

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.022

# 地下水浅埋条件下单向冻结土壤水热变化试验\*

陈军锋<sup>1</sup> 杨军耀<sup>1</sup> 郑秀清<sup>1</sup> 秦作栋<sup>2</sup> 刘萍<sup>1</sup> 臧红飞<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024; 2. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006)

**摘要:** 采用室内土壤单向冻结试验装置,进行了地下水位埋深为 87.5 cm 的小幅降温、中幅降温和大幅降温 3 种冻结气温作用下砂壤土和粉质粘壤土的温度和土壤含水率的监测。结果表明:小幅降温、中幅降温和大幅降温冻结条件下砂壤土地表温度较粉质粘壤土分别低 0.88、2.06 和 2.81℃,土壤剖面温度分别在第 31、33 和 37 天达到稳定降温阶段;砂壤土水分主要聚集在 10~30 cm,而粉质粘壤土水分主要聚集在 10~40 cm;小幅降温冻结下,砂壤土 0~10 cm 土壤含水率较中幅降温和大幅降温冻结下高 1.5% 和 7.3%,粉质粘壤土 0~10 cm 土壤含水率较中幅降温和大幅降温冻结下高 2.3% 和 2.7%。

**关键词:** 土壤温度 土壤含水率 冻结气温 土壤质地 地下水 水分迁移

**中图分类号:** S152.7; S152.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)12-0146-06

## 引言

由于冻融土壤水热迁移过程的复杂性及边界条件的多变性,国内外学者采用数值模拟方法对冻土水热迁移转化规律进行了大量的研究<sup>[1-7]</sup>,尚松浩等<sup>[8]</sup>建立了地下水浅埋条件下土壤冻融期水热耦合迁移模型,并对冻融过程中的土壤饱和-非饱和水分流动问题进行了初步研究。近年来,中国一些研究者通过田间试验研究了冻融期不同地表处理条件、不同冻融阶段土壤剖面水热的变化特征<sup>[9-12]</sup>。在地下水浅埋区,土壤的冻结与融化作用加剧了潜水与土壤水的转化,而土壤的冻融状况及冻融过程主要取决于土壤温度<sup>[13]</sup>,因此,研究地下水浅埋条件下土壤温度的变化及土壤剖面水分迁移特征对于揭示冻融期潜水与土壤水的转化规律具有重要意义。

季节性冻融期土壤温度的变化决定了冻土的物理、力学、水力性质以及土壤冻结和融化特征,影响冬春季节作物的播种、生长发育、土壤养分分布<sup>[14-15]</sup>。气温和降水<sup>[16-18]</sup>、冬春灌水<sup>[19]</sup>、地表覆盖<sup>[20-22]</sup>、地下水位埋深<sup>[23]</sup>等均影响土壤温度,关于季节性冻融期土壤温度方面的研究取得了一些重要的研究成果,郑秀清等<sup>[22]</sup>研究表明冻融期气温与土壤温度的变化具有较好的相关性,苗春燕等<sup>[23]</sup>研究

了季节性冻融期不同地下水位埋深下土壤剖面温度的变化特征,但均未考虑气温变化幅度对土壤温度的影响。李瑞平等<sup>[24]</sup>研究了冻融期气温与土壤剖面的水分迁移特征,但未考虑气温降幅对土壤水分迁移的影响。已有研究表明,土壤质地影响土壤水肥运动<sup>[25-26]</sup>,土壤颗粒大小影响土壤的水热参数<sup>[27]</sup>,而土壤质地对冻结土壤温度和水分迁移的影响还有待研究。

为了揭示气温降幅和土壤质地对地下水浅埋区土壤温度的变化和水分迁移的影响,采用室内土壤单向冻结试验,研究了地下水位埋深为 87.5 cm 3 种不同气温降幅下砂壤土和粉质粘壤土土壤温度的变化与水分迁移特征。

## 1 试验方法

### 1.1 试验装置

室内土壤单向冻结试验装置主要由模拟池、空气制冷系统、定水头供水系统和土壤温度场自动监测系统组成,试验装置结构示意图如图 1 所示。

模拟池池内规格(长×宽×高)为 123 cm×44 cm×97.5 cm,是由厚度为 1 cm 的 PVC 塑料板制成的双层保温池。空气制冷设备由 Haier BC/BD-388A 型冰柜(冷冻能力为 31 kg/d)改造为数控制冷装置,模拟冬季气温的降低过程,温控精度为 0.01℃,

