



引文格式: 魏凯迎, 黄金廷. 不同浓度 NaCl 土壤-地下水蒸发积盐规律: (I) 物理实验[J]. 西北地质, 2026, 59(2): 304-315. DOI: 10.12401/j.nwg.2025171

Citation: WEI Kaiying, HUANG Jinting. Evaporation-Induced Salt Precipitation in Soil-Groundwater System under Different Concentrations of NaCl : (I) Physical Experiment[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(2): 304-315. DOI: 10.12401/j.nwg.2025171

不同浓度 NaCl 土壤-地下水蒸发积盐规律: (I) 物理实验

魏凯迎, 黄金廷*

(西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 土壤-地下水蒸发积盐在旱区广泛存在, 但咸水与纯水的蒸发过程是否相同尚无统一认识, 限制了人们对土壤-地下水蒸发积盐的深刻理解。为探明不同浓度 NaCl 的土壤-地下水蒸发积盐的阶段划分及其主控因素, 本研究开展室内土柱实验, 介质为石英砂, NaCl 浓度分别为 0 g/L、1 g/L、3 g/L、10 g/L、50 g/L, 各浓度设两组平行实验, 共 10 个土柱。实验历时 43 d, 记录蒸发量, 监测气温、表面温度和剖面温度, 记录表面积盐变化, 并测定表面盐层质量。结果表明: ①纯水蒸发过程与前人研究一致, 划分为 I 恒速/高速 (1~18 d)、II 过渡/减速 (18~37 d)、III 扩散/低速阶段 (37~43 d) 3 个阶段。②咸水蒸发也可划分为 3 个阶段, 但各阶段的起始时间与强度随 NaCl 浓度变化; 浓度越大, 第 I 阶段持续时间越短, 第 III 阶段越早开始, 浓度为 1 g/L、3 g/L、10 g/L 和 50 g/L 的盐水蒸发第 I 阶段持续时间分别为 17 d、13 d、7 d 和 4 d, 第 III 阶段开始时间分别是第 36 d、31 d、23 d、17 d; 中、重度咸水 (≥ 10 g/L) 因表层盐壳覆盖更早进入第 III 阶段, 导致累积蒸发量降低; 两组平行实验的累积蒸发量取平均值, 纯水、1 g/L、3 g/L、10 g/L 和 50 g/L 分别为 228.25 cm、131.92 cm、117.45 cm、109.53 cm、29.16 cm。③蒸发主控因子随浓度与蒸发阶段变化: 纯水、淡水 (1 g/L)、轻度咸水 (3 g/L) 蒸发早期受温度势主控; 中度咸水 (10 g/L) 过渡期温度势与基质势并重, 溶质势开始增强并参与抑制; 重度咸水 (50 g/L) 后期以溶质势为主。

关键词: 土壤盐渍化; 水-热-溶质运移; 土柱实验; 蒸发积盐

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)02-0304-12

Evaporation-Induced Salt Precipitation in Soil-Groundwater System under Different Concentrations of NaCl : (I) Physical Experiment

WEI Kaiying, HUANG Jinting*

(School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

收稿日期: 2026-01-20; 修回日期: 2026-02-05; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金(41672250、42177076), 陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF05-09)联合资助。

作者简介: 魏凯迎 (1999-), 女, 硕士生研究生, 研究方向为水资源合理开发利用与生态保护。E-mail: wkying4319@163.com。

* 通讯作者: 黄金廷 (1979-), 男, 博士, 教授, 博士/硕士研究生导师, 主要从事水资源合理开发利用与生态保护研究工作。E-mail: hjinting@xust.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

Abstract: Evaporation-induced salt precipitation in the soil-groundwater system is widespread in arid regions. However, there is no consensus on whether the temporal stage division of evaporation for saline water is consistent with that for pure water, which limits a deeper understanding of evaporation-induced salt precipitation in soil-groundwater system. To clarify the stage division and the controlling factors of evaporation-induced salt precipitation under different NaCl concentrations, indoor soil-column experiments were conducted using quartz sand as the porous medium. Five concentrations were tested: 0, 1, 3, 10, and 50 g/L NaCl. Two parallel replicates were performed for each concentration, giving a total of ten soil columns. The experiment lasted 43 days. Evaporation was recorded, air temperature, surface temperature and profile temperature were monitored, surface salt precipitation was documented, and the mass of the surface salt crust was measured. The results show that: ① The evaporation of pure water is consistent with previous studies and can be divided into three stages: Stage I, constant-rate or high-rate evaporation (days 1-18); Stage II, transitional or falling-rate evaporation (days 18-37); and Stage III, diffusion-limited or low-rate evaporation (days 37-43). ② Evaporation of saline water can also be divided into three stages, but the onset time and intensity of each stage vary with NaCl concentration. With increasing concentration, Stage I becomes shorter and Stage III starts earlier. For 1, 3, 10, and 50 g/L, Stage I lasted 17, 13, 7 and 4 days, respectively, and Stage III started on days 36, 31, 23 and 17, respectively. For moderate to high saline water (≥ 10 g/L), earlier development of a surface salt crust led to an earlier transition to Stage III and reduced cumulative evaporation. Using the mean cumulative evaporation of the two replicates, the values for 0, 1, 3, 10, and 50 g/L were 228.25, 131.92, 117.45, 109.53, and 29.16 cm, respectively. ③ The controlling factors vary with both concentration and evaporation stage: temperature potential dominated the early-stage evaporation for pure water, freshwater (1 g/L) and mildly saline water (3 g/L); during the transitional stage for moderately saline water (10 g/L), temperature potential and matric potential were both important, while solute potential became stronger and began to contribute to evaporation suppression; for highly saline water (50 g/L), solute potential dominated in the later stage.

Keywords: soil salinization; water-heat-solute transport; soil column experiment; evaporation-induced salt precipitation

最新遥感监测数据显示, 中国盐渍化土壤总面积达 36 万 km^2 , 其中干旱区占比达 69.03%, 且呈现年均 1.47% 的增加速率(杨真等, 2015; 杨劲松等, 2022)。土壤盐渍化作为全球性问题, 其形成与蒸发驱动的水盐运移密切相关(王文科等, 2018; Joseph et al., 2020; 赵作章等, 2023; Jannesarahmadi et al., 2024)。

现有研究表明, 纯水蒸发过程可划分为 3 个阶段: ①恒速/高速阶段(I), 表层湿润、蒸发受大气需水量控制; ②过渡/减速阶段(II), 表层干化、毛细水补给受限, 速率下降; ③扩散/低速受限阶段(III), 表层干枯、蒸发受气相扩散或薄层传质控制(Lehmann et al., 2008; Shokri et al., 2011; 唐朝生等, 2011; Or et al., 2013; Han et al., 2013; Mosthaf et al., 2014; 林宗泽等, 2021; 贾振江等, 2023)。咸水蒸发因积盐与盐壳形态演化, 导致阶段划分出现不同情况, 多数学者用 3 个阶段来描述(Nachshon et al., 2011; Dong et al., 2021; 唐洋等, 2022; Zhang et al., 2023; 周凤玺等, 2024), 但也有学者将其

