

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.03.019

# 季节性冻融期灌水对土壤温度与冻融特性的影响\*

陈军锋<sup>1</sup> 郑秀清<sup>1</sup> 臧红飞<sup>1</sup> 刘萍<sup>1</sup> 任霞<sup>1</sup> 孙明<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024; 2. 山西省水文水资源勘测局太谷均衡实验站, 太谷 030800)

**摘要:** 通过季节性冻融期裸地、地膜覆膜地和秸秆覆盖地的田间系列灌水试验,研究了冻融期不同阶段灌水对土壤温度及冻融特性的影响。试验表明:不论何种地表条件,入冬后冻结期较早的灌水地块耕作层土壤温度在整个冻融期处于较低值。消融期,灌水对裸地和地膜覆盖地耕作层土壤温度的影响较小,灌水加速了地表冻层的融化;秸秆覆盖地灌水后土壤温度较低且变幅较小,秸秆覆盖不利于土壤的消融解冻。5 cm 土壤累积负温快速增加阶段灌水对于降低土壤最大冻结深度影响非常明显。

**关键词:** 灌水 土壤温度 冻结 融化 季节性冻融期

**中图分类号:** S152.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)03-0104-06

## Effects of Irrigation on Soil Temperature and Soil Freeze-thaw Characteristics during Seasonal Freeze-thaw Period

Chen Junfeng<sup>1</sup> Zheng Xiuqing<sup>1</sup> Zang Hongfei<sup>1</sup> Liu Ping<sup>1</sup> Ren Xia<sup>1</sup> Sun Ming<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

2. Taigu Water Balance Experimental Field, Bureau of Hydrology and Water Resources Survey of Shanxi Province, Taigu 030800, China)

**Abstract:** A series of field irrigation experiments of bare plot (BP), plastic film mulched plot (PFP) and corn straw mulched plot (CSP) were conducted during the seasonal freeze-thaw period. The effects of irrigation at different stages on soil temperature and soil freeze-thaw characteristics were analyzed. The results showed that the soil temperatures of plots irrigated earlier in freezing period were lower during the freeze-thaw period. The irrigation had a little effect on the soil temperature of BP and PFP in the thawing period, and the irrigation accelerated the thawing of the surface frozen layer. The soil temperatures of CSP irrigated at thawing period were lower and had a smaller variation. The mulching of corn straw went against soil thawing. The irrigation had a great effect on maximum soil freezing depth in the rapid increasing stage of accumulated negative soil temperature at the depth of 5 cm.

**Key words:** Irrigation Soil temperature Freezing Thawing Seasonal freeze-thaw period

### 引言

季节性冻融期土壤的冻结与融化取决于太阳辐射热量的变化和土壤对热量的吸收利用状况。当土壤温度降低到冻结温度以下时,土壤中的水分便开始冻结,形成冻土。土壤的季节冻融特性主要受植被、雪盖、水体、地形、含水率和盐分含量等因素影

响<sup>[1]</sup>。季节性冻土主要分布于北纬 30° 以北地区,这些地区大多数属于干旱、半干旱、水资源严重短缺区。近年来,随着干旱及水污染灾情的日益加重,农业生产的发展受着干旱缺水的严重威胁。出于储水保墒的目的,中国北方大部分灌区实施冬春灌溉,然而有关冻融期农田灌水方面的研究成果较少。目前国内多侧重于非冻融期农田灌水对作物生长、产

收稿日期: 2012-08-16 修回日期: 2012-10-21

\* 国家自然科学基金资助项目(40472132)、山西省自然科学基金资助项目(2012011033-2)和太原理工大学 2012 年校青年基金资助项目(2012L016)

作者简介: 陈军锋, 博士生, 主要从事水资源与水环境研究, E-mail: ambitionchjf@163.com

通讯作者: 郑秀清, 教授, 博士生导师, 主要从事孔隙介质流体力学、水资源与水环境研究, E-mail: zxq6818@sina.com

量及土壤水分状况等方面的研究<sup>[2-13]</sup>。在季节性冻土分布区,冬春季节作物的播种、生长发育、土壤养分、盐分分布均与土壤温度及土壤冻融特性密切相关,已有学者对其进行了研究<sup>[14-20]</sup>。

