

局部秋浇条件下冻融期“秋浇-春灌” 农田土壤水盐归趋研究

范理权¹, 史海滨¹, 闫建文^{1*}, 李仙岳¹, 窦旭¹, 祁茜¹, 李慧祥²

(1.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2.内蒙古河套灌区水利发展中心义长分中心 沙河所渠供水所, 内蒙古 巴彦淖尔 015100)

摘要:【目的】探究河套灌区局部秋浇条件下秋浇和非秋浇(翌年春灌)农田冻融期土壤水盐迁移规律。【方法】基于野外采样观测与室内试验分析, 研究了秋浇与非秋浇(翌年春灌)条件下农田冻融期土壤温度变化特征、土壤剖面水分和盐分的变化特征。【结果】在局部秋浇后 1 周内, 秋浇农田表层至深层温度降幅逐渐变大, 而春灌农田表层至深层温度降幅逐渐变小。在冻结过程中, 秋浇农田 0~60 cm 土层温度降至 0℃相比春灌农田早 30 d, 在消融过程中, 秋浇农田 0~60 cm 土层温度升至 0℃相比春灌农田晚 10 d。秋浇后和冻结期是秋浇农田脱盐的关键时期, 0~100 cm 土层脱盐 47.38%; 而春灌农田在冻结、消融阶段分别积盐 35.68%、16.87%。在整个冻融期内, 秋浇和春灌农田各土层的盐分净通量均为负值, 但秋浇农田盐分净通量随着土层深度的增加而增加; 而春灌农田盐分净通量随着土层深度的增加先增加后减小。【结论】秋浇和春灌农田之间存在水位差, 为水盐迁移提供了驱动力; 冻结过程中各土层温度降至 0℃以下和消融过程中各土层温度升至 0℃以上存在时间差, 导致春灌农田在翌年春灌前呈积盐状态。

关键词: 局部秋浇; 春灌; 冻融期; 水盐迁移

中图分类号: S512.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022693

OSID: 

范理权, 史海滨, 闫建文, 等. 局部秋浇条件下冻融期“秋浇-春灌”农田土壤水盐归趋研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 90-97, 113.

FAN Liquan, SHI Haibin, YAN Jianwen, et al. Analysis of Soil Water and Salt Redistribution during the Freeze-thaw Period in “Autumn Watering-spring Irrigation” under Local Autumn Watering Conditions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 90-97, 113.

0 引言

内蒙古河套灌区是我国典型的干旱地区, 是亚洲最大的一首制平原引水灌区^[1-2]。该灌区每年作物收获后均需进行秋浇, 以实现土壤保墒和压盐。随着节水改造工程的实施, 灌区年平均引水量减少 20%^[3], 秋浇面积大幅度缩减, 春灌面积增加^[4]。春灌农田受到种植制度和农民种植意愿的影响, 表现为插花状的空间分布特征, 且面积差异较大。

灌区明沟排水不健全且塌坡严重导致排水和排盐能力较差^[5]。秋浇后地下水位上升显著, 秋浇与非秋浇农田在局部秋浇后存在水位差, 为水盐迁移提供了驱动力。冻结前不进行秋浇的农田在第二年会进行

春灌, 秋浇后至翌年春灌前土壤会经历冻融期。冻融过程中, 秋浇与非秋浇农田土壤的物理性状和水盐迁移规律存在差异, 由此引发了新的水盐分布问题, 需要进一步分析, 以指导当地秋浇和春灌的实施。

【研究进展】虎胆 吐马尔白等^[6]通过冻融期覆盖探究了土壤水盐时空动态变化规律。李瑞平等^[7]基于 SHAW 模型提出不同盐渍化土壤的秋浇节水灌溉制度。马睿等^[8]对义长灌域土壤冻结过程中的地下水向冻土层的迁移量进行了估算。毛俊等^[9]探究了盐分对季节性冻融土壤蒸发的影响规律。富广强等^[10]研究了季节性冻融期盐荒地的水盐运移规律。张殿发等^[11]对冻融条件下土壤水盐迁移机理进行了研究, 认为冻融过程中盐分的迁移受温度梯度、盐分浓度梯度及温度影响。彭振阳等^[12]针对内蒙古河套灌区局部秋浇条件下农田土壤水盐运移的特殊性进行了研究。此外, 以往针对土壤冻融过程的水、热、盐变化规律也开展了大量研究^[13-14]。【切入点】在河套灌区秋浇面积减小、春灌面积增加的趋势下, 局部秋浇灌溉将直接影响秋浇农田土壤的水盐状况, 进而影响翌年的春灌制

收稿日期: 2022-12-20 修回日期: 2023-03-21 网络出版日期: 2023-05-16
基金项目: “十四五”重点研发计划项目(2021YFC3201202); 内蒙古水利科技重大专项(NSK2017-M1); 国家自然科学基金项目(51769024); 内蒙古自然科学基金项目(2020MS05052)
作者简介: 范理权(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉技术研究。E-mail: 921339972@qq.com
通信作者: 闫建文(1985-), 男, 讲师, 主要从事水肥循环利用及农业水土环境研究。E-mail: baotouyan13579@163.com
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

度。【拟解决的关键问题】鉴于此，本研究开展局部秋浇条件下冻融期“秋浇-春灌”农田土壤水盐归趋研究，明确局部秋浇条件下冻融期土壤水盐迁移规律，为局部秋浇经历冻融过程后的翌年春灌农田灌溉制度提供理论依据。

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五原县屈二红圪旦（41°07'46.98"N，108°12'38.40"E，海拔 1 020 m），

表1 试验区土壤理化性质

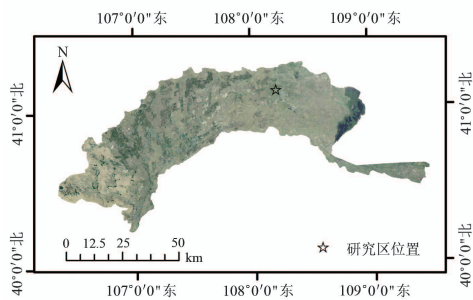
Table 1 Test area soil physical properties table

试验区	土壤盐碱化程度	全盐量/(g kg ⁻¹)	pH值	质量含水率/%	田间持水率/%	孔隙度/%	土壤质地	土壤体积质量/(g cm ⁻³)
秋浇农田	中度	2.73	9.35	16.01	21.4~24.3	42.07~50.42	粉土及粉壤土	1.46
春灌农田	中度	2.74	9.35	16.02	21.7~24.7	41.78~51.15	粉土及粉壤土	1.46