划分为 4 个或更多阶段(Li et al., 2021; 刘世元, 2024; 靳芳等, 2024; Jannesarahmadi et al., 2024), 可见咸水蒸发阶段的划分尚无统一论。

土壤-地下水咸水蒸发主要受离子组分与浓度、地下水埋深、介质性质和大气需水能力等多因素影响(袁磊等, 2021)。前人研究表明: 离子组分与浓度决定析盐矿物类型, 改变盐壳孔隙结构, 影响蒸发通量与阶段转换(张建国等, 2019; 付小磊等, 2021; Xu et al., 2022; 杨彩霞等, 2023); 地下水埋深影响毛细上升高度能否到达蒸发面, 埋深增大时基质势与浓度梯度减弱, 表层积盐减少(李麒麟等, 2003; 王文科等, 2021); 介质性质(粒径级配、孔径分布、润湿性)影响液相连通性与干层形成, 从而改变各阶段的持续时间与强度(Wang et al., 2024); 大气需水能力由辐射与温湿度共同决定, 湿润区蒸发力弱不利于持续积盐, 干旱区蒸发力强则促进盐壳形成与维持(冯浩轩等, 2025)。然而, 现有研究对咸水蒸发过程中主控因子随浓度与阶

段变化的规律分析略显不足。

为探究不同浓度 NaCl 下土壤-地下水的蒸发积盐规律,本研究设置了 0、1 g/L、3 g/L、10 g/L、50 g/L 等 5 个浓度 NaCl,通过室内土柱实验,开展以下研究工作:①验证纯水蒸发阶段是否与前人研究的 3 个阶段相符合;②探究咸水蒸发与纯水蒸发阶段划分的异同;③探讨咸水蒸发特征及不同浓度、不同蒸发阶段的主导影响因素。研究成果可为 NaCl 型土体中水盐运移机理的分析提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料与制样

为避免天然土壤中颗粒级配不均和有机质等因素的干扰,选择均质黑色石英砂作为实验材料,粒径为 0.35 ± 0.05 mm,属细砂级配。实验溶液由 NaCl 与去离子水配制,据 Robinove et al. (1958)盐度分类,采用 0 (纯水,对照组)、1 g/L、3 g/L、10 g/L、50 g/L NaCl 溶液,分别代表淡水、轻度咸水、中度咸水和重度咸水开展实验研究,每种浓度设置两个平行土柱以保证规律一致性(表 1)。实验土柱底部 2 cm 处铺设滤网,并分层

填装石英砂,每层约 3 cm,再用马氏瓶从底部供水至表面出现水膜,饱水半小时后排水,重复 3 次以保证石英砂均匀密实。填充完成后,调整恒定水位至距石英砂顶部表面下方 6 cm,确保毛细上升高度达蒸发面 (Lehmann et al., 2018)。

表 1 不同浓度 NaCl 组对应的实验编号
Tab. 1 Experiment identifiers to different different concentrations of NaCl

NaCl溶液浓度	纯水	1 g/L	3 g/L	10 g/L	50 g/L
盐度分类	淡水	淡水	轻度咸水	中度咸水	重度咸水
A组	A5	A4	A3	A2	A1
B组	B5	B4	B3	B2	B1

1.2 室内土柱实验装置

实验装置由马氏瓶、电子分析天平(生产厂家华志,型号 PTQ-A+6,量程为 6 kg,精度为 0.01 g)、175 W 卤光灯(生产厂家飞利浦,型号 BR125,)和十个透明有机玻璃柱(内径为 8 cm,高度为 30 cm)组成。温度探头布设于滤网上方 1、14、21 cm 高度处(图 1)。实验在室内开展,为减少侧壁热量交换,每个土柱的外壁包裹一层保温材料。

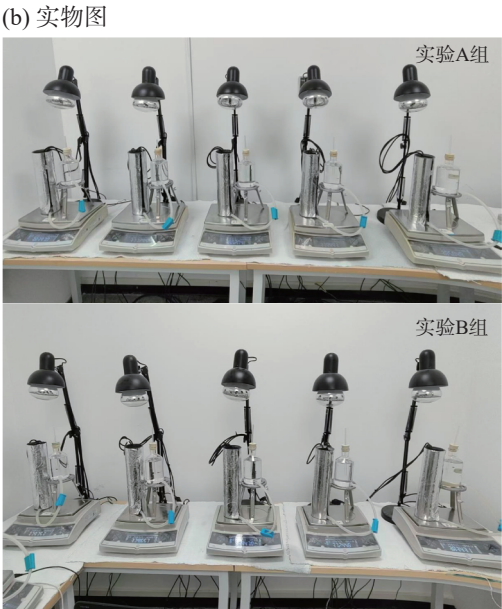
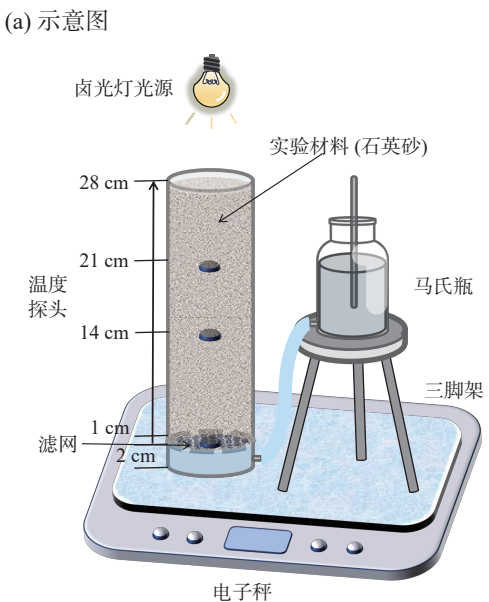


图1 实验装置

Fig. 1 Experiment instruments set-up

石英砂柱的质量变化数据由电子天平每隔 5 min 通过串口自动向电脑传输,表面温度数据则由测温仪(生产厂家奥思浦,型号 ASP604A)每隔 4 h 手动记录,室内气温和湿度由实验室温湿度计(生产厂家妙听,

型号 TH20R)自动记录,同时用数码相机(生产厂家 FLIR; 型号 T630SC)记录表面盐斑发育情况。实验持续 43 d,直到蒸发速率趋于稳定。实验结束后,刮取表面盐层后用电子天平称其质量。

1.3 数据处理

用 Excel 处理蒸发质量损失数据, 计算蒸发速率与累积蒸发量, 并使用 Origin 2018 绘图。将质量损失换算为等效蒸发水深, 土柱内径为 8 cm, 对应截面积 $A=50.27\text{ cm}^2$, 按公式(1)计算。

$$\Delta h = \frac{m_{t_1} - m_{t_2}}{\rho_w A} \tag{1}$$

式中: Δh 为一定时间间隔内的蒸发水深, 单位为 cm; m_{t_1} 、 m_{t_2} 分别为时刻 t_1 、 t_2 的土柱质量, 单位为 g; ρ_w 为水密度, 取 1 g/cm^3 。

