

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2024.05.034

高素素, 陈继虹, 李王成, 等. 掺砂量对中度盐碱土壤水力特性及溶质运移过程的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 374-384.

GAO Susu, CHEN Jihong, LI Wangcheng, et al. Effect of sand incorporation on hydraulic properties and solute transport processes in moderately saline soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 374-384.

掺砂量对中度盐碱土壤水力特性及溶质运移过程的影响

高素素¹, 陈继虹¹, 李王成^{1,2,3,4}, 牛宵宵¹,
贾振江¹, 吴洋洋¹, 马东祥¹, 吕航¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021; 3. 省部共建西北土地退化与生态恢复国家重点实验室, 银川 750021;
4. 宁夏回族自治区黄河水联网数字治水重点实验室, 银川 750021)

摘要: [目的] 为探究不同掺砂量对中度盐碱土壤水力特性和溶质运移过程的影响。[方法] 采用室内土柱试验, 设置 4 种掺砂比例 CK(掺砂 0%)、B1(掺砂 10%)、B2(掺砂 15%)、B3(掺砂 20%), 研究中度盐碱土壤在不同掺砂量条件下的土壤水力特性和溶质运移过程变化规律并进行模型模拟。[结果] (1) 掺砂量在 0~20% 内, 中度盐碱土掺砂明显影响土壤水分特征曲线变化, 掺砂比例越大, 曲线越靠近 Y 轴。在任一吸力条件下土壤含水率表现为 CK>B1>B2>B3。且掺砂比例越大, 土壤小孔隙数量越多, 微小孔隙减少, 土壤持水性能减弱。土壤的饱和导水率随掺砂量的增加而增大。(2) 随掺砂量的增加, 溶质穿透曲线明显左移, 初始穿透时间、完全穿透时间及穿透总历时均减少, B1、B2、B3 处理总穿透历时分别比 CK 减少 34.48%, 47.22%, 69.71%。(3) CED 方程和两区模型均能较好地模拟掺砂条件下土壤中溶质运移状况, 但相较于 CDE 方程, 两区模型的拟合精度更高。对两区模型拟合参数进行分析发现, 随掺砂量的增加, 土壤孔隙流速、可动区含水比率和质量交换系数逐渐增大, 而水动力弥散系数和弥散度呈减小趋势。[结论] 盐碱土掺砂能够有效改善土壤水力特性, 促进溶质在土壤中运移, 有助于缓解盐碱对作物生长的不利影响。研究结果可为盐碱土改良与治理工作提供参考, 为未来的研究和实践提供理论支持和实践指导。

关键词: 土壤水分特征曲线; 溶质运移; 穿透曲线; CDE 方程; 两区模型

中图分类号: S153.5 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242-(2024)05-0374-11

Effect of Sand Incorporation on Hydraulic Properties and Solute Transport Processes in Moderately Saline Soils

GAO Susu¹, CHEN Jihong¹, LI Wangcheng^{1,2,3,4}, NIU Xiaoxiao¹, JIA Zhenjiang¹,
WU Yangyang¹, MA Dongxiang¹, LÜ Hang¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 3. State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Yinchuan 750021, China; 4. Key Laboratory of the Internet of Water and Digital Water Governance of the Yellow River in Ningxia, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of different sand blending rates on the hydraulic properties and solute transport processes of moderately saline soils. [Methods] Four sand mixture ratios were established using an indoor soil column test: CK (0 sand mixing), B1 (10% sand mixing), B2 (15% sand mixing), and B3 (20% sand mixing), to investigate the solute transport characteristics of moderately saline soils under

收稿日期: 2024-04-22 修回日期: 2024-06-24 录用日期: 2024-07-15 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-09-04

资助项目: 清华大学—宁夏银川水联网数字治水联合研究院项目 (sklhse-2023-Iow013); 国家自然科学基金项目 (52169010); 国家重点研发计划项目 (2021YFD1900600); 宁夏自然科学基金重点项目 (2021AAC02008); 宁夏重点研发计划项目 (2019BEH03010); 宁夏高等学校一流学科建设项目 (NXYLXK2021A03); 宁夏大学研究生创新项目 (CXXM2022-18)

第一作者: 高素素 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事水资源高效利用研究。E-mail: 1859555436@163.com

通信作者: 李王成 (1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail: liwangcheng@126.com

different sand mixing conditions and to perform model simulations. [Results] (1) In the range of 0~20%, sand mixing in moderately saline soil will obviously affect the change of soil moisture characteristic curve, and the larger the proportion of sand mixing, the closer the curve is to the Y-axis. Under any suction condition, the soil water content was ranked as $CK > B1 > B2 > B3$, and the larger the proportion of sand mixing, the more small pores in the soil, the reduction of small pores, and the weakening of soil water-holding properties. The saturated hydraulic conductivity of the soil increased with the increase of sand doping. (2) With the increase of sand doping, the solute penetration curve shifted significantly to the left, and the initial penetration time, complete penetration time, and total penetration time were reduced, and the total penetration time of B1, B2, and B3 treatments were reduced by 34.48%, 47.22%, and 69.71%, respectively, compared with that of CK. (3) Both the CED equation and the two-zone model can simulate the solute transport in soil under sand doping conditions well, but the fitting accuracy of the two-zone model is higher compared with the CDE equation. Analyses of the fitted parameters of the two-zone model showed that the soil pore flow rate, the water content ratio of the movable zone and the mass exchange coefficient gradually increased with the increase of sand doping, while the hydrodynamic dispersion coefficient and the dispersion degree showed a decreasing trend. [Conclusion] Therefore, sand blending in saline soils can effectively improve soil hydraulic properties, promote solute transport in the soil, and help alleviate the adverse effects of salinity on crop growth. The results of this study can provide reference for saline soil improvement and management work, and provide theoretical support and practical guidance for future research and practice.

Keywords: soil water characteristic; solute transport; breakthrough curve; convection dispersion equation; two-region model

Received: 2024-04-22

Revised: 2024-06-24

Accepted: 2024-07-15

Online(www.cnki.net): 2024-09-04

土壤是人类赖以生存的宝贵资源,但随着社会经济的快速发展,土壤盐碱化问题日益严重,已成为制约全球农业可持续发展的重要因素之一,并受到国内外相关学者^[1-2]重点关注。目前,全球盐碱土总面积约为 $1.1 \times 10^9 \text{ hm}^2$,我国盐碱土总面积约为 $3.69 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占全国可利用土地面积的 4.88%,主要分布在东北、西北及滨海地区,此外,仍有大量土地存在盐碱化风险^[3-5]。土壤盐碱化是自然因素和人类活动共同作用的结果,而盐碱化土壤盐分含量过高,土体结构松散,养分有效性较低,导致作物的生长发育严重受限。因此,开展盐碱地治理与综合利用,是补充耕地后备资源,提高农业综合生产能力的重要途径,对于保障国家粮食安全,端牢中国饭碗具有重要战略意义。

目前,国内外在盐碱地改良方面的措施主要包括水利工程措施、生物措施、化学措施及物理措施等^[6-7]。其中,农田表层土壤掺砂是一种经济实用的土壤改良方法,通过优化土壤的物理性质来提升土地的生产力^[8]。这种方法能够优化土壤团粒结构,增加有效孔隙度,从而提高土壤的通透性,增强水分入渗性能,提高盐分的淋洗效率,有效降低耕层土壤的盐分储量,改善作物的生长环境,提高产量,为农业生产

