



马东祥,王相平,姚荣江,等. 秸秆隔层与微咸水灌溉对滨海盐渍土水盐分布及孔隙结构特性的影响研究[J]. 江西农业大学学报, 2026, 48(1): 275–288.

MA D X, WANG X P, YAO R J, et al. Effects of straw layer and brackish water irrigation on water-salt distribution and pore structure properties of coastal saline soil[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2026, 48(1): 275–288.

# 秸秆隔层与微咸水灌溉对滨海盐渍土水盐分布及孔隙结构特性的影响研究

马东祥<sup>1</sup>, 王相平<sup>1\*</sup>, 姚荣江<sup>1</sup>, 谢文萍<sup>1</sup>, 李文平<sup>2</sup>, 傅鹏霄<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; 2. 江苏沿海生态科技发展有限公司, 江苏 南京 210000)

**摘要:**【目的】旨在提高微咸水淋盐效率,并抑制土壤返盐。【方法】以滨海重度盐渍土为研究对象,分别设置每667 m<sup>2</sup> 0 t(OSL)、0.75 t(LSL)和1.50 t(HSL)3种秸秆用量的隔层和3 g/L(LBW)、5 g/L(HBW)2种矿化度的微咸水,通过室内土柱试验模拟灌溉淋洗和潜水蒸发,以探究秸秆隔层和微咸水淋洗对盐渍土水盐分布特性和保水抑盐效果的影响,并结合CT无损扫描技术分析土壤孔隙结构特征。【结果】(1)通过微咸水淋洗可以使所有处理0~<80 cm土层的土壤EC下降且小于本底值(2.00 mS/cm);此外,同一秸秆隔层处理情景下,HBW淋洗处理的土壤平均EC大于LBW处理。(2)潜水蒸发试验结束后,0~<20 cm土层,LSL和HSL处理的土壤平均含水率和EC均小于OSL处理;20~100 cm土层,LSL和HSL处理土壤平均含水率均大于OSL处理。(3)LSL和HSL处理的孔隙总数分别超出OSL对应微咸水淋洗处理的79.68%(LBW)和31.89%(HBW)、99.03%(LBW)和101.66%(HBW)。毛管孔隙数变化显著,OSL、LSL和HSL对应微咸水淋洗处理的毛管孔隙数占比分别为28.91%(LBW)和26.22%(HBW)、76.86%(LBW)和72.76%(HBW)、80.73%(LBW)和79.40%(HBW)。(4)与OSL相比,秸秆隔层使土壤孔隙度增加,孔隙连通性和孔隙结构复杂性提升,土壤水分下渗能力增强。【结论】设置秸秆隔层配合微咸水灌溉有助于提高微咸水的淋盐效率并抑制土壤表层返盐,这主要是由于秸秆隔层改善了土壤孔隙结构,同时抑制了隔层下方水分蒸发。研究结果可为滨海盐渍土综合改良利用、缓解农业淡水资源短缺及推进农业可持续发展等提供参考。

**关键词:** 秸秆隔层;微咸水;盐渍土;水盐分布;孔隙结构

中图分类号:S156.4<sup>+</sup>2 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2026)01-0275-14

CSTR:32399.14.aauj.2026024



## Effects of straw layer and brackish water irrigation on water-salt distribution and pore structure properties of coastal saline soil

MA Dongxiang<sup>1</sup>, WANG Xiangping<sup>1\*</sup>, YAO Rongjiang<sup>1</sup>,  
XIE Wenping<sup>1</sup>, LI Wenping<sup>2</sup>, FU Pengxiao<sup>2</sup>

收稿日期:2025-05-26 修回日期:2025-06-30 接受日期:2025-07-02

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42477074)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(42477074)

作者简介:马东祥,博士生, orcid.org/0009-0003-2588-3057, mdxiang312@163.com; \*通信作者:王相平,副研究员,博士,主要从事盐渍农田适水调盐理论与技术研究, orcid.org/0009-0000-7846-4487, xpwang@issas.ac.cn。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Jiangsu Coastal Ecological Technology Development Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

**Abstract:** [Objective] To enhance salinity leaching efficiency and prevent soil resalinization under brackish water irrigation. [Method] this study investigated the combined effects of straw layer applications and water mineralization levels on soil water-salt distribution through controlled soil column experiments. Three straw layer application rates 0 t (OSL), 0.75 t (LSL), and 1.50 t (HSL) per 667 m<sup>2</sup> were established in combination with two brackish water treatments [3 g/L (LBW) and 5 g/L (HBW)]. CT nondestructive scanning technology was employed to analyze soil pore structure characteristics. [Result] (1) Brackish water irrigation effectively reduced soil electrical conductivity (EC) in the 0–<80 cm layer to below background levels (2.00 mS/cm), with HBW treatments maintaining higher EC values than LBW treatments under equivalent straw application conditions. (2) At the end of the submersible evapotranspiration test, the average soil water content and EC of the LSL and HSL treatments were less than that of the OSL treatment in the 0–<20 cm soil layer, and the average soil water content was greater than that of the OSL treatment in the 20–100 cm soil layer in both the LSL and HSL treatments. (3) The total number of pores in LSL and HSC exceeded 79.68% (LBW) and 31.89% (HBW), as well as 99.03% (LBW) and 101.66% (HBW) of OSL. The variation in the number of capillary pores was significant, with increases of 28.91% (LBW) and 26.22% (HBW), 76.86% (LBW) and 72.76% (HBW), and 80.73% (LBW) and 79.40% (HBW) for OSL, LSL, and HSL, respectively, under the brackish water leaching treatment. (4) Compared with OSL, the straw layer enhanced soil porosity, pore connectivity, pore structure complexity, and the capacity for soil water infiltration. [Conclusion] In conclusion, the application of straw layers in conjunction with brackish water irrigation significantly enhances the efficiency of salinity leaching and mitigates the resalting of surface soil. This improvement is primarily attributed to the capacity of straw layers to enhance the soil's pore structure and decrease water evaporation from deeper soil layers. This study serves as a valuable reference for the comprehensive improvement and utilization of coastal saline soils, addressing the scarcity of agricultural freshwater resources and promoting sustainable agricultural development.

**Keywords:** straw layer; brackish water; saline soil; water-salt distribution; pore structure

【研究意义】滨海盐渍土含盐量高、结构性差,严重限制了土壤肥力和作物产能提升,在很大程度上造成了耕地资源的浪费<sup>[1]</sup>。合理使用微咸水灌溉不仅可以提高土壤盐分淋洗效率、调节盐渍土壤水盐动态平衡,还能有效缓解淡水资源短缺的现象<sup>[2–3]</sup>。与此同时,秸秆隔层还田作为一项绿色环保的盐渍土改良技术,在提升土壤淋盐效果、减缓土壤返盐速率等方面具有明显优势<sup>[4–5]</sup>。因此,综合运用微咸水灌溉淋洗及秸秆隔层还田等措施,从不同角度协同发力,对提升滨海盐渍土壤保水效果、有效抑制土壤返盐及缓解淡水资源供需矛盾具有积极作用。【前人研究进展】我国滨海地区微咸水资源非常丰富,利用微咸水对盐渍土进行淋洗改良,可以使土壤容重降低、土壤渗透性能提升,进而加速浅层土壤盐分向深层淋洗的速率,较大程度上增强脱盐效果<sup>[6–8]</sup>。但是,微咸水中的可溶性盐离子也会被引入土壤,这可能会对土壤理化性质产生负面效应,并加剧盐分对农作物根系的胁迫<sup>[9]</sup>。因此,使用微咸水灌溉并减轻盐分对作物的胁迫作用是当前微咸水资源利用所面临的挑战。针对这一现状,有研究<sup>[10]</sup>发现,采用微咸水与淡水交替灌溉模式不仅可以减少淡水灌溉量,还可以维持盐渍土周年水盐平衡。亦有研究<sup>[11–13]</sup>指出,在微咸水-淡水交替灌溉情景下,配施生物炭能够有效降低土壤可溶性盐分积累量,增加土壤总孔隙度和水稳性团聚体,并改善土壤水力性能和养分条件,进而减轻盐分对作物的胁迫。值得注意的是,经磁化处理的磁化微咸水更有利于土壤盐分淋洗,并削减盐分对作物生长的抑制作用,进而对作物生长产生正反馈,如提高作物水分利用效率,增加株高、茎粗、叶面积指数,促进干物质积累等<sup>[14–15]</sup>。农作物秸秆是一种绿色可再生材料,通过秸秆浅埋还田以构建秸秆隔层,是盐渍土综合改良利用,进而达到水盐调控、结构