收稿日期:2014-08-11 修回日期:2014-09-13

\* 国家自然科学基金资助项目(40472132)、国家国际科技合作专项资助项目(2012DFA20770)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20131402110008)、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,讲师,博士,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

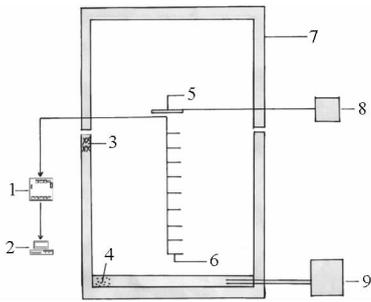


图 1 室内地下水浅埋条件下土壤冻结试验装置示意图

Fig. 1 Device of soil freezing with shallow groundwater

1. 数据采集模块 2. 计算机 3. 聚氨酯 4. 石英砂 5. 温控仪  
温度传感器 6. 温度传感器 7. 制冷装置 8. 数显温控仪 9. 模拟  
供水系统

表 1 试验土样物理性质

Tab. 1 Physical property of soil sample

土壤 质地	不同粒径质量分数/%			天然容重 $/(g \cdot cm^{-3})$	干容重 $/(g \cdot cm^{-3})$	天然含 水率/%
	粘粒 ( $<0.002 mm$ )	粉粒 ( $0.002 \sim 0.02 mm$ )	砂粒 ( $>0.02 mm$ )			
砂壤土	11.3	27.6	61.1	1.54	1.45	6.42
粉质粘壤土	19.0	49.4	31.6	1.44	1.32	9.58

### 1.3 试验方案

根据原状土的天然容重和天然含水率,将砂壤土和粉质粘壤土分别均匀充填于模拟池中,并在垂向上埋设智能温度传感器,分别独立供水直至剖面水分稳定。按如下 3 种气温降幅方案进行了土壤单向冻结试验,起始冷冻气温均为  $-5^{\circ}C$  :

(1) 小幅降温冻结方案:在制冷设备气温为  $-5^{\circ}C$  的冻结作用下,当土壤剖面温度稳定时(冻结第 7 天),将气温降低  $3^{\circ}C$ ,经过 6 次变温降至  $-23^{\circ}C$ ,土壤剖面温度稳定时停止冻结。

表 2 冻结试验方案

Tab. 2 Scheme of freezing test

降温 次数	小幅降温		中幅降温		大幅降温	
	冻结历 时/d	冷冻 气温/ $^{\circ}C$	冻结 历时/d	冷冻 气温/ $^{\circ}C$	冻结 历时/d	冷冻 气温/ $^{\circ}C$
第 1 次	7	-8	7	-10	7	-12
第 2 次	13	-11	15	-15	17	-19
第 3 次	17	-14	23	-20	28	-26
第 4 次	23	-17	29	-25	35	-33
第 5 次	31	-20	37	-30		
第 6 次	37	-23				
结束	42	-23	45	-30	41	-33

注:冷冻气温由冰柜于空载条件下调试。

(2) 中幅降温冻结方案:当土壤剖面温度稳定时(冻结第 7 天),将气温降低  $5^{\circ}C$ ,经过 5 次变温降至  $-30^{\circ}C$ ,土壤剖面温度稳定时停止冻结。

(3) 大幅降温冻结方案:当土壤剖面温度稳定时(冻结第 7 天),将气温降低  $7^{\circ}C$ ,经过 4 次变温降

最低制冷温度为  $-36^{\circ}C$ 。定水头供水系统由模拟池之外的容量瓶控制,模拟池底部铺设厚度约  $2 cm$  的石英砂,考虑土壤冻结后冻胀不超出模拟池顶,设定的地下水位埋深为  $87.5 cm$ 。土壤温度场自动监测系统由计算机、智能温度传感器及 LTM-8303 型温度测量智能模块组成,土壤温度采用智能温度传感器实时监测,数据由计算机自动采集,采集频率为  $1 次/min$ 。

