 8.9, 44.3, 88.5, 442.5, and $885.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, defined as S0, S1, S2, S3, S4, and S5, respectively. Our results indicated that under flooding condition, compared to S0, the application of soil ameliorants treatments (S3, S4, and S5) substantially reduced soil bulk density and soil pH on different depths of soil layers (0~30 cm) by 3.88% to 8.87% and 2.36% to 8.05%, respectively, and substantially increased soil porosity by 3.82% to 9.38% ($P<0.05$) on different depth soil layer (0~30 cm). The application of soil ameliorants treatments (S2, S3, S4, and S5) enhanced soil moisture infiltration of 20~40 cm soil layer, with an increase of 55.9% to 294.6% ($P<0.05$). The application of soil ameliorant reduced exchangeable sodium content with 0~10 cm and 10~20 cm soil layer ($P<0.05$), decreased by 4.84% to 56.5% ($P<0.05$), increased exchangeable sodium content of 20~30 cm and 30~40 cm soil layer by 1.09%~17.1%; S3, S4, and S5 reduced electrical conductivity of 0~10 cm soil layer by 49.0% to 60.4% ($P<0.05$), increased electrical conductivity of 20~40 cm soil layer by 3.68% to 19.8% ($P<0.05$); S2, S3, S4, and S5 reduced CO_3^{2-} content of 10~20 cm soil layer by 5.98% to 23.4% ($P<0.05$); S3, S4, and S5 reduced HCO_3^- content of 0~30 cm soil layer by 1.49%~18.0%; S2, S3, S4, and S5 substantially enhanced water stable aggregate $\geq 0.25 \text{ mm}$, with an increase of 16.4% to 161.7% ($P<0.05$); S3, S4, and S5 substantially increased mean weight diameter (MDW) by 5.78% to 161.7% ($P<0.05$). Based on comprehensive analysis of the effect of soil ameliorants on desalting soda-salinized meadow soil and the application rates of soil ameliorants, the optimum application rate for the specific soil salinization in this experiment was proposed as 0.1 g ($88.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) with each soil column.

Keywords: soil ameliorant; desalination; soda-salined meadow soil; flooding condition; leaching

松嫩平原是世界三大苏打盐渍土分布区域之一^[1],属中温带半湿润气候向半干旱气候过渡区,受长白山阻隔,大陆性季风气候特征明显,春秋多风少雨,冬季严寒少雪,地质构造属中生代的沉陷地带,为易溶性盐分在土壤中大量聚集创造了极为有利的条件^[2-3]。苏打盐渍土主要盐分为 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 ,主要表现为土壤 pH 高,碱性强,物理结构恶化,渗透性极差等特点^[4-6]。大量研究已证实碱性盐对作物萌发及根系生长的抑制作用显著大于中性盐^[5-7],因此苏打盐渍土生产能力低,土地资源难以得到充分利用,造成大量土地资源浪费^[8]。灌溉洗盐是解决盐分表层聚集的有效方法之一^[9-11]。针对这一问题,Mermond^[12]和 Letey^[13]等认为,高频少量的淋洗方式在蒸发强烈的条件下使水层停留在土壤表层,从而起不到洗盐的目的;彭振阳^[14-15]等也认为间歇淋洗能否提高淋洗效率不能一概而论,针对松嫩平原特殊的气候条件,土壤水分蒸发量远大于降雨量,而且地下水埋藏较浅,在盐碱土水稻种植中为降低因水分蒸发而引起二次返盐现象,一般水田仅在阴天进行适当晾田,因此亟需探讨淹水条件下苏打盐化草甸土中盐分的淋洗效应。苏打盐渍土质地粘重,土壤颗粒组成以粉粒和黏粒为主,透水性极差^[16],导致很难通过灌溉洗盐实现改良的目的,但可通过施加外源物质对土壤物理、化学性质进行改良。赵兰坡^[17]认为,为提高灌溉洗

盐效率,首要任务是改善盐渍土结构,以提高质地粘重土壤团聚体数量,增强土壤通透性。为解决这个问题,已研制出具有自主知识产权、成本较低的盐碱土壤改良剂,能有效增加土壤水稳性团聚体数量,增大土壤孔隙,降低土壤容重,提高土壤水分入渗速率,降低土壤交换性钠含量,达到较好的洗盐效果^[18]。但关于改良剂在不同土层的土壤孔隙度、pH、交换性 Na^+ 含量和水稳性团聚体数量等指标的改良效果尚不明晰。为了进一步探究改良剂在盐碱土不同深度土层中的改良效果,本研究采用松嫩平原典型的苏打盐化草甸土进行室内土柱淋溶试验,在淹水条件下,设置添加不同剂量的改良剂处理,测定不同深度土层土壤物理化学等相关指标,探明淹水条件下不同用量的改良剂对苏打盐化草甸土盐分的淋洗效应,以期为松嫩平原干旱区盐碱地改良及盐碱地种植水稻提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤 取自黑龙江省大庆市龙凤区落荒地土壤 ($124^\circ 19' \sim 125^\circ 12' \text{E}$, $45^\circ 46' \sim 46^\circ 55' \text{N}$),地表作物为碱蓬和羊草,供试土壤类型为苏打盐化草甸土。该地区位于松嫩平原中部,海拔 126~165 m,地势较平坦,春秋多风少雨,冬季严寒少雪,蒸发量较大,平均年蒸发量为 $1\,635 \text{ mm}$,年平均降水量

427.5 mm,年平均风速为 $3.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。试验土壤位于季节性冻土区,冻融作用较为强烈,盐碱地分布广泛,土壤多为盐化草甸土,盐分组成以碳酸盐为主,土壤盐分分布呈明显的表聚性。按卡庆斯基分类制分类方法,该土壤为粉质黏壤土。土壤样品分别取自 0~10、10~20、20~30、30~40 cm 和 40~50 cm 土层,取样同时用环刀采集不同土层原状土用于土壤容重的测定。土壤样品自然晾干,分别过 2 mm 筛待测。供试土壤交换性 Na^+ 含量、pH 和电导率^[19]见表 1。