改良、减损增效的重要途径<sup>[16-18]</sup>。秸秆隔层不仅可以在减小土壤容重、降低土壤紧实度的同时增加土壤孔隙度及有效孔隙数量<sup>[19-21]</sup>;而且还可以有效抑制土壤潜水蒸发和盐分积聚,达到优化土壤水盐分布的效果<sup>[22-25]</sup>。长期秸秆隔层还田的土壤,其有机质、氮、磷养分含量通常较高,土壤酶活性更佳,这更有利于农作物生长和产量的提高<sup>[26-27]</sup>。由此可见,秸秆隔层还田不仅对土壤环境改善具有显著的正向效应,而且还可以实现农业废弃物的循环利用,符合绿色农业发展的要求。

【本研究切入点】厘清微咸水灌溉和秸秆隔层还田协同作用对盐渍土盐分淋洗及抑盐效果的影响机制,是合理高效利用滨海地区微咸水资源及实现当地农业废弃资源转化利用的必要途径。【拟解决的关键问题】本研究以滨海盐渍土为试验对象,通过探究微咸水灌溉和秸秆隔层设置对滨海盐渍土水盐分布、保水抑盐效果的影响;同时,借助 CT 无损扫描技术重建土壤孔隙网络结构,定量化分析孔隙的类型、数量、形态和网络结构特征及孔隙之间的连通状况<sup>[28-29]</sup>,以探究土壤孔隙结构对微咸水灌溉和秸秆隔层还田的响应特征,为滨海盐渍土盐分调控及微咸水资源合理利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土样采自江苏省盐城市东台市条子泥地区(32°50' N, 120°56' E),土壤采集深度为 30 cm。将采集的土壤经风干后过 2 mm 筛,用于初始土样检测和土柱装填。试验开始前对初始土样进行理化性质检测,结果显示初始土壤电导率(EC)为 2.00 mS/cm, pH 为 7.86,容重为 1.40 g/cm<sup>3</sup>,含盐量为 5.40 g/kg<sup>[30]</sup>,属重度盐渍土。试验用水根据当地微咸水(brackish water, BW)矿化度由纯净水和氯化钠(NaCl)配制而成,分别配制 3 g/L 和 5 g/L 2 种矿化度的微咸水。秸秆隔层的材料取自东台市的水稻秸秆,由人工制成 2~3 cm 的秸秆碎片。

### 1.2 试验设计

本研究采用室内土柱试验的方式进行,土柱尺寸为  $D=20$  cm,  $H=130$  cm。依据现有研究资料<sup>[31-32]</sup>设置秸秆使用量每 667 m<sup>2</sup>分别为 0.75 t (LSL) 和 1.50 t (HSL) 的 2 种秸秆隔层(straw layer, SL),秸秆隔层埋设深度为 25 cm,即在 25 cm 深度位置将秸秆与土壤混合形成秸秆隔层。以不设秸秆隔层(OSL)为对照,即不添加秸秆。分别使用矿化度 3 g/L 和 5 g/L 的微咸水对土柱进行淋洗试验。本研究共 6 个处理,每个处理 3 组重复,根据试验设计要求装填土柱。试验设计如表 1 所示。

表 1 试验因素水平

Tab.1 Table of experimental factor levels

| 试验因素<br>Experimental factors        |                           | 处理<br>Treatment |
|-------------------------------------|---------------------------|-----------------|
| 秸秆隔层(SL)<br>Straw layer             | 微咸水(BW)<br>Brackish water |                 |
| OSL(每 667 m <sup>2</sup> 0 t)       | LBW(3 g/L)                | OSLLBW          |
| OSL(0 t per 667 m <sup>2</sup> )    | HBW(5 g/L)                | OSLHBW          |
| LSL(每 667 m <sup>2</sup> 0.75 t)    | LBW(3 g/L)                | LSLLBW          |
| LSL(0.75 t per 667 m <sup>2</sup> ) | HBW(5 g/L)                | LSLHBW          |
| HSL(每 667 m <sup>2</sup> 1.50 t)    | LBW(3 g/L)                | HSLLBW          |
| HSL(1.50 t per 667 m <sup>2</sup> ) | HBW(5 g/L)                | HSLHBW          |

为保证土柱底部有水淋出,根据土壤饱和含水率估算每个土柱的淋洗水量为 16 L,且采用一次性淋洗的方法。淋洗试验结束后进行潜水蒸发模拟试验,即在土柱底部连接马氏瓶,控制地下水位在 80 cm、地下水矿化度为 5 g/L,以观察土壤水分蒸发及返盐情况,潜水蒸发试验为期 55 d。本研究所用试验装置如图 1 所示。

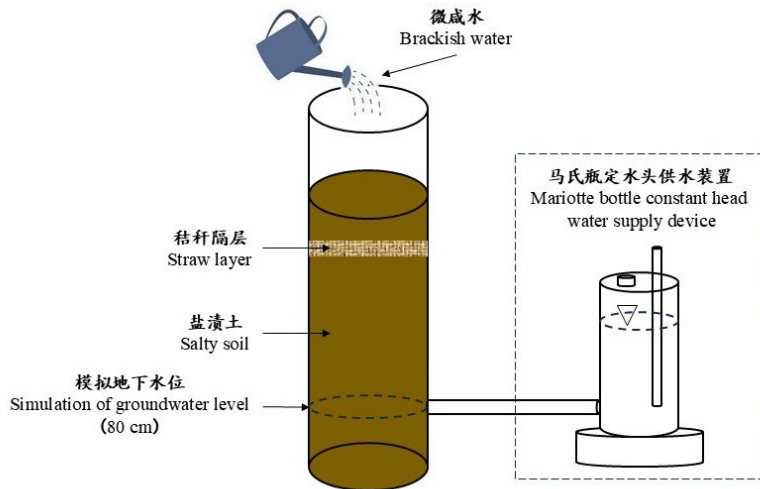


图 1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the test setup

### 1.3 观测指标及方法

分别在淋洗试验及潜水蒸发试验结束后,测定不同土层土壤含水率和EC。土壤含水率采用烘干法进行测定,土壤EC采用电导率仪进行测定[ $m(\text{水}):m(\text{土})=1:5$ ]。

在潜水蒸发试验结束后,使用PVC环刀采集秸秆层土壤进行CT扫描。采用工业纳米CT扫描仪(Nanotom S)对环刀样品进行扫描,像素分辨率为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 。通过扫描,每个环刀样品均得到1 500张面积为 $1\,000\text{ Pixel}\times 1\,000\text{ Pixel}$ 的切片图像。通过VGStudioMAX 2.2重构土壤孔隙结构进行孔隙分析。结合Image J分割插件对切片图像进行分割处理得到分形维数、孔隙度、连通性等参数。

### 1.4 数据处理与分析

利用Excel汇总、整理试验数据。利用双因素方差分析法(two-way ANOVA)分析比较秸秆隔层、微咸水及交互效应对滨海盐渍土孔隙结构特征的影响效应,利用Duncan's法进行差异性检验( $P<0.05$ ),上述过程在SPSS Statistics 27中进行。利用Origin 2022进行孔隙结构特征参数之间的Pearson相关性分析及主成分分析(PCA),并绘制相关图形。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对土壤水盐分布及保水抑盐效果的影响

#### 2.1.1 秸秆隔层及微咸水灌溉对土壤水盐分布特性的影响

本研究分别在盐分淋洗试验及潜水蒸发试验结束后测定所有处理不同土层土壤含水率(图2)。淋洗试验结束后,0~100 cm土层,微咸水浓度对所有处理土壤含水率的影响作用相同,即LBW淋洗处理的土壤含水率均大于HBW。与此同时,0~20 cm土层,LSL与HSL 2种秸秆隔层处理的土壤含水率大于无隔层(OSL)处理。此外,OSL整个剖面上(0~100 cm),2种微咸水淋洗处理的土壤含水率变化范围分别为25.76%~31.93%(LBW)和23.56%~30.52%(HBW);LSL整个剖面上,2种微咸水淋洗处理的土壤含水率变化范围分别为28.52%~31.86%(LBW)和26.02%~29.76%(HBW);HSL整个剖面上,2种微咸水淋洗处理的土壤含水率变化范围分别在27.62%~33.56%(LBW)和25.24%~27.92%(HBW)。这说明,秸秆隔层对其上部土壤水分入渗有一定的阻滞效应。

潜水蒸发试验结束后。OSL、LSL和HSL处理土壤含水率随土层加深整体上呈增大趋势,且LBW与HBW灌溉处理的土壤含水率差异不明显。具体而言,0~20 cm土层,在LSL中,LBW与HBW淋洗处理对应的土壤含水率变化范围分别为13.28%~14.18%和13.09%~15.04%;在HSL中,LBW与HBW淋洗处理对应的土壤含水率变化范围分别为12.99%~14.36%和13.01%~13.88%;在OSL中,LBW与HBW淋洗处理对应的土壤含水率变化范围分别为20.96%~22.04%和20.47%~21.29%。20~100 cm土层,在LSL中,LBW与HBW淋洗处理对应的土壤含水率变化范围分别为28.12%~30.64%和28.37%~31.66%;在HSL中,LBW与HBW淋洗处理对应的土壤含水率变化范围分别为25.70%~29.82%和26.83%~30.82%;在OSL