水的比热容较大( $4.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ),这一特性对于指导冬春灌溉具有重要意义。目前,国内外关于冻融期灌水对土壤冻融特性的影响尚未见报道。本文以山西省水文水资源勘测局太谷均衡实验站为试验基地,进行了裸地、地膜覆盖地和秸秆覆盖地的田间系列冬春灌溉试验,分析研究冻融期灌水对不同地表处理地块土壤温度和土壤冻融特性的影响。

## 1 试验条件及方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于山西省晋中盆地,太原市南部60 km处的太谷均衡实验站,地理位置位于东经 $112^\circ 30' \sim 112^\circ 33'$ ,北纬 $37^\circ 26' \sim 37^\circ 27'$ ,海拔高度777.0 m。试验区属暖温带大陆性半干旱季风气候,春季风大雨少,夏季雨量高度集中,秋季阴雨连绵,冬季寒冷少雪。多年(1954—2004年)平均气温 $9.9^\circ\text{C}$ ;年降水量415.2 mm,主要集中在6~9月份;水面蒸发能力1642.4 mm(小型蒸发器);历史最大冻土深度92 cm(1960年),多年平均相对湿度74%,多年平均风速 $0.9 \text{ m/s}$ ,全年平均无霜期200 d。

试验区地下水位埋深为25.0 m。试验期间(2004年11月1日至2005年3月31日)太阳总辐射量为 $127.18 \text{ kJ}/\text{cm}^2$ ,其中12月份太阳总辐射量最低,为 $18.77 \text{ kJ}/\text{cm}^2$ 。1月最冷,平均气温 $-6.8^\circ\text{C}$ 。日平均最低气温出现在12月31日,为 $-15.7^\circ\text{C}$ ;日内最低气温出现在12月31日,为 $-23.3^\circ\text{C}$ 。试验期太阳辐射量和日平均气温变化特征见图1。

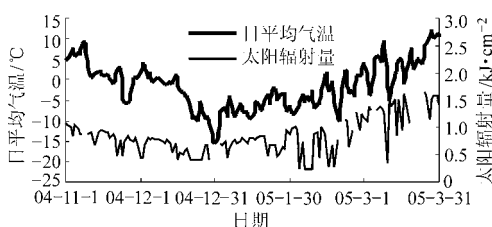


图1 试验期日平均气温和太阳辐射量变化曲线

Fig. 1 Diurnal average air temperature and solar radiation curves during test period

### 1.2 试验方法及方案

试验地块分为裸地(LD)、地膜覆盖地(MD)和秸秆覆盖地(JD)3种。MD覆盖物为厚度0.1 mm的聚乙烯白色塑料布;JD覆盖物为玉米秸秆,长约

5 cm,平均厚度为18 cm。土壤含水率采用干燥法测定,土壤温度采用热敏电阻测定,冻结与融化深度采用人工土钻取土观测法确定,观测时间均为8:00~9:00。11月1日,5~10 cm平均土壤含水率为15.6%,5 cm处土壤温度为 $0.1^\circ\text{C}$ 。

为了充分揭示冻融期不同冻融阶段灌水对土壤温度和冻融特性的影响,共进行了24组田间试验。每种地表条件的试验地块均为8块,分别以0~7表示,0代表冻融期末灌溉地块,1~7分别代表不同灌水日期地块,冻融期仅灌水一次,灌水定额均为 $225 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,灌水时间均为8:00,灌水水源为试验区地下水,水温 $6 \sim 8^\circ\text{C}$ 。灌水日期见表1。

表1 季节性冻融期系列灌水试验地块设计

Tab. 1 Irrigation experiments of different plots during freeze-thaw period

地块编号	灌水日期	冻融阶段 <sup>[20]</sup>
1	11月30日	不稳定冻结阶段
2	12月14日	(11月11日~12月24日)
3	12月27日	稳定冻结阶段
4	1月6日	(12月25日~2月12日)
5	2月16日	消融解冻阶段
6	2月25日	(2月13日~3月17日)
7	3月15日	

