

DOI: 10.11766/trxb202105250272

王瑞琪, 栗现文, 郑哪, 江思珉, 陈俊英, 严宝文, 何雨江. 微咸水冰体融出水质及基于 HYDRUS-1D 的土壤淋洗特征研究[J]. 土壤学报, 2023, 60 (2): 378–389.

WANG Ruiqi, LI Xianwen, ZHENG Na, JIANG Simin, CHEN Junying, YAN Baowen, HE Yujiang. Dewaterability of Frozen-melt Brackish Water and Its Soil Salt Leaching Efficiency Based on HYDRUS-1D[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 (2): 378–389.

微咸水冰体融出水质及基于 HYDRUS-1D 的土壤淋洗特征研究*

王瑞琪^{1, 2}, 栗现文^{1, 2†}, 郑 哪³, 江思珉³, 陈俊英^{1, 2}, 严宝文^{1, 2},
何雨江⁴

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 同济大学水利工程系, 上海 200092; 4. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

摘 要: 为揭示微咸水结冰融水时咸淡分离状况及对盐渍土盐分的淋洗效应, 通过室内融冰试验研究不同解冻温度 (10℃、15℃) 和矿化度处理 (纯净水、0.5 g·L⁻¹、2 g·L⁻¹、4 g·L⁻¹) 冰体的融化速度及融出水质, 并借助 HYDRUS-1D 模型, 模拟分析了不同处理融出水与微咸水直接入渗对剖面土壤盐分的淋洗效果差异。结果表明: 微咸水冰体咸淡分离效果明显, 各处理下的微咸水冰体融出淡水体积占比均超 75%, 矿化度越小融出淡水体积越大; 微咸水冰体先咸后淡融出水入渗对盐渍土中的盐分有较好的淋洗效果, 优于相同矿化度的微咸水直接入渗处理; 10℃处理微咸水冰融出水对盐渍土的淋洗效果要好于 15℃处理。研究结果对于探索内陆干旱区地下微咸水利用及新的非生育期节水控盐模式具有一定的指导意义。

关键词: 盐渍化改良; 微咸水利用; 水盐运移; HYDRUS-1D

中图分类号: S156.4 文献标志码: A

Dewaterability of Frozen-melt Brackish Water and Its Soil Salt Leaching Efficiency Based on HYDRUS-1D

WANG Ruiqi^{1, 2}, LI Xianwen^{1, 2†}, ZHENG Na³, JIANG Simin³, CHEN Junying^{1, 2}, YAN Baowen^{1, 2}, HE Yujiang⁴

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Science, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: [Objective] Soil salinization is of growing concern in China since it severely restricts agricultural development and

* “十三五”国家重点研发计划项目 (2017YFC0403302) 和陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2020JQ-277) 资助 Supported by the “The 13th Five-Year Plan” National Key R&D Program of China (No. 2017YFC0403302) and the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (No. 2020JQ-277)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lixianwen@nwfau.edu.cn

作者简介: 王瑞琪 (1998—), 女, 甘肃人, 硕士研究生, 研究方向为水资源利用与保护。E-mail: wangruiqi126@126.com

收稿日期: 2021-05-25; 收到修改稿日期: 2021-12-02; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-04-26

poses ecological and environmental risks in arid and semi-arid regions. High soil salinity causes deterioration of soil physical and chemical properties and inhibits plant growth. Given the wide distribution of brackish groundwater in arid and semi-arid regions, brackish irrigation is an effective approach to mitigate the shortage of freshwater resources. In addition, the naturally low air temperature in winter makes it possible to combine brackish irrigation and freeze-melt processes to enhance salt leaching and thus help reduce soil salinity. 【 Method 】 To reveal the dewaterability of frozen brackish water, the melting rates and temporal changes in water quality of ice blocks frozen from brackish water were compared under two air temperatures (10°C, 15°C) and four initial salinity gradients (freshwater, 0.5 g·L⁻¹, 2 g·L⁻¹, and 4 g·L⁻¹). Furthermore, to evaluate the salt leaching efficiency through saline soil by melted brackish water, the HYDRUS-1D model was applied to simulate the one-dimensional soil water and salt transport patterns under two scenarios: direct infiltration using brackish water and infiltration using desalinated water melted from brackish ice frozen at different initial salinity gradients. 【 Result 】 Our results show that: (1) The amount of melting water per unit time of brackish water ice body increased first and then decreased, and the melting rate was faster and peaked at higher value when the initial salinity was greater; (2) Freeze-melt could effectively desalinate brackish water by selectively discharging brine with great salinity at the early stage of melting, and the dewaterability was greater at lower initial salinity with an average dewaterability > 75%; (3) The HYDRUS-1D simulations on saline soil illustrated a better leaching efficiency when infiltrated with water melted from frozen brackish ice than directly applying unfrozen brackish water, and the leaching effect of brackish ice meltwater was better at 10°C than at 15°C. 【 Conclusion 】 These findings proved the applicability and effectiveness of combining brackish groundwater with freeze-melt treatments, as a new water-saving and salt-controlling mode, to help mitigate freshwater shortage and reduce soil salinization risk in the arid and semi-arid of China.

Key words: Salinization improvement; Brackish water utilization; Water and salt transport; HYDRUS-1D

土壤盐渍化是制约我国干旱和半干旱地区农业发展和生态环境改善的重要因素, 由于土壤中盐分过高, 土壤理化性质较差, 使得盐碱地区大多数植物无法正常生长^[1]。在我国西北内陆盐渍区, 土壤盐渍化的治理以物理措施为主, 多以秋浇/冬灌的形式将大量淡水灌入盐渍化田块, 达到淡水压盐目的^[2]。但我国淡水资源短缺, 传统的淡水压盐措施, 加剧了供水资源不足的现状。

目前已有学者提出, 在我国滨海地区采用冬季咸水结冰融水压盐改良重盐渍化土地的技术^[3]。咸水结冰融水压盐技术原理为, 利用抽取的高矿化度地下水结冰后冰层融化过程中的咸淡水分离效应, 通过融出咸淡水的梯次分离入渗, 后融化的低矿化度淡水可有效淋洗土壤盐分, 从而实现盐渍土表层脱盐, 有效改善了滨海地区的土壤盐渍化状况^[4-5]。咸水在结冰时和融化时, 均表现出脱盐过程, 而且融化时的脱盐效果明显好于结冰过程^[6]。郭凯等^[7]对咸水冰体的融出水质进行了研究, 发现矿化度为 10 g·L⁻¹ 的咸水冰体融化过程中, 融出水的含盐量在 1 小时之后呈指数下降, 直到融出淡水; 融出水含盐量小于 3 g·L⁻¹ 的微咸水占总体积的 57.2%。车升国等^[8]发现, 在咸水结冰入渗过程中, 咸水中的离子与土壤

中的离子发生作用, 改变了土壤的入渗能力, 增大了入渗深度, 这使得后融化的低矿化度水对盐分的淋洗深度增加, 从而提高了淋洗效果。

我国西北内陆地区土壤盐渍化与微咸地下水 (2~5 g·L⁻¹) 并存, 且广泛分布^[9-11], 微咸水矿化度远小于滨海地区地下水矿化度。同时北方内陆地区冬季气温低, 具备冰冻条件, 若能抽取地下微咸水进行微咸水结冰融水压盐, 有望改变以往淡水压盐方式, 以节约珍贵的淡水资源; 且抽水适当降低局部较浅的地下水位, 也有助于控制土壤蒸发返盐。目前关于微咸水结冰后融出水的研究还相对较少, 本文拟通过室内融冰试验研究不同矿化度和温度下, 微咸水冰体的融化速度和融出水质, 结合冰体融水入渗数值模拟, 揭示微咸水结冰融水入渗特征及对盐渍土的淋洗效果, 为探索内陆土壤盐渍化地区非生育期新的节水控盐模式提供理论与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究所用微咸水通过在纯净水中溶解分析纯氯

