DOI: 10.11766/trxb202505210233 **CSTR: 32215.14.trxb202505210233**

乐丽格，程婕妤，黄种辉，吕义豪，谢文萍，林金石，蒋芳市，黄炎和，张越. 秸秆覆盖和生物质炭隔层对滨海新增耕地水盐运移的影响[J]. 土壤学报，2026，

LE Lige, CHENG Jieyu, HUANG Zhonghui, LÜ Yihao, XIE Wenping, LIN Jinshi, JIANG Fangshi, HUANG Yanhe, ZHANG Yue. Effects of Straw Mulching and Biochar Interlayer on the Water and Salt Movement in Newly Reclaimed Cultivated Land in Coastal Areas[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

秸秆覆盖和生物质炭隔层对滨海新增耕地水盐运移的影响*

乐丽格[1]，程婕妤[1]，黄种辉[1]，吕义豪[1]，谢文萍[2]，林金石[1]，蒋芳市[1]，黄炎和[1]，张 越[1†]

(1. 福建农林大学资源与环境学院，福州 350002 ; 2. 中国科学院南京土壤研究所，南京 211135)

摘 要：滨海新增耕地实现可持续利用的关键是控制土壤盐分上升，覆盖和隔层是控制表层土壤积盐的常用措施，但是目前有关秸秆覆盖+生物质炭隔层的组合效应对东南沿海土壤水盐运移的影响尚不明确。本研究以福建滨海新增耕地为对象，探究了生物质炭隔盐层（埋深 25 cm、45 cm）+秸秆覆盖对盐渍土壤水分入渗过程和蒸发过程中水盐分布的影响。结果表明：在淋洗过程中，生物质炭隔层可减缓湿润锋运移速率，其中 T3-25（表层秸秆覆盖+25 cm 处生物质炭隔层）处理效果最佳，入渗 73 h 时，其湿润锋运移距离较 CK 降低了 4.07%。随淋洗时间延长，各处理淋洗液含盐量下降，淋洗第一天 T3-45 的淋洗液含盐量最高，为 16.24 g·L^{-1}，但从总脱盐量看，CK 因无隔层阻碍表现为最优，淋洗结束后其 pH 也最高，为 8.07。在 0～45 cm 土层，各处理土壤含盐量显著降低，CK 的脱盐率最高，为 68.68%，T3-45 脱盐率高于 T3-25。T3-25 的平均 Na^+含量降幅最大，为 74.76%。在地下水埋深 65 cm 的蒸发条件下，0～45 cm 土层，T3-0 和 T3-45 的含水率显著高于 CK。蒸发 45 天后，各处理该土层土壤盐分和 Na^+含量均显著增加，T3-45 的积盐率和 Na^+含量增幅最低，分别为 3.49%和 14.06%，CK 则最大，分别为 54.21%和 150.19%，各处理 pH 较蒸发前显著升高，且较 CK 高 0.71%～3.57%。以上结果表明，秸秆覆盖+45 cm 处生物质炭隔层协同效应最佳，在减少水分蒸发的同时，其对促进滨海盐渍土降盐、抑盐的效果也最好。本研究发现 T3-25 处理与 T3-45 处理的效果接近，在兼顾前期成本的实际应用过程中，在东南地区滨海新增耕地中可考虑秸秆覆盖+ 25 cm 处生物质炭隔层的改良措施。

关键词：秸秆覆盖；生物质炭隔层；脱盐率；积盐率；水盐动态

中图分类号：S157.1 **文献标志码**：A

Effects of Straw Mulching and Biochar Interlayer on the Water and Salt Movement in Newly Reclaimed Cultivated Land in Coastal Areas

LE Lige[1], CHENG Jieyu[1], HUANG Zhonghui[1], LÜ Yihao[1], XIE Wenping[2], LIN Jinshi[1], JIANG Fangshi[1], HUANG Yanhe[1], ZHANG Yue[1†]

* 国家重点研发计划项目(2022YFD190010301)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China(No.2022YFD190010301)

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：zhangyue@fafu.edu.cn

作者简介：乐丽格（1999-），女，广西桂林人，硕士研究生，主要从事土壤侵蚀与修复研究。E-mail:2907024658@qq.com

收稿日期：2025-05-21；收到修改稿日期：2026-01-24；网络首发日期（www.cnki.net）：

(1. *College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou* 350002, *China;* 2. *Institute of Soil Science*， *Chinese Academy of Sciences*， *Nanjing* 211135， *China*)

Abstract:【Objective】The key to achieving sustainable utilization of newly reclaimed cultivated land in coastal areas is to control the upward accumulation of soil salinization. In this context, mulching and subsoil interlayer placement are widely adopted measures to mitigate salt accumulation in the surface soil. However, the combined effect of straw mulching with a biochar interlayer on soil water and salt transport in the southeastern coastal regions remains unexplored.【Method】This study considered a newly reclaimed cultivated land in the coastal areas of Fujian Province as the research object, and explored the impacts of biochar salt-barrier layer (with burial depths of 25 cm and 45 cm) combined with straw mulching on the distribution of water and salt during the water infiltration and evaporation processes of saline soils.【Result】The results demonstrated that the incorporation of a biochar interlayer significantly decelerated the wetting front advancement during the leaching process. Among all treatments, T3-25 (straw mulching combined with a biochar interlayer at 25 cm depth) exhibited the most pronounced effect, reducing the migration distance by 4.07% compared to the control (CK) after 73 hours of infiltration. As the leaching time prolonged, the salt content of the leachate in all treatments gradually decreased. On the first day of leaching, the T3-45 treatment (surface straw mulching + 45 cm biochar interlayer) had the highest leachate salt content, reaching 16.24 $g \cdot L^{-1}$. In terms of total desalination amount, CK outperformed all interlayer treatments due to the absence of interlayer obstruction; it also had the highest pH value (8.07) after leaching. In the 0~45 cm soil layer, a significant reduction in soil salt content was observed across all treatments. The control (CK) treatment exhibited the highest desalination rate at 68.68%, while the T3-45 treatment demonstrated a superior desalination effect compared to T3-25. Regarding specific ions, the T3-25 treatment showed the most pronounced decrease in Na^+ content, with an average reduction of 74.76%. Also, under the evaporation condition with a groundwater table depth of 65 cm, the soil water content in the 0~45 cm layer was significantly higher in both T3-0(straw mulching only) and T3-45 treatments than in CK. Following 45 days of evaporation, a notable increase in both total salt and Na^+ content was detected in the 0~45 cm soil layer for all treatments. Additionally, the T3-45 treatment displayed the lowest increments in the salt accumulation rate and Na^+ content, at 3.49% and 14.06% respectively, relative to pre-evaporation levels. In contrast, the CK treatment exhibited the most severe salt accumulation, with corresponding increases of 54.21% and 150.19%. By the end of the evaporation stage, the soil pH in all treatments had increased significantly compared to both pre-evaporation values and the CK, with the relative increase over CK ranging from 0.71% to 3.57%.【Conclusion】Based on the experimental results, the combined application of straw mulching with a biochar interlayer at 45 cm depth proved most effective. It not only reduces water evaporation but also achieves the best performance in promoting desalination and inhibiting the salinization of coastal saline soil. This study found that the effects of the T3-25 treatment and the T3-45 treatment are similar. In practical applications where upfront cost-effectiveness is a consideration, the improvement measure of straw mulching with a biochar interlayer buried at a 25 cm depth can be considered for newly reclaimed coastal farmlands in the southeast region.

