文章编号: 1672 - 3317 (2021) 02 - 0062 - 08

盐分对季节性冻融土壤蒸发的影响试验及数值模拟研究

毛 俊¹, 伍靖伟^{1*}, 刘雅文¹, 吴谋松²

(1.武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室,武汉 430072;2.南京大学 国际地球系统科学研究所,南京 210046)

摘 要:【目的】探究盐分对季节性冻融土壤蒸发的影响规律。【方法】在内蒙古河套灌区开展了B1和B2二组不同 含盐量下(B1:7.80g/kg;B2:41.16g/kg)的野外土柱蒸发试验,建立了考虑盐分影响(该影响由盐分阻抗和土壤 表面阻抗体现)的冻融土壤蒸发数值模拟模型。采用土柱试验结果对模型进行了率定验证,并与SHAW模型进行了 对比分析。在此基础上,应用该模型对9种不同含盐量(S1—S9:0、2.5、5、7.5、10、15、20、35、50g/kg)下 的冻融土壤蒸发进行了模拟。【结果】土壤含盐量不同导致的土壤蒸发强度差异显著,特别是在土壤冻结初期和融通 期,土壤含盐量较低的B1土柱蒸发强度分别约是B2土柱的1.5倍和1.8倍;与SHAW模型相比,考虑盐分影响的 冻融土壤蒸发模型能准确反映受盐分影响的冻融土壤蒸发过程,更适用于受盐渍化影响的季节性冻土区;冻融土壤 蒸发量随含盐量增加呈现出先增后减的变化趋势,在含盐量为S6时,土壤蒸发量最大,为136.3 mm;相比无盐土 S1,S2—S6的土壤蒸发分别增加了1.09%、13.68%、56.22%、73.73%和86.46%,而对比S6,S7—S9的土壤蒸发分 别减少了10.20%、26.34%和42.55%。【结论】盐分对季节性冻融土壤蒸发影响显著,其作用为先促进后抑制,考虑 盐分影响的冻融土壤蒸发模型可以提升盐渍农田蒸发的模拟精度。

关键词:盐分;冻融土壤;土壤蒸发;数值模拟

中图分类号:S125.7 文献标志码:A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020355

OSID:

毛俊, 伍靖伟, 刘雅文, 等. 盐分对季节性冻融土壤蒸发的影响试验及数值模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 62-69.

MAO Jun, WU Jingwei, LIU Yawen, et al. Effects of Salt Content on Evaporation from Seasonally Frozen Soil: Experimental Measurement and Numerical Simulations[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 62-69.

0 引 言

【研究意义】季节性冻融土壤在世界广泛分布, 是一种重要的土地利用资源。我国是世界第三大冻土 国,季节性冻融土壤约占全国国土面积的 53.5%^[1], 主要分布在干旱、半干旱的粮食产区^[2],同时这些区 域也是我国主要的土壤盐渍化分布区^[3]。随着中国工 业的快速发展和水资源的日益短缺,提升灌区水资源 利用效率势在必行。而冻融土壤蒸发作为季节性冻土 区水文循环的重要组成部分^[4],在农业用水的管理与 制定中扮演着重要角色^[5-6]。因此,研究季节性冻融 土壤蒸发的机理机制,对提高水资源利用效率、促进

农业可持续发展具有重要意义。

【研究进展】目前已有较多针对季节性冻融土 壤蒸发的野外观测和数值模拟。Zhang等^[7]测量了不 同地下水位条件下裸地与非裸地的季节性冻土蒸发 量; Miao 等^[8]对冻融期的潜水蒸发进行了测量; 苗 春燕等^[9]研究了地表覆砂对季节性冻土蒸发的影响: Wu 等^[10]开展了不同含盐量及地下水埋深下的野外 土柱蒸发试验; Zhang 等^[11]开发了可计算寒区土壤蒸 发的数值模拟模型;陈军锋等^[12]使用 SHAW 模型模拟 了不同潜水埋深下的季节性冻融土壤蒸发;解雪等^[13] 利用灰色关联分析与 BP 神经网络相结合的方法,对 冻融期大田土壤蒸发量进行了模拟预报。【切入点】但 这些研究均较少考虑盐分在其中的影响。在季节性冻 土区,土壤冻结与融化的交替作用是造成土壤次生盐 渍化的重要原因之一[14],土壤中的盐分会显著影响并 改变土壤蒸发[15-16]。因此,有必要对盐分影响下的冻 融土壤蒸发规律进行研究。

收稿日期: 2020-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51790532);国家重点研发计划课题(2017YFC0403304);湖北省水利重点项目(HBSLKY201908)

