doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.12.033

旱区盐碱土壤优先流区与基质流区水盐分布和淋洗规律研究

董勤各[1]　白金灵[1,2]　焦平金[2]　陶　园[2]　陈皓锐[2]　许　迪[2]

（1. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院，陕西杨凌 712100；
2. 中国水利水电科学研究院水利研究所，北京 100048）

摘要：水分流经土壤大孔隙携带溶质运移进而影响土壤优先流区与基质流区的水盐运移特征。为探讨旱区盐碱地土壤优先流区与基质流区水盐分布及淋洗规律，本文采用原状土柱染色淋溶试验并结合结构方程模型，分析了盐荒地与葵花地土壤剖面水文连通性、淋溶特征与水盐含量特征及其作用关系。结果表明，葵花地土壤优先流发育程度与剖面水文连通性较盐荒地强，前者土壤垂直和水平剖面染色面积比为后者的 1.05 倍和 1.56 倍，染色面积比变异系数为后者的 55%，前者染色通道细碎，后者染色集中于上层且呈狭长条带状。与盐荒地相比，葵花地累积出流量增加 8.76%，开始出流时间提前 68.32%，出流历时缩短 88.95%，累积淋盐量和淋溶液含盐量减少 83.08% 和 78.32%。淋溶后优先流区土壤含盐量均值低于基质流区 33.38%，发生频率为 89.38%。土壤剖面水文连通性直接影响土壤水盐含量和淋溶特征，亦可通过改变淋溶特征间接影响优先流区与基质流区水分分布。研究结果为深入理解盐碱土壤水盐运移机制和改良土壤结构提供了理论支持。

关键词：盐碱土；土壤大孔隙；优先流；水盐运移；淋洗；染色

中图分类号：S152；S156.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)12-0354-10　　**OSID**：

Water and Salt Transport and Salt Leaching Patterns in Preferential Flow and Matrix Flow Zones of Saline-alkaline Soils in Arid Regions

DONG Qin'ge[1]　BAI Jinling[1,2]　JIAO Pingjin[2]　TAO Yuan[2]　CHEN Haorui[2]　XU Di[2]

(1. *College of Soil and Water Conservation Science and Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Department of Irrigation and Drainage*, *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100048, *China*)

Abstract: Water flowing through soil macropores transports solutes and thereby influences water and salt migration in preferential flow and matrix flow domains. To investigate the distribution and leaching patterns of water and salt in these two domains in arid saline-alkali soils, undisturbed soil column dye infiltration experiments combined with structural equation modeling were conducted. The relationships among soil profile hydrological connectivity, leaching characteristics, and water-salt contents were analyzed for soils from a barren saline land and a sunflower field. The results showed that preferential flow development and profile hydrological connectivity were stronger in the sunflower-field soil than that in the barren saline soil. The vertical and horizontal stained-area ratios of the sunflower-field soil were 1.05 times and 1.56 times those of the barren saline soil, respectively, while the coefficient of variation of stained-area ratios was only 55% of that of the latter. Stained flow paths in the sunflower-field soil were finer and more fragmented, whereas staining in the barren saline soil was mainly concentrated in the upper layer and exhibited narrow, elongated strip-like patterns. Compared with the barren saline soil, the sunflower-field soil showed an 8.76% increase in cumulative outflow, a 68.32% earlier onset of outflow, and an 88.95% reduction in outflow duration, accompanied by decreases of 83.08% and 78.32% in cumulative salt leaching and leachate salinity, respectively. After leaching, the mean soil salt content in the preferential flow domain was 33.38% lower than that in the matrix flow domain, with an occurrence frequency of 89.38%. Soil profile hydrological connectivity directly affected soil water and salt contents as well as leaching characteristics, and indirectly influenced water distribution between preferential and

收稿日期：2025-12-08　修回日期：2025-12-28

基金项目：国家自然科学基金项目(52179054)

作者简介：董勤各(1982—)，男，副研究员，博士生导师，主要从事土壤水盐运移调控与模拟研究，E-mail：qgdong2011@163.com

matrix flow domains by altering leaching behavior. These findings can provide theoretical support for a deeper understanding of water-salt transport mechanisms and for improving soil structure in arid saline-alkali soils.

Key words: saline-alkaline soil; soil macropores; preferential flow; water-salt transport; leaching; dye tracing

0　引言

我国盐渍土总面积约 3.69×10^7 hm^2，是主要的中低产田，占全国可利用土地面积的 5.01%[1]。盐碱土壤结构较差、团聚体稳定性低、孔隙发育不良，在气象、土地利用和土壤结构等多因素叠加下易导致土壤盐分积聚[1-3]。土壤结构是土壤水盐运移等理化过程的重要载体，尤其土壤大孔隙数量、形状和三维空间构型共同决定了土壤水分的供应和蓄持能力[4]，对土壤优先流形成和发育具有促进作用[5]。因此，解析盐碱土大孔隙结构特征及其对水盐运移的影响，有助于推进盐碱土治理与耕地质量提升。

由土壤大孔隙形成的优先流通道具有成因多样、几何形态复杂和空间分布异质性强等特征[6]。土壤优先流区明显的非稳定渗透特征将影响土壤剖面水盐的运移速率与空间分布形态[7-8]。有研究表明，染色示踪法可清晰区分土壤水的流经区域与未流经区域（土壤优先流区与土壤基质流区）[6]，有效呈现土壤大孔隙的分布特征。相较于示踪离子穿透曲线与 CT 扫描等手段，染色示踪法能直观呈现土壤水流的路径几何形态、连通性与染色深度，为定量评估优先流发育程度提供了简便易行的技术方法[9]。与田间土壤染色示踪相比，原状土柱染色示踪可控性更强且能有效排除外界干扰，优先流区的形成发育与空间变异性均与大田接近[10]。因此，借助染色示踪法直观区分并定位土壤优先流区与土壤基质流区，从而明晰二者的土壤水盐分布特征，将有助于探求土壤大孔隙结构特征对水盐运移的影响机制。

关于土壤大孔隙结构对土壤水盐运移影响研究多集中于非盐碱土，如免耕土壤优先流路径的连通性高于耕作土壤[11]，林地垂直渗漏发育显著而水田侧向渗漏发育显著[12]等。与非盐碱化土壤相比，盐碱土壤具有含盐量高、结构差和易板结等特征[13]，其优先流路径分布特征及其对水盐运移过程的影响了解尚不足。在土壤水盐运移过程，剖面水文连通性是反映水分由表层向深层迁移难易程度的重要指标，直接影响水分及溶质在垂直方向上运移路径与速率[14]。因此，深入揭示盐碱土壤剖面水文连通性的变化规律对阐明盐碱土水盐运移机制具有重要意义。基于此，本文选择内蒙古黄河南岸葵花地和盐荒地典型旱区盐碱土壤，采用原状土柱淋溶染色试验，分析剖面水文连通性指标、淋溶特征与土壤剖面水盐分布的关系，探究水盐淋溶变化及淋溶后土壤优先流区与基质流区水盐分布差异，以期为盐碱地改良与耕地质量提升提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　淋溶染色试验