Key words: Straw mulching; Biochar Interlayer; Desalination rate; Salt accumulation rate; Water-salt dynamics

土壤盐渍化是指可溶性盐分在土壤中积聚，对土壤的物理、化学、生物等特性和植物生长造成不良影响的现象，常造成植被退化，降低土地生产力，同时极大地危害区域生态环境[1-2]。盐渍土广泛分布于全球许多干旱和半干旱地区，2024 年盐渍土壤全球评估关键报告显示[3]，全球盐渍土壤面积达 1.38×10^9 hm^2，占全球土地总面积的 10.7%，约 10%的灌溉农田和 10%的雨养农田受到盐碱化影响，威胁着全世界的农业生产、粮食安全和可持续发展。中国约有 3.67×10^8 hm^2 的盐碱地，广泛分布在东北部、西北部、中北部、北部和沿海地区，其中滨海盐碱地面积约为 1×10^6 hm^2[4-5]。在我国东南沿海地区，滨海耕地资源紧张，而持续淤涨的沿海滩涂作为一类具备可持续利用潜力的土地资源，成为重要的后备耕地储备，但是存在盐分含量高的突出问题[6]。因此，降低滨海盐渍土的盐分含量，对其进行合理的开发利用，有助于缓解东南沿海地区耕地资源的不足，对区域农业的可持续发展具有重要意义。

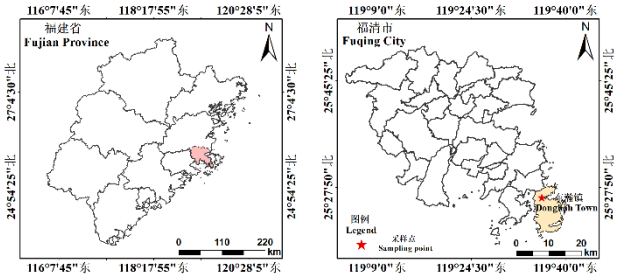
东南滨海地区地下水位浅，土壤结构性差，保水能力弱，土壤水分蒸发量较大，盐分随水分向土壤表层运动，导致盐分在土壤表层积聚，发生土壤盐碱化，进而影响植物生长。在各种水盐调控措施中，顶覆盖和底隔离技术一直是研究热点之一。覆盖是减少土壤水分散失的主要措施，农业生产中以地膜和秸秆使用最为广泛，其中，秸秆覆盖可有效抑制土壤水分的蒸发，促进降雨时盐分的淋洗，抑制地表返盐，减轻盐分表聚[7]。孙博等[8]研究结果表明，秸秆覆盖能有效提高盐渍土不同生育期土层（0～10 cm）含水率，抑制表层土壤盐分积聚，并有效提高了耕地面积的利用。隔盐层技术主要利用土壤层次变化引起的水盐运动状况变化来实现[9]，通过在土壤剖面创建疏松隔层可以阻滞盐分上行，增加土壤排水可以加快土体排盐，从而定向调控土壤水盐运动[10]。赵永敢等[11]通过室内土柱模拟试验，结果表明，在浅层地下水埋深 1 m 的条件下，秸秆隔层结合地膜覆盖对 0～40 cm 土层潜水蒸发和土壤返盐的抑制效应更强，淡化耕层作用更为明显。孙艳[12]通过土柱试验发现，在土层 30 cm 处设置生物质炭隔层可以降低黄河三角洲滨海盐碱地土壤水分入渗，提高盐分淋洗效率，进而降低土壤中的盐分含量。史丹一等[13]研究结果表明，在滨海盐渍土中添加生物质炭能够增加累积入渗量，提高持水能力，且酸改性生物质炭较生物质炭效果更明显。Akhtar 等[14]研究表明，由于生物质炭较强的吸附作用，可将盐碱土壤中的 Na^+吸附并固定于团聚体中，有效调控土壤盐分。王曼华等[15]研究结果显示，秸秆覆盖+秸秆隔离对地下水埋深为 1 m 的土壤水分蒸发和 0～40 cm 土壤返盐的抑制效果大于单独秸秆覆盖和秸秆深层隔离。部分学者对秸秆覆盖或地膜覆盖结合秸秆隔层措施进行了研究[11, 15]，在不同地区和不同水文地质条件下，隔层深度或隔层+覆盖的组合模式存在显著差异，如隔层深度 30 cm 和 40 cm[12, 16]。因此，秸秆覆盖结合生物质炭隔层对东南地区滨海盐渍土水盐运移的影响机理及作用效果还需深入研究。

基于以上分析，本文采用室内土柱模拟试验，研究秸秆覆盖结合生物质炭隔层（25 cm 和 45 cm）对土壤水分淋洗和蒸发过程的影响，并探讨其对滨海轻度盐渍土的协同改良效果，以期为秸秆覆盖和生物质炭隔层在滨海新增耕地的初步改良应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省福清市东瀚镇（25°25′N，119°36′E）滨海平原（图 1），该地区为亚热带海洋性季风气候，年平均气温 19～20℃，年平均降雨量 1 200～1 400 mm，降雨量集中在 4—9 月（占全年的 70%以上）。该地块由填海造地而成，现场形成一片淤泥地，淤泥深度约 1.5 m，地下水位浅，具有土壤结构性差，保水能力弱，水分蒸发量大等问题，无法直接作为耕地使用。根据福清市东瀚镇东瀚村土地整治项目要求并结合福清市正在实施的建设项目，将开挖的土方运至研究区，并加以碾压作为覆土层，再客土肥力较好的土壤作为耕作层，有效土层厚度大于 60 cm，耕作层厚度大于 15 cm，将研究区改造为后备耕地。



注：该图基于自然资源部标准地图服务下载的审图号为 GS(2024)0650 的标准地图制作，底图无修改。Note： This map was created based on the standard map downloaded from the Standard Map Service of the Ministry of Natural Resources of

the People's Republic of China, with the map verification number GS(2024)0650. No modifications have been made to the base map.

图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the study area

1.2 供试材料

试验所用土壤采自福建省福清市项目研究区，采样深度为 0～60 cm 的土壤。测定的基本理化性质如表 1 所示。将采集的土样在室内自然风干后，去除根系、碎石等杂物，混合均匀，过 2 mm 筛，保存备用。供试的材料为玉米秸秆和玉米秸秆生物质炭（电导率为 1.22 mS·cm^{-1}），试验前将秸秆剪至 2～3 cm 长。所采集的土壤为轻度化盐渍土，研究区周边潮汐沟中的咸水矿化度为 57.38 mS·cm^{-1}。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil used in the experiment

土壤 Soil	机械组成 Mechanical composition/（mm,%）			土壤质地 Soil texture	容重 Bulk density/（g·cm^{-3}）	pH	含盐量 Salt content/（g·kg^{-1}）
	＞0.002	0.002～0.05	0.05～2				
滨海耕地①	15.84	60.33	23.83	粉壤土②	1.43	7.06	1.15

①Coastal cultivated land，②Silty loam

试验采用直径 10 cm，高 80 cm 的 PVC 管做土柱试验。土层高 55 cm，生物质炭隔层厚度为 5 cm，顶部蓄水层高 15 cm，在土柱侧壁沿垂直向下方向的三个面，从土表开始每隔 10 cm 处设有口径为 1.5 cm 的取样孔，水分入渗过程用橡胶塞堵住，取样时打开并采集相应土层的土壤样品，进行水盐动态监测。装土前，为记录水分入渗迁移湿润锋变化，在土柱侧壁标明刻度尺；在土柱底部装填厚度为 5 cm（空白处理厚度为 10 cm）的干净的石英砂作为渗滤层，模拟地下饱和含水层。底部留一直径为 1 cm 的开口，连接塑料软管，在土柱下方放置小白瓶承接渗出的淋洗液，试验装置如图 2 所示。

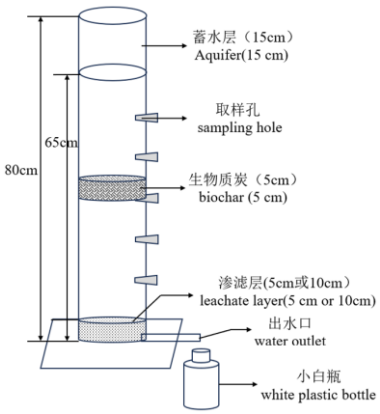


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the in-lab experiment

1.3 试验设计

试验前，先将风干的土样研磨后过 2 mm 筛，混合均匀后按特定容重装入 PVC 管，每 10 cm 为一层进行装填。为保证土样容重均匀，每装填一层压实后，需把土壤表面刮毛。本试验采用双因素设计，具体因素水平如下：表层秸秆覆盖设置“有覆盖（覆盖厚度 3 cm，用量 2 100 kg·hm^{-2}）”和“无覆盖”两个水平。生物质炭埋设深度设置“土表下 0 cm（即无生物质炭埋设）”、“土表下 25 cm”、“土表下 45 cm”三个水平，其中生物质炭用量为 20 400 kg·hm^{-2}。两个因素相互交叉，共 6 个处理，