带来显著的经济效益^[9]。宋日权等^[10]研究发现,土壤掺砂能够提高土壤入渗能力,增大掺砂层以下的土壤含水率,抑制土壤水分蒸发和表层积盐;蔺亚莉等^[11]研究表明,盐碱土掺砂可以改变土壤机械组成和土壤质地,降低土壤全盐量和碱化度,从而改善作物生长环境,提高玉米产量;MIAO等^[12]对河套灌区重度盐碱土进行掺砂改良发现,适当掺砂可以增加土壤水分入渗能力,同时能够保证土壤的脱盐能力和持水能力。由此可知,表层土壤适量掺砂可以起到保水托肥的作用,从而提高土壤水分和养分的利用率,并对农田土壤次生盐渍化有较好的防治效果。

综上,关于掺砂改良盐碱土壤的研究取得显著进展,但主要集中在如何通过掺砂降低土壤体积质量、增大孔隙度等方式,来改善土壤的入渗性能和脱盐效率,针对不同掺砂比例改变土壤颗粒级配,探究其对土壤水力特性和溶质迁移特征影响的研究鲜见报道。鉴于此,本研究通过水分特征曲线试验和土柱溶质运移试验,研究不同掺砂量对土壤水力特性和溶质运移过程的影响,并利用对流-弥散方程(CDE)和两区模型(TRM)对溶质运移过程进行模型模拟并获得相关参数,明确不同掺砂量对中度盐碱土壤溶质运移特征

影响,以期为盐碱土改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土样取自宁夏回族自治区银川市兴庆区通贵乡表层 0—40 cm 土壤,所添加砂土取自月牙湖表层 0—10 cm 砂土,为确保土壤样品的纯净性,将土样中

的杂物去除。将处理好的土壤样品放置在阴凉、干燥的地方进行自然风干,然后对其进行碾压处理,过 2 mm 筛备用。土壤体积质量为 1.35 g/cm³,初始含水率 17.82%,饱和含水率(质量)30.93%,田间持水量(质量)22.44%。经 Bettersize-2003 型激光粒度分析仪测得土壤机械组成见表 1。

表 1 试验土壤机械组成
Table 1 Mechanical composition of test soil

采样地	土层深度/cm	机械组成/%			土壤质地
		砂粒(2~0.02 mm)	粉粒(0.02~0.002 mm)	黏粒(<0.002 mm)	
通贵乡	0—40	20.50	65.10	14.40	砂质壤土
月牙湖表层	0—10	88.09	10.70	1.21	砂土

土壤含盐量:将土样研磨过 1 mm 筛,制备水土比 5:1 浸提液。利用 DJS-1VTC 型电导率仪测定电导率。最后,将电导率转化为含盐量,电导率与土壤含盐量公式为:

$$y=3.57x-0.864\ 5\tag{1}$$

式中: y 为土壤的含盐量(g/kg); x 为土壤浸提液电导率(mS/cm)。测得土壤电导率为 1.119 mS/cm,含盐量为 3.13 g/kg,为中度盐碱土^[13]。

1.2 试验方法

1.2.1 试验装置 土壤溶质穿透曲线试验装置见图 1。本试验装置包括土柱和马氏瓶两部分。其中,土柱由透明有机玻璃柱制成(内径 30 cm、高 50 cm);马氏瓶采用有机玻璃制成(内径 17 cm、高 50 cm)。设置 3 cm 定水头供水,上部设供水孔,外壁带有刻度线,底端为多孔底板。出水口设有阀门,分别在土层的 10、20、30 cm 打孔插入传感器。

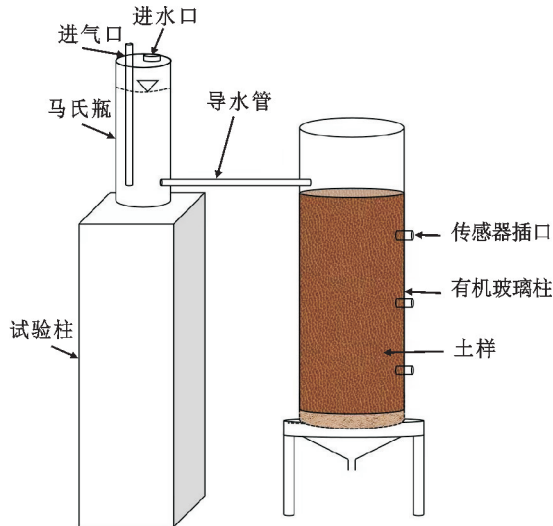


图 1 土壤溶质穿透曲线试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the soil solute penetration curve test setup

利用美国制 1 500F 型陶瓷压力膜仪测定土壤水分特征曲线,试验配置土样按图 1 进行装填。使用压

力膜仪之前先使陶土板浸泡 24 h,使陶土板中的空气全部被排除。在陶土板上的盛土环中装入 1 cm 厚风干土样加溶液浸润至饱和 12 h,用吸管吸出陶土板上多余水分。将陶土板上的出水孔与外流管连接起来。密封压力室,拧紧压力室盖上的所有螺丝。启动空压机,空气控制面板调节气压大小(50,100,200,300,500,700,900,1 150 kPa),使土样在不同压力下通过陶土板排水,记录排水量并结合初始含水率,用烘干法确定各级压力下的含水率。最后,根据土壤水吸力和对应的含水率数据,绘制脱湿曲线。

1.2.2 试验设计 本试验采用完全试验设计,试验前先将所添加的砂土过 1 mm 筛进行备用,再与试验土样按不同掺砂比例混合均匀,本试验设置的掺砂比例为 0(CK),10%,15%,20%,不同掺砂比例后土壤机械组成见表 2。

表 2 不同掺砂比例后土壤机械组成

Table 2 Soil mechanical composition after different sand		mixing ratio			%
编号	掺砂比例	砂粒	粉粒	黏粒	
CK	0	20.5	65.1	14.4	
B1	10	28.0	56.7	15.3	
B2	15	32.2	53.8	14.0	
B3	20	47.6	39.2	13.2	

为了避免土柱壁面优先流的影响,装填土柱前在土柱内壁均匀涂抹少量凡士林。供试土样按照设计干体积质量计算土样质量,以 5 cm 为单位分层填土,每层土壤填充完毕后,按一定强度夯实,在准备填入下层土壤时,把上层的表面进行刨毛处理,以确保相邻 2 层土壤之间能够紧密接触,以防入渗过程中出现分层现象。在土柱的侧壁从上到下依次插入 1~3 号校正好的传感器。土柱装填高度为 40 cm。在填装土柱时在入水口和出水口铺设 1 cm 的砂石层,防止进水时破坏土体表面和土壤堵塞。每层装填土样质量(W)计算公式为:

$$W = V\gamma(1 + S) \quad (2)$$

式中: V 为每次装填到土柱里的体积(cm^3); γ 为自然状态下土壤的干体积质量(g/cm^3); S 为室内土壤体积分数(%)。

土柱装填完毕后先用纯水对土柱进行饱和处理, 准备 1 个适当大小的水箱, 并向其中灌一定量的纯水, 将整个土柱从底部缓慢浸入水箱中, 确保水从底部渗入土壤, 并排除土壤中的空气, 保持水箱中的水位低于土体顶部, 静置 24 h 确保土壤达到充分饱和状态。试验前将配置好的 NaCl 溶液(AR 分析纯, 相对分子质量为 58.44)放入马氏瓶中, 保持 3 cm 入渗水头连续输入。试验开始时观测马氏瓶水位变化, 用烧杯在底部末端承接出流液。在试验过程中, 依据溶质浓度的变化速度, 定期间隔 5 min 到 1 h 收集 1 次。在收集过程中, 详细记录渗滤液质量、时间和溶质浓度。由于电导率与溶液中的离子之间存在定量关系, 故选择用测量的电导率间接反映 Cl^- 浓度, 不仅有助于简化试验操作, 还能有效降低溶质在土壤中因吸附作用和离子交换效应而产生的干扰。试验持续进行, 直到出流液与置换液中 Cl^- 浓度一致时结束试验。