供试土壤采自内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗王爱召镇的重度盐碱土，去除表层杂草，采集 0 ~ 40 cm 原状土作为供试土壤。原状土柱采用内径 20 cm、长度 40 cm、管壁厚 0.5 cm PVC 硬质管件，一端打磨成刀口便于外力按压并全部插入土体。挖出土样后削平下端多余土样，用薄膜包裹土柱并置于防震包装袋中运回实验室。耕地和盐荒地是当地典型土地类型且葵花因耐盐程度较高一直为内蒙古地区最主要经济作物，故选择葵花地（K）和盐荒地（Y）[13]。于 2023 年 9 月底采样，葵花地旋耕覆膜种植并于收获后取样，盐荒地大面积覆盖盐碱草。葵花地土壤黏粒、粉粒、砂粒含量分别为 12.29%、78.09%、9.62%，盐荒地对应为 8.69%、77.73%、13.58%，按照国际制土壤质地分类标准，供试土壤均为粉壤土。葵花地与盐荒地土壤容重分别为 1.26、1.42 g/cm^3，土壤含盐量分别为 11.26、18.59 g/kg，饱和含水率（质量含水率）分别为 31.95% 与 36.71%。

根据内蒙古河套灌区秋浇洗盐用水量并考虑土壤初始含水率影响，采用 160 mm 去离子水并添加质量浓度 1 g/L 亮蓝染色溶液进行淋洗[15-16]。土柱上端粘接 PVC 软管以延长柱体高度，保证马氏瓶控制定水头为 3.5 cm，在土柱上表面覆盖砂砾石以防止表层土壤冲刷。土柱下表面放置滤网，防止土壤颗粒冲刷流失，并设置淋溶液出流漏斗来导流淋溶液至下方量筒中（图 1a）。试验期间土柱上方覆盖塑料膜以减少水分蒸发损失。

1.2　监测与分区取样

灌水过程记录马氏瓶刻度变化以控制淋溶水量。盐荒地土柱与葵花地土柱分别间隔 2 h 与 10 min 记录淋溶出流水量用于随后测量淋溶液含盐量，同时记

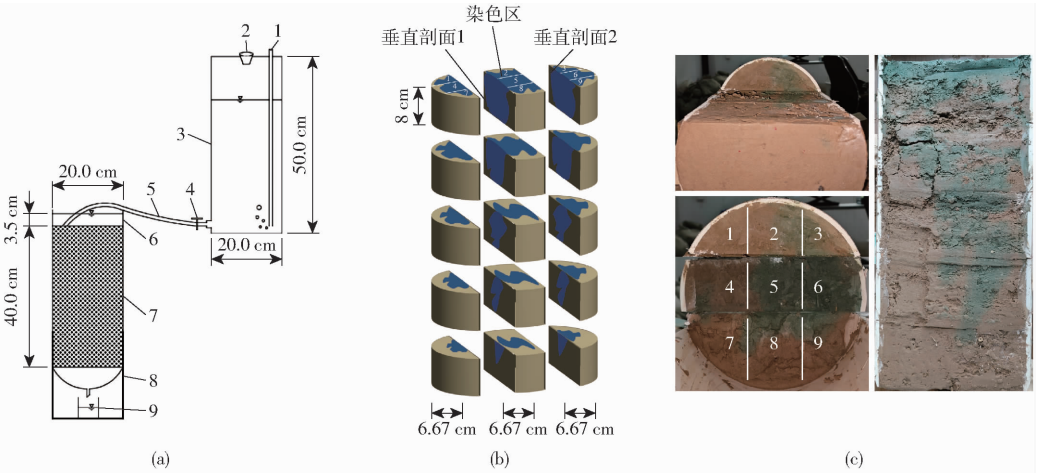

图 1 试验装置与土柱分区切割图

Fig. 1 Experimental setup and schematic of soil column zoning

1. 马氏瓶进气口 2. 马氏瓶进水口 3. 马氏瓶 4. 止水夹 5. 乳胶管 6. PVC 软管 7. 土柱 8. 漏斗 9. 量筒

录淋溶结束时间。淋溶试验结束后,对土柱进行系统性切割与取样。操作时,先将土柱水平固定,用角磨机沿标记切开外部 PVC 管,再以削土刀平稳切削土壤,确保土壤剖面完整、表面平整。采用分层切割法,每层切取厚度为 8 cm 的水平土壤切片,自表层至底层共切割 5 层(图 1b)。每切取一层后,立即拍摄该层横向剖面图像,随后将土片均匀分为 3 部分,并依据预设的 9 个分区(图 1c 左下)分别采集染色与未染色土样。该层取样完成后,继续切取下一层,直至 5 层全部处理完毕。待所有水平层取样结束后,对土柱剩余部分拍摄完整的垂直剖面图像。各水平剖面的染色分布图通过拼接同层 3 个分块图像获得。最终,每根原状土柱共获取 2 幅垂直剖面图像和 5 幅水平剖面图像。按每层 9 个分区、每分区采集染色与未染色样品各 1 份计,单层样品数为 18 个,单柱累积获得 90 个土壤样品,用于后续土壤水分与盐分含量测定。土柱切割操作流程、水平剖面拼接示例及完整垂直剖面结果见图 1c。

1.3 数据处理

1.3.1 染色图像预处理

土壤垂直与水平染色模式分析有助于揭示其三维运移特征。垂直模式反映水分入渗过程的非均匀性与优先流特征,水平模式则弥补垂直剖面不足,揭示水分横向交换差异[17]。土壤垂直剖面染色处理过程如图 2 所示。将试验过程中获取的土壤水平剖面图像进行拼接及空间校正、垂直剖面进行空间校正后,使用 Adobe Photoshop 2024 的“调整亮度/饱和度”“替换颜色”“灰度”转换“阈值”与“反相”功能对两剖面图像进行预处理,获得黑色区域的优先流区和白色区域的基质流区。采用 Image Pro Plus 进行降噪处理(选用 2×2 Square,腐蚀 1 次和膨胀 1 次)[18],并通过 Matlab R2023b 获取不同区域所占像素点数以便对染色区域形态参数进行量化。

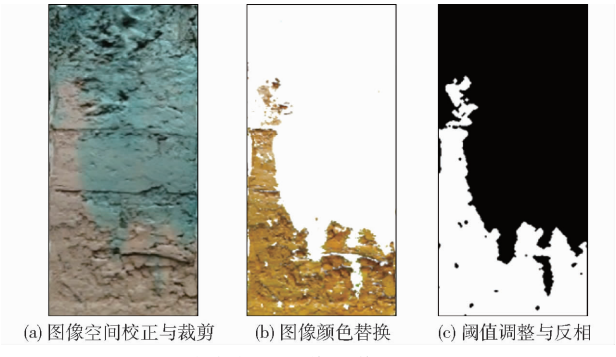

图 2 染色剖面图像二值化处理过程

Fig. 2 Binarization process of dyed soil profile image

1.3.2 测试指标与数据处理

试验结束后,将土样风干研磨过 2 mm 筛并取 30 g 于 250 mL 振荡瓶中,加入 150 mL 去离子水振荡 30 min。静置 30 min 后取上清液过滤收集 100 mL,使用 DDSJ-318 型电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司,精度 ±0.5%)测定电导率。采用干燥残渣法标定土壤含盐量(SS,g/kg)与电导率(EC,μS/cm)的关系,盐荒地为 $SS = 0.003\ 59EC$($R^2 = 0.99$),葵花地为 $SS = 0.004\ 38EC$($R^2 = 0.99$)。每层分区土样均采用烘干法测定土壤质量含水率。