中, LBW 与 HBW 淋洗处理对应的土壤含水率变化范围分别为 24.45%~28.04% 和 23.82%~29.52%。因此, 秸秆隔层有效抑制了隔层下方土壤水分上行, 减少了土壤水分蒸发, 增强了隔层下方土壤保水能力。

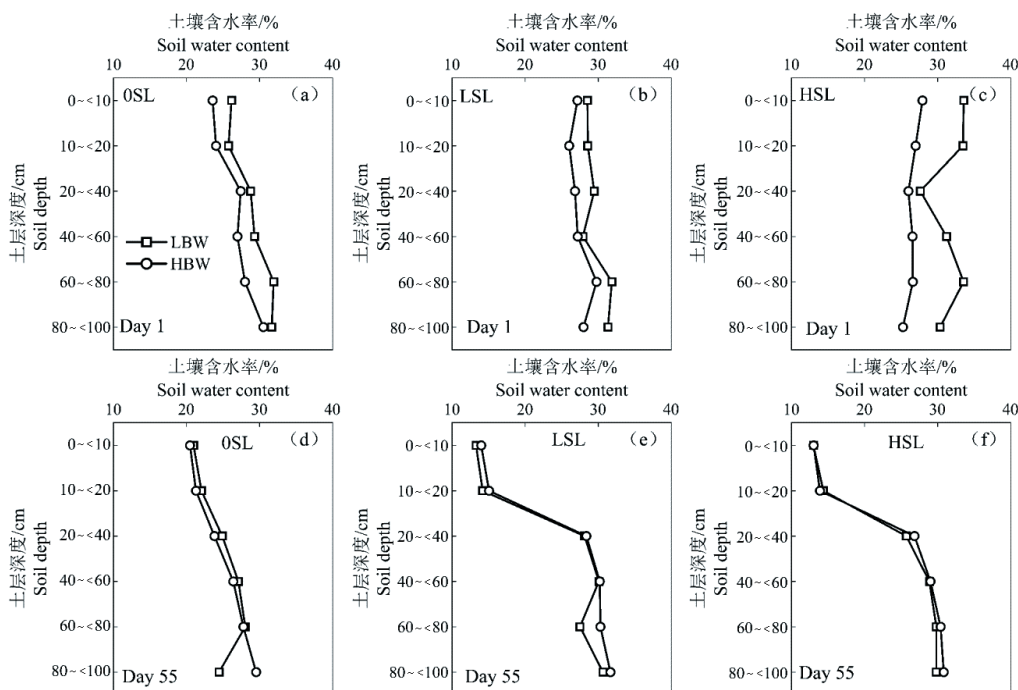


图 2 不同处理对土壤水分空间分布的影响

Fig.2 Effect of different treatments on the spatial distribution of soil moisture

如图 3 所示, 盐分淋洗试验及潜水蒸发试验结束后土壤 EC 对秸秆隔层设置和微咸水淋洗的响应相同, 即所有处理在垂直方向上土壤 EC 随着土层加深均呈增大趋势; 且 0~80 cm 土层土壤 EC 均小于本底值 2.00 mS/cm。盐分淋洗试验结束后, 0~60 cm 土层, OSL 处理 EC 均值分别为 0.60 mS/cm (LBW) 和 0.76 mS/cm (HBW), LSL 处理 EC 均值分别为 0.57 mS/cm (LBW) 和 0.74 mS/cm (HBW), HSL 处理 EC 均值分别为 0.58 mS/cm (LBW) 和 0.76 mS/cm (HBW)。因此, 在 OSL、LSL 和 HSL 中, 0~60 cm 土层 EC 均表现为 HBW 淋洗处理均大于 LBW 处理。与之类似的是, 潜水蒸发试验结束后, 0~80 cm 土层, OSL 处理 EC 均值分别为 0.63 mS/cm (LBW) 和 0.72 mS/cm (HBW), LSL 处理 EC 均值分别为 0.48 mS/cm (LBW) 和 0.69 mS/cm (HBW), HSL 处理 EC 均值分别为 0.47 mS/cm (LBW) 和 0.82 mS/cm (HBW)。所以, 在 OSL、LSL 和 HSL 中, 0~80 cm 土层 EC 均同样表现为 HBW 淋洗处理均大于 LBW 处理。与此同时, 0~20 cm 土层, LBW 淋洗处理土壤 EC 分别为 0.71 mS/cm (OSL)、0.35 mS/cm (LSL)、0.45 mS/cm (HSL), HBW 淋洗处理土壤 EC 分别为 0.74 mS/cm (OSL)、0.58 mS/cm (LSL)、0.55 mS/cm (HSL)。因此, 0~20 cm 土层, 相同浓度微咸水淋洗的处理, LSL 和 HSL 处理土壤 EC 均小于 OSL。这说明秸秆隔层更有助于抑制土壤表层 (0~20 cm 土层) 盐分积聚, 这是因为秸秆隔层抑制了下层土壤水分上行, 减缓了盐分向表层土壤迁移现象。

### 2.1.2 秸秆隔层及微咸水灌溉对土壤保水抑盐效果的影响

潜水蒸发试验始末土壤含水率和 EC 的相对变化情况如图 4 所示。由图 4(a) 可知, 0~20 cm 土层, 所有处理土壤含水率均减小, 且 LSL 和 HSL 隔层处理的土壤含水率减小程度明显大于 OSL; 而 20~100 cm 土层, 所有处理土壤含水率变化较小。具体而言, 0~20 cm 土层, OSL 土壤含水率相对变化范围分别为 -18.95%~-14.44% (LBW) 和 -13.13%~-11.46% (HBW); LSL 隔层土壤含水率相对变化范围分别为 -53.44%~-50.37% (LBW) 和 -48.48%~-42.19% (HBW); HSL 隔层土壤含水率相对变化范围分别为 -61.28%~-57.09% (LBW) 和 -53.38%~-48.54% (HBW)。20~100 cm 土层, OSL 土壤含水率相对变化范围分别为 -22.78%~-7.50% (LBW) 和 -13.12%~-0.78% (HBW); LSL 隔层土壤含水率相对变化范围分别为 -13.70%~-7.80% (LBW) 和 1.79%~13.17% (HBW); HSL 隔层土壤含水率相对变化范围分别为 -11.13%~-1.72% (LBW) 和 3.19%~22.10% (HBW)。

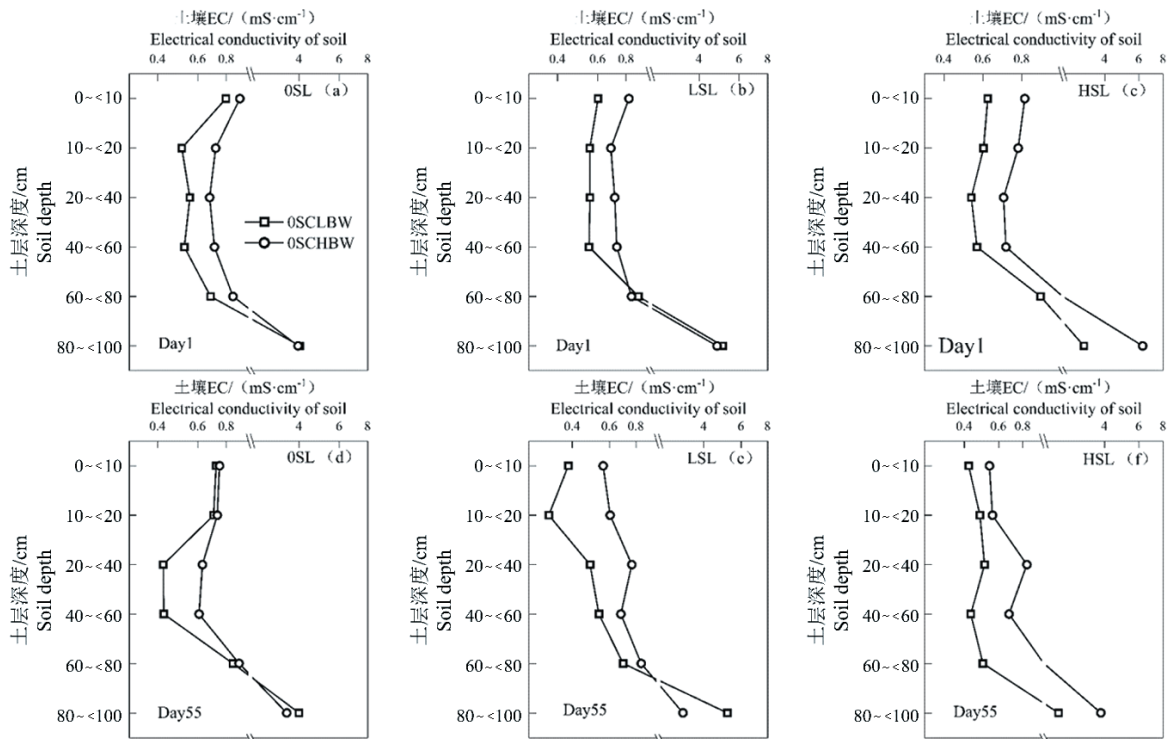


图3 不同处理对土壤盐分空间分布的影响

Fig.3 Effects of different treatments on the spatial distribution of soil salinity

