

不同程度苏打盐碱土入渗过程及预测模型适用性

付饶¹, 张旭¹, 白玉锋^{1,2}, 邹元春², 李筱琳¹, 刘宏远², 李秀军², 关义新²

(1.吉林师范大学地理科学与旅游学院, 吉林 四平 136000; 2.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

摘要: [目的] 为揭示不同程度苏打盐碱土入渗过程差异及其影响因素,并评估不同入渗模型对模拟苏打盐碱土入渗过程的适用性。[方法] 采用一维垂直定水头单环入渗法,通过野外原位入渗试验,研究不同程度苏打盐碱土入渗过程参数特征,分析盐碱化指标对入渗过程的影响,并对不同预测模型的适用性进行评价。[结果] 1) pH由9.31增至10.35, ESP从1.09%升至65.82%、SAR从1.24上升至115.71时, 5种供试土壤稳定入渗速率较初始入渗速率下降41.81%~99.59%。其中,盐碱程度最重的碱蓬地降幅最大,稳定入渗速率为0.13 mm/h。2) 相关分析显示,稳定入渗速率与碱化度(ESP)和pH均呈极显著负相关($p < 0.01$),而与交换性 Na^+ 呈显著负相关($p < 0.05$);平均入渗速率与ESP、交换性 Na^+ 、钠吸附比、pH和盐分含量均呈不同水平显著负相关。3) 基于模型决定系数(R^2)和不同程度苏打盐碱土盐碱指标的关联性,当 $\text{SAR} < 108.60$ 、 $\text{SC} < 10\ 568.64\ \text{mg/kg}$ 、 $\text{EC} < 1.70\ \text{mS/cm}$ 时,入渗模型采用Horton模型的模拟效果优于通用经验模型;当盐碱化程度超过此范围时,采用通用经验模型更优。[结论] 苏打盐碱化程度是制约土壤入渗能力的关键因素,基于典型盐碱指标阈值可进行不同盐碱程度入渗模型适用性选择。研究结果可为苏打盐碱土区的水分运移模拟与灌溉排水管理提供理论依据和方法支持。

关键词: 苏打盐碱土; 碱化度; 钠吸附比; 入渗参数; 模型适用性; 松嫩平原

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)04-0410-10

Infiltration Process and Applicability of Prediction Models for Soda Saline-Alkali Soils with Different Degrees

Fu Rao¹, Zhang Xu¹, Bai Yufeng^{1,2}, Zou Yuanchun², Li Xiaolin¹, Liu Hongyuan², Li Xiujun², Guan Yixin²

(1.College of Geographic Science and Tourism, Jilin Normal University, Siping, Jilin 136000, China; 2.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the differences in infiltration processes of soda saline-alkali soils with different degrees and their influencing factors, and to evaluate the applicability of different infiltration models in simulating the infiltration process of soda saline-alkali soils. [Methods] Using the one-dimensional vertical constant-head single-ring infiltration method, field in-situ infiltration experiments were conducted to study the characteristics of infiltration process parameters in soda saline-alkali soils with different degrees, analyze the effects of salinization-alkalization indicators on the infiltration process, and evaluate the applicability of different prediction models. [Results] 1) As pH increased from 9.31 to 10.35, exchangeable sodium percent (ESP) rose from 1.09% to 65.82%, and sodium adsorption ratio (SAR) increased from 1.24 to 115.71, the stable infiltration rates of the five tested soils decreased by 41.81% to 99.59% compared with the initial infiltration rates. Among them, the *Suaeda salsa* land with the highest degree of salinization and alkalization showed the largest decrease, with a stable infiltration rate of only 0.13 mm/h. 2) Correlation analysis indicated that the stable infiltration rate was significantly negatively correlated with ESP and pH ($p < 0.01$), and significantly negatively correlated with

收稿日期: 2025-12-05

修回日期: 2026-02-07

录用日期: 2026-03-18

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-03-25

资助项目: 中国科学院科研基金项目; 吉林省科技发展计划项目(YDZJ202201ZYTS498); 吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20240574KJ)

第一作者: 付饶(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事盐碱地改良研究。E-mail: fr20000618@163.com

通信作者: 白玉锋(1988—), 男, 讲师, 博士, 硕士生导师, 主要从事土壤物理与土壤改良研究。E-mail: byfzy2021@jlnu.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

exchangeable Na^+ ($p < 0.05$). The average infiltration rate was significantly negatively correlated with ESP, exchangeable Na^+ , SAR, pH, and salt content at different levels. 3) Based on the coefficient of determination (R^2) of the models and the correlation with the saline-alkali indicators of soda saline-alkali soils with different degrees, the simulation performance of the Horton infiltration model was superior to that of the general empirical model when $\text{SAR} < 108.60$, salt content (SC) $< 10\ 568.64$ mg/kg, and electrical conductivity (EC) < 1.70 mS/cm. When the degree of salinization and alkalization exceeded this range, the general empirical model performed better. [Conclusion] The degree of soda salinization and alkalization is a key factor constraining soil infiltration capacity. The applicability of infiltration models for soils with different degrees of salinization and alkalization can be optimized based on thresholds of typical saline-alkali indicators. These findings provide a theoretical basis and methodological support for simulating water movement and managing irrigation and drainage in soda saline-alkali soil regions.

Keywords: soda saline-alkali soil; exchangeable sodium percent; sodium adsorption ratio; infiltration parameters; model applicability; Songnen Plain

Received: 2025-12-05

Revised: 2026-02-07

Accepted: 2026-03-18

Online (www.cnki.net): 2026-03-25

苏打盐碱土是指盐分组成以 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 为主、pH 通常高于 8.5 的一类盐渍土, 主要分布于我国松嫩平原, 尤其大面积集中连片分布于松嫩平原西部的大安市、通榆县等区域^[1-2]。该类土壤具有高 pH、高交换性 Na^+ 含量、高盐分含量与低渗透性的典型特征, 各因素间相互依存、互相制约, 导致其在湿润时结构紧密、水分难以渗透, 干燥时则坚硬异常, 形成所谓“刀枪不入”的障碍特性^[3]。渗透性及动态过程是盐碱地改良过程中实施“淡化肥沃层”与“障碍消减”技术的关键环节^[4], 直接影响盐碱地改良与利用的综合成效。松嫩平原作为我国苏打盐碱土的典型分布区, 同时也是东北地区粮食生产的核心区, 推进该地区盐碱地的改良与高效利用, 对保障国家粮食安全、拓展耕地后备资源及落实新一轮粮食产能提升战略具有重大意义^[5]。