蒸发速率计算公式如公式(2)所示。

$$E = \frac{\Delta h}{t_2 - t_1} = \frac{m_{t_1} - m_{t_2}}{\rho_w A (t_2 - t_1)} \tag{2}$$

式中: E 为蒸发速率, 单位为 cm/d; $t_2 - t_1$ 为时间间隔, 单位为 d。

累积蒸发量为各时间间隔蒸发水深损失的累加按公式(3)计算。

$$H(t) = \sum_{i=1}^n \Delta h_i = \sum_{i=1}^n \frac{m_{t_{i-1}} - m_{t_i}}{\rho_w A} \tag{3}$$

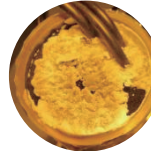
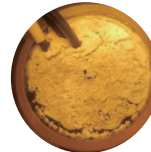
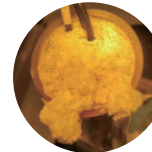
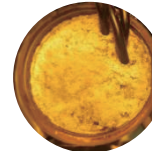
式中: $H(t)$ 为截止时刻 t 的累积蒸发量, 单位为 cm。

2 实验结果分析

2.1 不同浓度 NaCl 盐层的形成过程

A、B 两组实验的 50 g/L 和 10 g/L 组均在 12 h 内出现明显盐斑(表 2), A 组 3 g/L 第 20 h 开始析盐, 1 g/L 第 48 h 出现细小盐斑; B 组 1、3g/L 组均在 10 h 出现明显盐斑, 且 1 g/L 比 A 组盐层形成得更完整, 最终覆盖全表面。该差异可能因为实验所用的石英砂仅用纯净水冲洗而未进行灭菌处理, 不排除存在少量有机质, 从而导致盐斑出现时间与盐壳发育存在差别。经过 43 d 的持续蒸发, 盐分向表层富集。实验结束后, 50 g/L 的两组盐层质量分别为 18.25 g、19.56 g, 10 g/L 的两组盐层质量分别为 6.82 g、7.83 g, 3g/L 的两组盐层质量分别为 3.36 g、3.97 g, 1 g/L 的两组盐层质量分别为 1.98 g、3.78 g。NaCl 浓度越高, 盐分析出越早, 积盐现象越明显, 实验结束后盐层质量越大且覆盖表面的比例也越大。

表 2 A、B 两组盐分析出过程
Tab. 2 Salt precipitation process of the groups A and B

NaCl溶液 浓度	A组			B组		
	盐斑析出时间	盐分累积过程	盐壳形成过程	盐斑析出时间	盐分累积过程	盐壳形成过程
50 g/L						
	8 h	8~72 h(3 d)	72~1 032 h	4 h	4~24 h(1 d)	24~1 032 h
10 g/L						
	12 h	12~336 h(14 d)	336~1 032 h	8 h	8~192 h(8 d)	192~1 032 h
3 g/L						
	20 h	20~528 h(22 d)	528~1 032 h	10 h	10~384 h(16 d)	384~1 032 h
1 g/L						
	48 h	48~1 032 h		10 h	10~408 h(17 d)	408~1 032 h

2.2 不同浓度 NaCl 土壤蒸发过程

A、B 两组实验结果显示,纯水蒸发速率随时间变化可分为 3 个阶段(图 2)。第 I 阶段(恒速/高速阶段)持续 18 d,在此期间两组平均蒸发速率最高,分别为 6.35 cm/d、7.43 cm/d;第 II 阶段(减速/过渡阶段)从 18~37 d,平均蒸发速率下降至 4.04 cm/d、4.69 cm/d 并趋于稳定;第 III 阶段(扩散/低速阶段)启动于 37 d 后,平均蒸发速率继续下降至 3.25 cm/d、3.86 cm/d,并在末期基本不变。实验结束(第 43 d),两组总累积蒸发量分别为 210.51 cm、246.00 cm。纯水组蒸发速率和累积蒸发量均大于咸水蒸发。

咸水蒸发过程整体上也表现为 3 个阶段,但阶段长度与蒸发量随浓度变化。第 I 阶段时长随浓度升高显著缩短(表 3,图 3):由 1 g/L 的 17 d、3 g/L 的 13 d,降至 10 g/L 的 7 d 与 50 g/L 的 4 d。浓度越高,第 I 阶段对总蒸发量的贡献比例越低,由 58%~61%(1 g/L)、47%~52%(3 g/L)、37%~42%(10 g/L)下降至 32%~40%(50 g/L)。到第 43 d 的累积蒸发量总体随浓度增加而降低(表 3,图 4):50 g/L 与 10 g/L、3 g/L、1 g/L 相比, A 组累积蒸发量分别下降约 77.74%、78.25%、

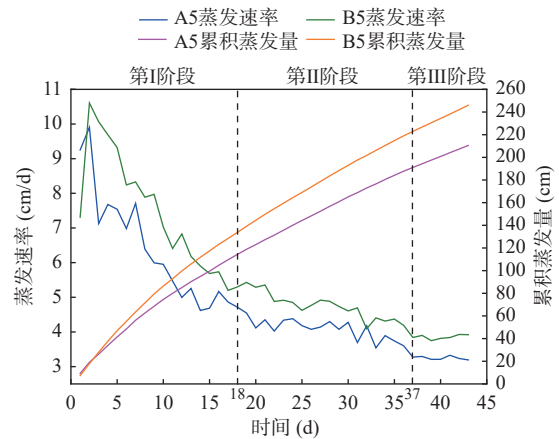


图2 纯水蒸发速率、累积蒸发量与时间关系

Fig. 2 Change of the pure water evaporation rate and cumulative quantity with time

79.09%, B 组累积蒸发量分别下降约 68.38%、71.99%、76.83%。实验结束时的累积蒸发量随 NaCl 浓度升高而降低,且符合对数拟合, R^2 达到 0.94(图 5)。A 组 10 g/L 与 3 g/L 的累积蒸发量变化曲线接近,可能是由于实验全期 10 g/L 的表面温度均比 3 g/L 高,蒸发量较大。

表 3 不同浓度 NaCl 两组阶段 I 平均蒸发速率与累积蒸发量

Tab. 3 Evaporation metrics for groups A and B under different concentrations of NaCl

NaCl溶液 浓度 (g/L)	阶段I 时长 (d)	A: 阶段I平均蒸 发速率(cm/d)	B: 阶段I平均蒸 发速率(cm/d)	A: 阶段I 累积(cm)	B: 阶段I 累积(cm)	A: 1~43 d 总累积(cm)	B: 1~43 d 总累积(cm)	A: 阶段I 占比(%)	B: 阶段I 占比(%)
1	17	4.26	4.99	72.40	84.73	124.30	139.53	58.24	60.72
3	13	4.34	4.57	56.46	59.45	119.52	115.39	47.24	51.52
10	7	6.21	6.07	43.47	42.48	116.82	102.24	37.21	41.55
50	4	2.57	2.61	10.27	10.42	26.00	32.32	39.50	32.25