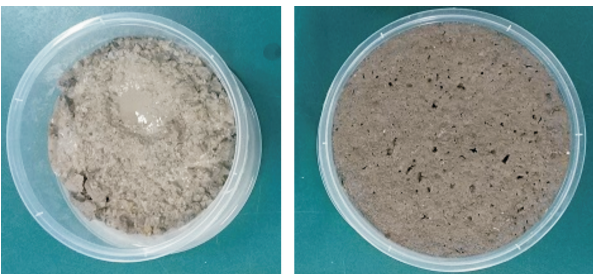
1.1.2 供试改良剂 以硫酸铵和凹凸棒土为载体,按一定比例加入生物炭基肥、褪黑素、柠檬酸、硫酸铝、硫酸锌、硫酸亚铁、2-N,N-二乙氨基乙基己酸酯和脂肪醇聚氧乙烯醚硫酸酯盐等,合成制作土壤改良剂。由大庆市启隆农业科技有限公司生产。图 1A 为浇灌自来水处理,表现为土壤粘重,孔隙小;图 1B 为自来水+改良剂处理,表现为土壤疏松,孔隙大,水分入渗速率大。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 4—7 月采用土柱在实验室进行淋洗试验,设置 6 个不同改良剂处理 S0、S1、S2、S3、S4、S5(每个土柱分别施用改良剂 0.00、0.01、0.05、0.10、0.50、1.00 g,依据土柱代表面积换算成公顷用量分别为 0.0、8.9、44.3、88.5、442.5、885.1 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),每个处理均重复 3 次。

表 1 土壤交换性 Na^+ 含量、pH 和电导率

Table 1 Exchangeable sodium content, pH and electrical conductivity of studied soils			
土层深度 Soil depth/cm	土壤交换性 Na^+ 含量 Exchangeable sodium content/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH	电导率 Electrical conductivity /($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)
0~10	1.70	9.57	0.599
10~20	1.61	9.62	0.569
20~30	1.88	9.65	0.629
30~40	1.78	9.59	0.593
40~50	1.80	9.61	0.634



(A) 浇灌自来水处理
The treatment of
water irrigation

(B) 自来水+改良剂处理
The treatment of water
added soil ameliorant

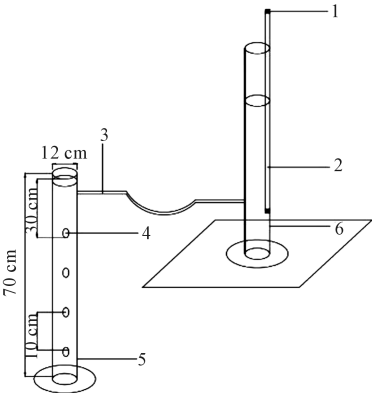
图 1 改良剂改良苏打盐化草甸土效果

Fig.1 Effects of a soil ameliorants on improvement
of soda-salinized meadow soil

淋溶试验装置由土柱和马氏瓶两部分组成(图 2)。试验土柱为有机玻璃材质,柱高 70 cm,内径 12 cm,管壁厚 1 cm,管壁单侧具有 4 个圆形取样孔,间距 10 cm,试验时用磨砂玻璃塞堵实,涂抹凡士林,防止水分流失,容器底部垫 2 层纱布,防止漏土,放置于直径 15 cm、高 5 cm 的培养皿中,用于接淋出液。

从土柱底端开始向上分层装填过 2 mm 筛的风干土,共装填 50 cm,10~20 cm 土层按试验处理加入改良剂,充分混合均匀,40~50、30~40、20~30、10~20 cm 和 0~10 cm 土层按原土壤剖面土层顺序依次加入土柱,根据原位土壤自然条件下的 0~10、10~20、20~30、30~40 cm 和 40~50 cm 的土壤容重 1.4739 、 1.5560 、 1.6073 、 $1.6721\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $1.7011\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,风干后土壤含水量和土柱体积计算每 10 cm 深度填装风干土质量,使土柱内各层土壤容重与自然情况下的容重基本相符。装填之前在土柱内壁涂抹凡士林,装填土柱时将土柱内壁边缘的土壤压实,确保无贴壁水流现象发生;在实际装填时每 5 cm 深度进行一次填土,并用夯实器将土样夯实,在填入下一层土壤时,使用毛刷将上一层界面刮毛,让相邻两层土壤紧密接触,以保证上下两层之间无明显分层,确保灌溉时土壤水盐运移的连续性。填装完毕后,在土表放置一张与土柱内径相同的带孔滤纸以防止灌水时对表土的冲刷。

试验用马氏瓶供水(为防止自来水中水溶性离子对本试验的干扰,灌溉水使用去离子水),其横截面积 0.0113 cm^2 ,高 60 cm,供水水头控制在 $1.5\sim2.0\text{ cm}$,每 2 d 打开马氏瓶开关进行灌水,保证各处理灌溉时间相同,使土面淹水深度维持在 20 cm,表层土壤始终处于饱和状态(模拟水稻田灌水洗盐),试验



1.进气孔;2.进气管;3.输水软管;4.取土口;5.试验土柱;6.马氏瓶

1. Air inlet; 2. Air inlet vent; 3. Water hose; 4. Soil extraction;
5. Soil column; 6. Markov bottle

图 2 淋溶试验装置图

Fig.2 Diagram of leaching experiment

周期为 15 d, 试验结束后在土柱 10、20、30、40 cm 孔隙处采集土样(50 cm 没取样是因为水分没有渗入 40~50 cm 土层中, 不存在洗盐的效应, 在前期预备试验中, 土柱淹水 1 个月仅 S5 处理水分渗入到 40~50 cm 土层, 因此本试验未测定该层次相关指标), 将土样分为两部分, 一部分经风干后过 1 mm 筛放入封口袋中, 用于土壤理化指标的测定; 一部分置于通风阴凉处自然风干, 风干过程中沿土壤自然裂痕剥离为 1 cm³ 左右的小块, 将土样混合均匀, 用于水稳性团聚体的测定。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤理化指标的测定 采用环刀法测定土壤容重及土壤孔隙度, 从土柱上部用定制环刀(直径 30 mm, 高 40 mm, 体积 28.26 cm³) 进行分层取土, 依次测定 0~10、10~20、20~30 cm 和 30~40 cm 深度土层 4~7、14~17、24~27 cm 和 34~37 cm 土壤容重, 用夯实器慢慢向下敲打环刀, 待环刀全部没入土壤, 用自制铁钩将环刀取出, 土壤烘干称重, 计算孔隙度^[19]; 采用 pH 计(Sartorius PB-10, 德国赛多利斯公司生产)测定土壤 pH(水土比 5:1); 使用电导率仪(雷磁 DDS-307, 上海仪电科学仪器股份有限公司生产)测定土壤电导率(水土比 5:1); 采用烘干法测定土壤含水量; 采用 NH₄OAc-NH₄OH 火焰光度法测定土壤交换性钠含量^[19]; 采用双指示剂-中和滴定法测定碳酸根和碳酸氢根含量^[19]。