入渗过程是指降水或灌溉水由地表进入土壤并再分布的过程, 不仅调控地表径流与地下径流的分配^[6-7], 也伴随水分运移影响盐分、养分及污染物的迁移, 进而与土地盐碱化、水体污染及土壤养分淋失等环境问题密切相关^[8-9]。相比于非盐碱土, 盐碱土的入渗过程直接受到盐分含量与组成、pH、碱化度 (ESP)、钠吸附比 (SAR) 等因素的调控。已有研究^[10]表明, 高矿化度咸水入渗有助于提高滨海盐土入渗速率、累积入渗量和入渗深度, 并有效提升盐分淋洗效率。而在高 pH 条件下, 土壤胶体上负电荷数量增加, 增强对 Na^+ 的吸附, 进而加剧土壤颗粒分散^[11]。当 SAR 超过 13 时, 土壤胶体吸附大量 Na^+ 引起黏粒分散并堵塞土壤孔隙, 显著降低入渗能力 (SAR) 从 5 增至 20 可导致苏打盐碱土稳定入渗速率

下降 60% 以上^[12]; ESP 从 18.0% 上升至 86.3% 则可使稳定入渗速率从 835.2 mm/d 急剧降至 2.64 mm/d, 降幅达 99.68%, 几乎呈不透水状态^[13]。由于受交换性 Na^+ 含量、孔隙结构及质地等因素影响, 盐碱土的入渗能力普遍低于非盐碱土, 且田间原位观测耗时费力^[14]。在松嫩平原苏打盐碱土区, 尽管已有研究^[15-16]证实, ESP、SAR、pH 等指标是影响土壤水分入渗的关键参数, 但现有相关结果主要源于室内控制试验或单一指标的分析。目前, 基于长时间序列、不同盐碱程度条件下的苏打盐碱土入渗过程及影响因素仍缺乏综合系统研究。尤其针对不同盐碱程度, 如何依据关键盐碱指标的明确阈值来评价入渗模型适用性仍需进一步研究。

因此, 本研究通过野外原位监测试验, 获取不同盐碱程度苏打盐碱土长时间序列入渗过程数据, 旨在揭示影响苏打盐碱土入渗的关键因素, 并依据盐碱指标阈值评价苏打盐碱土入渗过程模型的适用性, 以期为推进区域盐碱地改良中“水盐平衡”与“水盐调控”提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验研究区位于中国科学院松嫩平原西部盐碱湿地生态研究站 ($45^\circ 13' \sim 45^\circ 16' \text{N}$, $123^\circ 15' \sim 123^\circ 21' \text{E}$), 供试土壤取自试验基地周边霍林河与洮儿河下游河漫滩分布区。研究区地势低平, 海拔 120~160 m, 纵坡降为 1/5 000~1/8 000, 区域地势主要由水力运动产生的河间积水洼地和河漫滩构成^[17]。气候特征为温带半湿润向半干旱过渡的大陆性季风气候, 年平均气温为 4.3°C , 多年平均降水量为 396 mm,

降雨集中且主要集中在 6—8 月,占全年降雨量的 73%,年潜在蒸发量达 1 817 mm。区域地带性土壤为黑钙土,微地形差异导致土壤盐碱程度及其地表植被组成差异明显。

1.2 试验装置与方案

在试验区河漫滩选择典型插花状分布、盐碱化程度依次增强的 5 种盐碱地土壤,分别为农田(玉米连作)、羊草地、虎尾草地、碱蓬地和碱斑裸地,除农田土壤受长期耕作影响外,其余样地未受人类活动干扰。每种土壤样地(15 m×15 m)设置 3 个典型样点,在不破坏地表微形态条件下,清除地表枯落物后用于后续入渗试验和土壤样品采集。

本试验采用一维垂直定水头单环入渗法测定不同程度苏打盐碱土入渗过程。自制入渗仪由内径为 31 cm,外径为 46 cm,高度为 20 cm,壁厚为 1 cm 的双环组成,试验过程仅用内环。供水装置为马氏瓶,直径 16 cm,高度 100 cm,容积 20 L,瓶外壁粘贴 100 cm 软皮尺,试验过程中恒定水头控制在 3 cm。通过计时器记录不同时间间隔内马氏瓶的读数变化,据此计算入渗水量与入渗速率等参数。为同步观测入渗过程中水分的运移路径,采用亮蓝染色剂(Brilliant Blue)进行示踪,将调配好的 4 g/L 亮蓝溶液灌入马氏瓶,开展定水头入渗试验。采用染色剂示踪的目的在于观测入渗过程水分运移路径及是否存在优先流现象,本文重点探讨不同程度苏打盐碱土水分入渗过程及入渗模型的适用性。而基于染色剖面所揭示的水分运移路径细节及优先流现象的定量分析,将在本研究的基础上进行专门深入探讨。

试验开始前,用大锤将入渗仪垂直砸入土壤约 10 cm 深度,为消除击打过程中震动引起的环内壁与土壤间产生间隙,采用入渗仪外围土壤填充内壁与土壤交界面,使之略高于原土表。试验开始后,在内环加入相当于 3 cm 水头高度的溶液,体积为 2.26 L。随后打开马氏瓶出水口开关并同时计时,记录不同

入渗历时对应的马氏瓶读数(累积入渗量,mm)。数据记录遵循“先密后疏”原则,初始阶段每 30 s 记录 1 次,随入渗速率减缓,逐步将间隔调整为 1、2、3、5、10、20、30 min,及 1、2、3、5、6、12 h。当在相同时间间隔内连续 5~8 次读数基本一致或波动较小时,认为此时入渗过程已达到稳定状态,随即停止入渗试验。入渗速率计算公式为:

$$IR = \frac{\Delta V}{A \times \Delta t}$$
(1)

式中:IR 为入渗速率,mm/h;A 为内环面积,cm²;Δt 为入渗历时,h。

为分析土壤理化性质对水分入渗过程的影响,在每个试验点附近选取 3 个典型取样点,以 10 cm 间隔分层采集 0~30 cm 深度土壤样品,用于测定初始含水率、体积质量(BD, g/cm³)、总孔隙度(TP, %)及土壤盐分含量(SC, mg/kg)、碱化度(exchangeable sodium percent, ESP)、钠吸附比(sodium adsorption ratio, SAR)等盐碱特征参数。土壤体积质量和初始含水率采用烘干法,孔隙参数按照森林土壤水分-物理性质测定法测定;盐分含量中 Na⁺和 K⁺用火焰光度法测定, Ca²⁺和 Mg²⁺用原子吸收光谱法测定(GBC-906 AAS), CO₃²⁻和 HCO₃⁻用滴定法测定, Cl⁻用硝酸银滴定法测定, SO₄²⁻用硫酸钡比浊法测定;交换性钠用 CaCO₃-CO₂交换-中和滴定法测定;阳离子交换量(CEC)用乙酸钠法测定。碱化度(ESP)和钠吸附比(SAR)分别采用公式(2)和公式(3)计算,供试土壤基本理化性见表 1。

$$ESP = 100\% \times \frac{ENa^+}{CEC}$$
(2)

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])}}$$
(3)

式中:ENa⁺为交换性 Na⁺的含量,mg/kg;CEC 为阳离子交换量,mg/kg;Na⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺分别为各离子浓度含量,mg/kg。