2.3 不同浓度 NaCl 土柱温度变化

卤光灯持续加热使室温自初始 30.5 ℃ 上升至第 15 天的 42.5 ℃,随后波动下降,实验期内平均气温 38.7 ℃。相对湿度平均 36.2%(图 6)。

根据各组盐壳覆盖时间(表 2、表 3)及不同浓度 NaCl 表面温度随时间变化图(图 7)可知,覆盖后纯水组表面温度整体高于咸水组。盐壳覆盖后的表面温度均值为:50 g/L 的 A1、B1 为 81.8 ℃、86.0 ℃,10 g/L 的 A2、B2 为 82.1 ℃、77.5 ℃,3 g/L 的 A3、B3 为 72.0 ℃、92.7 ℃,1 g/L 的 A4、B4 为 97.1 ℃、87.8 ℃,纯水组的 A5、B5 为 106.3 ℃、83.9 ℃。以 1 g/L 为参照,盐壳覆盖后 10 g/L 与 50 g/L 的表面温度分别降低 12.7、

8.6 ℃;以纯水为参照,分别降低 15.3 ℃、11.2 ℃;3 g/L 相对 1 g/L 也降低约 10 ℃。B5(纯水)因实验开始前存在薄干层,盐壳覆盖前表面温度偏高,覆盖后回落到 83.9 ℃,仍符合纯水高于咸水的总体规律。

以盐层覆盖前与覆盖后的稳定期对比,剖面土壤温度均呈上部高、下部低,且盐层覆盖后上下温差增大。试验开始第 1 天,各组柱内温差较小,整体接近等温。盐层覆盖前,21 cm 与 1 cm 之间温差多为 7~9 ℃;覆盖后稳定期,该温差增至 10~13 ℃,分别为纯水 9.93 ℃、1 g/L 11.62 ℃、3 g/L 12.87 ℃、10 g/L 11.04 ℃、50 g/L 11.44 ℃。覆盖后各组上部温度多稳定在 57~63 ℃,下部温度在 46~51 ℃ 范围内波动。其中,

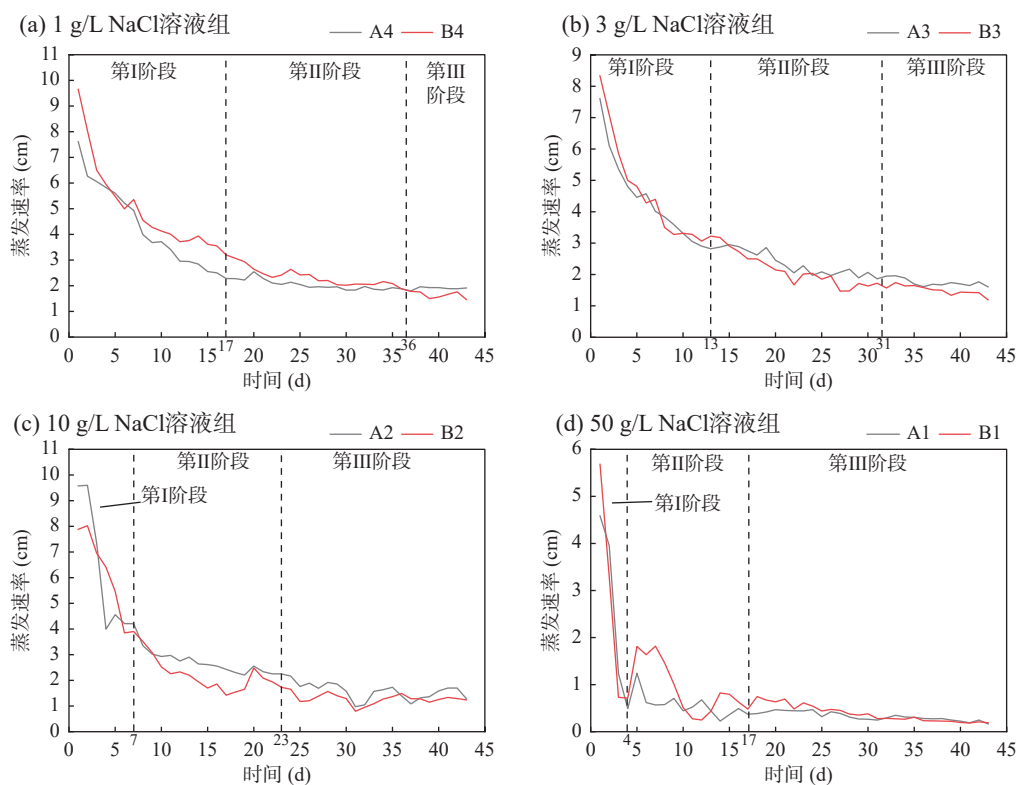
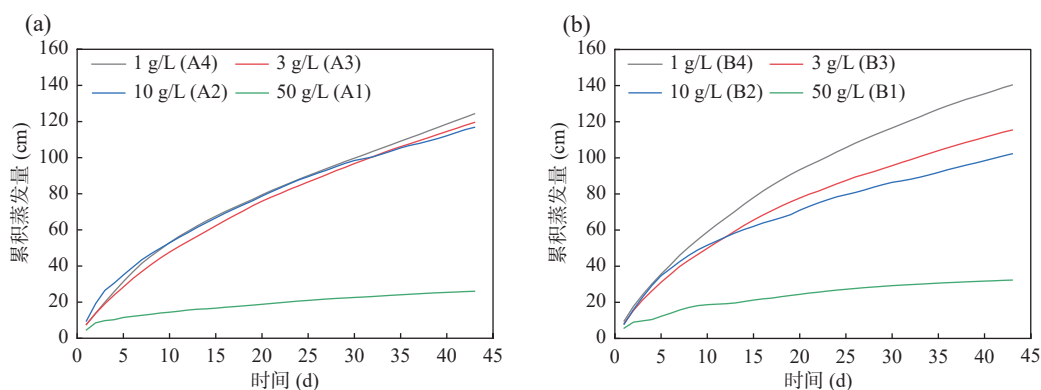


图3 不同浓度 NaCl 蒸发速率随时间变化

Fig. 3 Change of different concentrations NaCl evaporation rate with time



a. A 组不同浓度 NaCl 累积蒸发量随时间变化; b. B 组不同浓度 NaCl 累积蒸发量随时间变化

图4 不同浓度 NaCl 累积蒸发量随时间变化图

Fig. 4 Change of different concentrations NaCl cumulative evaporation with time

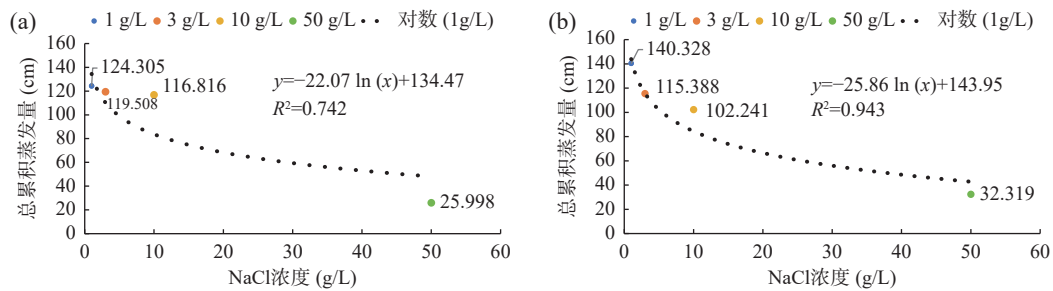
50 g/L 组下部由约 31 °C 升至约 47 °C, 10 g/L 组下部由约 55 °C 降至 49~51 °C。总体来看, 盐层覆盖后剖面垂向温差明显扩大(图 8)。