### 1.2 试验土样

试验土样取自太原市晋源区汾河西岸,2 种土壤质地分别为砂壤土和粉质粘壤土,是太原盆地代表性土壤,其物理性质如表 1 所示。

至  $-33^{\circ}C$ ,当土壤剖面温度稳定时停止冻结。3 种气温降幅冻结试验方案如表 2 所示。

土壤水分采用人工取土、称重烘干法测定,取样点深度分别为  $0、5、15、25、35、45、55、65、75$  和  $85 cm$ 。土壤温度监测点设置情况如表 3 所示。

表 3 土壤温度监测点深度设置情况

Tab. 3 Monitoring points of soil temperature

冷冻试验方案	监测点深度/cm
小幅降温	0, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 32, 37, 42, 47, 57, 67, 77, 87
中幅降温	0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 32, 37, 42, 47, 57, 67, 77, 87
大幅降温	0, 2, 7, 12, 17, 22, 27, 32, 37, 47, 57, 67, 77, 87

## 2 结果分析

### 2.1 土壤温度变化特征

#### 2.1.1 气温降幅对地表土壤温度的影响

由于土壤冻结过程中不断释放潜热,所以冷冻气温呈波动式下降,较冰柜空载调试的气温低(图 2)。小幅降温冻结时,土壤冻结过程缓慢,潜热释放对冷冻气温的影响较小,试验结束时冷冻气温达到调试的  $-23.0^{\circ}C$ ;中幅降温和大幅降温条件下,试验结束时气温分别较调试的低  $5.0^{\circ}C$  和  $5.3^{\circ}C$ 。可见,气温降幅越大,潜热释放对气温的影响越显著。

由于土壤导热系数远小于空气导热系数,所以地表土壤温度变幅小于空气的温度变幅(图 2)。冻

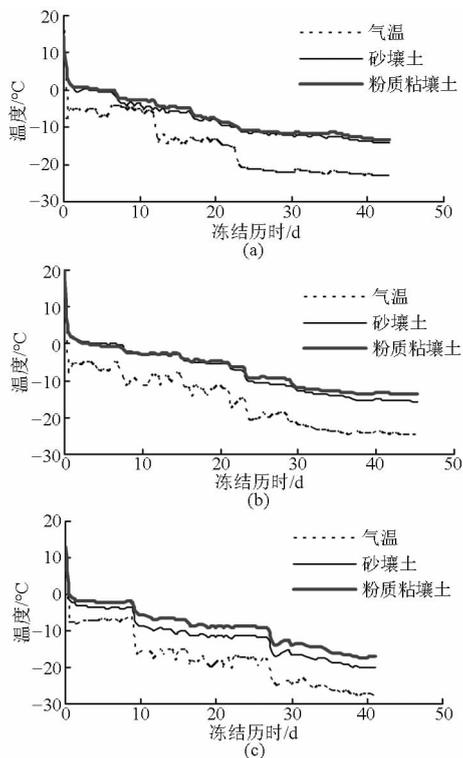
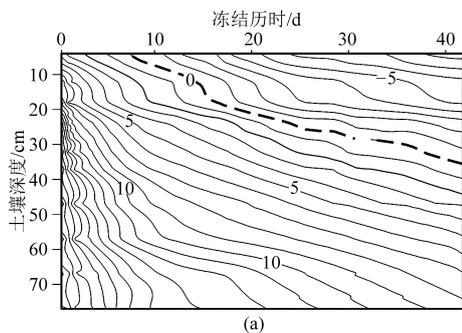


图2 3种冻结方案下冷冻气温与地表土壤温度变化曲线

Fig.2 Variations of freezing temperature and surface soil temperature under three freezing schemes

(a) 小幅降温冻结 (b) 中幅降温冻结 (c) 大幅降温冻结

结前,在土壤毛细作用下,剖面土壤水分稳定后粉质粘壤土和砂壤土地表土壤含水率分别为15.6%和17.5%,由于砂壤土的干容重和土壤含水率均较大,根据徐学祖等<sup>[27]</sup>试验研究可知,砂壤土的导热系数大于粉质粘壤土。在冻结气温作用下,砂壤土冻结速率较快,其地表温度低于粉质粘壤土。随着气温降幅的增加,粉质粘壤土与砂壤土的地表温差随着冻结历时在不断增大。小幅降温冻结下,试验结束时砂壤土地表温度较粉质粘壤土低0.88℃,中幅降温和大幅降温冻结下砂壤土地表温度较粉质粘壤土分别低2.06℃和2.81℃。可见,气温降幅越大,粉质粘壤土与砂壤土的地表温差越大。