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Basic physicochemical properties of tested soils

土壤类型	pH	ECe/ (dS·m ⁻¹)	ENa ⁺ / (mg·kg ⁻¹)	ESP/%	SAR	盐分含量/ (mg·kg ⁻¹)	黏粒含量/%	孔隙度/ %	质量含水 量/%
玉米地	8.68±0.06	0.09±0	1.61±0.09	1.09±0.10	1.24±0.11	570±20	2.40±0.13	45.40±2.11	7.24±0.53
羊草地	9.31±0.19	0.18±0.03	4.83±0.06	1.61±0.05	21.92±1.36	990±20	4.58±0.21	43.79±0.31	10.64±0.12
虎尾草地	10.35±0.17	0.78±0.01	83.03±6.74	48.86±6.11	53.95±1.33	6 380±110	3.73±0.11	42.94±0.13	13.63±0.79
碱斑裸地	10.31±0.02	1.57±0.04	150.88±10.12	65.82±3.58	105.33±4.81	8 900±110	6.02±0.10	36.03±1.70	8.10±0.94
碱蓬地	10.23±0.05	1.99±0.10	7.21±0.43	49.88±2.89	115.71±8.72	14 310±140	10.68±0.32	36.45±0.10	16.25±0.32

注:表中数据均为平均值±标准差。

1.3 入渗理论模型及适用性评价

估算入渗速率的模型主要分为理论模型和经验模型。常用的物理模型有 Philip 模型,经验模型应用较多的有 Horton 模型、Kostiakov 模型,本研究采用 Philip 模型、Horton 模型、Kostiakov 模型和通用经验模型来拟合入渗速率与时间关系曲线。

Horton 模型: $f(t)=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt}$ (4)

Philip 模型: $f(t)=0.5 St^{-0.5}+f_c$ (5)

Kostiakov 模型: $f(t)=at^b$ (6)

通用经验模型: $f(t)=a+bt^n$ (7)

式中: $f(t)$ 为土壤入渗速率,mm/h; f_c 为稳定入渗速率,mm/h; t 为入渗时间,h; a 、 b 、 n 、 k 均为模型参数。

在 SPSS 24 软件中对入渗观测数据进行拟合。模型适用性评价指标采用均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)。当模型拟合参数具有实际意义时,RMSE 值越小, R^2 越大,模型适用性越高。对最终模型预测值与实测值进行配对卡方检验(Chi-square test)。当实际值和预测值的卡方值小于临界卡方值时,则认为二者间无显著差异,模型适用于模拟苏打盐碱土水分入渗过程。

1.4 数据分析

采用 Excel 2023 和 SPSS 24 软件对数据进行统计分析,以单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不

同程度苏打盐碱土入渗过程特征参数与土壤理化性质之间的差异显著。采用 Origin 2023 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同程度苏打盐碱土入渗量特征

由表 2 可知,5 种不同盐碱程度苏打碱土入渗过程中入渗历时、累积入渗量、达到稳定入渗历时及对应的累积入渗量参数均具有明显差异。从整个入渗试验来看,盐碱程度越轻,对应土壤的入渗历时愈短,累积入渗量越大。盐碱程度最轻的玉米地砂土入渗过程持续时间最短,入渗过程持续时间为 2.83~3.08 h,累积入渗量达到 968.62~985.62 mm,而盐碱程度最强的碱蓬地土壤入渗历时为 197.01~201.00 h,入渗历时是玉米地土壤的 63.96~71.02 倍,累积入渗量为 125.00~191.00 mm,仅为玉米地土壤的 12.91%~19.72%,碱斑裸地土壤不及玉米地土壤累积入渗量的 23.36%。结合图 1 来看,当入渗历时<34.15 h 时,相同入渗历时条件下,累积入渗量大小为玉米地土壤>羊草地土壤>碱斑裸地土壤>虎尾草地土壤>碱蓬地土壤,累积入渗量大小与土壤盐碱程度有明显的一致性。从达到稳定入渗历时来看,除盐碱程度较轻的玉米地和羊草地土壤差异不显著($p>0.05$),其他 3 种土壤达到稳定入渗对应的入渗历时差异显著($p<0.05$)。达到稳定入渗状态时,碱斑裸地累积入渗量显著高于其他 4 种土壤($p<0.05$)。

表 2 不同程度苏打盐碱土入渗历时及累积入渗量
Table 2 Infiltration duration and cumulative infiltration of soda saline-alkali soils with different degrees

土壤类型	入渗历时/h	累积入渗量/mm	达到稳定入渗历时/h	达到稳定入渗时的累积入渗量/mm
玉米地	2.83~3.08	968.62~985.62	0.86±0.17a	246.33±26.50c
羊草地	3.50~5.00	928.62~1 038.62	1.33±0.14a	329.20±67.84a
虎尾草地	31.33~54.83	490.62~585.12	26.17±2.77b	274.00±130.05c
碱蓬地	197.01~201.00	125.00~191.00	104.83±14.25c	116.33±11.24c
碱斑裸地	198.50~257.50	301.00~454.00	66.13±12.54d	290.67±72.22b

注:同列不同小写字母表示不同土壤类型间差异显著($p<0.05$)。下同。

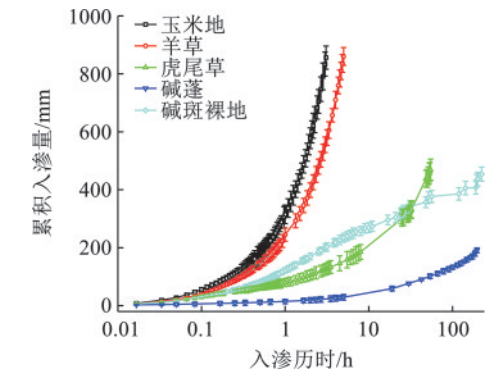


图 1 不同程度苏打盐碱土累积入渗量

Fig.1 Cumulative infiltration of soda saline-alkali soils with different degrees

2.2 不同程度苏打盐碱土入渗速率特征

由图 2 可知,5 种不同程度苏打盐碱土入渗速率均随入渗历时的增加而呈上下波动-急剧下降-逐步稳定变化规律。由表 3 可知,盐碱程度最强的碱蓬地土壤初始入渗速率最小,仅为(17.11±9.53) mm/h,与其他 4 种土壤初始入渗速率差异显著($p<0.05$);玉米地等 4 种土壤初始入渗速率为 63.49~111.88 mm/h,相互间差异不显著($p>0.05$)。从整个入渗过程中平均入渗速率来看,玉米地和羊草地土壤平均入渗速率(63.79~74.74 mm/h)显著高于虎尾草、碱斑裸地和碱蓬地土壤(1.66~14.06 mm/h) ($p<$

0.05)。随盐碱化程度增强,达到稳定入渗状态时,5 种土壤稳定入渗速率较初始入渗速率分别下降 41.81%、64.87%、97.20%、99.24%、99.59%,盐碱程度最重的碱蓬地稳定入渗速率仅为 0.13 mm/h。