3 讨论

3.1 蒸发阶段时间划分

纯水蒸发过程可划分为 3 个阶段: 初期为快速蒸

发期, 此时表层含水量大, 蒸发受温度主导, 质量损失率最高; 随后进入过渡/减速期, 表层逐渐干燥, 蒸发速率由毛细运输与气相扩散共同决定, 质量损失曲线缓慢下降并趋于平稳; 最终进入扩散受限或低速期, 毛细水分补给能力减弱, 气相扩散成为主控过程, 蒸发速率下降并保持在较低水平。纯水蒸发曲线在第 18 天与第 37 天附近出现拐点, 据此可划分 3 个阶段(图 2)。因此, 本研究验证了纯水蒸发过程的三阶段划分



a. A 组蒸发总累积量与 NaCl 浓度关系图; b. B 组蒸发总累积量与 NaCl 浓度关系图

图5 实验结束后蒸发总累积量与 NaCl 浓度关系

Fig. 5 Relationship between total cumulative evaporation and different concentrations of NaCl

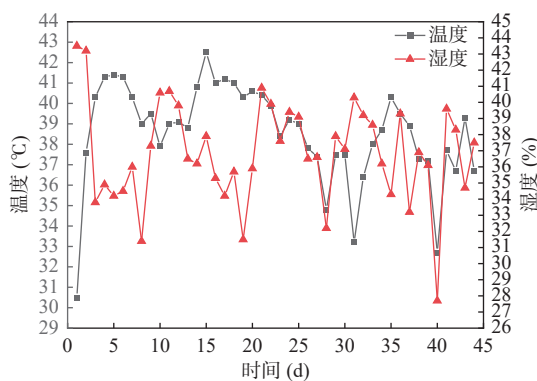
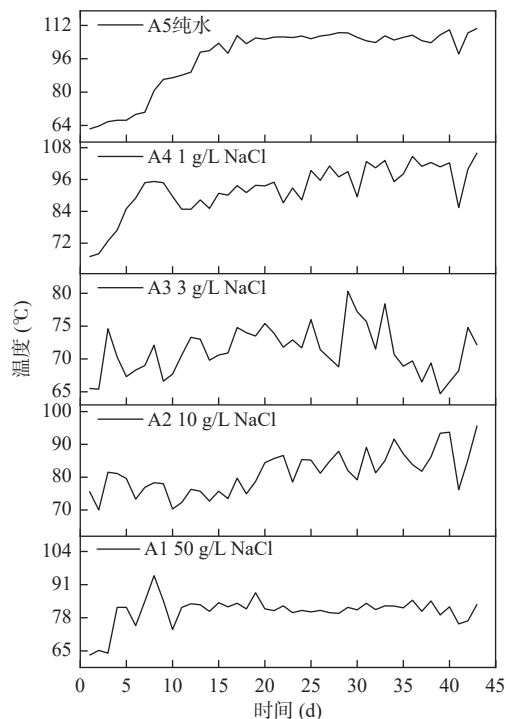