由图4(b)可知,0~10 cm土层,OSL土壤EC分别降低9.41%(LBW)和18.64%(HBW),LSL隔层土壤EC分别降低36.38%(LBW)和31.90%(HBW),HSL隔层土壤EC分别降低32.63%(LBW)和33.89%(HBW)。10~20 cm土层,OSL土壤EC分别上升37.87%(LBW)和1.63%(HBW),LSL隔层土壤EC分别降低44.07%(LBW)和11.86%(HBW),HSL隔层土壤EC分别降低20.22%(LBW)和28.52%(HBW)。20~40 cm土层,OSL土壤EC分别降低5.51%(LBW)和5.52%(HBW),LSL隔层土壤EC分别降低12.59%(LBW)和6.81%(HBW),HSL隔层土壤EC分别降低7.79%(LBW)和9.63%(HBW)。40~60 cm土层,OSL土壤EC分别降低18.65%(LBW)和14.41%(HBW),LSL隔层土壤EC分别降低2.80%(LBW)和6.75%(HBW),HSL隔层土壤EC分别降低24.13%(LBW)和5.49%(HBW)。60~80 cm土层,OSL土壤EC分别上升25.39%(LBW)和6.34%(HBW);LSL隔层,LBW处理土壤EC降低23.14%,HBW处理土壤EC上升0.30%;HSL隔层土壤EC分别降低44.38%(LBW)和23.54%(HBW)。80~100 cm土层,OSL土壤EC分别降低1.16%(LBW)和10.86%(HBW);LSL隔层,LBW处理土壤EC上升1.45%,HBW处理土壤EC下降33.66%;HSL隔层土壤EC分别降低25.95%(LBW)和38.99%(HBW)。

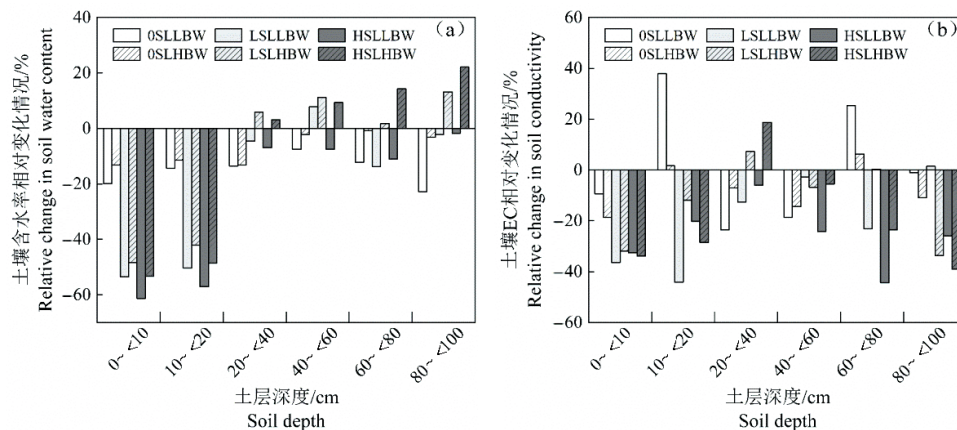


图4 土壤含水率、EC相对变化情况

Fig.4 Relative changes in soil water content, EC

由此可见,在潜水蒸发试验期间,秸秆隔层有效抑制了隔层下部土壤潜水蒸发,减缓了隔层下方土壤盐分上行速率,进而有效抑制了隔层上方土层(0~<20 cm)盐分积聚现象的发生。因此,秸秆隔层起到了保水抑盐的作用。

## 2.2 不同处理对土壤孔隙结构特征的影响

### 2.2.1 秸秆隔层及微咸水灌溉对土壤孔隙数量的影响

根据土壤孔径大小可将土壤孔隙分为非活性孔隙(<2  $\mu\text{m}$ )、毛细孔隙(2~20  $\mu\text{m}$ )和通气孔隙(>20  $\mu\text{m}$ ) 3类<sup>[33]</sup>,不同类型土壤孔隙数量及孔隙总数统计如表2所示。与不设秸秆隔层(OSL)相比,秸秆添加量为每667 m<sup>2</sup> 0.75 t(LSL)和1.50 t(HSL)的处理显著减少了土壤非活性孔隙数,并显著增加了土壤毛细孔隙数和通气孔隙数,使土壤孔隙总数也有很大程度提升。具体而言,在无秸秆隔层处理中,使用3 g/L(LBW)和5 g/L(HBW)2种质量浓度微咸水淋洗的土壤孔隙数量没有显著差异;其中,非活性孔隙数分别占孔隙总数的68.88%(LBW)和70.89%(HBW)。在秸秆添加量为每667 m<sup>2</sup> 0.75 t的隔层处理中,LBW和HBW淋洗土壤的非活性孔隙数和通气孔隙数差异不显著,毛细孔隙数和孔隙总数差异显著;其中,毛细孔隙数分别占孔隙总数的76.86%(LBW)和72.76%(HBW)。在秸秆添加量为每667 m<sup>2</sup> 1.50 t的隔层处理中,LBW和HBW淋洗的土壤孔隙数量差异不显著;其中,毛细孔隙数分别占孔隙总数的80.73%(LBW)和79.40%(HBW)。方差分析的结果显示,秸秆隔层对不同类型孔隙数量及孔隙总数影响显著,而微咸水及交互效应(SL×BW)的影响不显著。这说明与不设秸秆隔层(OSL)相比,秸秆隔层可以增加滨海盐渍土壤孔隙总数并提升毛细孔隙数占比,进而促进土壤盐分淋洗并抑制下层土壤水分上行。

表2 不同处理对滨海盐渍土孔隙数量的影响及双因素方差分析

Tab.2 Effects of different treatments on the number of pores in coastal saline soils and two-factor ANOVA results

| 秸秆隔层<br>Straw<br>layer    | 微咸水<br>Brackish<br>water | 非活性孔隙数<br>Number of inactive<br>pores | 毛细孔隙数<br>Number of capillary<br>pores | 通气孔隙数<br>Number of ventilation<br>pores | 孔隙总数<br>Total number of<br>pores |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|
| OSC                       | LBW                      | 23 590±3 158 <sup>a</sup>             | 9 900±1 065 <sup>c</sup>              | 758±85 <sup>c</sup>                     | 34 248±1 420 <sup>b</sup>        |
|                           | HBW                      | 23 602±3 671 <sup>a</sup>             | 8 371±600 <sup>c</sup>                | 961±96 <sup>c</sup>                     | 33 294±3 088 <sup>b</sup>        |
| LSC                       | LBW                      | 12 255±2 019 <sup>b</sup>             | 47 301±4 216 <sup>a</sup>             | 1 983±140 <sup>ab</sup>                 | 61 538±1 455 <sup>a</sup>        |
|                           | HBW                      | 10 309±695 <sup>b</sup>               | 31 950±5 930 <sup>b</sup>             | 1 653±202 <sup>b</sup>                  | 43 912±3 845 <sup>b</sup>        |
| HSC                       | LBW                      | 10 803±3 859 <sup>b</sup>             | 55 027±7 371 <sup>a</sup>             | 2 335±207 <sup>a</sup>                  | 68 164±8 087 <sup>a</sup>        |
|                           | HBW                      | 11 318±938 <sup>b</sup>               | 53 309±3 838 <sup>a</sup>             | 2 514±458 <sup>a</sup>                  | 67 141±2 375 <sup>a</sup>        |
| 试验因子 Experimental factors |                          | 显著性水平 Significance level              |                                       |                                         |                                  |
| SC                        |                          | ***                                   | ***                                   | ***                                     | ***                              |
| BW                        |                          | ns                                    | ns                                    | ns                                      | ns                               |
| SC*BW                     |                          | ns                                    | ns                                    | ns                                      | ns                               |

