

宁夏青铜峡灌区冬灌对冻融期土壤 水热盐分布及作物生长影响

王心亮¹, 王春颖¹, 袁银², 杨健³, 韩宇平¹

(1.华北水利水电大学 水资源学院, 河南 郑州 450046; 2.河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450016; 3.黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘要: [目的] 研究冬灌和冻融条件下土壤水热盐的再分布规律及其对作物生长的影响, 为防治土壤盐渍化和保障粮食安全提供科学依据。[方法] 基于宁夏青铜峡灌区 2018 年 10 月 25 日至 2020 年 10 月 3 日试验田实测气象、土壤理化指标和作物生长数据, 采用统计分析及可视化方法对冬灌与非冬灌区农田水热盐的运移规律及作物生长情况进行对比分析。[结果] 青铜峡灌区土壤温度变化滞后于气温变化, 土壤浅表层温度受气温变化影响更显著。土壤从表面开始逐渐向下冻结, 冻结深度随着气温的降低不断加深, 冻融期土壤冻结层从表层和底部同时进行消融, 整个土壤冻融期共历时 98 d。农田灌溉后含水率显著增高, 冻结期灌溉降低各土层土壤温度 0.1~1.1 °C。冬灌农田不同深度土层土壤温度变化趋势和含水率变化特征与非冬灌区农田基本一致。冬灌后各土层盐分含量均下降, 其中 0—30 cm 土层土壤盐分显著下降, 但冻融期后冬灌农田土壤出现返盐现象。冬灌农田相较于非冬灌农田, 小麦植株较高, 玉米生长发育速度较快, 小麦增产 20.64%, 玉米增产 4.20%。[结论] 青铜峡灌区冬灌明显改变了土壤水热盐的分布规律, 可以有效降低土壤盐分, 促进作物生长和增产, 特别是明显提高小麦产量。

关键词: 宁夏青铜峡灌区; 冬灌; 冻融期; 土壤水热盐; 作物生长

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0054-07

中图分类号: S152.7, S278

文献参数: 王心亮, 王春颖, 袁银, 等. 宁夏青铜峡灌区冬灌对冻融期土壤水热盐分布及作物生长影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 54-60, 68. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.008; Wang Xinliang, Wang Chunying, Yuan Yin, et al. Effects of winter irrigation on soil water-heat-salt migration and crop growth during freezing-thawing period in Qingtongxia Irrigation District of Ningxia [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 54-60, 68.

Effects of Winter Irrigation on Soil Water-heat-salt Migration and Crop Growth During Freezing-Thawing Period in Qingtongxia Irrigation District of Ningxia

Wang Xinliang¹, Wang Chunying¹, Yuan Yin², Yang Jian³, Han Yuping¹

(1. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China; 2. Henan Water & Power Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450016, China; 3. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: [Objective] The effects of winter irrigation on soil water-heat-salt migration and crop growth during the freezing-thawing period were analyzed in order to provide a scientific basis for controlling soil salinization, and to ensure food security. [Methods] Statistical analysis and visualization methods were used to compare and analyze soil water-heat-salt migration and crop growth in winter irrigation and non-winter irrigation areas based on meteorological, soil physicochemical indicators, and crop growth data in an experimental field in the Qingtongxia Irrigation District of Ningxia from 25 October 2018 to 3 October 2020. [Results] Soil temperature changes in the Qingtongxia Irrigation District lagged behind air temperature changes, and the shallow surface soil temperature was more significantly affected by air temperature changes. The soil gradually froze from the

收稿日期: 2022-04-06

修回日期: 2022-11-02

资助项目: 黄河水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研课题“宁夏引黄灌区冬灌农田水热盐运移规律及数值模拟研究”(HKY-JBYW-2022-10); 河南省自然科学基金面上项目(232300421249)

第一作者: 王心亮(1997—), 男(汉族), 湖北省襄阳市人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。Email: 15176419363@163.com。

通信作者: 杨健(1989—), 男(汉族), 河南省洛阳市人, 博士, 工程师, 主要从事农业节水与水资源高效利用研究。Email: cauyangjian@126.com。

surface downward and the freezing depth deepened as the temperature decreased. The frozen layer of soil thawed simultaneously from the soil surface and the bottom of the measurement profile during the thawing period. The entire soil freezing and thawing period lasted for 98 days. The soil moisture content increased significantly after irrigation. During the freezing period, irrigation decreased the temperature of each soil layer by 0.1—1.1 °C. The variation trends of soil temperature and moisture in different soil layers during the winter irrigation period were basically the same as those during the non-winter irrigation period. After winter irrigation, the salinity of each soil layer decreased, especially in the 0—30 cm soil layer, and salinity decreased significantly. However, after the freezing-thawing period, salt accumulated in the soil. Winter wheat grew taller and corn grew faster in the winter irrigation farmland than in the non-winter irrigation farmland. Average wheat and corn yields increased by 20.64% and 4.20%, respectively, in the winter irrigation farmland. [Conclusion] Winter irrigation affected the distribution of soil water, heat, and salt, and effectively reduced soil salinity, resulting in increased crop growth and yield (especially wheat yield) in the Qingtongxia Irrigation District.