## 2 试验结果分析

### 2.1 土壤耕作层温度

冬春农作物根系深度一般为0~20 cm,本研究选择10 cm深度处的土壤温度作为耕作层的研究对象。图2~4分别为裸地、地膜覆盖和秸秆覆盖下不同试验地块耕作层土壤温度的变化曲线。

11月30日,裸地处于土壤不稳定冻结阶段,冻层位于地表及其附近,而地膜覆盖地和秸秆覆盖地土壤尚未冻结<sup>[20]</sup>。实施灌水后,裸地5~10 cm土壤含水率由21.1%增加到次日的29.0%,地膜覆盖地由18.1%增加到次日的23.9%,秸秆覆盖地由15.1%增加到次日的25.1%。由于土的导热系数随含水率的增大而增大<sup>[21]</sup>,所以灌水后土壤含水率的升高使土壤导热性能提高,灌水加剧了土气之间的能量交换,入冬后冻结期较早灌水不利于土壤蓄积热量。由图2~4可知,不论何种地表条件,冻结期第1次灌水地块土壤温度在整个冻融期总体上处于较低值,LD1较LD0低 $1.7 \sim 7.8^\circ\text{C}$ ,最大差值出现在2月6日;MD1较MD0低 $1.0 \sim 4.4^\circ\text{C}$ ,最大差值出现在2月21日;JD1较JD0低 $1.2 \sim 4.5^\circ\text{C}$ ,最大差值出现在3月19日。12月14日灌水后,由于水中潜热的释放,LD、MD、JD土壤温度分别增高约

1.1、0.3、0.2℃,但土壤含水率的增加使得土气之间的热交换加强,冻融期土壤温度总体上较未灌水地块低,LD2、MD2、JD2 较未灌水地最大低 0.7℃(2月11日)、0.6℃(2月21日)和 2.0℃(3月19日)。可见,土壤温度的变化受土壤热特性以及地表与大气之间热交换状况的影响。入冬后在土壤冻结期较早的实施灌水降低了土壤耕作层温度,从预防越冬作物受低温冻害角度考虑,越冬期冬灌不宜太早。