1.3 基本理论与指标计算

1.3.1 Van Genuchten 模型公式

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (ah)^n} \right]^m \quad (3)$$

式中: θ_s 为土壤饱和体积含水率(cm^3/cm^3); θ_r 为残余土壤体积含水率(cm^3/cm^3); h 为负压(m); a 为进气值的倒数; m 、 n 为不相关参数或 $m = 1 - 1/n$ 或 $m = 1 - 2/n$, 是土壤孔隙尺寸分布参数, a 、 m 、 n 均为影响土壤水分特征曲线形态的经验参数。

1.3.2 饱和导水率公式 土壤饱和导水率(K_s)是指单位水势梯度下通过饱和土壤的水通量, 与土壤的孔隙结构状况、体积质量及土壤质地密切相关。饱和导水率公式为:

$$K_s = \left(\frac{Q}{At} \right) \left(\frac{L}{H} \right) \quad (4)$$

式中: K_s 为饱和导水率(cm/min); Q 为测定的出水量(cm^3); A 为土柱横截面积(cm^2); H 为水头高度(cm); t 为相应出水量的时间(min)。

1.3.3 溶质迁移模型

(1) 局部平衡对流—弥散方程

在土柱试验中, 将水流与溶质的运动视为一维流运动, 以便更精确地研究其动态特性。为了描述均质稳定流下的溶质运移问题, 采用经典 CDE 方程, 该方程已被广泛认可并应用于相关领域的研究中。方程为:

$$R_d \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} \quad (5)$$

$$R_d = 1 + \frac{\rho K_d}{\theta} \quad (6)$$

$$P_e = \frac{lv}{D} = \frac{1}{\lambda} \quad (7)$$

式中: D 为水动力弥散系数(cm^2/min); v 为平均孔隙水流速(cm/min); c 为溶质的浓度(g/L); θ 为体积含水量(cm^3/cm^3); l 为土柱长度; R_d 为阻滞因子; x 为距溶质加入端的距离(cm); t 为时间(min); K_d 为溶液和吸附相之间的线性分配系数(L/kg); ρ 为体积质量(g/cm^3)。

(2) 非平衡两区模型(TRM 模型)

两区模型将土壤水分和溶质浓度分为两部分: 流动部分(c_m)和非流动部分(c_{im})。其中, c_m 代表流动的水分含量和溶质浓度, 而 c_{im} 则代表非流动的水分含量和溶质浓度^[14]。

非均质介质、优势流及动态扩散等要素是导致物理非平衡现象的关键因素, 深刻影响溶质的吸附与非吸附特性。为准确描述这一复杂现象, 常采用非平衡(TRM)理论^[15]:

$$\theta_m \frac{\partial C_m}{\partial t} + \theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \theta_m D \frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2} - v_m \theta_m \frac{\partial C_m}{\partial x} \quad (8)$$

$$\theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \omega (C_m - C_{im}) \quad (9)$$

$$\theta = \theta_m + \theta_{im} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{\theta_m}{\theta} \quad (11)$$

式中: θ 为土壤体积含水率(cm^3/cm^3); θ_m 和 θ_{im} 分别为可动区和不可动区的体积含水率(cm^3/cm^3); c_{im} 和 c_m 为不可动区和可动区的溶质浓度($\mu\text{g}/\text{mL}$); v_m 为可动区的平均孔隙流速(cm/h); β 为可动水区和不动水区或为吸附交换点位在瞬时和限速区域的分配系数; ω 为无量纲的质量传递函数。

(3) 模型边界条件

本试验 Cl^- 为非吸附性离子, 采用 3 cm 定水头和 40 cm 土层高度。 C_i 为初始浓度值。本试验为连续输入型, 其边界条件为:

$$C_m = 0 \quad 0 < x < l, t = 0 \quad (12)$$

$$v_m C_0 = -D \frac{\partial C_m}{\partial x} + v_m C_m \quad x = 0, t > 0 \quad (13)$$

$$0 \quad x = l, t > 0 \quad (14)$$

式中: D 为弥散系数(cm^2/h); C 为可动区浓度(g/L); V 为可动区流速(cm/d); t 为时间(d); l 为土柱长度(cm)。

1.4 数据处理

应用 Office 软件处理试验数据, Origin 2019 软件进行绘图, SPSS 19.0 软件进行经验参数拟合。应用 CXTFIT 2.1 软件对施加不同掺砂比例的溶质穿透曲线进行 CDE 方程和两区模型的模拟分析。

2 结果与分析

2.1 掺砂量对中度盐碱土水分特性的影响

2.1.1 掺砂量对土壤水分特征曲线的影响 土壤水力学特征参数是研究土体水分入渗和评估水分利用效率的基础指标, 对于理解土壤水分运动规律和提升水资源利用效率至关重要。为研究掺砂后对中度盐碱土壤

持水性的影响, 本文通过压力膜仪测定不同掺砂比例后的水分特征曲线。从图 2a 可以看出, 掺砂比例越大的土壤水分特征曲线越接近 Y 轴, 随着掺砂比例的增加, 曲线的位置从左向右的排序依次为 B3、B2、B1、CK。在低吸力阶段 (< 500 cm), CK 比 B1、B2 和 B3 含水量分别增多 4.72%, 8.34% 和 13.64%; 在高吸力阶段 ($> 10\ 000$ cm), CK 比 B1、B2 和 B3 含水量分别增多 0.14%, 6.52% 和 25.17%。可知在任一吸力条件下含水率大小排序为 $CK > B1 > B2 > B3$ 。主要由于砂粒含量增加, 土壤结构中大孔隙增多且相互联通, 使得水分优先排出, 因此水分在土壤中的流动性增强。

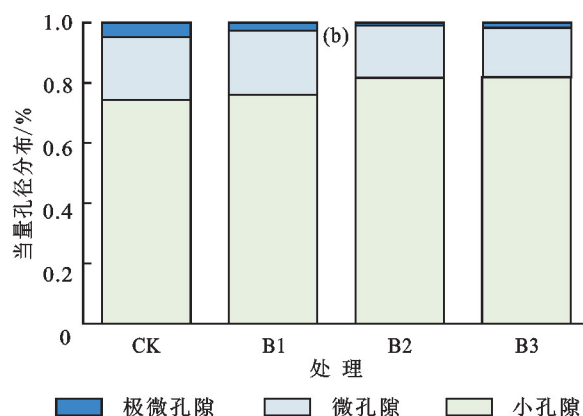
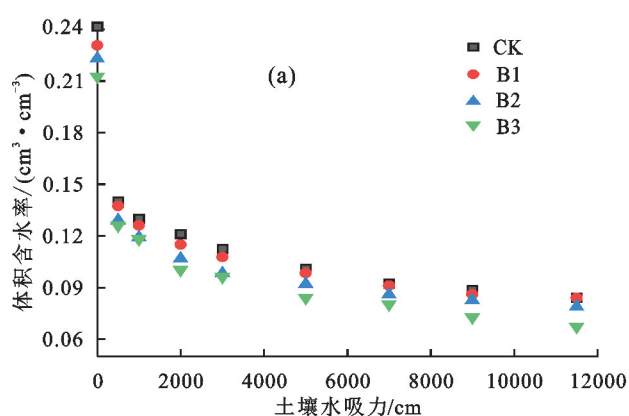


