

引文格式: 尹亚敏, 赵作章, 宋国苍, 等. 隔盐材料对盐渍土水盐分布及蒸发特性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(2): 155–161. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202312028](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202312028)

隔盐材料对盐渍土水盐分布及蒸发特性的影响*

尹亚敏¹, 赵作章¹, 宋国苍², 彭尔瑞^{1**}

(1. 云南农业大学 水利学院, 云南 昆明 650201; 2. 昆明市官渡区水利管理中心, 云南 昆明 650214)

摘要:【目的】通过探究隔盐材料土壤水盐运移规律, 为盐渍土壤治理措施的合理选择、土壤盐渍化及区域生态修复提供科学依据。【方法】以云南省楚雄州禄丰市黑井镇轿子山隧道弃渣场的土壤为研究对象, 选取紫茎泽兰(F1)、剑麻(X1)、小麦(D1)3种植物秸秆作为土壤隔盐材料, 未设置隔层材料的红黏土为对照组(CK)开展室内土柱试验, 测定土壤累积蒸发量、土壤剖面含水率、土壤盐分含量等。【结果】(1)土壤累积蒸发量表现为CK>D1>F1>X1, 植物秸秆隔盐材料最大可降低22.69%的土壤水分蒸发率。(2)18~30 cm土壤剖面层平均含水率在整个试验过程中均表现为F1>X1>D1>CK; 0~18 cm土壤剖面层平均含水率在试验初期至27 d时表现为F1>X1>D1>CK, 在试验28 d至试验结束时均表现为CK>D1>X1>F1。(3)土壤平均含盐量表现为CK>D1>X1>F1, 隔盐材料积盐率降低12%~35%。【结论】在蒸发试验中, 隔盐材料有良好的阻滞水分上行和减缓盐分向隔层上部土壤积聚的作用, 并具有保水性和抑制盐分表聚的作用, 其中紫茎泽兰的效果最好。

关键词: 盐渍化土壤; 隔盐材料; 水盐调控; 土壤蒸发

中图分类号: S161.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X(2024)02-0155-07

Effects of Salt-isolating Materials on Water-salt Distribution and Evaporation Characteristic of Salinized Soil

YIN Yamin¹, ZHAO Zuozhang¹, SONG Guocang², PENG Errui¹

(1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Kunming Guandu District Water Conservancy Management Center, Kunming 650214, China)

Abstract: [Purpose] To explore the regulation of soil water and salt transport of salt-insulating materials, providing a scientific basis for the rational selection of saline soil treatment measures, improvement of soil salinization and regional ecological restoration. [Methods] The soil of Jiaozishan Tunnel slag dump in Hejing Town, Lufeng City, Chuxiong Prefecture, Yunnan Province, was selected as the research object, and the three plant straws of *Ageratina adenophora* (F1), *Agave sisalana* Perr. ex Engelm. (X1) and wheat (D1), were used as soil salt-isolating materials, red clay without any salt-isolating materials were used as control group (CK) to carry out indoor soil column test, and the soil cumulative evaporation, soil profile moisture content and soil salt content were measured.

[Results] 1) The cumulative evaporation of soil was CK>D1>F1>X1, which could reduce the soil water evaporation rate by 22.69%. 2) The average moisture content of soil profile layer in the 18-30 cm

收稿日期: 2023-12-18

修回日期: 2024-05-10

网络首发日期: 2024-05-17

*基金项目: 国家自然科学基金项目(42367025); 校企合作项目(KX132021013)。

作者简介: 尹亚敏(1965—), 女, 云南嵩明人, 学士, 高级实验师, 主要从事水力学及生态修复研究。

E-mail: 1433085524@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 彭尔瑞(1966—), 女, 云南丘北人, 硕士, 教授, 主要从事河湖整治与工

程扰动修复研究。E-mail: 1750272433@qq.com

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20240516.1806.001>



was F1>X1>D1>CK during the whole experiment; the average moisture content of 0-18 cm soil layer was F1>X1>D1>CK from the initial stage to the 27th day of the experiment, and presented as CK>D1>X1>F1 from the 28th day to the end of the experiment. 3) The average salt content of soil was CK>D1>X1>F1, the salt accumulation rate was reduced by 12% to 35%. [Conclusion] In the evaporation test, the salt-isolating materials has good effects on blocking water up-welling and slowing salt accumulation to the soil above the spacer, and it has the effect of water retention and inhibiting salt surface accumulation, and the effect of *A. adenophora* is the best.