Keywords: Qingtongxia Irrigation District; winter irrigation; freezing-thawing; soil water-heat-salt; crop growth

土壤冻融循环伴随水分相变、水热传输和盐分积累等过程^[1-3]。冬灌直接改变冻融期间土壤水分、温度和土壤理化性质等,可有效降低土壤盐分,是治理土壤盐渍化的重要措施^[4],也间接影响作物生长和产量。针对冻融期土壤水热盐运移规律及对作物生长影响,Hou等^[5]建立了室内单向冻结试验,有效地识别了冻结过程中土壤水热盐的变化特征及其相互作用;李晶等^[6]通过探究冻融期干旱荒漠区不同开垦年限的农田土壤水热变化特征,揭示冬灌对土壤水热变化及农田水量平衡的影响;王海霞等^[7]通过野外田间灌溉试验探讨了微咸水对土壤水盐分布特征及冬小麦生长、产量、光合作用特性的影响,并提出了土壤水盐调控措施。Feng等^[8]研究表明土壤盐分、粮食产量与灌溉水盐分之间存在显著的指数关系。目前,针对不同条件下非冻融期土壤水热盐迁移规律的研究较多,而考虑冬灌和冻融条件下土壤水热盐迁移规律及对作物生长影响的研究较少。

中国季节性冻土主要分布在北纬 30°以北的干旱和半干旱地区,这些地区土壤季节性冻融所诱发的土壤积盐是造成土地盐渍化的重要组成部分^[9]。宁夏盐碱土主要分布在北部的引黄灌区,该区盐渍化耕地面积占现有耕地面积的 48.93%,其轻、中、重度盐渍土土壤面积比例为 2.1 : 1.4 : 1.0,土壤盐碱化制约着该区农业的发展^[10-12]。本研究在宁夏引黄灌区青铜峡灌区选取气候、土壤、管理方式接近的试验田开展试验,研究冬灌对冻融期土壤水热盐分布及作物生长影响,旨在揭示冬灌和冻融条件下土壤水热盐的再分布规律及其对作物生长影响,为土壤盐渍化的治理和农业生产提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

青铜峡灌区位于宁夏平原北部(105° 85'—

106° 90'E, 37° 74'—39° 25'N),南起青铜峡水利枢纽,北至石嘴山,西抵贺兰山脉,东至鄂尔多斯台地西缘,总土地面积为 6 239 km²,是中国最古老的特大型灌区之一^[13],灌区主要土壤类型是灌淤土、盐渍土和淡灰钙土。灌区地处中温带干旱区,属典型温带大陆性气候,日照充足,蒸发强烈,昼夜温差大,年均气温 8~9 °C,年均蒸发量 1 000~1 550 mm,年均降水量 180~220 mm,时空分布极不均匀。夏季降雨多,农田淋洗脱盐,春、秋季节蒸发量大于降水量,土壤返盐,土壤盐渍化状况随季节变化呈周期性特点。试验田选取贺兰山农牧场典型粉壤土地块,地下水埋深介于 1.30~2.34 m,灌溉水矿化度为 448 mg/L,田间持水量为 21.2%(质量含水率),pH 值为 8.23,全盐量为 3.34 g/kg,钠吸附比(SAR)为 4.93(mmol/L)^{1/2},盐渍化程度较弱。土壤有机质含量 17.73 g/kg,全氮 1.18 g/kg,速效氮 51.20 g/kg,速效磷 9.85 mg/kg,速效钾 77.23 mg/kg,土壤肥力较差。灌区土壤一般 12 月初开始冻结,次年 3 月中旬融沉结束,冻结时间 3~4 个月。

1.2 试验设计

试验时间为 2018 年 10 月 25 日至 2020 年 10 月 3 日。在总面积约 0.28 hm² 的两块临近试验农田设置冬灌和非冬灌对比试验,对不同土层深度的土壤温度和含水率每间隔 1 h 传输一次实时数据。小麦生长周期为 3 月 15 日至 7 月 20 日,玉米生长周期为 4 月 28 日至 10 月 3 日,对小麦和玉米的株高与产量监测分别取 5 组重复,其中,株高监测每组取 10 个样点,产量监测每组取样面积为 23.2 m²。电导率(盐分)和其他土壤理化指标随机选择 6 个样点分别采集土样混匀成 1 个混合土样密封带回实验室测得,气象数据采用试验场邻近的惠农气象站监测数据。

观测试验田深度为 10,30,50,70,90 cm 的土壤

温度、水分和盐分,盐分在此基础上增加了地表(0 cm)和 110 cm 处的观测。根据灌溉管理处实际统计资料,在 2018 年 11 月 4 日进行冬灌,灌溉量预设为 $2\ 250\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。采用土壤温度监测仪和土壤水分速测仪(TDR 时域反射仪)监测土层温度和含水率变化情况,将温度和含水率传感器分别埋入对应深度土层,设置测定间隔为 1 h。TDR 测量含水率的原理是利用电磁脉冲在土壤中的传导速度与介电常数之间的函数关系,通过介电常数来推算未冻水的体积含水率^[14]。在冬灌前(2018 年 11 月 1 日)、冬灌后(2018 年 11 月 24 日)和冻融期后(2019 年 3 月 25 日)钻土取样测量电导率值,有研究表明,土壤电导率与盐分含量呈正相关关系^[1]。本研究取土样风干研磨后过 1 mm 筛,采用土水混合 1:5 配置,震荡仪震荡 3 min 后静置 30 min 提取上清液并使用 DDS-307 雷磁电导率仪测定电导率值,通过所测土壤浸出液的电导率值来反映土壤含盐量的高低。2018 年 10 月 25 日试验开始后进行 2019 年和 2020 年作物生长情况的监测,小麦和玉米种子同等处理后种植在相应的冬灌和非冬灌试验田里,生长期间进行相同的除草和施肥作业,作物成熟后通过鲜产量与作物含水量的关系计算作物产量。

