



土壤改良剂对苏打盐化草甸土水盐运移特性的影响

张佰毅¹, 张恩浩¹, 韩爱平¹, 常 峰², 杜吉到^{1,3}, 张玉先¹, 张明聪^{1,3}, 周 伟⁴

(1. 黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 大庆市林业和草原局, 黑龙江 大庆 163300; 3. 黑龙江省盐碱地改良工程技术研究中心, 黑龙江 大庆 163319; 4. 大庆市启隆农业科技有限公司, 黑龙江 大庆 163711)

摘 要:为明确外源添加改良剂后苏打盐化草甸土不同深度土层的水盐运移特征,采用室内淋溶土柱试验方法,设置 5 个改良剂施用处理(CK、T1、T2、T3 和 T4),依据土柱内径折算用量分别为 0.0、8.9、44.3、88.5 和 221.25 kg·hm⁻²,研究不同改良剂用量对不同土层水分累计入渗量、湿润峰运移深度和全盐含量的影响。结果表明:与未施改良剂处理(CK)相比,入渗时间为 15 000 min 时,T1、T2、T3 和 T4 处理累计入渗量分别增加 158%、167%、205% 和 257%,湿润峰累计运移深度分别增加 144%、145%、266% 和 369%;入渗时间为 25 000 min 时,T1、T2、T3 和 T4 处理累计入渗量分别增加 140%、163%、200% 和 239%,T1、T2 和 T3 处理湿润峰运移深度分别增加 155%、176% 和 284%,T4 处理湿润峰运移深度超 50 cm(装土深度 50 cm);入渗时间为 37 440 min 时(入渗稳定),在 20~50 cm 土层,T3 与 T4 含水量分别增加 415% 和 471%,脱盐率分别增加 512% 和 556%,三相比最接近理想值。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 T3 处理的 88.5 kg·hm⁻²,可达到最优淋洗效果。

关键词:土壤改良剂;苏打盐碱土;湿润峰;累计入渗量

Effects of Soil Ameliorant on Characteristics of Soil Water and Salt Movement in Soda-salinized Meadow Soil

ZHANG Bai-yi¹, ZHANG En-hao¹, HAN Ai-ping¹, CHANG Feng², DU Ji-dao^{1,3}, ZHANG Yu-xian¹, ZHANG Ming-cong^{1,3}, ZHOU Wei⁴

(1. College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. Forestry and Grassland Bureau of Daqing City of Heilongjiang Province, Daqing 163300, China; 3. Research Center of Saline and Alkali Land Improvement Engineering Technology in Heilongjiang Province, Daqing 163319, China; 4. Daqing Qilong Agricultural Science and Technology Limited Company, Daqing 163711, China)

Abstract: Understanding the relationship between the application of a soil ameliorant and soda-salinized meadow soil was crucial to investigate the characteristics of soil water and salt movement on different depths of soil layers. In this experiment, we conducted a simulated leaching soil column experiment in laboratory, set up five ameliorants application rates treatments, 0.0, 8.9, 44.3, 88.5, 221.25 kg·ha⁻¹, defined as CK, T1, T2, T3 and T4, respectively. And we analyzed the cumulative amount of water infiltration, wetting front depth and full salt content at different soil layers, in order to clarify the characteristics of soil water and salt movement with the number of different amendments. The results showed that compared with CK, when the infiltration time was 15 000 min, the cumulative infiltration of T1, T2, T3 and T4 increased by 158%, 167%, 205% and 257%, the migration depth of wetting front of T1, T2, T3 and T4 increased by 144%, 145%, 266% and 369%, respectively. And when the infiltration time was 25 000 min, the cumulative infiltration of T1, T2, T3 and T4 increased by 140%, 163%, 200% and 239%, the migration depth of wetting front with T4 reached 50 cm(the depth of soil loading is 50 cm). However, that of T1, T2 and T3 increased by 155%, 176% and 284%, respectively. When the infiltration time was 37 440 min (water infiltration tended to stop, and the test was terminated), compared with CK in 20–50 cm, the application of T3 and T4 treatment substantially increased the water content by 415% and 471%, increased the desalination rate by 512% and 556%, and the three-phase ratio was the closest to the ideal ratio. Based on comprehensive analysis of the effect of soil ameliorant on the characteristics of water and salt movement, according to the degree of soil salinity in this experiment, the optimum application rate for the specific soil salinization was proposed as T3 treatment of 88.5 kg·ha⁻¹.

Keywords: soil ameliorant; soda-salinized meadow soil; migration depth of wetting front; cumulative infiltration

松嫩平原是世界三大苏打盐渍土集中分布区之一,受盐渍化影响的土地面积超过 373 万 hm²^[1]。苏打盐渍土是一种高度退化的盐渍土类型,土壤中主要以钠离子和碳酸根离子为主,分散性强,水分

入渗性能极差^[2-4]。研究表明,单纯的水洗盐一般适合于土壤颗粒以砂质化为主的土壤,相对于土壤颗粒组成以粉粒和黏粒为主的苏打盐碱土,因质地粘重、透水性差,灌溉洗盐难以实现改良目的^[5-6]。

收稿日期:2022-01-05

基金项目:黑龙江省大学生创新创业训练项目(201910223003);黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(P TJH201901);大庆市指导性科技计划(zd-2019-78);黑龙江八一农垦大学博士科研启动基金(XYB2014-04)。