化钠制备, 根据微咸水矿化度范围 ($2\sim 5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)^[12], 确定处理梯度为 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($7\ 135\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)、 $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($3\ 440\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) 和 $0.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($996\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 淡水), 并以纯净水为对照。制冰容器为内径 10 cm 的有机玻璃柱, 注水高度为 15 cm , 体积为 $1\ 177\text{ mL}$, 置于 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 环境中冻结 24 h 。

采用 4 个融冰装置 (图 1), 分别将矿化度为 $0.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微咸水冰体置于 1~3 号融冰装置中, 并将等体积纯净水冰体置于 4 号融冰装置, 作为对照。首批次控制融冰恒温箱温度为 $10\text{ }^\circ\text{C}$, 融冰装置漏斗下方放置烧杯, 每间隔 2 h 取一次融水, 测定融出水量 (称重并采用量筒读取体积), 及其电导率, 直至 4 种处理下的冰体全部融化, 记录各处理微咸水冰体融化完成所用时间。第二批次将恒温箱温度设置为 $15\text{ }^\circ\text{C}$, 重复以上过程。

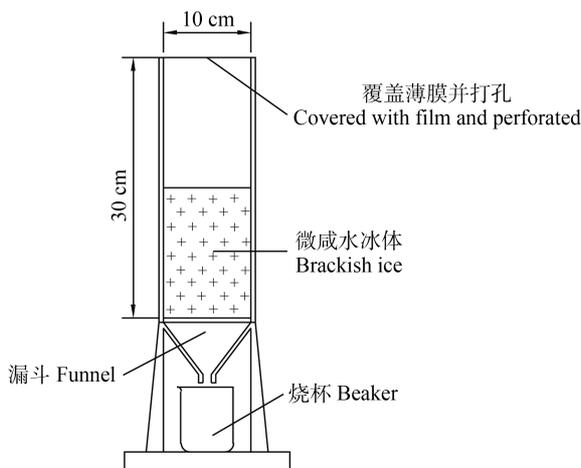


图 1 融冰试验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of ice melting experimental apparatus

以内蒙古河套灌区解放闸灌域的中等盐渍化土壤为融水入渗的数值模拟对象。将采集的原状土壤环刀样饱和, 用高速恒温冷冻离心机 (CR21G II 型, 日立, 日本) 测定环刀样品脱湿过程的土壤水分特征曲线, 并采用 RETC 软件中的 van Genuchten-Mualem^[13]模型进行拟合, 得到基本土壤水力参数 (表 1), 作为数值模型参数初始值。

1.2 试验数据获取与处理

微咸水结冰后融出水质通过电导率来反映, 水量由量筒读取, 通过绘制变化过程曲线, 反映融出水量和水质随时间的动态变化。采用实测率定模型将电导率换算成矿化度, 并统计融化后不同矿化度融出水体积占总融出水体体积的比例, 反映微咸水冰体融冰过程咸淡分离效果。

用纯净水和分析纯氯化钠配制一系列浓度的微咸水样, 并测定其电导率, 用 origin 软件进行拟合显示, 电导率 ($x, \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) 与矿化度 ($y, \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 有显著线性关系:

$$y = 0.000\ 67x - 0.511\ 36 \quad R^2 = 0.998 \quad (1)$$

微咸水冰体相对融化速率按下式进行计算:

$$v_i = \frac{V_i}{(V_i + V_{\text{剩余}})t} \quad (2)$$

式中, v_i 表示时间为 i 时对应的相对融化速率, $\text{mL}\cdot(\text{mL}\cdot\text{h})^{-1}$; V_i 指 t 时段内融出水的体积, mL ; t 指监测时间间隔, 2 h ; $V_{\text{剩余}}$ 指时间为 i 时的剩余冰体融化后的体积, mL 。

1.3 HYDRUS-1D 模型建立

通过 HYDRUS-1D 软件, 建立微咸水冰体融水入渗和微咸水直接入渗的一维土壤水盐运移模型。

表 1 土壤初始水盐含量及水力特征参数

Table 1 Initial soil water and salt content and selected hydraulic characteristics

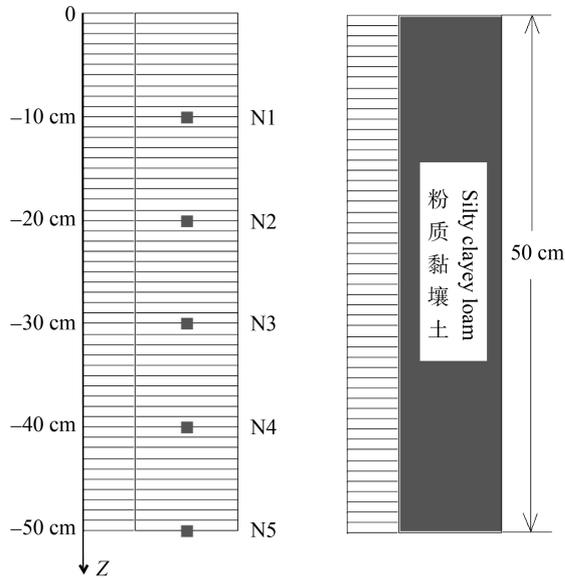
土壤质地	体积含水量	土壤水含盐量	θ_r	θ_s	α	n	K_s	l
Soil texture	Volumetric water content/ ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	Salt content of soil water/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)						
粉质黏壤土	0.32	15.91	0.095	0.329	0.003	1.19	0.216	0.5
Silty clayey loam								

注: θ_r 表示土壤残余含水率; θ_s 表示土壤饱和含水率; α 表示进气值的倒数, cm^{-1} ; n 表示形状参数; K_s 表示土壤饱和导水率, $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$; l 表示孔隙连接系数。Note: θ_r represents residual soil moisture content; θ_s represents saturated moisture content of soil; α represents the reciprocal of the intake value, cm^{-1} ; n represents the shape parameter; K_s represents the saturated water conductivity of the soil, $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$; l represents the pore connection coefficient.

概念模型: 咸水条件下, 田宇等^[14]的研究表明, 咸水冰体融水入参与不同矿化度咸水梯次入渗对土壤的脱盐效果具有一致性。因此, 在本研究中, 将融

冰试验中各时段的融出水量换算为水层厚度, 作为该水盐运移模型的灌水量, 融出水矿化度即为入渗水浓度。模拟土壤厚度为 50 cm , 将土壤概化为均质各向

同性，剖面初始含水量及盐分含量相同（图 2）。



注：N1、N2、N3、N4、N5 为在模拟土柱中设置的观测点。Note: N1, N2, N3, N4 and N5 are the five observation points of the soil column.