2 结果与分析

2.1 冻融期土壤温度变化特征

气温与土壤剖面温度随时间变化见图 1。气温变化是导致土壤冻融现象出现的主要原因。土壤冻结深度随着气温的降低不断加深,浅层土壤温度随气温变化较为剧烈,土层越深,变化越平缓,冻融期土壤温度呈先下降后上升的趋势,同气温变化趋势一致。根据土壤冻结特征,将土壤冻融期划分为冻结期、稳定期和消融期 3 个阶段。冻结期是从土壤表层出现负温开始,表层土壤开始冻结至 50 cm 土层冻结,此阶段土壤温度不断降低,冻深不断增加,当冻深超过 50 cm 时逐渐稳定(图 2a,2b)。稳定期是从 50 cm 土层出现负温至地表或 50 cm 土层完全回暖到 $0\ ^\circ\text{C}$ 以上。从冻结层开始融化至完全消融为消融期。消融期土壤冻结层从地表向下和下部向上同时消融(图 2c),当土壤剖面深 30 cm 处温度回升至 $0\ ^\circ\text{C}$ 以上时,冻结层完全消融,整个冻融期共历时 98 d。冬灌与非冬灌农田冻融期土壤剖面温度变化特征基本一致(图 1)。整体上,土壤温度变幅小于空气温度变幅,土壤温度随气温的变化趋势具有滞后性。

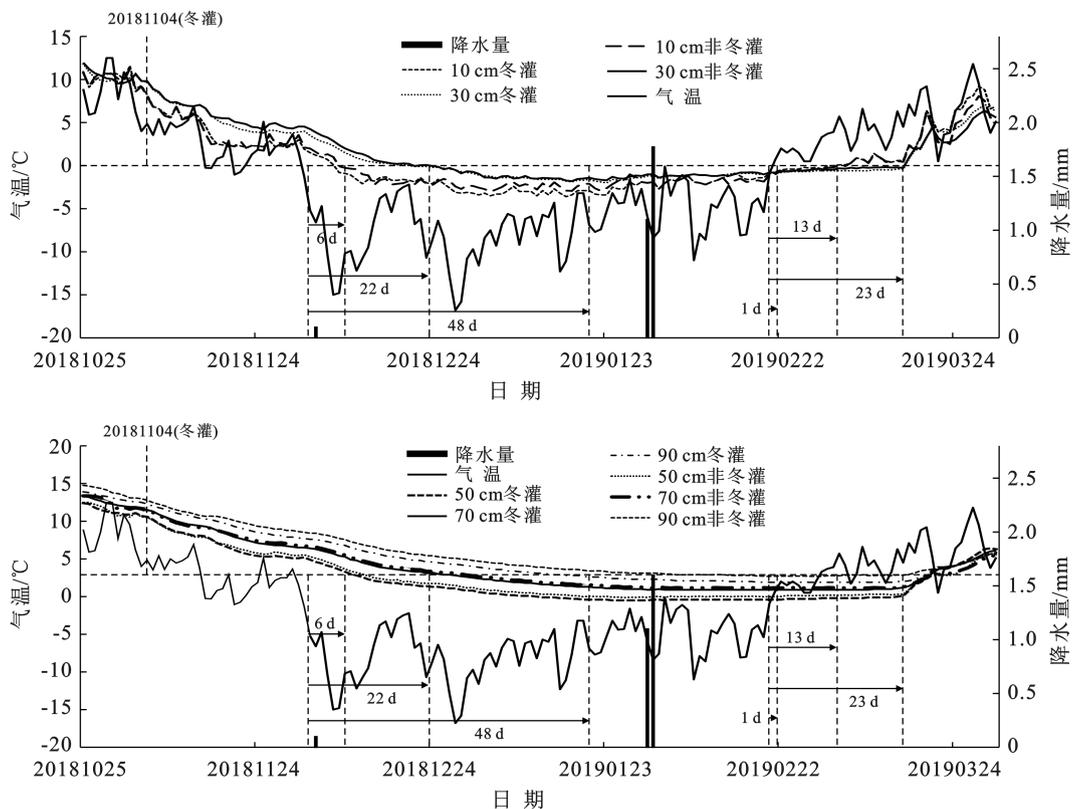


图 1 气温、地温、降水随时间变化

Fig.1 Temperature, ground temperature and precipitation change with time

土壤剖面深 10, 30, 50 cm 处的冻结时间依次滞后于气温低于 0 °C 的时间为 6, 22, 48 d, 消融时间依次滞后于气温回升至 0 °C 以上的时间为 13, 23, 1 d (图 1)。由此可见, 土层越深, 土层的冻结时间滞后越长, 且消融速度比冻结速度快。冬灌和非冬灌农田土壤温度统计分析见表 1。由图 1 和表 1 可以看出, 冬灌前冬灌农田与非冬灌农田土壤温度变化规律基本一致。冬灌降低土壤剖面温度, 其中 10 cm 土层温差最大为 1.72 °C, 70 cm 土层温差最小, 最大温差为