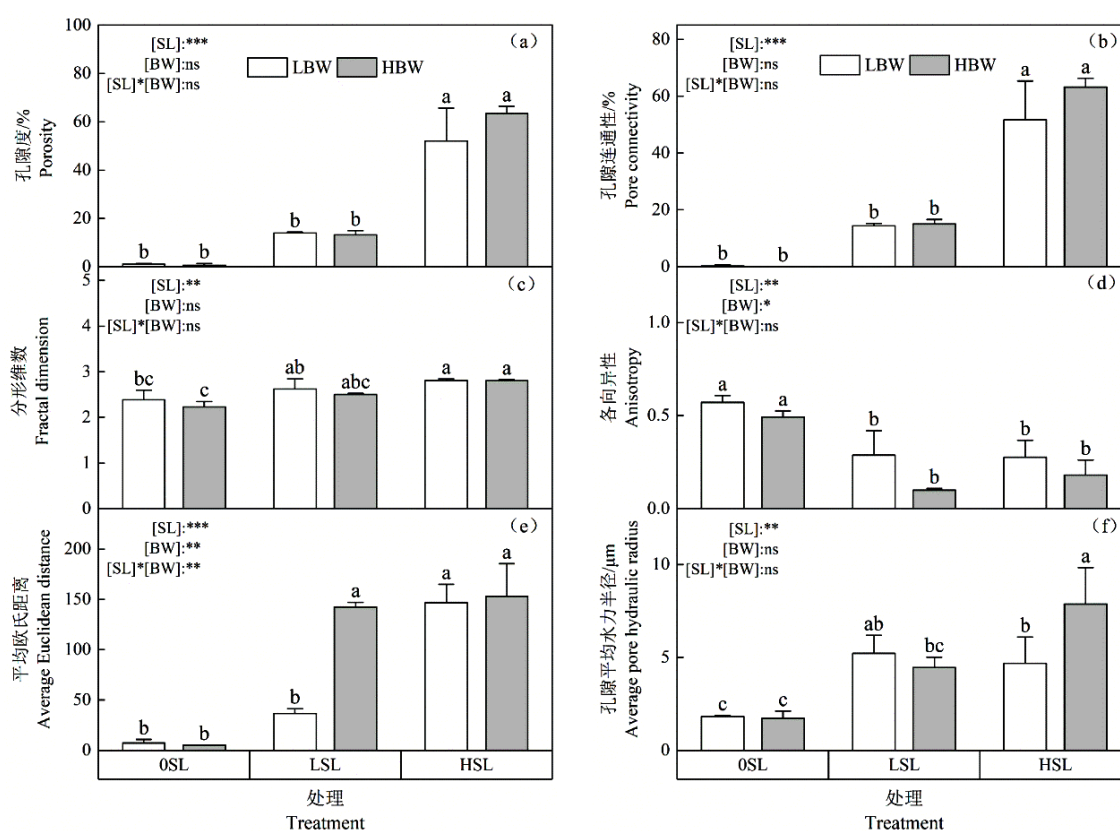
不同小写字母表示不同处理具有显著差异( $P<0.05$ ),字母相同的处理则说明无显著差异( $P>0.05$ );“\*\*\*”表示在 $P<0.001$ 水平上影响极显著,“ns”表示在 $P>0.05$ 水平上影响不显著。

Different lowercase letters indicate that different treatments are significantly different ( $P<0.05$ ), while treatments with the same letter indicate that there is no significant difference ( $P>0.05$ ); “\*\*\*” indicates that the effect is highly significant at the  $P<0.001$  level, and “ns” indicates that the effect is not significant at  $P>0.05$  level.

### 2.2.2 秸秆隔层及微咸水灌溉对孔隙结构参数的影响

土壤孔隙结构参数能在一定程度上表征土壤内部的连通性及孔隙结构的复杂程度,秸秆隔层和微咸水淋洗处理的土壤结构参数如图5所示。由图5(a)可知,在OSL中,LBW和HBW处理的孔隙度均为1.10%。相较于OSL,LSL隔层孔隙度分别增加了12.95%(LBW)和12.00%(HBW),HSL处理孔隙度分别显著增加了50.85%(LBW)和62.30%(HBW);相同秸秆隔层情景下,LBW和HBW处理的土壤孔隙度无显著差异。由图5(b)可知,在OSL中,孔隙连通性分别为0.57%(LBW)和0.64%(HBW)。相较于OSL,LSL隔层孔隙连通性分别提升了13.78%(LBW)和14.48%(HBW),HSL处理孔隙连通性分别显著提升了51.14%(LBW)和62.61%(HBW);相同秸秆隔层处理,LBW和HBW处理的孔隙连通性无显著差异。由图

5(c)可知,在OSL中,孔隙分形维数分别为2.39(LBW)和2.23(HBW)。相较于OSL,LSL隔层孔隙分形维数分别增加了0.24(LBW)和0.28(HBW),HSL隔层孔隙分形维数分别显著增加了0.42(LBW)和0.58(HBW);相同秸秆隔层处理,LBW处理的孔隙分形维数大于HBW处理,但无显著差异。由图5(d)可知,在OSL中,孔隙各向异性分别为0.57(LBW)和0.49(HBW)。相较于OSL,LSL隔层孔隙各向异性显著减小了0.28(LBW)和0.39(HBW),HSL隔层孔隙各向异性显著减小了0.30(LBW)和0.31(HBW);相同秸秆隔层处理,LBW处理的孔隙各向异性大于HBW处理,但无显著差异。由图5(e)可知,在OSL中,平均欧氏距离分别为7.19(LBW)和5.22(HBW)。相较于OSL处理,LSL隔层平均欧氏距离分别增加了29.51(LBW)和137.23(HBW),HSL隔层平均欧氏距离分别显著增加了139.63(LBW)和147.74(HBW);在LSL隔层中,LBW与HBW淋洗处理平均欧氏距离差异显著。由图5(f)可知,在OSL中,孔隙平均水力半径分别为 $1.82\text{ }\mu\text{m}$ (LBW)和 $1.72\text{ }\mu\text{m}$ (HBW)。相较于OSL,LSL隔层孔隙平均水力半径分别增加了 $3.40\text{ }\mu\text{m}$ (LBW)和 $2.74\text{ }\mu\text{m}$ (HBW),HSL隔层孔隙平均水力半径分别显著增加了 $2.87\text{ }\mu\text{m}$ (LBW)和 $6.16\text{ }\mu\text{m}$ (HBW)。上述结果说明,秸秆隔层增加了土壤孔隙度,提升了孔隙连通性、孔隙结构复杂性,对土壤孔隙运输水分能力也有所改善;同时,由于孔隙网络结构复杂程度提升,土壤原本连续的毛管体系被破坏,盐分随水分向上移动的路径被阻断或变得不顺畅,从而减缓盐分在土壤表层积聚,降低返盐程度。方差分析的结果显示,秸秆隔层对孔隙度、孔隙连通性、分形维数、各向异性、平均欧氏距离和孔隙平均水力半径的影响极显著;微咸水对各向异性影响显著,对平均欧氏距离影响极显著,对其他孔隙结构参数影响不显著;交互效应仅对平均欧氏距离影响极显著,对其他孔隙结构参数影响不显著(图5)。



“\*\*\*”表示在 $P<0.001$ 水平上影响极显著,“\*\*”表示在 $P<0.01$ 水平上影响极显著,“\*”表示在 $P<0.05$ 水平上影响显著,“ns”表示在 $P>0.05$ 水平上影响不显著;不同小写字母表示不同处理具有显著差异( $P<0.05$ ),字母相同的处理则说明无显著差异( $P>0.05$ )。

“\*\*\*” indicates that the effect is highly significant at the  $P<0.001$  level, “\*\*” indicates that the effect is highly significant at the  $P<0.01$  level, “\*” indicates that the effect is not significant at the  $P<0.05$  level, and “ns” indicates that the effect is not significant at  $P>0.05$  level; Different lowercase letters indicate that different treatments are significantly different ( $P<0.05$ ), while treatments with the same letter indicate that there is no significant difference ( $P>0.05$ ).

图5 不同处理土壤孔隙结构参数

Fig.5 Parameters of soil pore structure in different treatments

2.2.3 土壤孔隙数量与土壤孔隙结构参数的相关性

PCA 分析结果如图 6 所示,第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的贡献率分别为 80.10% 和 8.90%,累积贡献率为 89.00%。对比各主成分载荷之间的角度可知,毛管孔隙数、通气孔隙数和孔隙总数与各向异性呈负相关,与其他孔隙结构参数呈正相关;非活性孔隙数与各向异性呈正相关,与其他孔隙结构参数呈负相关。与此同时,除各向异性与非活性孔隙数外,其他变量对 PC1 均具有正向贡献,其中毛管孔隙数与通气孔隙数对 PC1 贡献较大。此外,OSL、HSL 及 HSC 对应的散点呈相互聚集现象,说明秸秆隔层对土壤孔隙结构特征有较好的区分度,即秸秆隔层对土壤孔隙结构具有较大的影响。Pearson 相关性分析的结果如图 7 所示,可以看出,非活性孔隙数与各向异性呈显著正相关关系,与其他孔隙结构参数呈负相关关系,其中,非活性孔隙数与分形维数、孔隙平均水力半径、平均欧氏距离等孔隙结构参数负相关关系显著。毛管孔隙数、通气孔隙数、孔隙总数分别与各向异性呈负相关关系;与其他孔隙结构参数呈正相关关系,其中,除平均欧氏距离外,与其他孔隙结构参数具有显著正相关关系。通过比对 PCA 和 Pearson 相关性分析的结果发现,2 种分析结果相吻合。这在很大程度上说明土壤孔隙数量与孔隙结构参数密切相关,毛管孔隙数与通气孔隙数对孔隙结构特征具有较大的影响。