Keywords: salinized soil; salt-isolating materials; water and salt regulation; soil evaporation

黑井地区弃渣场位于云南省楚雄彝族自治州禄丰市黑井镇,是云南省最大的产盐区,也是中国砂盐的重要产地。该地区地层富含石膏、芒硝、氯盐等风化物,由于铁路建设,黑井地区弃渣场完全暴露于地表,表层渣土已风化开裂甚至成粉末状,加上水分大量蒸发,渣场表层已经析出一层白色的盐结晶。随后该地进行了耕作土回填,土壤发生次生盐渍化,土壤板结、水资源匮乏和缺少适生作物/植物品种严重影响了该区域的生态环境^[1]。采用合理的盐渍土壤治理措施,改善其理化性状和生物学特性,对耕地资源扩展、生态系统建设、区域化高质量发展具有重要的现实意义。

在理论方面,王遵亲等^[2]对盐渍土进行了定义和系统的分类。在治理方面,土壤盐渍化治理措施包括灌排措施、物理调节、化学改良和生物措施。物理调控措施的机理相对明确,操作性较强^[3],其措施主要有秸秆深埋、地膜覆盖、耕作保墒、深耕施肥、平整土地等^[4-6]。秸秆深埋是通过在耕层以下铺设隔层,减少因蒸发作用的水分上移,阻止深层土壤盐分向耕层运移^[7-9]。本研究选取紫茎泽兰、剑麻和小麦秸秆作为土壤隔盐材料,以黑井镇轿子山隧道弃渣场的土壤为研究对象开展室内土柱试验,研究不同隔盐材料处理下土壤水盐的分布规律,以期为改良土壤质地、改善土壤盐渍化和区域生态修复提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

将昆明当地收割晾干的小麦秆剪裁为 0.5~1.0 cm,将云南农业大学后山收割的紫茎泽兰的茎晾干并剪裁至 0.5~1.0 cm,将从昆明周边县城农村采摘的剑麻按 50% 腐烂、50% 半腐烂剪裁为 0.8~1.2 cm,三者即为供试秸秆。

试验土壤采自轿子山隧道弃渣场,自然风干,经粉碎后过 2 mm 孔径的试验筛备用。供试盐渍土中,黏粒 [直径 (d) ≤ 0.005 mm] 占 5.00%,粉粒 (0.005 mm $<d\leq 0.075$ mm) 占 14.74%,砂粒 (0.075 mm $<d\leq 2$ mm) 占 35.18%,砾粒 (2 mm $<d\leq 60$ mm) 占 45.08%,属于粉土质砾。根据 TB 10012—2019《铁路工程地质勘察规范》^[10],轿子山隧道弃渣场采样土壤含盐量为 35 g/kg,属于强盐渍土。对照组土壤取自云南省昆明市云南农业大学后山,土体呈棕红色,土质均匀,为红黏土。土样经风干、碾碎过 2 mm 筛,进行常规土力学试验。根据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》^[11]进行相关基础试验,测得土样基本物理性质见表 1。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 试验设计

试验装置(图 1)为底部密封但设有通气孔的有机玻璃圆柱(内径 10.0 cm,高 50.0 cm,壁厚 0.3 cm),自下而上依次分为盐岩层、隔盐层和耕

表 1 供试土样基本物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of test soil

土样分类 soil sample classification	天然含水率/% natural moisture content	天然密度/(g·cm ⁻³) natural density	液限/% liquid limit	塑限/% plastic limit	最优含水率/% optimal moisture content	最大干密度/(g·cm ⁻³) maximum dry density
盐渍土 saline soil	12.21	1.39	25.90	18.70	17.49	1.74
红黏土 red clay	20.10	1.13	31.40	21.50	28.20	1.42