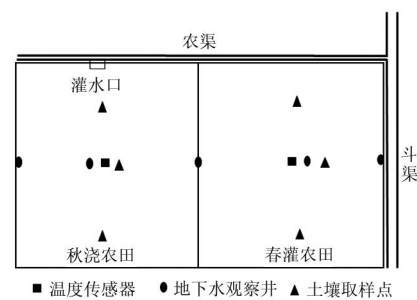
1.2 试验设计与数据采集

试验持续时间为 2021 年 9 月 24 日—2022 年 5 月 7 日。试验区东西宽 50 m，南北长 40 m，总面积为 0.2 hm²，秋浇和春灌农田各占试验区面积的 50%。试验区西侧为 2021 年进行秋浇灌溉的农田（以下简称秋

浇农田），东侧为 2022 年进行春灌的农田（以下简称春灌农田）（图 1）。2021 年 11 月 23 日—12 月 24 日为冻结期 I，2021 年 12 月 25 日—2022 年 2 月 17 日为冻结期 II，2022 年 2 月 18 日—3 月 25 日为消融期 I，2022 年 3 月 26 日—4 月 20 日为消融期 II。



(a) 研究区



(b) 采样点分布

图 1 研究区和采样点分布示意

Fig.1 Study area and sampling point distribution map

土壤温度采用 HZR8T 四路土壤温度记录仪自动监测，每隔 2 h 记录 1 次。监测深度为田面以下 0、10、20、40、60、80、100 cm。在 5 眼地下水观测井中放置 HOBO 水位观测计，在秋浇和春灌农田中心观测井中放置 HOBO 水质观测计，每 12 h 记录 1 次地下水的水位和盐分浓度。

采用土钻法采集 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层的土样。分别在 10 月 20 日进行秋浇、11 月 8 日进行秋浇后、翌年 5 月 6 日进行春灌前取样；此外，在冻融期每隔 10~15 d 取 1 次土样，试验期间共计取样 16 次。每次取样后利用烘干法测定土壤质量含水率，并将烘干土样粉碎过筛，取 5 g 干土和 25 g 蒸馏水按 1:5 的土水比混合后搅拌、离心，将离心后的提取液用电导仪（DDS-307A 型）测定土壤 EC。

用梯形量水堰测定秋浇水量，并收集灌溉水，用电导仪测定 EC。10 月 30 日，研究区进行秋浇，秋浇水

量约为 225 mm。灌溉水平平均矿化度为 0.55 g/L。

1.3 研究方法

土壤电导率转换为土壤全盐量的计算式为^[15]：

$$C=3.765\ 7EC_{1:5}-0.240\ 5, \quad (1)$$

式中：C 为土壤全盐量（g/kg）；EC_{1:5} 为土水比 1:5 的土壤浸提液电导率（dS/m）。

地下水 EC 和矿化度（TDS）的转换式为^[16]：

$$TDS=0.69EC, \quad (2)$$

式中：TDS 为地下水矿化度（g/L）；EC 为地下水电导率（dS/m）。

土壤积盐率为 0~100 cm 土层剖面某一时期与前一时期相比土壤含盐量的增加率，计算式为^[17]：

$$t=\frac{W_i-W_{i-1}}{W_i} \times 100\%, \quad (3)$$

式中：t 为土壤积盐率（%）；W_i 为第 i 时期土壤含盐量（kg/hm²）；W_{i-1} 为第 i-1 时期土壤含盐量（kg/hm²）。

土壤脱盐率为 0~100 cm 土层剖面在灌溉后某一时期

期与灌溉前相比土壤含盐量的减少率,其计算式为^[18]:

$$\omega = \frac{S_0 - S_t}{S_0} \times 100\%, \quad (4)$$

式中: ω 为土壤脱盐率(%) ; S_t 为灌溉后某一时时期土壤含盐量(kg/hm^2) ; S_0 为灌溉前土壤含盐量(kg/hm^2) 。

采用式(5)计算第 j 次取样时第 i 层土壤单位面积的储盐量^[19]:

$$S_i^j = 100h_i\gamma_i C_i^j, \quad (5)$$

式中: S_i^j 为第 j 次取样时第 i 层土壤的储盐量(g) ; h_i 为第 i 层土壤的厚度(cm) ; γ_i 为第 i 层土壤的干体积质量(g/cm^3) ; C_i^j 为第 j 次取样时第 i 层土壤的质量含盐率(% , $i=1, 2, \dots, 7$; $j=1, 2, \dots, 7$) 。

考虑一维条件下的各土层盐分平衡,土层内储盐量的增加量与其流入与流出量之差相等,计算式为^[19]:

$$S_i^{j+1} - S_i^j = Q_{i+1}^j - Q_i^j, \quad (6)$$

式中: Q_i^j 为第 j 时段内第 i 层土壤下边界的盐分通量(g) ; 顶层土壤上边界通量为 Q_0 ,即为灌溉水引入盐分量。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据分析,利用 Surfer 12.0 绘制土壤水分和盐分的时空分布图。

2 结果与分析

2.1 秋浇-非秋浇(翌年春灌)农田土壤温度变化特征

由图2可知,随着土层深度的增加,在冻结和消融过程中土壤温度随时间的变化均表现出滞后效应,滞后时间随着土层深度的增大而增加。随着土层深度的增加,冻结过程中,温度降幅逐渐变小;消融过程中,温度涨幅逐渐变大。