作者简介: 毛俊(1994-), 男。硕士研究生, 主要从事农田水资源高效利用研究。E-mail: 1069748601@qq.com

通信作者: 伍靖伟(1974-), 男。教授, 博士, 主要从事土壤水地下水资源与环境方面研究。E-mail: jingwei.wu@whu.edu.cn

【拟解决的关键问题】通过野外土柱冻融试验与数值模拟相结合的方法,探究盐分对季节性冻融土壤 蒸发的影响规律,以期为季节性冻土区水资源计算及 其高效利用提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古河套灌区义长灌域永联试验 基地,地理坐标为东经108 00'6.6",北纬41 04'2.3", 海拔1020m。地处干旱、半荒漠地带,冬季严寒少 雪,夏季高温干热。试验区年降雨量 139~222 mm, 主要集中在 7-8 月,占全年降雨量的 60%左右;年 潜在蒸发量高达 2 200~2 400 mm。通常在 11 月初平 均气温降低至 0 ℃以下,土壤进入初始冻结阶段。 随着气温持续降低,冻结锋面向深层土壤推进,并在 2 月下旬达到最大冻深,多年平均冻结深度约为 100~110 cm。在 3 月上旬日平均气温回升至 0 ℃以上, 冻土开始从地表向下消融。与此同时,受地热作用, 冻土开始从冻结锋面向上融化,至4月下旬整个土层 完全融通,年内冻土存在的时间长达约6个月。该试 验区土壤以壤土、粉壤土、粉土和砂土为主,含黏土 夹层, 土壤平均体积质量为 1.5 g/cm³, 冻融期地下水 位埋深及电导率变化如图1所示[17]。



during freezing/thawing period

1.2 试验设计与方法

1.2.1 试验设计

此次野外土柱试验于 2018 年 11 月 16 日—2019 年 5 月 1 日进行。设置 2 组试验土柱,分别记为 B1 和 B2,每组包含 4 根处理相同的土柱,双排放置在大 田 PE 材质的套管中,每根土柱之间间隔为 50 cm,其 野外布置如图 2 所示。土柱每根长 3 m,直径为 5 cm, 土柱的前 2 m 为非饱和段,后 1 m 为饱和段(因为在 试验区,无灌水和强降雨时,地下水埋深在 2 m 左右, 地下水的电导率在 1 500 µS/cm 左右^[17-18],后 1 m 的 饱和段用来模拟地下水位),其土柱设计如图 3 所示。

在野外试验大田挖取了3种含盐量不同的土壤, 分别编号为土壤 1、2 和土壤 3, 其土壤质地见表 1。 将挖取的土壤在室内分别进行烘干、研磨、过2 mm 筛并搅拌均匀,测定土壤1、2和土壤3的初始平均 电导率分别为2438、12862和1141 uS/cm(土壤全 盐量分别为 7.80、41.16 和 3.65 g/kg)。将预处理的土 壤1和土壤2按体积含水率0.30m³/m³进行配水,土 壤3按饱和含水率0.43 m³/m³进行配水,随后将配好 水的土壤在室内用塑料薄膜密封静置 24 h。由于在配 水过程中认为土壤完全干燥,忽略了土壤吸湿水等的 影响,实际配水得到的土壤1、2和土壤3的初始含 水率分别为 0.32、0.33 和 0.44 m³/m³。将配好水的土 壤3按体积质量1.5g/cm³每10cm填装在土柱的饱和 段,然后将土壤1和土壤2按体积质量1.5 g/cm³每 10 cm 分别填装在 B1 和 B2 土柱的非饱和段。将填装 好的土柱放入预先埋置在大田的 PE 材质套管中进行 自然冻融试验,并用保温棉将套管与土柱之间的空隙 进行填充。



土壤编号	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	土壤类型
土壤1	14.00	73.50	12.50	粉壤土
土壤 2	10.05	77.94	12.01	粉壤土
土壤 3	30.13	53.37	16.50	粉黏壤土

1.2.2 土壤含水率和含盐量测定

每隔 42 d 左右对 B1 和 B2 中的一根土柱进行取 样,取样时间分别为 2018 年 12 月 25 日 (P1)、2019 年 2 月 10 日 (P2)、3 月 20 日 (P3)、5 月 1 日 (P4)。

采用破坏法对土柱进行取样,利用锯子对土柱每 10 cm 进行切割,并将切割后土柱中的土倒入到预先 准备好的自封袋中。在室内通过烘干法测定土样的质 量含水率,取 20 g 烘干后的土样按照 1:5 的土水质 量比混合,经振荡、过滤后,所得清液采用上海仪电 科学仪器股份有限公司生产的 DDSJ-318 型电导率仪 测定其电导率 *EC*_{1:5} (μS/cm),与全盐量 *S*(g/kg)的 关系可采用在该地区标定得到的换算^[19]计算式为:

$$S=0.32EC_{1:5}/100_{\circ}$$
 (1)