(1)淋溶液含盐量与累积淋盐量

为量化单位体积水中携带的盐分,通过测定土壤淋溶液矿化度计算含盐量。取适量水样过滤除杂后置于蒸发皿中,在 180℃ 条件下干燥至恒定质量,称量后计算含盐量,计算式为

$$\rho = \frac{1\ 000(m_1 - m_0)}{V} \tag{1}$$

式中 ρ——淋溶液含盐量,g/L

m_0、m_1——蒸发皿质量、干燥后蒸发皿质量,g

V——水样体积，mL

累积淋盐量计算式为

$$D = W\rho \tag{2}$$

式中　D——累积淋盐量，g

W——累积出流量，L

（2）染色面积比及其变异系数

染色面积比为土壤染色区域面积与相应剖面总面积之比，能反映水文连通性在整个剖面的变化规律。通过剖面染色面积比衡量剖面水文连通性[19]。

土壤剖面染色面积比变异系数（CV）是衡量土壤垂直剖面中优先流引起的土壤高水文连通区面积与低水文连通区面积间差异的指标[20]，土壤剖面染色面积比变异系数越小，其优先流度越高[17]，剖面水文连通性程度越高[20]。本文以深度（mm）计算土层数，土壤垂直剖面对应土层染色面积比统计数为 10。

（3）基质流深度与优先流比

在土壤垂直剖面染色面积比随土壤层深度增加而变化降至 80% 时，该土层以上的土壤深度为基质流区域，该层所在深度为基质流深度（cm）[21]。优先流比是指在垂直剖面所有以优先流形式入渗的水流面积占剖面总面积比例[21]，优先流比越高则优先流发育程度越高。二者均为剖面水文连通性指标，其中优先流比计算式为

$$P_F = \left(1 - \frac{W_1 U_F}{D_T}\right) \times 100\% \tag{3}$$

式中　P_F——土壤优先流比，%

U_F——土壤剖面基质流深度，cm

W_1——剖面水平宽度，cm

D_T——土壤剖面染色区面积，cm^2

（4）长度指数

长度指数 L_i 是指在土壤垂直剖面连续 2 层之间染色面积比例差值绝对值之和，用以表征剖面水文连通性在不同土壤层次间分布的空间变异性[20]。计算式为

$$L_i = \sum_{i=1}^{n} |D_{C_{i+1}} - D_{C_i}| \tag{4}$$

式中　D_{C_i}、$D_{C_{i+1}}$——第 i 层、第 $i+1$ 层土壤染色面积比，%

n——剖面土壤层总层数，以每行像元间隔对垂直剖面进行划分

采用 Origin 进行数据可视化，Chiplot 工具进行相关性分析和 Mantel 检验。使用 SmartPLS 4 软件应用偏最小二乘法结构方程模型（PLS－SEM）分析剖面水文连通性、土壤淋溶特征与土壤水盐含量的影响路径。通过拟合优度指数（Goodness of fit，GOF，大于 0.36 表示整体拟合效果良好）以及标准化残差均方根（Standardized root mean square residual，SRMR，小于 0.08 表示模型与数据之间的拟合误差较小，模型拟合效果良好）反映模型拟合程度。

2　结果与分析

2.1　葵花地与盐荒地土壤的染色特征及其差异

2.1.1　土柱土壤垂直剖面染色形态

葵花地土柱与盐荒地土柱垂直土壤剖面染色路径形态如图 3（图中红色曲线为染色面积比随土壤深度的变化趋势，黑色区域为染色覆盖土壤区域，K1～K3 表示葵花地样土，Y1、Y2 表示盐荒地样土，下同）所示。葵花地土壤染色水流沿破碎交错连通的路径运移，表现出较高的土壤剖面水文连通性。相比之下，盐荒地土壤垂直剖面的染色面积比随土层深度呈单调递减趋势，上层土壤染色分布均匀且染色面积比在 80% 以上，表明土壤水流以基质流形式在土壤表层整体均匀下渗，随着深度增加，染色区域逐渐变窄并呈狭长条带状，下层土壤水文连通性较低。葵花地土壤垂直剖面平均染色面积比为 52.28%，是盐荒地土壤的 1.05 倍；葵花地土壤剖面平均染色面积比变异系数较小（0.11），为盐荒地土壤剖面的 55%，表明其优先流程度较高。葵花地土壤优先流比为 93.14%，是盐荒地土壤的 1.24 倍；葵花地与盐荒地土壤基质流深度占入渗深度比例分别为 6.88% 与 24.73%。葵花地与盐荒地土壤长度指数分别为 680.86% 与 415.26%，优先流长度指数越大表示其土壤水分运动的优先流现象越明显。

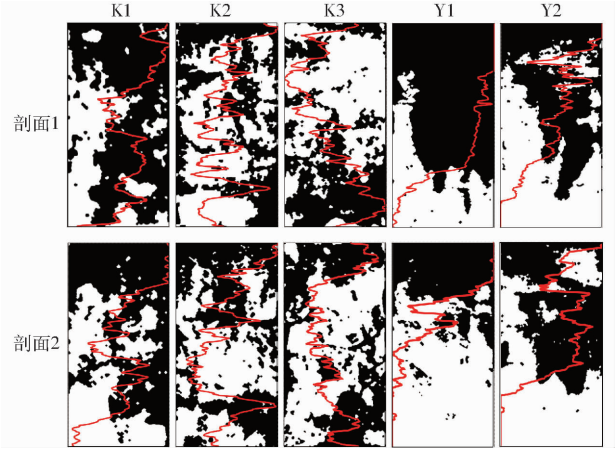

图 3　葵花地土柱与盐荒地土柱垂直土壤剖面染色路径形态

Fig. 3　Morphology of stained flow paths in vertical soil profiles of sunflower field and saline wasteland

2.1.2　土柱土壤水平剖面染色形态

葵花地土柱与盐荒地土柱土壤水平剖面染色路径形态如图 4 所示。葵花地土柱染色面积随土壤深

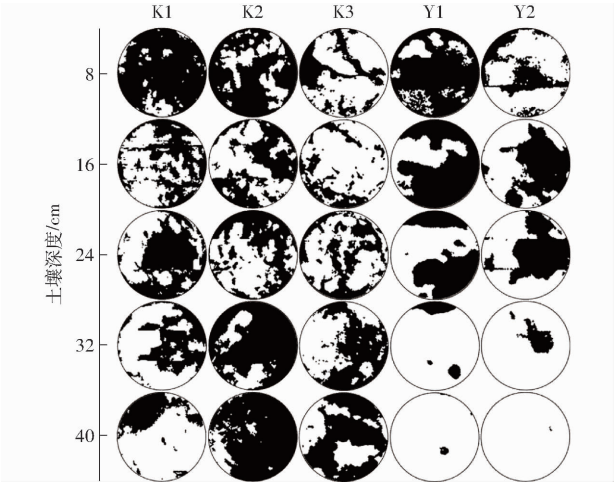

图 4 葵花地与盐荒地土壤水平剖面染色形态

Fig. 4 Dye-staining patterns of horizontal soil sections in sunflower fields and saline wastelands