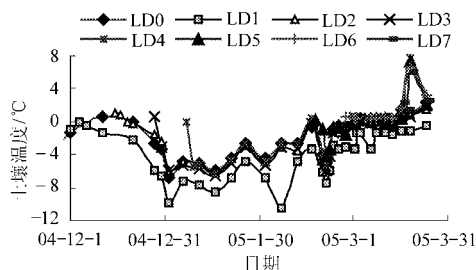


图2 裸地不同试验地块土壤温度变化曲线

Fig. 2 Soil temperature variation in bare plots

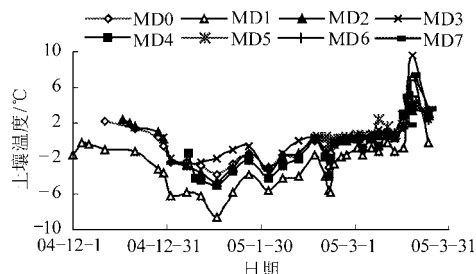


图3 地膜覆盖下不同试验地块土壤温度变化曲线

Fig. 3 Soil temperature variation in plastic film mulched plots

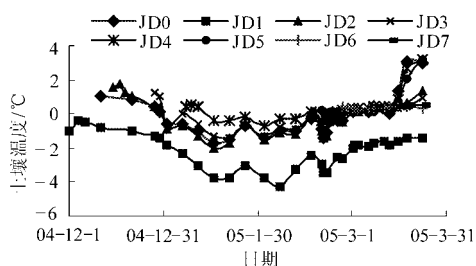


图4 秸秆覆盖下不同试验地块土壤温度变化曲线

Fig. 4 Soil temperature variation in corn straw mulched plots

当土壤温度出现负温并持续降低时,灌水对于提高土壤温度的效果越来越明显。12月下旬,外界气温逐渐达到年内最低,在地表土壤累积负温的作用下,裸地土壤冻层快速向下发展,12月27日和1月6日灌水后,裸地地块(LD3和LD4)土壤温度较LD0最多提高3.2~4.8℃。但由于土壤与外界的能量交换较强,该阶段灌水提高耕作层土壤温度持续的时间较短,约2~3d;地膜覆盖下,土壤可有效蓄积太阳辐射热,因此其耕作层土壤温度较裸地高,MD3和MD4耕作层土壤温度较MD0最多提高0.5~1.0℃;秸秆覆盖隔绝了土壤与外界的能量交换,保温效果显著,JD3和JD4耕作层土壤温度一直

较JD0高,最多提高0.7~1.0℃。

翌年2月份,太阳辐射逐渐增强,气温开始回升,灌水对裸地和地膜覆盖地土壤温度的影响较小;由于灌水后土壤含水率增大,土壤温度升高需要吸收较多的热量,但秸秆覆盖减弱了地气间的水热交换,所以JD6和JD7土壤温度变幅较小且较JD0低。

## 2.2 5 cm 土壤累积负温

对于不灌水地块而言,在外界气温和太阳辐射强度逐渐降低的影响下,12月下旬至1月初5 cm处累积负温增加速率最大,冻结期(2004年11月11日~2005年2月12日)LD0、MD0和JD0地块5 cm累积负温分别为 $-298.91^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 、 $-152.82^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 和 $-52.03^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。

由于水的比热容较大且是热的良导体,冻结期不同阶段灌水对于5 cm土壤累积负温影响较大,灌水增加了土壤含水率,加剧了土气间的热交换,冻结期较早的灌水使得土壤温度较低,不论何种地表处理,冻结期第一次灌水地块5 cm土壤累积负温最大。试验区1月最冷,平均气温为 $-6.8^{\circ}\text{C}$ ,在外界低温的作用下,5 cm土壤累积负温快速增加。1月6日灌水后,LD土壤温度由 $-4.8^{\circ}\text{C}$ 升高至 $0^{\circ}\text{C}$ ,MD和JD分别升高1.0和 $0.5^{\circ}\text{C}$ ,降低了冻结期5 cm土壤累积负温。秸秆覆盖下,灌水释放的潜热散失较少,5 cm土壤累积负温较小,为 $-14.39^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ (见表2)。地表累积负温是影响土壤冻结深度的最主要因素,已有研究表明,冻结期间5 cm土壤累积负温可表征土壤的最大冻结深度的变化特征<sup>[22]</sup>。然而,季节性冻融期地面灌水潜热的释放使得土壤冻融过程复杂化,改变了地表土壤的水热状况和土壤的自然冻结过程,使土壤的冻结过程更趋于复杂化。由表2可见,不同灌水地块5 cm土壤累积负温与其最大冻结深度无一定的相关关系。

## 2.3 土壤冻融特性

### 2.3.1 裸地

土壤的冻结和融化实质上是土壤水分的冻结和融化,即水分的相态变化过程,当土壤中的热量通过对流、导热等方式放出并使其温度降低到土壤的冻结温度时,其中的水分便开始冻结。由于水的比热容较大,水分的冻结和融化过程中要释放或者吸收较多的热量,因此冻融期灌水必然影响土壤的冻融特性。图5为裸地不同灌水地块土壤冻融过程曲线。

地球表面与大气之间不断地进行着能量的交换,土壤冻结过程与地表温度变化过程有着密切的关系。11月11日,LD0土壤温度降至 $-0.4^{\circ}\text{C}$ ,达到冻结温度。11月11日至12月24日土壤经历不稳定冻结阶段,该阶段土壤呈昼融夜冻状态,冻结强

表2 冻结期5 cm 累积负温及最大冻结深度

Tab.2 Accumulative negative temperature at 5 cm and the maximum frozen depth during freezing period