第一作者:张佰毅(1999—),男,硕士研究生,主要从事苏打盐渍土改良相关研究。E-mail:1426003909@qq.com。

通讯作者:张明聪(1983—),男,博士,副教授,主要从事盐碱地改良相关研究。E-mail:zhangmingcong@163.com。

赵兰坡等^[7]研究表明改良苏打盐渍土的重点是增加土壤团聚体数量,改善土壤结构。近年来,在外源添加物改善苏打盐渍土土壤结构方面有较多研究,结果表明添加水热炭可显著改善土壤胶结物质交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量及阳离子交换总量,从而改善土壤结构^[8];脱硫石膏通过离子置换,降低土壤 Na^{+} 含量,改善盐渍土结构,降低 pH 和碱化度^[9];生物炭通过增加盐碱土壤孔隙度和团聚体数量提高水分入渗速率,改善土壤胶体胶结物质种类及微生物种群环境^[10],从而达到改良目的,但相关改良材料大多工序复杂、施用量大,导致成本高。本团队自主研发的土壤改良剂,使用方便、施用量少且价格低廉,在前期的试验中,已证明其能有效增加土壤水稳性团聚体数量,降低土壤容重,增大土壤孔隙,极好地改善土壤结构^[11],提高土壤水分入渗速率,但导致土壤水盐运移存在空间差异。因此本

研究设置不同剂量改良剂处理研究淹水下水分垂直入渗速率与不同土层脱盐性能的关系,从而明确外源添加改良剂后土壤不同深度土层的水盐运移特性,以期为松嫩平原苏打盐渍土改良利用提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料

土壤取自黑龙江省大庆市龙凤区国家杂粮中心落荒地(124°19′~125°12′E,45°46′~46°55′N),地表作物为碱蓬和羊草,采集土壤样品分别取自 0~10,10~20,20~30,30~40 和 40~50 cm 土层,带回试验室自然风干后过 2 mm 筛;取样时用环刀法测定各层原状土土壤容重。土壤基本理化指标详见表 1。供试土壤改良剂:鑫锐禾牌盐碱土壤改良剂(大庆市启隆农业科技有限公司)。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soil

土层深度 Soil depth/cm	土壤全盐含量 Total salt content of soil/%	pH	电导率 Electrical conductivity/($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	容重 Bulk density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
0~10	0.3215	8.81	1.175	1.4739
10~20	0.2973	9.09	1.013	1.5560
20~30	0.3516	9.11	1.236	1.6073
30~40	0.3646	9.01	1.259	1.6721
40~50	0.3407	8.99	1.169	1.7011

1.2 试验设计

试验于 2020 年 9—12 月在试验室进行,采用土柱试验方法^[12],设置 5 个改良剂处理 CK、T1、T2、T3 和 T4,每个土柱分别施用改良剂 0.00,0.01,0.05,0.10 和 0.25 g,分别依据土柱内径(12 cm)换算成公顷用量为 0.0,8.9,44.3,88.5 和 221.25 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,每个处理 3 次重复。

试验装置如图 1 所示,由土柱和马氏瓶两部分组成。土柱为有机玻璃材质,柱高 70 cm,内径 12 cm,管壁厚 1 cm,管壁侧有 5 个取土孔,间距 10 cm,用磨砂玻璃塞堵实,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。马氏瓶控制供水水头为 1.5~2.0 cm,用去离子水进行试验。

从土柱底端开始分层装填过 2 mm 筛的风干土,共装填 40~50,30~40,20~30,10~20 和 0~10 cm 土层按原位土壤剖面顺序依次加入土柱,其中 10~20 cm 土层按试验设计与改良剂充分混拌。装填土柱时每 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,确保灌溉时土壤水盐运移的连续性。

每 10 cm 填装风干土质量(W,g)根据原位土壤自然条件下的土壤容重($\gamma,\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、风干后土壤含水量($S,\%$)和土柱体积(V,cm^3)进行计算,计算公式为 $W=\gamma\times(1+S)\times V$,确保土柱内各层土壤容重与田间自然情况下的容重基本相符。

1.3 测定项目及方法

采用直尺测量土壤湿润峰运移深度,在试验开始前 2 d,每隔 60 min 测量 1 次,后每隔 360 min 测量 1 次,在第 26 天(37 440 min)土柱内水分入渗趋于停止,试验终止;采用烘干法测定土壤质量含水量,试验终止后,从土柱上部用定制环刀(直径 4.0 cm,高 4.0 cm,体积 50.24 cm^3)进行分层取土,依次取 0~10,10~20,20~30 和 30~40 cm 深度土层 4~7,14~17,24~27 和 34~37 cm 土壤,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,计算质量含水量;入渗速率参见孔祥清等^[13]的计算方法;灌水均匀度采用刘小媛等^[14]的计算方法;采用电导率仪(雷磁 DDS-307,上海仪电科学仪器股份有限公司生产,水土比为 5:1)测定土壤电导率(水土比为 5:1);采用残渣