## 2.1.2 土壤质地对土壤剖面温度的影响

土壤颗粒大小、干容重、含水率均影响土壤的导热系数,砂壤土和粉质粘壤土干容重基本相近,但土粒大小和含水率不同。在地下水埋深为87.5 cm条件下,砂壤土和粉质粘壤土剖面初始含水率相差较小,所以土壤质地成为决定土壤剖面导热系数的主要因素,砂壤土颗粒直径相对较大,其总孔隙度较粉质粘壤土小,所以砂壤土导热系数较粉质粘壤土的大。因此,无论在何种气温降幅冻结方案下,砂壤土剖面温度降速较快,由图3可见,砂壤土和粉质粘壤土的0℃等温线在冻结第42天分别达到33 cm和28 cm。土壤剖面温度等温线在垂向上的疏密程度反映了垂向土壤温度梯度的大小,随着土壤温度的不断降低,10~20 cm土壤温度在垂向上变化较小,表明该层水分相变为冰,是坚硬密实的冻层分布位置。由图3b可以看出,40~50 cm土壤温度等值线在冷冻10 d后几乎与横轴平行,说明在小幅降温冻结下,粉质粘壤土0~40 cm土壤的温度变化较为剧烈。

图4为不同冻结方案下12 cm和37 cm深度处的土壤温度变化曲线。由图4可见,砂壤土温度低于粉质粘壤土,在小幅降温冻结条件下,试验结束时粉质粘壤土12 cm和37 cm土层处的土壤温度较砂壤土温度分别高1.69℃和1.94℃;在中幅降温冻结条件下,粉质粘壤土较砂壤土温度分别高0.38℃和0.94℃;在大幅降温冻结条件下,粉质粘壤土较砂壤土温度分别高0.69℃和0.72℃。可见,无论何种冻结方案,由于土壤剖面热传导特性的差异,粉质粘壤土与砂壤土的温差随着土壤深度的增加而增大。

## 2.1.3 土壤剖面温度变化阶段的划分

根据土壤剖面温度变化特征,土壤冻结过程中土壤剖面温度变化可划分为3个阶段,即快速降温阶段(剖面土壤温度日降幅大于3℃),慢速降温阶段(剖面土壤温度日降幅为0.5~3℃)和稳定降温阶段(剖面土壤温度日降幅小于0.5℃)。不同深度

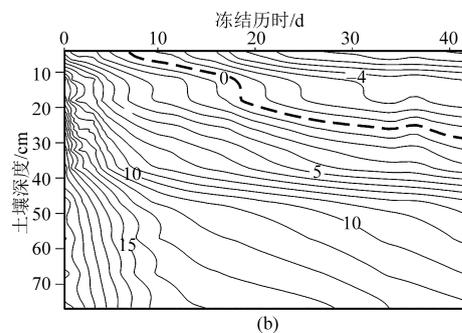


图3 砂壤土和粉质粘壤土剖面温度等值线(小幅降温冻结方案,单位:℃)

Fig.3 Soil temperature contour of sandy loam and silty clay loam (scheme of less DRFT, unit: °C)