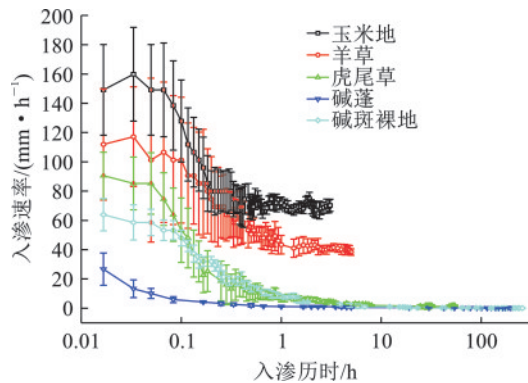


图2 不同程度苏打盐碱土入渗速率

Fig.2 Infiltration rates of soda saline-alkali soils with different degrees

2.3 不同程度苏打盐碱土入渗特征参数与理化性质的相关性

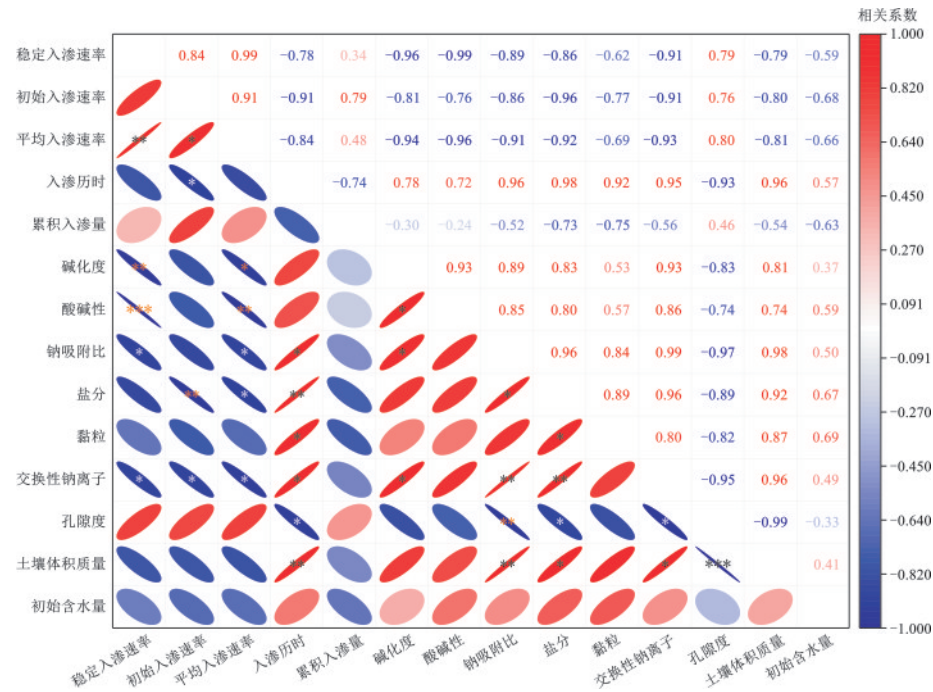
相关性分析表明,入渗过程参数与多个土壤剖面理化性质呈显著相关(图3)。初始入渗速率(IIR)与交换性 Na⁺和盐分含量(SC)分别呈显著($p<0.05$)

和极显著负相关($p<0.01$),稳定入渗速率(SIR)分别与碱化度(ESP)、pH呈极显著负相关($p<0.01$ 、 $p<0.001$),与交换性 Na⁺呈显著负相关($p<0.05$),而整个入渗过程中的平均入渗速率与包括碱化度、交换性 Na⁺、钠吸附比、pH和盐分含量在内的盐碱化指标均呈不同程度的显著负相关。达到稳定入渗状态历时与钠吸附比(SAR)、黏粒含量(CC)、交换性 Na⁺含量呈显著正相关($p<0.05$),而与盐分含量和体积质量呈极显著正相关($p<0.01$),但与孔隙度表现出显著负相关($p<0.05$)。孔隙度与盐碱化指标钠吸附比、盐分含量、交换性 Na⁺含量均存在显著的负相关。

表 3 不同程度苏打盐碱土入渗速率特征

Table 3 Infiltration rate characteristics of soda saline-alkali soils with different degrees

土壤类型	初始入渗速率/ (mm·h ⁻¹)	平均入渗速率/(mm·h ⁻¹)	稳定入渗速率/(mm·h ⁻¹)
玉米地	111.88±33.26a	74.74±4.88a	65.10±4.29a
羊草地	136.39±44.68a	63.79±8.47a	47.92±6.44b
虎尾草地	63.49±23.24a	12.06±1.29b	1.78±0.44c
碱蓬地	17.11±9.53b	1.66±0.73b	0.13±0.10c
碱斑裸地	67.50±21.55a	14.06±4.54b	0.28±0.13c



注:*表示 $p\leq 0.05$; **表示 $p\leq 0.01$; ***表示 $p\leq 0.001$ 。

图3 苏打盐碱土入渗特征参数与理化性质相关性

Fig.3 Correlation between infiltration characteristic parameters and physicochemical properties of soda saline-alkali soils

2.4 苏打盐碱土土壤水分入渗过程模拟及模型适用性评价

由表4可知,4个经典模型中,除 Kostikov模型与通用经验模型对玉米地入渗速率的拟合决定系

数(R^2)较低(分别为0.77、0.82)之外,其余模型对不同程度苏打盐碱土水分入渗过程的拟合均具有较高的 R^2 和较低的均方根误差(RMSE)。Philip模型的 R^2 为0.82~0.93,参数S(吸渗率)为5.22~28.11。

王幼奇等^[18]研究指出, S 值可反映土壤水分入渗能力,其值越大,入渗能力越强。本研究所测 S 值从大到小依次为羊草地土壤>虎尾草地土壤>玉米地土壤>碱斑裸地土壤>碱蓬地土壤。尽管除碱蓬地土壤的入渗能力最低与 S 值表现一致外,其余几种土壤的 S 值排序与其实测入渗能力明显不符,表明 Philip 模型不适于描述供试土壤的入渗过程。Kostiakov 模型的 R^2 为 0.77~0.99, RMSE 为 0.46~10.59; 模型参数 a 为 0.85~68.97, b 为 -0.21~-0.84。根据王幼奇等^[18]的研究, a 影响初始入渗

速率, b 反映水分入渗的衰减程度。本研究中, a 与 b 的变化趋势与实际入渗速率的变化一致, 说明该模型具有一定适用性。通用模型的 R^2 为 0.82~0.99, RMSE 为 0.34~9.27; 参数 a 为 -3.16~50.10, b 为 0.66~24.98。该模型对碱蓬群落土壤的拟合效果最佳, R^2 达 0.99, RMSE 仅为 0.34。比较表明, Horton 模型对玉米地、羊草群落、虎尾草群落和碱斑裸地 4 种苏打盐碱土入渗过程拟合效果良好, 而通用经验模型则对盐碱程度较重的碱蓬地水分入渗过程拟合效果最优。