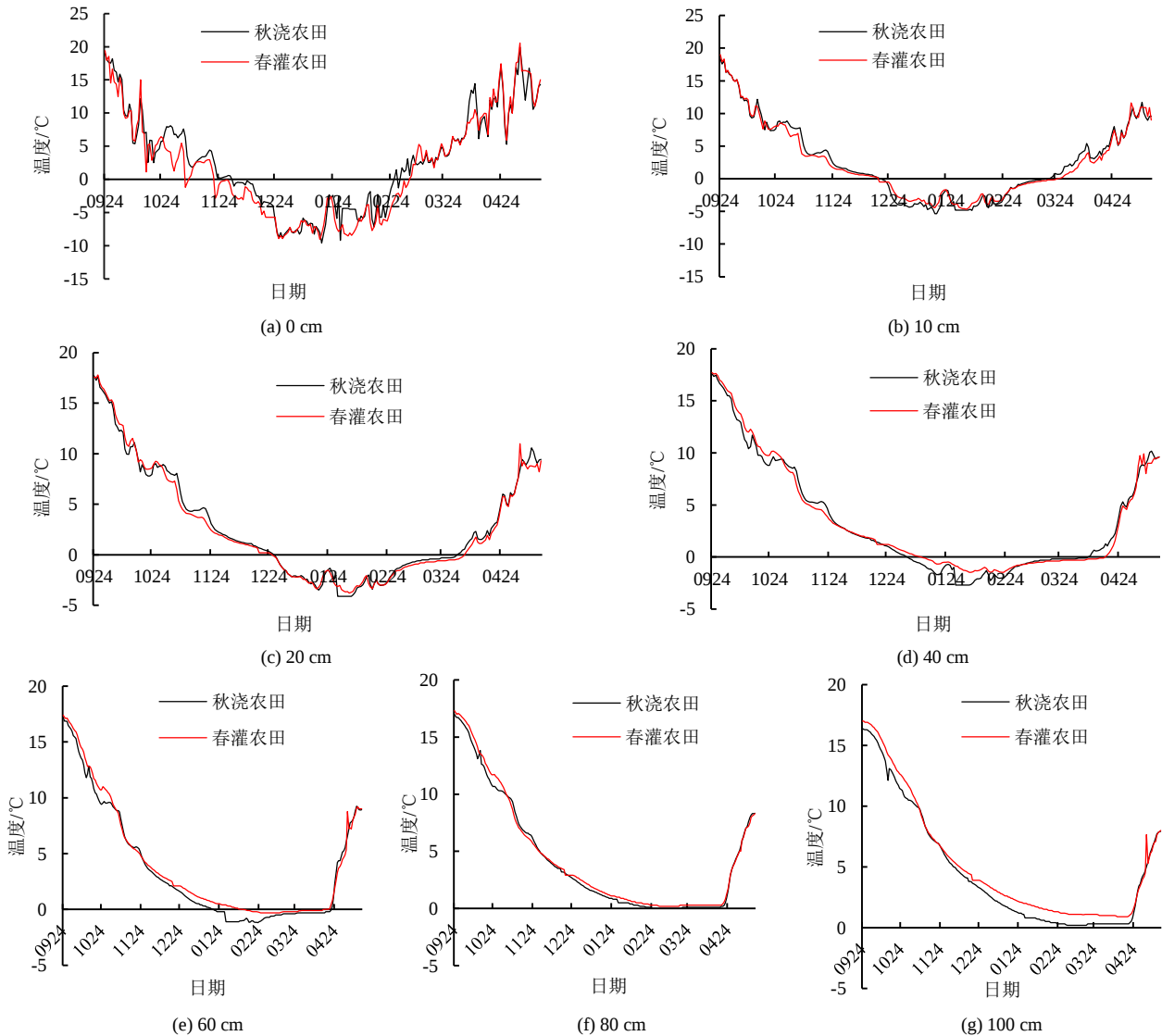


图2 秋浇-非秋浇(翌年春灌)农田土壤温度变化

Fig.2 Temperature changes of each layer of autumn watering - non-autumn irrigation (spring irrigation the following year)

局部秋浇后1周,秋浇和春灌农田各土层平均温度和秋浇前1周相比均发生了不同程度的降低,秋浇

农田平均温度降幅为 $0.38\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；春灌农田平均温度降幅为 $1.28\sim 2.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于秋浇农田表面存在隔水层，具有一定的保温作用，因此秋浇农田降幅小于春灌农田。随着土层深度的增加，秋浇农田土壤温度降幅逐渐变大，而春灌农田降幅逐渐变小。冻融过程中，秋浇和春灌农田仅 $0\sim 60\text{ cm}$ 土层存在负温。在冻结过程中，秋浇农田 $0\sim 60\text{ cm}$ 土层温度降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 历时 50 d ，而春灌农田历时 82 d 。在消融阶段，秋浇农田 $0\sim 60\text{ cm}$ 土层温度升至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 历时 55 d ，而春灌农田历时 41 d 。其中，春灌农田 40 cm 深度处的土壤温度降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比秋浇农田迟 8 d ， 60 cm 深度处的土壤温度降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比秋浇农田迟 23 d 。受到上层冻土的阻碍，春灌农田在冻结期 II 的土壤含水率增加主要是由灌溉水渗流所导致，所以春灌农田随着土层深度的增加温度降

至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间要迟于秋浇农田。

2.2 秋浇-非秋浇（翌年春灌）农田地下水埋深及矿化度变化

由图3（a）可知，局部秋浇后，地下水位达到最高，秋浇、春灌农田平均地下水埋分别为 0.47 、 0.60 m 。冻结期 I 末，地下水位开始下降；翌年3月初，水位降至最低，此时秋浇和春灌农田平均地下水埋深分别为 2.06 、 2.17 m 。消融期 I 结束，水位再次上升，秋浇和春灌农田平均地下水埋深分别为 0.84 、 0.82 m 。由图3（b）可知，秋浇开始后，秋浇和春灌农田的地下水矿化度开始提高，而后趋于下降。在局部秋浇后至冻结期 I 末，秋浇和春灌农田地下水位之间相互波动变化，冻结期 I 中12月2—4日、12月15—17日和12月21—23日3个时段的春灌农田水位高于秋浇农田。

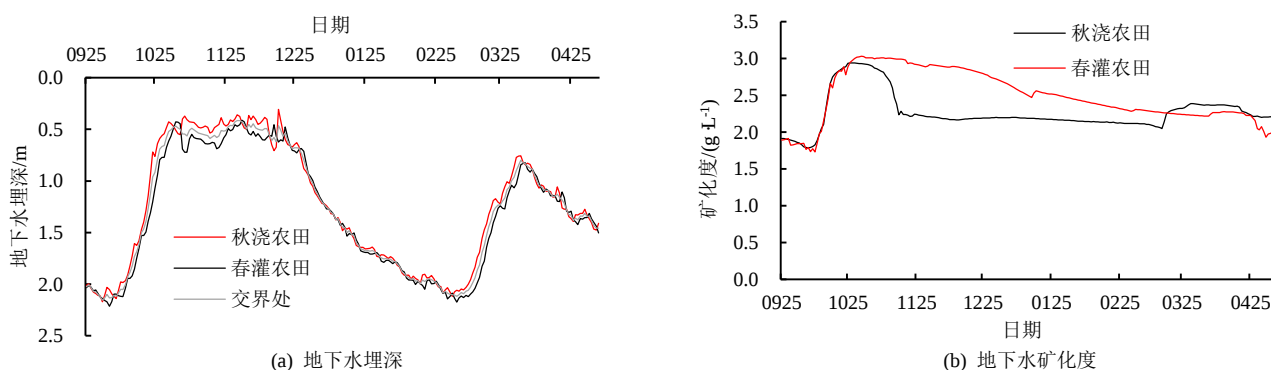


图3 秋浇-非秋浇（翌年春灌）农田地下水埋深和矿化度的动态变化

Fig.3 Dynamic changes of groundwater depth and mineralization degree of farmland under autumn watering and non-autumn