图 2 不同掺砂比例下的土壤水分特征曲线和当量孔径分布

Fig. 2 Characteristic soil moisture profiles and equivalent pore size distributions for different sand blending ratios

土壤中孔隙大小的分布状况可以由土壤水分特征曲线间接表征。土壤孔隙直接影响土壤的透气、透水及持水能力, 同时也反映土壤的团聚状态。土壤水吸力 (S , Pa) 和毛管直径 (d , mm) 的关系为:

$$d = \frac{300}{S} \quad (15)$$

如果土壤含水率分别为 θ_1 、 θ_2 (cm^3/cm^3), 相应的当量孔径分别为 d_1 、 d_2 , 那么 d_2 与 d_1 之间的孔隙所占体积与孔隙总体积之比为 $(\theta_1 - \theta_2)/\theta_s$ (其中 $\theta_1 > \theta_2$), 分别计算出不同处理下的当量孔径。土壤当量孔径可分为: 极微孔隙 ($< 0.3\ \mu\text{m}$)、微孔隙 ($\geq 0.3 \sim 5\ \mu\text{m}$)、小孔隙 ($\geq 5 \sim 30\ \mu\text{m}$)、中等孔隙 ($\geq 30 \sim 75\ \mu\text{m}$)、大孔隙 ($\geq 75 \sim 100\ \mu\text{m}$) 和土壤孔隙 ($\geq 100\ \mu\text{m}$)^[16]。

由公式 (15) 计算得出的掺砂后土壤的累积当量孔径分布结果见图 2b, 可以看出, 不同掺砂比例处理对土壤当量孔径产生不同程度影响。当水吸力在 $0 \sim 500$ cm 时, 对应当量孔径为小孔隙 ($0.3 \sim 5\ \mu\text{m}$), 此阶段不同砂粒处理的小孔隙的占比有所差异, 具体表现为 $B3 > B2 > B1 > CK$ 。B3 所占小孔隙比 CK、B1 和 B2 分别增多 10.34%, 7.70% 和 0.28%; B3 所占微孔隙比 CK、B1 和 B2 分别减少 22.24%, 23.33% 和 6.04%; B3 所占极微孔隙比 CK、B1 分别减少 63.58%, 33.97%,

说明掺砂比例越大其小孔隙数量相应增多, 从而土壤的导水性能增强。

为进一步分析掺砂对土壤水分运动参数的影响, 利用 RETC 软件中 Van Genuchten 经验模型对水分特征曲线进行拟合, 拟合参数见表 3。其拟合效果由评价指标 SSQ (残差平方和) 和 R^2 (决定系数) 进行评价分析。 R^2 越接近 1, SSQ 越接近 0, 计算误差越小, 精度越高。

从表 3 的 R^2 和 SSQ 的评价结果来看, VG 模型对于各处理条件下的土壤水分特征曲线拟合较好, SSQ 接近于 0, 为 $0.000\ 01 \sim 0.000\ 7$; R^2 接近于 1, 破碎度为 $0.995\ 7 \sim 0.999\ 3$, 表明 VG 模型在本试验条件下能够准确地描述土壤水分特征曲线, 对参数的拟合效果较好。

θ_s 为土壤饱和和体积含水率, 可以看出掺砂比例越大, θ_s 越小, CK 分别比 B1、B2 和 B3 增多 4.59%, 8.21% 和 13.50%; θ_r 为残余体积含水率, 土壤掺砂增大土壤残余含水率; 参数 a 为进气值的倒数, a 随着掺砂比例的增大而减小, 说明土壤进气吸力在增加, 相同条件下土壤的持水性降低^[17], 土壤水势降低; n 值代表土壤水分特征曲线的倾斜程度, n 值越大, 则土壤水分特征曲线越

陡,土壤释出的水分越多,相应的土壤含水量变化较大, n 值随着掺砂比例的增大而增大。

表 3 RETC 拟合参数结果

Table 3 RETC fitting parameter results

处理	θ_s	θ_r	a	n	SSQ	R^2
CK	0.241 3	0.000 2	0.062 1	1.150 4	0.000 04	0.997 8
B1	0.230 7	0.000 5	0.057 0	1.158 2	0.000 03	0.998 3
B2	0.223 0	0.000 7	0.045 0	1.159 5	0.000 01	0.999 3
B3	0.212 6	0.000 4	0.023 7	1.195 0	0.000 07	0.995 7

2.1.2 掺砂量对饱和和导水率的影响 通过分析不同试验处理单位水势梯度下的饱和水通量来确定土壤的导水性,不同掺砂比例处理下的土壤饱和导水率变化情况见图 3。由图 3 可知,当掺砂比例从 0 增加到 20%时,土壤饱和导水率明显增加。对各处理 K_s 比较发现,B1、B2、B3 处理分别比 CK 增加 1.04%,6.20%,20.99%。分析可知,掺砂明显提高土壤饱和导水率,加快土壤水分的入渗,与戴世鑫等^[18]的研究结论一致,即掺砂比例的增加显著提升土壤饱和导水率。是因为掺砂量的增加改变土壤的机械组成,土壤的孔隙状况因此改变^[19-20]。所以,掺砂量能显著改变土壤孔隙结构和分布,提高孔隙连通性,使得作为水分通道的土壤有效孔隙数量增加,土壤孔隙透水能力增强。

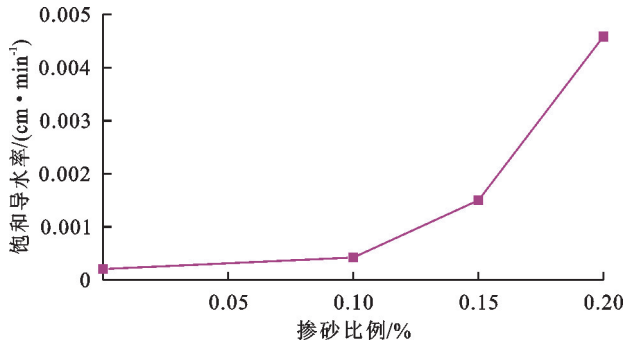


图 3 不同掺砂比例下的土壤饱和和导水率变化

Fig. 3 Variation of saturated hydraulic conductivity of soil with different sand mixing ratios

2.2 掺砂量对溶质运移过程的影响

2.2.1 掺砂量对溶质穿透曲线特征的影响 溶质穿透曲线(BTC)是根据测定的溶液浓度及出流时间,绘出的出流液溶质相对浓度和出流时间的关系曲线,一般认为是运移离子在介质中运移过程的真实反映,可以反映溶质与土壤间的作用^[21],也能直观显示出溶质在土壤运移过程中的浓度变化,可以推求水动力弥散系数及研究土壤孔隙的导水能力。