(a) 砂壤土 (b) 粉质粘壤土

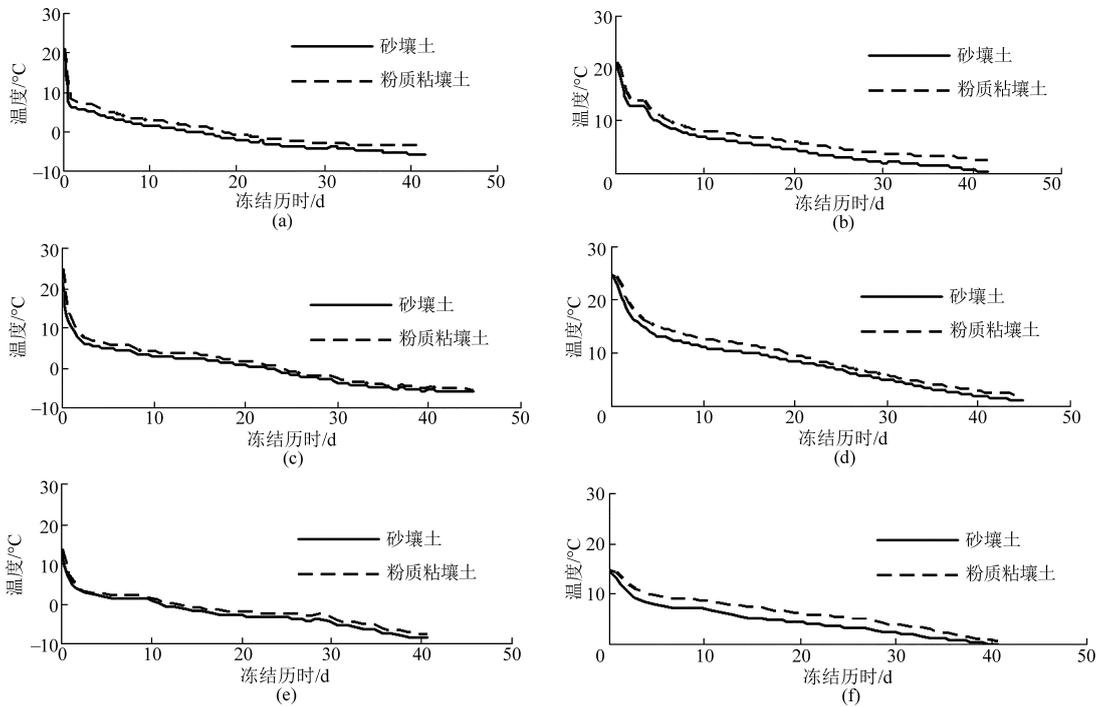


图 4 3 种冻结方案下土壤温度对比曲线

Fig. 4 Contrast of soil temperature under three freezing schemes

(a) 12 cm, 小幅降温 (b) 37 cm, 小幅降温 (c) 12 cm, 中幅降温 (d) 37 cm, 中幅降温 (e) 12 cm, 大幅降温 (f) 37 cm, 大幅降温

土壤温度变化趋势基本一致,在快速降温阶段,曲线斜率近乎垂直,土壤温度在冷冻气温作用下快速下降。在地下水浅埋条件下,随着土壤深度的增加,土壤含水率增加,使得土壤热容量的增大,从而使土壤温度变幅减小。12 cm 处土壤温度在冻结第 3 天时降速趋缓,进入慢速降温阶段。37 cm 处土壤水分未发生相变,在温度梯度作用下,土壤温度不断降低,呈现稳定降温特征,土壤降温持续时间较 12 cm 处长。在大幅降温冻结条件下,剖面土壤温度在第 37 天达到稳定降温阶段;而小幅降温冻结条件下,剖面土壤温度在第 31 天呈现稳定降温特征,3 种冻结方案下土壤剖面温度变化阶段划分如表 4 所示。

表 4 3 种冻结方案下剖面土壤温度变化阶段划分结果

Tab. 4 Varying stage of soil temperature under three freezing schemes

冻结方案	快速降温阶段	慢速降温阶段	稳定降温阶段
小幅降温		第 3 ~ 30 天	第 31 天后
中幅降温	第 1 ~ 2 天	第 3 ~ 32 天	第 33 天后
大幅降温		第 3 ~ 36 天	第 37 天后

## 2.2 土壤水分迁移特征

### 2.2.1 气温降幅对水分迁移的影响

3 种冻结方案的土壤剖面含水率冻结始末变化对比如图 5 所示。由图可知,地下水浅埋条件下土壤冻结作用使剖面水分发生明显的迁移。土壤温度制约着土壤剖面水分的迁移,在冷冻气温作用下,土

壤温度逐渐降低,当温度降低到土壤冻结温度时,部分液态水相变成冰,土水势降低,由此产生的土水势梯度使土壤剖面水分由高土水势向低土水势迁移。当冻结开始后,第 5 ~ 6 天砂壤土表层温度为  $-0.62 \sim -0.5^\circ\text{C}$ ,表层 1 cm 土壤冻结,而粉质粘壤土表层温度为  $-0.25 \sim 0^\circ\text{C}$ ,土壤尚未冻结。在实施降温第 7 天后,如果气温降幅较大 ( $\Delta = 7^\circ\text{C}$ ), 0 ~ 10 cm 土层土壤快速冻结,土壤水分呈原位冻结特征,孔隙较快地被冻结的水分充填,水分可以运动的有效孔隙度降低,所以水分向地表冷端迁移水量较少。由图 5 可见,在大幅降温冻结下,0 ~ 10 cm 土壤含水率反而最小;而小幅降温冻结下,0 ~ 10 cm 土壤含水率最大,砂壤土 0 ~ 10 cm 土壤含水率较中幅降温 and 大幅降温冻结下高 1.5% 和 7.3%,粉质粘壤土 0 ~ 10 cm 土壤含水率较中幅降温 and 大幅降温冻结下高 2.3% 和 2.7%。