度先减后增,分布较分散,呈零星斑块并形成交错连通网络;盐荒地土柱染色面积随土壤深度减少,染色集中且主要分布于土壤上层。葵花地水平剖面平均染色面积比为 54.17%,是盐荒地的 1.56 倍,表明其优先流发育程度更强。

2.2 土壤水盐淋溶变化

葵花地土柱与盐荒地土柱在水流入渗过程的累积出流量与出流流速如图 5 所示。葵花地土柱出流流速先增加再下降,盐荒地出流流速先下降后长期趋于稳定再下降。葵花地土柱累积出流量与出流流速均值分别为 125.54 mm 与 0.38 mm/min,较盐荒地土柱高 8.76% 与 15.94 倍。葵花地与盐荒地土柱开始出流时间与出流历时均不相同。前者平均入渗 45.33 min 后出流,较后者开始出流时间快 68.32%;前者出流历时平均为 10.83 h,比后者缩短 88.95%。表明葵花地土柱出流更迅速且水分流动更集中,可能存在更多的优先流通道。

葵花地与盐荒地土柱入渗过程形成的累积淋盐量与淋溶液含盐量如图 6 所示。盐荒地土柱累积淋盐量与淋溶液含盐量均大于葵花地。葵花地与盐荒地土柱淋溶液含盐量呈先增加后减少趋势,且在地表积水消失后,含盐量出现短暂回升。盐荒地土柱累积淋盐量与淋溶液含盐量均值分别为218.96 g、66.20 g/L,相较之下,葵花地土柱分别降低 83.08% 和 78.32%。

2.3 土壤优先流区和基质流区剖面水盐分布特征

2.3.1 土壤含水率分布特征

葵花地与盐荒地土柱土壤剖面含水率分布特征如图 7(左图气泡大小与土壤含水率成正比)所示。小提琴图直观地呈现数据分布,图中黑线与虚线分别表示中位数与均值。整体来看,优先流区和基质

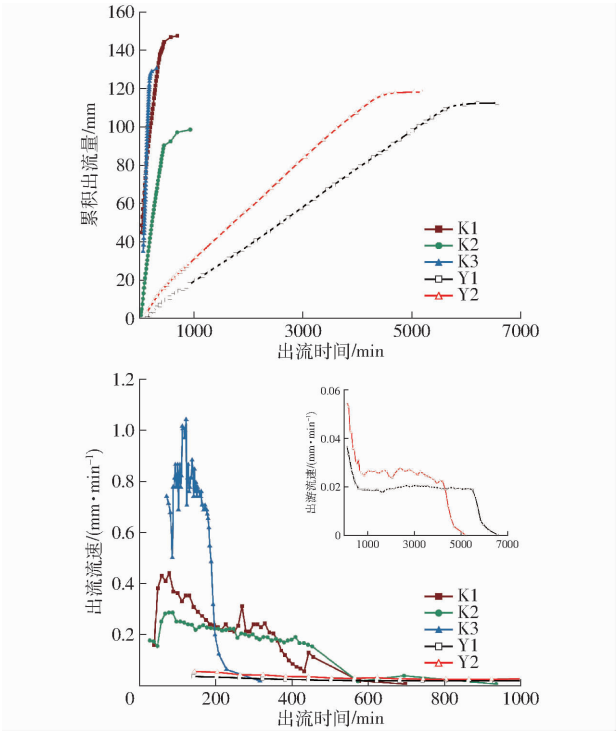

图 5 葵花地与盐荒地累积出流量与出流流速变化曲线

Fig. 5 Cumulative outflow and outflow rate between sunflower field and saline wasteland

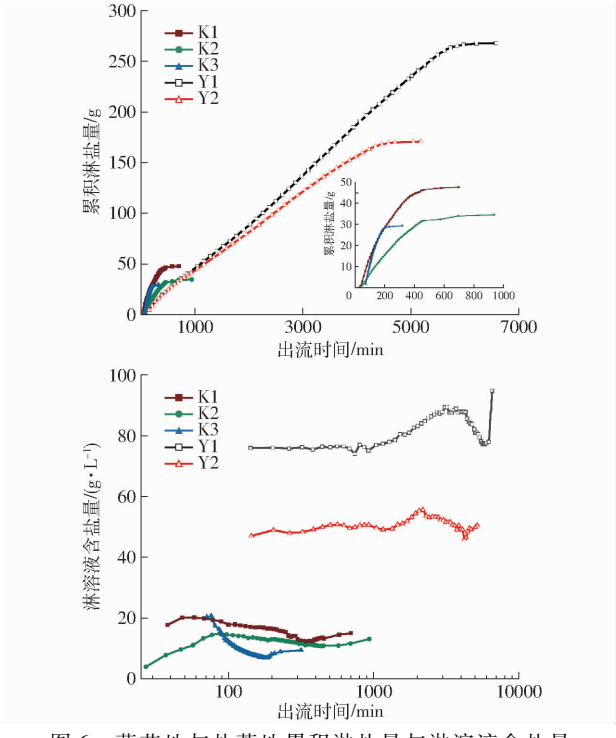

图 6 葵花地与盐荒地累积淋盐量与淋溶液含盐量变化曲线

Fig. 6 Cumulative leached salt and leachate salt concentration in sunflower field and saline wasteland

流区土壤含水率均随土层深度先下降后上升,且优先流区含水率峰值高于基质流区,其分布范围较广(23.65% ~ 40.87%),说明优先流区水分运移活跃,可能存在明显的优先流路径。从土地利用方式