烘干—质量法测定土壤全盐含量,用以计算脱盐率^[15]。

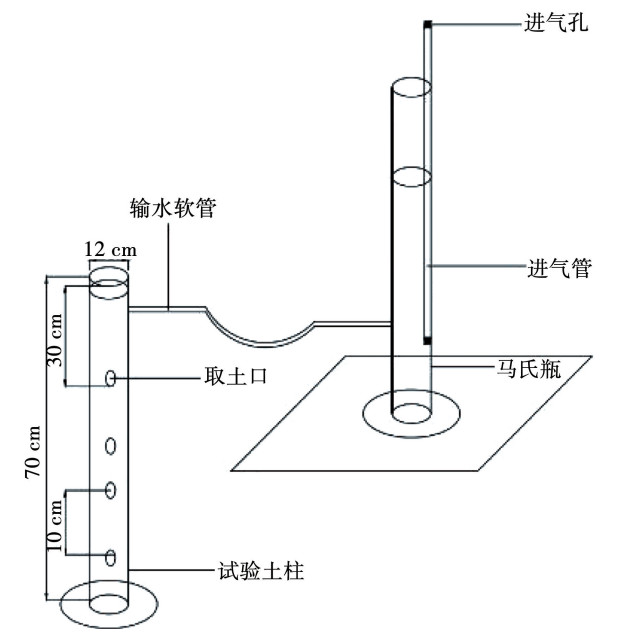


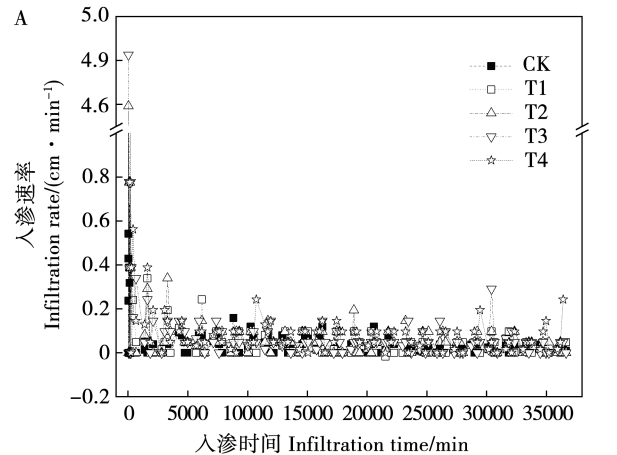
图1 淋溶试验装置图

Fig.1 Sketch map of leaching experiment

1.4 计算公式

入渗速率: $K = \frac{Y_{i+1} + Y_i}{X_{i+1} + X_i}$, 式中, K 表示入渗速率, Y_i 表示 X_i 时间的水分累计入渗量, Y_{i+1} 表示 Y_i 的下次采样的入渗量, X_{i+1} 表示 X_i 下次采样的入渗时间。

灌水均匀度: $E_d = 1 - \frac{\sum_{i=0}^N |Z_i - \bar{Z}|}{NZ}$, 式中, Z_i 为各层的土壤含水率, \bar{Z} 为土壤含水率的平均值(%) ; N 为取样层数。



土壤脱盐率: 脱盐率(%) = $\frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100$, 式中, S_1 为土壤初始含盐量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), S_2 为灌后土壤含盐量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

土壤三相比: 固相: 液相: 气相 = (1 - 土壤孔隙度): 土壤容积含水量: (土壤孔隙度 - 容积含水量), 式中, 土壤孔隙度(%) = $(1 - \text{土壤容重} / 2.65) \times 100$, 土壤容积含水量 = 土壤质量含水量 \times 土壤容重。

1.5 数据分析

使用 Excel 2013 进行原始数据的处理, 使用 Origin 2018 进行图例绘制, 使用 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)法比较不同处理间的差异。

2 结果与分析

2.1 土壤改良剂对盐碱土壤入渗特征的影响

2.1.1 累计入渗情况 为了分析水分在苏打盐渍土中的入渗特征, 点绘不同处理下土壤水分累计入渗量随入渗时间的变化曲线, 由入渗深度随时间的变化可知入渗速率。如图 2 所示, 入渗初期所有处理的入渗速率随着时间的增长而加快。在入渗中期 15 000 min 时, 与 CK 处理相比, 不同剂量的改良剂处理后入渗量分别增加 158%、167%、205% 和 257%; 在入渗后期 25 000 min 时, 入渗速率逐渐变缓, 与 CK 处理相比, 不同剂量的改良剂处理入渗量分别增加 140%、163%、200% 和 239%。在相同入渗时间条件下, T1、T2、T3 和 T4 处理累计入渗量均大于 CK 处理, 且 T4 处理增幅最高。表明施用改良剂可以显著增加苏打盐渍土的水分累计入渗量, 其中, T3 和 T4 处理明显优于其他处理。

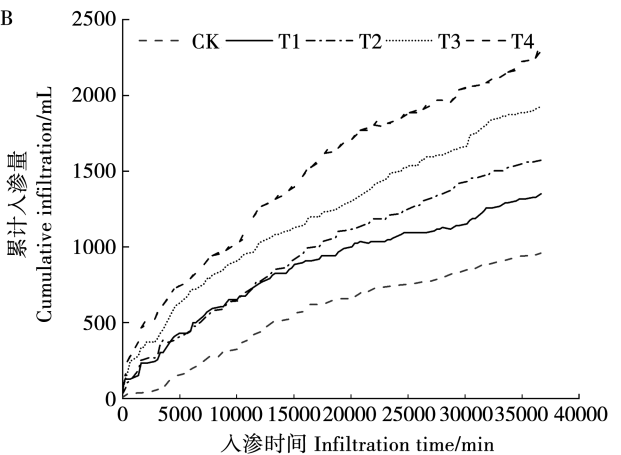


图2 改良剂对累计入渗速率(A)和入渗量(B)的影响

Fig.2 Effects of soil ameliorant on cumulative rate(A) and infiltration(B)