0.92 °C。冻结期 10—70 cm 土层, 非冬灌农田土壤温度略高于冬灌农田, 随着土层深度增加, 温度差异越来越小。研究期间 90 cm 土层非冬灌农田土壤温度明显高于冬灌农田。此外, 冬灌农田各层土壤温度的标准差和变差系数均大于非冬灌农田, 说明冬灌农田土壤温度受气温影响波动幅度大于非冬灌农田。土壤剖面越深, 土壤温度的标准差与变差系数越小, 说明土壤温度波动幅度随土层加深不断减小, 气温对土壤温度的影响随着土层深度的增加而递减。

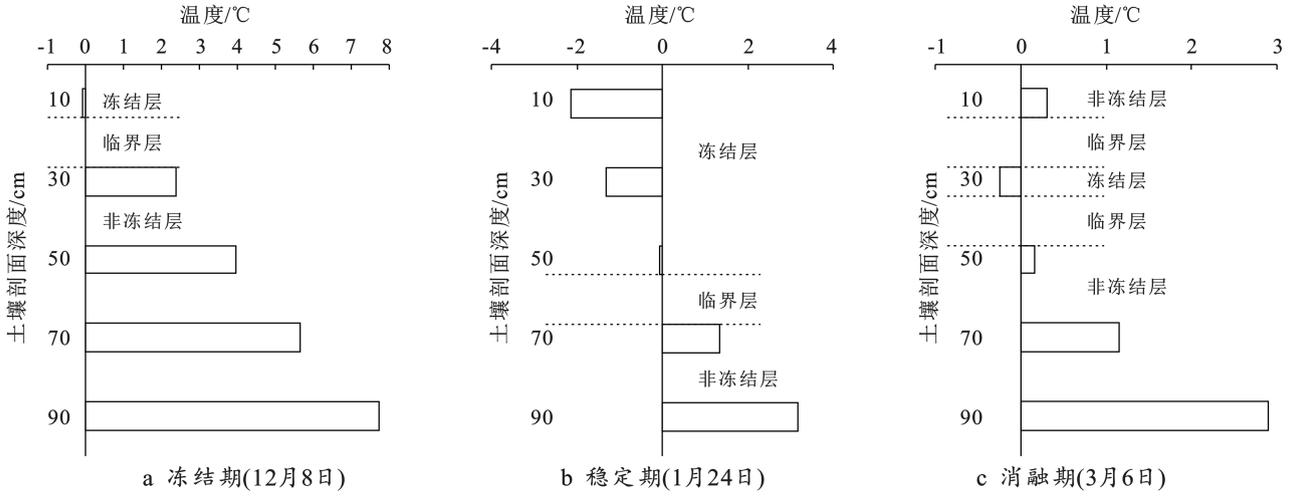


图 2 冻融期土壤剖面温度变化特征

Fig.2 Variation characteristics of soil profile temperature during freeze-thaw period

表 1 土壤温度统计分析结果

Table 1 Statistical analysis results of soil temperature

处理	深度/cm	最小值/°C	最大值/°C	均值 μ /°C	标准差 S /°C	变差系数 C_v
冬灌	10	-3.6	11.6	0.96	4.03	4.20
	30	-2	11.8	1.74	3.7	2.13
	50	-0.5	12.4	2.76	3.73	1.35
	70	0.9	13.3	4.07	3.64	0.89
	90	1.9	13.9	5.17	3.57	0.69
	平均值	-0.66	12.6	2.94	3.73	1.85
非冬灌	10	-3.04	11.27	1	3.78	3.78
	30	-1.8	11.95	1.87	3.69	1.97
	50	-0.13	12.51	3	3.57	1.19
	70	1.12	13.37	4.2	3.55	0.85
	90	2.69	14.77	5.89	3.52	0.60
	平均值	-0.23	12.77	3.19	3.62	1.68

2.2 冻融期土壤水分时空动态变化特征

冬灌与非冬灌农田土壤含水率时空变化过程和差异见图 3。由图 3a 可以看出, 非冬灌农田土壤越深含水率越高, 10—30 cm 土层含水率变化趋势显著, 90 cm 土层含水率变化趋势相对稳定。10—50 cm 土层含水率在冻结期呈下降趋势, 消融期含水率增加, 70—90 cm 土层含水率在整个冻融期内均呈缓慢下

降趋势。消融期末 (3 月 6 日), 表层土壤全部融化, 气温回升至 0 °C 以上, 10—30 cm 土层含水率回升至冻结初期土壤含水率水平, 随着温度进一步回升, 土壤含水率开始下降。2018 年 11 月 4 日进行了冬灌, 由图 3b 可以看出, 与非冬灌农田相比, 冬灌后土壤含水率大幅增加。12 月 8 日前土壤未冻结, 含水率逐渐降低。冻结期土壤水分逐渐发生相变, 液态水减

少, TDR 测得土壤未冻结含水率呈持续降低趋势, 其中, 10—50 cm 土层含水率下降趋势显著, 50—70 cm 土层含水率下降幅度较小, 70 cm 以下土层含水率有先下降后增加的趋势。稳定期土壤含水率变化幅度较小。消融期气温回升, 土壤水分由冻结态逐渐变成液态, TDR 测得含水率均有不同程度的增加。冻土全部融化后, 随着气温的上升, 土壤含水率逐渐减少。冻融期内冬灌农田土壤含水率浅层变化较大, 深层相对稳定, 与非冬灌农田变化特征基本一致。