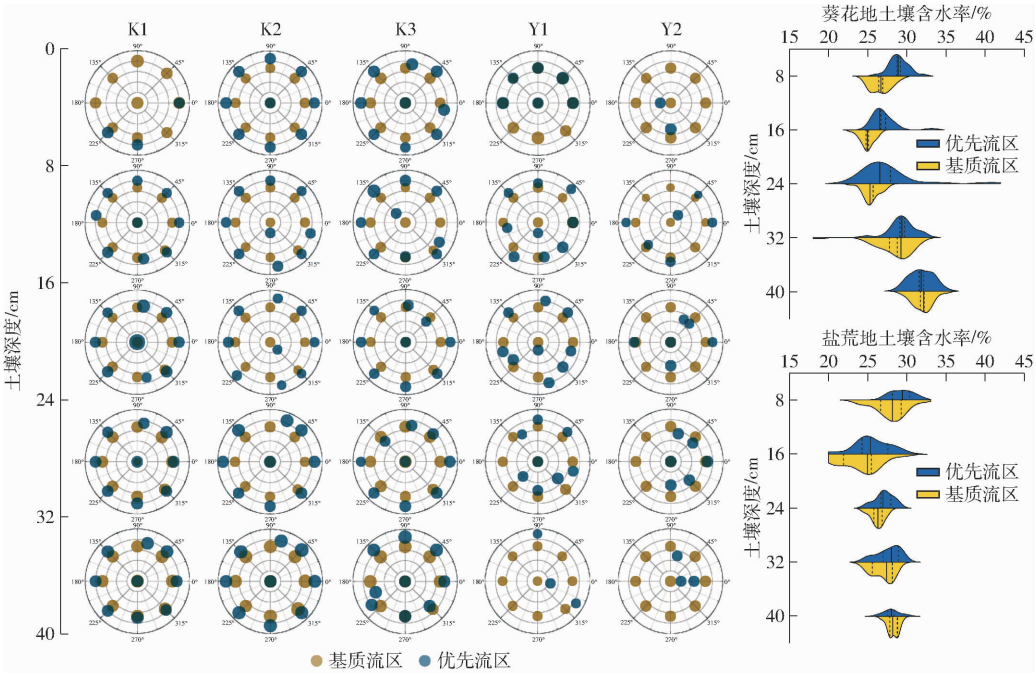

图 7　葵花地土柱与盐荒地土柱土壤水平面优先流区与基质流区含水率分布

Fig. 7　Distribution of water content in preferential flow and matrix domains on horizontal planes of sunflower field and saline wasteland

看，葵花地与盐荒地土壤平均含水率分别为 28.19% 与 27.08%。从土壤分区来看，2 类土柱土壤优先流区含水率均值为 28.31%，高于基质流区 4.16%，该差异出现频率为 72.99%，进一步证实优先流现象在剖面水分分布中具有普遍影响。其中，葵花地土壤优先流区平均含水率为 28.91%，较基质流区增加 5.15%；而盐荒地中该增幅仅为 2.64%（优先流区均值 27.43%），说明葵花地中优先流路径更为发育。整体而言，优先流区在水分快速传导中发挥主导作用，有助于提升水分利用效率并保障作物根系的均衡供水。

2.3.2　土壤含盐量分布特征

葵花地与盐荒地土柱土壤剖面含盐量分布特征如图 8（左图气泡大小与土壤含盐量成正比）所示。整体上，土壤基质流区含盐量峰值大于优先流区，前者数据分布较为广泛（1.31 ~ 23.80 g/kg），后者数

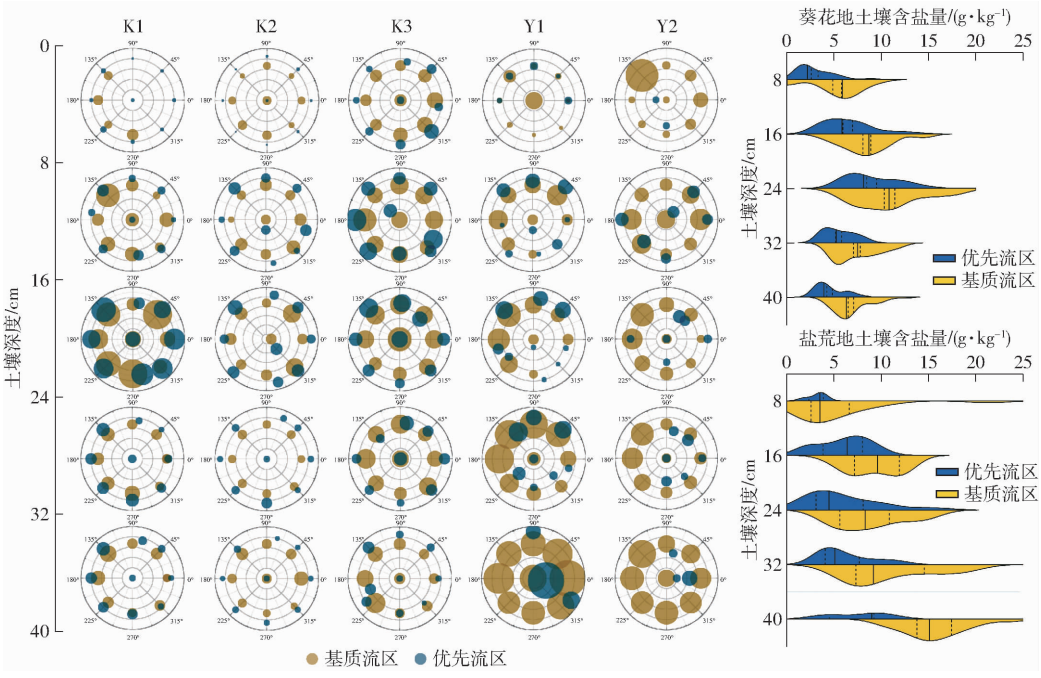

图 8　葵花地土柱与盐荒地土柱土壤水平面优先流区与基质流区含盐量分布

Fig. 8　Distribution of salt content in preferential flow and matrix domains on horizontal planes of sunflower field and saline wasteland

据分布相对集中(0.71 ~ 15.45 g/kg),说明盐分随水分更易沿优先流路径向下迁移,导致其含盐量低且变异较小。从剖面分布来看,葵花地土壤含盐量沿剖面深度先递增后递减,盐荒地土壤剖面含盐量随深度递增。从土地利用类型看,葵花地土壤淋溶后平均含盐量为 6.60 g/kg,低于盐荒地 22.72%。从土壤分区来看,2 类土柱土壤优先流区含盐量均值为 5.83 g/kg,较基质流区低 33.38%,该差异出现的频率达 89.38%。具体而言,葵花地土壤优先流区含盐量均值为 5.66 g/kg,低于基质流区 24.63%;相比之下,盐荒地土壤优先流区含盐量均值为 6.00 g/kg,低于基质流区 39.95%。综上,盐分随水分沿优先流路径运移,有效减少土壤盐分累积,起到调控土壤盐分的作用。

2.4 土壤剖面水盐分布、入渗与淋洗特征及其与剖面水文连通性关系

土壤淋溶特征、土壤水盐含量与剖面水文连通性指标的 Spearman 相关性如图 9 所示,图中 CO 为累积出流量(Cumulative outflow),OST 为开始出流时间(Onset time of outflow),OD 为出流历时(Outflow duration),CLS 为累积淋盐量(Cumulative leached salt),LSC 为淋溶液含盐量(Leachate salt concentration),MWC 为基质流区含水率(Matrix water content),PWC 为优先流区含水率(Preferential flow water wontent),MSC 为基质流区含盐量(Matrix salt content),PSC 为优先流区含盐量(Preferential flow salt content),VPDC 为纵剖面染色面积比(Vertical profile dye coverage),HPDC 为横剖面染色面积比(Horizontal profile dye coverage),* 表示差异显著($0.01 < P \leqslant 0.05$),** 表示差异较显著($0.001 < P \leqslant 0.01$),*** 表示差异极显著($P < 0.001$),下同。通过染色面积比及其变异系数、基质流深度与优先流比和长度指数表征土壤剖面水文连通性,较大染色面积比和较小变异系数表明较高的剖面水文连通性[19-20]。土壤优先流区含水率与土壤基质流区含盐量以及优先流区含盐量呈显著负相关($0.01 < P \leqslant 0.05$)。土壤基质流深度与出流历时、累积淋盐量和淋溶液含盐量呈极显著正相关($P < 0.001$),与开始出流时间呈较显著正相关($0.001 < P \leqslant 0.01$);优先流比与累积出流量($0.001 < P \leqslant 0.01$)和优先流区含盐量($0.01 < P \leqslant 0.05$)呈显著正相关。结果表明,更高的剖面水文连通性显著促进水分快速下渗和盐分垂向运移,增加土壤剖面含水率并降低含盐量。