图 2 模拟土壤观测点分布及剖面土质

Fig. 2 Soil profile and distribution of the observation points

土壤水分运动数学模型：基于以上条件，不考虑根系吸水，由 Richards 方程^[15-16]建立一维土壤水分运动模型：

基本方程：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (3)$$

初始条件：

$$\theta(z, 0) = \theta_0(z), Z < z < 0 \quad (4)$$

边界条件：

$$\text{上边界：} -K(\theta) \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} + 1 \right) = q_s, z = 0 \quad (5)$$

$$\text{下边界：} \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0, z = Z \quad (6)$$

式中， t 为时间，h； θ 为土壤体积含水率，%； $K(\theta)$ 为非饱和导水率， $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ； $D(\theta)$ 为土壤水分扩散率， $\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ； θ_0 为初始土壤体积含水量，cm； q_s 为地表水分通量， $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ； z 为垂向空间坐标，cm； Z 为下边界位置，-50 cm。其中，土壤水分特征曲线可用 van Genuchten-Mualem 模型^[17]表示。

土壤溶质运移数学模型：基于以上条件，不考

虑固态吸附与源汇项，由对流-弥散方程^[18]建立一维土壤溶质运移模型：

基本方程：

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial c}{\partial z} \right) - q \frac{\partial c}{\partial z} \quad (7)$$

初始条件：

$$c(z, 0) = c_0(z), Z < z < 0; t = 0 \quad (8)$$

边界条件：

$$\text{上边界：} -\theta D \frac{\partial c}{\partial z} + qc = q_s c_s(t), z = 0; t > 0 \quad (9)$$

$$\text{下边界：} -D \frac{\partial c}{\partial z} = 0, Z < z < 0 \quad (10)$$

式中， t 为时间，h； θ 为土壤体积含水率，%； D 为弥散系数， $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ； c 为土壤水盐分含量， $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ； q 为垂直方向达西流速， $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ； c_0 为剖面初始土壤水盐分含量， $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ； c_s 为上边界灌溉水矿化度， $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ； q_s 为地表水分通量， $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ，灌水入渗时取正值； z 为垂向空间坐标，cm； Z 为下边界位置，-50 cm。

数值模型设置：根据入渗特点，按照先密后疏^[19]设定输出时间点为 12 h、24 h、48 h、96 h、144 h、240 h、360 h。根据已有土壤信息确定初始体积含水率为 $0.32 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。上边界设为可积水大气边界，将灌水量作为边界降水输入；微咸水冰体融水入渗时，根据微咸水冰体融水试验所测得各时段融出水量，换算为水层厚度，作为时段灌水量；微咸水直接入渗时，设定 15 cm 微咸水以 1 h 灌入。下边界设为自由排水边界。初始土壤水分特征参数见表 1。溶质运移模型中，根据已有土壤信息以 $15.91 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 为初始土壤水盐分含量。上边界确定为浓度通量边界，输入变边界条件为灌水浓度；微咸水冰体融水入渗时，根据融冰试验中所测的各时段融出水的电导率，换算为浓度，作为该浓度边界输入；微咸水直接入渗时，输入变边界条件为灌入微咸水的浓度。下边界确定为零浓度梯度边界。初始溶质运移参数中，土壤干容重为 $1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，纵向弥散度 D_L 参考前人研究成果，取为 $20 \text{ cm}^{[20-21]}$ 。

2 结果

2.1 微咸水冰体相对融化速率与融出水质

2.1.1 不同矿化度微咸水冰体相对融化速率 不同解冻温度微咸水冰体融出水量随时间变化如图 3

所示。融化前期随时间增加,融出水量不断增加,达到峰值以后,由于冰的体积变小,融出水量开始下降,直至融化完成;且15℃处理峰值的出现时间明显早于10℃处理。微咸水冰体的初始矿化度对融冰过程有重要影响。10℃时(图3a),4 g·L⁻¹处理的微咸水冰体融化完成所用时间最短(72 h)。15℃时(图3b),2 g·L⁻¹和4 g·L⁻¹处理的融化时间较0.5 g·L⁻¹处理短;纯净水冰体在前期(0~10 h)融出水量大于其他处理。

相对融化速率由式(2)计算,不同解冻温度各矿化度微咸水冰体的相对融化速率随时间的变化过程如

图4所示。各处理下微咸水冰体的相对融化速率在融化前期增加缓慢,至融化末期,整体快速增加。对比图4a和图4b,温度越高,相对融化速率增加越快,融化过程完成的时间越短;如4 g·L⁻¹处理的微咸水冰体在15℃时,44 h融化结束,而在10℃时则需要68 h,时长约为15℃时的1.5倍。纯净水冰体在前期(0~10 h)融化速率大于其他处理,后期增加缓慢,小于其他处理。对比图3和图4,在融出水量的峰值过后,融出水量迅速下降,但相对融化速率却迅速增加,表明在融化后期,冰体的体积变小对融出水量的下降有控制作用,即剩余冰量小,融出水量也小。

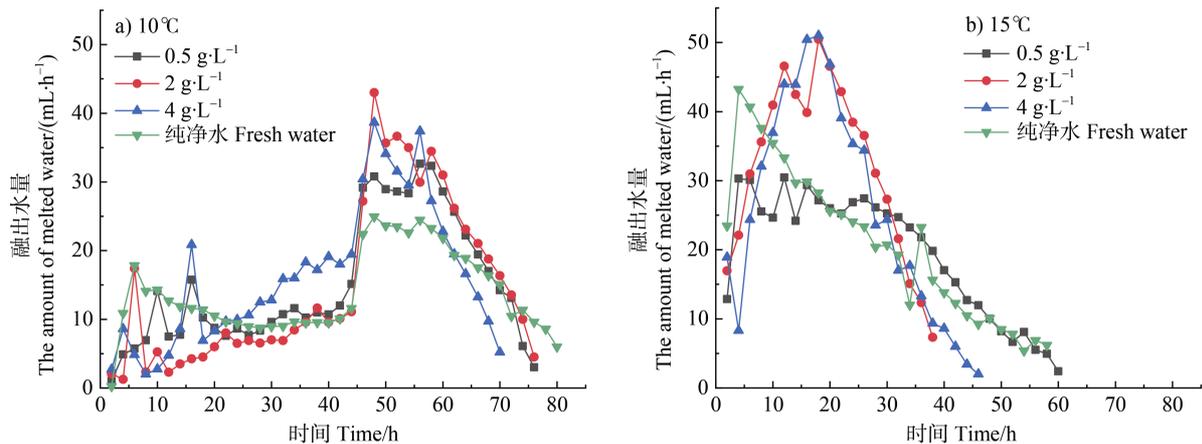


图3 不同温度下各矿化度处理微咸水冰体融出水量变化

Fig. 3 Temporal changes of water amount melted from brackish ice at different temperatures and initial salinity gradients

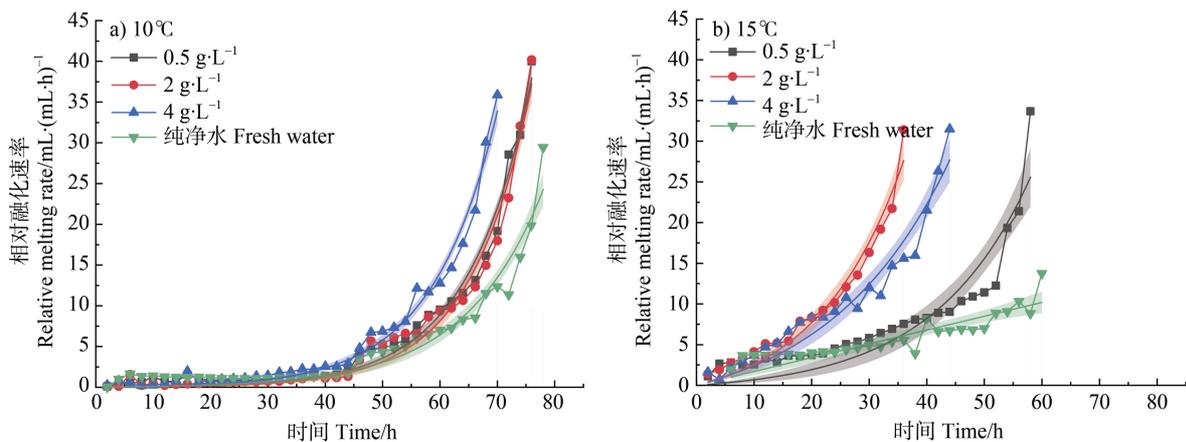


图4 不同温度下各矿化度处理微咸水冰体融化速率

Fig. 4 Melting rate of brackish water ice at different temperatures and initial salinity gradients