1.2.3 蒸发速率计算

在整个冻融期,试验基地无降雨降雪,蒸发成为 通过水量平衡原理计算试验土柱蒸发速率水分消耗 的唯一项,因此其平均蒸发速率 *E*(mm/d)计算式为:

$$E = 1\ 000 \times (V_{i-1} - V_i) / (\Delta TA), \tag{2}$$

式中: ΔT 为土柱取样的时间间隔 (d); A 为土柱横 截面积 (m²); *i* 为取样的时期; 1 000 为单位换算系 数; V 为整根土柱水的体积 (m³), 计算式为:

$$V_i = \sum_{j=1}^N A\theta_{ij} h_j / \rho_{\rm w}, \tag{3}$$

式中: θ_{ij} 为取样土层体积含水率 (m³/m³); h_j 为取样 土层深度,0.1 m; ρ_w 为水的密度 (kg/m³);N为土 柱总的取样土层数目;j为取样土层编号。

1.3 考虑盐分影响的冻融土壤蒸发模型建立

现有的冻融土壤模型,例如 SHAW 模型,土壤 蒸发 *E* 计算式^[20]为:

$$E = \frac{\rho_{\rm vs} \cdot \rho_{\rm va}}{\rho_{\rm w} r_{\rm v}},\tag{4}$$

式中: ρ_{vs} 和 ρ_{va} 分别为土壤表面和大气的水汽密度 (kg/m³); r_v 为空气动力学阻抗(s/m)。该蒸发模型 仅考虑了溶质势对土壤表面水汽密度的影响,并未考 虑盐分的其它作用。例如:①盐分可影响冻融土壤中 的液态含水率,含盐量越大,液态含水率越多^[21],则 越有利于土壤蒸发;②土壤含盐量达到一定量时,易 形成盐结壳,从而阻碍土壤蒸发^[22]。基于以上考虑, 本文提出如下考虑盐分影响的冻融土壤蒸发模型:

$$E = \frac{\rho_{\rm vs} \cdot \rho_{\rm va}}{\rho_{\rm w}(r_{\rm v} + r_{\rm s} + r_{\rm sc})},\tag{5}$$

式中: r_s 和 r_{sc} 分别表示土壤表面阻抗和盐分阻抗 (s/m)。

Bittelli 等^[23]对土壤表面阻抗 r_s进行了研究,推荐 使用 Sun 提出的幂函数模型计算土壤表面阻抗 r_s比较 合理,即:

$$r_{\rm s} = 3.5 \left(\frac{\theta_{\rm s}}{\theta_{\rm l}}\right)^{2.3} + 33.5,$$
 (6)

式中: θ_s为土壤饱和含水率(m³/m³); θ₁为土壤的液 态含水率(m³/m³)。其中,对于非冻土,液态含水率 即为总的土壤含水率,但是对于冻结土,其液态含水 率的大小与土壤负温和含盐量有关。经研究发现,溶 质势、基质势与土壤负温之间满足关系式^[24]为:

$$\psi + \pi = \frac{L_{\rm f}T}{{}_{\rm g}T_{\rm s}},\tag{7}$$

式中: L_f 为水的冻结潜热 (J/kg); g 为重力加速度 (m/s²); T 为土壤摄氏温度 (℃); T_s 为土壤绝对温 度 (K), $T_s = T + 273.15$; ψ 为基质势 (m), 基质势与 液态含水率的关系可采用 VG 模型计算式为:

$$-\psi = -\frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{\theta_{l} - \theta_{r}}{\theta_{s} - \theta_{r}} \right)^{\frac{-1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{m}}, \qquad (8)$$

式中: θ_r 为土壤残余含水率 (m^3/m^3); α 、m和n分别为影响土壤水分特征曲线的经验系数,其中 m=1-1/n;溶质势 π 计算式为:

$$\pi = -\frac{cRT_s}{g}, \qquad (9)$$

式中: *R* 为气体常数,为 8.31 J/(mol·K); *c* 为盐分 浓度(mol/kg),计算式为:

$$c = \frac{S\rho_{\rm b}}{M_{\rm m}\rho_{\rm w}\theta_{\rm l}},\tag{10}$$

式中: ρ_b 为土壤体积质量(kg/m³); M_m 为盐分的摩 尔质量(g/mol)。

将式(8)、式(9)和式(10)带入式(7)得到:

$$-\frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{\theta_{\rm l} \cdot \theta_{\rm r}}{\theta_{\rm s} \cdot \theta_{\rm r}} \right)^{-\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{m}} - \frac{S\rho_{\rm b}RT_{\rm s}}{M_{\rm m}\rho_{\rm w}\theta_{\rm l}g} = \frac{L_{\rm f}T}{gT_{\rm s}}, \qquad (11)$$