地块编号	灌水日期	裸地		地膜覆盖		秸秆覆盖	
		5 cm 累积负温/ ℃·d	最大冻结 深度/cm	5 cm 累积负温/ ℃·d	最大冻结 深度/cm	5 cm 累积负温/ ℃·d	最大冻结 深度/cm
0	不灌水	-298.91	60	-152.82	42	-52.03	35
1	2004-11-30	-429.15	63	-366.21	43	-146.53	35
2	2004-12-14	-267.90	63	-161.17	45	-52.34	33
3	2004-12-27	-292.92	60	-133.62	43	-62.21	33
4	2005-01-06	-264.45	50	-126.63	39	-14.39	20

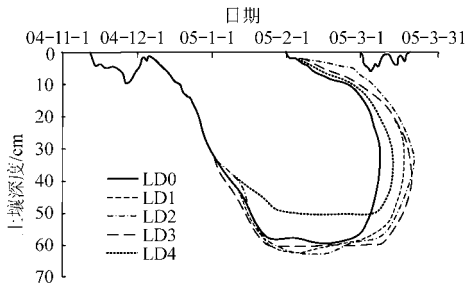


图5 裸地不同灌水地块土壤冻融过程曲线

Fig.5 Soil freezing and thawing process in bare plots

度低,主要形成薄层霜状冻层,最大深度为15 cm。12月25日土壤进入冻层稳定发展阶段,土壤温度梯度向上,热量持续不断逸出土壤。在地表累积负温持续增加的作用下,冻层逐渐向下稳定发展,冻结速率最大达2.8 cm/d,1月21日冻结锋面到达57 cm处;之后地表负积温增加缓慢(平均增速为 $-2.9^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ),冻层向下发展速度也随之减慢,到翌年2月6日冻层达到最大,为60 cm;2月13日,裸地土壤进入消融解冻阶段,0~5 cm深度的土壤受外界气温的影响经历数次冻融微循环,3月17日冻层完全融通。

不稳定冻结阶段,由于冻层位于地表,LD灌水后使冻层部分融化且土壤含水率增大加剧了裸地与外界热量的强烈交换,在外界负温的作用下土壤很快再次冻结,而且冻层稳定向下发展的速度较LD0快,冻层持续时间较长。稳定冻结阶段是土壤5 cm累积负温增加较快阶段,灌水潜热的释放可显著减小冻层的最大冻结深度。由图5可见,LD3与LD4的土壤冻融过程差异较大,其主要原因是12月27日和1月6日灌水引起的土壤累积负温差异较大。LD3累积负温为 $-292.92^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,1月6日,地表土壤累积负温增加速度较快(增速为 $-6.5^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ),而此时灌水显著地降低了地表土壤的累积负温,LD4累积负温为 $-264.45^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,因此LD4冻层发展速度较小,最大冻结深度仅为50 cm。

消融期,太阳辐射增强,外界气温逐渐回升,地面的热量收入大于热量支出,土壤表层开始消融并

向深层发展。灌水促进了地表土壤的消融解冻过程,但对下部冻层的融化影响不明显。

可见,冻结期灌溉水在向下入渗过程中逐渐发生相变并释放热量,所以灌水后土壤的冻层厚度先减小,之后随着地表累积负温的作用冻层再次增厚。消融期灌水的热量为土壤消融解冻提供了热量,加速了地表冻层的融化。

### 2.3.2 地膜覆盖地

地膜切断了土壤水分向空气中逸散的通道,限制了地表水分的蒸发,而另一方面,地膜覆盖后提高了土壤温度。所以,MD0初始冻结滞后LD0约30 d,冻层于12月29日开始稳定向下发展,土壤最大冻结速率达4.0 cm/d,最大冻结深度42 cm。由图6可见,MD1、MD2和MD3土壤最大冻结深度较MD0略有增加,而MD4与MD1、MD2、MD3冻结特征不同。1月6日灌水后,降低了地表负积温,冻层向下发展速度减缓,冻结速度平均为0.3 cm/d,最大冻结深度为39 cm。