在小幅降温慢速冻结条件下,土壤由地表向下缓慢冻结,水分原位冻结较慢,水分源源不断地向冻结处迁移,所以向地表冷端迁移水量较多,土壤剖面水分主要在 10 ~ 20 cm 聚集。在大幅降温冻结下,土壤剖面含水率变化较大,砂壤土水分聚集在 20 ~ 30 cm,粉质粘壤土水分主要聚集在 20 ~ 40 cm,聚墒区的含水率较小幅降温冻结高 5.3% ~ 8.7%;尽管表层土壤冻结较快,但在较大的土壤温度梯度作用下,剖面水分迁移较快,潜水流入土壤剖面的水量较大,因此土壤剖面含水率总体较高。

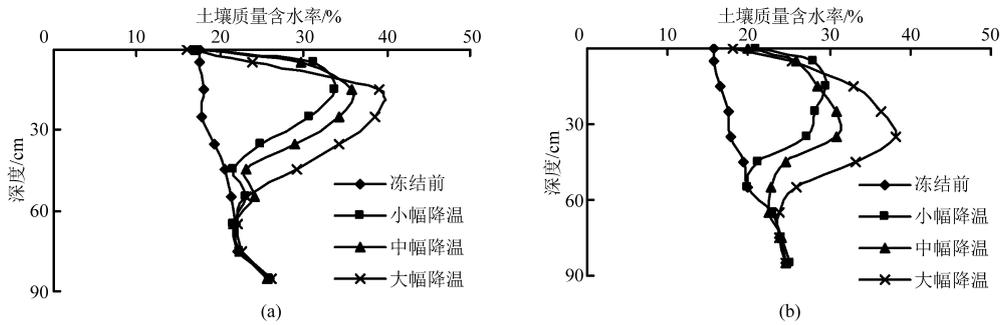


图5 地下水浅埋条件下土壤单向冻结始末含水率变化

Fig.5 Contrast of soil moisture content at beginning and end of unidirectional freezing test with shallow groundwater

(a) 砂壤土 (b) 粉质粘壤土

### 2.2.2 土壤质地对水分迁移的影响

在冻结过程中,如果土壤剖面颗粒较粗,则相对较大的孔隙便于水分迁移,水分会在较短的时间内在冻结锋面处聚集,反之,冻结锋面不断向下发展,水分在较深的位置聚集。由图5可知,冻结作用下水分在砂壤土中聚集的深度较粉质粘壤土浅,砂壤土水分主要聚集在10~30 cm,而粉质粘壤土水分主要聚集在10~40 cm。

由于砂壤土孔隙直径相对较大,水力传导系数较大,有利于水分迁移,冻结锋面处含水率较粉质粘壤土大。在小幅降温冻结下,砂壤土和粉质粘壤土剖面含水率峰值分别为33.7%和29.5%;大幅降温冻结下,砂壤土和粉质粘壤土剖面含水率最大值分别为39.0%和38.2%。

## 3 结论

(1) 气温降幅越大,粉质粘壤土与砂壤土的地表温差越大,小幅降温、中幅降温和大幅降温冻结条件下砂壤土地表温度较粉质粘壤土分别低0.88、2.06和2.81℃。

(2) 砂壤土剖面温度降速较快,土壤温度较粉

质粘壤土温度低。随着土壤深度的增加,土壤剖面温度变幅减小。12 cm处土壤温度在冻结第3天降速趋缓,进入慢速降温阶段;37 cm处土壤温度呈现稳定降温特征,降温持续时间较12 cm处长。小幅降温、中幅降温和大幅降温冻结条件下,剖面土壤温度分别第31、33和37天时达到稳定降温阶段。