在土壤负温 *T*、全盐量 *S*和土壤水分特征曲线确 定时,此时式(11)中只有 θ₁为未知量,可通过牛顿 迭代法求解出 θ₁。

对于土壤盐分阻抗 r_{sc}, Haruyuki F 等^[25]利用土壤 蒸发实验推导出 r_{sc}可用对数函数表达,其计算式为:

$$r_{sc}=0 \qquad \Gamma < \exp(-b_r/a_r), \qquad (12)$$
$$r_{sc}=100[a_r\ln(\Gamma)+b_r] \quad \Gamma \ge \exp(-b_r/a_r), \qquad (12)$$

式中: $a_r \approx b_r \beta_r$ 分别为盐分控制参数; Γ 为一定厚度土层的盐分累计值(mg/cm²),其计算式为:

$$\Gamma = \frac{1}{1\,000} \int_0^z S\rho_{\rm d} \mathrm{d}z,\tag{13}$$

式中: z 为一定厚度土层 (cm),本文取 0.25 cm。

1.4 冻融土壤水热盐控制方程

1.4.1 土壤水分控制方程

对于土壤水分运移方程,考虑冰水相变的影响,

依据质量守恒定律和达西定律,可得到控制方程为:

$$C(\psi)\frac{\partial\psi}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w}\frac{\partial\theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial\psi}{\partial z} + 1 \right) \right], \quad (14)$$

式中: $C(\psi)$ 为土壤的容水度; t为时间 (s); z为土壤 层深度 (m); K为土壤水力传导系数 (cm/h); θ_i 为 土壤含冰率; ρ_i 为冰的密度 (kg/m³)。

1.4.2 土壤热控制方程

对于土壤热控制方程,忽略气相和液相的对流热, 考虑冰水相变的影响,依据傅里叶定律和能量守恒定 律,可得到土壤热运移方程为:

$$C_{s\frac{\partial T}{\partial t}} - \rho_{i} L_{f} \frac{\partial \theta_{i}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \qquad (15)$$

式中: C_s 为土壤的体积热容量 (J/(m^3 ·℃)); λ 为土 壤热传导系数 (W/(m·℃))。

1.4.3 土壤盐分控制方程

冻融土壤的盐分运移控制方程主要考虑了水动 力弥散以及对流作用,控制方程为:

$$\rho_{\rm b} \frac{\partial C}{\partial t} = \rho_{\rm w} \frac{\partial}{\partial z} \Big[(D_{\rm H} + D_{\rm m}) \frac{\partial c}{\partial z} \Big] - \rho_{\rm w} \frac{\partial (q_{\rm f} c)}{\partial z}, \qquad (16)$$

式中: $D_{\rm H}$ 和 $D_{\rm m}$ 分别为水动力弥散系数和离子扩散系数(m²/s);C和c分别为单位质量土壤和水溶液中盐分浓度(mol/kg); $q_{\rm l}$ 为液态水通量(m/s)。

1.5 模型应用的情景设置

为全面揭示不同盐渍化程度下盐分对冻融土壤 蒸发的影响规律,依据表 2 的土壤盐渍化程度分级标 准,对非盐渍化、轻度和中度盐渍化土壤分别设置 2 种含盐量水平,对重度盐渍化土壤设置 3 种含盐量水 平,共 9 种含盐量水平(S1—S9),全盐量值从小到 大分别为 0、2.5、5、7.5、10、15、20、35 和 50 g/kg。 应用考虑盐分影响的冻融土壤蒸发模型对这 9 种含 盐量情形进行蒸发模拟,土壤盐渍化分级标准参考 文献[26]。

Та	ble 2	Classi	fication standa	rd of soil salin	ization
分类	非書	L 渍化	轻度盐渍化	中度盐渍化	重度盐渍化
含盐量/(σ kg ^{-1、}) 0≶	S<5	$5 \leq S \leq 10$	10≤ <i>S</i> ≤20	$20 \leq S$

表 2 土壤盐渍化分级标准

2 结果与分析

2.1 盐分对冻融土壤蒸发的影响

图4和图5分别为冻融土柱试验的累计蒸发量及 不同阶段的日平均蒸发速率。由图4可知,含盐量不 同导致冻融土壤蒸发量差异显著,含盐量较高的 B2 土柱总蒸发量仅为B1 土柱的65%,且冻融土壤蒸发 量主要集中在冻结初期(P1)以及融通期(P4)。从 图5可见,在测量的P1和P4时期,B1的日平均蒸 发速率远高于B2 土柱,分别约是B2 土柱的1.5 倍和 1.8 倍。而在测量的 P2 和 P3 时期, B1 和 B2 的日平 均蒸发速率相当,这表明含盐量差异在该 2 个阶段的 作用不显著。这可能是因为在该 2 个时期,土壤温度 和含水率分别成为了影响蒸发的主要因素,从而影响 到了盐分的作用。