1.3.2 水稳性团聚体的测定 采用湿筛法^[20]测定, 每个样品取 4 份 50 g 风干土样置于 4 套孔径自上而下分别为 5、2、1、0.5、0.25 mm 套筛的顶层筛上, 将套筛静止浸没在蒸馏水中 5 min, 湿筛 15 min(振幅 5 cm, 频率 30 次·min⁻¹, XY-100 型土壤团聚体分析仪, 北京祥宇伟业仪器设备公司), 分别得到 5 个团聚体粒径组分。将各个筛网的团聚体土样转移到铝盒中, 置于 60℃ 烘箱中烘干, 称重, 记录各团聚体粒径的质量, 用于计算各团聚体组分的占比。

$$W_i = \frac{m_i}{100} \times 100\% \quad (1)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i W_i \quad (2)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (3)$$

式中, W_i 为某级水稳性团聚体的质量分数(%); m_i 为该级水稳性团聚体的质量(g); MWD (mean weight diameter) 为团粒均重直径(mm); GMD (geometric

mean diameter) 为几何平均直径; x_i 为各级别团聚体的平均直径(mm)。

1.4 统计分析

用 Microsoft Excel 2013 进行原始数据的处理, Origin 2018 进行图例绘制, SPSS 17.0 数据处理软件进行相关数据统计分析, 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异(LSD)法比较不同土层间和处理间土壤脱盐率的差异。

2 结果与分析

2.1 淹水条件下改良剂对盐化草甸土容重和孔隙度的影响

容重表示土壤疏松程度, 如图 3A 所示, 施用改良剂处理均可一定程度上降低土壤容重。在 0~40 cm 土层范围内, 相同土层条件下, S1 与 S0 处理相比差别不大, 当改良剂施用量增加到每个土柱施用 0.05 g 以上时(S2), 与 S0 相比, 土壤容重显著降低(30~40 cm 除外), 其中, 与 0~10、10~20 cm 和 20~30 cm 土层 S0 处理土壤容重相比, S3 处理分别降低 5.47%、5.38% 和 3.88%, S4 处理分别降低 8.0%、7.87% 和 6.35%, S5 处理分别降低 8.87%、9.60% 和 8.07% ($P < 0.05$)。从图 3B 可以看出, 不同土层土壤孔隙度随改良剂施用量的增加而呈增加趋势, 与 0~10、10~20 cm 和 20~30 cm 土层 S0 处理孔隙度相比, S3 分别增加 5.38%、5.47% 和 3.82%, S4 分别增加 7.69%、7.81% 和 6.11%, S5 处理分别增加 8.46%、9.38% 和 7.63% ($P < 0.05$)。说明施用改良剂后可以显著降低土壤容重, 增加土壤孔隙, 利于水分下渗; 从土壤容重和改良剂用量上来看, S3 处理为最优改良剂施用量。

2.2 淹水条件下改良剂对盐化草甸土 pH 和土壤质量含水量的影响

如图 4A 所示, 土壤 pH 随改良剂用量的增加呈降低趋势, 在不同深度土层 pH 值 S1 处理与 S0 相比差别不大, 而当改良剂增加到 S2 处理用量之后, 土壤 pH 呈显著降低趋势, 其中与 S0 处理相比, S3、S4 和 S5 不同深度土层 pH 降幅分别达到 2.36%~3.89%、5.47%~9.58% ($P < 0.05$) 和 7.39%~10.7% ($P < 0.05$), 说明施用适宜改良剂可显著降低土壤 pH。如图 4B 所示, 施用改良剂处理 0~10 cm 土层土壤含水量均高于 S0 处理, 其中 S2、S3、S4 和 S5 分别增加 6.94%、16.0%、18.2% 和 26.5% ($P < 0.05$), 10~20 cm 土层 S0 处理土壤含水量仍为各处理最低(20.19%), 当土壤深度增加到 20 cm 以下时, S0 处理 20~30 cm 和 30~40 cm 含水量仅为 10.2% 和 8.04%,

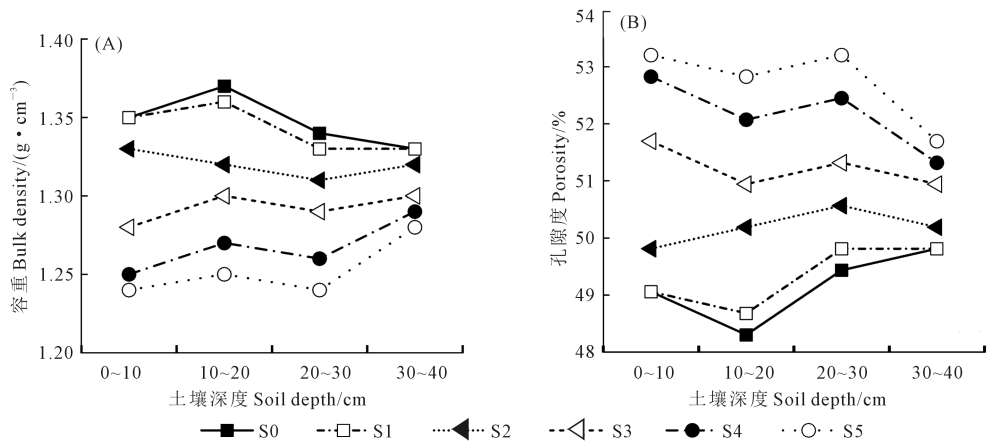


图 3 淹水条件下改良剂对盐化草甸土容重和孔隙度的影响

Fig.3 Effects of a soil ameliorant on bulk density and porosity of soda-salinized meadow soil under flooding condition