2.1.2 湿润锋运移深度 本试验采用土柱试验方法,所有湿润峰运移深度只受一维垂直积水入渗影响,水分在垂直土柱内进行迁移,且呈线性关系^[16],土壤入渗深度随着时间增大而增长。如图3可知,在25 000 min时T4处理下的水分已经渗出土柱。在水分入渗初期,由于上层土壤容重低、土壤松散,湿润锋运移速度较快,处理间曲线均呈快速上升趋势,随着时间的推移,湿润峰入渗深度逐渐增大,处理间达显著差异水平,在15 000 min时T1、T2、T3和T4处理下湿润峰运移深度较CK处

理相比分别增加144%、145%、266%和369%;15 000~25 000 min,处理间斜率降低,但T1、T2、T3和T4处理下的湿润锋运移深度均大于CK处理,且T3与T4的增幅显著高于其他处理;在25 000 min时,T1、T2和T3处理较CK分别增加155%、176%和284%,T4处理湿润峰运移深度超过50 cm(装土深度50 cm)。表明施用改良剂处理改善了土体结构,降低水分入渗阻力,提高了水分下渗深度,有助于盐基离子的淋洗,且T3与T4明显优于其他处理。

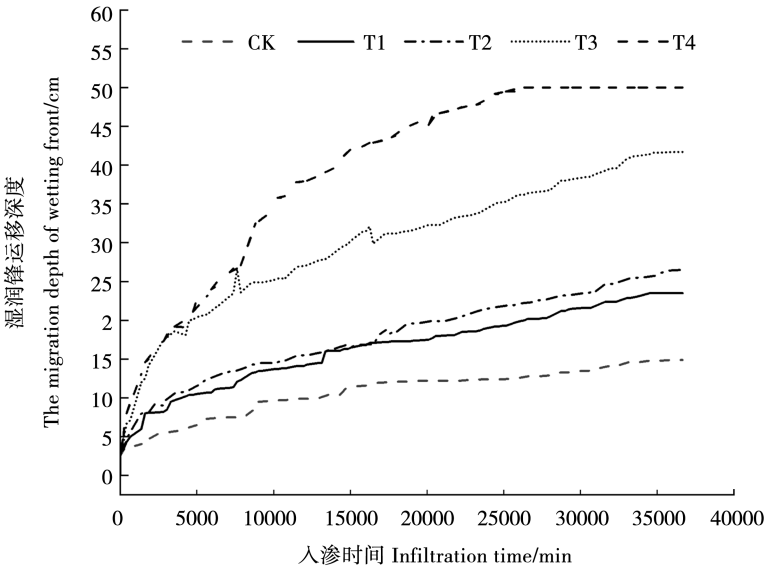


图3 入渗时间对湿润锋运移深度的影响

Fig. 3 Effects of infiltration time on the migration depth of wetting front

2.1.3 累计入渗量与湿润锋运移深度的相关分析 累计入渗量和湿润锋运移深度与入渗时间的拟合方程如表2所示,可见累计入渗量和湿润锋运移

深度与入渗时间的相关性表现一致,且决定系数 R^2 均大于0.95,表明累计入渗量和湿润锋运移深度与入渗时间的线性关系成立,且呈正相关。

表2 拟合方程
Table 2 Fitting coefficient

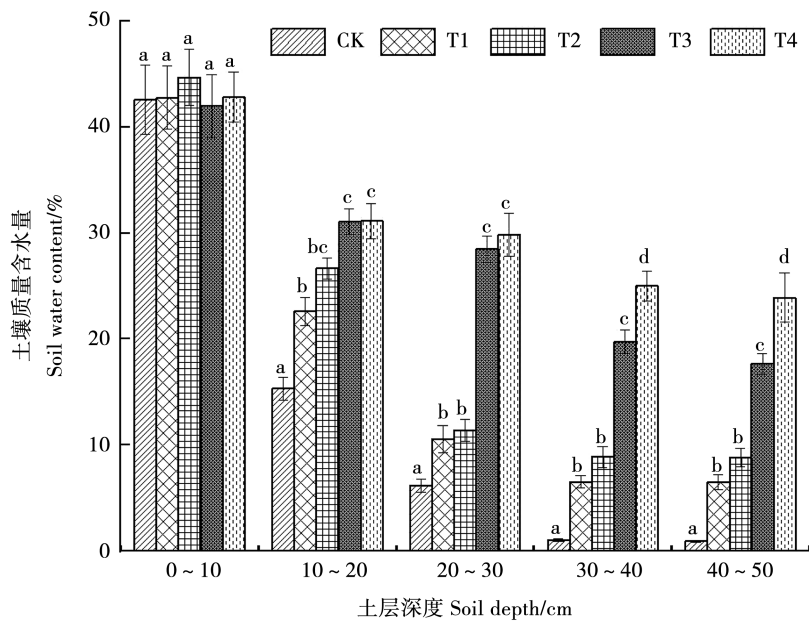
处理 Treatment	累计入渗量与入渗时间 Cumulative infiltration and infiltration time		湿润锋运移深度与入渗时间 Migration depth of wetting front and infiltration time	
	拟合方程 (n = 119) Fitted equation (n = 119)	R^2	拟合方程 (n = 119) Fitted equation (n = 119)	R^2
CK	$y = -4E - 7x^2 + 0.042x - 8.845$	0.9937	$y = -E - 8x^2 + 0.0007x + 3.363$	0.9846
T1	$y = -8E - 7x^2 + 0.063x + 86.532$	0.9896	$y = -E - 8x^2 + 0.001x + 4.425$	0.9736
T2	$y = -7E - 7x^2 + 0.064x + 91.481$	0.9975	$y = -E - 8x^2 + 0.001x + 4.867$	0.9732
T3	$y = -9E - 7x^2 + 0.078x + 151.790$	0.9886	$y = -3E - 8x^2 + 0.002x + 7.136$	0.9529
T4	$y = -E - 6x^2 + 0.104x + 162.510$	0.9925	$y = -6E - 8x^2 + 0.003x + 6.020$	0.9893