表 4 4 个经典模型对供试土壤水分入渗过程适用性评价参数
Table 4 Evaluation parameters of applicability of four classical models to water infiltration process of tested soils

土壤类型	Horton 模型			Philip 模型			Kostiakov 模型				通用经验模型				
	k	R^2	RMSE	S	R^2	RMSE	a	b	R^2	RMSE	a	b	n	R^2	RMSE
玉米地	6.11	0.93	7.20	20.76	0.82	13.32	68.97	-0.21	0.77	10.59	50.10	19.80	0.46	0.82	9.27
羊草地	3.27	0.97	3.45	28.11	0.95	7.45	48.74	-0.26	0.94	5.09	23.35	24.98	0.42	0.95	4.38
虎尾草地	5.45	0.95	5.10	25.39	0.91	7.58	10.82	-0.58	0.91	6.39	-3.16	13.50	0.53	0.91	6.18
碱蓬地	15.88	0.92	1.52	5.22	0.93	1.57	0.85	-0.84	0.99	0.46	0.39	0.66	0.89	0.99	0.34
碱斑裸地	3.25	0.97	3.34	22.53	0.92	4.85	12.25	-0.47	0.93	4.74	-4.28	16.34	0.40	0.94	4.28

为明确模型评价参数与不同苏打盐碱土盐碱指标间的关联,进一步分析拟合决定系数(R^2)随交换性钠(ESP)、钠吸附比(SAR)、pH、盐分含量(SC)与电导率

(EC)的变化规律。由图 4 可知,在 $ESP < 48.88\%$ 且 $pH < 10.24$ 条件下, Horton 模型的拟合 R^2 始终高于通用经验模型,超出该范围时,2 个模型未见一致规律。

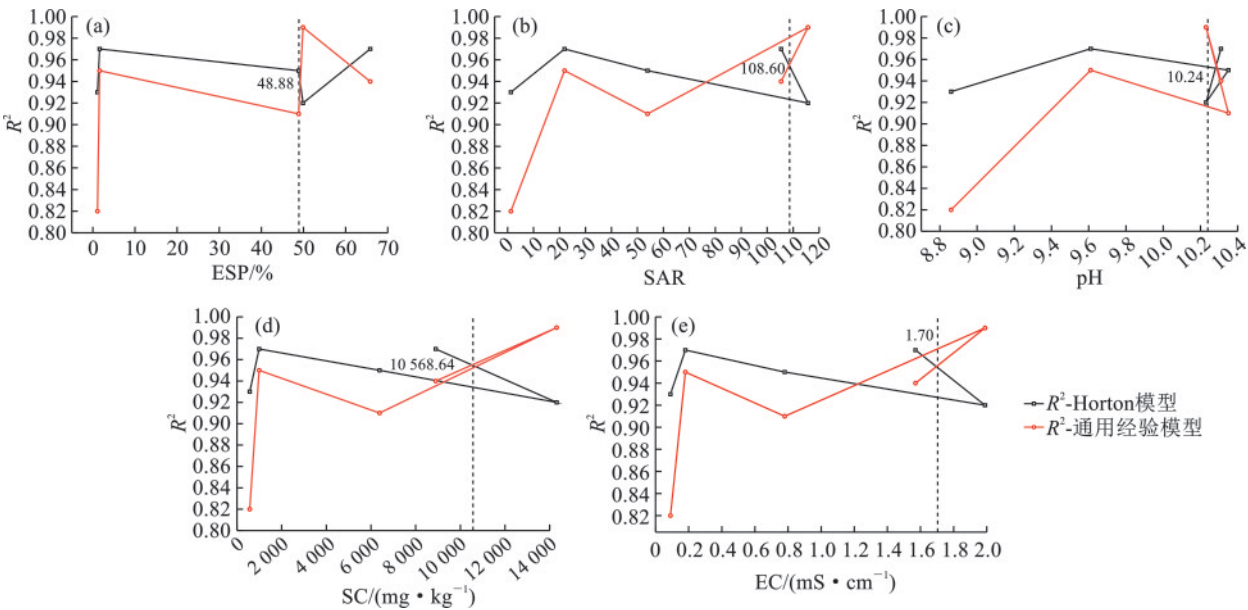


图 4 模型拟合 R^2 与关键盐碱指标的关联性
Fig.4 Relationship between model fitting R^2 and key saline-alkali indicators

当 $SAR < 108.60$ 、 $SC < 10\ 568.64\ \text{mg/kg}$ 、 $EC < 1.70\ \text{mS/cm}$ 时, Horton 模型的拟合效果同样稳定优于通用经验模型,适用于模拟本研究中的玉米地、羊草地、虎尾草地及碱斑裸地的土壤入渗过程; 而当 $SAR \geq 108.60$ 、 $SC \geq 10\ 568.64\ \text{mg/kg}$ 、 $EC \geq 1.70\ \text{mS/cm}$ 时, 通用经验模型的拟合 R^2 则一致高于 Horton 模型, 更适用于模拟碱蓬地入渗过程。因此, 上述临界值可作为判别 Horton 模型与通用经验模型在模拟不同程度苏打盐碱土入渗过程中适用性的依据。