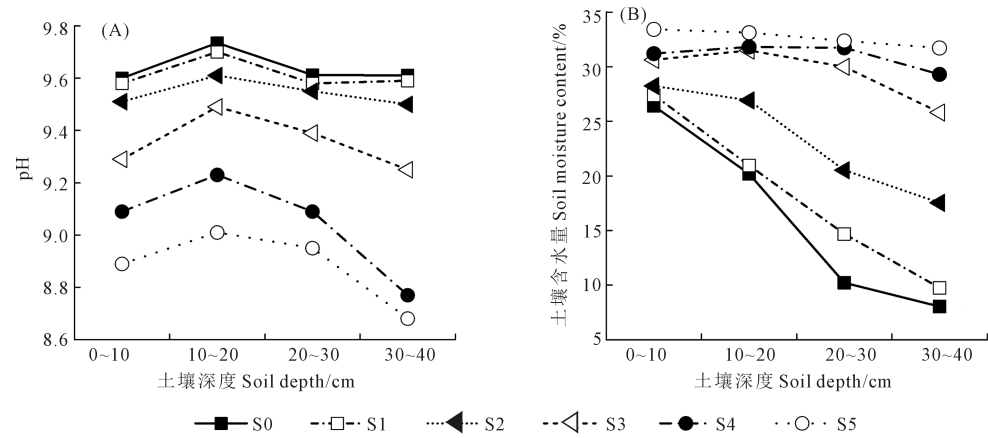


图 4 淹水条件下改良剂对盐化草甸土 pH 和土壤含水量的影响

Fig.4 Effects of a soil ameliorant on pH and soil moisture content of soda-salinized meadow soil under flooding condition

极显著低于施用改良剂处理 (S2、S3、S4 和 S5) ($P<0.01$)。综上可知,未施改良剂处理苏打盐化草甸土土壤高度分散,土壤质地粘重,使水分渗入率低,土壤含水量远低于其他处理,而施用改良剂处理 (S3、S4 和 S5) 土壤孔隙度大,水分渗入率增大,使 20~40 cm 土层土壤含水量与 0~20 cm 土层相差不大。

2.3 淹水条件下改良剂对苏打盐化草甸土交换性钠、电导率和 Na^+ 淋失比率的影响

如图 5A 所示,10~20 cm 土层交换性钠含量较 0~10 cm 土层显著增加,说明在淹水条件下土壤表层 Na^+ 随水而淋洗,降低表层土壤盐浓度,但未施用改良剂处理 (S0) 在 0~10 cm 和 10~20 cm 交换性钠含量均显著高于其他处理,增幅分别为 5.88%~56.5% 和 4.84%~30.5% ($P<0.05$);而当土壤深度达到 20~30 cm 时 S0 处理交换性钠含量与施用改良剂处理相比显著降低,表明施用改良剂处理表层土壤的交换性钠随水分而淋洗,并淀积在 20~30 cm 以下,洗盐效果显著;S5 处理交换性钠含量最高,与

S0 处理相比,S3、S4 和 S5 处理的交换性钠含量分别增加 7.37%、12.8% 和 17.1% ($P<0.05$),表明适量的改良剂施用量在增加水分入渗的同时可淋洗土壤溶液中交换性钠,降低土壤 Na^+ 含量。

如图 5B 所示,土壤 10~20 cm 的电导率与交换性钠含量变化趋势相同,均表现出淹水条件下 10~20 cm 土层电导率要高于 0~10 cm 土层,说明在淹水条件下 0~10 cm 苏打盐化草甸土盐基离子可被水淋洗至 10~20 cm 或以下土层,其中,0~10 cm 土层中,S3、S4 和 S5 处理电导率较 S0 处理分别降低 49.0%、60.4% 和 58.2% ($P<0.01$),10~20 cm 土层 S5 处理电导率为各处理最高,较其他处理增幅 6.69%~37.5% ($P<0.05$),20~40 cm 土层各处理均表现为 S3、S4 和 S5 电导率高于 S0 处理,而 S1 和 S2 低于 S0 处理。

表 2 为相同土层条件下施用改良剂处理与对照 (S0) 处理相比的 Na^+ 淋失比率。可以看出,0~10 cm 和 10~20 cm 土层施用改良剂处理均可显著提高

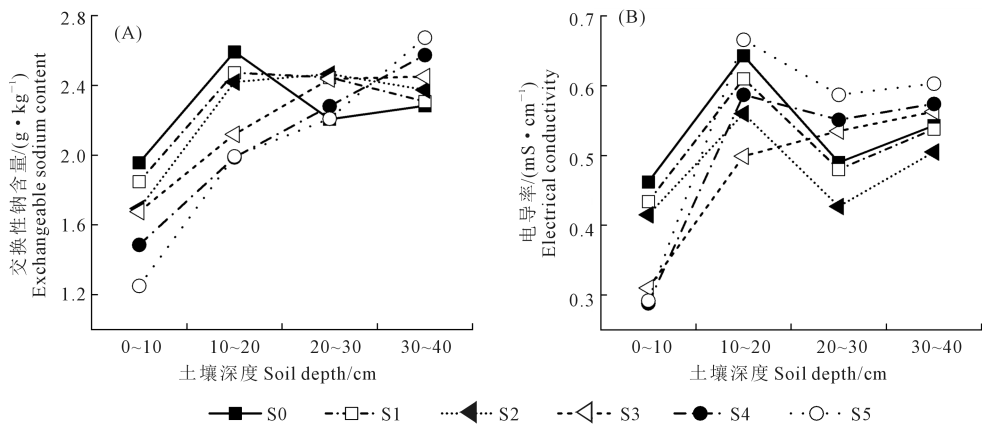


图 5 淹水条件下改良剂对盐化草甸土交换性钠含量和电导率的影响

Fig.5 Effects of a soil ameliorant on exchangeable sodium content and electrical conductivity of soda-salinized meadow soil under flooding condition