由图 4 可知,尽管各处理下 BTC 曲线均呈典型的“S”形特征,但随着掺砂量改变,“S”形曲线形状及其随时间推移的浓度变化趋势呈现出显著差异。具

体来说,随掺砂量增加, Cl^- 穿透曲线呈现出向纵坐标(Y 轴)靠近的趋势,说明 Cl^- 在土壤中相对浓度随时间增长的速率加快,在此过程无显著浓度增长滞后(即拖尾现象),且 Cl^- 到达完全穿透状态(即相对浓度达 1)所需时间显著缩短。这一现象表明,砂粒的添加对土壤溶质运移过程起到积极促进作用。这是由于掺砂使得土壤介质中孔隙增加,孔隙间联通性增大,土壤渗透性增强, Cl^- 在土壤系统中的扩散与传播效率得到提高。

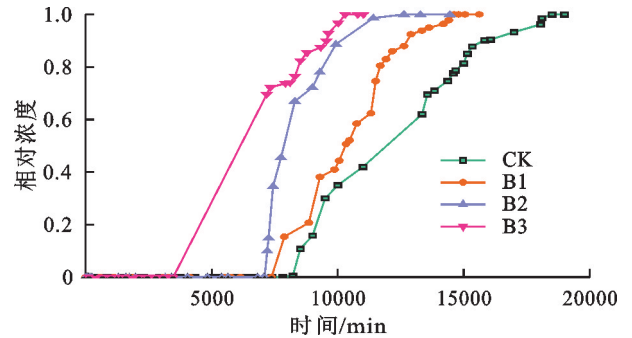


图 4 不同掺砂比例下 Cl^- 穿透曲线

Fig. 4 Cl^- penetration curves under different sand mixing ratios

2.2.2 掺砂量对穿透时间的影响 为进一步分析掺砂对溶质运移的影响,引入一系列指标对穿透效果进行评价。初始穿透时间(t_e)、平均穿透点($t_{0.5}$)、完全穿透时间(t_s)、穿透总历时(t_t)为溶质穿透的重要特征参数,由土壤的孔隙水流速(v)和水动力弥散系数(D)共同决定^[22]。

由表 4 可知, t_e 、 $t_{0.5}$ 、 t_s 、 t_t 均与掺砂比例呈反比,即掺砂比例越大, Cl^- 的 t_e 和 t_s 越短, t_t 也越短。具体而言,相较于对照组(CK),B1 处理下的 t_e 、 $t_{0.5}$ 、 t_s 、 t_t 分别较 CK 处理减小 4.10%,22.61%,20.98%和 34.48%。B2 和 B3 处理 t_t 分别比 CK 降低 47.22%和 69.71%,降幅更为显著,表明砂粒含量的增加能有效缩减 Cl^- 在土壤中的 t_e 、 $t_{0.5}$ 、 t_s 和 t_t ,间接表明掺砂对土壤孔隙流速有正向调节效应。

表 4 不同比例掺砂量下的 Cl^- 穿透时间

Table 4 Cl^- penetration time with different proportion of sand blending

处理	初始穿透	平均穿透	完全穿透	穿透
	时间	时间	时间	总历时
CK	8 219	13 346	18 500	10 281
B1	7 882	10 328	14 618	6 736
B2	7 200	8 050	12 626	5 426
B3	7 179	7 895	10 293	3 114

2.2.3 CDE 方程和两区模型拟合对比分析 为进一步研究不同掺砂比例作用下土壤的溶质迁移特征,本文利用 CXTFIT 软件中 CDE 方程和 TRM 模型对溶

质穿透曲线相关参数进行拟合,并对比分析不同溶质迁移数学模型的适用性^[23]。

土层总长度为 40 cm,平衡 CDE 方程对土柱试验穿透曲线拟合,由于 Cl⁻ 作为示踪剂具有良好的稳定性,不会产生易于沉淀的化学物质,被土壤吸附和降解作用可以忽略,所以控制方程中 μ 均为 0,模拟设置 $R=1$,通过拟合穿透曲线对 v 和 D 进行拟合。非平衡两区模型拟合将阻滞因子(R)设为 1, $\mu=0$,对 v 、 D 、 β 和 w 进行拟合。通过调整参数使得计算结果与实测数据最大程度接近,其中,拟合结果由 SSQ(残差平方和)、均方误差(MSE)和决定系数(R^2)进行评价分析,SSQ 值越接近 0,MSE 值越接近 0, R^2 值越接近 1,则说明拟合效果越好。

由表 5 可知,CDE 方程拟合试验参数的 $R^2 > 0.98$,SSQ<0.093 8,MSE<0.003 0,而 TRM 模型系数 $R^2 > 0.994$,SSQ<0.040 1,MSE<0.000 7。表明虽然 CDE 方程与两区模型均能准确模拟不同掺砂比例下土壤溶质迁移,但两区模型精度更高,对实际情况的描述更为贴切。采用 CDE 方程对平均孔隙水流速(v)、水动力弥散系数(D)及弥散系数(λ)进行拟合时,所得数值普遍偏高,原因是传统的 CDE 方程仅关注溶质在土壤中由于对流作用引发的机械弥散效应,而忽视溶质在非流动区域内的分子扩散过程。实际上机械弥散与分子扩散均能引起土壤溶质的迁移,两者共同构成水动力弥散作用^[22]。

进一步观察数据可知,CDE 方程与 TRM 模型对不同掺砂比例条件下 v 、 D 和 λ 的拟合值变化趋势一致。平均孔隙流速(v)是指有效水流通量^[24]。砂粒的增大加快土壤的孔隙水流速(v),并且施加比例越大,孔隙水流速越大。可能是由于砂粒的添加导致

土壤机械组成的改变,土壤内部孔径增大,水流通道变大^[25],TRM 模型拟合出的 v ,B1、B2、B3 分别比 CK 增加 44%,92%和 100%。

CDE 方程模拟参数水动力弥散系数(D)值随掺砂量增加而减小,B1、B2、B3 分别比 CK 减小 62.50%,70.83%和 75.00%。水动力弥散作用大小受土壤含水率和孔隙水流速共同影响。掺砂比例的增加导致 v 提升,水流通道畅通。因此,Cl⁻ 在穿透过程中的机械弥散作用减弱, D 随掺砂量增加而呈减少趋势。

弥散度(λ)反映土壤孔隙介质中溶质扩散能力,与介质粒径及均匀度相关,数值上等于 D 与 v 之比。 λ 是评价溶质在孔隙介质中弥散能力的指标,其值越大,说明溶质在孔隙介质的扩散能力越强^[26]。CDE 方程和两区模型模拟弥散度(λ)均随掺砂量增大而减小,B1、B2、B3 分别比 CK 减小 81.23%,98.59%和 98.65%,表明掺砂量越大, λ 越小,溶质在土壤中充分扩散能力越弱。

在均衡条件下,可动区含水量比率(β)反映溶质在可动区域中所占土体总浓度的比例^[27]。TRM 模型的模拟结果显示,随着掺砂比例的增加, β 值呈上升趋势。表明随着砂粒含量增加导致混合土样中不可动区水体的含水率降低,土壤不可动区域缩减。质量交换系数 w 参数反映可动区和不可动区之间溶质交换的程度^[28]。由模拟结果可知,随掺砂比例增加, w 值总体呈现不断增长趋势。掺砂比例由 0 增加到 20%, w 值由 0.000 01 增加到 0.056 3。掺砂比例的增加可增强可动区和不可动区之间的溶质交换,使原本较低的溶质交换程度得以提升,进而促进 Cl⁻ 向微小孔隙中扩散,表明掺砂有助于提高 Cl⁻ 在土壤中的扩散潜力。

表 5 CDE 方程和两区模型(TRM)对 Cl⁻ 穿透曲线拟合结果比较

Table 5 Comparison of Cl⁻ penetration curve fitting results by CDE equation and two-region model (TRM)