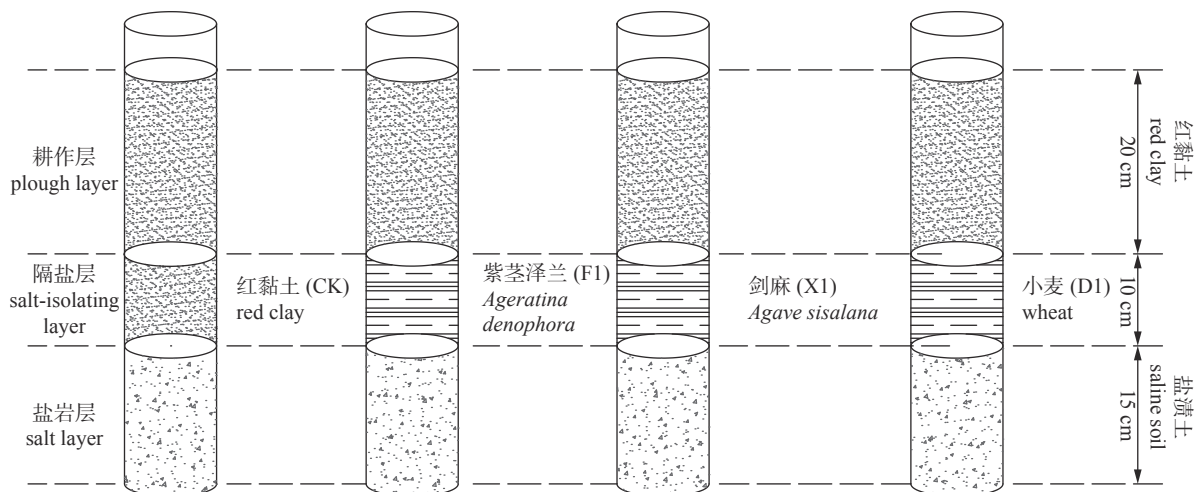


图1 试验装置和处理

Fig. 1 Test device and treatments

作层3层填装。盐岩层为厚度15 cm的盐渍土压实;隔盐层分别用厚度为10 cm的紫茎泽兰(F1)、剑麻(X1)、小麦(D1)秸秆填充作为隔盐材料,对照(CK)用厚度为10 cm的红黏土填充,共计4个处理;耕作层以厚度为20 cm的红黏土覆盖。

1.2.2 试验方法

把经过CK、F1、X1、D1处理的试验土柱放置于云南农业大学水利学院开展室内试验。每天10:00,用精度为1/10、量程为40 kg的电子秤称量土柱,连续称量42 d,计算土壤蒸发量。为了更直观地说明不同隔盐材料对土壤水分蒸发的影响,对蒸发抑制率进行计算,即不同隔盐材料处理的累积蒸发量与对照累积蒸发量的差值占对照累积蒸发量的百分数。土柱与传感器相结合,分别于蒸发试验第1、14、28和42天时,利用土壤墒情传感器(RS485类型)测定土柱内土壤的含水率和盐分含量,每隔6 cm测定1次。

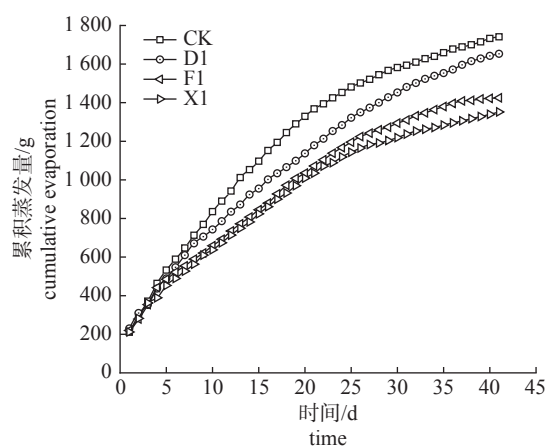
1.3 数据统计与分析

采用Excel 2010处理数据;采用Origin 2018绘图。

2 结果与分析

2.1 不同隔盐材料对土壤蒸发的影响

由图2可知:蒸发初期,不同隔盐材料处理下的土壤水分累积蒸发量差异不显著($P>0.05$),蒸发强度表现为 $D1>F1>X1>CK$;随着蒸发时间的延长,土壤累积蒸发量呈增加趋势,蒸发速率逐渐趋于平缓。蒸发5 d时,对照组的蒸发强度



注:CK.对照处理;F1.紫茎泽兰为隔盐材料;X1.剑麻为隔盐材料;D1.小麦为隔盐材料;下同。

Note: CK. control treatment; F1. *Ageratina adenophora* used as salt-isolating material; X1. *Agave sisalana* used as salt-isolating material; D1. wheat used as salt-isolating material; the same as below.