为定量评价微咸水冰体的相对融化速率变化,应用Origin软件通过指数函数中的BoxLucas1函数对其变化过程进行拟合(图4),并进行回归分析和显著性检验(表2)。15℃时0.5 g·L⁻¹处理决定

系数 R^2 为0.85,纯净水处理为0.69,其余处理 R^2 为0.94~0.98,均在0.05水平上显著,可以较为准确地描述相对融化速率随时间的变化情况。函数表达式为:

表 2 指数函数拟合相对融化速率曲线参数计算表

Table 2 Parameters of relative melting rate curves fitted by exponential functions

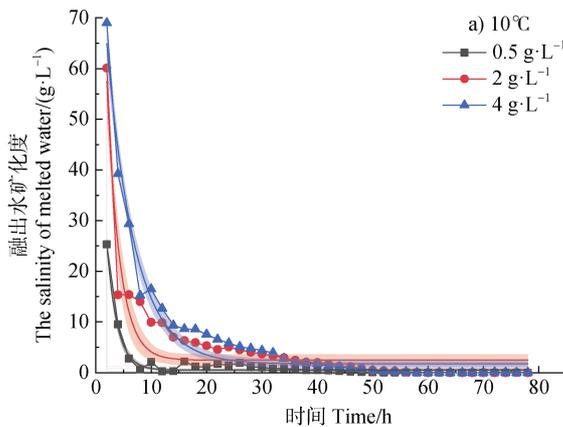
温度 Temperature /°C	矿化度 Salinity/ (g·L ⁻¹)	$y=a(1-e^{-bx})$			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>N</i>
15	纯净水 Fresh water	-16.854	-0.009	0.69	29
	0.5	-0.844	-0.059	0.85	30
	2	-2.737	-0.067	0.96	19
	4	-4.013	-0.047	0.94	23
	纯净水 Fresh water	-0.080	-0.073	0.94	39
	10	0.5	-0.039	-0.091	0.98
	2	-0.027	-0.094	0.97	39
	4	-0.072	-0.088	0.98	36

注：表中 *a*、*b* 为指数函数中的拟合常量；*R*² 为拟合精度；*N* 为样本数。Note: *a* and *b* are the fitting constants of the exponential function; *R*² is the fitting accuracy; *N* is the number of data used for fitting.

$$y=a(1-e^{-bx}) \quad (11)$$

式中，*a*、*b* 为拟合常量；*x* 为累积时间，h；*y* 为相对融化速率，mL·(mL·h)⁻¹。

2.1.2 不同矿化度微咸水冰体融出水质 不同温



度 (15°C、10°C) 下各处理的融出水矿化度变化过程，如图 5 所示。在初始时段，融出水的矿化度远大于融冰前微咸水的矿化度。如 10°C 时，4 g·L⁻¹ 处理初始融出水矿化度 69 g·L⁻¹，这表明在试验初始阶段 (0~8 h)，冰体中的盐分以较高浓度排出。处理矿化度越高，初始阶段融出水的盐浓度越高；随后各处理融出水矿化度急剧下降，最终可降低至初始矿化度的 1%。

融冰前期，矿化度处理相同时，温度越高，融出水矿化度越低，且矿化度下降越剧烈。对比融出水量变化 (图 3) 可以看出，温度对融出水矿化度的影响主要与融出水量有关。融冰前期，15°C 时各处理的融出水量远大于 10°C 情景，会使得脱盐量相同时，15°C 时的融出水矿化度相对较小。

通过 Origin 软件，采用指数函数中的 Asymptotic1 函数对融出水质的变化过程进行拟合 (图 5)，并进行回归分析和显著性检验 (表 3)。15°C 时 2 g·L⁻¹ 处理决定系数 *R*² 为 0.88，其余处理 *R*² 为 0.96~0.99，均在 0.05 水平显著，拟合模型可较为准确地描述融出水水质随时间的变化情况。

函数表达式为：

$$y=a-bc^x \quad (12)$$

式中，*a*、*b*、*c* 为拟合常量；*x* 为累积时间，h；*y* 为融出水矿化度，g·L⁻¹。

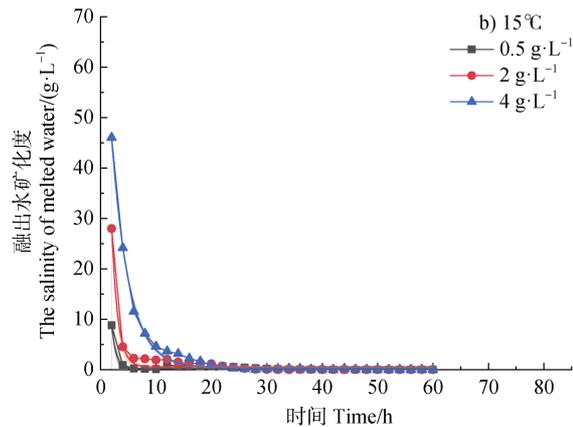


图 5 不同温度下各矿化度处理微咸水冰体融出水矿化度 Asymptotic1 函数拟合

Fig. 5 Melt water salinity fitted using Asymptotic1 function at different temperatures and initial salinity gradients

对各处理融出水质进行分类 (矿化度大于 5 g·L⁻¹ 为咸水，1 g·L⁻¹~5 g·L⁻¹ 为微咸水，小于 1 g·L⁻¹ 为淡水)，同时对各处理小于冻结前处理矿化度的融出水体积进行统计，如图 6 所示。三种矿化度处理的冰体均有淡水融出，矿化度处理越低，融

出水中淡水体积越大、咸水体积越小。即使是在 15°C 时，4 g·L⁻¹ 处理的融出淡水仅占融出水总量的 47%，用于灌溉盐渍化土壤时，这部分水便具备淋洗盐分效用。15°C 时，4 g·L⁻¹ 和 2 g·L⁻¹ 处理下均有超过 900 mL (融出水总量的 75%) 的融出水矿化

表3 指数函数拟合融出水矿化度曲线参数计算表

Table 3 Parameters of melt water salinity curves fitted by exponential functions

温度 Temperature /°C	矿化度 Salinity/ (g·L ⁻¹)	$y=a-bc^x$			R^2	N
		a	b	c		
15	0.5	0.228	-111.253	0.277	0.97	30
	2	0.496	-166.638	0.406	0.98	19
	4	0.394	-85.725	0.727	0.99	23
10	0.5	1.710	-93.742	0.821	0.96	39
	2	2.461	-131.425	0.646	0.88	39
	4	0.501	-72.946	0.584	0.97	36

注：表中 a 、 b 、 c 为指数函数中的拟合常量； R^2 为拟合精度； N 为样本数。Note: a , b and c are the fitting constants of the exponential function; R^2 is the fitting accuracy; N is the number of data used for fitting.