表 2 不同土层 Na⁺淋失比率/%

Table 2 The rate of Na⁺ leaching in different soil layers

试验处理 Treatment	土壤深度 Soil depth/cm				
	0~10	10~20	20~30	30~40	0~40
S0					
S1	5.88±0.23d	4.84±0.35d	-9.81±0.46c	-1.07±0.06a	-0.40±0.01d
S2	15.5±1.11c	7.14±0.59c	-10.5±0.89c	-3.85±0.36b	0.95±0.06c
S3	16.7±1.55c	22.3±2.36b	-9.49±0.77c	-6.87±0.51c	4.07±0.36b
S4	31.7±2.18b	30.5±3.01a	-3.32±0.56b	-11.3±1.04d	8.52±0.74a
S5	56.5±5.23a	30.1±2.66a	-1.36±0.09a	-14.6±1.27e	10.8±1.11a

注:同列不同小写字母代表差异显著($P<0.05$),下同。
Note: Different lowercase letters in the same colum indicated significant differences ($P<0.05$). The same below.

Na⁺淋失比率,而 20~30 cm 和 30~40 cm 土层各处理 Na⁺淋失比率均显著低于对照,表明施用改良剂处理使 0~20 cm 土层 Na⁺淋失至 20~40 cm 土层,0~20 cm 土层作物根系活跃脱盐效果显著,其中,20~30 cm 土层 S4 和 S5 处理 Na⁺淋失比率较 S1、S2 和 S3 相比显著增加,说明改良剂施用数量对 Na⁺淋失比率影响较大。从 0~40 cm 土层可以看出,S3、S4、S5 处理 Na⁺淋失比率远高于其他处理,表明施用适量改良剂有利于土壤中 Na⁺淋失。

2.4 淹水条件下改良剂对盐化草甸土 CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 的影响

在苏打盐渍土中阴离子主要是碳酸根和碳酸氢根,Na⁺发生水解产生 NaOH,NaOH 与 CO₂生成 Na₂CO₃,而 Na₂CO₃又与 CO₂生成 NaHCO₃,使得土壤碱性增强,而土壤 Ca²⁺和 Mg²⁺置换出土壤胶体上的 Na⁺,利于水分的淋洗,降低土壤碱化度^[19]。如图 6A 所示,0~10 cm 土层各处理 CO₃²⁻含量无显著差别,而 10~20 cm 土层随改良剂施用数量的增加,水溶性 CO₃²⁻含量呈降低趋势,其中 S2、S3、S4、S5 显著低于 S0 处理,分别降低 5.98%、10.8%、23.4%和 20.7% ($P<0.05$),20~40 cm 土层均表现为 S0 处理

水溶性 CO₃²⁻含量最高;图 6B 所示,0~30 cm 土层因 Na⁺离子被其他阳离子所替代并淋洗,表现为 S0 和 S1 处理水溶性 HCO₃⁻含量高于其他处理,而土壤深度达到 30~40 cm 时,S4 和 S5 水溶性 HCO₃⁻含量比 S0 降低 3.85%和 6.92% ($P<0.05$)。

2.5 淹水条件下改良剂对盐化草甸土水稳性团聚体含量、MWD 和 GMD 的影响

水稳性团聚体数量和分布状况反映了土壤结构的稳定性、持水性、通透性和抗侵蚀的能力^[21]。从表 3 可以看出,施用不同用量改良剂对不同深度土层不同级别水稳性团聚体影响较大,0~10 cm 表现为施用改良剂处理 ≥ 0.25 mm 水稳性团聚体的百分数均高于 S0 处理,其中 S2、S3、S4 和 S5 处理较 S0 相比分别增加 25.6%、61.5%、115.8%和 159.0% ($P<0.01$),从不同级别水稳性团聚体可以看出,S1、S2 和 S3 的 ≥ 0.25 mm 水稳性团聚体数量提高主要是通过增加 0.25~1.00 mm 团聚体数量,而改良剂用量增加到 S4 以上时,可以提高所有级别团聚体的数量;10~20 cm 土层表现与 0~10 cm 土层表现相一致,但施用改良剂处理的 ≥ 0.25 mm 水稳性团聚体百分数均高于 S0 处理($P<0.05$);20~30 cm 土层

表现出与 0~20 cm 土层相类似的规律,其中 S2、S3、S4 和 S5 处理的 ≥ 0.25 mm 水稳性团聚体百分数较 S0 分别增加 15.9%、37.0%、67.7% 和 82.3% ($P<0.01$);30~40 cm 土层 S0 与 S1、S2 和 S3 相比无显著差别,而 S4 和 S5 显著高于 S0 处理,表明改良剂施用量低则 30~40 cm 土层水分入渗率低,而改良剂施用量增加至 S4(0.5 g) 以上时,水溶液可渗入 30~40 cm,明显调节土壤水稳性团聚体数量,提高土壤保水和渗水能力。

图 7A 为不同土层土壤平均质量直径(*MWD*),如图所示,*MWD* 随改良剂施用量增加呈增加的趋势,在 0~10、10~20 cm 和 20~30 cm 土层,S3 比 S0 分别增加 5.78%、6.85% 和 6.17%,S4 分别增加

24.6%、18.4% 和 12.1%,S5 分别增加 23.3%、34.4% 和 17.7% ($P<0.05$) 差异达显著水平;在 30~40 cm 土层与 S0 相比,仅 S4 和 S5 分别增加 16.7% 和 22.9% ($P<0.01$),其他处理与 S0 差异均未达显著水平。图 7B 为不同土层土壤几何平均直径(*GMD*),*GMD* 随改良剂施用无规律性变化,0~10 cm 表现为 S0 处理最高,显著高于 S2、S3、S4 和 S5 处理,分别增加 11.0%、18.5%、7.03% 和 18.4% ($P<0.05$),10~20 cm 土层各处理未达显著差异水平,20~30 cm 土层表现为 S0 处理最高,显著高于 S2、S3、S4 和 S5,分别增加 10.7%、14.7%、17.0% 和 13.6% ($P<0.05$),而 30~40 cm 土层表现为 S4 和 S5 显著高于其他处理,且分别较 S0 处理增加 21.6% 和 23.7% ($P<0.01$)。