为阐明土壤水盐含量、土壤淋溶特征与剖面水文连通性指标之间的复杂关系,建立结构方程PLS-SEM 模型,如图 10 所示,CV-VPDC 为纵剖面染色面积比变异系数,单实线箭头和单虚线箭头分别表示显著影响和不显著影响,箭头线上数字表示标准化路径系数。该模型拟合优度 GOF 为 0.61 > 0.36,标准化残差均方根 SRMR 为 0.076 < 0.080,表明模型具有良好的解释力与适配性。剖面水文连通性对土壤水盐含量具有显著直接效应,可提高土壤含水率(路径系数为 0.37,$0.001 < P \leqslant 0.01$),并降低土壤含盐量(路径系数为 -0.73,$P < 0.001$)。剖面水文连通性还可通过显著影响淋溶特征(路径系数为 -0.40,$0.01 < P \leqslant 0.05$),进而显著影响土壤含水率(路径系数为 0.70,$P < 0.001$),或影响土壤含盐量(路径系数为 -0.02)。

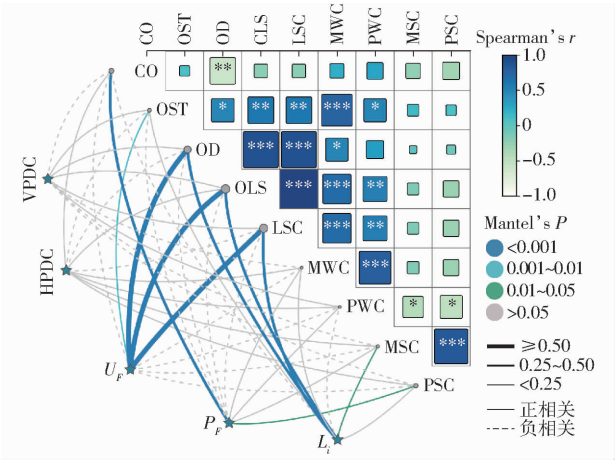

图 9 土壤剖面水盐含量、土壤淋溶特征与剖面水文连通性指标的 Spearman 相关性

Fig. 9 Spearman correlation among soil profile water-salt content, leaching characteristics, and hydrological connectivity indicators of soil profile

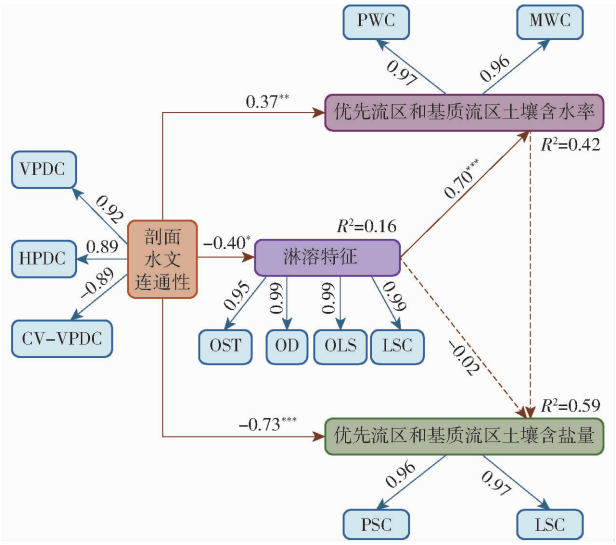

图 10 土壤剖面水盐含量、土壤淋溶特征与剖面水文连通性的结构方程模型分析

Fig. 10 Structural equation model analysis of soil water-salt characteristics and profile hydrological connectivity

3　讨论

3.1　土壤水盐淋溶动态变化

土壤大孔隙分布特征是影响土壤入渗的关键因子[22]，其中大孔隙在维持垂直水分运动及其连通性方面发挥至关重要的作用[14]，并主导水盐淋溶规律在不同阶段的差异。初始入渗阶段，孔径较大的大孔隙排出土壤空气，削弱气压阻滞，增加了水分侧向渗透和垂直下渗能力；小孔径孔隙因气体易被水包围而形成封闭气泡阻碍孔隙水流动[23]，致使基质流区水分缓慢下渗。接着，水分由大孔隙通道首先出流，基质流区则滞后排出。葵花地因耕作增加裂隙和较多根系通道[21,24]，使得水分入渗主要通过纵横交错的大孔隙与裂隙。本研究葵花地染色面积比与优先流比均大于盐荒地且染色面积比变异系数为盐荒地的 55%，表明葵花地可能由于存在较多优先流通道，从而具有较高的剖面水文连通性。剖面水文连通性指标（基质流深度）与出流历时和开始出流时间呈显著正相关，表明基质流深度越大，水分出流时间与出流历时越长。盐荒地基质流深度为葵花地的 3.61 倍，这可能与盐荒地土壤紧密质地、较高容重（1.42 g/cm^3）和土壤剖面中大孔隙的整体垂向连通性有关。盐荒地土壤容重较高且未受耕作干扰，其盐生植物根系直径更大、数量更少[25-27]，水分入渗虽依赖土壤上层根系主导的大孔隙，但由于下层土壤大孔隙较少，部分水分仍通过基质流区土壤入渗，导致基质流深度较大且下层土壤染色面积减小，土壤剖面水文连通性较低，因此开始出流时间与出流历时比葵花地高 2.16、8.05 倍。

水分入渗与运移驱动下，土壤剖面盐分的溶解与运移过程也表现出明显差异。土壤基质流深度与累积淋盐量和淋溶液含盐量呈极显著正相关。葵花地土壤基质流深度较盐荒地小，可能与葵花地土壤存在较多交错连通的大孔隙与裂隙有关。葵花地土壤剖面的大孔隙整体垂向连通性较强，水分主要通过存在于优先流区土壤中较多的大孔隙和裂隙快速下渗，从而导致基质流深度较小，溶盐量相对减少，同时较低的初始含盐量亦在一定程度上解释了其溶盐量较盐荒地低。葵花地染色面积比大于盐荒地，且土壤孔隙度与染色面积比之间存在显著正相关关系[28]，进一步证实了葵花地土壤大孔隙较多，染色面积比较大，导致剖面水文连通性与优先流发育程度较高，水分入渗较快导致溶盐相对不充分，因此葵花地累积淋盐量、淋溶液含盐量减少 83.08% 和 78.32%。在整个淋溶过程最后阶段，土柱上表面水头降为 0 后，土壤表层与大气接触导致大孔隙残余水分迅速排出[23]，而基质流区仍以缓慢出流为主[29]，从而使两处理淋溶液盐分均出现回升。