分别为 CK、T0-25、T0-45、T3-0、T3-25、T3-45，具体如表 2 所示，每个处理设置 3 次重复。为避免降雨对试验的影响，将试验土柱放置在室内进行。

土柱淋洗模拟试验过程：土柱装填好后，为使土柱紧密、容重均匀，在室温 25℃，相对湿度为 58%的条件下，将土柱静置 24 h。按照测得的饱和含水量，用一定量的去离子水对土柱进行淋洗，使其自然入渗。以无秸秆处理和无生物质炭处理的空白 PVC 管作为对照。在入渗过程中，按照 0.5、1、2 h“先密后疏”的时间规律记录湿润锋的位置，湿润锋运移结束后，收集淋洗液，当淋洗液不再渗出时，淋洗结束。淋洗液按照前后顺序依次编号，测定电导率、pH。淋洗结束后立即采集土样，取样位置分别距土表 10 cm、20 cm、40 cm 处，每次取样位置不重复，用于测定土壤含水率、电导率、pH、钠离子含量。

土柱地下水蒸发模拟试验过程：在土柱淋洗结束的基础上，室温 25℃，相对湿度为 58%的条件下，将土柱放置于试验样地采集回来的咸水中，咸水电导率为 57.38 mS·cm^{-1}，模拟地下水环境，地下水埋设深度为土层下 65 cm。试验开始后，打开进水口，使其自然蒸发，直至土面有白色盐分渗出时立即取样，取样深度与淋洗试验过程一致。对同一位置的取样孔轮流取样，每次取样位置不重复，用于测定土壤含水率、电导率、pH 和 Na^+含量。

表 2 试验处理

Table 2 Designing of the experiment

处理 Treatment	表层秸秆覆盖厚度 Surface straw mulching thickness/cm	生物质炭埋设深度 The burial depth of biochar/cm
T3-25	3	25 cm 下埋设 5 cm 厚
T3-45	3	45 cm 下埋设 5 cm 厚
T3-0	3	0
T0-25	0	25 cm 下埋设 5 cm 厚
T0-45	0	45 cm 下埋设 5 cm 厚
CK	0	0

1.4 测定方法

含水率用105℃烘干法；电导率、pH：水样直接测定，土样、生物质炭采用1:5的土水比浸提，均采用电极法；Na^+采用火焰光度法[17]。

1.5 数据处理与分析

溶液 EC 值与含盐量的关系公式为:

$$y=0.8602x+0.2847$$

式中，y 表示盐分含量（g·L^{-1}）；x 表示电导率（mS·cm^{-1}）。

脱盐率(%)计算公式为:

$$脱盐率(\%)=\frac{C_0\text{-}C_1}{C_0}\times 100$$

式中，C_0表示初始土壤盐分含量（g·kg^{-1}）；C_1表示淋洗后土壤盐分含量（g·kg^{-1}）。

积盐率(%)计算公式为:

$$积盐率(\%)=\frac{C_2\text{-}C_0}{C_0}\times 100$$

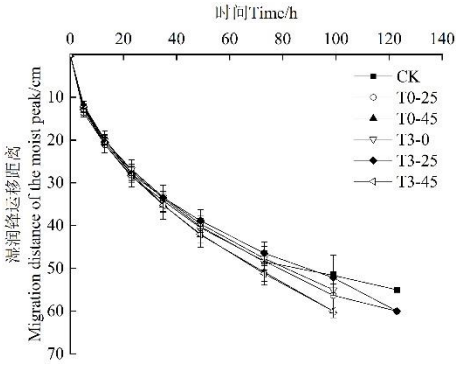
式中，C_0表示初始土壤盐分含量（g·kg^{-1}）；C_2表示蒸发后土壤盐分含量（g·kg^{-1}）。

采用 Microsoft Office Excel 2019、SPSS26.0 和 Origin 2021 进行数据整理分析以及图像绘制，采用 LSD 法检验试验数据差异的显著性水平（P<0.05）。

2 结 果

2.1 秸秆覆盖和生物质炭隔层对土壤淋洗过程中水盐运移的影响

2.1.1 不同处理对湿润锋运移的影响　各处理下的湿润锋运移深度均随时间的延长不断增加，运移速率逐渐减慢（图 3）。在土层深度 0～25 cm 内，湿润锋未进入隔盐层，0～10 cm 各处理的湿润锋运移规律差异不明显。在 10 cm 之后，各处理运移距离为 T0-25＞T3-45＞T3-25＞T3-0＞CK＞T0-45，表层秸秆覆盖处理整体运移速率较快。湿润锋冲破 25 cm 隔层后，隔盐层的存在明显降低了湿润锋运移速率。在入渗 55 h 时，T3-25、T3-0、T3-45 处理的湿润锋运移距离分别为 41 cm、41.92 cm 和 44.75 cm，T3-25 处理的运移速率相较于进入隔盐层前降低了 52.85%；CK、T0-25、T0-45 处理的湿润锋运移距离分别为 42.45 cm、42.85 cm 和 44.92 cm，T0-25 处理的运移速率相较于进入隔盐层前降低了 51.88%。在湿润锋进入 45 cm 隔盐层以下土层后，入渗 73 h 时，各处理运移距离由大到小为 T0-45＞T3-45＞CK＞T0-25＞T3-0＞T3-25，T0-45、T3-45 的运移速率相较于进入 45 cm 处隔盐层前分别降低了 14.78%、16.90%，与 CK 相比，T3-25 处理的运移距离降低了 4.07%。



注：CK、T0-25、T0-45、T3-0、T3-25、T3-45 分别表示空白对照、土表下 25 cm 处埋设 5 cm 厚度生物质炭、土表下 45 cm 处埋设 5 cm 厚度生物质炭、表层覆盖 3 cm 厚度玉米秸秆、表层覆盖 3 cm 厚度玉米秸秆+土表下 25 cm 处埋设 5 cm 厚度生物质炭、表层覆盖 3 cm 厚度玉米秸秆+土表下 45 cm 处埋设 5 cm 厚度生物质炭，下同。Note： CK、T0-25、T0-45、T3-0、T3-25andT3-45 stands for blank control, 5 cm-thick biochar buried at 25 cm soil layer, 5 cm-thick biochar buried at 45 cm soil layer, 3 cm-thick straw mulched, 3 cm-thick straw mulched+5 cm-thick biochar buried at 25 cm soil layer and 3 cm-thick straw mulched+5 cm-thick biochar buried at 45 cm soil layer. The same below.