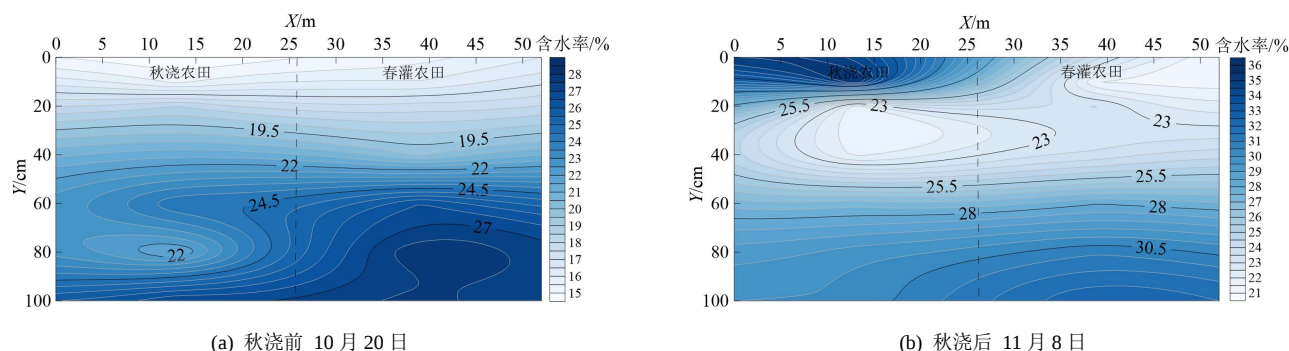
2.3 秋浇-非秋浇（翌年春灌）农田土壤剖面含水率时空变化特征

由图4可知，秋浇后，秋浇农田 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层含水率增加 74.81% ，为春灌农田的 2.24 倍。冻结期 I，随着土壤温度的降低，秋浇农田 $0\sim 40\text{ cm}$ 土层含水率相比秋浇后增加 41.76% 。在冻结期 II，秋浇农田 $20\sim 80\text{ cm}$ 土层含水率增幅为 $7.04\%\sim 40.18\%$ 。消融期 I 的秋浇农田 $0\sim 100\text{ cm}$ 土层含水率相比冻结期 II 减少 10.44% 。由于冻土层尚未融通，因此该时期土壤含水率没有明显减小。进入消融期 II，随着冻土层逐渐融通，秋浇农田 $0\sim 80\text{ cm}$ 土层含水率相比消融期 I 减少 16.35% ，而 $80\sim 100\text{ cm}$ 土层含水率增加 12.46% 。

由于春灌农田没有进行秋浇灌溉，因此主要受灌

区地下水位整体上升和灌溉水侧向渗流的影响。 $0\sim 100\text{ cm}$ 土层含水率相比秋浇前增加 19.91% 。冻结期 I，春灌农田 $0\sim 40\text{ cm}$ 土层含水率相比秋浇后增加 57.74% 。冻结期 I 秋浇和春灌农田之间的水位相互波动，且地下水会补给土壤水，因此该时期春灌农田 $0\sim 40\text{ cm}$ 土层含水率明显增大。消融期春灌农田含水率变化规律与秋浇农田基本一致。

经历冻融过程后，翌年春灌前，土壤含水率由表层至深层呈递增趋势，此时秋浇农田与年前秋浇前相比含水率增幅为春灌农田的 2.96 倍，春灌农田 $0\sim 100\text{ cm}$ 土层含水率平均增加 8.62% ，主要受到灌溉水渗流作用的影响。