度小于冻结前矿化度，0.5 g·L⁻¹ 处理下为 543 mL。10℃时，4 g·L⁻¹ 和 2 g·L⁻¹ 处理融出水矿化度小于冻结前矿化度的体积较 15℃时小，分别为 884 mL 和 977 mL，0.5 g·L⁻¹ 处理为 722 mL；但融出的淡水体积却明显较 15℃时大。以上结果均表明，各矿化度微咸水结冰融水过程，水盐分离效果十分明显。

2.2 微咸水冰融水入渗和微咸水直接入渗模拟的盐分运移特征

基于建立的微咸水冰体融水入渗一维土壤水盐运移数值模拟，分析微咸水冰体融水入渗和微咸水直接入渗时，各处理不同观测点土壤盐分的动态变

化(图7)。微咸水冰体融水入渗时，不同处理各观测点土壤水含盐量变化存在明显差异。2 g·L⁻¹ 和 4 g·L⁻¹ 处理在模拟初期约 30 h 均有明显的积盐现象。在 10℃时，4 g·L⁻¹ 的处理下五个观测点初期均先后表现出积盐现象，其中 N1 观测点积盐强烈；2 g·L⁻¹ 的处理下只有 N1 和 N2 观测点表现出积盐现象，N1 观测点较为明显，且 10℃时两种矿化度处理的积盐现象存在一定滞后现象。0.5 g·L⁻¹ 的处理各观测点均无积盐现象。在 15℃时，各矿化度处理的盐分运移过程与 10℃时较为相似，2 g·L⁻¹ 和 4 g·L⁻¹ 处理的 N1 观测点 15℃时的积盐强度均大于 10℃情景，但持续时间相对较短。10℃时各处理观测点最终的土壤水含盐量，明显小于 15℃时各观测点的土壤水含盐量，说明 10℃时融化后期融出水矿化度虽然略微高于 15℃情景(图5)，但因融出水量较大(图3)，对土壤的淋洗效果更好。土壤水含盐量最终趋近的稳定值与处理矿化度密切相关，融冰后期融出水矿化度大大降低，不同处理各观测点均有显著的脱盐效果，且对上层土壤的淋洗效果最优。

微咸水直接灌溉入渗时，各处理所有观测点均表现为先剧烈脱盐，后趋于稳定的变化规律。与微咸水冰融水入渗相比，各处理均无积盐过程，同时也表现为越靠近上边界，脱盐速率越快，最终的土壤水含盐量越小。对于不同矿化度处理，各观测点最终趋近于稳定的土壤水含盐量，表现为矿化度越低，各观测点最终土壤含盐量的稳定值越小。

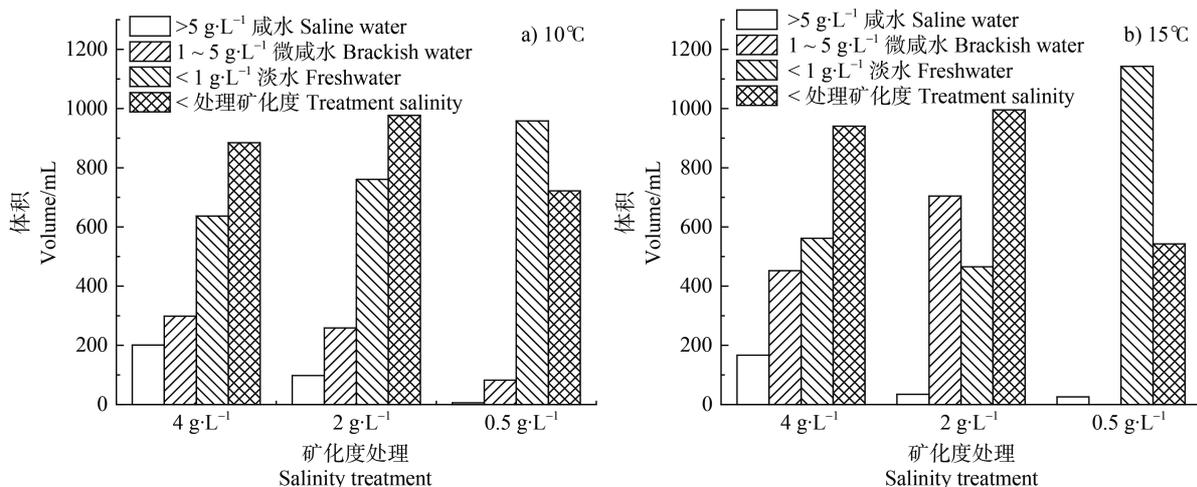
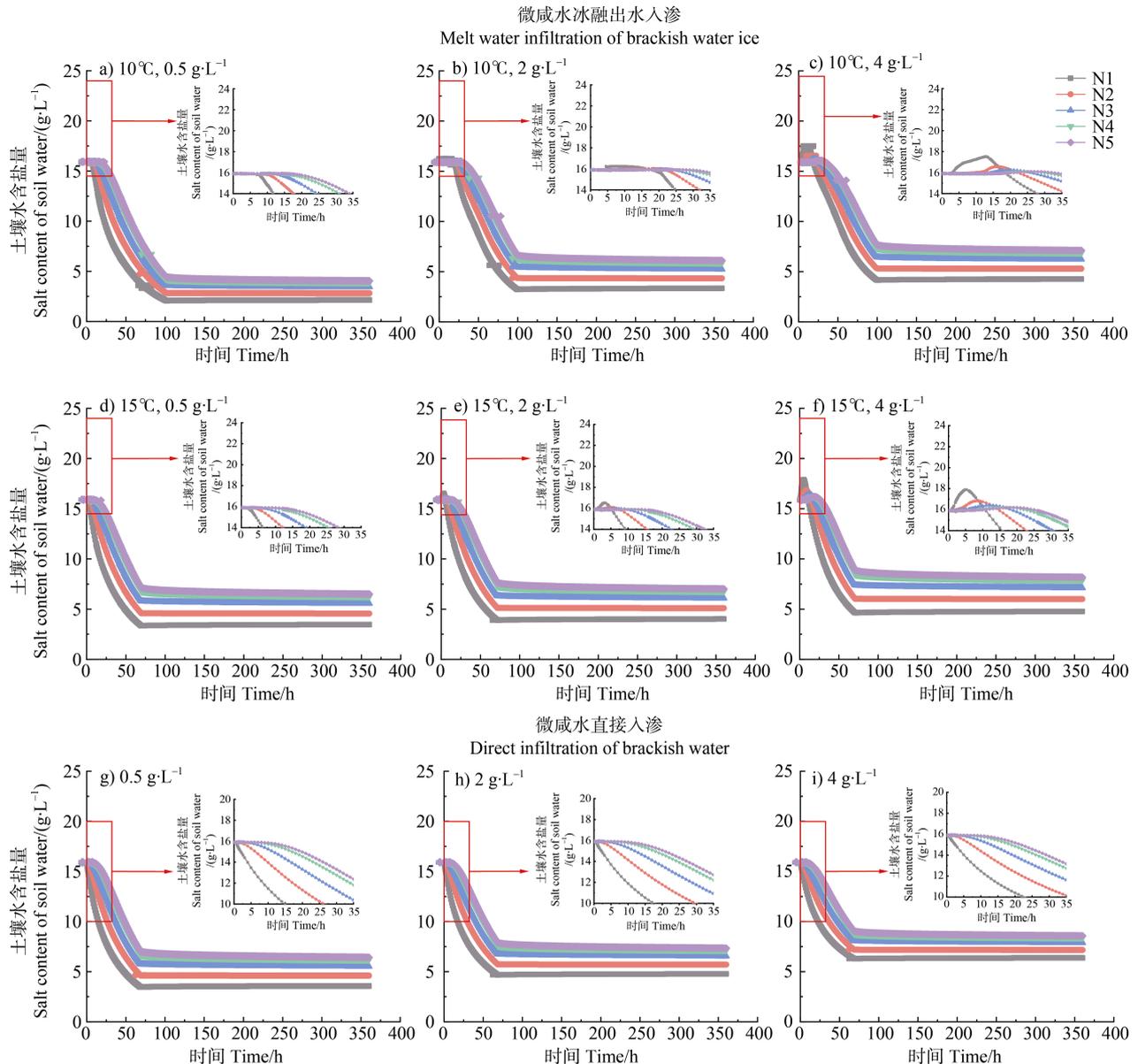