图 3 不同处理下湿润锋深度随时间的变化

Fig. 3 Variation of wetting front with time for different treatments

2.1.2 不同处理对土壤淋洗液含盐量、pH 的影响　不同处理的淋洗液含盐量均随时间呈显著降低的趋势，且降幅随时间延长逐渐减小（图 4a）。由图可知，不同生物质炭隔层处理对淋洗液含盐量的影响更显著，第 1 天不同处理淋洗液含盐量大小依次为 T3-45＞T0-45＞T0-25＞T3-25＞CK＞T3-0，T3-45 和 T0-45 处理的淋洗液含盐量较高，分别为 16.24 $g\cdot L^{-1}$ 和 15.62 $g\cdot L^{-1}$，洗盐效果最好。淋洗第 2 天，T0-45、T0-25 和 CK 的降幅分别减小 34.49%、28.80%和 31.02%，其中，T0-45 的含盐量为 10.33 $g\cdot L^{-1}$，T0-25 的含盐量为 10.28 $g\cdot L^{-1}$，两个处理淋洗效果趋于相近。第 2 天到淋洗结束后，T0-25、T3-25 和 T0-45、T3-25 处理的淋洗液含盐量变化曲线趋于相近，隔层处理的含盐量始终大于无隔层处理。整个淋洗过程结束后，无隔层处理的淋洗液渗出时间和淋洗液体积均大于隔盐层处理，CK、T0-25、T0-45、T3-0、T3-25 和 T3-45 处理的淋洗液体积分别为 559 mL、332 mL、312 mL、544 mL、325 mL 和 312 mL，因此淋洗掉的总盐分表现为 CK 最高，T3-45 处理低于 CK，T0-25、T0-45 和 T3-25 处理低于 T3-45，T3-0 处理最小。

不同处理下淋洗液 pH 均随淋洗天数的增加呈逐渐增大的趋势（图 4b）。分析图 4b 可知，淋洗

第 1 天，各个处理 pH 大小依次为 T3-0＞CK＞T3-25＞T0-25＞T0-45＞T3-45，CK 相较于隔层处理 pH 更高，25 cm 隔层 pH 较 45 cm 更高。淋洗第 2 天至结束后，T3-0 和 CK 处理的 pH 始终大于 T3-25、T0-25、T0-45、T3-45，不同处理 pH 增加显著，CK、T0-25、T0-45、T3-0、T3-25 和 T3-45 处理的 pH 分别较第一天升高 4.95%、2.09%、4.33%、4.15%、1.56%和 3.73%，CK 增幅最高，45 cm 隔层 pH 增幅高于 25 cm。淋洗结束后，各个处理 pH 大小依次为 CK＞T3-0＞T0-45＞T3-45＞T0-25＞T3-25。综上，设置生物质炭隔盐层具有阻止淋洗液碱化的效果，各改良处理的 pH 均小于 CK。

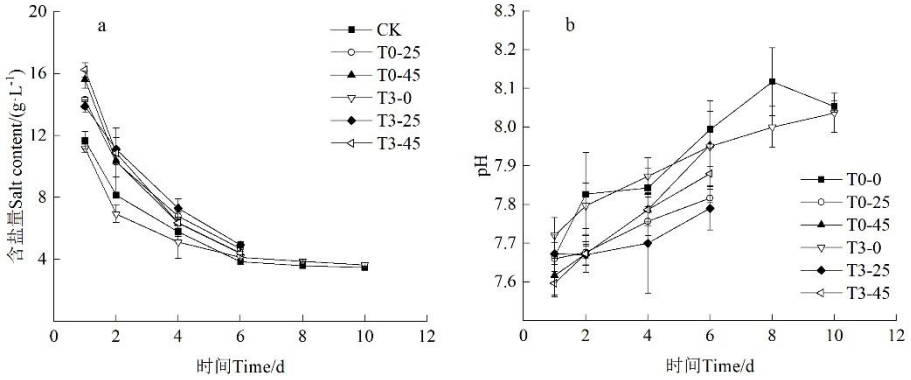


图 4 不同处理下淋洗液含盐量和 pH 随时间的变化

Fig. 4 Variation of leachate salt content and pH with time for different treatments

2.1.3 不同处理对土壤盐分的影响　本试验发现，在水分淋洗作用下，土壤剖面内的盐分随水分向下迁移，并迁移出土体（图 5）。淋洗前，土壤初始含盐量为 1.15 g·kg^{-1}，淋洗后各处理盐分含量均显著降低，且随土层加深土壤含盐量较初始盐分降幅越小。CK、T0-25、T0-45、T3-0、T3-25 和 T3-45 处理在 0～45 cm 土层土壤的含盐量降低 65.30%～68.68%。在 0～45 cm 土层，CK 处理的含盐量平均值为 0.36 g·kg^{-1}，低于 T3-0 处理的 0.40 g·kg^{-1}，同样低于 T0-25、T0-45、T3-25 和 T3-45 处理的 0.38 g·kg^{-1}。

为进一步比较各处理的淋洗效果，计算出 6 种处理在 0～15 cm、15～25 cm、25～45 cm 土层的脱盐率（表 3）。经过淋洗后，各处理具有较好的脱盐效果，脱盐率均达 60%以上，随土层加深，脱盐率逐渐减小。在三个土层中，各处理的脱盐率处于不同范围，分别为 65.73%～70.75%、65.71%～69.27%、64.44%～66.03%。CK、T0-25、T0-45、T3-0、T3-25 和 T3-45 处理在 0～45 cm 土层内的平均脱盐率分别为 68.68%、66.73%、66.66%、65.30%、66.88%和 66.97%，CK 处理脱盐率最高，为 68.68%，T3-45 的脱盐率低于 CK，为 66.97%，T0-25、T0-45 和 T3-25 处理的脱盐率低于 T3-45 且相差较小，T3-0 处理的脱盐率最小。综合图 5 与表 3 可知，经过淋洗后，不同处理土壤含盐量显著降低，CK 处理的脱盐率最高，T3-45 处理脱盐效果仅次于 CK。

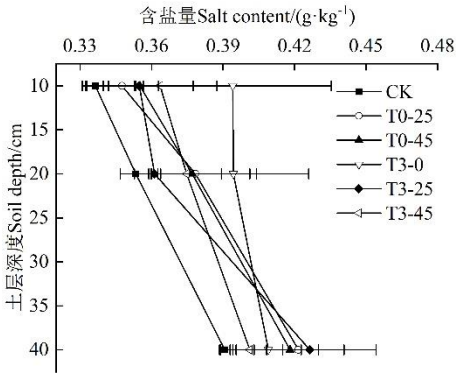


图 5 不同处理下土壤剖面含盐量

Fig. 5 Soil salt content on profiles for different treatments

表 3 不同处理下土壤剖面的脱盐率/%

Table 3 Soil desalinization rate in soil profiles under different treatments/%

深度 Depth/cm	T0-0	T0-25	T0-45	T3-0	T3-25	T3-45
10	70.75	69.78	69.12	65.73	69.14	68.39
20	69.27	67.09	67.21	65.71	68.58	67.42
40	66.03	63.34	63.65	64.44	62.92	65.11

2.1.4 不同处理对土壤 Na^+和 pH 的影响　Na^+是盐渍土中盐分的重要阳离子之一，土壤剖面盐分随水分向下迁移的过程中伴随着 Na^+含量降低（图 6a）。土壤初始 Na^+浓度为 129.77 mg·kg^{-1}，淋洗后，各处理下 0～45 cm 土层的 Na^+含量均有不同程度的降低，且随土层加深土壤 Na^+含量较初始含量降幅越小。在 0～15 cm、15～25 cm、25～45 cm 三个土层中，各处理的平均 Na^+含量分别为 26.88 mg·kg^{-1}、54.41 mg·kg^{-1}、94.45 mg·kg^{-1}，较初始含盐量分别降低 79.29%、58.07%、27.22%，由此可知，在淋洗作用下，浅层土壤的 Na^+含量下降较显著。CK、T0-25、T0-45、T3-0、T3-25 和 T3-45 处理在 0～45 cm 土层土壤的平均 Na^+含量分别为 62.49 mg·kg^{-1}、56.52 mg·kg^{-1}、69.59 mg·kg^{-1}、70.21 mg·kg^{-1}、32.75 mg·kg^{-1} 和 59.90 mg·kg^{-1}，较初始 Na^+含量降低 45.90%～74.76%。其中，T3-25 处理的平均 Na^+含量降幅最高，为 74.76%。

图 6b 为 0～45 cm 土层不同处理下土壤剖面的 pH 状况，整体上淋洗后 pH 降低。由图可知，同一处理的不同土层间，各个处理 pH 差异均不显著。同一土层不同的处理土壤 pH 中，在 0～15 cm 土层，T0-25、T0-45 和 T3-0 处理与 CK 有显著性差异；在 15～45 cm 土层中，均表现为 T0-25、T0-45、T3-0 和 T3-45 处理与 CK 有显著性差异。在 0～45 cm 土层中，CK、T0-25、T0-45、T3-0、T3-25 和 T3-45 处理土壤的平均 pH 分别为 7.16、6.91、6.61、6.84、7.01 和 6.97，各改良处理分别比 CK 降低 2.09%～7.68%。