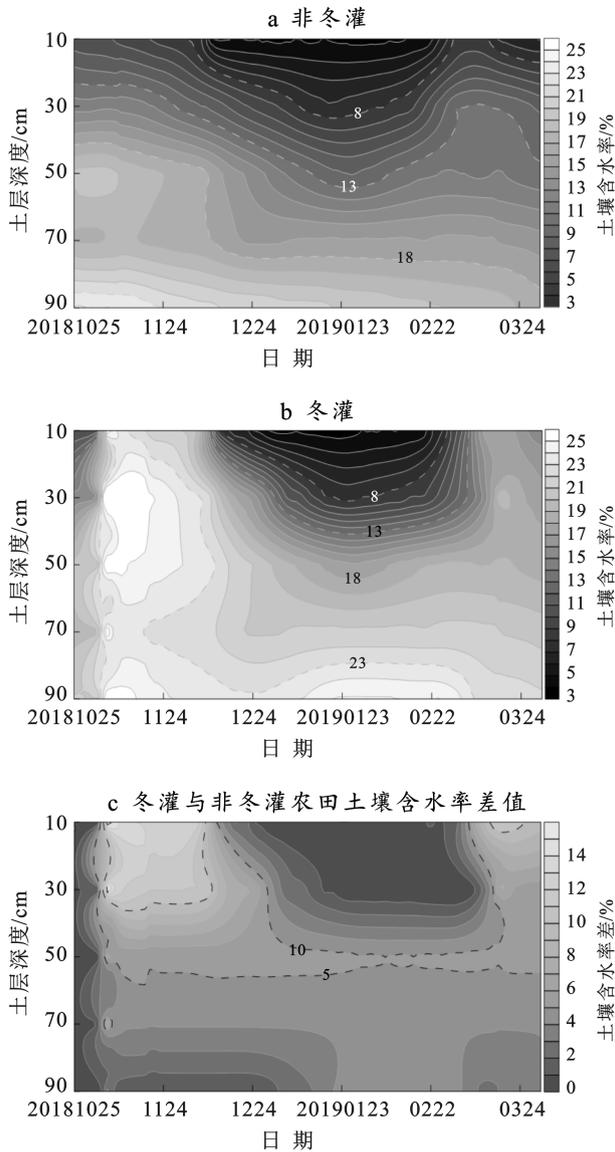


图 3 土壤含水率时空变化过程

Fig.3 Temporal and spatial variation of soil moisture content

冬灌与非冬灌农田土壤未冻结含水率差值见图 3c。灌溉后冬灌农田土壤含水率均大于非冬灌农田土壤含水率。冻结前(12月8日), 冬灌农田相较于非冬灌农田, 从浅层到深层土壤含水率差值逐渐减小。冻融期内, 冬灌农田与非冬灌农田土壤未冻结含

水率差值从 50 cm 土层向上层和下层递减, 其中, 10 cm 和 30 cm 土层含水率差先减小后又逐渐增大, 70 cm 和 90 cm 土层含水率差值较稳定。完全消融后, 冬灌农田含水率较高, 从浅层到深层土壤含水率差值逐渐减小。

2.3 冬灌对土壤含盐量变化的影响

研究期间冬灌与非冬灌农田土壤剖面盐分变化见图 4。非冬灌农田土壤电导率从表层到深层有减小的趋势。2019 年 3 月 25 日非冬灌农田各土层电导率均比冻融期前有所下降, 2018 年 11 月 24 日相比于 2018 年 11 月 1 日, 表层盐分略高, 10 cm 以下土层盐分小幅下降。此时农田还未冻结, 土壤表层 (<10 cm) 受到微弱的蒸发作用使得盐分略高, 10 cm 以下土层受温度梯度和水势的共同影响, 土壤水分运移带走了部分盐分。冬灌农田在灌溉前土壤电导率从浅层到深层有逐渐下降趋势, 灌溉后各土层电导率值差异较小且相较于灌溉前均下降。冻融期后(2019 年 3 月 25 日)冬灌农田土壤电导率均有不同幅度的增加, 10—70 cm 土层电导率增长至超过冬灌前, 出现返盐现象。整体上, 灌溉前(2018 年 11 月 1 日), 非冬灌农田土壤电导率略小于冬灌农田, 变化趋势相近, 其中非冬灌农田 70 cm 土层出现积盐现象, 冬灌农田 90 cm 土层出现积盐现象。灌溉后(2018 年 11 月 24 日), 冬灌农田表层电导率远低于非冬灌农田, 30 cm 以下土层电导率值接近, 冻融期后(2019 年 3 月 25 日)冬灌农田各土层电导率均高于非冬灌农田, 平均含盐量高出 50% ($p < 0.05$), 出现返盐现象, 非冬灌农田未出现返盐现象。

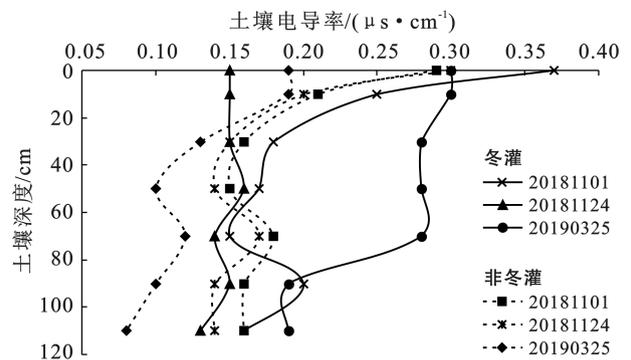


图 4 土壤电导率分布特征

Fig.4 Soil electrical conductivity change along the soil profile under winter irrigation and non-winter irrigation conditions