图2 不同隔盐材料处理下土壤累积蒸发量的变化

Fig. 2 Changes of cumulative evaporation of soil under different treatments of salt-isolating materials

逐渐超过隔盐材料组,累积蒸发量表现为 $CK(532.4\text{ g})>D1(489.2\text{ g})>F1(485.1\text{ g})>X1(452.9\text{ g})$,D1和F1土壤累积蒸发量差异不显著($P>0.05$),但X1显著低于D1和F1($P<0.05$)。说明埋置隔盐层降低了土壤的累积蒸发量,与CK相比,3种隔盐材料中剑麻的效果最好,紫茎泽兰次之,小麦最差。此外,由表2可知:土壤水分蒸发抑制率为 $X1>F1>D1$,与CK相比,D1、F1和X1的累积蒸发量在蒸发5、10和25 d分别下降了10.80%、19.31%和22.82%,到蒸发后期各处理蒸发抑制率略有下降,累积蒸发量增长缓慢。因此,3种

表 2 不同隔盐材料的土壤水分蒸发抑制率

Tab. 2 Inhibition rate of soil moisture evaporation under different treatments of salt-isolating materials

%

隔盐材料 salt-isolating materials	5 d	10 d	25 d	40 d
D1	8.12±0.74 b	11.09±0.22 c	10.80±0.32 c	5.22±0.26 c
F1	8.80±0.21 b	21.17±0.52 b	19.31±0.38 b	17.91±2.08 b
X1	14.50±0.69 a	23.70±0.88 a	22.82±0.19 a	22.69±0.32 a

注: F1. 紫茎泽兰为隔盐材料, X1. 剑麻为隔盐材料, D1. 小麦为隔盐材料; 同列不同字母表示具有显著差异 ($P<0.05$)。

Note: F1. *Ageratina adenophora* used as salt-isolating material, X1. *Agave sisalana* used as salt-isolating material, D1. wheat used as salt-isolating material; different letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

隔盐材料处理中, 剑麻蒸发强度最低, 蒸发抑制作用表现最好。

2.2 不同隔盐材料对土壤剖面含水率的影响

由图 3 可知: 不同隔盐材料改变了土壤结构, 且都具有一定的吸水性, 在不同处理下土壤含水率表现出一定差异性。(1) 蒸发 1 d 时, 各处理 0~12 cm、30~42 cm 土壤含水率差异不显著 ($P>0.05$), 土壤平均含水率表现为 $F1>X1>D1>CK$; 与 CK 相比, F1、X1 和 D1 的土壤含水率在 0~18 cm 分别提高 6.06%、5.03% 和 3.46%, 在 18~

30 cm 增幅为 47.51%、34.98% 和 23.07%, 说明埋设隔盐层能提升上层土壤的持水能力。(2) 当蒸发试验进行至 14 d 时, 不同处理下 0~18 cm 层土壤平均含水率表现为 $F1(24.30\%)>X1(24.10\%)>D1(24.00\%)>CK(22.60\%)$, 而这 4 个处理的 18~30 cm 层土壤平均含水率分别为 21.90%、30.10%、27.60% 和 25.50%。与蒸发 1 d 时相比, CK、F1、X1 和 D1 处理 0~18 cm 层的土壤平均含水率分别减少 1.70%、6.00%、5.10% 和 3.70%, 18~30 cm 层的土壤平均含水率分别减少 0.17%、2.54%、