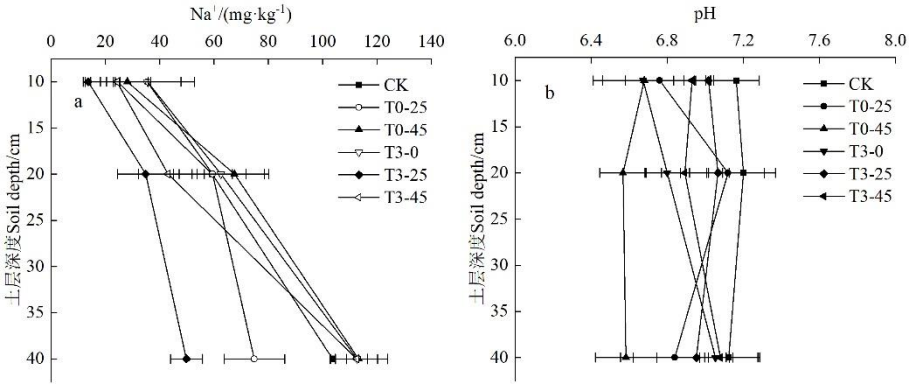


图 6 不同处理下土壤剖面 Na^+含量和 pH

Fig. 6 Soil Na^+ content and pH on profiles for different treatments

2.2 秸秆覆盖和生物质炭隔层对土壤蒸发过程水盐运移的影响

2.2.1 不同处理对土壤水盐动态的影响　同一处理不同土层中，CK 在 15～25 cm 土层含水率与其他土层差异显著（表 4）；其他处理均表现为 15～25 cm 土层含水率与 25～45 cm 土层差异显著。同一土层的不同处理中，3 个土层均表现为 T3-0 和 T3-45 处理含水率与 CK 差异显著，分别较 CK 增加 4.45%～5.13%、1.13%～2.92%、5.60%～6.71%。

本试验发现，在潜水蒸发过程中，底层土壤和潜水中的盐分随水分向上迁移，导致 0～45 cm 土层土壤不断积盐，盐分含量增加（图 7）。由图 7 可知，在 0～25 cm 土层，各处理土壤返盐现象不显著；在 25～45 cm 土层，各处理土壤盐分含量较蒸发前显著增加，CK、T0-25、T0-45、T3-0、T3-25

和 T3-45 处理的平均含盐量分别为 0.94 g·kg^{-1}、0.71 g·kg^{-1}、0.50 g·kg^{-1}、0.51 g·kg^{-1}、0.45 g·kg^{-1} 和 0.43 g·kg^{-1}，较蒸发前各处理平均含盐量增幅分别为 139.72%、68.28%、19.64%、24.50%、6.46%和 6.99%。其中，CK 处理的平均含盐量增幅最高，T3-25 处理的含盐量增幅最低，为 6.46%。

结合蒸发后不同处理下土壤剖面的积盐率（表 5）综合分析，随土层加深，各处理积盐率逐渐增大，深层与表层土壤积盐率差异较大。在 3 个不同土层中，各处理的积盐率分别处于 0.81%～2.74%、1.71%～20.16%、6.46%～139.72%范围内。CK、T0-25、T0-45、T3-0、T3-25 和 T3-45 处理在 0～45 cm 土层内的平均积盐率分别为 54.21%、25.53%、10.09%、9.01%、5.54%和 3.49%，依次减小，T3-45 处理的积盐率最小，CK 的积盐率最高，T3-45 的积盐率较 CK 降低 93.56%。

表 4 不同处理下土壤剖面的含水率

Table 4 Soil moisture content on profiles for different treatments/%

深度 Depth/cm	T0-0	T0-25	T0-45	T3-0	T3-25	T3-45
10	26.30Bb	27.51ABab	27.18ABb	27.47ABa	27.88ABab	27.65ABa
20	27.39Ab	27.04Aab	27.46Ab	27.70Aa	27.75Aab	28.19Aa
40	26.09Bb	27.47Bab	25.30Bb	27.84Ba	26.76Bab	27.55Ba

注：同一处理不同大写字母表示土层间差异显著(P＜0.05)；同一土层不同小写字母表示处理间差异显著(P＜0.05)。

Note： Different capital letters in the same treatment represent significant difference among soil layers(P＜0.05); Different lowercase letters in the same treatment represent significant difference between the treatments (P＜0.05).

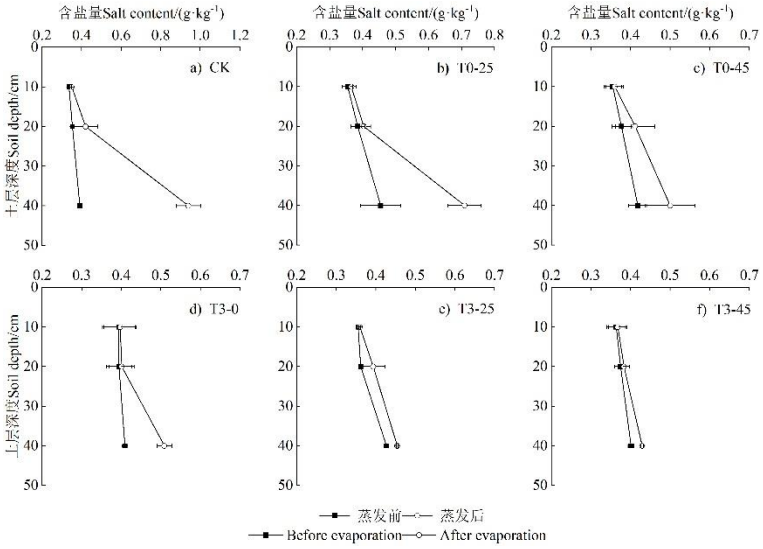


图 7 不同处理下蒸发前和蒸发后土壤剖面含盐量对比

Fig. 7 Comparison of soil salt content on profiles before and after evaporation for different treatments

表 5 不同处理下土壤剖面积盐率

Table 5 Soil accumulation rate in soil profiles under different treatments/%

深度 Depth/cm	T0-0	T0-25	T0-45	T3-0	T3-25	T3-45
10	2.74	1.86	1.43	0.81	1.32	1.16
20	20.16	6.46	9.19	1.71	8.84	2.32
40	139.72	68.28	19.64	24.50	6.46	6.99

2.2.2 不同处理对土壤 Na^+和 pH 的影响　潜水蒸发后，在不同深度土层中，各处理间 Na^+含量存在

较大差异（图 8），由图可知，在 0～45 cm 土层，土壤 Na^+含量较蒸发前显著增加。在 0～15 cm、15～25 cm 和 25～45 cm 三个土层中，各处理的平均 Na^+含量分别为 29.69 mg·kg^{-1}、73.97 mg·kg^{-1} 和 169.49 mg·kg^{-1}，较蒸发前含盐量分别增加 10.45%、35.95%和 79.45%，随土层加深，Na^+含量增幅越大。在 0～45 cm 土层中，CK、T0-25、T0-45、T3-0、T3-25 和 T3-45 处理的平均 Na^+含量分别为 156.35 mg·kg^{-1}、91.91 mg·kg^{-1}、96.86 mg·kg^{-1}、91.36 mg·kg^{-1}、41.47 mg·kg^{-1} 和 68.33 mg·kg^{-1}，较初始 Na^+含量增加 14.06%～150.19%。其中 CK 增幅最大，T3-45 处理增幅最小，抑制返盐效果最佳。

同一处理的不同土层中，各处理 pH 差异均不显著（表 6）。在同一土层不同处理中，0～25 cm 土层各处理的 pH 没有显著性差异；25～45 cm 土层各处理的 pH 与 CK 差异显著，分别较 CK 增加 2.33%～6.11%，其中 T3-25 处理增幅最高。在 0～45 cm 土层中，CK、T0-25、T0-45、T3-0、T3-25 和 T3-45 处理土壤平均 pH 分别为 7.01、7.06、7.18、7.26、7.24 和 7.18，各改良处理分别比 CK 增加 0.71%～3.57%，且显著高于蒸发前。