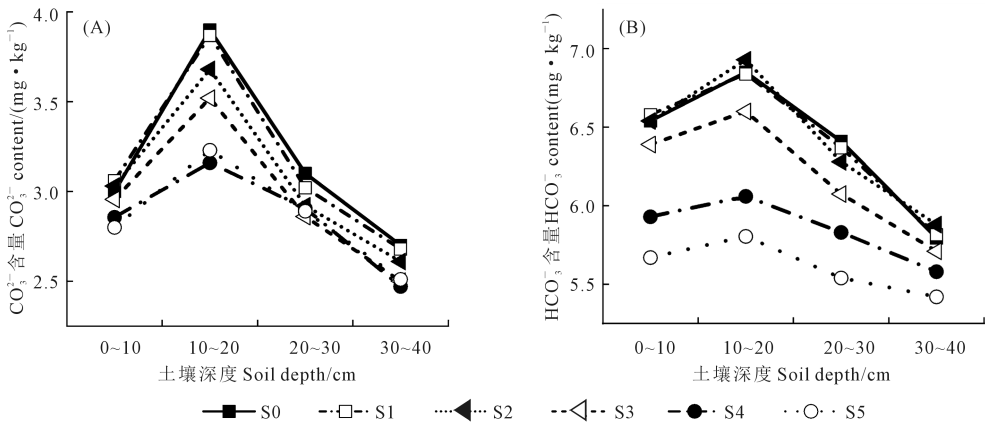
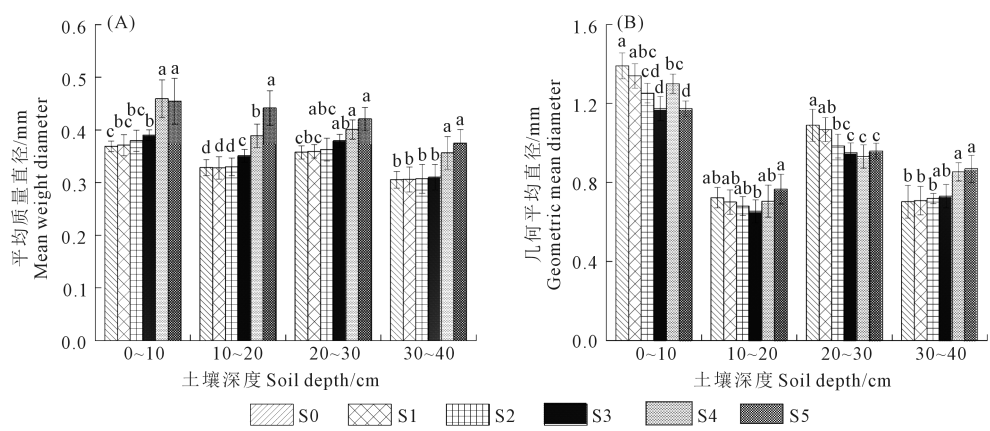


图 6 淹水条件下改良剂对盐化草甸土碳酸根和碳酸氢根的影响

Fig.6 Effects of a soil ameliorant on CO_3^{2-} content and HCO_3^- content of soda-salinized meadow soil under flooding condition

表 3 淹水条件下改良剂对盐化草甸土水稳性团聚体含量的影响

Table 3 Effects of a soil ameliorant on water stable aggregate of soda-salinized meadow soil under flooding condition		各级别水稳性团聚体的质量百分比 Proportion of water stable aggregate/%					
土层深度/cm Soil depth	处理 Treatment	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1.0 mm	0.25~0.50 mm	≥ 0.25 mm
0~10	S0	1.52±0.31b	0.83±0.21b	0.94±0.33c	1.39±0.28c	1.32±0.34d	6.00±1.03d
	S1	1.51±0.33b	0.88±0.29b	1.00±0.35c	1.37±0.30c	1.52±0.39cd	6.29±1.22d
	S2	1.62±0.39ab	0.80±0.30b	1.43±0.31bc	1.43±0.33c	1.92±0.27c	7.20±2.39cd
	S3	1.59±0.34ab	0.99±0.28b	1.71±0.30ab	1.83±0.36bc	2.33±0.32bc	8.44±2.16bc
	S4	2.24±0.29a	1.99±0.27a	1.90±0.42ab	2.51±0.48ab	2.80±0.30ab	11.43±2.01ab
	S5	1.88±0.33ab	2.13±0.27a	2.24±0.34a	3.17±0.31a	3.25±0.29a	12.66±2.18a
10~20	S0	0.85±0.13c	0.42±0.08b	0.67±0.10b	2.64±0.34c	3.63±0.31d	8.22±1.23c
	S1	0.81±0.11c	0.44±0.11b	0.70±0.09b	2.68±0.26c	3.93±0.32cd	8.57±1.68c
	S2	0.82±0.19c	0.43±0.10b	0.76±0.06b	2.85±0.29bc	4.35±0.36c	9.20±2.01c
	S3	1.01±0.20bc	0.56±0.19b	1.02±0.11ab	3.45±0.23ab	6.19±0.33b	12.24±1.99b
	S4	1.33±0.23ab	1.08±0.29a	1.13±0.20a	4.27±0.41a	7.04±0.59ab	14.85±2.49ab
	S5	2.09±0.49a	1.29±0.20a	1.50±0.25a	5.13±0.56a	7.90±1.01a	17.91±2.36a
20~30	S0	0.86±0.10c	1.29±0.31a	1.06±0.15c	1.97±0.28b	2.00±0.36d	7.18±1.69d
	S1	0.84±0.11c	1.39±0.26a	1.06±0.10c	1.87±0.23b	2.22±0.31cd	7.39±1.55cd
	S2	0.90±0.10bc	1.29±0.20a	1.18±0.11c	2.28±0.32b	2.68±0.26c	8.33±1.63c
	S3	1.13±0.21b	1.30±0.26a	1.48±0.26bc	2.53±0.46ab	3.40±0.39b	9.84±1.35bc
	S4	1.32±0.23ab	1.31±0.31a	2.06±0.30ab	3.36±0.53a	3.99±0.32ab	12.04±1.49ab
	S5	1.59±0.32a	1.42±0.31a	2.22±0.36a	3.68±0.43a	4.19±0.36a	13.09±1.26a
30~40	S0	0.29±0.06b	0.58±0.09c	0.88±0.26b	1.88±0.12bc	2.98±0.36bc	6.61±1.13b
	S1	0.30±0.03b	0.57±0.08c	0.91±0.18b	1.92±0.11bc	2.94±0.35bc	6.64±1.33b
	S2	0.31±0.02b	0.60±0.11bc	0.89±0.11b	1.94±0.16bc	2.89±0.25c	6.63±1.29b
	S3	0.31±0.03b	0.68±0.10bc	0.95±0.12b	1.85±0.26c	2.95±0.16bc	6.75±1.55ab
	S4	0.99±0.10a	0.77±0.16ab	1.63±0.21a	2.27±0.20ab	3.57±0.46ab	9.23±1.46a
	S5	1.11±0.11a	1.00±0.17a	1.83±0.26a	2.81±0.32a	3.99±0.35a	10.74±2.31a