2.2 土壤改良剂对土壤水分垂直分布特征的影响

2.2.1 土壤质量含水量 土壤水分入渗是指水分通过地表或入渗界面进入土壤的过程,盐碱土改良后,不同深度土层的水分分布情况能反映出改良效果的强弱^[17]。由图 4 可知,表层 0~10 cm 土壤,土壤质量含水量无显著差异,表明此时土壤表层水分受重力作用下渗至 10 cm 处,但在 10~30 cm 土层处,CK 处理质量含水量显著低于 T1、T2、T3 和 T4 处理,其中,T3 与 T4 处理质量含水量显著高于 T1 与 T2,表明改良剂用量低于 44.3 kg·hm⁻² (T2 处理)时,下渗至 10~30 cm 水分显著降低;30~50 cm 土层,T3 和 T4 处理质量含水量显著高于其他处理,其中,T4 处理显著优于 T3 处理,表明改良剂用量高于 88.5 kg·hm⁻² (T3)时,能显著提高农田水分入渗深度,使水分在土壤有效深度内聚集(0~30 cm),利

于作物根系对水分吸收,增强了土壤洗盐效应。在 10~50 cm 土层,T3 和 T4 处理的含水量分别较 CK 增加 415% 和 471%。

2.2.2 土壤灌水均匀度 灌水均匀度是衡量灌水质量的重要指标,数值越接近 1 时灌水均匀度越高。由计算可得,CK、T1、T2、T3 和 T4 处理的均匀度分别为 0.190、0.414、0.441、0.775 和 0.831。结果表明施用改良剂处理的灌水均匀度均高于 CK 处理,T1 和 T2 处理的灌水均匀度基本稳定在 0.40~0.45 之间,而 T3 和 T4 处理的灌水均匀度基本在 0.8 左右,表明灌水均匀度随着改良剂用量的增加而增大,其中 T3 和 T4 处理其灌水均匀度分别为 0.775 与 0.831,最为接近 1,表明 T3 和 T4 处理各层盐渍土中含水率最均匀,改善了土壤结构,加强了土壤持水能力。



注:不同字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平存在显著差异。
Note: Different letter mean there is significant difference between treatments at $P < 0.05$ level.

图 4 土层深度对土壤含水量的影响
Fig.4 Effects of soil depth on soil water content

2.3 土壤改良剂对土壤脱盐率的影响

脱盐率是衡量土壤盐分的淋洗效果重要指标之一,正值代表脱盐,负值代表积盐^[14]。由表 3 可知,在 5 000 min 时,土壤表层均为脱盐,其中 T3 和 T4 处理 10~20 cm 已开始脱盐;10 000 min 时,T3 和 T4 盐分已淋洗到 20~30 cm,并在 20~30 cm 积盐;20 000 min 时,T1 和 T2 在 10~20 cm 开始积盐,T4 处理 30~40 cm 和 40~50 cm 已开始积盐;

37 440 min 时,T1 和 T2 处理在 20 cm 处仍为积盐,表明 T1 和 T2 处理洗盐效应为 20 cm,T3 和 T4 处理在 20~30 cm 和 30~40 cm 处仍能保持脱盐,其中,T3 和 T4 处理的脱盐效果最好。植物根系有效生长部位为土层 10~20 cm,T3 和 T4 处理均能保持 30% 左右的脱盐率,可为植物生长提供了良好的生长环境。在 10~50 cm 土层,T3 和 T4 处理的脱盐率分别较 CK 增加 512% 和 556%。

表 3 土壤改良剂处理不同时间土壤各层脱盐率

Table 3 Desalination rate of soil layers treated with soil amendments for different time 单位: %

时间 Time/min	处理 Treatment	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm	40 ~ 50 cm
5000	CK	1.34	—	—	—	—
	T1	13.85	—	—	—	—
	T2	14.02	—	—	—	—
	T3	21.37	3.45	—	—	—
	T4	21.14	4.02	—	—	—
10000	CK	2.43	—	—	—	—
	T1	19.35	—	—	—	—
	T2	22.68	—	—	—	—
	T3	26.88	16.97	-5.69	—	—
	T4	28.04	18.07	-10.89	—	—
20000	CK	3.55	—	—	—	—
	T1	24.36	-2.30	—	—	—
	T2	26.74	-5.88	—	—	—
	T3	30.12	21.33	-15.88	—	—
	T4	32.05	24.79	-15.31	-21.35	-11.33
37440	CK	6.79	—	—	—	—
	T1	27.82	-11.30	—	—	—
	T2	30.87	-31.79	—	—	—
	T3	34.78	28.24	-40.24	-57.65	—
	T4	37.76	30.87	4.94	-46.57	-24.68