2.2 考虑盐分影响的冻融土壤蒸发模型验证与评价

将考虑盐分影响的冻融土壤蒸发模型与冻融土 壤的水热盐运移模型相结合,以 B1 土柱的试验结果 进行参数率定,以 B2 土柱的试验结果进行模型验证。 率定得到的土壤水分特征曲线如表 3 所示,率定得到 的盐分阻抗控制参数 *a*_r=1.05, *b*_r=-4.225。模型模拟设 置的上边界为大气边界,土壤温度的下边界为给定温 度边界,水分和盐分运移的下边界为零通量边界。使 用的气象数据资料来自内蒙古河套灌区义长灌域试 验站在试验区布设的自动气象站。

表 3 土壤水分特征曲线参数

Table 3 Parameters of soil water characteristic curve

土壤深度/cm	$\theta_{\rm s}/({\rm m}^3~{\rm m}^{-3})$	$\theta_{\rm r}/({\rm m}^3~{\rm m}^{-3})$	α/m^{-1}	т	п
$0{\sim}200$	0.43	0.06	0.52	0.40	1.68
200~300	0.43	0.13	0.32	0.40	1.68

图 6 为率定期和验证期冻融土壤水盐运移的模 拟值与实测值相关图。引入均方根误差(*RMSE*)、决 定系数(*R*²)以及相对百分误差绝对值的平均值 (*MAPE*)3 种指标作为水盐运移模型率定和验证的 合理性评价指标。

率定期冻融土壤水盐模拟的 *RMSE* 分别为 0.021 m³/m³ 和 1.89 g/kg, *R*² 为 0.87 及 0.52, *MAPE* 为 5.01% 和 24.04%;验证期冻融土壤水盐模拟的 *RMSE* 分别 为 0.023 m³/m³ 和 10.28 g/kg, *R*² 为 0.87 及 0.72, *MAPE* 为 6.52% 和 34.76%。模拟数据显示:率定期盐分的 *RMSE* 和 *MAPE* 均优于验证期,但是 *R*² 却劣于验证

期,其原因在于 R² 表示的是整体的数据点在回归线 的集中程度,受极端值的影响较小。从图 6 可以看出, 验证期存在几个较大的极端值,但是其数据更加集中 在 45°线附近,这使得验证期的盐分 R²高于率定期。 总体来看,冻融土壤水盐的模拟值与实测值吻合得较 好,这为验证盐分影响下的冻融土壤蒸发模型奠定了 基础。





图 7 为率定期和验证期冻融土壤蒸发模拟值与 实测值。从图7可看出,SHAW 模型无法对盐分影响 下的冻融土壤蒸发过程进行较好的模拟,在较长时间 段低估了 B1 土柱蒸发,而始终高估了 B2 土柱蒸发, 模拟结果的 *MAPE* 值分别为 26.67%和 41.27%,这充 分表明 SHAW 模型并不适用于盐渍化季节性冻土区 的土壤蒸发模拟。与 SHAW 模型的模拟结果相比, 考虑盐分影响的冻融土壤蒸发模型明显改善了对盐 渍化冻融土壤蒸发的模拟效果,对 B1 和 B2 土柱均 进行了较好模拟,模拟结果的 MAPE 分别为 9.74%和 6.35%,这表明建立的考虑盐分影响的冻融土壤蒸发 模型更加适用于盐渍化季节性冻土区。



Fig.7 Simulated and measured values of evaporation from freezing / thawing soil

2.3 考虑盐分影响的冻融土壤蒸发模型的应用

图 8 为 9 种含盐量下模拟得到的冻融土壤在整个 冻融期的总蒸发量。从图 8 可看出,冻融土壤总蒸发 量随含盐量的增大表现出先增加后减少的变化趋势, 在土壤含盐量为 S6 时,土壤蒸发量最大,为 136.3 mm。 与无盐土 S1 相比, S2—S6 的冻融土壤蒸发量分别增 加了 1.09%、13.68%、56.22%、73.73%以及 86.46%。 而与含盐土 S6 相比, S7—S9 的冻融土壤蒸发量分别 减少了 10.20%、26.34%和 42.55%。由此可见,盐分 对冻融土壤蒸发的作用是先促进后抑制。





3 讨论

土壤蒸发是地表能量和水量平衡重要的组成部 分,其准确计算对于干旱、半干旱季节性冻土区土壤 盐渍化防治具有重要的现实意义。而土壤中的盐分对 土壤蒸发的影响是十分显著的,这与他人研究结果一 致^[16,22]。冻融土壤蒸发量的大小受到冻融期时段的影 响,在冻结初期和融通期土壤蒸发量较大,在其余阶 段土壤蒸发量较小,这与 Kaneko 等^[27]研究结果一致。 此外,土壤含盐量不同导致的土壤蒸发强度差异也 主要表现在冻结初期和融通期,这与 Wu 等^[10]研究 结果一致。