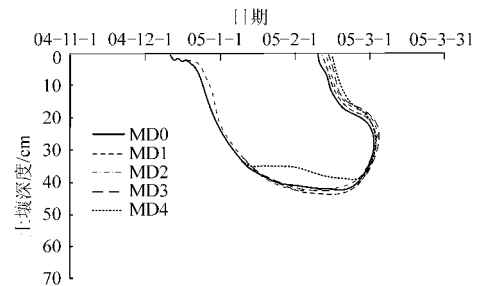


图6 地膜覆盖下不同灌水地块土壤冻融过程曲线

Fig.6 Soil freezing and thawing process in plastic film mulched plots

消融期,地膜覆盖下MD0耕作层土壤含水率较高(19.1%~21.0%),土壤中冻结的水分融化需吸收较多的热量,试验表明MD0初始消融时间较LD滞后约4 d。由于覆膜地块增温较快,所以消融解冻速度快过程较短,完全解冻较裸地提前14 d。消融期灌水对于地膜覆盖地块表层土壤的冻融影响较大,湿润的土壤在白天储蓄了太阳辐射热,土壤辐射维持正平衡,表层土壤保持向下融化状态,但对于下

部冻层解冻影响较小。

### 2.3.3 秸秆覆盖地

玉米秸秆覆盖层厚 18 cm,有效地阻隔了土壤对太阳辐射热量的直接吸收,减弱了土壤与外界的水热交换,地面辐射平衡维持正值时间较长,因此,JD0 于 12 月 26 日开始冻结,滞后 LD0 约 45 d。JD0 土壤冻结过程缓慢,1 月 1 日至 1 月 21 日,秸秆覆盖地 5 cm 累积负温增速较快,为  $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ,冻层快速向下发展,冻结速率最大为  $1.4\text{ cm}/\text{d}$ ,最大冻结深度 35 cm。灌水的 JD1、JD2、JD3 土壤含水率增大  $5.5\% \sim 11\%$ ,土壤导热系数增大,因此灌水后土壤冻结速度较 JD0 快。1 月 6 日灌水后地表土壤温度为  $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在秸秆保温的作用下表层土壤温度持续 5 d 为  $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,之后 5 cm 土壤累积负温增速为  $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ,冻结速率最大为  $0.6\text{ cm}/\text{d}$ ,最大冻结深度仅 20 cm,土壤冻结过程较为缓慢(见图 7)。

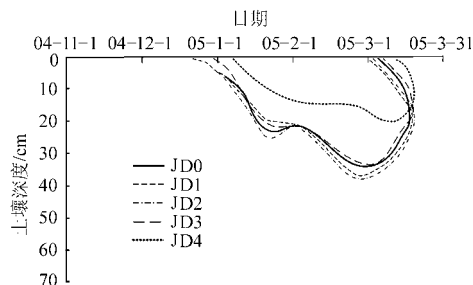


图 7 秸秆覆盖下不同灌水地块土壤冻融过程曲线

Fig.7 Soil freezing and thawing process in corn straw mulched plots

消融期,受秸秆覆盖隔热作用的影响,土壤吸收太阳辐射热量较裸地少,土壤的消融解冻速度较裸地慢。JD0 土壤起始消融时间较 LD0 滞后约 8 d,由于土壤含水率较高,秸秆覆盖下吸收外界的热量较少,3 月 16 日,15 cm 处土壤仍处于冻结状态,冻土完全解冻滞后裸地约 7 d。但消融期灌水释放的热量为秸秆覆盖地土壤提供了能力,促进了土壤的消融解冻,由于秸秆的覆盖隔热作用,土壤完全消融解

冻过程缓慢。

可见,在 5 cm 土壤累积负温增加较快阶段灌水对于减小冻层厚度非常有利,同时地表有覆盖物地块灌水后土壤的冻结深度明显较未灌水时浅,原因是覆盖物减少了水中热量向外界的散失,水分释放的热量抵消了地表负积温的累积,从而减缓了冻层向下发展的速度。