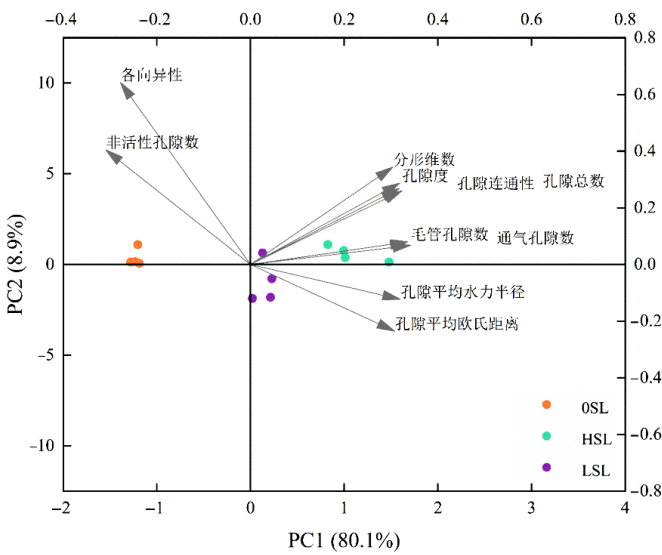


图 6 主成分分析(PCA)

Fig.6 Principal Component Analysis(PCA) results

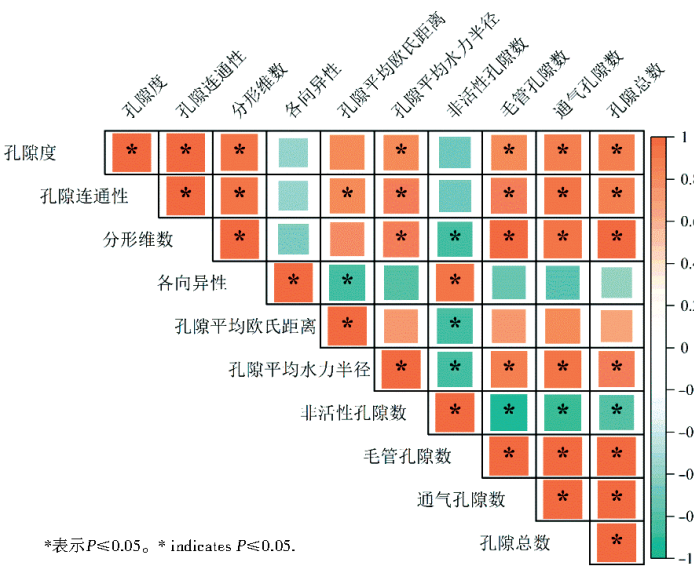


图 7 Pearson 相关性分析

Fig.7 Pearson correlation analysis results

### 3 讨论

#### 3.1 秸秆隔层和微咸水灌溉对滨海盐渍土水盐分布特性及保水抑盐效果的影响分析

本研究表明,盐分淋洗试验结束后,所有处理0~100 cm土层土壤含水率均表现为3 g/L微咸水(LBW)灌溉处理的土壤含水率大于5 g/L微咸水(HBW)处理。原因主要是本研究用于试验的微咸水由NaCl配制而成,随着微咸水矿化度增加,土壤中 $\text{Na}^+$ 浓度也随之增加, $\text{Na}^+$ 可以使土壤胶体颗粒分散并破坏土壤团聚体结构,从而导致土壤导水能力降低,土壤含水率也随之减小<sup>[34]</sup>。因此,微咸水矿化度越高,土壤含水率越小,反之亦相反。此外,相较于OSL,LSL和HSL秸秆隔层处理土壤水分在垂直方向上分布更均匀,且秸秆隔层对其上部土壤水分入渗有一定阻滞效应。这主要是由于秸秆隔层、隔层上部及下部土壤在孔隙数量和结构上存在差异,并且土壤-秸秆界面水势差逆向<sup>[24]</sup>,因此减缓了湿润峰向下推移的速率,对土壤水分入渗起到了阻滞效果<sup>[25,35]</sup>。潜水蒸发试验结束后,相较于OSL,LSL和HSL秸秆隔层有助于抑制隔层下部土壤的水分蒸发,增强隔层下部土壤保水能力。这是因为,秸秆隔层切断了土壤毛管孔隙之间的连续性<sup>[36]</sup>,当地下水上升至临近隔层下部土壤后,只能以气相水形式缓慢扩散上移<sup>[25]</sup>,从而有效抑制了隔层下部土壤水分蒸发速率。本研究亦表明,盐分淋洗试验及潜水蒸发试验结束后,土壤EC分布特性一致,随土层加深均随之逐渐增大;0~<80 cm土层土壤EC均小于本底值,并且,低矿化度微咸水表现出更佳的淋盐效果。这是因为,土壤中的水盐运移遵循“盐随水动”<sup>[37]</sup>的基本规律。首先,在灌溉淋洗的过程中,水分下渗带走了大量可溶性盐离子,从而导致土壤EC下降<sup>[38]</sup>;其次,在潜水蒸发的过程中,秸秆隔层减少了土壤毛管水上升的路径,抑制土壤水分蒸发的同时也降低了返盐速率<sup>[39]</sup>;此外,低矿化度微咸水向土壤中引入的可溶性盐离子更少<sup>[40]</sup>。综上,就不同处理的保水抑盐效果而言,与无隔层相比,秸秆隔层有效提升了隔层下部土壤保水效果;同时,减缓了其上部土层(0~<20 cm)盐分积聚现象。

#### 3.2 秸秆隔层和微咸水灌溉对滨海盐渍土孔隙结构特征的影响分析

土壤孔隙类型及其数量对土壤水汽运输能力和植物根系生长都有重要影响。本研究表明,秸秆隔层对土壤不同类型孔隙数量及孔隙总数影响极显著;有秸秆隔层的土壤非活性孔隙数显著减少,毛管孔隙数、通气孔隙数及孔隙总数显著增加,毛管孔隙数占比达72.76%~80.73%;秸秆添加量为每667 m<sup>2</sup> 1.50 t(HSL)的隔层处理,毛管孔隙数、通气孔隙数及孔隙总数明显大于其他处理。原因可能是,一方面农作物秸秆作为一种多孔材料,其本身具有大量孔隙<sup>[41]</sup>,且易与土壤颗粒相互黏结形成新的孔隙<sup>[42]</sup>。因此,秸秆作为外源物输入土壤,增加了土壤孔隙数量。另一方面,形状各异的秸秆碎片随机堆积,形成较为蓬松的秸秆隔层,这在降低土壤紧实度的同时也增加了土壤孔隙数量<sup>[43]</sup>。土壤孔隙结构参数的分析表明,秸秆隔层对土壤孔隙结构起主导作用。由于设置秸秆隔层,土壤孔隙度增加,孔隙连通性、孔隙结构复杂性提升,土壤孔隙水分运输能力也明显改善。原因可能是,首先,秸秆隔层使得土壤孔隙数量增加,土壤内部气相占比增大,导致孔隙度也因此增加<sup>[44]</sup>。其次,土壤孔隙数量增加,尤其是毛管孔隙数与通气孔隙数的增加,使得相邻孔隙连通的可能性也进一步增大,这有助于整体孔隙连通性的提升<sup>[45]</sup>。与此同时,在孔隙连通性提升的基础上,水分在土壤中运移通路也随之增加,孔隙水分运输能力也得到改善<sup>[46-48]</sup>。最后,受秸秆本身形状及其孔隙结构的影响<sup>[49]</sup>,设置秸秆隔层不仅会增加土壤孔隙数量、提升土壤孔隙度,而且也会影响土壤孔隙原本的空间分布状况,土壤孔隙结构也因此变得更为复杂<sup>[50-51]</sup>。此外,PCA和Pearson相关性分析的结果表明,土壤孔隙数量与孔隙结构参数密切相关,毛管孔隙数与通气孔隙数对孔隙结构特征具有较大的影响作用。原因可能是孔隙数量越多,孔隙分布范围可能更广、形状更加多样、连通性也相对提升,相互连通的孔隙形成较为复杂的孔隙网络结构<sup>[52-53]</sup>。

### 4 结论

使用3 g/L和5 g/L 2种微咸水对滨海重度盐渍土进行淋洗,0~<80 cm土层EC均小于本底值(2.00 mS/cm)。相较于5 g/L微咸水,使用3 g/L微咸水灌溉对土壤水分保持和盐分淋洗效果更好。