2.4 冬灌对作物生长的影响

冬灌与非冬灌农田作物植株平均高度变化特征见图 5。由图 5a 可以看出, 冬灌农田小麦植株高度高

于非冬灌农田小麦植株高度。生长阶段,植株生长速度相近,成熟阶段,冬灌农田小麦生长速度比非冬灌农田快,且小麦成熟后植株高度比非冬灌植株高。由图5b可以看出,冬灌农田玉米拔节、小(大)喇叭口、孕穗期比非冬灌农田早,冬灌农田玉米植株高度高于非冬灌农田玉米植株高度。由表2可以看出,冬灌农田小麦平均株高为0.80 m,平均产量为7 856 kg/hm²,非冬灌农田平均株高为0.67 m,平均产量为6 512 kg/hm²。冬灌农田小麦植株高度和产量均高于非冬灌农田,冬灌后平均株高增加0.13 m ($p < 0.01$),产量增长

20.64% ($p < 0.05$)。冬灌农田玉米平均株高3.31 m,非冬灌农田玉米平均株高3.09 m,冬灌后平均株高增加0.22 m ($p < 0.01$)。冬灌和非冬灌农田玉米平均产量为13 603 kg/hm²和13 055 kg/hm²,冬灌后产量增长4.20% ($p < 0.05$),产量受冬灌影响较小。

由此可见,冬灌农田作物生长发育较早,长势好,产量高。其中,冬灌对小麦植株高度影响较大,对玉米生长发育速度影响较大,且冬灌后小麦产量增长率高于玉米产量增长率,冬灌是促进作物增产的有效措施。

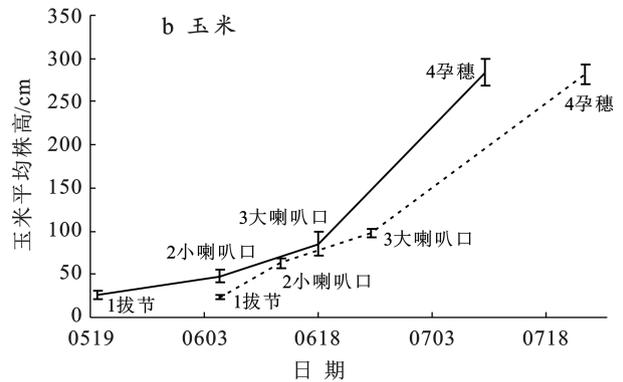
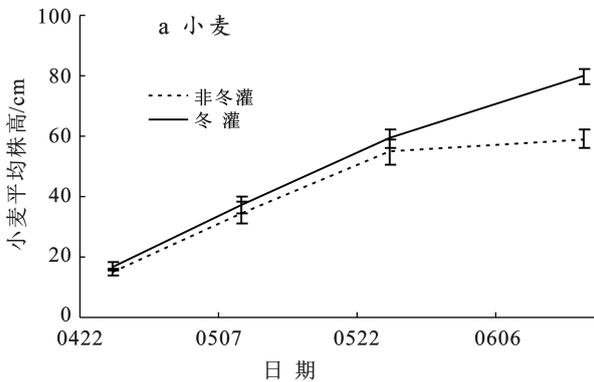


图5 作物植株高度变化特征

Fig.5 Variation characteristics of crop height

表2 冬灌与非冬灌农田作物特征统计(2019)

Table 2 Crop characteristics statistics of winter irrigation and non-winter irrigation fields (2019)

指标	玉米株高/m	小麦株高/m	玉米产量/(kg·hm ⁻²)	小麦产量/(kg·hm ⁻²)
冬灌	3.31	0.80	13 603	7 856
非冬灌	3.09	0.67	13 055	6 512
显著性水平(p)	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p < 0.05$	$p < 0.05$

3 讨论

土壤含水率在冻融期呈先下降后上升趋势,这主要是由于TDR时域反射仪观测的冻结层游离水逐渐减少导致。在土壤完全消融时,冻结层的土壤含水率略高于冻结前土壤含水率,非冻结层的土壤含水率呈下降趋势,说明土壤冻结时下层非冻结土壤水分向上层冻结层运移,与以往研究结论一致^[6,15]。这主要是当土壤表层发生冻结时,由于深层土壤温度较高,土壤表面张力和水分黏度较高,导致土壤水分向温度较低的区域转移^[16]。冬灌农田土壤含水率高,冻结程度强,土壤孔隙度变小,土壤的渗透性和导水性变弱,限制水在冻结带的迁移^[16-17],这可以解释部分时段冬灌农田游离态水分含量小于非冬灌农田的现象。冬

灌农田冻融期后可为作物提供良好的土壤水分条件,起到蓄水保墒作用^[6]。冬灌通过改变土壤含水率改变了土层的导温系数,土壤含水率高,热容量增大,因而降温过程中土温降低缓慢,升温时冬灌农田各土层温度升高比较慢^[18]。导致冻融期部分时段非冬灌农田土壤温度略高于冬灌农田。非冬灌农田土壤冻结前(2018年11月24日)表层(<10 cm)盐分较高,10 cm以下土层盐分下降,冻融期后土壤剖面盐分均有所下降。冬灌农田灌溉后各土层电导率均出现了不同程度的下降,冻融期后土层返盐。冬灌后,冬灌农田地表盐分相比于冬灌前明显减少,变化率为-59%。这与唐文政等^[19]和靳志锋等^[15]的研究结果相似,主要是由于水分下渗淋洗盐分所致^[5,16,19]。冻融期后,冬灌农田土壤剖面(<70 cm)出现返盐现象。这主要是由于土壤冻结过程中土壤盐分随水分有向冻结层运移的趋势,在临界层不断聚积,同时,在土壤消融时冻结层以上由于蒸发作用,表层会积盐^[20-22]。非冬灌农田含水率较小,潜水蒸发和土壤表层蒸发弱,水盐运移能力较弱,冻融期后土壤表层盐分减少。冬灌前,冬灌农田与非冬灌农田盐分差异较小且变化趋势相近,分别在90 cm土层和70 cm土层出现积盐现象。积盐现象的存在可能主要是浅层土壤水分有