进一步研究表明,SHAW 模型不能对受盐渍化影 响的冻融土壤蒸发进行较好模拟,而考虑盐分影响的 冻融土壤蒸发模型则明显改善了对盐渍化冻融土壤 蒸发的模拟效果。由此可见,在对含盐土壤进行蒸发 模拟时,考虑盐分在其中的影响有利于提升模拟计算 的精度。张少文等^[15]和彭振阳等^[16]在对含盐土进行模 拟时,通过考虑盐分对土壤蒸发的影响提升了模拟精 度。并且应用该模型发现,随着土壤含盐量的增大, 冻融土壤蒸发呈现先增大后减小的变化趋势,在土壤 含盐量不高于中度盐渍化程度时,土壤中的盐分可促 进土壤蒸发,这与 Wu 等^[10]研究结果一致。而在重度 盐渍化下,土壤易形成盐结壳,对土壤蒸发具有抑制 作用,这与张建国等^[22]研究结果一致。

为应对秋浇或冬灌后产生的土壤次生盐渍化问题,对于排水能力不足的地区,利用干排水控盐技术 是治理该问题的重要举措^[28]。该技术通过地下水的天 然运动将耕地多余水分和盐分排至相邻盐荒地,然后 通过盐荒地的蒸发作用消耗掉,而将盐分储存在土壤 和地下含水层中。由此可见,盐荒地的蒸发能力是干 排水控盐技术的核心。可是盐分对土壤蒸发能力具有 重要影响,随着干排水控盐技术的持续使用,盐荒地 的土壤含盐量将持续累积并达到重度盐渍化,此时盐 荒地的土壤蒸发能力将受到严重限制,通过干排水控 盐防止土壤次生盐渍化的效果也将大打折扣。因此, 对于利用干排水控盐技术治理土壤盐渍化的地区,盐 荒地的盐渍化程度应控制在中度,可使盐荒地土壤蒸 发能力达到最大,也可增强干排水控盐效果。

值得注意的是,在试验研究过程中,土柱蒸发的 测量是破坏式的,这可能增加测量的不确定性。为减 小蒸发测量的不确定性,建议后期的土柱试验可采用 原位监测的方法。与此同时,野外土柱试验剖面的水 盐含量是一个动态变化过程,但是在此次研究过程中 采用的是静态分析方法,并未突出考虑盐分的动态变 化过程对土壤蒸发的影响,这可在后期利用冻融水热 盐运移模型探究该影响。此外,对于考虑盐分影响的 冻融土壤蒸发模型中的盐分阻抗参数,其值的影响因 素也值得进一步研究。

4 结 论

 1)盐分对季节性冻融土壤蒸发影响显著,在整 个冻融期,含盐量较高的 B2 土柱总蒸发量仅为 B1 土柱的 65%。在受盐渍化影响的季节性冻土区,考虑 盐分对土壤蒸发的影响是很有必要的。

2)SHAW 模型对冻融土壤蒸发试验模拟结果较差,率定期和验证期的 MAPE 值分别为 26.67%和 41.27%。而建立的考虑盐分影响冻融土壤蒸发模型率定期和验证期的 MAPE 值分别为 9.74%和 6.35%,提升了盐渍农田蒸发的模拟精度。

3)当土壤含盐量 *S*<15 g/kg 时,冻融土壤蒸发 随含盐量增大而增大,而当 *S*>15 g/kg 时,冻融土壤 蒸发随含盐量增大而减小。这表明盐分对冻融土壤蒸 发随含盐量增加呈现出先促进后抑制的作用。

参考文献:

[1] 汪菲,唐少容,王红雨.季冻区土体水分迁移研究综述[J].灌溉排
 水学报,2020,39(S1):51-55,70.

WANG Fei, TANG Shaorong, WANG Hongyu. Review of research on soil mobility in seasonally frozen area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(S1): 51-55, 70.

- [2] 沈婧, 樊贵盛. 冻融土壤 Philip 入渗模型参数的非线性传输函数模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(6): 42-48. SHEN Jing, FAN Guisheng. Estimating Philip infiltration parameter using nonlinear transfer function for water infiltration in seasonal frozen soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(6): 42-48.
- [3] 刘柏君, 权锦, 雷晓辉, 等. 干旱区灌区水盐综合调控研究[J]. 中国 农村水利水电, 2017(10): 206-212.

LIU Bojun, QUAN Jin, LEI Xiaohui, et al. A comprehensive regulation and control of water and salt of irrigated areas in the arid regions[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(10): 206-212.