处理	V/(cm·min ⁻¹)		D/(cm ² ·min ⁻¹)		λ		β	w	R^2		SSQ		MSE	
	CDE	TRM	CDE	TRM	CDE	TRM	TRM	TRM	CDE	TRM	CDE	TRM	CDE	TRM
CK	0.003 4	0.002 5	0.004 8	0.003 7	1.411 7	1.480 0	0.739 0	0.000 01	0.994 7	0.996 7	0.040 4	0.040 1	0.000 8	0.000 7
B1	0.003 7	0.003 6	0.001 8	0.001 0	0.486 5	0.277 8	0.884 2	0.056 2	0.994 1	0.994 4	0.038 5	0.036 9	0.001 0	0.001 0
B2	0.004 9	0.004 8	0.001 4	0.000 1	0.285 7	0.020 8	0.872 9	0.025 9	0.980 7	0.996 8	0.093 8	0.016 9	0.003 0	0.000 6
B3	0.005 0	0.005 0	0.001 2	0.000 1	0.240 0	0.020 0	0.876 1	0.056 3	0.994 0	0.997 7	0.028 4	0.012 3	0.001 1	0.000 5

为了更直观呈现实测、CDE 方程和 TRM 模型模拟的溶质穿透曲线之间的异同,将所有处理下的溶质穿透曲线绘于图 5。CDE 方程和 TRM 模型拟合的曲线均能很好地贴合实测数据。但 CDE 方程拟合的曲线相较于实测曲线普遍存在一定程度偏离现象,图 5c 尤为明显。CDE 方程预测的穿透初期相对浓度高于实测水平,而穿透中期则出现低于实测的现

象,两区模型拟合曲线在穿透过程的初期和中期阶段均能与实数据保持较高的一致性,无明显偏离现象。表明掺砂导致土壤质地的背景下,Cl⁻ 迁移机制不仅包括可动区对流-弥散作用,还需考虑土壤水相对不可动区中水体溶质的扩散效应。综上所述,相较于 CDE 方程,TRM 模型对不同掺砂量下土壤 Cl⁻ 的迁移过程及规律的模拟精度更高,拟合结果更为可信。

2.3 各指标间的相关性分析

对各处理下土壤水力特性及溶质运移特性 9 个指标进行相关性分析(图 6)。由图 6 可知, 掺砂量与平均穿透时间、完全穿透时间、穿透总历时呈显著负相关($p < 0.05$), 极微孔隙与饱和导水率呈显著正相关($p < 0.05$), 表明掺砂量越高, Cl^- 穿透时间越短,

极微孔隙比例越高, 土壤饱和导水率越高; 掺砂量与极微孔隙及微孔隙之间相关性不强; 掺砂量、饱和导水率与小孔隙之间及小孔隙与初始穿透时间、平均穿透时间、完全穿透时间、穿透总历时之间相关性不明显或接近于 0, 这表明各指标之间存在非线性关系或没有明显关联。

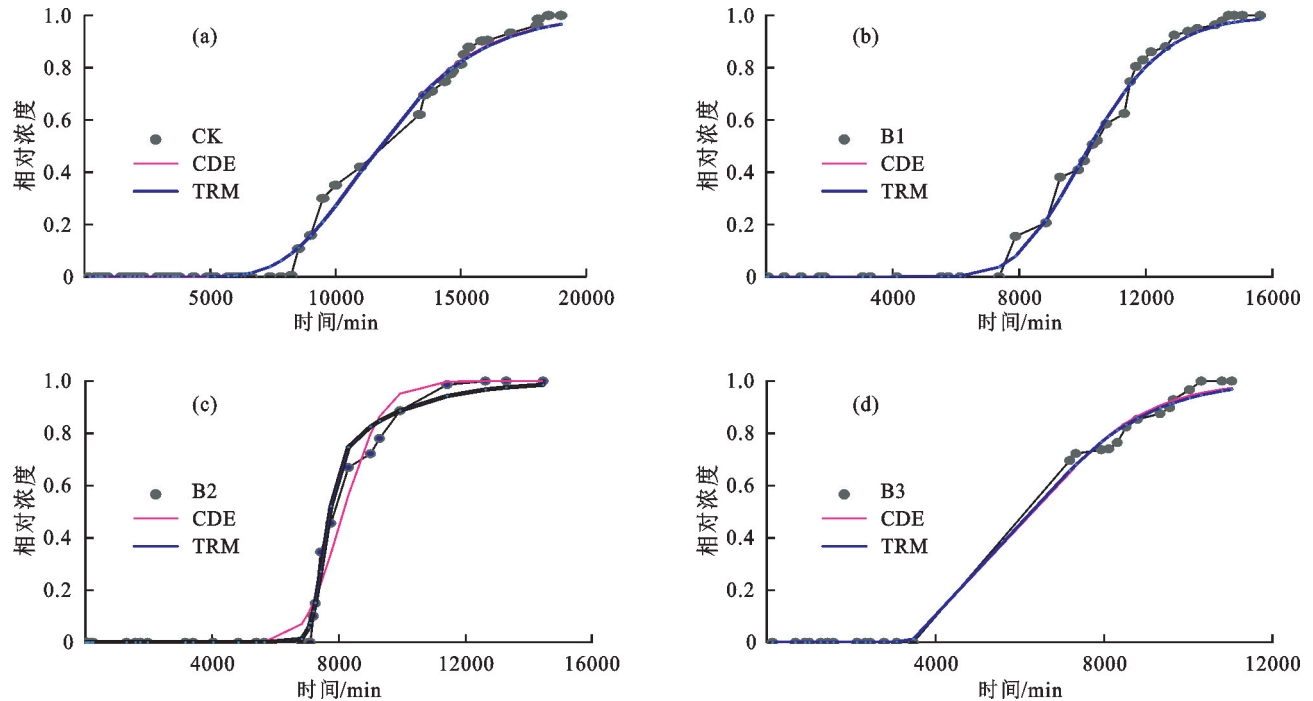


图 5 基于 CDE 和 TRM 模型拟合的穿透曲线对比

Fig. 5 Comparison of penetration curves based on CDE and TRM model fitting

综上所述, 掺砂更多影响极微孔隙和微孔隙比例, 小孔隙与之相关性不显著, 且小孔隙与饱和导水率及初始穿透时间、平均穿透时间、完全穿透时间、穿透总历时之间相关关系均不显著, 表明水分在土壤中的运移及溶质的迁移更多受到较小孔隙影响, 而掺砂正是通过改善极微孔隙和微孔隙来影响土壤水力特性及溶质运移过程。