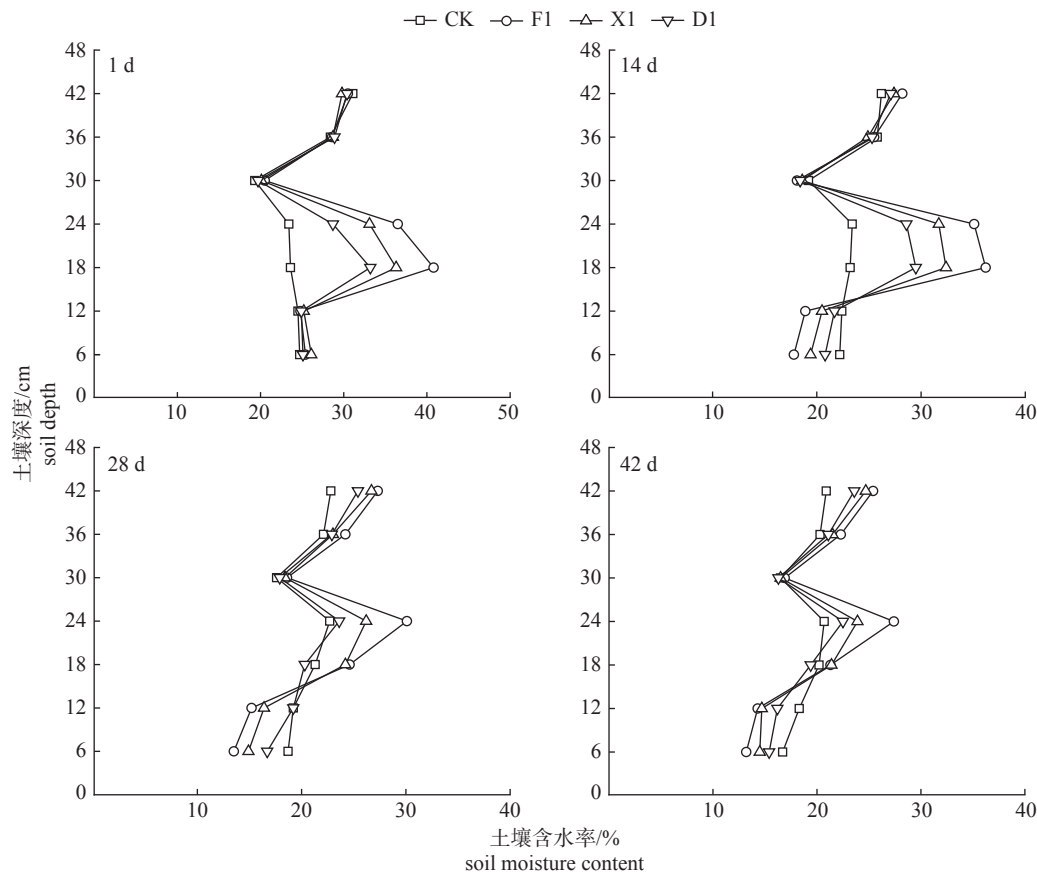


图 3 不同隔盐材料处理的土壤剖面含水率分布

Fig. 3 Distribution of soil profile moisture content treated with different salt-isolating materials

2.27%和1.70%。可见,不同处理下18~30 cm层土壤的平均含水率减小幅度差异不明显。与CK相比,在0~18 cm层设置隔盐层后土壤平均含水率都较大,其中D1处理的土壤平均含水率降幅最小,F1处理的降幅最大,表现为 $F1 > X1 > D1 > CK$,说明隔盐材料提高了土壤表层的失水速率,抑制下层水分的上移速率。(3)蒸发至28 d时,表层土壤逐渐失水,形成干土层,蒸发强度进一步降低。CK、F1、X1和D1处理的0~18 cm层土壤平均含水率分别为19.73%、17.76%、18.50%和18.74%,18~30 cm层土壤平均含水率分别为20.53%、24.97%、22.93%和20.26%。(4)蒸发至42 d时,与28 d相比,CK、F1、X1和D1的0~18 cm层土壤平均含水率分别减少1.33%、1.49%、1.64%和1.92%,18~30 cm层土壤平均含水率分别减少1.40%、3.11%、2.33%和0.86%,土壤平均含水率变化差异不显著($P > 0.05$),说明土壤水分主要以水汽扩散的方式穿过干土层进入大气;与CK相比,F1、X1和D1的0~18 cm层土壤平

均含水率分别降低11.58%、8.69%和5.38%,而18~30 cm层土壤的平均含水率分别提高14.26%、7.68%和1.42%,说明埋置隔盐层对土壤上层具有良好的保水性,且紫茎泽兰的保水性能最好。

2.3 不同隔盐材料处理对土壤盐分含量的影响

由图4可知:不同隔盐材料均能够抑制土壤盐分上移,且与蒸发过程相关。随着蒸发的进行,盐岩层的盐分随毛管水通过隔盐层上升到耕作层,水分蒸发后,使盐分积累在表层土壤中,表现为CK最大,F1最小。(1)蒸发1 d时,土壤各深度层盐分含量差异较小,不同处理间耕作层和隔盐层平均含盐量较小,盐岩层含盐量较大,土壤中的盐分主要集中在盐岩层。(2)蒸发至14 d时,不同隔盐材料处理的0~18 cm土层平均含盐量表现为 $CK > X1 > F1 > D1$,18~30 cm土层的平均含盐量表现为 $CK > D1 > X1 > F1$,30~42 cm土层平均含盐量表现为 $F1 > X1 > D1 > CK$,说明埋置隔层均可降低上层土壤(0~18 cm)的含盐量,降低土壤的输水能力;不同处理18~30 cm土层盐分累