(a) 秋浇前 10月20日

(b) 秋浇后 11月8日

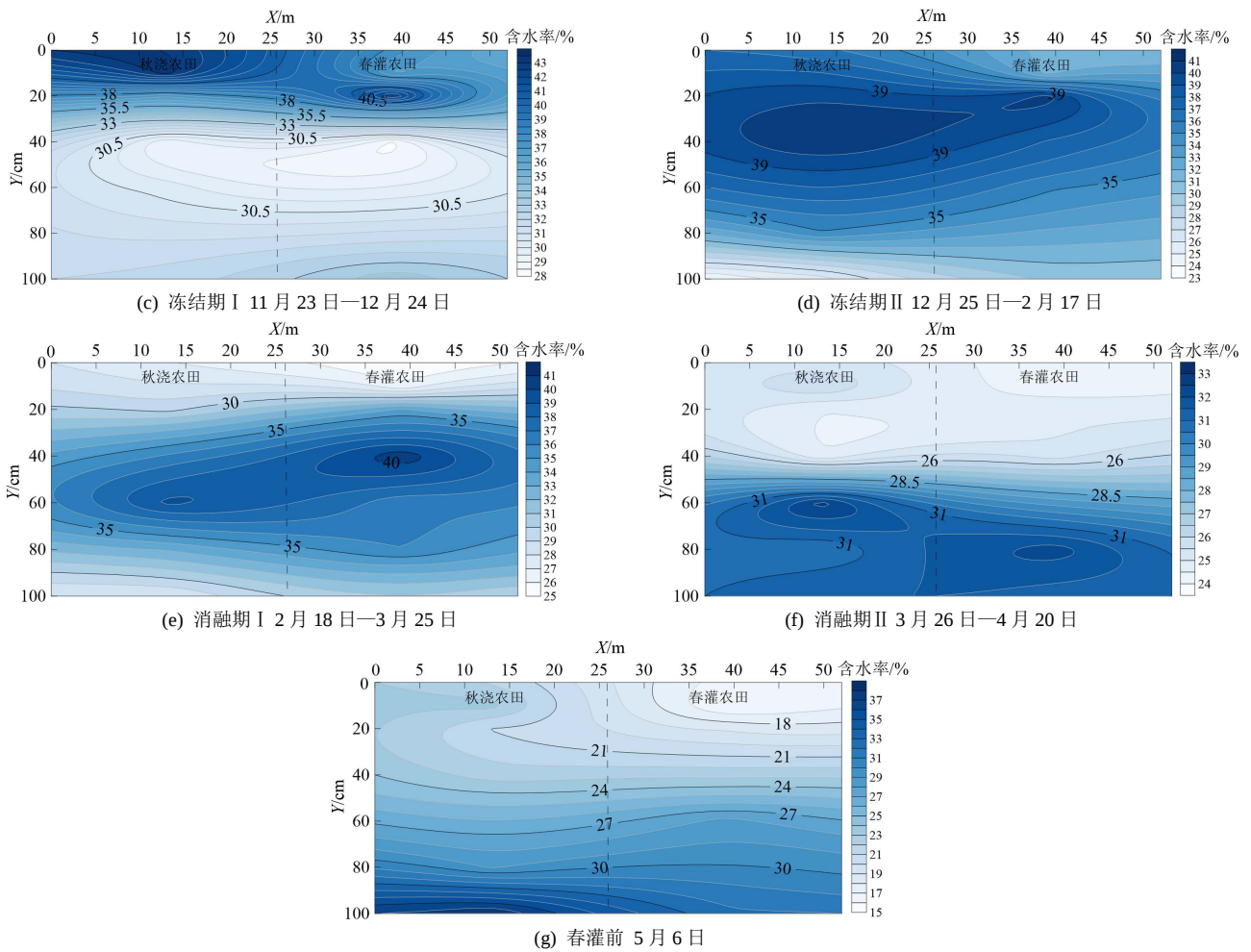


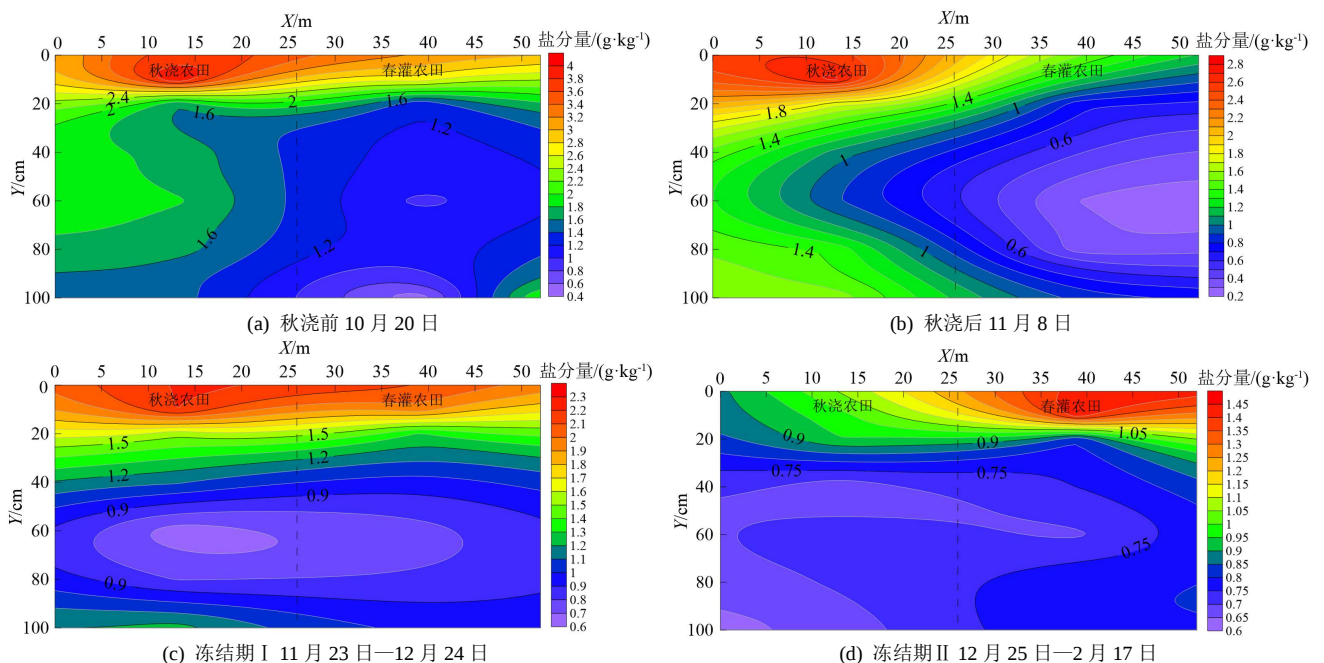
图4 秋浇-非秋浇（翌年春灌）农田土壤剖面含水率分布

Fig.4 Distribution of soil moisture content in autumn watering - non-autumn irrigation (spring irrigation the following year)

2.4 秋浇-非秋浇（翌年春灌）农田土壤剖面盐分时空变化

由图5可知,秋浇后,秋浇农田0~80 cm土层脱盐率为18.45%~49.74%,80~100 cm土层积盐5.91%。秋浇农田在冻结期 I 的20~40 cm土层积盐4.05%,冻结期 II 的40~60 cm土层积盐10.71%,其他土层在

整个冻结期均呈脱盐状态。在消融期 I,秋浇农田积盐47.32%。由于冻土层融化,水分释放会携带盐分,并且该时期冻层尚未彻底融通,故冻层和冻层以下土层盐分量增加。进入消融期 II,随着冻层的融通,秋浇农田和消融期 I 相比0~80 cm土层脱盐52.92%,而80~100 cm土层积盐8.72%。