2.4 土壤改良剂对土壤固、液、气三相比的影响

农田理想的土壤三相比为:固相 50%、液相 25%、气相 25%^[18],合理调控土壤三相比,可为作物生长发育提供更好的环境条件。由图 5 可知,0 ~ 10 cm 土壤中液相比比例最高;10 ~ 20 cm,CK 处理液相比比例大幅降低,而改良剂处理与 CK 处理相比液相比比例降幅缓慢;20 ~ 30 cm,T1 与 T2 处理液相比比例与 CK 接近,而 T3 与 T4 处理仍保持较高的

液相比比例;30 ~ 40 cm,CK 处理液相比比例极低,而 T3 与 T4 处理仍能保持较高的液相比比例。其中,T3 处理 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 固、液、气三相比比例分别为 41%、45%、14% 和 51%、42%、7%,T4 处理 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 固、液、气三相比值分别为 37%、42%、21% 和 54%、41%、5%,与其他处理相比,均接近土壤理想三相比,能为作物提供更好的生长环境。

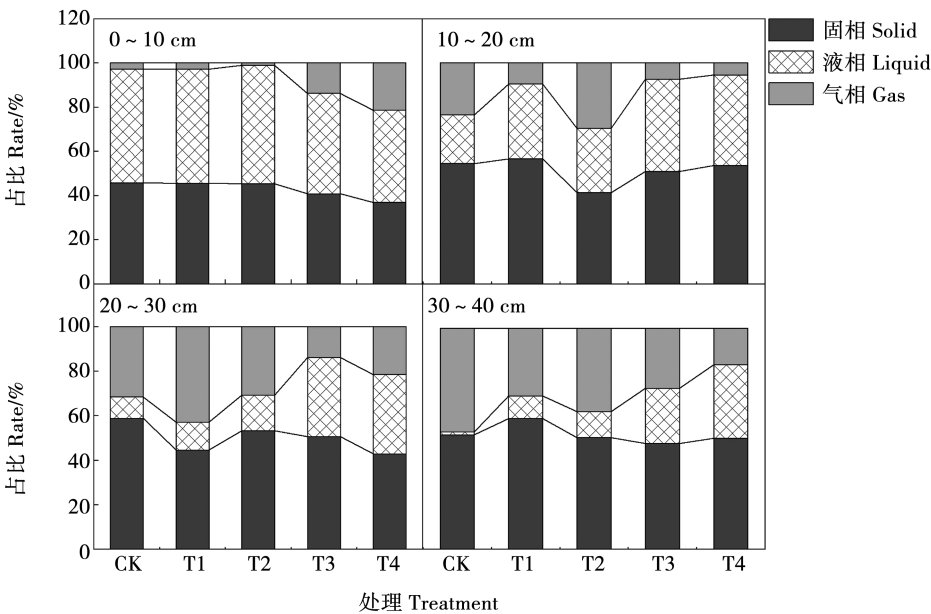


图 5 土壤改良剂对土壤固、液、气三相比的影响

Fig. 5 Effects of soil amendments on the ratio of soil solid, liquid and gas

3 讨论

长期以来土壤盐渍化一直是困扰农业发展的
问题之一,为减少土地资源的浪费,盐碱土改良是
当前研究的热点^[19]。目前盐碱土改良研究中以土
柱试验、大田试验和数值模拟为主要的研究方
法^[20-21]。土柱试验作为盐碱土改良研究方法之一,
具有还原性高,外界影响性小,方便快捷等优点,被
多数土壤改良研究选用。本研究采用的土柱设计
与王著峰等^[12]所采用的土柱相似,可以满足溶质溶
液在土柱中的运移模拟要求。本研究通过室内土
柱淋溶试验方法,模拟大田中改良剂对苏打盐渍土
水盐运移的影响,发现土壤水分累计入渗量与土壤
湿润峰运移深度二者运移初期速率较快,后期逐渐
变慢,这可能是由于改良剂溶解后提供阳基离子,
可置换土壤胶体中的 Na⁺,改善土壤通透性,加速水
分下渗,与郑飞龙等^[22]对水分累计入渗量与入渗时
间关系的分析一致。土壤中的含水量直接影响作
物的生长与发育,在 0~10 cm 土层各处理土壤含
水量基本一致,而在土层 10~50 cm,T3 和 T4 处理
的含水量与 CK 相比分别增加 415% 和 471%,脱盐率
分别提高 512% 和 556%,表层含水量一致,可能
是因为苏打盐化草甸土土壤粘重、孔隙度小,土壤结
构分散、透水性差^[23-24],所以水分大多停留在土壤
表层;而土壤表层 10 cm 以下各层之间含水量存在
差异的原因可能是应用改良剂处理改善了土壤结
构,将土壤由溶胶转变成凝胶,降低了土壤分散性,
利于水分下渗^[25]。与 CK 处理相比,施用改良剂可
增加阳离子交换量,促进对土壤胶体中 Na⁺ 的交换,
使 Na⁺ 随水分下渗淋洗至深层,降低了 Na⁺ 水解
强度,减少了 OH⁻ 的形成,起到降碱作用,这与李晓
晴等^[26]研发的有机酸改良剂的改良效果相似。