- [4] PAN X C, HELGASON W, IRESON A, et al. Field-scale water balance closure in seasonally frozen conditions[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(11): 5 401-5 413.
- [5] 梁红闪, 王丹, 郑江华. 伊犁河流域地表蒸散量时空特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 100-110.
 LIANG Hongshan, WANG Dan, ZHENG Jianghua. Temporal and spatial characteristics of surface evapotranspiration in the lli river basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 100-110.
- [6] 肖璐, 崔宁博, 赵璐, 等. 西北地区夏玉米不同生育期蒸发蒸腾量模 拟模型适用性评价[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(S2): 20-29.

XIAO Lu, CUI Ningbo, ZHAO Lu, et al. Applicability evaluation of evapotranspiration estimate models for different growth stages of summer maize in northwest China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(S2): 20-29.

- [7] ZHANG Z Y, WANG W K, GONG C C, et al. Evaporation from seasonally frozen bare and vegetated ground at various groundwater table depths in the Ordos basin, northwest China[J]. Hydrological Processes, 2019, 33(9): 1 338-1 348.
- [8] MIAO C Y, CHEN J F, ZHENG X Q, et al. Soil water and phreatic evaporation in shallow groundwater during a freeze-thaw period[J]. Water, 2017, 9(6): 396.
- [9] 苗春燕,陈军锋,郑秀清,等. 地表覆砂对季节性冻融土壤蒸发影响 的试验研究[J]. 节水灌溉, 2018(11): 5-9.
 MIAO Chunyan, CHEN Junfeng, ZHENG Xiuqing, et al. Effect of sand mulching on soil evaporation during the seasonal freeze-thaw period[J].
 Water Saving Irrigation, 2018(11): 5-9.
- [10] WU M S, HUANG J S, WU J W, et al. Experimental study on evaporation from seasonally frozen soils under various water, solute and groundwater conditions in Inner Mongolia, China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 535: 46-53.
- [11] ZHANG M L, WEN Z, XUE K, et al. A coupled model for liquid water, water vapor and heat transport of saturated- unsaturated soil in cold regions: Model formulation and verification[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8): 701.
- [12] 陈军锋,郑秀清,张永波,等.季节性冻融期不同潜水位埋深下土壤 蒸发规律模拟研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 131-140. CHEN Junfeng, ZHENG Xiuqing, ZHANG Yongbo, et al. Simulation of soil moisture evaporation under different groundwater level depths during seasonal freeze-thaw period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 131-140.
- [13] 解雪,陈军锋,郑秀清,等.基于灰色关联分析-BP 神经网络的冻融 土壤蒸发预报模型[J].节水灌溉,2019(4):22-26.
 XIE Xue, CHEN Junfeng, ZHENG Xiuqing, et al. Freeze-thaw soil evaporation forecast model based on gray correlation analysis-BP[J].
 Water Saving Irrigation, 2019(4): 22-26.
- [14] 郭占荣, 荆恩春, 聂振龙, 等. 冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 298-302.
 GUO Zhanrong, JING Enchun, NIE Zhenlong, et al. Analysis on the characteristics of soil moisture transfer during freezing and thawing period[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(3): 298-302.
- [15] 张少文,张玻华,刘洁颖,等. 盐分对土壤蒸发影响的试验及其数值 模拟[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(5): 1-5. ZHANG Shaowen, ZHANG Bohua, LIU Jieying, et al. Effect of salinity on soil evaporation and its simulation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(5): 1-5.
- [16] 彭振阳, 郭会, 伍靖伟, 等. 溶质势对地表蒸发速率的影响[J]. 水科

学进展, 2013, 24(2): 235-242.

PENG Zhenyang, GUO Hui, WU Jingwei, et al. Contribution of osmotic potential on bare soil evaporation rate[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2): 235-242.

- [17] 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.
 CUI Lihong, ZHU Yan, ZHAO Tianxing, 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.
- [18] 谭畅,伍靖伟,汪昌树,等.基于溴离子示踪的干旱地区潜水蒸发规 律研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 73-81.
 TAN Chang, WU Jingwei, WANG Changshu, et al. Using bromide tracer method to analyze the evaporation rule of phreatic water in arid area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(9): 73-81.
- [19] 毛威,杨金忠,朱焱,等. 河套灌区井渠结合膜下滴灌土壤盐分演化规律[J].农业工程学报,2018,34(1):93-101.
 MAO Wei, YANG Jinzhong, ZHU Yan, et al. Soil salinity process of Hetao irrigation district after application of well-canal conjunctive irrigation and mulched drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(1): 93-101.
- [20] YIN Z F, HUA O Y, XU X L, et al. Estimation of evapotranspiration from faber fir forest ecosystem in the eastern Tibetan plateau of China using SHAW model[J]. Journal of Water Resource and Protection, 2010, 2(2): 143-153.
- [21] BANIN A, ANDERSON D M. Effects of salt concentration changes during freezing on the unfrozen water content of porous materials[J]. Water Resources Research, 1974, 10(1): 124-128.
- [22] 张建国,孙树国,徐新文,等. 塔里木沙漠公路防护林土壤盐结皮化 学特征及其对土壤蒸发的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(4): 174-179.