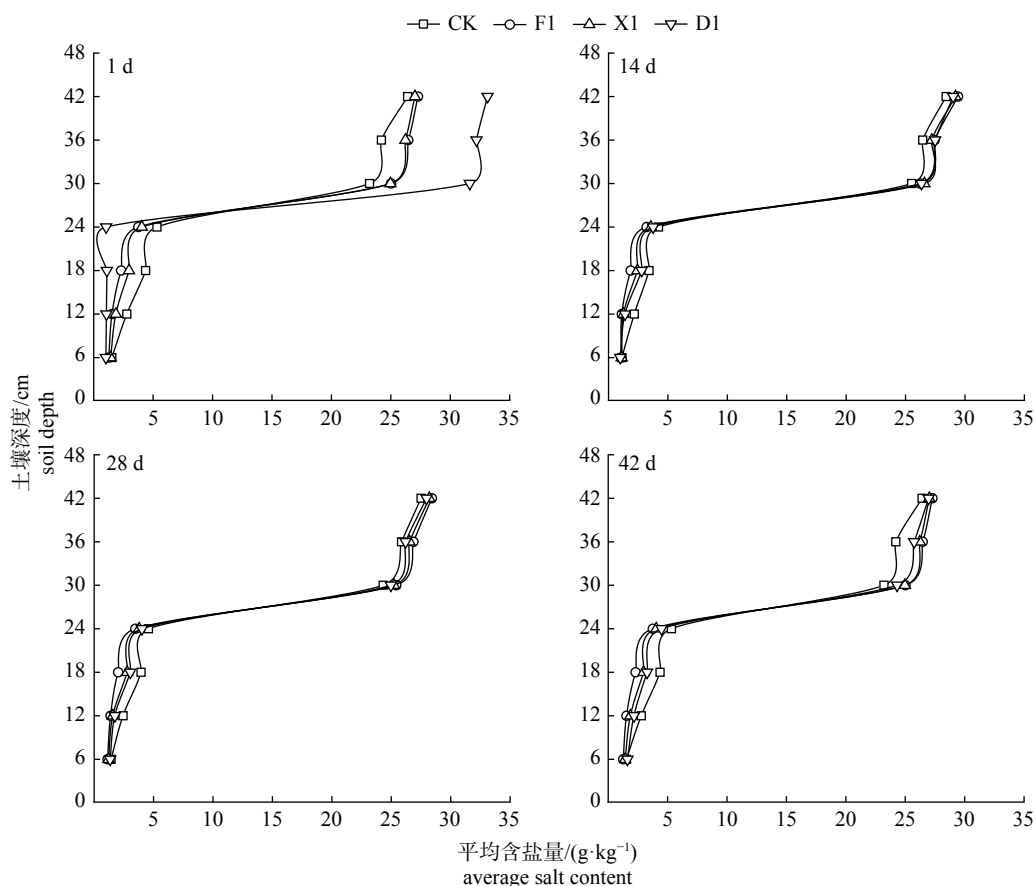


图4 不同隔盐材料处理土壤剖面含盐量分布

Fig. 4 Distribution of salt content in soil profiles treated with different salt-isolating materials

积明显, 主要原因是隔盐材料处理分层压实后孔隙率有差异, 并且不同材料的表面斥水性存在一定程度差异。(3) 蒸发至 28 d 时, 不同隔盐材料处理的 0~18 cm 土层平均含盐量表现为 $CK > D1 > X1 > F1$, 18~30 cm 土层的平均含盐量表现为 $CK > D1 > X1 > F1$, 30~42 cm 土层 CK、F1、X1 和 D1 的平均含盐量分别为 24.61、26.26、26.08 和 25.68 g/kg。各处理土壤平均盐分含量增幅较小, CK、F1、X1 和 D1 的 0~18 cm 土层平均盐含量增幅分别为 16.97%、14.50%、16.80% 和 15.68%, 18~30 cm 土层的平均盐含量增幅分别为 11.81%、8.67%、9.67% 和 7.97%。(4) 蒸发 42 d 时, F1、X1 和 D1 处理的 0~18 cm 土层平均盐含量比 CK 分别降低了 34.83%、23.61% 和 12.50%, CK、F1、X1 和 D1 处理 30~42 cm 土层平均含盐量分别为 24.61、26.26、26.08 和 25.68 g/kg, 说明埋置隔层能够有效抑制土壤盐分向土壤表层集聚, 且紫茎泽兰抑制盐分的效果最明显。