图6 室内气温及湿度随时间变化

Fig. 6 Change of indoor temperature and relative humidity with time

(a) A组表面温度变化



(b) B组表面温度变化

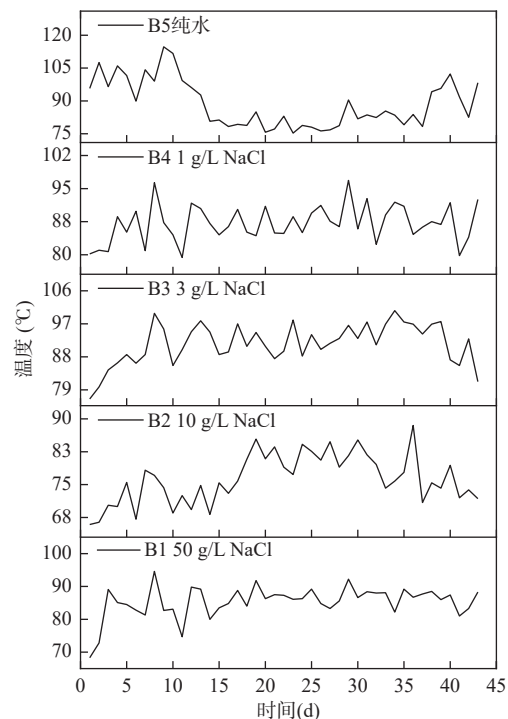


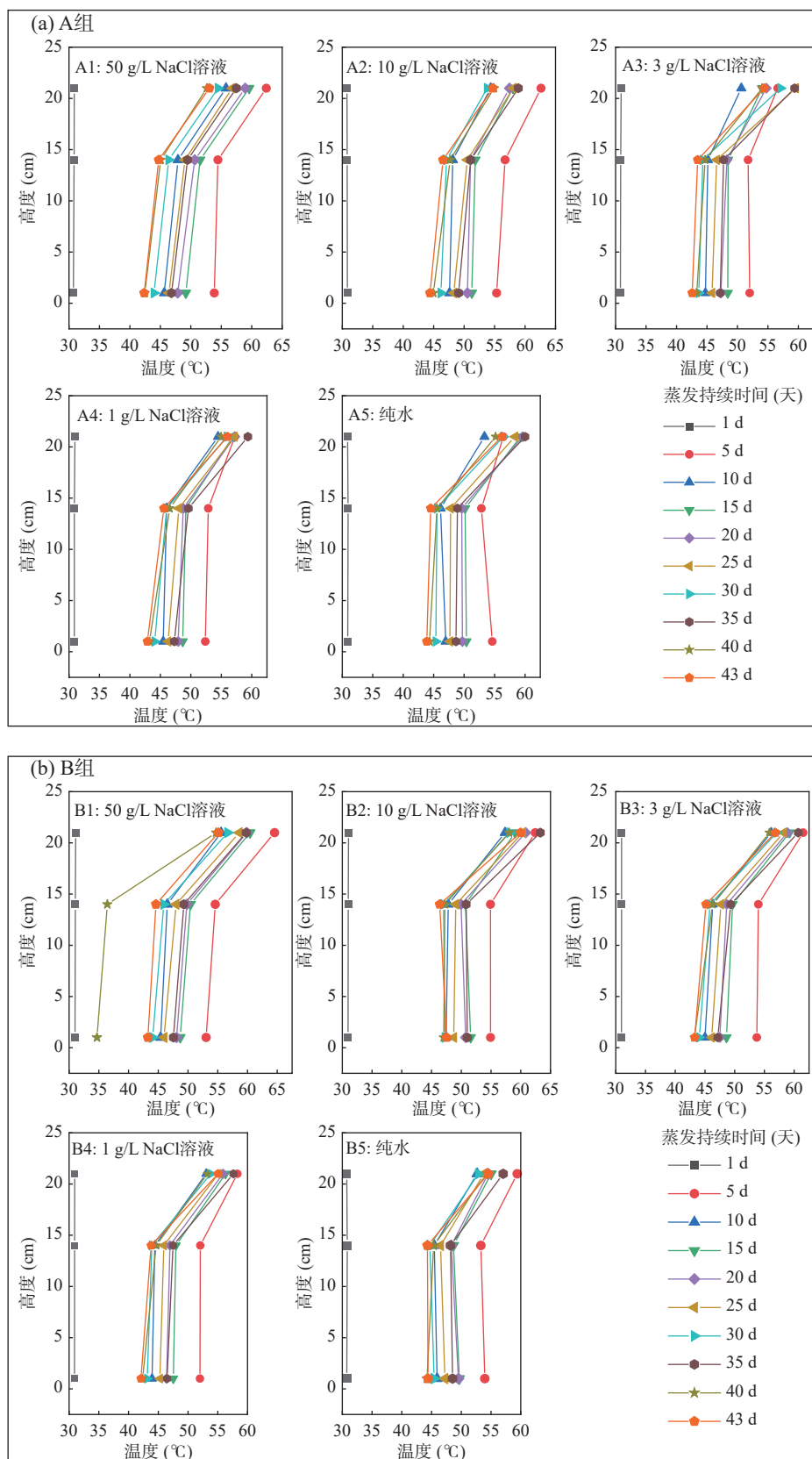
图7 不同浓度 NaCl 表面温度随时间变化图

Fig. 7 Change of surface temperature with time for different concentrations of NaCl

(Lehmann et al., 2008; 唐朝生等, 2011; Han et al., 2013; Mosthaf et al., 2014; 林宗泽等, 2021; 贾振江等, 2023)。

咸水蒸发也可分为 3 个阶段(表 3、表 4, 图 3、图 4)。

1 g/L 组第 I 阶段持续 17 d, 48 h 出现盐斑, 进入第 II 阶段后蒸发速率下降缓慢, 第 III 阶段在 36 d 后开始; 3 g/L 组第 I 阶段 13 d, 第 20 h 即出现盐斑, 31 d 进入第 III 阶段; 10 g/L 组第 I 阶段 7 d, 12 h 内即析出盐晶, 23 d 进入第 III 阶段。50 g/L 组第 I 阶段仅 4 d, 8 h 内即出现大量盐析, 表面迅速被盐层覆盖, 17 d 即进入第 III 阶段。总体上, 浓度越高, 第 I 阶段越短, 第 II 阶段越



a. A 组不同浓度 NaCl 剖面土壤温度; b. B 组不同浓度 NaCl 剖面土壤温度

图8 不同浓度 NaCl 剖面土壤温度分布

Fig. 8 Temperature profiles for different concentrations of NaCl

表 4 不同浓度 NaCl 蒸发阶段时间划分表

Tab. 4 Evaporation-stage for different concentrations of NaCl

NaCl溶液浓度	纯水	1 g/L	3 g/L	10 g/L	50 g/L
第 I 阶段	0~18 d	0~17 d	0~13 d	0~7 d	0~4 d
第 II 阶段	18~37 d	17~36 d	13~31 d	7~23 d	4~17 d
第 III 阶段	37~43 d	36~43 d	31~43 d	23~43 d	17~43 d

早开始, 50 g/L 组累积蒸发量显著低于 1 g/L 组, 咸水组蒸发量低于纯水组。

3.2 土壤-地下水蒸发影响因素分析

3.2.1 盐壳对蒸发的影响

盐壳通过两个方面影响蒸发: ①盐晶在表层堆积会堵塞孔隙, 使土体内部水分向表面的补给变慢; ②盐层覆盖会改变表面的受热情况。例如, 反射增强、吸热减少, 从而影响表面温度。第 I 阶段内, 咸水组早期的盐斑多为湿润状态, 局部仍保持潮湿并参与蒸发, 因此对蒸发速率的影响不明显。随着盐斑干燥形成盐层后覆盖在表面, 表层孔隙与渗透性下降, 毛细连通性降低, 蒸发进入扩散控制阶段。此外, 浓度越大, 盐层覆盖后的表面温度越低(图 7), 纯水与 1 g/L 为 95.1 ℃、92.5 ℃, 而 3 g/L、10 g/L、50 g/L 仅 82.4 ℃、81.8 ℃、80.9 ℃。此外, 盐壳形成使剖面温差增大(图 8), 盐层覆盖后 1~21 cm 的温差在各浓度组普遍增大 13 ℃。

3.2.2 浓度对蒸发的影响

实验结果(表 3, 图 2、图 3、图 4、图 5)显示, 浓度越高, 表层达到饱和并析盐的时间越早, 盐层越快覆

盖整个表面, 累积蒸发量越小。在轻度咸水(3 g/L)中, 溶质势开始发挥影响, 促使盐斑形成降低毛细上升通量; 在中度咸水(10 g/L)中, 溶质势与由此引起的孔隙与渗透性变化成为主要限制因子, 蒸发速率降低; 在重度咸水(50 g/L)中, 溶质势占主导, 蒸发快速进入扩散受限的低通量阶段。第 III 阶段(扩散/低速), 系统普遍转向以溶质势为主导, 中、重度咸水(≥ 10 g/L, 尤其 50 g/L)因盐壳形成过快而较早丧失毛细连通, 导致压力梯度迅速降低、毛细上升通量受限, 蒸发被气相扩散控制, 50 g/L 的盐壳覆盖表面仅需 1~3 d, 第 I 阶段仅 4 d, B 组至实验结束累积蒸发量仅 1 635 g。同时, 低浓度组在前期完成的蒸发量占比更高, A、B 组第 I 阶段占比分别为 58% 和 61%, 10 g/L 与 50 g/L 因为盐层形成更早, 前期持续时间缩短, 后期低速阶段所占比例增加。总体上, 浓度越高, 阶段转折点越早出现, 累积蒸发量越小。

3.2.3 表面温度对蒸发的影响

温度是驱动蒸发的关键因素之一, 按不同浓度的阶段划分(表 4), 对表面温度与蒸发速率进行了 Pearson 相关分析(表 5)。结果显示: 纯水、淡水(1 g/L)与轻度咸水(3 g/L)在第 I 阶段普遍呈显著相关(多数组合 $p<0.05$, R^2 较高); 随浓度升高, 第 I 阶段的 R^2 和显著性下降, 部分在第 II、III 阶段相关性减弱或不显著; 50 g/L 在多数阶段的 R^2 最低、显著性弱。说明中、重度咸水的蒸发更受盐壳与溶质势影响, 质量变化对温度变化的响应减弱, 从而使温度与质量的线性关联在后期不再显著。