注: * 代表差异显著 ($P < 0.05$)。
Note: * indicates significant differences ($P < 0.05$).

图 7 淹水条件下改良剂对盐化草甸土 MWD 和 GMD 的影响

Fig.7 Effects of a soil ameliorant on MWD and GMD of soda-salinized meadow soil under flooding condition

3 讨 论

长期以来,通过种植水稻改良盐碱地是一项促进生态环境发展的有利工程之一^[22]。本试验通过室内土柱方法模拟水稻淹水环境,探究改良剂对盐碱土的改良效果。一般认为淹水条件下的淋洗效应受土壤结构、盐基离子种类和团聚体状况等因素的影响^[1]。本研究表明每个土柱施用改良剂 0.05 g 以上(S3、S4 和 S5)处理(图 3)显著降低 0~30 cm 土层土壤容重,增加土壤孔隙度,利于水分入渗。一般认为同一灌溉条件和同一土壤类型条件下,相同深度土壤含水量基本相同^[23],但本研究结果表明施用改良剂后提高不同深度土层的土壤含水量效果不同,主要因为盐化草甸土具有土壤粘重,孔隙度小,土壤高度分散、透水性差等特点^[24-25],在淹水条件下,水分滞留于 20 cm 左右土层,无法下渗,而施用改良剂后(0.1 g 以上)土壤容重降低,孔隙度增加,在淹水条件下增加的孔隙被毛管水充满,使改良剂处理入渗量显著增加,利于盐分的淋洗,与赵金星^[18]和董伟^[26]等关于改良剂可以提高土壤水分入渗量的研究结果相一致,而与罗雪园^[10]和王鹏山^[11]等的研究结论相反,这种差异主要是由于供试土壤的质地条件及环境条件的差异所造成的。

化学改良方法的主要原理是将土壤颗粒吸附的 Na⁺与高价阳离子进行置换,用灌溉水将置换下来的 Na⁺从根区滤去,增加了盐基代换容量,调节土壤酸碱度^[27-28]。苏打碱化草甸土含有大量 Na⁺,土壤的盐碱性强弱决定于土壤胶体上 Na⁺的相对数量。水稻种植户常用单纯灌水的方法进行洗盐,但在盐化草甸土上,灌水后大量的 Na⁺解吸,土粒之间

相互排斥,土壤胶体高度分散,从而使土壤性质恶化,水分无法到达土壤深层,洗盐效果不佳^[29-30]。本试验中施用改良剂后显著增加土壤孔隙,降低土壤容重,使水分入渗能力增强,增加土壤对 Na⁺的淋洗效果,在 0~20 cm 土层中,施用改良剂处理较未施(S0)处理相比有较好的洗盐效果,降低 10~20 cm 土层中的 CO₃²⁻ 和 0~20 cm HCO₃⁻ 含量,而 0~10 cm CO₃²⁻ 含量各处理相差不大,原因可能是高价阳离子 Al³⁺和 Ca²⁺等置换 Na⁺并淋洗至下层,而使 0~10 cm 土层 Na⁺含量降低,但过多的 Al³⁺和 Ca²⁺等离子或被 Al³⁺置换出的 Ca²⁺和 Mg²⁺存在土壤溶液中^[31],发生水解后形成碳酸钙和碳酸镁等物质,碳酸钙和碳酸镁与 CO₂不产生 HCO₃⁻,Na⁺被淋洗至 10~20 cm 土层后,未施改良剂处理由于土壤粘重 Na⁺残留此层,而施改良剂处理改善土壤结构,致使 Na⁺洗脱所致;20~40 cm 土层中,施用改良剂处理 Na⁺含量又高于 S0 处理,说明施用改良剂处理使 0~20 cm 土层中的 Na⁺淋洗至下层,有利于土壤脱盐。

电导率可用来表示土壤中可溶性盐分的溶出状况,可在一定程度上反映盐离子的含量。在前期赵金星等^[18]的研究表明,盆栽水稻施用改良剂后 0~20 cm 土壤电导率显著增加,而本试验中,除 S5 处理外其他施用改良剂处理在 0~10 cm 和 10~20 cm 的电导率均低于 S0 处理,原因可能是盆栽水稻盆底封死不漏水,使盐基离子不能通过淋洗的方式洗脱而残留在盆中,使电导率高于不施改良剂处理,而本试验采用原位土柱模拟的方式,盐基离子均随水淋洗到下层,因而使电导率低于 S0 处理;而 10~20 cm 土层的 S5 处理和 20~40 cm 的 S3、S4 和 S5 处理电导率均高于 S0 处理(图 5B),这与大多数研究关

于外源改良物质降低土壤电导率的结果不一致^[32-33],原因是本改良剂中含有的铝、铁和钙等离子,一部分与土壤 Na^+ 发生置换,置换 Na^+ 及部分铝、铁、钙等离子在水分的淋洗下,渗到下层使电导率提高,而 S5 处理电导率远高于其他处理,说明 S5 处理改良剂施用过多,易造成土壤污染和产品浪费。