对 2 个模型模拟效果进行实测值与预测值的卡

方检验。由图 5 可知,2 个模型的预测值与实测值之间均无显著差异(卡方值均小于相应临界值),表明 2

个模型对模拟不同盐碱条件下的苏打盐碱土入渗过程具有一定的适用性。

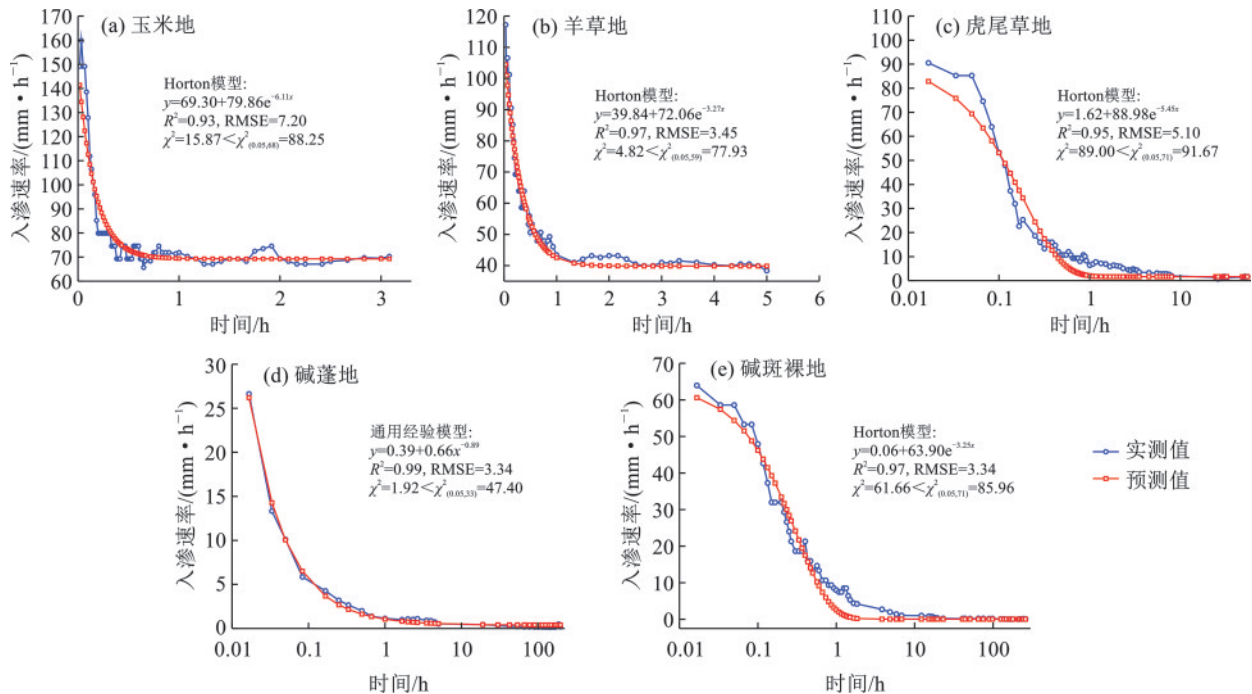


图 5 模型实测值与预测值卡方检验对比

Fig.5 Comparison between model predicted values and measured values using Chi-Square test

3 讨论

3.1 入渗过程特征参数分析

表征入渗过程的参数主要包括入渗速率(如初始入渗速率、稳定入渗速率和平均入渗速率)及累积入渗量等。其中,稳定入渗速率是表征土壤水力特征的关键参数^[19]。该值越大,表明土壤入渗能力越强,能够将更多水分转化为土壤水和地下水,从而有助于减少地表径流和水土流失^[20]。本研究测得稳定入渗速率为 0.13~65.10 mm/h,且不同程度苏打盐碱土间差异显著,与王遵亲等^[13](0.11~34.8 mm/h)、周鑫等^[21](0.24 mm/h)、杨艳丽等^[22](7.2~43.2 mm/h)、廖栩等^[16](1.1 mm/h)的研究结果较为接近,但与杨洪涛等^[15](146.1~300 mm/h)研究结果差异较大。该差异可能与松嫩平原苏打盐碱土自身的时空异质性有关。受微地形、植被分布和土壤质地等因素影响,该区域土壤性质空间变异显著,素有“一步三换土”之说^[23],从而导致土壤饱和导水率、水分特征曲线等水力特征参数在空间分布上也呈明显差异。入渗历时也常被用作指示土壤渗透能力的间接指标,入渗时间越短,累积入渗量越大,通常代表入渗性能越好。秦耀东^[24]研究指出,不同类型土壤达到稳定入渗状态的时间一般不超过 2~3 h。本研究中,玉米地砂土和羊草地壤砂土在 0.86~1.33 h 达到稳定入渗状态,而盐碱化程度较高的虎尾草地、碱斑裸地及碱蓬地则分别需要 26.17、66.13、

104.83 h。结合表 1 数据,其原因可归纳为 2 个方面:一方面,玉米地为砂质土,砂粒高达 86.94%,质地较粗且本身盐碱化程度轻,因而入渗速率大,水分更容易下渗;羊草地属于壤质砂土,盐碱程度略高于玉米地,质地稍细,入渗速率也相应较低;另一方面,虎尾草、碱斑裸地和碱蓬地的土壤 ESP 为 48.86%~65.82%,SAR 从 53.95 上升至 115.71,同时,土壤质地由壤砂土逐渐过渡为砂质壤土,质地趋于细化。在盐碱化程度与土壤质地的共同影响下,样地土壤达到稳定入渗所需时间更长,而相应的累积入渗量反而更小。

3.2 入渗过程影响因素分析

障碍性苏打盐碱土的入渗过程受其盐碱特性的显著调控。本研究表明,入渗参数与盐碱化指标间存在显著相关性。稳定入渗速率与 SAR、ESP、交换性 Na^+ 及 pH 呈显著负相关,其根本原因在于高钠高碱环境驱动的黏粒分散机制,即当钠离子(Na^+)置换土壤胶体上的钙镁离子后,增大双电层厚度与 Zeta 电位,导致胶体间排斥力增强^[25-26]。加之高 pH 环境(通常 >8.5)下羟基铝等物质的溶解,破坏维持团聚体的“胶结”作用,最终引发黏粒的强烈分散,是导致入渗性能下降的化学起点^[25]。该化学过程直接重塑土壤的物理结构,主要表现在入渗初期速率呈波动式下降,正是由于表层土壤被水分湿润后,分散的黏粒在入渗水流的驱动下迁移并在孔隙沉积,造成“物

理性”孔隙堵塞^[27-28]。本研究也证实,总孔隙度与SAR、交换性 Na^+ 呈显著负相关。更关键的是,盐碱化不仅降低总孔隙度,更劣化孔隙结构。微结构研究^[29-30]表明,盐碱土孔隙常以 $<2\ \mu\text{m}$ 的微孔和超微孔为主导(占比可超过86%),而水分传输的关键通道[大中孔隙($>30\ \mu\text{m}$)]则严重匮乏^[31]。该种致密的、类似“砖墙”的微观结构^[29],导致水分传输通道狭窄且曲折,极大增加导水阻力,从而解释稳定入渗速率降低与入渗水量减少的现象^[32-33]。盐分含量和电导率(EC)的影响则呈现复杂性。一方面,高浓度可溶性盐通过渗透压压缩双电层,抑制黏粒分散,在特定条件下可能缓解钠的负面效应;另一方面,本研究^[34]和Zhu等^[34]所示,高盐分常与平均入渗速率呈负相关。可能是由于盐分结晶在孔隙中造成的物理堵塞,或盐分与钠的耦合作用加剧结构恶化。初始入渗速率对表层盐分和交换性 Na^+ 尤为敏感,反映盐碱障碍对水分“第一道门槛”的强烈抑制作用。最终,所有微观过程的不利累积,体现在宏观的入渗历时上。达到稳定入渗所需历时与盐分含量、体积质量及SAR呈显著正相关,表明盐碱化程度越高,土壤结构在湿润过程中的破碎与重建达到新平衡所需时间越长。