## 3 结论

(1)土壤温度的变化受土壤热特性以及地表与大气之间的热交换状况影响,入冬后冻结期较早的灌水地块土壤温度在整个冻融期处于较低值,LD1 耕作层温度较 LD0 低  $1.7 \sim 7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,JD1 较 JD0 低  $1.2 \sim 4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,MD1 较 MD0 低  $1.0 \sim 4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2)冻层稳定向下发展阶段,裸地灌水后(LD3 和 LD4)土壤温度较 LD0 最多提高  $3.2 \sim 4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,但持续的时间仅 2~3 d;地膜覆盖下,MD3 和 MD4 较 MD0 最多提高  $0.5 \sim 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;秸秆覆盖保温效果显著,JD3 和 JD4 灌水后土壤温度一直较 JD0 高,最多提高  $0.7 \sim 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。消融期,灌水对裸地和地膜覆盖地土壤温度的影响较小,JD6 和 JD7 土壤温度较 JD0 低且变幅较小。

(3)水的比热容较大,季节性冻融期灌水对于土壤温度和冻融特性的影响较大。在 5 cm 土壤累积负温快速增加阶段实施灌溉,可减小土壤冻结深度。LD4 最大冻结深度为 50 cm,较 LD0 小 10 cm;MD4 最大冻结深度为 39 cm,较 MD0 小 3 cm;JD4 最大冻结深度为 20 cm,较 JD0 小 15 cm。冻融期其他时间灌水对冻层最大冻结深度影响较小。消融期,裸地灌水的热量为土壤消融解冻提供了能量,加速了地表冻层的融化,地膜覆盖地块灌水后表层土壤保持向下融化状态,对于下部冻层解冻速度影响较小;而秸秆覆盖不利于土壤的消融解冻,土壤完全消融解冻过程缓慢。

## 参 考 文 献

- 1 周幼吾,郭东信,程国栋,等. 中国冻土[M]. 北京:科学出版社,2000.
- 2 Gouranga Kar, Verma H N, Ravender Singh. Effects of winter crop and supplemental irrigation on crop yield, water use efficiency and profitability in rain fed rice based cropping system of eastern India[J]. Agricultural Water Management, 2006, 79(3): 280 ~ 292.
- 3 Kashyap P S, Panda R K. Effect of irrigation scheduling on potato crop parameters under water stressed conditions[J]. Agricultural Water Management, 2003, 59(1): 49 ~ 66.
- 4 Zhang Buchong, Huang Gaobao, Li Fengmin. Effect of limited single irrigation on yield of winter wheat and spring maize relay intercropping[J]. Pedosphere, 2007, 17(4): 529 ~ 537.
- 5 Li Jiamin, Inanaga Shinobu, Li Zhaohe, et al. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2005, 76(1): 8 ~ 23.
- 6 Kang Shaozhong, Zhang Lu, Liang Yinli, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2002, 55(3): 203 ~ 216.