与无隔层处理(OSL)相比,秸秆隔层设置对滨海盐渍土具有蓄水降盐的效应,对隔层下部土壤水分保持及其上部土壤盐分阻抑效果尤为突出。

秸秆隔层对土壤孔隙数量及孔隙结构参数影响显著,且土壤孔隙数量变化与孔隙结构参数变化密

切相关。与无隔层处理(OSL)相比,设置秸秆隔层可以增加滨海盐渍土壤孔隙总数、提升毛管孔隙占比及孔隙度、提升土壤孔隙的连通性和孔隙网络结构复杂程度,进而改善土壤结构、增强土壤水分保持和运输能力。

致谢:江苏省沿海开发集团有限公司揭榜挂帅项目(2022YHTDJ02)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

## 参考文献 References:

- [1] 张贵芹,王洪章,郭新送,等.有机物料投入对滨海盐碱地土壤理化性状和夏玉米产量形成的影响[J].作物学报,2024,50(9):2323-2334.  
ZHANG G Q, WANG H Z, GUO X S, et al. Effects of organic material inputs on soil physicochemical properties and summer maize yield formation in coastal saline-alkali land[J]. Acta agronomica Sinica, 2024, 50(9): 2323-2334.
- [2] 戴继航,张金龙,李婧男,等.咸水淋洗改良滨海盐渍土的潜力研究[J].水土保持学报,2011,25(3):250-253.  
DAI J H, ZHANG J L, LI J N, et al. Leaching potential of salt water in coastal saline soils[J]. Journal of soil and water conservation, 2011, 25(3): 250-253.
- [3] HUANG M Y, ZHANG Z Y, ZHU C L, et al. Effect of biochar on sweet corn and soil salinity under conjunctive irrigation with brackish water in coastal saline soil[J]. Scientia horticulturae, 2019, 250: 405-413.
- [4] CHEN S, WANG Z C, GUO X P, et al. Effects of vertically heterogeneous soil salinity on tomato photosynthesis and related physiological parameters[J]. Scientia horticulturae, 2019, 249: 120-130.
- [5] ZHANG H Y, PANG H C, ZHAO Y G, et al. Water and salt exchange flux and mechanism in a dry saline soil amended with buried straw of varying thicknesses[J]. Geoderma, 2020, 365: 114213.
- [6] 吴乐知,李取生,刘长江.微咸水淋洗对苏打盐渍土土壤理化性状的影响[J].生态与农村环境学报,2006,22(2):11-15.  
WU L Z, LI Q S, LIU C J, et al. Effects of leaching with mildly saline water on the physical and chemical properties of saline-sodic soil[J]. Journal of ecology and rural environment, 2006, 22(2): 11-15.
- [7] YIN C Y, ZHAO J, CHEN X B, et al. Desalination characteristics and efficiency of high saline soil leached by brackish water and Yellow River water[J]. Agricultural water management, 2022, 263: 107461.
- [8] HE K K, YANG Y H, YANG Y M, et al. HYDRUS simulation of sustainable brackish water irrigation in a winter wheat-summer maize rotation system in the north China plain[J]. Water, 2017, 9(7): 536.
- [9] 孙宏勇,张雪佳,田柳,等.咸水灌溉影响耕地质量和作物生产的研究进展[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(3):354-363.  
SUN H Y, ZHANG X J, TIAN L, et al. Effects of saline water irrigation on soil quality and crop production: a review[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2023, 31(3): 354-363.
- [10] 王茜,董世德,崔光旭,等.咸淡水交替滴灌对滨海盐渍土水盐动态和作物生长的影响[J].灌溉排水学报,2023,42(增刊1):18-25.  
WANG Q, DONG S D, CUI G X, et al. Effects of alternate saline and fresh water drip irrigation on water and salt dynamics and crop growth in coastal saline soil[J]. Journal of irrigation and drainage, 2023, 42(Sup1): 18-25.
- [11] 黄明逸,张展羽,徐辉,等.咸淡轮灌和生物炭对滨海盐渍土水盐运移特征的影响[J].农业机械学报,2021,52(1):238-247.  
HUANG M Y, ZHANG Z Y, XU H, et al. Effects of cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar on water and salt transports of coastal saline soil[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2021, 52(1): 238-247.
- [12] 黄明逸,张展羽,翟亚明,等.咸淡交替灌溉下生物炭对滨海盐渍土及玉米产量的影响[J].农业工程学报,2020,36(21):88-96.  
HUANG M Y, ZHANG Z Y, ZHAI Y M, et al. Effects of biochar on coastal saline soil and maize yield under alternate irrigation with brackish and freshwater[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(21): 88-96.
- [13] 朱成立,吕雯,黄明逸,等.生物炭对咸淡轮灌下盐渍土盐分分布和玉米生长的影响[J].农业机械学报,2019,50(1):226-234.  
ZHU C L, LYU W, HUANG M Y, et al. Effects of biochar on coastal reclaimed soil salinity distribution and maize growth with

- cycle fresh and saline water irrigation[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2019, 50(1): 226-234.
- [14] GUO Y, WANG Q J, ZHAO X, et al. Field irrigation using magnetized brackish water affects the growth and water consumption of *Haloxylon ammodendron* seedlings in an arid area[J].Frontiers in plant science, 2022, 13: 929021.
- [15] ZHAO G Q, MU Y, WANG Y H, et al. Magnetization and oxidation of irrigation water to improve winter wheat (*Triticum aestivum* L.) production and water-use efficiency[J].Agricultural water management, 2022, 259: 107254.
- [16] 王纪鹏, 晁赢, 阎祥慧, 等. 秸秆还田与无机改良剂配合对滨海盐渍化土壤特性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(3): 623-635.
- WANG J P, CHAO Y, YAN X H, et al. Effects of straw returning with inorganic improver on characteristics of coastal saline soil[J].Journal of agricultural resources and environment, 2024, 41(3): 623-635.
- [17] 孙乐, 景媛媛, 蒋恒, 等. 农作物秸秆还田研究现状与展望[J]. 中国草地学报, 2024, 46(11): 130-140.
- SUN L, JING Y Y, JIANG H, et al. Research status and prospect of crop straw returning to the field[J].Chinese journal of grassland, 2024, 46(11): 130-140.
- [18] 贾振江, 吴洋洋, 李王成, 等. 隔层创建技术的土壤生态环境效应进展分析与发展展望[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 1-12.
- JIA Z J, WU Y Y, LI W C, et al. Progress analysis and development prospects of soil ecological and environmental effects of interlayer construction[J].Journal of soil and water conservation, 2024, 38(6): 1-12.
- [19] 刘娜. 河套平原盐碱地不同材料隔层水盐调控及培肥增产机制与效应[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
- LIU N. Mechanism and effect of interlayer by different material on soil water and salt regulation, fertilization and yield for saline-alkali soil in Hetao Plain[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021.
- [20] 董建新, 丛萍, 刘娜, 等. 秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 921-934.
- DONG J X, CONG P, LIU N, et al. Effects of deep straw incorporation on subsoil physical properties and aggregate distribution in black soil[J].Acta pedologica Sinica, 2021, 58(4): 921-934.
- [21] WU G, LING J, ZHAO D Q, et al. Deep-injected straw incorporation improves subsoil fertility and crop productivity in a wheat-maize rotation system in the north China plain[J].Field crops research, 2022, 286: 108612.
- [22] 赵永敢, 逢焕成, 李玉义, 等. 秸秆隔层对盐碱土水盐运移及食葵光合特性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5153-5161.
- ZHAO Y G, PANG H C, LI Y Y, et al. Effects of straw interlayer on soil water and salt movement and sunflower photosynthetic characteristics in saline-alkali soils[J].Acta ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5153-5161.
- [23] MASHARIFOV U, WANG Z C, LI Q X, et al. Effects of buried straw strips with different internal structures on water and salt distribution and leaching efficiency in coastal saline soil[J].Agriculture, 2024, 14(7): 994.
- [24] 郭相平, 杨泊, 王振昌, 等. 秸秆隔层对滨海盐渍土水盐运移影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(5): 22-27.
- GUO X P, YANG B, WANG Z C, et al. Influence of straw interlayer on the water and salt movement of coastal saline soil[J].Journal of irrigation and drainage, 2016, 35(5): 22-27.
- [25] 黄达, 陈盛, 王振昌, 等. 浅埋秸秆隔层对滨海盐渍土水盐运移及番茄生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(3): 48-56.
- HUANG D, CHEN S, WANG Z C, et al. Ameliorating salt accumulation and enhancing tomato growth by shallow-burying a crop straw layer in coastal saline soil[J].Journal of irrigation and drainage, 2023, 42(3): 48-56.
- [26] HUANG T T, YANG N, LU C, et al. Soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods[J].Soil and tillage research, 2021, 214: 105171.
- [27] 徐忠山, 刘景辉, 逯晓萍, 等. 秸秆颗粒还田对黑土土壤酶活性及细菌群落的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(12): 4347-4355.
- XU Z S, LIU J H, LU X P, et al. Effects of returning granulated corn stover on soil enzyme activities and bacterial community in black soil[J].Acta ecologica Sinica, 2019, 39(12): 4347-4355.
- [28] 温云杰, 张建诚, 杨娜, 等. 长期秸秆还田配施有机肥对土壤有机碳组分和孔隙结构的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 74-81.
- WEN Y J, ZHANG J C, YANG N, et al. Effects of the long-term application of organic fertilization and straw returning on the components of soil organic carbon and pores[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2024, 40(21): 74-81.
- [29] 张硕, 王松, 张钰, 等. 广西地区甘蔗粉垄与旋耕耕作方式下土壤孔隙特征变化[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 221-229.
- ZHANG S, WANG S, ZHANG Y, et al. Changes in soil pore characteristics under powder ridge tillage and rotary tillage in