ZHANG Jianguo, SUN Shuguo, XU Xinwen, et al. Chemical characteristics and its effect on soil evaporation of soil salt crusts in the Tarim desert highway shelterbelts[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(4): 174-179.

- [23] BITTELLI M, VENTURA F, CAMPBELL G S, et al. Coupling of heat, water vapor, and liquid water fluxes to compute evaporation in bare soils[J]. Journal of Hydrology, 2008, 362(3/4): 191-205.
- [24] FUCHS M, CAMPBELL G S, PAPENDICK R I. An analysis of sensible and latent heat flow in a partially frozen unsaturated soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1978, 42(3): 379-385.
- [25] FUJIMAKI H, SHIMANO T, INOUE M, et al. Effect of a salt crust on evaporation from a bare saline soil[J]. Vadose Zone Journal, 2006, 5(4): 1 246-1 256.
- [26] 张慧,李毅,邓宏伟,等.基于遥感影像的新疆玛纳斯河流域土壤盐 渍化分类[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(3):

153-158.

ZHANG Hui, LI Yi, DENG Hongwei, et al. Soil salinization classification in Manas river basin of Xinjiang based on remote sensing images[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2013, 41(3): 153-158.

[27] KANEKO T, KOBAYASHI T, WANG W Z, et al. Estimating evapora-

tion in winter at a field irrigated late in autumn in Inner Mongolia, China[J]. Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University, 2006, 51(2): 407-411.

[28] WANG C S, WU J W, ZENG W Z, et al. Five-year experimental study on effectiveness and sustainability of a dry drainage system for controlling soil salinity[J]. Water, 2019, 11(1): 111.

Effects of Salt Content on Evaporation from Seasonally Frozen Soil: Experimental Measurement and Numerical Simulations

MAO Jun¹, WU Jingwei^{1*}, LIU Yawen¹, WU Mousong²

(1. State Key Laboratory of Water Resource and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

Abstract: [Background] Seasonally frozen soils are a widely distributed land resource in China, and sustaining their agricultural production is essential to meet the increased demand of the growing population for foods. Hetao irrigation district in Inner Mongolia is one of three major irrigation districts located in seasonally frozen regions, and its agricultural production is constrained by soil salinization and water shortage. As soil salinity and soil evaporation are interconnected, understanding the changes in evaporation from soils with different salinity is important for improving water and salinity management in seasonally frozen soils. Objective The purpose of this paper is to evaluate the impact of salt content on evaporation from soils subject to freezing-thawing cycles. [Method] Soil columns packed by soil with salt content 7.80 g/kg (B1) and 41.16 g/kg (B2), respectively, were used in the experiments conducted in Inner Mongolia. Evaporation from the columns under a thawing-freezing process was measured, from which a numerical model, considering the effects of salt contents on soil surface impedance, was developed to calculate the evaporation. We calibrated and validated the model against the experimental data and compared it with the SHAW model first, and then used it to simulate evaporation under freezing-thawing processes from soils with salt contents ranging from 0 to 50g/kg. [Result] The impact of salt content on evaporation was noticeable, especially at the beginning of the freezing and thawing processes, with their associated average evaporation from the B1 treatment being1.5 times and 1.8 times that of the B2 treatment, respectively. Compared with the SHAW model, the numerical model simulated the evaporation process reasonably well and was more suitable for seasonally frozen soil with salinization. During the freezing-thawing process, the evaporation from soil increased first followed by a decline as the salt content increased. When the salt content was 15 g/kg, the maximum evaporation was 136.3 mm. Compared to soil without salinization, increasing salt content from 2.5 g/kg to 20 g/kg increased soil evaporation from 1.09% to 86.46%. In contrast, increasing salt content from 20 g/kg to 50 g/kg reduced the evaporation gradually by up to 42.55%. [Conclusion] Salt content has a great impact on evaporation from seasonally freezing-thawing saline soil. With salt content increasing, the evaporation increased first followed by a decline. The proposed numerical model considering the effects of salt improved accuracy of the predicted evaporation. Our results have implications for improving our understanding of the mechanisms underlying evaporation from seasonally frozen salt-affected soils and provide methods for simulating soil and water dynamics in these regions.

Key words: soil salt content; seasonally freezing-thawing; soil evaporation; numerical simulation

责任编辑:陆红飞