3 讨论

土壤水分是土壤盐分运移的重要载体, 设置隔盐层会破坏原土体毛细管的连续性、增加土壤孔隙度。有研究表明: 利用地上降雨和灌溉水对隔层以上土壤淋洗盐分, 或通过隔层切断土壤的毛细管作用, 阻隔地下水向上层运动引发返盐可以改善土壤理化性质, 增加土壤有机质, 优化土壤水盐分布, 有效提高土壤“保水抑盐”的能力^[7]。隔层材料填充改变土壤结构的同时还能通过降低土壤累积蒸发量来降低土壤积盐量, 达到改良盐碱的目的。地表覆盖可改变土壤上边界条件, 重度盐渍土地表覆膜可减少蒸发量 12.1%~25.5%, 能降低表层土壤积盐量 14.3%~32.4%^[12]。地表覆膜的隔盐效果主要集中于 0~10 cm 的表层土壤, 而作物根系生长分布不只局限于表土层, 85% 以上的根系分布在 0~40 cm 土层^[13]。有学者提出: 将表层覆盖材料埋设在地下适宜深度更利于土壤耕层脱盐^[14]。本研究中, 填充隔盐材料土壤的土壤蒸发强度和累积蒸发量低于裸土, 减少蒸发量 5.22%~22.69%, 降低表层土壤积盐量 12.50%~34.72%, 这可能是由于不同隔盐层材料阻隔水分运移的机理不同, 降低土壤蒸发速率和抑制的土壤水分蒸发效果也不同。小麦秸秆表面由疏水蜡

组成, 具有一定的斥水性, 在一定程度上对土壤的蒸发产生阻抑作用, 且小麦秸秆的覆盖使得水汽只能通过隔盐层间的毛细管道扩散, 蒸发水分。剑麻剪裁后呈片状结构, 分层压实后对土壤表层覆盖比较大, 孔隙度较低, 减缓了表层土壤与大气的水分能量交换。紫茎泽兰吸水性和持水性较强, 降低了水汽扩散通量。

应用较多且降盐控盐效果较为理想的隔盐材料包括河沙、炉渣、陶粒、沸石、蛭石、玉米秸秆等。张清敏等^[15]在盐渍化地区土地整理过程中提出“炉渣和玉米秸秆(隔盐材料)+隔盐层深度 60 cm+有机肥(改良剂)”的改良方案能有效改良土壤性状。此外, 隔盐材料能有效保水降盐, 促进植物光合作用及生长。王琳琳等^[16]在盐碱地刺槐造林中采用沸石、陶粒和河沙作为隔盐层材料, 均有助于土壤保墒控盐、改善植物光合特性以及促进刺槐生长, 其中沸石 0~80 cm 土体内盐分含量和土壤盐溶质浓度显著降低, 为最佳隔盐材料。本研究中, 各处理表层盐分含量随时间的推移呈上升趋势, 且表层盐分含量因隔盐材料的填充而降低, 隔盐层以下盐分含量上升, 这可能是由于隔盐材料填充降低了土壤蒸发强度, 减缓了可溶盐随水分向土壤表层运输的效率, 进而降低土壤表层盐分含量, 使盐分被阻断在隔盐层以下。

由于试验采用室内土柱模拟的方式进行, 只研究了短时间内土壤剖面水盐的变化规律, 未在室外进行长时间的大田或微区试验, 考虑到隔盐材料长时间存在于土壤中会发生分解, 长期利用是否会导致土壤理化性质发生变化, 并且不同隔盐材料分解速率不一致, 对土壤的改良效果和持续时间亦不明确, 故在今后的研究中应加长试验周期, 开展土柱模拟试验的同时进行大田试验, 确保研究结果具有实践性。