土壤中水稳性团聚体是评定土壤微生物资源和土壤肥沃程度的重要指标,其值越高,土壤透水性和稳定性越强^[34]。一般认为 $>0.25\text{ mm}$ 的团聚体被称为土壤团粒结构体, $>0.25\text{ mm}$ 级别团聚体的质量百分比可以衡量土壤结构的优劣^[20]。本试验中增施改良剂可以显著改善土壤结构,增加水稳性团聚体数量,在 $30\sim 40\text{ cm}$ 土层中(表 3),S0 处理与 S1、S2 和 S3 处理相比,各级别水稳性团聚体的质量百分比均未达到显著水平,但与 S4 和 S5 处理相比均达显著水平,说明适当加大改良剂用量可以增加土壤孔隙,增强水分入渗强度,改良剂溶液淋洗至的土层均有明显改善土壤结构的功能。一般认为水稳性团聚体的平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)是反映土壤团聚体稳定性的常用指标,团聚体的稳定性越好越有利于土壤对水分、养分的转化,促进植物的生长,达到改善土壤生产力的目的^[35]。本试验中 MWD 与前人研究的结果相一致^[34-35],施用改良剂处理后获得较大的 MWD ,因此具有相对稳定的土壤结构;而 GMD 与前人研究结果不完全一致^[34-35],这可能与盐化草甸土土壤质地黏粒含量高有关,在 $0\sim 30\text{ cm}$ 土层中施用改良剂处理与 S0 处理相比, $0.5\sim 1.0\text{ mm}$ 和 $0.25\sim 0.50\text{ mm}$ 水稳性团聚体数量增加高于 1.0 mm 以上的水稳性团聚体数量,因而使得 S0 处理 GMD 的值有高于施用改良剂的趋势,而 $30\sim 40\text{ cm}$ 土层 S4 和 S5 处理要远高于 S0 处理,原因主要是改良剂溶液渗入改善土壤结构,而 S0 处理水分未渗入该层,土壤仍保持原结构。

由于本试验研究土壤为重度苏打盐化草甸土,重点探索改良剂的应用效果,未能针对不同盐渍化程度的苏打盐化草甸土给出改良剂的施用数量,今后将作进一步探索,为改良苏打盐化草甸土和盐碱地种水稻提供更为丰富的科学依据。

4 结 论

室内土柱试验下,供试苏打盐化草甸土中加入适量改良剂,可以降低土壤容重,增加土壤孔隙度,降低土壤 pH 值,增加水分入渗能力,提高 $20\sim 40\text{ cm}$ 土壤水分入渗量,降低 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层交换性 Na^+ 含量,降低 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层电导率,降低 $10\sim 20\text{ cm}$

CO_3^{2-} 和 $0\sim 30\text{ cm HCO}_3^-$,增加 $0\sim 30\text{ cm} \geq 0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体数量,增加 $0\sim 30\text{ cm}$ 土层 MWD 。比较分析试验结果,土柱施用 $0.1\text{ g}(88.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ 改良剂能够使土柱达到最优淋洗效果。

参 考 文 献:

- [1] 孙兆军. 中国北方典型盐碱地生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2017:9.
- [2] 张树文,杨久春,李颖,等.1950s 中期以来东北地区盐碱地时空变化及成因分析[J]. 自然资源学报,2010, 25(3): 435-442.
- [3] 李取生,李秀军,李晓军,等. 松嫩平原苏打盐碱地治理与利用[J]. 资源科学,2003, 25(1): 17-22.
- [4] 张晓光,黄标,梁正伟,等. 松嫩平原西部土壤盐碱化特征研究[J]. 土壤,2013, 45(2): 332-338.
- [5] Wang Z M, Song K S, Zhang B, et al. Shrinkage and fragmentation of grasslands in the west Songnen Plain, China [J]. Agriculture, ecosystems and environment, 2009, 129 (1-3):315-324.
- [6] 赵兰坡,尚庆昌,李春林. 松辽平原苏打盐碱土改良利用研究现状及问题[J]. 吉林农业大学学报, 2000, 22(S1):79-83, 85.
- [7] 黄立华,梁正伟,马红媛. 不同盐分对羊草种子萌发和根芽生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1974-1979.
- [8] 周文志,孙向阳,李素艳,等. 生物炭和园林废弃物堆肥对滨海盐碱土淋溶的影响[J]. 中国水土保持科学, 2019, 3(17): 23-30.
- [9] 李卫,郑子成,李延轩,等.设施灌溉条件下不同次生盐渍化土壤盐分离子迁移特征[J].农业机械学报, 2011, 42(5):92-99.
- [10] 罗雪园,周宏飞,柴晨好,等. 不同淋洗模式下干旱区盐渍土改良效果分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 322-326.
- [11] 王鹏山,张金龙,苏德荣,等.不同淋洗方式下滨海沙性盐渍土改良效果[J].水土保持学报, 2012, 26(3): 136-140.
- [12] Mermond A, Tamini T D, Yacouba H, Impact of different irrigation schedules on the water balance components of an onion crop in a semi-arid zone[J]. Agriculture Water Management, 2005, 77(1): 282-295.
- [13] Letey J, Feng U L. Dynamic versus steady-state approaches to evaluate irrigation management of saline waters[J]. Agriculture Water Management, 2007, 91(1-3):1-10.
- [14] 彭振阳,伍靖伟,黄介生.间歇入渗对土壤溶质淋洗效率的影响[J].农业工程学报,2012, 28 (20): 128-134.
- [15] 彭振阳,伍靖伟,黄介生. 采用间歇灌溉进行土壤盐分淋洗的适用性[J]. 水科学进展, 2016, 27(1): 31-39.
- [16] Luo J Q, Wang L L, Li Q S, et al. Improvement of hard saline sodic soils using polymeric aluminum ferric sulfate (PAFS) [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 149:12-20.
- [17] 赵兰坡. 松嫩平原盐碱地改良利用[M]. 北京: 科学出版社, 2013:40-46.
- [18] 赵金星,周伟,战英策,等. 土壤改良剂对盐化草甸土物理性质及水稻产量的影响[J]. 作物杂志, 2018, (6):138-143.
- [19] 鲍士旦,土壤化学分析(第三版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 1999:22-24,172-177,183-187,193-195.

(下转第 230 页)