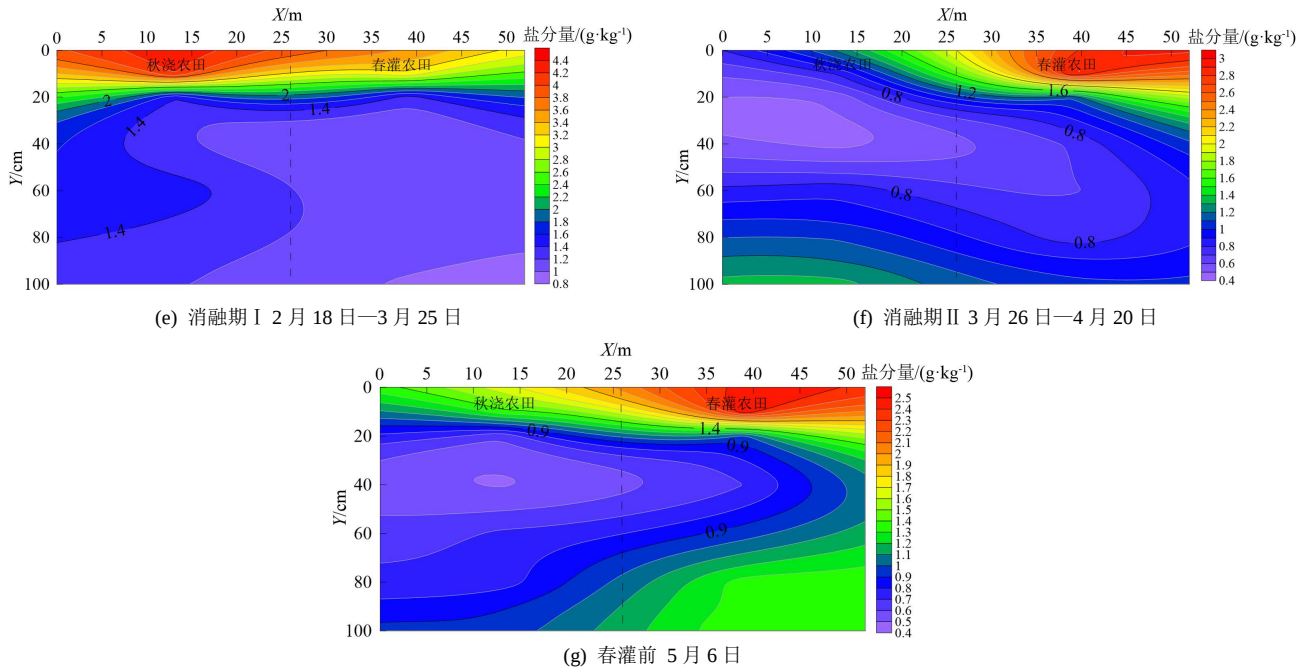


图5 秋浇-非秋浇（翌年春灌）农田土壤剖面盐分分布

Fig.5 Soil cross-sectional salt distribution map of autumn watering-non-autumn irrigation (spring irrigation the following year)

春灌农田秋浇后, 0~80 cm 土层脱盐 57.44%, 80~100 cm 土层积盐 43.24%。由于春灌农田没有进行秋浇灌溉, 造成其脱盐的原因是秋浇后地下水位上升, 秋浇和春灌农田间水分存在水平侧向补给, 使春灌农田土壤盐分得到了淋洗。春灌农田在冻结期 I 积盐 42.59%, 由于冻结期 I 秋浇和春灌农田之间水位相互波动, 在水势梯度的作用下, 秋浇农田水分通过侧向径流将盐分传输至春灌农田, 导致其盐分量增加。冻结期 II 春灌农田脱盐 19.83%, 地下水位的下降是造成春灌农田冻结期 II 脱盐的主要原因。消融阶段春灌农田变化规律和秋浇农田基本一致。在消融期 I, 春灌农田积盐 27.12%。

经历冻融过程后, 在翌年春灌前, 春灌农田土层含盐量为秋浇农田的1.60倍。此时的秋浇农田与秋浇前相比1 m土层整体脱盐58.35%; 而春灌农田0~60 cm 土层脱盐17.29%; 60~100 cm土层积盐41.59%。

2.5 秋浇-非秋浇（翌年春灌）农田盐分通量

由表2和表3可知, 秋浇和春灌农田各时期不同深度土壤盐分运动方向存在较强的一致性, 在秋浇期、

冻结期 I 和消融期 I 盐分整体向下运动, 其他时期盐分则整体向上运动。冻结期 I, 受到秋浇灌溉的影响, 秋浇农田各土层盐分通量为春灌农田的1.61~2.32倍。随着温度的持续下降, 冻土层逐渐变厚, 在冻结作用影响下, 冻结期 II 盐分整体向上运动。消融期 I, 秋浇和春灌农田各土层盐分通量均随着土层深度的增大而增大, 导致消融阶段土层积盐, 秋浇农田各土层盐分通量为春灌农田3~15倍。消融期 II, 随着土层逐渐融通, 蒸发作用增强, 春灌农田各层土壤养分整体向上运动, 但60~100 cm土层盐分通量明显大于0~60 cm土层, 导致深层土壤积盐。秋浇农田0~60 cm 土层盐分通量随着土层深度的增加而减小, 而春灌农田逐渐增加。

由整个试验期盐分净通量可知, 秋浇和春灌农田各土层盐分通量均为负值, 但秋浇农田随着土层深度的增加, 盐分通量逐渐增加, 这说明秋浇农田经历冻融过程后, 在翌年春灌前呈脱盐状态; 春灌农田随着土层深度的增加先增加后减小, 这也说明春灌农田存在深层积盐。

表2 秋浇农田各时期各土层盐分通量

Table 2 The salt flux of each soil layer in each period of autumn watering farmland is divided							g/m^2
时段	Q_0	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
秋浇期	-123.75	-310.44	-291.33	-485.37	-752.91	-844.05	-817.59
冻结期 I (11月23日—12月24日)	0	-179.21	-266.40	-397.40	-374.34	-400.17	-565.32
冻结期 II (12月25日—2月17日)	0	473.29	543.40	715.01	943.81	1 126.49	1 285.17
消融期 I (2月18日—3月25日)	0	-498.20	-626.44	-855.24	-1 043.46	-1 114.50	-1 080.36
消融期 II (3月26日—4月20日)	0	80.26	91.33	96.87	52.58	-44.28	-157.76
盐分净通量		-434.29	-549.42	-926.14	-1 174.31	-1 276.52	-1 335.86

注 Q_0 、 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 、 Q_6 分别为0、10、20、40、60、80、100 cm土层处的盐分通量。其 Q_0 为秋浇灌溉水入渗所引入的盐分。

表3 春灌农田各时期各土层盐分通量

时段	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆
秋浇期	0.00	-219.03	-291.06	-479.22	-673.26	-887.88	-776.16
冻结期 I (11月23日—12月24日)	0.00	-77.04	-147.85	-209.20	-231.80	-243.33	-295.92
冻结期 II (12月25日—2月17日)	0.00	250.95	323.83	414.25	517.58	604.30	657.81
消融期 I (2月18日—3月25日)	0.00	-32.75	-59.05	-158.69	-262.94	-358.89	-343.21
消融期 II (3月26日—4月20日)	0.00	53.97	30.45	74.73	199.28	431.78	606.15
盐分净通量	0.00	-23.90	-143.68	-358.13	-451.14	-454.02	-151.33

注 Q₀、Q₁、Q₂、Q₃、Q₄、Q₅、Q₆分别为0、10、20、40、60、80、100 cm土层处的盐分通量。

3 讨论

由于节水改造工程的实施,河套灌区引水量逐年减少,多年的水盐平衡体系被打破^[18],灌区内部盐分普遍重新分配。随着引水量的减少,秋浇面积减少,春灌面积相应增加^[4]。局部秋浇后,灌溉和非灌溉农田是冻融期耕地盐分迁移发生的主要区域。