- 7 吕桂军,袁巧丽,康银红. 不同灌水处理对盐渍土壤中玉米生长发育的影响[J]. 节水灌溉,2010(3):1~5.  
Lü Guijun, Yuan Qiaoli, Kang Yinhong. Influence of different irrigation treatments on growth of maize in saline soil[J]. Water Saving Irrigation, 2010(3):1~5. (in Chinese)
- 8 王建东,龚时宏,于颖多,等. 地面灌水频率对土壤水与温度及春玉米生长的影响[J]. 水利学报,2008,39(4):500~505.  
Wang Jiandong, Gong Shihong, Yu Yingduo, et al. Effect of surface irrigation frequency on soil water and temperature as well as growth of spring maize[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,39(4):500~505. (in Chinese)
- 9 张忠学,于贵瑞. 不同灌水处理对冬小麦生长及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报,2003,22(2):1~4.  
Zhang Zhongxue, Yu Guirui. Effects of irrigation scheduling on development and water use efficiency in winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(2):1~4. (in Chinese)
- 10 肖俊夫,刘战东,段爱旺,等. 不同灌水处理对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究[J]. 灌溉排水学报,2006,25(2):20~23.  
Xiao Junfu, Liu Zhandong, Duan Aiwang, et al. Studies on effects of irrigation systems on the grain yield constituents and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(2):20~23. (in Chinese)
- 11 孙丽萍,王树忠,赵景文,等. 灌溉频率对日光温室黄瓜水分利用规律的影响[J]. 上海交通大学学报:农业科学版,2008,26(5):487~500.  
Sun Liping, Wang Shuzhong, Zhao Jingwen, et al. Effects of different irrigation rate on water utilization rule in solar greenhouse[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2008,26(5):487~500. (in Chinese)
- 12 Rousseaux M C, Benedetti J P, Searles P S. Leaf-level responses of olive trees (*Olea europaea*) to the suspension of irrigation during the winter in an arid region of Argentina[J]. Scientia Horticulturae, 2008, 115(2):135~141.
- 13 李瑞平,史海滨,王长生,等. 秋灌定额对越冬期土壤水盐运移分布的影响[J]. 灌溉排水学报,2010,29(6):43~46.  
Li Ruiping, Shi Haibin, Wang Changsheng, et al. Effect of autumn irrigation on soil water and salt transfer for freezing and thawing period[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(6):43~46. (in Chinese)
- 14 高阳,段爱旺. 冬小麦间作春玉米土壤温度变化特征试验研究[J]. 中国农村水利水电,2006(1):1~4.  
Gao Yang, Duan Aiwang. An experimental study on the temporal and spatial variations of soil temperature of wheat inter-planted with maize[J]. China Rural Water and Hydropower,2006(1):1~4. (in Chinese)
- 15 王新路,冯丽宵,赵光辉,等. 冀西北高原土壤冻融特征研究[J]. 土壤通报,2011,42(3):528~533.  
Wang Xinlu, Feng Lixiao, Zhao Guanghui, et al. Characteristics of soil freezing and thawing in the north-western plateau of Hebei[J]. Chinese Journal of Soil Science,2011, 42(3):528~533. (in Chinese)
- 16 Wang Liping, Takeo Akae. Analysis of ground freezing process by unfrozen water content obtained from TDR data in Hetao irrigation district of China[J]. Journal of the Japanese Society of Soil Physics, 2004, 98:11~18.
- 17 张立新,徐学祖,韩文玉. 景电灌区次生盐渍化土壤冻融特征[J]. 土壤学报,2002,39(4):512~516.  
Zhang Lixin, Xu Xuezu, Han Wenyu. The freezing-thawing characteristics of salinized soil in Jingdian irrigated area of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4):512~516. (in Chinese)
- 18 王璐璐,陈晓飞,马巍,等. 不同土壤冻融特征曲线的试验研究[J]. 冰川冻土,2007,29(6):1004~1011.  
Wang Lulu, Chen Xiaofei, Ma Wei, et al. Experimental study of the freezing and thawing characteristic curves of different soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(6):1004~1011. (in Chinese)
- 19 杨金凤,郑秀清,孙明. 地表覆盖对季节性冻融土壤温度影响研究[J]. 太原理工大学学报,2006,37(3):358~360.  
Yang Jinfeng, Zheng Xiuqing, Sun Ming. The effect of different surface mulchings on soil temperature during seasonal freezing-thawing period[J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2006, 37(3):358~360. (in Chinese)
- 20 郑秀清,陈军锋,邢述彦,等. 季节性冻融期耕作层土壤温度及土壤冻融特性的试验研究[J]. 灌溉排水学报,2009,28(3):65~68.  
Zheng Xiuqing, Chen Junfeng, Xing Shuyan, et al. Soil temperature variation in plough layer and soil freeze-thaw characteristics during seasonal freezing and thawing period[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2009, 28(3):65~68. (in Chinese)
- 21 徐学祖,邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京:科学出版社,1991.
- 22 李韧,赵林,丁永建,等. 青藏高原季节冻土的气候学特征[J]. 冰川冻土,2009,31(6):1051~1056.  
Li Ren, Zhao Lin, Ding Yongjian, et al. The climatic characteristics of the maximum seasonal frozen depth in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(6):1051~1056. (in Chinese)