向深层运移的趋势,同时地下水埋深较浅,在土壤表面张力和水力梯度的作用下有向上层运移的趋势^[15-16],因此,在某一临界层形成积盐。积盐层位置由地下水埋深和土壤含水率等因素共同决定。但当受到大量冬灌水的淋洗后各土层盐分含量差异较小且均降低,其中积盐层降幅最大。

冬灌农田小麦植株高度和产量均高于非冬灌农田,玉米生长发育提前,冬灌后小麦产量增长幅度明显高于(20.64%)玉米产量增长(4.20%)。这主要是由于冬灌农田较高的含水率和较低土壤温度促进农作物根系的发育,并可能减少病虫害。非冬灌农田土壤含水率均低于冬灌农田,小麦根系供水不足,导致株高表现出显著差异。冬灌农田土壤储水量较多,促使玉米生长较快、生育期提前。综上所述,在土壤冻结前适时冬灌可以保证墒情并降低病虫害发生概率,对作物的发育和生长具有促进作用。土壤盐分过高容易造成土壤盐渍化,可能对作物产量及区域农业生产造成负面影响^[23]。本研究结果发现冬灌造成来年土壤返盐,但返盐是否对作物生长造成了影响尚无法判断,后续研究中,应选取不同盐渍化程度的试验田研究作物生长对盐渍化程度的响应机制。卢星航等^[24]和彭振阳等^[25]的研究表明,对农田进行覆盖和埋设暗管排水均能有效抑制盐分向上运移,降低冻结层返盐率。因此,科学合理地控制冬灌量,建立良好的排水系统,可降低冬灌返盐对作物造成的不良影响。

4 结论

(1) 气温变化是土壤发生冻融现象的主要原因,土壤温度变幅小于气温变幅,且土壤温度变化滞后于气温变化,整个土壤冻融过程共历时 98 d,农田冬灌和非冬灌条件下土壤温度变化特征基本一致。冬灌显著提高浅层(<50 cm)土壤含水率,对深层(50—90 cm)土壤含水率影响较小,气温变化和冬灌对于浅层土壤的影响均高于深层土壤。

(2) 冬灌后,非冬灌农田表层盐分略有增加,10 cm以下土层盐分小幅下降,冬灌农田各土层盐分差异较小且相较于灌溉前均下降。冻融期后,非冬灌农田各土层盐分均比冻融期前有所下降,冬灌农田中浅层(10—70 cm)土壤盐分含量超过冬灌前,出现返盐现象。

(3) 冬灌农田的小麦植株高度和产量均高于非冬灌农田,玉米生长发育比非冬灌农田早,冬灌后小麦增产显著(20.64%),玉米增产较小(4.20%)。冬灌明显改变土壤水热盐条件,对于作物生长及产量具有重要促进作用,对于水资源利用和农业生产具有重要意义。

[参 考 文 献]

- [1] 刘小燕,刘巧玲,刘廷玺,等.科尔沁草甸地冻融期土壤水热盐动态迁移规律[J].水科学进展,2015,26(3):331-339.
- [2] 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.
- [3] 付强,侯仁杰,李天霄,等.冻融土壤水热迁移与作用机理研究[J].农业机械学报,2016,47(12):99-110.
- [4] Li Ling, Liu Hongguang, He Xinlin, et al. Winter Irrigation Effects on Soil Moisture, Temperature and Salinity, and on Cotton Growth in Salinized Fields in Northern Xinjiang, China [J]. Sustainability, 2020,12(18),7573.
- [5] Hou Renjie, Li Tianxiao, Fu Qiang, et al. Research on the distribution of soil water, heat, salt and their response mechanisms under freezing conditions [J]. Soil and Tillage Research, 2020,196:104486.
- [6] 李晶,何志斌,杜军,等.冬灌对冻融期干旱区荒漠绿洲农田土壤水热状况的影响[J].农业工程学报,2018,34(11):105-112.
- [7] 王海霞,徐征和,庞桂斌,等.微咸水灌溉对土壤水盐分布及冬小麦生长的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):291-297.
- [8] Feng Genxiang, Zhu Chengli, Wu Qingfeng, et al. Evaluating the impacts of saline water irrigation on soil water-salt and summer maize yield in subsurface drainage condition using coupled HYDRUS and EPIC model [J]. Agricultural Water Management, 2021,258:107175.
- [9] 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.
- [10] 李文昊,王振华,郑旭荣,等.冻融对北疆盐碱地长期滴灌棉田土壤盐分的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):40-46.
- [11] Li Xianwen, Jin Menggui, Zhou Nianqing, et al. Inter-dripper variation of soil water and salt in a mulched drip irrigated cotton field: Advantages of 3-D modelling [J]. Soil and Tillage Research, 2018,184:186-194.
- [12] 张永宏,周涛,樊丽琴,等.宁夏引黄灌区菜田利用地下水喷灌对土壤水盐动态的影响[J].土壤通报,2019,50(6):1323-1327.
- [13] 刘宽,翟家齐,赵勇,等.青铜峡灌区引水变化趋势及影响因素解析[J].灌溉排水学报,2020,39(10):99-107.
- [14] 谭秀翠,杨金忠,查元源.土壤含盐量对 TDR 含水率测试结果的影响及校正方法[J].灌溉排水学报,2010,29(6):1-6.
- [15] 靳志锋,虎胆·吐马尔白,牟洪臣,等.土壤冻融温度影响下棉田水盐运移规律[J].干旱区研究,2013,30(4):623-627.