温度是土壤水分迁移的主要驱动力。局部秋浇后1周与秋浇前1周相比,秋浇农田0~100 cm土层温度降幅为0.38~1.00℃;春灌农田温度降幅为1.28~2.38℃。秋浇农田灌溉后形成隔水层,具有一定的保温作用,导致秋浇农田温度降幅小于春灌农田^[20]。本研究中,局部秋浇后1周,随着土层深度的增加,秋浇农田温度降幅变大,春灌农田温度降幅变小。冻结过程中,秋浇农田0~60 cm土层温度降至0℃相比春灌农田早30 d,消融过程中,秋浇农田0~60 cm土层温度升至0℃相比春灌农田迟10 d。秋浇农田各土层最低温度均小于春灌农田,且随着土层深度的增加,温差变大。由于春灌农田没有进行秋浇灌溉,土壤含水率低于秋浇农田。

研究表明,水分在温度梯度下的运动决定了盐分的运动趋势^[11]。在冻结期 I,秋浇农田0~40 cm土层含水率相比秋浇后增加了41.76%;在冻结期 II,20~80 cm土壤含水率增幅为7.04%~40.18%。冻结时,温度降低导致水分在土水势作用下向冻层迁移,非冻结层的水分向上层冻结区移动导致冻结层含水率增大,这与以往研究结果一致^[11]。春灌农田在冻结期 I积盐42.59%,与以往研究结果一致^[21-22]。目前,关于冻结过程中盐分的迁移规律尚不统一。研究表明,水分聚集的冻结层中未发生积盐^[10],反而呈脱盐状态^[13, 23]。本研究中,秋浇后和冻结期是秋浇农田脱盐的关键时期,并且秋浇农田在冻结期 II的脱盐率大于在冻结期 I的脱盐率,而春灌农田在冻结期 II脱盐19.83%。本研究中,冻结期 II地下水位开始下降,因此导致春灌农田在冻结期 II脱盐。研究表明,冻结前土壤溶液当中的盐分浓度梯度为正时,冻结层易积盐;当冻结前土壤溶液盐分浓度梯度为负时,冻结

层易脱盐^[24]。

由冻融期内各土层盐分净通量可知,秋浇和春灌农田各土层盐分净通量均为负值,但秋浇农田盐分通量随着土层深度的增加而增加,春灌农田随着土层深度的增加先增加后减小。土壤冻结过程中盐分迁移受土壤类型、初始含水率、土壤溶液浓度、盐分组成以及冻结温度等因素共同影响^[11]。春灌农田与秋浇农田的相邻区域,在局部秋浇后经历冻融过程中,土壤水分和盐分受到了一定程度影响,秋浇不进行灌溉的农田第二年会进行春灌,因此,对于合理的春灌制度有待进一步研究。

4 结论

1)局部秋浇后,在冻结过程中,秋浇农田0~60 cm土层温度降至0℃相比春灌农田早30 d,在消融过程中,秋浇农田0~60 cm土层温度升至0℃相比春灌农田迟10 d。

2)局部秋浇后至冻结期 I末,秋浇和春灌农田水位之间相互波动变化,形成水头差,成为水分迁移的主要驱动力。

3)秋浇后和冻结期是秋浇农田脱盐的关键时期,秋浇农田从秋浇后至冻结期脱盐47.38%;而春灌农田在冻结、消融阶段分别积盐35.68%、16.87%。

4)在整个冻融期内,秋浇和春灌农田各层盐分净通量均为负值,但秋浇农田盐分通量随着土层深度的增加而增加;而春灌农田随着土层深度的增加先增加后减小。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] ZHANG Jianfeng, ZHU Yan, ZHANG Xiaoping, et al. Developing a Long Short-Term Memory (LSTM) based model for predicting water table depth in agricultural areas[J]. Journal of Hydrology, 2018, 561: 918-929.
- [2] 白岗栓, 张蕊, 耿桂俊, 等. 河套灌区农业节水技术集成研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(1): 149-154.
BAI Gangshuan, ZHANG Rui, GENG Guijun, et al. Integrating agricultural water-saving technologies in Hetao Irrigation District[J].

- Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(1): 149-154.
- [3] XU Xu, HUANG Guanhua, QU Zhongyi, et al. Assessing the groundwater dynamics and impacts of water saving in the Hetao Irrigation District, Yellow River basin[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(2): 301-313.
- [4] 杨丽清, 刘燕凤, 刘坤. 浅谈义长灌域春灌面积增大的成因[J]. 内蒙古水利, 2017(4): 66-67.
- [5] 祁茜, 史海滨, 闫建文, 等. 暗管农田不同类型肥料对向日葵生长及土壤氮素分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 559-567.
- QI Qian, SHI Haibin, YAN Jianwen, et al. Effects of different types of fertilizer on sunflower growth and soil nitrogen distribution in subsurface farmland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(3): 559-567.
- [6] 虎胆 吐马尔白, 赵永成, 马合木江·艾合买提. 冻融期膜下滴灌棉田水盐时空动态特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(5): 269-274.
- HUDAN Tumarbay, ZHAO Yongcheng, MAHEMUJIANG·Aihemaiti. Study on spatial and temporal variabilities of soil moisture and salt during freeze-thawing period in cotton field with drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(5): 269-274.
- [7] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 基于 SHAW 模型的内蒙古河套灌区秋浇节水灌溉制度[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 31-36.
- LI Ruiping, SHI Haibin, TAKEO Akae, et al. Scheme of water saving irrigation in autumn based on SHAW model in Inner Mongolia Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(2): 31-36.
- [8] 马睿, 伍靖伟, 查元源, 等. 内蒙古河套灌区冻融土壤水分迁移简化模型[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6): 1-5.
- MA Rui, WU Jingwei, ZHA Yuan Yuan, et al. Simplified model simulating soil moisture migration during freeze and thaw in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(6): 1-5.
- [9] 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.
- [10] 富广强, 李志华, 王建永, 等. 季节性冻融对盐荒地水盐运移的影响及调控[J]. 干旱区地理, 2013, 36(4): 645-654.
- FU Guangqiang, LI Zhihua, WANG Jianyong, et al. Effects of seasonal freeze thawing on water and salt movement in saline lands[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(4): 645-654.
- [11] 张殿发, 郑琦宏, 董志颖. 冻融条件下土壤中水盐运移机理探讨[J]. 水土保持通报, 2005, 25(6): 14-18.
- ZHANG Dianfa, ZHENG Qihong, DONG Zhiying. Mechanism of soil salt-moisture transfer under freeze-thawing condition[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(6): 14-18.
- [12] 彭振阳, 伍靖伟, 黄介生. 内蒙古河套灌区局部秋浇条件下农田水盐运动特征分析[J]. 水利学报, 2016, 47(1): 110-118.
- PENG Zhenyang, WU Jingwei, HUANG Jiesheng. Water and salt movement under partial irrigation in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(1): 110-118.
- [13] 彭振阳. 单向冻结土壤中水分、热量和溶质耦合迁移机理与模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
- PENG Zhenyang. Mechanism and modeling of coupled water-heat-solute movement in unidirectional freezing soils[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015.
- [14] 李志华. 季节性冻融期盐渍土水盐耦合关系研究: 以玛纳斯河流域 142 团为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- LI Zhihua. Coupled soil moisture, temperature and salinity dynamics in salined land during seasonal freezing-thawing period: A case study in 142nd Corp of Manas River watershed[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.
- [15] 童文杰. 河套灌区作物耐盐性评价及种植制度优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- TONG Wenjie. Study on salt tolerance of crops and cropping system optimization in Hetao Irrigation District[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [16] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区耕地-荒地-海子间水盐运移规律及平衡分析[J]. 水利学报, 2019, 50(12): 1 518-1 528.
- WANG Guoshuai, SHI Haibin, LI Xian Yue, et al. Analysis of water and salt transportation and balance during cultivated land, waste land and lake system in Hetao Irrigation Area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(12): 1 518-1 528.
- [17] 史海滨, 郭珈玮, 周慧, 等. 灌水量和地下水调控对干旱地区土壤水盐分布的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 268-278.
- SHI Haibin, GUO Jiawei, ZHOU Hui, et al. Effects of irrigation amounts and groundwater regulation on soil water and salt distribution in arid region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 268-278.
- [18] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区不同地类盐分迁移估算及与地下水埋深的关系[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 255-269.
- WANG Guoshuai, SHI Haibin, LI Xian Yue, et al. Estimation of salt transport and relationship with groundwater depth in different land types in Hetao Irrigation Area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 255-269.
- [19] 彭振阳, 黄介生, 伍靖伟, 等. 秋浇条件下季节性冻融土壤盐分运动规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 77-81.
- PENG Zhenyang, HUANG Jiesheng, WU Jingwei, et al. Salt movement of seasonal freezing-thawing soil under autumn irrigation condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6): 77-81.
- [20] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 冻融期气温与土壤水盐运移特征研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 70-74.
- LI Ruiping, SHI Haibin, TAKEO Akae, et al. Characteristics of air temperature and water-salt transfer during freezing and thawing period[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(4): 70-74.
- [21] 姚宝林, 李光永, 王峰. 冻融期灌水和覆盖对南疆棉田水盐盐的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 114-120.
- YAO Baolin, LI Guangyong, WANG Feng. Effects of winter irrigation and soil surface mulching during freezing-thawing period on soil water-heat-salt for cotton fields in South Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 114-120.
- [22] WU Mousong, HUANG Jiesheng, WU Jingwei, 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.
- [23] STÄHLI M, STADLER D. Measurement of water and solute dynamics in freezing soil columns with time domain reflectometry[J]. Journal of Hydrology, 1997, 195(1): 352-369.
- [24] 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.