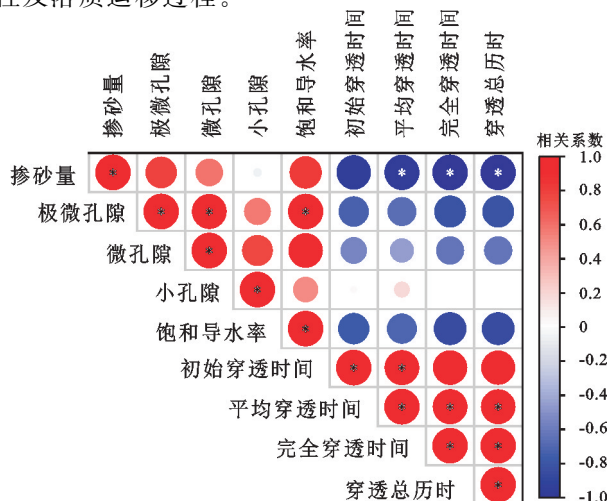


图 6 掺砂量及各指标间相关性分析

Fig. 6 Analysis of sand dosage and related rows between indicators

3 讨论

3.1 掺砂对土壤水力特性的影响

土壤水力特性决定水分在土壤中的行为模式, 是土壤科学研究的核心内容之一。本研究通过试验分析不同处理下土壤水力特性的响应规律。试验结果表明, 随着掺砂量的增加土壤持水性降低, 饱和导水率(K_s)逐渐增大, 与李克升等^[29]对掺砂能提高土壤大孔隙率、提升土壤入渗能力的结论相同。这是因为砂粒的添加改变土壤机械组成和土壤质地, 改善土壤孔隙度^[11]。一方面随着掺砂量增加, 土壤中黏粒相对含量减少, 而砂粒比表面积较黏粒小得多, 对水分子的吸附能力较弱, 因此掺砂量越大, 土壤持水性越弱^[30]; 另一方面, 砂粒粒径相对较大, 将其掺入土壤易形成较大孔隙, 不仅增加土壤的总孔隙体积, 而且相互连通, 形成有效的水分运动通道, 从而增强土壤的通气透水性^[31]。因此, 在实施掺砂改良时, 必须权衡其对土壤持水性和通气透水性的双重影响, 以确保土壤改良的效果既能满足植物生长的需求, 又能适应环境变化的挑战。通过精确控制掺砂的比例和方法, 来实现对土壤物理性质的优化, 进而提升土壤质量, 为农业生产提供有力支持。

3.2 掺砂对溶质运移过程的影响

掺砂比例越大,溶质穿透曲线越靠近 Y 轴,穿透时间提前,且无拖尾现象,说明掺砂比例多的土壤颗粒粒径较大,可供水分流动和互相联通的孔隙增大,水流通道变宽,水流过水断面面积增大,使得饱和土壤的孔隙结构更为简单,加快孔隙水流速^[32],这种简单的孔隙结构也导致水流在土壤介质中的流速梯度减小,减弱溶质的机械弥散作用,使得溶质能够迅速穿透土壤。穿透曲线峰值均为 1,表明试验过程中溶质没有被土壤颗粒吸附,造成这种情况的原因可能是掺砂改变土壤团聚体结构,而松散的土壤结构减少溶质在土壤中的吸附和固定^[33],因此,随掺砂量增加,土壤溶质的弥散度减小,溶质在土壤中充分扩散能力减弱,而迁移能力增强。综上,盐碱土掺砂能有效促进溶质在土壤中的迁移过程,为盐碱地改良提供思路,与相龙康等^[9]和张宇航等^[34]在掺沙有利于盐碱化土壤脱盐的研究结果一致。然而,本研究只考虑掺砂单一因素对土壤溶质运移过程的影响,未考虑其他因素,如温以华^[35]以 2 种不同质地的土壤为研究对象,发现随着体积质量的减小,弥散度也随之减小,提出黏粒含量是影响溶质运移的关键因素之一的结论;虎胆·吐马尔白等^[36]研究证明,土壤质地和水流速度是影响弥散系数和弥散度的关键因素;刘营营等^[37]也发现,土壤入渗能力与体积质量存在反比关系,质地越粗的土壤入渗能力和溶质迁移速度明显大于其他土壤。可见,土壤质地、体积质量等也是溶质运移的影响因素,在探究盐碱土壤溶质运移过程中应考虑多方面因素的共同作用,为形成改良盐碱土的综合手段提供理论和数据支撑。

4 结论

(1)在 0~20%掺砂比例范围内,掺砂比例越大,水分特征曲线越接近 Y 轴,在任一吸力条件下土壤含水率表现为 CK>B1>B2>B3;不同掺砂比例处理对土壤当量孔径影响不同,掺砂比例越大,小孔隙数量越多,微小孔隙减少;土壤饱和导水率随掺砂量的增加而增大,当掺砂量达到 20%, K_s 相较 CK 增加 20.99%。

(2)在 0~20%掺砂比例范围内,随掺砂量增大 Cl^- 的穿透曲线左移,穿透时间缩短,表明掺砂比例的增加改变土壤颗粒级配,使土壤孔隙数量增多,土壤平均孔隙流速加快。

(3)相较于 CDE 方程,两区模型的拟合精度更高,能较好模拟掺砂条件下土壤中溶质运移过程;两区模型参数拟合结果显示,随掺砂量的增加, v 、 β 和

w 逐渐增大, D 和 λ 呈减小趋势。

综上所述,在 0~20%掺砂比例范围内,掺砂能显著影响中度盐碱土水力特性,有效促进其溶质运移过程,且 20%掺砂量促进效果最好。

参考文献:

- [1] 杜学军,闫彬伟,许可,等.盐碱地水盐运移理论及模型研究进展[J].土壤通报,2021,52(3):713-721.
DU X J, YAN B W, XU K, et al. Research progress on water-salt transport theories and models in saline-alkali soil[J].Chinese Journal of Soil Science,2021,52(3):713-721.
- [2] LIU G M, LI J B, ZHANG X C, et al. GIS-mapping spatial distribution of soil salinity for eco-restoring the Yellow River Delta in combination with electromagnetic induction[J].Ecological Engineering,2016,94:306-314.
- [3] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993.
WANG Z Q, ZHU S Q, YU R P, et al. Salt-affected soils of China[M].Beijing: Science Press,1993.
- [4] 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 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.
- [5] CUI Q, XIA J B, YANG H J, et al. Biochar and effective microorganisms promote *Sesbania cannabina* growth and soil quality in the coastal saline-alkali soil of the Yellow River Delta, China[J].Science of the Total Environment,2021,756:e143801.
- [6] 王全九,单鱼洋.微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J].农业机械学报,2015,46(12):117-126.
WANG Q J, SHAN Y Y. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(12):117-126.
- [7] 杨真,王宝山.中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J].山东农业科学,2015,47(4):125-130.
YANG Z, WANG B S. Present status of saline soil resources and countermeasures for improvement and utilization in China[J].Shandong Agricultural Sciences,2015,47(4):125-130.
- [8] LI X Y. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of Northwest China[J].Catena,2003,52(2):105-127.
- [9] 相龙康,高佩玲,张晴雯,等.不同改良剂对滨海盐碱化土壤水盐运移特性的影响[J].排灌机械工程学报,2020,38(9):945-950.