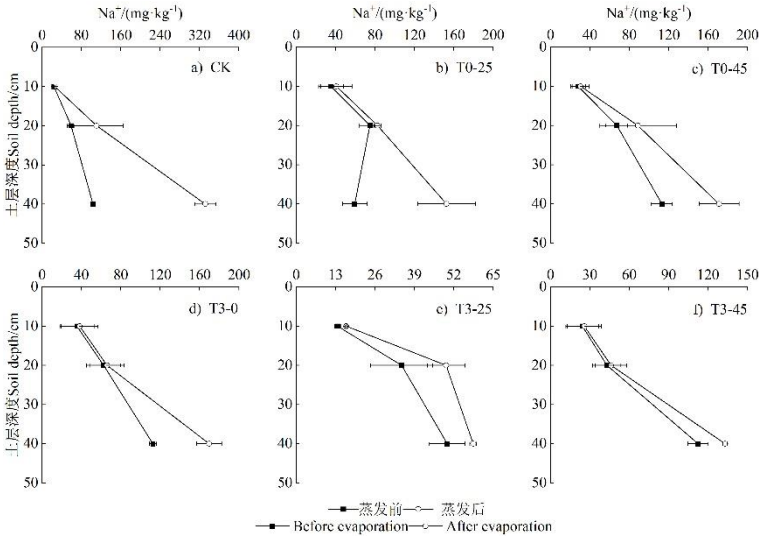


图 8 不同处理下蒸发前和蒸发后土壤剖面 Na^+含量对比

Fig. 8 Comparison of soil Na^+ content on profiles before and after evaporation for different treatments

表 6 不同处理下土壤剖面的 pH 状况

Table 6 Soil pH on profiles for different treatments

深度 Depth/cm	T0-0	T0-25	T0-45	T3-0	T3-25	T3-45
10	6.97Aa	7.0Aa	7.15Aa	7.25Aa	7.22Aa	7.19Aa
20	7.20Aa	7.16ABa	7.29Aa	7.31Aa	7.20Aa	7.08Aa
40	6.87Ac	7.03Abc	7.10Aab	7.21Aa	7.29Aa	7.27Aab

注：同列不同大写字母表示不同土层间差异显著(P＜0.05)；同行不同小写字母表示不同处理间差异显著(P＜0.05)。

Note: Different uppercase letters in the same column indicate significant differences among different soil layers (P < 0.05); different lowercase letters in the same row indicate significant differences among different treatments within the same soil layer. 3 讨 论

3.1 秸秆覆盖和生物质炭隔层促进盐分淋洗

本研究发现在土壤中设置生物质炭隔层明显抑制湿润锋的运移速率，T3-25 处理对湿润锋的阻隔效果最好。土壤中粗细不同的毛管孔隙为水分运动提供一个连续体，水分可以通过毛细管向土层下方入渗。前人研究表明，土壤水分入渗能力受土壤质地、结构、团聚体和地理环境等因素影响[18]。生物质炭与土壤的孔隙状况不同，它们以大孔隙居多，其作为隔盐层可以切断土壤毛细作用，改变土壤构型，在细质土层和生物质炭隔盐层交界面形成“孔隙差异界面”，使其中导水率产生差异[9]，

单位时间内进入隔盐层的水通量减少，从而降低土壤水分入渗速率，因此，生物质炭隔层起到了良好的减渗效果。孙艳[12]的研究也证明，在土壤中设置隔盐层，较大地减缓湿润锋运移速率，延长水分在土壤浅层的停留时间，具有明显的阻水和持水的作用。

在盐渍土淋洗过程中，土壤中的可溶性盐会溶解进入水体[19]。本研究观测到，在 45 cm 处设置生物质炭隔层的淋洗液含盐量高于其他处理，但淋洗掉的总盐分表现为 CK 最高，T3-45 次之。生物质炭具有较大的比表面积和丰富的孔隙结构，以及较高的阳离子交换量（CEC）和多种官能团[20-21]，能够吸附土壤中的可溶性盐分，在淋洗过程中，使淋洗液中的盐分浓度升高。但是生物质炭的多孔结构使其持水能力增强，在 45 cm 处设置生物质炭隔层能够吸附大量水分，导致深层淋洗液补给不足，限制了盐分的彻底淋洗。孔芊芊等[20]研究发现，将棉秆生物质炭均匀施用在 0～10 cm 土层中，虽能提高表层保水性，但深层（>45 cm）盐分淋洗效率降低。而 CK 由于未设置生物质炭隔层，盐分随淋洗液持续下渗至深层土壤。尹春艳[22]研究表明，淋洗液脱盐效率与总淋洗水量呈正相关，更高的淋洗量可溶解并带走更多盐分。虽然 T3-45 淋洗液含盐量高，但淋洗液体积较低，此外，生物质炭自身含有一定量的盐分，因此导致 T3-45 处理下淋洗液含盐量高但总脱盐率低的现象。本研究淋洗后，土壤盐分呈现随土层加深而增加的态势，在 0～45 cm 土层中，CK 处理的土壤脱盐率最高。CK 处理的淋洗液可贯穿整个土层，使盐分持续向下迁移并排出，而隔层处理因生物质炭吸附部分盐离子（如 Na^+、Cl^-），虽加速了上层土壤脱盐，但也导致盐分在隔层界面聚集，深层（45 cm 以下）盐分未能被充分淋洗[23-24]。尹建道等[23]研究发现，随着灌水量的增加，土壤上层迅速脱盐，中、下层在盐峰过后才能进入脱盐阶段，且连续淋洗（类似 CK）较间歇淋洗（隔层）更有利于盐分整体迁移[24]。CK 的淋洗时间长，使滞留于深层土壤的盐分最终被排出，而隔层处理因淋洗液减少，部分盐分残留在深层。对比本研究中 T3-25 和 T3-45 的处理结果，45 cm 处隔层下的整体脱盐率更高。深层淋洗液补给不足会直接降低隔层以下土层的盐分淋洗效率。25 cm 处的浅位隔层对盐分淋洗效率的抑制作用覆盖范围更大（如 30～60 cm 土层）；而 45 cm 处的深位隔层对盐分淋洗效率的抑制作用覆盖范围更小（如 50～60 cm 土层）。由此可见，更深的隔层能够有效缩小阻盐范围，同时延长水分在隔层以上土层的停留时间，促进盐分充分溶解。但过厚的生物质炭层可能导致盐分在隔层界面滞留积聚，增加次生盐渍化的发生风险[25]。综上，生物质炭隔层对淋洗液含盐量的影响，与土壤整体盐分变化紧密相关，本研究中 45 cm 处隔层在淋洗过程中表现出优于 25 cm 处隔层的脱盐效果。

淋洗结束后，CK 处理较秸秆覆盖和生物质炭隔层处理的淋洗液 pH 更高，这是由于 CK 处理淋洗掉的总盐分高于隔层处理。在淋洗过程中，土壤中的盐类物质部分溶解，释放强碱性离子，使淋洗液呈碱性。张越等[26]研究表明，土壤 pH 的变化情况与总碱度具有一致性，土壤 pH 与总碱度存在极显著的正相关关系。本研究淋洗后各处理土壤 Na^+含量显著下降，T3-25 处理的平均 Na^+含量最低，其 pH 平均值也较 CK 低 2.09%。孔芊芊等[20]研究结果显示，添加生物质炭处理下，Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 较 CK 分别减少 3.71%～39.72%，这是由于生物质炭多孔结构和大比表面积将盐分离子吸附在孔隙中，进而降低土壤总盐含量，促进盐分离子的洗脱。生物质炭的阳离子交换容量（CEC）较高，盐渍土中通常含有大量交换性 Na^+，生物质炭自身携带的无机物成分（如 K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}）能通过交换作用将土壤胶体上吸附的 Na^+释放到溶液中，随淋洗液排出，从而降低了土壤胶体上 Na^+的含量[21, 27]。土壤胶体上的 Na^+水解会产生 OH^-，当 Na^+被淋洗时，降低了 OH^-的来源，pH 降低。