2015. The GIMMS *NDVI*, monthly total water storage anomaly (*TWSA*), temperature, rainfall, and the autoregressive model was used to quantify the short-term impact of vegetation stability on *TWSA* and meteorological factors.

【Result】The vegetation index *NDVI* in the plateau exhibited a strong correlation with temperature and precipitation. The areas that have strong correlation between *NDVI* and *TWSA* are primarily located in the central areas in the plateau. Most vegetation types show strong stability resilience, particularly in the Northeast, North, and center of the plateau. Woodland, meadow steppe, and typical grassland exhibited strong stability resilience. Most areas showed insignificant stability resistance to *TWSA*, and only 33.1% of vegetation exhibited strong stability resistance to *TWSA*. The areas with significant vegetation stability resistance were in the center, the East, and typical grassland and desert steppe areas in the Northwest. **【Conclusion】** The autoregressive model effectively represents the response of vegetation stability to water storage and meteorological factors in the plateau. The combined influence of precipitation and temperature plays a significant role in vegetation growth; areas with high water storage have a greater impact on vegetation in the plateau.

Key words: *NDVI*; *TWSA*; temperature and precipitation; autoregressive model; Mongolian Plateau

责任编辑：赵宇龙

(上接第 97 页)

Analysis of Soil Water and Salt Redistribution during the Freeze-thaw Period in “Autumn Watering-spring Irrigation” under Local Autumn Watering Conditions

FAN Liquan¹, SHI Haibin¹, YAN Jianwen^{1*}, LI Xianye¹, DOU Xu¹, QI Qian¹, LI Huixiang²

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Inner Mongolia Hetao Irrigation District Water Conservancy Development Center

Yichang Branch Shahe Canal Water Supply Institute, Bayannaoer 015100, China)

Abstract: 【Objective】 The objective of this study is to investigate the water and salt movement during freeze-thaw period under partial autumn watering conditions in the Hetao Irrigation District. Specifically, the study focuses on comparing the water and salt dynamics between autumn irrigated farmland and non-autumn irrigated farmland (spring irrigated the following year). **【Method】** Field sampling observations and laboratory experiments were conducted to analyze the variations in soil temperature, soil moisture, and soil salinity during the freeze-thaw period under autumn watering and non-autumn watering conditions. **【Result】** After partial autumn irrigation, the temperature gradually decreased from the surface to the deeper layers in autumn irrigated farmland, while it decreased gradually in spring irrigated farmland. During the freezing process, the soil temperature in the 0~60 cm layer of autumn irrigated farmland dropped below 0 °C 30 days earlier than in spring irrigated farmland. In the melting process, the temperature in the 0~60 cm layer of autumn irrigated farmland rose above 0 °C 10 days later than in spring irrigated farmland. The desalination of the 0~100 cm soil layer in autumn irrigated farmland occurred mainly after autumn watering and during the freezing period, resulting in a desalting percentage of 47.38%. However, spring irrigated fields experienced salt accumulation of 35.68% and 16.87% during the freezing and melting stages, respectively. Throughout the freeze-thaw period, the net salt flux in each layer of both autumn irrigated and spring irrigated fields was negative, but it increased with soil depth. However, in spring irrigated farmland, the net salt flux initially increased and then decreased with increasing soil depth. **【Conclusion】** The water and salt migration patterns during the freeze-thaw period were influenced by the water level differences between autumn irrigated and spring irrigated fields. The time difference between the freezing and melting processes led to salt accumulation in spring irrigated fields before the next year's spring irrigation. These findings provide valuable insights into the water and salt migration dynamics in irrigated and non-irrigated farmland, as well as the optimal development of autumn irrigation and spring irrigation practices under local autumn watering conditions.

Key words: local autumn watering; spring irrigation; freeze-thaw period; water-salt migration

责任编辑：韩 洋