3.3 入渗模型适用性分析

为评估不同盐碱化程度苏打碱土入渗过程,本研究尝试采用多种经典模型进行模拟,经验模型(如Horton模型、通用经验模型、Kostiakov模型)获得较好的拟合精度,而基于恒定参数假设的物理模型(如Philip模型)则出现参数失准的现象。与周蓓蓓等^[35]在新疆极端干旱区盐碱土研究结果一致,即Philip模型在入渗历时较长的条件下模拟值偏差较大。该适用性差异的内在原因主要在于,一方面,经典模型的物理假设未能充分考虑盐碱土在入渗过程中动态变化的水力性质;另一方面,苏打型盐碱土土壤颗粒的分散性决定土壤物理结构在入渗过程的动态变化性,如孔隙结构的量(数量、密度)和质(连通性、大小)^[31],从而影响稳定入渗速率、入渗历时等参数。具体而言,在高钠吸附比(SAR)条件下,交换性 Na^+ 引起的黏粒分散与迁移,导致土壤孔隙在入渗过程中持续被堵塞,使得关键参数如饱和导水率(K_s)并非恒定,而是随时间显著下降^[36]。直接违背Philip等模型的根本假设,从而限制其在此类土壤中的物理合理性与适用性。在质地黏重、孔隙结构不良的土壤中,Horton模型因其能描述入渗率随时间衰减至稳定值的物理过程,常表现出更好的拟合效果^[37-38]。本研究筛选出Horton模型和通用经验模型2个优选模型,并对比拟合决定系数(R^2)与关键盐碱指标的关联

性发现,二者的拟合优度在盐碱程度超过某一阈值后发生反转,表明经验模型对土壤结构动态变化的非线性响应更具灵活性,当盐碱化程度较低(如SAR、EC低于特定阈值)时,土壤结构在入渗过程中的变化相对平缓,Horton模型基于指数衰减的物理框架能较好地模拟入渗率趋近于1个相对稳定值的过程。然而,当盐碱化程度超过该临界阈值时,高钠环境引发的黏粒分散与孔隙堵塞效应急剧增强,土壤导水能力的衰减不再呈现简单的指数规律,而是可能表现为更复杂、速率更快的非线性下降。相反,通用经验模型因其纯经验特性,其参数不受特定物理过程的严格约束,数学形式(如幂函数)在拟合这种剧烈、非标准的变化曲线时往往表现出更强的灵活性与适应性,从而在拟合优度上实现反超。“阈值反转”现象深刻揭示了在高度退化的盐碱土中,水分入渗已由经典物理过程主导,转变为由快速演变的土壤结构所控制的复杂过程,模型的选择必须考虑土壤退化状态的阶段性特征。

为构建更能阐释盐碱土入渗规律的模型,未来的改进应聚焦于耦合土壤退化的动态过程。具体方向包括:1)参数动态化。将模型的最终入渗率、衰减系数等关键参数,从常数修正为随累积入渗量或关联黏粒分散程度的盐碱指标(如 Na^+ 含量、SAR)变化的土壤传递函数。2)结构过程化。在模型框架中引入描述“孔隙堵塞-导水率衰减”的微分模块,从根本上体现盐碱土入渗的核心物理机制。例如,可借鉴通过考虑土壤水分变化来改进Horton方程的思路,将盐碱指标作为驱动参数变化的内生变量。通过这种机理性的改进,模型才能超越单纯的经验拟合,真正成为预测和评估盐碱土水盐运移与改良效果的有力工具。

4 结论

1)稳定入渗速率、累积入渗量及初始入渗速率均随pH、ESP、SAR升高明显下降。盐碱化程度越强,土壤达到稳定入渗所需历时越长,相应的累积入渗量越小。

2)稳定入渗速率与碱化度、钠吸附比、交换性 Na^+ 含量及pH均呈显著负相关。达到稳定入渗状态所需的时间受盐碱化程度与质地的共同影响,与钠吸附比和黏粒含量呈显著正相关,与盐分含量和体积质量呈极显著正相关。

3)确定基于模型决定系数(R^2)与苏打盐碱土盐碱指标关联的入渗过程模型适用性依据。当 $\text{SAR}<108.60$ 、 $\text{SC}<10\ 568.64\ \text{mg/kg}$ 、 $\text{EC}<1.70\ \text{mS/cm}$ 时,入渗模型采用Horton模型的拟合效果优于通用经验模型;当盐碱程度超过此范围时,采用通用经验模型更优。

参考文献:

- [1] 姚东恒,廖宇波,孔祥斌,等.基于“三层”融合的松嫩平原盐碱地资源特征[J].农业工程学报,2022,38(23):247-257.
Yao Dongheng, Liao Yubo, Kong Xiangbin, et al. Characteristics of saline-alkali land and resources based on three-layer fusion of saline-alkali soil in Songnen Plain of China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(23):247-257.
- [2] Wang Guangzhou, Ni Gang, Feng Gu, et al. Saline-alkali soil reclamation and utilization in China: Progress and prospects[J].Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2024, 11(2):216-228.
- [3] Lei Sihong, Jia Xiaoxu, Zhao Chunlei, et al. A review of saline-alkali soil improvements in China: Efforts and their impacts on soil properties [J]. Agricultural Water Management, 2025, 317: e109617.
- [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 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.
- [5] 李保国.新时代下盐碱地改良与利用的科学之路[J].中国农业综合开发,2022(1):8-9.
Li Baoguo. The scientific way of saline-alkali land improvement and utilization in the new era[J].Agricultural Comprehensive Development in China, 2022(1):8-9.
- [6] Zhang Jun, Wang Sheng, Fu Zhiyong, et al. Characterizing rapid infiltration processes on complex hillslopes: Insights from soil moisture response to rainfall events[J]. Journal of Hydrology, 2024, 644: e132110.
- [7] 苏童童,阳辉,王基扬,等.我国优先流影响因素及其生态水文效应研究进展[J].中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(11):2107-2117.
Su Tongtong, Yang Hui, Wang Jiyang, et al. Research progress on influencing factors of preferential flow and its ecohydrological effects in China[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(11):2107-2117.
- [8] 刘昊.长期残留农药对黄土渗透特性的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2022:49.
Liu Hao. Study on osmotic characteristics of soil contaminated by long-term pesticide residues [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022:49.
- [9] Wang Peijun, Lin Xiaolan, Liu Qi, et al. Interactions between flue gas desulfurization gypsum and biochar on water infiltration characteristics and physicochemical properties of saline-alkaline soil[J].Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(11):e1273.
- [10] Guo Kai, Liu Xiaojing. The successive infiltration of various saline waters accelerates the infiltration processes and enhances the salt leaching in a coastal saline soil [J].Land Degradation and Development, 2023, 34(16):5083-5095.
- [11] 罗雪娇,王志春,杨帆.苏打盐碱土壤黏粒分散特征研究进展[J].土壤,2024,56(2):255-263.
Luo Xuejiao, Wang Zhichun, Yang Fan. Research progress on clay dispersion characteristics of saline-sodic soil [J].Soils, 2024, 56(2):255-263.
- [12] 杨艳,王全九.微咸水入渗条件下碱土和盐土水盐运移特征分析[J].水土保持学报,2008,22(1):13-19.
Yang Yan, Wang Quanjiu. Analysis water and salt transport characteristic of irrigation with saline water on alkaline and saline soil [J].Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(1):13-19.
- [13] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993:250-300.
Wang Zunqin, Zhu Shouquan, Yu Renpei, et al. Saline soil in China[M].Beijing: Science Press, 1993:250-300.
- [14] 白玉锋.苏打碱土土壤水分入渗过程及水盐运移特征[D].哈尔滨:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2021.
Bai Yufeng. Characteristics of sodic alkaline soil water infiltration process and water-salt transport [D]. Harbin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [15] 杨洪涛,王志春,杨帆,等.不同植被条件下苏打盐渍土体积质量与水分入渗速率差异[J].土壤与作物,2015,4(1):12-18.
Yang Hongtao, Wang Zhichun, Yang Fan, et al. Soil bulk density and water infiltration rate under different vegetations in saline-sodic soils [J].Soil and Crop, 2015, 4(1):12-18.
- [16] 廖栩,杨帆,王志春,等.腐解秸秆和脱硫石膏添加对苏打盐渍土淋洗脱盐效率的影响[J].土壤与作物,2020,9(1):74-82.
Liao Xu, Yang Fan, Wang Zhichun, et al. Effects of decomposed straw and desulfurized gypsum on salt leaching in saline-sodic soils[J].Soil and Crop, 2020, 9(1):74-82.
- [17] 赵兰坡,王宇,冯君,等.松嫩平原盐碱地改良利用:理论与技术[M].北京:科学出版社,2013:1-11.
Zhao Lanpo, Wang Yu, Feng Jun. Improvement and utilization of saline-alkali land in Songnen Plain: Theory and technology[M].Beijing: Science Press, 2013:1-11.
- [18] 王幼奇,包维斌,赵云鹏,等.生物炭添加对淡灰钙土水分入渗过程的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(12):60-65.
Wang Youqi, Bao Weibin, Zhao Yunpeng, et al. Amending soil by biochar reduces the ability of the soil to infiltrate water [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(12):60-65.
- [19] Szabó B, Kolcsár R A, Mészáros J, et al. National soil hydrologic groups map for environmental applications using data-driven and expert-based methods[J].Scientific