图6 不同温度下各矿化度处理微咸水冰体融出水水质分级对比

Fig. 6 Water salinity classification after melted from brackish ice at different temperatures and initial salinity gradients



注：N1、N2、N3、N4、N5 分别为在模拟土柱中设置的从上至下的五个观测点。Note: N1, N2, N3, N4 and N5 are the five observation points set from top to bottom in the simulated soil column

图 7 不同温度下各矿化度处理微咸水冰体融出水分入渗和微咸水直接入渗各观测点土壤水含盐量动态

Fig. 7 Temporal changes of soil water salinity at different observation points of soil columns infiltrated by water melted from brackish ice and by unfrozen brackish water at different temperatures and initial salinity gradients

2.3 土壤水盐均衡计算及淋洗效果对比

分析 12 种不同模拟条件下 50 cm 土壤剖面的水盐均衡，剖面最终模拟时刻（360 h）土体中的储水量、储盐量及脱盐率如表 4 所示。同时，为体现微咸水冰体融水入渗初期轻微积盐的现象，加入了模拟 12 h 时的结果。

由水盐均衡计算结果可以看出，微咸水冰体融水入渗相比微咸水直接入渗不仅提高了土壤脱盐率，还一定程度上增加了土壤中的储水量，当灌溉

面积较大时，总量可能表现出更明显差异。微咸水冰体融水入渗时，由于 10°C 时冰体融化速率慢，融出水量小，延长了入渗过程，因此 12 h 时土壤还未达到饱和含水率，且最终时刻 10°C 条件下土壤储水量略大于 15°C 情景。在 12 h 时，10°C 条件下的 2 g·L⁻¹ 和 4 g·L⁻¹ 两种处理均表现出积盐现象；15°C 时在 12 h 已经发生了土壤脱盐，并且处理矿化度越低，土壤脱盐率越高；而对比 10°C 和 15°C 两种条件最终时刻的储盐量，10°C 对应矿化度处理的土壤储盐量

表 4 不同处理下 50 cm 土体中水盐均衡结果

Table 4 Calculation of water-salt equilibrium in 50 cm soil columns under different treatments

处理			12 h 储水量	最终储水量	12 h 储盐量	最终储盐量	剖面脱盐率
Treatment			Water storage after	Final water	Salt storage after	Final salt storage/	Section desalting
入渗方式	温度	矿化度	12 h/cm	storage/cm	12 h/ (mg·cm ⁻²)	(mg·cm ⁻²)	rate/%
Way of infiltration	Temperature/°C	Salinity/ (g·L ⁻¹)					
融出水入渗 Melted water infiltration	10	0.5	16.44	15.088	206.76	12.94	94.92
	10	2	16.39	15.084	256.12	26.93	89.42
	10	4	16.40	15.084	270.74	44.25	82.61
	15	0.5	16.44	15.029	174.76	26.92	89.42
	15	2	16.44	15.033	196.74	35.71	85.97
	15	4	16.44	15.031	237.00	46.02	81.92
直接入渗 Direct infiltration	10	0.5	16.44	15.027	164.00	29.301	88.49
	10	2	16.44	15.027	173.50	49.135	80.69
	10	4	16.44	15.027	186.16	75.579	70.30
	15	0.5	16.44	15.027	164.00	29.301	88.49
	15	2	16.44	15.027	173.50	49.135	80.69
	15	4	16.44	15.027	186.16	75.579	70.30

注：各处理下 50 cm 土体初始储水量均为 16.00 cm，初始储盐量为 254.50 mg·cm⁻²。Note: The initial water storage capacity of 50 cm soil under each treatment was 16.00 cm, and the initial salt storage capacity was 254.50 mg·cm⁻².

显著小于 15℃ 处理，这与前述盐分运移分析结果一致。与之对应，微咸水直接入渗的水盐均衡计算表明，不同矿化度处理未对土壤储水量产生影响，而最终时刻土壤中的储盐量几乎达到相同微咸水冰体融水处理的两倍，脱盐效果相对较差。

剖面脱盐率的计算结果表明，10℃ 时相同矿化度处理的微咸水冰体融水入渗对土壤的淋洗效果优于 15℃ 情景。同时相同温度和矿化度处理下微咸水冰体融水入渗对土壤的淋洗效果优于微咸水直接入渗，10℃ 条件下 2 g·L⁻¹ 矿化度的微咸水冰体融水入渗的剖面脱盐率为 89.42%，甚至优于 0.5 g·L⁻¹ 的直接入渗处理。对比图 7 中的各子图也说明，相同矿化度处理 10℃ 条件下微咸水冰融水入渗对盐渍土的淋洗效果更好；同时在温度和矿化度处理均相同的情况下，微咸水冰体融水入渗时 5 个观测点最终趋向稳定的土壤水含盐量，均显著小于微咸水直接入渗情景。以上结果充分表明：基于微咸水冰体融化过程中发生的咸淡水分离效应，后融化的低矿化度淡水入渗对盐渍土盐分有较好的淋洗效果。

3 讨论

3.1 微咸水冰体融化过程的咸淡分离效应有助于淋洗盐渍土盐分

本文试验结果表明，微咸水冰体在融化时，咸淡分离效应明显，各处理微咸水冰体的融出淡水体积占比均达 75% 以上。不同矿化度处理对融化过程的影响主要因盐分浓度差异导致水的冰点不同：盐分浓度增加导致盐溶液的平衡冻结温度降低，浓度越大，冻结平衡温度越低，在相同温度下形成的温差越大，导致传热速率增加^[22]。因此，盐分浓度越高，冰的融化速率越快。微咸水冻结时对溶质的排斥作用，以及融化时由于重力作用形成的盐水通道，使得微咸水冰体融化时先融出的水矿化度较高，后融出的水矿化度较低，表现出明显的咸淡分离效应。在融水入渗时，后融出的低矿化度水入渗后对盐渍土盐分有较好的淋洗效果，这使得相同处理条件下，微咸水冰体融水入渗对盐渍土的淋洗效果要远好于微咸水直接入渗对土壤的淋洗效果。田宇等^[14]关于