4 结论

(1) 埋置隔盐层能够抑制土壤水分蒸发。不同隔盐材料可在不同程度上降低土壤蒸发强度, 土壤累积蒸发量表现为对照>小麦>紫茎泽兰>剑麻。土壤水分蒸发抑制作用表现为剑麻>紫茎泽兰>小麦, 且蒸发抑制表现与隔盐材料有关, 隔盐材料占比越大, 蒸发抑制率越高。

(2) 埋置隔盐层能够提高土壤保水持水能力。在蒸发阶段,以剑麻、紫茎泽兰和小麦为隔层的土柱,0~18 cm 土层的土壤含水率降幅大于对照组,18~30 cm 土层的土壤含水率降幅小于对照组,保水能力表现为紫茎泽兰>剑麻>小麦>对照;蒸发强度主要受土壤导水率控制,隔盐材料剪裁处理后的片状结构减小了土壤水分的蒸发通道,从而使下层水分上移更缓慢,限制了土壤水分扩散运动,使下层保持更高的含水率。

(3) 随着蒸发的进行,水分由土柱底部向表层运移,液态水逐渐减少,气态水占优,因此单位时间内盐分运移速率逐渐缓慢。埋置隔层能够有效抑制盐分向土壤表层聚集,且紫茎泽兰的抑制盐分效果最明显。

[参考文献]

- [1] 胡炎,杨帆,杨宁,等.盐碱地资源分析及利用研究展望[J].土壤通报,2023,54(2):489. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022031902.
- [2] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993.
- [3] 王婧,逢焕成,任天志,等.地膜覆盖与秸秆深埋对河套灌区盐渍土水盐运动的影响[J].农业工程学报,2012,28(15):52. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.15.009.
- [4] 丁光伟,赵存兴.黄土高原地区土地盐渍化的防治[J].干旱区资源与环境,1991(4):49. DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.1991.04.008.
- [5] ZHAO Y G, WANG S J, LI Y, et al. Long-term performance of flue gas desulfurization gypsum in a large-scale application in a saline-alkali wasteland in northwest China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2018, 261: 115. DOI: 10.1016/j.agee.2018.01.009.
- [6] ZHENG H, WANG X, CHEN L, et al. Enhanced growth of halophyte plants in biochar-amended coastal soil: roles of nutrient availability and rhizosphere microbial modulation[J]. Plant Cell and Environment, 2018, 41(3): 517. DOI: 10.1111/pce.12944.
- [7] ZHANG H, CHUANG L U, PANG H, et al. Straw layer burial to alleviate salt stress in silty loam soils: impacts of straw forms[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(1): 265. DOI: 10.1016/s2095-3119(19)62737-1.
- [8] 王乐,何平如,张红玲,等.秸秆深埋和覆膜对土壤水盐及番茄产量的影响[J].水土保持研究,2020,27(3):372. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2020.03.053.
- [9] HUO L, PANG H C, ZHAO Y G, et al. Buried straw layer plus plastic mulching improves soil organic carbon fractions in an arid saline soil from Northwest China[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 165: 286. DOI: 10.1016/j.still.2016.09.006.
- [10] TB 10012—2019. 铁路工程地质勘察规范[S].
- [11] GB/T 50123—2019. 土工实验方法标准[S].
- [12] WANG X P, YANG J S, YAO R J, et al. Manure plus plastic film mulch reduces soil salinity and improves barley-maize growth and yield in newly reclaimed coastal land, eastern China[J]. Water, 2022, 14(19): 2944. DOI: 10.3390/w14192944.
- [13] 马忠明,陈娟,刘婷婷,等.水氮耦合对固定道垄作栽培春小麦根长密度和产量的影响[J].作物学报,2017,43(11):1705. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2017.01705.
- [14] 张曼玉,杨海昌,张风华,等.秸秆还田方式对盐碱土壤微观结构和理化性质的影响[J].节水灌溉,2022(5):65. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2022.05.011.
- [15] 张清敏,刘峻岭,李洪远,等.盐渍化地区土地整理过程中的土壤改良[J].水土保持通报,2014,34(2):224. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.047.
- [16] 王琳琳,李素艳,孙向阳,等.不同隔盐措施对滨海盐碱地土壤水盐运移及刺槐光合特性的影响[J].生态学报,2015,35(5):1388. DOI: 10.5846/stxb201403090402.

责任编辑:何承刚