- sugarcane field in Guangxi region[J].Research of soil and water conservation, 2024, 31(6):221-229.
- [30] HOSSAIN M S, RAHMAN G K M M, SOLAIMAN A R M, et al. Estimating electrical conductivity for soil salinity monitoring using various soil-water ratios depending on soil texture[J]. Communications in soil science and plant analysis, 2020, 51(5):635-644.
- [31] 芦怡芳, 谢忠雷, 高燕, 等. 短期增温与秸秆还田量对东北黑土有机碳组分的协同影响[J]. 生态学报, 2024, 44(21): 9805-9814.
- LU Y F, XIE Z L, GAO Y, et al. Effects of short-term warming and amounts of residue return on soil organic carbon in black soils of northeast China[J]. Acta ecologica Sinica, 2024, 44(21):9805-9814.
- [32] 于茹, 宋佳坤, 张宏媛, 等. 秸秆隔层结合春灌对河套灌区盐碱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(12):2341-2353.
- YU R, SONG J S, ZHANG H Y, et al. Effects of straw interlayer combined with spring irrigation on salinealkali soil respiration and its temperature sensitivity in Hetao Irrigation District[J]. Scientia agricultura Sinica, 2023, 56(12):2341-2353.
- [33] 关连珠. 普通土壤学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2007:76-77.
- GUAN L Z. General soil science[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2007:76-77.
- [34] 刘小媛, 高佩玲, 张晴雯, 等. 微咸水矿化度对重度盐碱土壤入渗特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 102-107.
- LIU X Y, GAO P L, ZHANG Q W, et al. Effect of mineralization degree of infiltration water on infiltration characteristics of severely saline-alkali soil[J]. Agricultural research in the arid areas, 2018, 36(1):102-107.
- [35] 张万锋, 杨树青, 靳亚红, 等. 秸秆深埋下灌水量对土壤水盐分布与夏玉米产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1):228-237.
- ZHANG W F, YANG S Q, JIN Y H, et al. Effects of irrigation amount on soil water and salt distribution and summer maize yield under deeply buried straw[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2021, 52(1):228-237.
- [36] ZHAO Y G, LI Y Y, WANG J, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils[J]. Soil and tillage research, 2016, 155:363-370.
- [37] 弋鹏飞, 虎胆·吐马尔白, 吴争光, 等. 棉田膜下滴灌年限对土壤盐分累积的影响研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5):118-122.
- YI P F, Hudan·Tumaerbai, WU Z G, et al. Research on soil salt accumulation influence by the years of covered cotton under drip irrigation[J]. Research of soil and water conservation, 2010, 17(5):118-122.
- [38] 张美桃, 杨培岭, 任树梅, 等. 灌溉水盐分及灌水量对土壤水盐分布与春玉米生长的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4):290-298.
- ZHANG M T, YANG P L, REN S M, et al. Effects of irrigation water salinity and irrigation amount on soil water and salt distribution and spring maize growth[J]. Journal of soil and water conservation, 2022, 36(4):290-298.
- [39] 卢闯, 逢焕成, 张宏媛, 等. 春灌结合秸秆隔层促进土壤脱盐增加微生物多样性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18):87-94.
- LU C, PANG H C, ZHANG H Y, et al. Spring irrigation combined with straw interlayer promoting soil desalination and increasing microflora diversity[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2017, 33(18):87-94.
- [40] 刘祯媛, 张体彬, 梁青, 等. 不同浓度微咸水灌溉对土壤水盐分布及冬小麦生长的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1):378-386.
- LIU Z Y, ZHANG T B, LIANG Q, et al. Effects of saline water irrigation with different concentrations on soil water and salt distribution and growth of winter wheat[J]. Journal of soil and water conservation, 2024, 38(1):378-386.
- [41] ZHANG Z B, PENG X H. Bio-tillage: a new perspective for sustainable agriculture[J]. Soil and tillage research, 2021, 206: 104844.
- [42] 李金彪, 陈金林, 刘广明, 等. 滨海盐碱地绿化理论技术研究进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(1):246-251.
- LI J B, CHEN J L, LIU G M, et al. Progress of greening theory and technology for coastal saline land[J]. Chinese journal of soil science, 2014, 45(1):246-251.
- [43] 张奇, 陈桢, 陈效民, 等. 不同秸秆还田深度对黄棕壤土壤物理性质及其剖面变化的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(2): 308-314.
- ZHANG Q, CHEN C, CHEN X M, et al. Effects of different depths of straw returning to field on soil physical properties and profile changes of yellow brown soil[J]. Chinese journal of soil science, 2020, 51(2):308-314.

- [44] NEVES C S V J, FELLER C, GUIMARÃES M F, et al. Soil bulk density and porosity of homogeneous morphological units identified by the cropping profile method in clayey oxisols in Brazil[J]. Soil and tillage research, 2003, 71(2): 109-119.
- [45] 杨建君, 盖浩, 张梦璇, 等. 深松结合秸秆还田对黑土孔隙结构的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(5): 892-906.  
YANG J J, GAI H, ZHANG M X, et al. Effect of subsoiling combined with straw returning measure on pore structure of black soil[J]. Scientia agricultura Sinica, 2023, 56(5): 892-906.
- [46] 孟红旗, 熊仁鹏, 王崇, 等. 采煤沉陷区不同土地利用类型土壤水分、有机质和质地的空间变异性[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 911-922.  
MENG H Q, XIONG R P, WANG C, et al. Spatial variability of soil moisture, organic matter content and soil texture in coal mining subsidence area as affected by land use[J]. Acta pedologica Sinica, 2018, 55(4): 911-922.
- [47] 孟红旗, 赵同谦, 徐华山, 等. 河岸带耕地降雨径流产流特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 749-754.  
MENG H Q, ZHAO T Q, XU H S, et al. Research on the characteristics of the rainfall runoff in riparian farmland[J]. Journal of agro-environment science, 2009, 28(4): 749-754.
- [48] 张轩铭, 戴翠婷, 李朝霞, 等. 三峡库区紫色砂岩不同发育程度土壤入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 92-98.  
ZHANG X M, DAI C T, LI Z X, et al. Soil infiltration characteristics and influencing factors of purple sandstone with different degrees of development in the Three Gorges reservoir area[J]. Journal of soil and water conservation, 2022, 36(4): 92-98.
- [49] XUAN K F, LI X P, YU X L, et al. Effects of different organic amendments on soil pore structure acquired by three-dimensional investigation[J]. European journal of soil science, 2022, 73(4): e13264.
- [50] WANG J K, SUN C X, ZHANG Y L, et al. Straw return rearranges soil pore structure improving soil moisture memory in a maize field experiment under rainfed conditions[J]. Agricultural water management, 2024, 306: 109164.
- [51] YU X, HONG C, PENG G, et al. Response of pore structures to long-term fertilization by a combination of synchrotron radiation X-ray microcomputed tomography and a pore network model[J]. European journal of soil science, 2018, 69(2): 290-302.
- [52] YE H C, XU Z H, ZHA L L, et al. The application of computed tomography to study the soil porosity of mountain red earth[J]. Applied sciences, 2024, 14(19): 9050.
- [53] LI J M, HUANG Y L, WANG G Y, et al. Spatial distribution of soil pore structure and response characteristics of physical parameters in the subsidence area induced by shallow-buried extra-thick coal seam mining[J]. Journal of cleaner production, 2024, 484: 144335.

(责任编辑:熊淑琪)



**第一作者简介:**马东祥,在读博士生,主要研究方向为水土资源退化与修复。2020年获兰州理工大学学士学位;2024年获宁夏大学硕士学位,并入职中国科学院南京土壤研究所担任科研助理(项目聘用);2025年考入河海大学攻读博士学位。在本学科领域发表学术论文12篇,其中以第一作者身份发表2篇;参与完成发明专利1项。



**通信作者简介:**王相平,副研究员,博士。2005年获华北水利水电学院学士学位,2010年获中国农业大学博士学位,并入职中国科学院南京土壤研究所。主要从事盐渍农田适水调盐理论与技术、盐渍农田障碍消减机制及其伴生过程模拟等方面的研究工作。主持国家自然科学基金、国家重点研发计划专项子课题、江苏省自然科学基金等项目,参与编写专著2部,发表论文40余篇。