- XIANG L K, GAO P L, ZHANG Q W, et al. Effects of different modifiers on water-salt transport characteristics in coastal saline-alkaline soils[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(9): 945-950.
- [10] 宋日权, 褚贵新, 冶军, 等. 掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊1): 109-114.
- SONG R Q, CHU G X, YE J, et al. Effects of surface soil mixed with sand on water infiltration and evaporation in laboratory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(S1): 109-114.
- [11] 蔺亚莉, 李跃进, 陈玉海, 等. 碱化盐土掺砂对土壤理化性状和玉米产量影响的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2016(1): 119-123.
- LIN Y L, LI Y J, CHEN Y H, et al. Effects adding sand on soil physical and chemical property and corn yield in alkalinized solonchak soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016(1): 119-123.
- [12] MIAO Q F, ZHOU L Y, GONÇALVES J M, et al. Effects of sand addition to heavy saline-alkali soil on the infiltration and salt leaching in Hetao irrigation district, China[J]. Biology and Life Sciences Forum, 2021, 3(1): 33.
- [13] 马东海. 灌溉定额分配方式对宁夏平原盐碱稻田盐分运移及水稻产量的影响研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
- MA D H. Irrigation quota allocation method for saline-alkali paddy field in Ningxia plain study on the effect of salt transport and rice yield [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023.
- [14] 王岩. 黄河口潮间带沉积物水及溶质优先迁移的试验研究[D]. 山东 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- WANG Y. The experimental study of water and solute preferential transport in sediments on Yellow River estuary[D]. Qingdao, Shandong: Ocean University of China, 2010.
- [15] 郭志萍, 李斌, 孙西欢, 等. 不同生态修复模式下土壤水文性质及其对溶质运移的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(12): 4251-4260.
- GUO Z P, LI B, SUN X H, et al. Soil hydrological properties and their effects on solute transport under different ecological restoration models in coal mining area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(12): 4251-4260.
- [16] 廖海, 栗现文, 陈俊英, 等. 原状盐渍土不同盐分含量对土壤水分特征曲线的影响[J]. 节水灌溉, 2021(1): 7-13.
- LIAO H, LI X W, CHEN J Y, et al. Effects of different salt contents of undisturbed saline soil on soil moisture characteristic curves[J]. Water Saving Irrigation, 2021(1): 7-13.
- [17] 刘艳丽, 周蓓蓓, 王全九, 等. 纳米碳对黄绵土水分运动及溶质迁移特征的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 21-25.
- LIU Y L, ZHOU B B, WANG Q J, et al. Effects of nano-carbon on water movement and solute transport in loessial soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 21-25.
- [18] 戴世鑫, 郭同铠, 毛伟兵, 等. 基于分形理论配沙对粘质盐土饱和导水率的影响研究[J]. 节水灌溉, 2021(3): 19-24.
- DAI S X, GUO T K, MAO W B, et al. Research on the influence of sand distribution on the saturated hydraulic conductivity of clayey saline soil based on fractal theory [J]. Water Saving Irrigation, 2021(3): 19-24.
- [19] ALHAJHOJ AL-QAHTANI M R. Effect of addition of sand and soil amendments to loam and brick grit media on the growth of two turf grass species (*Lolium perenne* and *Festuca rubra*) [J]. Journal of Applied Sciences, 2009, 9(13): 2485-2489.
- [20] 黄锦文, 唐莉娜, 曾文龙, 等. 不同土壤处理对烤烟根际土壤生物学特性的影响[J]. 中国烟草学报, 2016, 22(2): 75-83.
- HUANG J W, TANG L N, ZENG W L, et al. Effects of different soil treatments on biological characters of rhizosphere soil of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2016, 22(2): 75-83.
- [21] 李志明, 周清, 王辉, 等. 土壤容重对红壤水分溶质运移特征影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 101-103.
- LI Z M, ZHOU Q, WANG H, et al. Influence of bulk density on the characteristic of water solute transport in red soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 101-103.
- [22] 吴军虎, 任敏. 羟丙基甲基纤维素作土壤改良剂对土壤溶质运移的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 141-147.
- WU J H, REN M. Effect of hydroxypropyl methyl cellulose as soil modifier on solute migration in soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(5): 141-147.
- [23] 高光耀, 冯绍元, 马英, 等. 考虑弥散尺度效应的一维反应性溶质运移两区模型及应用[J]. 水利学报, 2011, 42(6): 631-640.
- GAO G Y, FENG S Y, MA Y, et al. One-dimensional two-region model for reactive solute transport with scale-dependent dispersion and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(6): 631-640.
- [24] 许迪, 程先军. 地下滴灌土壤水运动和溶质运移数学模

- 型的应用[J].农业工程学报,2002,18(1):27-30.
- XU D, CHENG X J. Model application of water flow and solute transport during non-steady diffusion from subsurface emitter source[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(1): 27-30.
- [25] 李晓爽. 掺沙及施用生物有机肥对盐碱地水盐运移和冬小麦生长发育影响的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- LI X S. Study on the influence of Yellow River sediment mixed and application biological fertilizer on water and salt transport, winter wheat growth in saline-alkali land[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [26] 白一茹, 刘旭, 张钰涵, 等. 生物炭对黄绵土中 NO_3^- -N 运移过程影响及模拟[J]. 环境科学, 2024, 45(5): 2905-2912.
- BAI Y R, LIU X, ZHANG Y H, et al. Effect of bio-char on NO_3^- -N transport in loessial soil and its simulation[J]. Environmental Science, 2024, 45(5): 2905-2912.
- [27] SCHULIN R, VAN GENUCHTEN M T, FLÜHLER H, et al. An experimental study of solute transport in a stony field soil[J]. Water Resources Research, 1987, 23(9): 1785-1794.
- [28] BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York: Courier Corporation, 2013.
- [29] 李克升, 孔维航, 徐文硕, 等. 黄河沙施用方式及用量对盐碱土水分入渗与微观结构的影响[J]. 农业工程技术, 2022, 15(4): 139-146.
- LI K S, KONG W H, XU W S, et al. Impacts of application patterns and incorporation rates of dredged Yellow River sediment on structure and infiltration of saline-alkali soil[J]. Agricultural Engineering Technology, 2022, 15(4): 139-146.
- [30] 李靖江. 掺沙盐渍土入渗与盐分运移对灌溉淋洗响应的试验研究[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2021.
- LI J J. Experimental study on the responses of infiltration and salt transport of saline soil incorporated with sand to irrigation and leaching[D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2021.
- [31] 王慧芳, 邵明安. 含碎石土壤水分入渗试验研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 604-609.
- WANG H F, SHAO M A. Experimental study on water infiltration of soil containing rock fragments [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 604-609.
- [32] 吕德鹏, 张思毅, 贺斌, 等. 粤北红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤大孔隙与水分入渗特征研究[J]. 土壤通报, 2023, 54(6): 1290-1298.
- LV D P, ZHANG S Y, HE B, et al. Characteristics of soil macropore and water infiltration under different land use in hilly red soil region of northern Guangdong [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(6): 1290-1298.
- [33] 史海滨, 陈亚新. 吸附作用与不动水体对土壤溶质运移影响的模拟研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(3): 258-267.
- SHI H B, CHEN Y X. Study on influences of soil adsorption and immobile water on solute transport in soil by numerical simulation[J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(3): 258-267.
- [34] 张宇航, 高佩玲, 张晴雯, 等. 中度盐碱土掺沙对土壤水盐运移和夏玉米生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(2): 83-90.
- ZHANG Y H, GAO P L, ZHANG Q W, et al. Effect of mixing sand with surface soil on moderately salinized soil water-salt transport and summer maize growth[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(2): 83-90.
- [35] 温以华. 不同质地和容重对 Cl^- 在土壤中运移规律的影响[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 73-75.
- WEN Y H. Influence of texture and bulk density on the transport's law of Cl^- in soils[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 73-75.
- [36] 虎胆·吐马尔白, 穆丽德尔·托伙加, 朱珠. 北疆典型土壤纵向弥散系数试验[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(1): 151-158.
- HUDAN T, MULIDEER T, ZHU Z. Experimental study on longitudinal dispersion coefficient of typical soil in northern Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(1): 151-158.
- [37] 刘营营, 余冬立, 刘冬冬, 等. 土地利用与土壤容重双因子对土壤水分入渗过程的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 84-88.
- LIU Y Y, SHE D L, LIU D D, et al. Influence of land use patterns and soil bulk density on soil infiltration process [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 84-88.