- Data, 2025, 12; e1590.
- [20] Jabro J D, Stevens W B, Iversen W M, et al. Tillage effects on soil hydraulic parameters estimated by Brooks-corey function in clay loam and sandy loam soils [J]. *Agronomy*, 2025, 15(10): e2325.
- [21] 周鑫, 刘世虎, 窦森, 等. 不同改良剂对苏打草甸碱土渗透性的影响[J]. *吉林农业科学*, 2012, 37(5): 23-24.
- Zhou Xin, Liu Shihu, Dou Sen, et al. Effect of different soil modifier on improving soda meadow alkaline soil [J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2012, 37(5): 23-24.
- [22] 杨艳丽, 李秀军, 陈国双, 等. 生物质炭与盐酸配施对苏打盐渍土理化性状的影响研究[J]. *土壤与作物*, 2015, 4(3): 113-119.
- Yang Yanli, Li Xiujun, Chen Guoshuang, et al. Effects of biochar on saline-sodic soil physical and chemical properties [J]. *Soil and Crop*, 2015, 4(3): 113-119.
- [23] 杨帆, 罗金明, 王志春, 等. 松嫩平原盐渍化区水盐转化规律与调控机理[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014: 224-230.
- Yang Fan, Luo Jinming, Wang Zhichun. Water-salt transformation law and regulation mechanism in salinization area of Songnen Plain [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014: 224-230.
- [24] 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 97-110.
- Qin Yaodong. Soil physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 97-110.
- [25] Minhas P S, Qadir M. Effects of irrigation with saline, saline-sodic and alkali waters on soils [M]// *Irrigation Sustainability with Saline and Alkali Waters*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024: 69-110.
- [26] Ding Wuquan, He Jiahong, Wang Lei, et al. Effect of nonclassical polarization of Na^+ and K^+ on the stability of soil colloidal particles in suspension [J]. *Surface Review and Letters*, 2017, 24(7): e1850019.
- [27] Awadat A M, Zhu Yingcan, Bennett J M, et al. The impact of clay dispersion and migration on soil hydraulic conductivity and pore networks [J]. *Geoderma*, 2021, 404: e115297.
- [28] 王晓瑶, 樊秀峰, 简文彬, 等. 碎石土细颗粒迁移特征及优先流形成路径[J]. *工程地质学报*, 2024, 32(2): 387-396.
- Wang Xiaoyao, Fan Xiufeng, Jian Wenbin, et al. Migration characters of gravel soil fine particles and the formation path of preferential flow [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32(2): 387-396.
- [29] Li Kesheng, Geng Yuhan, Li Quanxin, et al. Comprehensive microstructural characterization of saline-alkali soils in the Yellow River Delta, China [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 67(3): 301-311.
- [30] Liu Chuanxiao, Li Kesheng, Ma Depeng. Construction and engineering application of salt-discharging model for local saline-alkali soil with compact structure in the Yellow River Delta [J]. *Applied and Environmental Soil Science*, 2020, 2020: e2906747.
- [31] 周宾, 胡树文. 不同种稻年限对苏打盐碱土孔隙和入渗性能的影响[J]. *土壤学报*, 2023, 60(1): 99-105.
- Zhou Bin, Hu Shuwen. Effect of different rice planting years on pore and infiltration properties of soda saline-alkali soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(1): 99-105.
- [32] Ju Xinni, Gao Lei, She Dongli, et al. Impacts of the soil pore structure on infiltration characteristics at the profile scale in the red soil region [J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 236: e105922.
- [33] Guo Ziqi, Li Peng, Yang Xiaomei, et al. Soil texture is an important factor determining how microplastics affect soil hydraulic characteristics [J]. *Environment International*, 2022, 165: e107293.
- [34] Zhu Hongyan, Zheng Bingyan, Zhong Weizheng, et al. Infiltration and leaching characteristics of soils with different salinity under fertilizer irrigation [J]. *Agronomy*, 2024, 14(3): e553.
- [35] 周蓓蓓, 侯亚玲, 王全九. 枯草芽孢杆菌改良盐碱土过程中水盐运移特征[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(6): 104-110.
- Zhou Beibei, Hou Yaling, Wang Quanjiu. Characteristics of water and salt migration in process of improving saline alkali soil with *Bacillus subtilis* [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(6): 104-110.
- [36] Basile A, Buttafuoco G, Mele G, et al. Complementary techniques to assess physical properties of a fine soil irrigated with saline water [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(7): 1797-1807.
- [37] 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 Xuanming, Dai Cuiting, Li Zhaoxia, 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.
- [38] 张贤林, 冯梦蝶, 何丙辉, 等. 喀斯特槽谷区不同土地利用方式下土壤入渗特征及适宜模型[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(4): 34-41.
- Zhang Xianlin, Feng Mengdie, He Binghui, et al. Soil infiltration characteristics and suitable models under different land use types in karst trough-valley region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(4): 34-41.