- [13] 俞慧珍,叶年山.江苏省城市绿化航空遥感调查评价研究报告[J].中国园林,1993,9(2):23-34.
- [14] 王新.紫叶稠李在乌鲁木齐地区的物候期观测和生长量调查[J].现代农业科技,2016(4):160.
- [15] 付鹏程,胡广录,巩炜,等.河西走廊沙漠—绿洲过渡带固沙植物根区土壤物理性质及持水特性[J].土壤通报,2021,52(4):811-820.
- [16] 方燕辉.上海 25 种常见灌木的固碳能力及其与叶性状的关系[D].上海:华东师范大学,2013.
- [17] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学(D 辑:地球科学),2007,37(6):804-812.
- [18] 梁艺馨,李卓蓉,雷珊,等.杨凌城区主要树种降噪评价及主要影响因素分析[J].陕西林业科技,2016(6):16-20.
- [19] 朱奕婕.基于层次分析法规划昆明市的园林树种[D].云南昆明:昆明理工大学,2020.
- [20] 喻华平,赵志常,高爱平,等.基于主成分分析和聚类分析的 23 份黄皮种质资源的品质评价[J].热带作物学报,2022,43(7):1357-1364.
- [21] 张卫勤,王文斗,那冬晨.临汾市主要区域绿化树种配置调查[J].现代农业科技,2018(11):169-170.
- [22] 苏晶,何云核.杭州湾滨海盐碱地主要灌木景观价值评价[J].安徽农业科学,2020,48(15):126-129.
- [23] 李佳睿,朱江龙,房晓君,等.青岛市行道树及花灌木的评价研究[J].陕西林业科技,2015(3):94-97.
- [24] 刘瑞宁,张文辉,刘新成,等.天津市 32 种常见灌木的观赏性及适应性综合评价[J].西北农业学报,2008,17(1):296-301.
- [25] Conway T M, Vander Vecht J. Growing a diverse urban forest: Species selection decisions by practitioners planting and supplying trees [J]. Landscape and Urban Planning, 2015,138:1-10.
- [26] 杨静怡,张政文,吴峰.贵阳市主要绿化树种功能评价[J].江苏农业科学,2020,48(3):156-161.
- [27] 张学星,施莹,周筑,等.云南城市行道树选择及综合评价研究[J].浙江农林大学学报,2011,28(6):922-926.
- [28] 赵青,刘爽,柳冬香,等.福州市普通公路主要园林绿化树种美学评价[J].武夷学院学报,2020,39(9):18-26.
- [29] 孙晓丹,李海梅,郭霄,等.10 种灌木树种滞留大气颗粒物的能力[J].环境工程学报,2017,11(2):1047-1054.
- [30] 陈芳,周志翔,郭尔祥,等.城市工业区园林绿地滞尘效应的研究:以武汉钢铁公司厂区绿地为例[J].生态学杂志,2006,25(1):34-38.
- [31] 张家洋,刘兴洋,邹曼,等.37 种道路绿化树木滞尘能力的比较[J].云南农业大学学报(自然科学),2013,28(6):905-912.
- [32] 白保勋,焦书道,陈东海.河南中北部 38 个常见树种的生物量与固碳特征分析[J].西部林业科学,2017,46(1):79-84.

(上接第 60 页)

- [16] Bing Hui, He Ping, Zhang Ying. Cyclic freeze-thaw as a mechanism for water and salt migration in soil [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,74(1):675-681.
- [17] Pradhan N, Downer C, Marchenko S. Catchment hydrological modeling with soil thermal dynamics during seasonal freeze-thaw cycles [J]. Water, 2019,11(1):116.
- [18] 李子忠,王皓.冬灌对农牧交错带人工草地越冬期土壤水热状况的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):7-13.
- [19] 唐文政,王春霞,范文波,等.积雪与地表联合覆盖条件下冻融土壤水盐运移规律[J].水土保持学报,2017,31(3):337-343.
- [20] 姚宝林,李光永,王峰.冻融期灌水和覆盖对南疆棉田水热盐的影响[J].农业工程学报,2016,32(7):114-120.
- [21] 李瑞平,史海滨,赤江刚夫,等.基于水热耦合模型的干旱寒冷地区冻融土壤水热盐运移规律研究[J].水利学报,2009,40(4):403-412.
- [22] 孙贯芳,屈忠义,杜斌,等.不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水热盐运移规律[J].农业工程学报,2017,33(12):144-152.
- [23] 李建国,濮励杰,朱明,等.土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J].地理学报,2012,67(9):1233-1245.
- [24] 卢星航,史海滨,李瑞平,等.覆盖后秋浇对翌年春玉米生育期水热盐及产量的影响[J].农业工程学报,2017,33(1):148-154.
- [25] 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.