3.2　土壤水盐空间分布变化

水流通过土壤大孔隙携带溶质运移，对土壤水盐空间分布产生影响[30-31]。染色示踪可直观表征土壤水分运移轨迹[32]，并据此将土壤划分为基质流区和优先流区[33]。入渗淋溶过程中，水分绕过土壤基质流区，沿优先流路径快速穿透土壤，优先流区水流运移量和发生概率高于基质流区[34-35]，导致淋溶后土壤优先流区含水率高于基质流区。土石山区林地由于较强的土壤蒸发作用，染色后优先流区含水率平均减少 20.14% 且基质流区平均含水率变化不明显[33]，以及本研究通过覆盖塑料膜减少蒸发损失的条件下，淋洗后优先流区含水率高于基质流区 4.16%，进一步佐证了优先流区为水分空间传输的核心区。本研究葵花地平均含水率与染色面积比随深度变化一致，且结构方程模型显示，剖面水文连通性对土壤含水率具有直接显著正效应（路径系数为 0.37），表明水分由较多的优先流通道下渗，增强了土壤剖面水文连通性，从而提高优先流区土壤含水率；盐荒地染色面积比随土壤深度递减，含水率先减后增，可能源于其下层土壤大孔隙连通性较低，优先流区水分渗出受限，导致水分滞留时间延长从而提高下层土壤含水率。

本研究表明，土壤优先流区含水率与含盐量呈显著负相关，即淋溶后优先流区含盐量普遍低于基质流区，说明水流沿优先流路径快速运移，显著改变并驱动土壤剖面盐分分布的演变[36]，从而导致优先流区土壤含盐量减少。结构方程模型显示，剖面水文连通性对土壤含盐量表现出直接显著负效应（路径系数为 -0.73）。较多且连续的优先流路径增强了剖面水文连通性，从而加速水分下渗和盐分运移，尽管水盐接触时间缩短导致溶盐效率降低，但水分的快速流动及较强的剖面水文连通性仍有效带走土壤盐分。葵花地土壤黏粒含量（12.29%）略高于盐荒地（8.69%），促进优先流发育[25]，且水分携带盐分主要依赖垂向贯通性较好的裂隙和较多交错连通的大孔隙快速下渗[37-38]，盐分通过这些数量较多、连续性较强的优先流路径运移，提高土壤剖面水文连通性，虽部分盐分运移至土壤中部时淋溶结束导致中部土壤含盐量较高，但优先流区的土壤盐分仍能被淋洗带走，因此优先流区土壤含盐量低于基质流区。相比之下，盐荒地土壤大孔隙数量较少，剖面水文连通性较低且水分流动速度较慢，虽然基质流区水流与盐分充分溶解，溶盐效率较高，但下层土壤

大孔隙连通性较差导致盐分排出受限,因此盐荒地基质流区下层土壤含盐量相对较高。

4 结论

(1)原状土柱染色淋溶试验结果表明,葵花地土壤优先流发育程度与剖面水文连通性较盐荒地强,前者土壤水平剖面染色面积比为后者的 1.56 倍,垂直剖面染色面积比为后者的 1.05 倍,染色面积比变异系数为后者的 55%,染色通道细碎,后者染色集中于上层,呈狭长条带状。

(2)葵花地与盐荒地的水盐淋溶过程差异明显,与盐荒地相比,葵花地累积出流量增加 8.76%,开始出流时间提前 68.32%,出流历时缩短 88.95%,累积淋盐量和淋溶液含盐量减少 83.08% 和 78.32%。

(3)淋溶后土壤优先流区与基质流区水盐含量差异明显,优先流区土壤含水率均值较基质流区高 4.16%,含盐量较基质流区低 33.38%,发生频率分别为 72.99% 和 89.38%。剖面水文连通性对土壤水盐含量具有显著调控作用,可直接影响优先流区和基质流区盐分分布,亦可通过改变淋溶特征间接影响优先流区和基质流区水分分布。

参 考 文 献

[1] 赵作章, 陈劲松, 彭尔瑞, 等. 土壤盐渍化及治理研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2023(6): 202 - 208.
ZHAO Zuozhang, CHEN Jinsong, PENG Errui, et al. Research progress on soil salinization and management[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(6): 202 - 208. (in Chinese)

[2] NACHSHON U. Cropland soil salinization and associated hydrology: trends, processes and examples[J]. Water, 2018, 10(8): 1030.

[3] 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.
YANG Jinsong, YAO Rongjiang, WANG Xiangping, et al. Research on salt-affected soils in China: history, status quo and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 10 - 27. (in Chinese)

[4] 周虎, 吕贻忠, 李保国. 土壤结构定量化研究进展[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 501 - 506.
ZHOU Hu, LÜ Yizhong, LI Baoguo. Advancement in the study on quantification of soil structure[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(3): 501 - 506. (in Chinese)

[5] JARVIS N. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. European Journal of Soil Science, 2020, 71(3): 279 - 302.

[6] 高朝侠, 徐学选, 赵娇娜, 等. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2801 - 2811.
GAO Chaoxia, XU Xuexuan, ZHAO Jiaona, et al. Review on macropore flow in soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 2801 - 2811. (in Chinese)

[7] GUO L, LIN H. Addressing two bottlenecks to advance the understanding of preferential flow in soils[J]. Advances in Agronomy, 2018, 147: 61 - 117.

[8] 陈力, 顾迎春, 杨柳, 等. 土壤大孔隙流研究进展与展望[J]. 农业环境科学学报, 2026, 45(1): 23 - 32.
CHEN Li, GU Yingchun, YANG Liu, et al. Research progress and prospect of soil macropore flow[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2026, 45(1): 23 - 32. (in Chinese)

[9] 张中彬, 彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 477 - 488.
ZHANG Zhongbin, PENG Xinhua. A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 477 - 488. (in Chinese)

[10] ALLAIRE S, ROULIER S, CESSNA A. Quantifying preferential flow in soils: a review of different techniques[J]. Journal of Hydrology, 2009, 378(1 - 2): 179 - 204.

[11] 王发, 付智勇, 陈洪松, 等. 喀斯特洼地退耕和耕作土壤优先流特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 111 - 116.
WANG Fa, FU Zhiyong, CHEN Hongsong, et al. Characteristics of preferential flow in soil of abandoned farmland and cultivated land of Karst depression[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 111 - 116. (in Chinese)

[12] 褚琳琳, 黄荣玉, 赵燕, 等. 低山丘陵区不同土地利用方式田内-田埂土壤优先流特征[J]. 农业工程学报, 2023, 39(4): 115 - 123.
CHU Linlin, HUANG Rongyu, ZHAO Yan, et al. Characteristics of preferential flow dyeing morphology in the field - ridge transition zone of different land use types in low mountainous and hilly areas[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(4): 115 - 123. (in Chinese)

[13] 郑思宇, 许迪, 焦平金, 等. 土地利用类型对内蒙古盐碱地土壤大孔隙特征的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(11): 71 - 79.
ZHENG Siyu, XU Di, JIAO Pingjin, et al. Effects of land use types on the macropore characteristics of saline-alkali soil in Inner Mongolia Region of China[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(11): 71 - 79. (in Chinese)

[14] DU Yingni, WEI Yujie, WANG Yundong, et al. Impact of land use conversion patterns on vertical hydrological connectivity in intensive orchards[J]. Soil & Tillage Research, 2025, 253: 106631.