脱盐率可以用来表示改良剂对苏打盐渍土的
改良效果。应用改良剂处理在不同时间 0~10 cm
土层的脱盐率均显著高于 CK 处理,说明施用改良
剂可显著降低土壤表层盐基比率。而施用改良剂
处理 T1 和 T2、T3 和 T4 间 0~10 cm 各处理脱盐效
果差别不显著,而 10~50 cm 脱盐率差异明显,原因
可能是 T1 和 T2 处理改良剂用量少,置换的苏打盐
渍土中的 Na⁺ 交换量少,使土层仍有较多 Na⁺,土壤
相对于 T3 和 T4 处理仍较粘重、渗水慢,在
37 440 min 时 T1 和 T2 处理仅使盐基洗脱到土层
10~20 cm;而 T3 和 T4 处理由于改良剂用量多,改善
了土壤结构,置换的苏打盐渍土中的 Na⁺ 多,渗水快,
使盐基离子可淋洗到 30~40 cm,T4 处理盐基离子淋
洗至 40~50 cm,有效降低土壤盐基含量,但 T4 处理
施用改良剂用量大,从成本的角度考量 T3 处理最优。

4 结论

供试苏打盐化草甸土应用土壤改良剂增加了
土壤水分入渗性能,随着改良剂应用量的增加土壤
水分累计入渗量和湿润峰运移深度增加,其中 T3
和 T4 处理土层 40~50 cm 质量含水量可达 20% 以
上,灌水均匀度好,植物根系生长土层(5~20 cm)
保持 30% 左右的脱盐率,显著提高盐碱地改良效
果,土壤固、液、气三相比也最为接近理想值。综合
改良效果及效益,针对本次供试土壤盐渍化程度,
改良剂最优用量为 T3 处理(88.5 kg·hm⁻²)。

参考文献

[1] 黄艳飞,陈君梅,辛亚宁,等.石膏对苏打盐碱土壤理化性质的影响[J]. 中国农业科技导报,2021, 23(11): 139-146. (HUANG Y F, CHEN J M, XIN Y N, et al. Effects of gypsum application on soil physical and chemical properties of soda saline-alkali soil[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(11): 139-146.)

[2] 朱建峰,崔振荣,吴春红,等.我国盐碱地绿化研究进展与展望[J].世界林业研究,2018, 31(4): 70-75. (ZHU J F, CUI Z R, WU C H, et al. Research advance and prospect of saline and alkali land green in China[J]. World Forestry Research, 2018, 31(4): 70-75.)

[3] 苏鑫,罗慧,岳中辉,等.碳添加对土壤固碳细菌群落结构及多样性的影响——以松嫩平原盐碱耕地为例[J]. 中国环境科学,2020, 40(10): 4496-4503. (SU X, LUO H, YUE Z H, et al. Effects of carbon addition on community structure diversity of CO₂-assimilating bacterial in saline-alkali cultivated land[J]. China Environmental Science, 2020, 40(10): 4496-4503.)

[4] 石礼文,王承昊,周伟,等.改良剂对盐化草甸土不同土层理化性质及大豆产量的影响[J]. 大豆科学,2020, 39(2): 269-276. (SHI L W, WANG C H, ZHOU W, et al. Effects of a soil ameliorants on soil physicochemical properties with different depth soil layers and yield of soybean in saline meadow soil[J]. Soybean Science, 2020, 39(2): 269-276.)

[5] 张永玲,王兴鹏,陈开明.冬春灌条件下棉田水盐对产量的影响研究[J]. 塔里木大学学报,2013, 25(4): 18-23. (ZHANG Y L, WANG X P, CHEN K M. The effects of soil moisture and salt content on the cotton yields in the field with winter and spring irrigation[J]. Journal of Tarim University, 2013, 25(4): 18-23.)

[6] 张璐,黄立华.淹水在苏打盐碱土形成过程中的作用——苏打盐碱土形成原因的探讨[J]. 土壤与作物,2018, 7(4): 365-373. (ZHANG L, HUANG L H. Effects of soil submerging on the formation of saline-sodic soils-Discussion on the causes of saline-sodic soils and the effects of submergence[J]. Soil and Crop, 2018, 7(4): 365-373.)

[7] 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. (ZHAO L P, SHANG Q C, LI C L. Research status and problems of improvement and utilization of soda saline-alkali soil in Songliao plain[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2000, 22(S1): 79-83, 85.)

[8] 吴昊,王奉博,王竞,等. 海带水热碳化产物改良滨海盐碱土壤研究[J]. 大连理工大学学报,2019, 59(4): 343-349. (WU H, WANG F B, WANG J, et al. Research on improvement of coastal saline-alkali soil by products from kelp *via* hydrothermal carbonization [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2019, 59(4): 343-349.)

[9] 罗成科,肖国举,张峰举,等. 脱硫石膏改良中度苏打盐渍土施用量的研究[J]. 生态与农村环境学报,2009, 25(3): 44-48. (LUO C K, XIAO G J, ZHANG F J, et al. Optimal application rate of desulfurized gypsum in ameliorating soils moderate in sodic salinity[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2009, 25(3): 44-48.)