表 5 温度与蒸发速率相关性分析表

Tab. 5 Correlation analysis between temperature and evaporation rate

NaCl浓度	阶段	A组			B组		
		R^2	p 值	是否通过显著性检验	R^2	p 值	是否通过显著性检验
纯水	I	0.860	5.3e-10	是	0.526	1.3e-04	是
	II	0.352	0.015	是	0.260	0.044	是
	III	0.013	0.806	否	0.145	0.400	否
1 g/L	I	0.343	0.035	是	0.132	0.222	否
	II	0.471	1.5e-04	是	0.037	0.359	否
	III	0.104	0.481	否	0.000	0.979	否
3 g/L	I	0.185	0.085	否	0.435	0.004	是
	II	0.061	0.441	否	0.171	0.182	否
	III	0.492	0.002	是	0.098	0.238	否

续表 5

NaCl浓度	阶段	A组			B组		
		R ²	p 值	是否通过显著性检验	R ²	p 值	是否通过显著性检验
10 g/L	I	0.012	0.777	否	0.215	0.209	否
	II	0.581	3.7e-05	是	0.461	5.1e-04	是
	III	0.014	0.685	否	0.012	0.705	否
50 g/L	I	0.796	0.003	是	0.261	0.196	否
	II	0.104	0.155	否	0.049	0.333	否
	III	0.254	0.047	是	0.299	0.028	是

3.2.4 主控因子判别与分级结果

为比较不同浓度的不同阶段下蒸发过程的主控因素,本文依据蒸发速率变化、同步监测的气温与土壤温度,以及表层盐壳的形成与覆盖过程,对影响蒸发的因素进行分级判别。将蒸发控制因素归纳为 3 类:①温度势,代表温度变化对蒸发的作用;②基质势,代表毛细力与吸附力对土壤水的作用,该作用随土体干燥和盐壳发育而减弱;③溶质势,代表浓度升高对水分蒸发的抑制作用,浓度越高该抑制越明显。分级方法采用 0 到 3 的主导性等级评价,3 表示主导,2 表示次要,1 表示弱,0 表示缺失。各浓度均设置 A、

B 两组平行土柱,判别结果在两组之间保持一致性,用于降低偶然性影响并检验重复性。

不同浓度与阶段下温度势、基质势与溶质势的分级结果(图 9)显示,蒸发主控因子随浓度与阶段发生变化。纯水、1 g/L 与 3 g/L 在第 I 阶段以温度势为主控,基质势次要,溶质势较弱。第 II 阶段纯水以基质势为主控,1 g/L 仍以温度势为主,3 g/L 溶质势开始增强并参与控制。第 III 阶段时,随着盐分累积,溶质势逐渐增强,3 g/L 与 10 g/L 以溶质势为主控。10 g/L 在阶段 II 表现为温度势与基质势并重,溶质势增强并抑制蒸发。50 g/L 在 3 个阶段均以溶质势为主控因子。

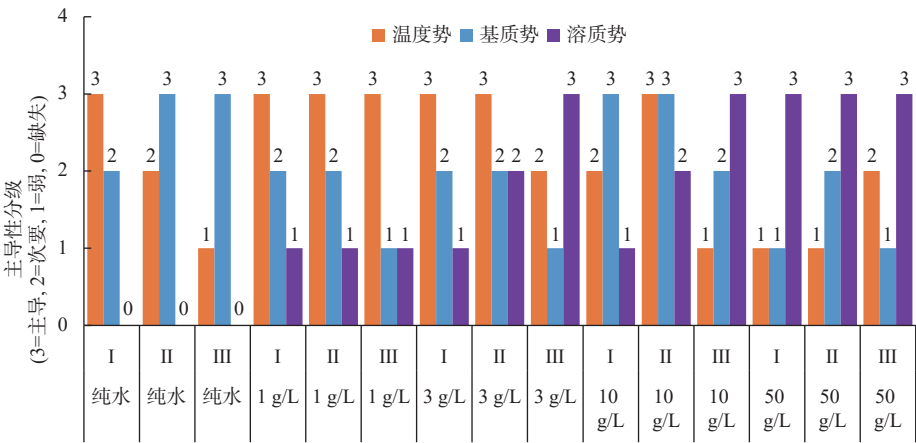


图9 不同浓度 NaCl 不同蒸发阶段的蒸发主控因子分级结果

Fig. 9 Rating results for different concentration NaCl of dominant controls factors under different stages

4 结论

(1)纯水蒸发过程与前人研究一致,可划分为: I 恒速/高速期(0~18 d)、II 过渡/减速期(18~37 d)、III 扩散/低速期(>37 d) 3 个阶段。

(2)咸水蒸发也可分为 3 阶段,但阶段持续时间和强度随浓度变化。浓度越高,第 I 阶段持续时间越短,盐析出越早,盐壳更快形成,蒸发更早进入扩散受限期,累积蒸发量越少。1g/L、3g/L、10g/L、50 g/L 的第 I 阶段为 17 d、13d、7d、4 d, A 组累积蒸发量由 111.81 cm 降至 26.00 cm。