3.2 秸秆覆盖和生物质炭隔层降低盐分表聚

本研究发现地下水埋深为 65 cm 的条件下，蒸发过程中秸秆覆盖和生物质炭隔层处理增加了 0～45 cm 土层土壤含水率。邓亚鹏等[28]在山东省滨州沿海地区，通过室内模拟实验研究发现，秸秆覆盖有效提高了土壤表层及剖面的含水率，随着秸秆覆盖量的增加，秸秆覆盖保水效果越强，这是因为地表覆盖秸秆切断了土表与空气的接触面，降低了土壤的垂直蒸发量，上层土壤水蒸散速度减慢，从而减少了水汽扩散量。在地表下 25 cm 和 45 cm 处埋设生物质炭隔层，其大孔隙居多，切断了土壤毛细管的连续性，减弱了蒸发能力。

蒸发过程中地下水中的盐分随土壤毛细管向上迁移，水分蒸发后盐分积累在土体[29]。本研究发现 65 cm 地下水蒸发后，在 0～45 cm 土层中，CK 的积盐率显著高于其他处理，T3-45 处理的积盐率最低，抑盐效果最好。这是由于秸秆覆盖在抑制土壤水分蒸发的同时也抑制了土壤在表层积盐[30]，生物质炭隔层通过减少水分蒸发从而减少隔层以下土壤盐分向上返盐。姚宝林等[31]通过室内土柱试验研究发现：地下水累积蒸发量和蒸发强度随地下水埋深增大均减小，在土壤中设置棉秆隔层可抑制潜水蒸发和地表返盐。尹亚敏等[32]研究发现，在土表 20 cm 处埋设 10 cm 厚度植物秸秆隔层后，18～30 cm 土层的平均含盐量表现为未设置隔层的红黏土＞小麦隔层。由于隔盐材料的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速度，进而降低土壤表层盐分含量，使盐分被阻断在隔盐层以下。王曼华等[15]研究结果表明，在地下水埋深 1 m 的条件下，0～40 cm 土壤秸秆覆盖+隔层处理的返盐率低于 CK。在地表下铺设秸秆的同时结合地表覆盖，能达到更好的控盐效果，明显降低土壤耕层的含盐量。这些均表明秸秆覆盖与生物质炭隔层的结合能够协同作用，进一步抑制盐分表聚。根据土壤水动力学理论，潜水蒸发依赖土壤毛细管的“输水通道”功能，水分通过毛细管向上迁移时携带盐分，最终在表层积累。隔层（生物质炭）的多孔疏松特性破坏这一通道，抑制上升水流，从源头阻断盐分上行动力[33-34]。单一隔层的阻盐效果有限，而秸秆覆盖与隔层结合能形成“抑蒸+阻盐”的协同效应，进一步降低表层土壤积盐率。对比本研究中 T3-45 与 T3-25 处理的结果，在浅地下水位条件下，45 cm 深度的生物质炭隔层对土壤返盐的抑制效果更为显著，这一现象表明，在东南沿海浅地下水位条件下，较深的隔层布设更有利于阻滞深层土壤盐分向上运移，进而控制表层土壤的盐分表聚。而姚宝林等[31]在地下水埋深 1.0 m、1.5 m、2 m 条件下研究发现，棉秆隔层设置于 15 cm 深度时对耕作层土壤的抑盐效果最佳，显著优于更深的隔层处理。这两个结果的差异说明，隔层的适宜布设深度并非固定值，而是与区域气候、土壤及水文地质条件密切相关。今后应进一步开展系统对比分析，以明确不同区域条件下隔层处理的最佳深度。

蒸发结束后，各处理土壤剖面 Na^+含量均较蒸发前显著增加，在 25～45 cm 土层，T3-25 处理的 Na^+含量增幅最小，说明该处理对土壤水分蒸发和 Na^+向上迁移的抑制效果较好，表明生物质炭不仅抑制隔层以下土壤盐分向上迁移，还对盐分中的 Na^+具有一定吸附作用。这一结果与孔芊芊等[20]的研究一致，研究发现生物质炭能够通过离子交换和吸附作用降低土壤中的 Na^+含量。根据“盐随水来，盐随水去”的原理，盐分随水分向上迁移能力减弱，因此 Na^+向土层上方迁移受到阻碍，含量减少。各处理 pH 显著高于蒸发前，土壤中 Na^+含量增加并吸附于土壤胶体上，遇水发生水解反应，释放 OH^-，使土壤呈碱性进而提高土壤 pH。Yuan 和 Xu[35]的研究结果表明，秸秆覆盖能够通过减少酸性物质的积累来提高土壤的 pH，这是由于秸秆含有多种矿物质元素和有机成分，在土壤中分解时，会释放出钾、钙、镁等碱性物质，这些阳离子可以与土壤中的酸性物质发生交换反应，中和土壤中的酸性成分，从而起到缓冲土壤酸碱度变化的作用。

4 结 论

本文通过室内土柱模拟试验，研究了秸秆覆盖结合生物质炭隔层对东南沿海土壤水分淋洗、蒸发过程水盐运移的影响，主要结论如下：在淋洗阶段，生物质炭隔层明显降低了水分入渗能力，T3-25 处理（秸秆覆盖+25 cm 处生物质炭隔层）的减渗效果最好。T0-45 处理（45 cm 处生物质炭隔层）的淋洗液含盐量较高，但由于 CK 的淋洗液渗出时间和渗出体积均大于隔层处理，因此 CK 的淋洗液总盐分高于 T0-45 处理；生物质炭隔盐层具有阻止淋洗液碱化的效果，各隔层处理的 pH 均低于 CK。淋洗后土壤盐分显著下降，CK 处理的脱盐率最高；Na^+含量具有明显的降幅，其中，T3-25 处理效果最好。在地下水埋深为 65 cm 的水分蒸发阶段，秸秆覆盖和生物质炭隔层增加了土壤含水率。水分蒸发后土层返盐现象显著，T3-45 处理（秸秆覆盖+45 cm 处生物质炭隔层）的积盐率和 Na^+含量

增幅均最低，生物质炭隔层不仅抑制隔层以下土壤盐分向上迁移，还对盐分中的 Na^+具有一定吸附作用。综上所述，将秸秆覆盖与生物质炭隔层结合使用，是东南滨海新增耕地改良与生产力提升的有效手段。未来可进一步探究秸秆覆盖与生物质炭隔层复合改良技术对滨海盐碱耕地土壤生态功能及土地生产力的影响，为该技术的可持续应用提供理论依据与实践参考。

参考文献（References）

[1] Yang J S, Yao R J, Wang X P, et al. Research on salt-affected soils in China: History, status quo and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 10-27. [杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10-27.]

[2] Huang G Z, Huang L H, Liu B S, et al. Evaluation of improvement effect and analysis of influencing factors of different amendments on saline-sodic soils based on a meta-analysis[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(2): 388-399. [黄广志, 黄立华, 刘伯顺, 等. 基于 Meta 分析的苏打盐碱土改良效果评估[J]. 土壤学报, 2025, 62(2): 388-399.]

[3] FAO. Global status of salt-affected soils–Main report[M]. Rome:FAO, 2024.

[4] Wang G Z, Ni G, Feng G, et al. Saline-alkali soil reclamation and utilization in China: Progress and prospects[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2024, 11(2): 216-228.

[5] Li K S, Li Q X, Geng Y H, et al. An evaluation of the effects of microstructural characteristics and frost heave on the remediation of saline-alkali soils in the Yellow River Delta, China[J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(3): 1325-1337.

[6] Zhao X F, Yang J S, Yao R J. Relationship between soil salt dynamics and factors of water balance in the typical coastal area of Northern Jiangsu Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(3): 52-57. [赵秀芳, 杨劲松, 姚荣江. 苏北典型滩涂区土壤盐分动态与水平衡要素之间的关系[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 52-57.]

[7] Mulumba L N, Lal R. Mulching effects on selected soil physical properties[J]. Soil & Tillage Research, 2008, 98(1): 106-111.