[15] 梁建财. 地面覆盖对盐渍土壤水热盐运移及作物生长调控机制研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2015:11 - 17.
LIANG Jiancai. Study on regulation mechanism of soil water-heat-salt transfer and crop growth with surface mulching in the salinized soil[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015:11 - 17. (in Chinese)

[16] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 1 - 17.
SHI Haibin, YANG Shuqing, LI Ruiping, et al. Soil water and salt movement and soil salinization control in Hetao Irrigation District: current state and future prospect[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 1 - 17. (in Chinese)

[17] 吴庆华, 张家发, 蔺文静, 等. 土壤水流模式染色剂示踪及优先流程度评估[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 82 - 90.
WU Qinghua, ZHANG Jiafa, LIN Wenjing, et al. Appling dyeing tracer to investigate patterns of soil water flow and quantify

preferential flow in soil columns[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 82 – 90. (in Chinese)
[18] 韩巧玲, 柏浩, 赵玥, 等. 采用染色示踪技术的土壤优先流自动分割与量化系统[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 127 – 134.
HAN Qiaoling, BAI Hao, ZHAO Yue, et al. Automatic segmentation and quantitative analysis of soil preferential flow using dye tracer technology[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(6): 127 – 134. (in Chinese)
[19] DAI Liyi, ZHANG Yinghu, LIU Ying, et al. Thick roots and less microaggregates improve hydrological connectivity[J]. Chemosphere, 2020, 266: 129008.
[20] 陈雨薇. 植物根系对剖面水文连通性的影响——以三峡库区紫色土为例[D]. 武汉:华中农业大学, 2022.
CHEN Yuwei. Influence of root on hydrological connectivity of profiles:a study of purple soils in the Three Gorges Reservoir Region[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[21] SCHAIK V. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed[J]. Catena, 2009, 78(1): 36 – 47.
[22] 敖家坤, 牛健植, 谢宝元, 等. 土壤大孔隙结构对饱和导水率的影响[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(2): 102 – 112.
AO Jiakun, NIU Jianzhi, XIE Baoyuan, et al. Influence of soil macropore structure on saturated hydraulic conductivity[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(2): 102 – 112. (in Chinese)
[23] 张宏媛, 逄焕成, 宋佳珅, 等. 亚表层有机培肥调控盐渍土孔隙结构与水盐运移机制[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 355 – 364.
ZHANG Hongyuan, PANG Huancheng, SONG Jiashen, et al. Effects of pore structure and water-salt movement for saline soil under subsurface organic amendment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 355 – 364. (in Chinese)
[24] 张勇勇, 利来, 赵文智, 等. 荒漠绿洲土壤优先流研究进展[J]. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1189 – 1195.
ZHANG Yongyong, LI Lai, ZHAO Wenzhi, et al. A review of researches on preferential flow in desert-oasis region[J]. Chinese Journal of Desert Research, 2017, 37(6): 1189 – 1195. (in Chinese)
[25] KOESTEL J, MOEYS J, JARVIS N. Meta-analysis of the effects of soil properties, site factors and experimental conditions on solute transport[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(6): 1647 – 1665.
[26] 孙贯芳, 翟明飞, 王春语, 等. 河套灌区根系层-深层土壤盐分动态及适宜控盐埋深[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 91 – 100.
SUN Guanfang, ZHAI Mingfei, WANG Chunyu, et al. Root zone and deep soil salinity dynamics and suitable groundwater depth for salt control in the Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(21): 91 – 100. (in Chinese)
[27] 贾鲜艳, 吴宏宇, 李霞, 等. 河套灌区盐碱地植物种类组成研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2006, 27(4): 78 – 82.
JIA Xianyan, WU Hongyu, LI Xia, et al. Study on floristic component of saline-alkali land in Hetao Irrigation Region[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2006, 27(4): 78 – 82. (in Chinese)
[28] ZHANG Yinghu, TANG Zhiying, ZHANG Jinchi, et al. Visualizing preferential flow paths using dye tracer and species diversity theory methods to explore their correlation to soil properties with random forest algorithm[J]. Journal of Hydrology, 2024, 638: 131570.
[29] 段正宇, 朱成立, 车子刚, 等. 秸秆还田下土壤孔隙演化及其对溶质穿透特征的影响机理分析[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 312 – 326.
DUAN Zhengyu, ZHU Chengli, CHE Zigang, et al. Soil pore evolution and effects on solute transport with straw application [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 312 – 326. (in Chinese)
[30] MEI X, ZHU Q, MA L, et al. Effect of stand origin and slope position on infiltration pattern and preferential flow on a loess hillslope[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(5): 1353 – 1365.
[31] SHENG F, LIU H, WANG K, et al. Investigation into preferential flow in natural unsaturated soils with field multiple-tracer infiltration experiments and the active region model[J]. Journal of Hydrology, 2014, 508: 137 – 146.
[32] 王在敏, 靳孟贵, 何雨江, 等. 基于染色示踪的膜下滴灌棉田水盐运移规律[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2012, 37(5): 1093 – 1100.
WANG Zaimin, JIN Menggui, HE Yujiang, et al. Water flow and salt transport in cotton field of mulched drip-irrigated using dye tracer[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2012, 37(5): 1093 – 1100. (in Chinese)
[33] 杜晓晴, 牛健植, 侯琨, 等. 华北土石山区优先流区与基质流区土壤特性分析[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(3): 51 – 57.
DU Xiaoqing, NIU Jianzhi, HOU Kun, et al. Soil characteristics of preferential flow area and matrix flow area in Rocky Mountain Area of Northern China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(3): 51 – 57. (in Chinese)
[34] BEVEN K, GERMANN P. Macropores and water flow in soils[J]. Water Resources Research, 1982, 18(5): 1311 – 1325.
[35] 牛健植, 余新晓, 张志强. 贡嘎山暗针叶林生态系统土壤优先流研究初探[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(增刊2): 246 – 254.
NIU Jianzhi, YU Xinxiao, ZHANG Zhiqiang. Soil preferential flow in the dark coniferous forest ecosystem of Gongga Mountain, Sichuan Province of southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(Supp. 2): 246 – 254. (in Chinese)
[36] 盛丰, 文鼎, 熊祎玮, 等. 基于电阻率层析成像技术的农田土壤优先流原位动态监测[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 117 – 124.
SHENG Feng, WEN Ding, XIONG Yiwei, et al. In-situ monitoring of preferential soil water flow with electrical resistivity tomography technology[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(8): 117 – 124. (in Chinese)
[37] GE Jiamin, SHE Dongli, JU Xinni, et al. Characterization of preferential flow and transport pathways under farmland with different land uses[J]. Soil & Tillage Research, 2025, 252: 106573.
[38] LIAO Yuliang, PAN Tiansen, DENG Yingying, et al. Comparing of soil matrix infiltration and preferential flow across different land use types in Karst landscapes: implications for soil and water conservation[J]. Catena, 2025, 256: 109127.