咸水冰融化入渗的土柱试验研究也表明，融化出的不同矿化度水梯次入渗时，后入渗的低矿化度水对盐渍土中的盐分淋洗效果较好，与本文微咸水冰体融水入渗的模拟规律一致。

盐水通道的形成可能是微咸水冰体融化过程中咸淡分离的重要影响因素。微咸水冰体在最初阶段融出水矿化度极大，并随时间增加呈指数降低，这说明冰体中的溶质不仅通过融化释放，还可能以盐胞形式通过盐水通道排出。这主要源于对盐度更大的海冰融化过程的认识，冰-海界面最初的盐排斥、盐扩散、重力排水以及表层融水冲刷导致了海冰中盐的流失。Cole 和 Shapiro^[23]对海冰进行了微观结构的观察，证明在海冰中存在大量的盐水通道。Luo 等^[24]的研究表明，在冻结的咸水冰体中观察到了盐水胞的存在。因此，微咸水冻结过程中也可能形成盐水胞，并在重力作用下缓慢移动；随着温度升高，在冰中逐渐生成盐水通道，为溶质的排出提供了途径。在后续研究中，可考虑对微咸水结冰后的微观结构进行细致观察，为盐水通道的形成提供更直接证据。试验结果同时表明，微咸水冰体融出水的水盐分离效果与温度密切相关，10℃相比 15℃情景，温度越低，前期（0~10 h）融出水的矿化度更大，但全过程融出淡水体积更大，水盐分离效果更好。根据盐水通道的形成过程，温度越低，冰晶的融化速度越慢，盐水胞可在更长的时间形成完整的盐水通道，为水和溶质的分离提供了更有利的条件。

3.2 应加强微咸水冰体融出水质对土壤入渗特性影响的研究

灌溉水质会对土壤的结构及理化性质产生影响，进而影响土壤的入渗特性^[25]，这也是咸水结冰融水入渗对盐渍土的淋洗效果较好的一个重要原因。灌溉水的盐分和钠吸附比（SAR）对土壤物理性质具有差异性影响，SAR 增大会导致土壤导水率下降，而高含盐量可以抵消高 SAR 引起的不利影响^[24]。Li 等^[26]关于盐渍土的研究表明，盐水处理的土柱较低盐度和淡水处理的土柱有更高的导水性。本研究中微咸水冰体的渐次融水入渗的顺序为：高矿化度水、中等矿化度水、低矿化度水以及淡水。在实际的微咸水融冰入渗过程中，前期的高含盐量融水可防止黏土分散，保持土壤结构和渗透性，使得相比于微咸水直接入渗，微咸水冰体融水入渗的深度更深，入渗量更大；这也使得后期融出的淡水

可以对土壤中的盐分进行更加充分地淋洗，从而提高对盐渍土盐分的淋洗效果。因此，微咸水融冰灌溉实际应用于土壤盐分淋洗，可能优于本文模拟的淋洗效果。在今后的研究中，可进一步开展入渗过程微咸水冰体渐次融出水质对土壤结构及理化性质影响的研究，并在模拟模型中加以考虑；同时在微咸水结冰灌溉的实际应用中，昼夜气温变化大，会发生冰体与土体的反复冻融情形，也会对土壤结构以及理化性质产生影响，在今后的研究中，也需要针对这些因素，开展更加深入细致的研究。

3.3 模型参数敏感性

土壤水盐运移数值模型对土壤水力参数和溶质运移参数的敏感性存在差异。在模型建立过程中，土壤水力参数是根据实测土壤水分特征曲线，由 RETC 软件拟合得到，其中 K_s 是由土壤的容重和颗粒分级预测获取。溶质运移参数中，纵向弥散度取自他人研究成果^[20-21]。Rocha 等^[27]的研究结果表明，土壤水力参数中敏感性从大到小为 n 、 θ_s 、 K_s ， l 最小。因此选择参数 D_L 、 n 、 K_s 进行参数敏感性分析（表 5）。

将参数 D_L 、 n 、 K_s 变化 +10%、+5%、-5%、-10%，分别进行数值模拟计算，对参数变化后土壤剖面最后一个输出时间点下边界的土壤含盐量，计算均方根误差。由计算结果可以看出， D_L 、 n 、 K_s 的变化对模型存在一定影响，其中 D_L 敏感性较小， n 在 10℃，矿化度为 0.5 g·L⁻¹、4 g·L⁻¹ 和 15℃，矿化度为 0.5 g·L⁻¹ 处理下敏感性较大； K_s 在 10℃，矿化度为 0.5 g·L⁻¹、4 g·L⁻¹ 和 15℃，矿化度为 4 g·L⁻¹ 处理下表现出较大敏感性。这说明 D_L 、 n 、 K_s 对模型的准确性均存在一定影响，但从模型输出结果看，参数变化对盐分动态的整体趋势未产生很大影响，仍然是相同处理条件下，微咸水冰体融水入渗对土壤盐分的淋洗效果好于微咸水直接入渗。

4 结 论

（1）微咸水冰体单位时间融出水量整体呈现出先增大后减小的趋势，并且矿化度越高，融出水量变化越剧烈，峰值越高。融化速率在融冰前期增加缓慢，后期剧烈增加。（2）融出水矿化度在融冰前期极大，随后剧烈下降，最终融出水矿化度可降低至初始时的 1% 左右。在不同处理下，微咸水冰体的

表 5 模型参数敏感性分析结果

Table 5 Parameters in the sensitivity analysis

处理			D_L 变化量				n 变化量				K_s 变化量			
Treatment			Variation in D_L /%				Variation in n /%				Variation in K_s /%			
入渗方式	温度	矿化度	-10	-5	5	10	-10	-5	5	10	-10	-5	5	10
Way of infiltration	Temperature/°C	Salinity/(g·L ⁻¹)												
融出水入渗 Meltwater infiltration	10	0.5	-0.89	-0.42	0.39	0.77	-40.93	-36.21	14.19	15.87	19.75	24.46	-41.27	-30.76
	10	2	0.52	0.25	-0.20	-0.39	7.84	1.78	-2.35	-2.26	-14.16	9.95	-1.24	-13.00
	10	4	0.89	0.42	-0.35	-0.68	-5.19	-12.04	-3.04	-28.56	3.08	4.71	2.18	-33.95
	15	0.5	0.91	0.37	-0.37	-0.72	3.83	-26.46	-2.55	-5.07	0.23	0.31	-0.03	-0.29
	15	2	1.01	1.83	-0.44	-0.81	3.95	2.81	-2.15	-5.00	0.58	-0.07	3.95	-0.41
直接入渗 Direct infiltration	15	4	1.83	0.86	-0.79	-1.51	1.21	3.29	-2.32	-4.21	0.38	25.29	13.17	18.44
	10	0.5	0.67	0.32	-0.27	-0.52	4.31	-4.89	-2.57	-4.67	-0.09	-0.33	-0.12	-0.37
	10	2	0.62	0.30	-0.25	-0.47	3.42	-3.85	-2.03	-3.67	-0.05	-0.24	-0.11	-0.30
	10	4	0.52	0.25	-0.20	-0.39	2.51	-2.82	-1.48	-2.68	-0.01	-0.15	-0.07	-0.22
	15	0.5	0.67	0.32	-0.27	-0.52	4.31	-4.89	-2.57	-4.67	-0.09	-0.33	-0.12	-0.37
15	2	0.62	0.30	-0.25	-0.47	3.42	-3.85	-2.03	-3.67	-0.05	-0.24	-0.11	-0.30	
15	4	0.52	0.25	-0.20	-0.39	2.51	-2.82	-1.48	-2.68	-0.01	-0.15	-0.07	-0.22	

注：参数敏感性分析所用数据为土壤剖面最后一个时间输出点下边界的土壤含盐量，表中数据为参数变化后计算得到的均方根误差。Note: The abbreviations of other treatments followed the same protocol. The data used for parameter sensitivity analysis is the soil salt content at the lower boundary of the last time output point of the soil profile, and the data in the table is the root mean square error calculated after parameter changes.