(3)蒸发主控因子随蒸发阶段与浓度而变化:纯水、淡水与轻度咸水/第Ⅰ阶段以温度势为主,中度咸水/第Ⅱ阶段温度、基质势、溶质势共同作用,重度咸水/第Ⅲ阶段以溶质势为主。纯水与轻度咸水(1 g/L、3 g/L)第Ⅰ阶段温度与蒸发速率通过显著性检验后 R^2 较高,纯水 R^2 达到0.86,10 g/L、50g/L的 R^2 降低,显著性弱。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 冯浩轩,李敏,行嘉豪,等.盐分及干湿循环对壤土蒸发特性与裂隙发育影响的机理探究[J].农业工程学报,2025,41(11):124-135.
- FENG Haoxuan, LI Min, XING Jiahao, et al. Mechanistic investigation of the effects of salinity and wetting-drying cycles on evaporation characteristics and crack development in loam[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(11): 124-135.
- 付小磊,李诚志,李胜辉.NaCl含量对风沙土盐结皮特性及其抗风蚀性能的影响[J].土壤,2021,53(5):1064-1071.
- FU Xiaolei, LI Chengzhi, LI Shenghui. Effect of NaCl content on salt crust characteristics and wind erosion resistance of aeolian sandy soil[J]. Soil, 2021, 53(5): 1064-1071.
- 贾振江,刘学智,徐天渊,等.砂土混合覆盖下的土壤水分蒸发特性及其因子分析[J].水土保持学报,2023,37(2):227-236.
- JIA Zhenjiang, LIU Xuezhi, XU Tianyuan, et al. Evaporation characteristics and factor analysis of soil moisture under sand-cover mixtures[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 227-236.
- 靳芳,贾建团,郭敏.柴达木盆地砂砾型孔隙水夏季自然蒸发实验[J].矿产综合利用,2024,45(4):161-167.
- JIN Fang, JIA Jiantuan, GUO Min. Summer natural evaporation experiment of brine in gravelly pores in the Qaidam Basin[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(4): 161-167.
- 李麒麟,梁明宏,王云斌,等.疏勒河上游地区土壤盐渍化现状与综合治理分析[J].西北地质,2004,37(1):81-85.
- LI Qilin, LIANG Minghong, WANG Yunbin, et al. Present situation and comprehensive countermeasures of salinized soil of the upper reach of Shule river[J]. Northwestern Geology, 2004, 37(1): 81-85.
- 林宗泽,唐朝生,曾浩,等.基于红外热成像技术的土体水分蒸发过程研究[J].岩土工程学报,2021,43(4):743-750.
- LIN Zongze, TANG Chaosheng, ZENG Hao, et al. Investigation of soil moisture evaporation process based on infrared thermal imaging technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(4): 743-750.
- 刘世元.黄河三角洲盐渍土蒸发特性及其模型模拟[D].泰安:山东农业大学,2024.
- LIU Shiyuan. Evaporation characteristics and model simulation of saline soils in the Yellow River delta[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2024.
- 唐朝生,施斌,顾凯.土中水分的蒸发过程试验研究[J].工程地质学报,2011,19(6):875-881.
- TANG Chaosheng, SHI Bin, GU Kai. Experimental study on the evaporation process of water in soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(6): 875-881.
- 唐洋,李新虎,郭敏,等.不同初始盐分浓度下土壤盐结皮的形成过程及其对蒸发的影响机理[J].干旱区地理,2022,45(4):1137-1145.
- TANG Yang, LI Xinhui, GUO Min, et al. Formation process of soil salt crust and its effect mechanism on evaporation under different initial salinity concentrations[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1137-1145.
- 王文科,宫程程,张在勇,等.旱区地下水文与生态效应研究现状与展望[J].地球科学进展,2018,33(7):702-718.
- WANG Wenke, GONG Chengcheng, ZHANG Zaiyong, et al. Research status and prospects of groundwater hydrology and ecological effects in arid regions[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(7): 702-718.
- 王文科,尹红美,黄金廷,等.基于蒸渗仪和解析法估算毛乌素沙地潜水蒸发量[J].水文地质工程地质,2021,48(4):1-6.
- WANG Wenke, YIN Hongmei, HUANG Jinting, et al. Estimation of phreatic evaporation in the Mu Us Sandy Land based on lysimeter observations and an analytical method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(4): 1-6.
- 杨彩霞,李诚志,孔德印,等.Na₂SO₄盐结皮对风沙土水分蒸发的影响[J].新疆大学学报(自然科学版)(中英文),2023,40(3):358-366.
- YANG Caixia, LI Chengzhi, KONG Deyin, et al. Effect of Na₂SO₄ salt crust on moisture evaporation of aeolian sandy soil[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2023, 40(3): 358-366.
- 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 and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 10-27.

- 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 Zhen, WANG Baoshan. Current status and improvement and utilization strategies of saline-alkali soil resources in China[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2015, 47(4): 125–130.
- 袁磊, 吴庭雯, 韩双宝, 等. 内蒙古高原内流区土壤水溶盐空间变异特征及其影响因素[J]. 西北地质, 2021, 54(4): 192–198.
- YUAN Lei, WU Tingwen, HAN Shuangbao, et al. Spatial Variability and Influencing Factors of Soil Water-Soluble Salt in Inner Mongolia Plateau[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(4): 192–198.
- 张建国, 李红伟, 李雅菲, 等. 土壤盐结皮人工培育及其破损程度对土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 138–144.
- ZHANG Jianguo, LI Hongwei, LI Yafei, et al. Artificial cultivation of soil salt crust and effect of its damage degree on soil evaporation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(13): 138–144.
- 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 its remediation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023, (6): 202–208.
- 周凤玺, 冉跃, 万旭升, 等. 盐渍土在蒸发过程中的水盐相变行为研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(5): 1030–1038.
- ZHOU Fengxi, RAN Yue, WAN Xusheng, et al. Study on water-salt phase change behavior of saline soils during evaporation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(5): 1030–1038.
- Dong L, Xiong Y, Huang Q, et al. Evaporation-induced salt crystallization and feedback on hydrological functions in porous media with different grain morphologies[J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126427.
- Han J, Zhou Z. Dynamics of Soil Water Evaporation during Soil Drying: Laboratory Experiment and Numerical Analysis[J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 240280.
- Jannesarrahmadi S, Aminzadeh M, Helmig R, et al. Quantifying Salt Crystallization Impact on Evaporation Dynamics From Porous Surfaces[J]. Geophysical Research Letters, 2024, 51(22): e2024GL111080.
- Joseph P, Alexander J H, Uri N, et al. Gas Permeability of Salt Crusts Formed by Evaporation from Porous Media[J]. Geosciences, 2020, 10(11): 423–423.
- Lehmann P, Assouline S, Or D. Characteristic lengths affecting evaporative drying of porous media[J]. Physical Review E, 2008, 77(5): 056309.
- Lehmann P, Merlin O, Gentile P, et al. Soil Texture Effects on Surface Resistance to Bare-Soil Evaporation[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(19): 10,398–10,405.
- Li Xinhui, Shi Fengzhi. Effects of evolving salt precipitation on the evaporation and temperature of sandy soil with a fixed groundwater table[J]. Vadose Zone Journal, 2021, 20(3): e20122.
- Mosthaf K, Helmig R, Or D. Modeling and analysis of evaporation processes from porous media on the REV scale[J]. Water Resources Research, 2014, 50(2): 1059–1079.
- Nachshon, U, Weisbrod N, Dragila M I, et al. Combined evaporation and salt precipitation in homogeneous and heterogeneous porous media[J]. Water Resources Research, 2011, 47(3): W03513.
- Or D, Lehmann P, Shahraeeni E, et al. Advances in Soil Evaporation Physics: A Review[J]. Vadose Zone Journal, 2013, 12(4): 1–16.
- Robinove C J, Langford R H, Brookhart J W. Saline-water resources of North Dakota[M]. U. S. Government Printing Office, 1958.
- Shokri N, Or D. What determines drying rates at the onset of diffusion controlled stage - 2 evaporation from porous media? [J]. Water Resources Research, 2011, 47(9): W09513.1–W09513.8.
- Wang H, Li X, Li J, et al. Impact of salt precipitation on evaporation resistance under different soil textures[J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 84(1): 12–12.
- Xu Boshi, Li Chengzhi, Li Zhaoti. Comparison of the characteristics of six salt crusts[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 905410.
- Zhang X, Shu C, Fujii M, et al. Numerical and experimental study on water-heat-salt transport patterns in shallow bare soil with varying salt contents under evaporative conditions: A comparative investigation[J]. Journal of Hydrology, 2023, 621: 129564.