[8] Sun B, Xie J C, Wang N, et al. Effect of straw mulching on water-salt dynamic of saline soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(4): 180-184. [孙博, 解建仓, 汪妮, 等. 秸秆覆盖对盐渍化土壤水盐动态的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 180-184.]

[9] Huang C Z, Wang J, Zhong Z Y, et al. Effect of common biochar and acid modified biochar on infiltration and evaporation of saline soil[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(11): 138-142, 150. [黄成真, 王娟, 仲昭易, 等. 普通和酸改性对盐渍土入渗、蒸发过程的影响[J]. 中国农村水利水电, 2020(11): 138-142, 150.]

[10] Peng X H, Wang Y Q, Jia X X, et al. Some key research fields of Chinese soil physics in the new era: Progresses and perspectives[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1071-1087. [彭新华, 王云强, 贾小旭, 等. 新时代中国土壤物理学主要领域进展与展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1071-1087.]

[11] Zhao Y G, Wang J, Li Y Y, et al. Reducing evaporation from phreatic water and soil resalinization by using straw interlayer and plastic mulch[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(23): 109-117. [赵永敢, 王婧, 李玉义, 等. 秸秆隔层与地覆膜盖有效抑制潜水蒸发和土壤返盐[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 109-117.]

[12] Sun Y. Influence of salt-isolation layer on water and salt tansport in coastal saline soil and numerical simulation study[D]. Yantai,Shandong: Ludong University, 2022. [孙艳. 隔盐层对滨海盐渍土水盐运移影响及数值模拟研究[D]. 山东烟台: 鲁东大学, 2022.]

[13] Shi D Y, Qiu Y, Huang C Z, et al. Effect of acid modified biochar on infiltration characteristics of coastal saline soil[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(9): 183-192. [史丹一, 邱禹, 黄成真, 等. 酸改性对滨海盐渍土壤水分入渗特性的影响[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(9): 183-192.]

[14] Akhtar S S, Andersen M N, Liu F. Biochar mitigates salinity stress in potato[J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 2015, 201(5): 368-378.

[15] Wang M H, Chen W F, Song X L, et al. Preliminary study on effect of straw mulching and incorporation on water and salt movement in salinized soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6): 1395-1403. [王曼华, 陈为峰, 宋希亮, 等. 秸秆双层覆盖对盐碱地水盐运动影响初步研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1395-1403.]

[16] Huo H X, Yang J S, Yao R J, et al. Effect of composite interlayer on soil water-salt transport in Hetao irrigation district[J]. Soils, 2024, 56(1): 90-96. [霍宏鑫, 杨劲松, 姚荣江, 等. 复合隔层对河套灌区盐碱土水盐运移的影响[J]. 土壤, 2024, 56(1): 90-96.]

[17] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]

[18] Li Y, Ren X, Hill R, et al. Characteristics of water infiltration in layered water-repellent soils[J]. Pedosphere, 2018, 28(5): 775-792.

[19] Tian F, Zhang C H, Wang G Q, et al. The application effects of biochar salt-isolation layer in aaline-alkali soil leaching improvement[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 302-308. [田飞, 张楚涵, 王国强, 等. 隔盐层在盐碱土淋洗改良中的应用效果[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 302-308.]

[20] Kong Q Q, Zhu L Y, Zhu Z, et al. Evaluation of the effectiveness of different biochar in leaching salt ions from saline soil in southern Xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6): 325-332. [孔芊芊, 朱连勇, 朱珠, 等. 不同对南疆盐渍土盐分离子淋洗效果的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 325-332.]

[21] Qiu Y, Wang Y J, Zhang Y B, et al. Effects of adding different types and amounts of biochar to saline alkali soil on its salt ions and microbial community in northwest China[J]. iScience, 2025, 28(4): 112285.

[22] Yin C Y. Study on water and salt transport characteristics and control technology of saline soil in the Yellow River Delta[D]. Yantai,Shandong: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2017. [尹春艳. 黄河三角洲滨海盐渍土水盐运移特征与调控技术研究[D]. 山东烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2017.]

[23] Yin J D, Jiang Z L, Cao B, et al. The dynamic law of coastal salinized soil desalting and its effect evaluation—A study on leaching process through simulation experiment in the field[J]. Journal of Nanjing Forestry University（Natural Sciences Edition）, 2002, 26(4): 15-18. [尹建道, 姜志林, 曹斌, 等. 滨海盐渍土脱盐动态规律及其效果评价——野外灌水脱盐模拟实验研究[J]. 南京林业大学学报（自然科学版）, 2002, 26(4): 15-18.]

[24] Liang J L, Zhang M Y. Desalting effect of soil under different infiltration conditions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(3): 116-117. [梁建林, 张梦宇. 不同入渗条件下土壤脱盐效果的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(3): 116-117.]

[25] Xu Q, Han H, Xu Y B, et al. Effect of the biochar interlayer on saline wasteland desalination and the development of *Suaeda salsa* roots[J]. Environmental Technology & Innovation, 2025, 37: 103976.

[26] Zhang Y, Yang J S, Yao R J. Effects of saline ice water irrigation on distribution of moisture and salt content in coastal saline soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(2): 388-400. [张越, 杨劲松, 姚荣江. 咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 388-400.]

[27] Sun Y, Liu J Q, Wu J X, et al. Effects of different biomass materials on the physicochemical properties and water-salttransport characteristics of saline-alkali soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,63(3)：**DOI: 10.11766/trxb202409300379**. [孙燕, 刘建旗, 吴建鑫, 等. 不同生物质材料对盐碱土理化特性及水盐运移特征的影响[J]. 土壤学报, 2026,63(3)：**DOI: 10.11766/trxb202409300379**.]

[28] Deng Y P, Sun C T, Sun J S, et al. Effects of straw mulching on water and salt distribution and evaporation characteristics in coastal saline soil[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(3): 128-133. [邓亚鹏, 孙池涛, 孙景生, 等. 秸秆覆盖条件下滨海盐渍土水盐分布及蒸发特征[J]. 中国农村水利水电, 2021(3): 128-133.]

[29] Li W H, Wang Z H, Wang K F. Effect of groundwater depth on soil water and salt content under evaporation[J]. Journal of Shihezi University（Natural Science）, 2020, 38(4): 443-448. [李文昊, 王振华, 王凯飞. 蒸发条件下地下水埋深对土壤水盐含量的影响[J]. 石河子大学学报（自然科学版）, 2020, 38(4): 443-448.]

[30] Zhang J, Cui S Y, Feng Z X, et al. Climatic factors and mulching affect soil salinity dynamics in coastal areas[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(2): 294-302. [张蛟, 崔士友, 冯芝祥, 等. 气候因子和地表覆盖对沿海滩涂土壤盐分动态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 294-302.]

[31] Yao B L, Sun S M, Li F Y, et al. Using cotton straw interlayer to reduce evaporation and salt migration from groundwater to the soil surface[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(10): 95-102. [姚宝林, 孙三民, 李发永, 等. 潜水蒸发条件下不同棉秆隔层埋深对土壤盐分时空分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 95-102.]

[32] Yin Y M, Zhao Z Z, Song G C, et al. Effects of salt-isolating materials on water-salt distribution and evaporation characteristic of salinized soil[J]. Journal of Yunnan Agricultural University（Natural Science）, 2024, 39 (2): 155-161. [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（自然科学版）, 2024, 39 (2): 155-161.]

[33] Xu Q, Liu H G, Li M S, et al. The presence of the biochar interlayer effectively inhibits soil water evaporation and salt migration to the soil surface[J]. Agriculture, 2023, 13(3): 638.

[34] Hudan T, Wu X C, Di L D. The experimental studies of soil water and salt movement under the condition of straw mulch in different locations[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(1): 34-37. [虎胆·吐马尔白, 吴旭春, 迪力达. 不同位置秸秆覆盖条件下土壤水盐运动实验研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(1): 34-37.]

[35] Yuan J H, Xu R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(1): 110-115.

（责任编辑：檀满枝）