[10] 李红宇,张巩固,范名宇,等. 生物炭连续还田对苏打盐碱水稻土养分及真菌群落结构的影响[J]. 水土保持学报,2020, 34(6): 345-351,360. (LI H Y, ZHANG F L, FAN M Y, et al. Effects of continuous biochar returning on nutrients of soda saline-alkali paddy soil and fungal community structure[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 345-351,360.)

[11] 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. (ZHAO J X, ZHOU W, ZHAN Y C, et al. Effects of a new soil ameliorants on soil physical properties and yield of rice in saline meadow soil[J]. Crops, 2018(6): 138-143.)

[12] 王著峰,王玉刚,陈园园,等. 施加脱硫石膏对盐碱土固碳的影响[J]. 水土保持学报,2021, 35(2): 353-360. (WANG Z F, WANG Y G, CHEN Y Y, et al. Effects of applying flue gas desulfurization gypsum(FGDG) on carbon sequestration in saline-sodic soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 353-360.)

[13] 孔祥清,韦建明,常国伟,等. 生物炭对盐碱土理化性质及大豆产量的影响[J]. 大豆科学,2018, 37(4): 647-651. (KONG X Q, WEI J M, CHANG G W, et al. Effect of biochar on the physical and chemical properties of saline-alkali soil and soybean yield[J]. Soybean Science, 2018, 37(4): 647-651.)

[14] 刘小媛,张晴雯,高佩玲,等. 间歇组合灌溉对中度盐化土壤水盐运移规律的影响研究[J]. 干旱地区农业研究,2018, 36(6): 1-6,12. (LIU X Y, ZHANG Q W, GAO P L, et al. Effects of alteration irrigation on soil water and salt transport in moderately saline soil [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(6): 1-6,12.)

[15] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版) [M]. 北京: 中国农业出版社,2000. (BAO S D. Soil analysis in agricultural chemistry (3rd Edition) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.)

[16] 樊丽琴,李磊,吴霞,等. 不同水质淋洗与改良剂施用对银北灌区碱化盐土水盐运移的影响[J]. 水土保持学报,2020, 34(6): 369-376. (FAN L Q, LI L, WU X, et al. Effects of leaching with different quality water and soil amendments application on soil water and salt transport in alkalize solonchaks in yinbei irrigation district [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 369-376.)

[17] 樊贵盛. 非饱和土壤介质水分入渗问题的试验研究 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2012. (FAN G S. Experimental study unsaturated soil [M]. Beijing: China Water Power Press, 2012.)

[18] LAL R, SHUKLA M K. Principles of soil physics[J]. New York: Marcel Dekker, Inc, 2004: 15-19.

[19] 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. (SUN Z J. Ecological restoration of typical saline-alkali land in northern China[M]. Beijing: Science Press, 2017.)

[20] 唐雪,尚辉,刘广明,等. 复合改良剂对盐碱土改良及植物生长的影响 [J]. 土壤,2021, 53(5): 1033-1039. (TANG X, SHANG H, LIU G M, et al. Effects of combined amendment on improvement of salinized soil and plant growth[J]. Soils,2021, 53(5): 1033-1039.)

[21] 陈俊英,何旭佳,杨亚龙,等. 盐碱土入渗下修正 Green-Ampt 模型参数确定与验证[J]. 农业工程学报,2021, 37(12): 125-133. (CHEN J Y, HE X J, YANG Y L, et al. Parameter determination and verification of improved Green-Ampt model under saline-alkali soil infiltration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(12): 125-133.)

[22] 郑飞龙,王西娜,葛敏,等. 压砂条件下灰钙土地区农田土壤水分垂直入渗特征研究[J]. 土壤通报,2021, 52(2): 314-321. (ZHENG F L, WANG X N, GE M, et al. Characteristics of vertical water infiltration in a sierozem soil under gravel-sand mulching condition[J]. Chinese Journal of Soil Science. 2021, 52(2): 314-321.)

[23] 杜雅仙,马凯博,康扬眉,等. 脱硫石膏与结构改良剂配合施用对盐碱地土壤的改良和枸杞生长的影响[J]. 北方园艺, 2018(21): 129-135. (DU Y X, MA K B, KANG Y M, et al. Influence of adding structure krilium combined with desulfurized gypsum on takyric solonetz soil improvement and growth of lycium Chinese[J]. Northern Horticulture, 2018(21): 129-135.)

[24] ZHANG Z H, WANG Q, WANG H, et al. Effects of soil salinity on the content, composition, and ion binding capacity of glomalin related soil protein [J]. Science of Total, 2017 (521-582): 657-665.

[25] 徐子棋,许晓鸿. 松嫩平原苏打盐碱地成因、特点及治理措施研究进展[J]. 中国水土保持,2018(2): 54-60. (XU Z Q, XU X H. The cause of formation and characteristics of soda saline-alkaline land of the songnen plain and the study progress of control measures[J]. Soil and Water Conservation in China, 2018(2): 54-60.)

[26] 李晓晴,周蓓蓓,杨扬,等. 有机酸改良剂对盐碱土水盐运移的影响[J]. 水土保持学报,2021, 35(1): 307-313. (LI X Q, ZHOU B B, YANG Y, et al. Effect of organic acid modifier on water and salt transport in saline-alkali soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 307-313.)