融出淡水体积占比均达 75%以上，水盐分离效果明显。(3) 在相同条件下微咸水冰体融水入渗对盐渍土的淋洗效果更好，10℃条件下微咸水冰体融水入渗对盐渍土的淋洗效果较 15℃时更好。(4) 本研究初步表明，在西北内陆地区，应用微咸地下水结冰灌溉方式，对改善内陆地区的土壤盐渍化状况有较大潜力，可进一步开展深入研究。

参考文献 (References)

- [1] Wang Z C, Liang Z W. Advances of salt tolerance in plants[J]. Ecology and Environment, 2003, 12 (1): 106—109. [王志春, 梁正伟. 植物耐盐研究概况与展望[J]. 生态环境, 2003, 12 (1): 106—109.]
- [2] Li X, Li Y G. Effects of freezing irrigation with saline water on coastal saline land soil under different salinity[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13 (3): 64—68. [李宪, 李亚光. 不同矿化度咸水冬季结冰灌溉对滨海盐碱土的改良效果 [J]. 中国水土保持科学, 2015, 13 (3): 64—68.]
- [3] Li Z G, Liu X J, Zhang X M, et al. A primary study on the reclamation of coastal saline soil with freezing irrigation of saline water in winter[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23 (S1): 187—192. [李志刚, 刘小京, 张秀梅, 等. 冬季咸水结冰灌溉后土壤水盐运移规律的初步研究[J]. 华北农学报, 2008, 23 (S1): 187—192.]
- [4] Guo K, Liu X J. Infiltration of meltwater from frozen saline water located on the soil can result in reclamation of a coastal saline soil[J]. Irrigation Science, 2015, 33 (6): 441—452.
- [5] Guo K, Ju Z Q, Feng X H, et al. Advances and expectations of researches on saline soil reclamation by freezing saline water irrigation [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24 (8): 1016—1024. [郭凯, 巨兆强, 封晓辉, 等. 咸水结冰灌溉改良盐碱地的研究进展及展望 [J]. 中国生态农业学报, 2016, 24 (8): 1016—1024.]
- [6] Luo C S, Chen W W, Han W F. Desalination of brackish water through freezing[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2010, 46 (2): 6—10. [罗从双, 谌文武, 韩文峰. 冷冻法净化苦咸水的实验[J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2010, 46 (2): 6—10.]
- [7] Guo K, Chen L N, Zhang X M, et al. Water and salt distribution in coastal saline soil after infiltration of melt-water of saline water ice with different sodium

- adsorption ratio[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19 (3): 506—510. [郭凯, 陈丽娜, 张秀梅, 等. 不同钠吸附比的咸水结冰融水入渗后滨海盐土的水盐分布[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19 (3): 506—510.]
- [8] Che S G, Lin Z A, Zuo Y B, et al. Effects of saline ice-melt water irrigation on soil water, salt movement and corn growth in agricultural fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20 (9): 1210—1215. [车升国, 林治安, 左余宝, 等. 咸水结冰融水入渗对土壤水盐运移和玉米苗期生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20 (9): 1210—1215.]
- [9] Cui L H, Zhu Y, Zhao T X, et al. Soil ion components and soil salts transport in frozen layer in seasonal freezing-thawing areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (10): 75—82. [崔莉红, 朱焱, 赵天兴, 等. 季节性冻融土壤盐分离子组成与冻结层盐分运移规律研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35 (10): 75—82.]
- [10] Fan L Q, Li L, Wu X. Relationship between soil salinity and groundwater characteristics in saline-alkali land with high groundwater level of Yinbei irrigation area [J]. Water Saving Irrigation, 2019 (6): 55—59. [樊丽琴, 李磊, 吴霞. 银北高水位盐碱地土壤盐分与地下水特征关系分析 [J]. 节水灌溉, 2019 (6): 55—59.]
- [11] Hou K X, Yue W F, Meng K K, et al. Autumn irrigation alerted the geochemistry of groundwater in Hetao irrigation district: Take Yichang irrigation district as an example[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38 (6): 85—91, 112. [侯凯旋, 岳卫峰, 孟恺恺, 等. 内蒙古河套灌区秋浇对区域尺度地下水水化学影响分析——以义长灌域为例[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38 (6): 85—91, 112.]
- [12] Wang Q J, Xu Y M, Wang J D, et al. Application of saline and slight saline water for farmland irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 2002, 21 (4): 73—77. [王全九, 徐益敏, 王金栋, 等. 咸水与微咸水在农业灌溉中的应用[J]. 灌溉排水, 2002, 21 (4): 73—77.]
- [13] van Genuchten M T, Leij F J, Yates S R. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils[R]. California: US Salinity Laboratory, 1999: 4—41.
- [14] Tian Y, Chen H Y, Guo K, et al. Saline water infiltration process and water-salt distributions in coastal saline soil relative to concentration of the saline water[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (4): 911—920. [田宇, 陈环宇, 郭凯, 等. 不同咸水梯次滨海盐土入渗过程及水盐分布特征[J]. 土壤学报, 2021, 58 (4): 911—920.]
- [15] Lei Z D, Yang S X, Xie S C. Soil water dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. [雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.]
- [16] Šimůnek J, Šejna M, Saito H, et al. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media[R]. University of California Riverside, 2008.
- [17] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44 (5): 892—898.
- [18] Jacques D, Simunek J. User manual of multicomponent variably-saturated flow and transport model HP1 (Version 1.0): Description, Verification, and Examples[M]. SCK•CEN, Mol, Belgium, BLG-998, 2005: 79.
- [19] Wang S M, Fan J L, Zhao Y, et al. Numerical simulation of water and salt migration in desert soil in the lower reaches of Tarim River under salt-water irrigation[J]. Arid Land Geography, 2021, 44 (4): 1104—1113. [王世明, 范敬龙, 赵英, 等. 咸水灌溉条件下塔里木河下游沙漠土壤水盐运移数值模拟[J]. 干旱区地理, 2021, 44 (4): 1104—1113.]
- [20] Ji X X. Soil water and salt transport characteristics and simulations under mulched drip irrigation of maize with different soil water matric potentials in the Hetao irrigation district[D]. Yangling, China: Northwest A & F University, 2019. [姬祥祥. 不同土壤水基质势水平下河套灌区玉米膜下滴灌土壤水盐运移特征及其模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.]
- [21] Ding Y T, Cheng Y, Zhang T B, et al. Effects of different thresholds of mulched drip irrigation on water and salt distribution and water use efficiency of maize in a sand-layered soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (3): 734—745. [丁运韬, 程煜, 张体彬, 等. 滴灌灌水下限对夹砂层农田土壤水盐分布和玉米生长的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59 (3): 734—745.]
- [22] Barma M C, Peng Z B, Moghtaderi B, et al. Freeze desalination of drops of saline solutions[J]. Desalination, 2021, 517: 115265.
- [23] Cole D M, Shapiro L H. Observations of brine drainage networks and microstructure of first-year sea ice[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1998, 103 (C10): 21739—21750.
- [24] Luo C S, Chen W W, Han W F. Experimental study on factors affecting the quality of ice crystal during the freezing concentration for the brackish water[J]. Desalination, 2010, 260 (1/2/3): 231—238.
- [25] Suarez D L, Wood J D, Lesch S M. Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation management system[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86 (1/2): 150—164.
- [26] Li Z G, Liu X J, Zhang X M, et al. Infiltration of melting saline ice water in soil columns: Consequences on soil moisture and salt content[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95 (4): 498—502.
- [27] Rocha D, Abbasi F, Feyen J. Sensitivity analysis of soil hydraulic properties on subsurface water flow in furrows[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132 (4): 418—424.

(责任编辑: 檀满枝)