(3) 小幅降温冻结下,剖面水分向上部土层迁移量较大,大幅降温冻结下,0~10 cm土壤快速冻结,土壤水分呈原位冻结特征,水分运动的有效孔隙度降低。小幅降温冻结下砂壤土和粉质粘壤土0~10 cm土壤含水率较其他冻结方案分别高1.5%~7.3%和2.3%~2.7%。

(4) 冻结作用下水分在砂壤土中聚集的深度较粉质粘壤土浅,砂壤土水分主要聚集在10~30 cm,而粉质粘壤土水分主要聚集在10~40 cm。小幅降温冻结下,土壤剖面水分聚集在10~20 cm。大幅降温冻结下,土壤剖面含水率变化较大,砂壤土水分聚集在20~30 cm,粉质粘壤土水分主要聚集在20~40 cm,土壤剖面含水率总体上较高,聚墒区土壤含水率较小幅降温冻结高5.3%~8.7%。

## 参 考 文 献

- Shoop S A, Bigl S R. Moisture migration during freeze and thaw of unsaturated soils: modeling and large scale experiments[J]. Cold Regions Science and Technology, 1997, 25(1): 33-45.
- Flerchinger G N, Sauerb T J, Aiken R A. Effects of crop residue cover and architecture on heat and water transfer at the soil surface[J]. Geoderma, 2003, 116(1): 217-233.
- Wu S H, Jansson P E, Zhang X Y. Modeling temperature, moisture and surface heat balance in bare soil under seasonal frost conditions in China[J]. European Journal of Soil Science, 2011, 62(6): 780-796.
- 郑秀清,樊贵盛. 冻融土壤水热迁移数值模型的建立及仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(3): 308-311. Zheng Xiuqing, Fan Guisheng. Numerical emulation on simultaneous soil moisture and heat transfer under freezing and thawing conditions[J]. Journal of System Simulation, 2001, 13(3): 308-311. (in Chinese)
- 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. Li Ruiping, Shi Haibin, Takeo Akae, et al. Study on water-heat-salt transfer in soil freezing-thawing based on simultaneous heat and water model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(4): 403-412. (in Chinese)
- Li R P, Shi H B, Flerchinger G N, et al. Simulation of freezing and thawing soils in Inner Mongolia Hetao irrigation district, China[J].

- Geoderma, 2012, 173 – 174:28 – 33.
- 7 刘杨,赵林,李韧. 基于 SHAW 模型的青藏高原唐古拉地区活动层土壤水热特征模拟[J]. 冰川冻土,2013,35(2):280 – 290.  
Liu Yang, Zhao Lin, Li Ren. Simulation of the soil water-thermal features within the active layer in Tanggula Region, Tibetan Plateau, by using SHAW model[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013,35(2):280 – 290. (in Chinese)
- 8 尚松浩,雷志栋,杨诗秀,等. 冻融期地下水位变化情况下土壤水分运动的初步研究[J]. 农业工程学报,1999,15(2):64 – 68.  
Shang Songhao, Lei Zhidong, Yang Shixiu, et al. Study on soil water movement with changeable groundwater level during soil freezing and thawing[J]. Transactions of the CSAE, 1999,15(2):64 – 68. (in Chinese)
- 9 杨金凤,郑秀清,邢述彦. 地表覆盖条件下冻融土壤水热动态变化规律研究[J]. 太原理工大学学报,2008,39(3):303 – 306.  
Yang Jinfeng, Zheng Xiuqing, Xing Shuyan. Experimental study of soil moisture regimes during seasonal freezing-thawing period under different surface mulchings[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2008,39(3):303 – 306. (in Chinese)
- 10 陈军锋,郑秀清,秦作栋,等. 冻融期秸秆覆盖量对土壤剖面水热时空变化的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(20):102 – 110.  
Chen Junfeng, Zheng Xiuqing, Qin Zuodong, et al. Effects of maize straw mulch on temporal and spatial variation of soil profile moisture and temperature during freeze-thaw period[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(20):102 – 110. (in Chinese)
- 11 苑俊廷,陈军锋,郑秀清,等. 季节性冻融期土壤剖面含水率变化特征研究[J]. 河南农业科学,2008(5):56 – 58.  
Yuan Juntao, Chen Junfeng, Zheng Xiuqing, et al. Experimental study of soil moisture characteristics during seasonal freezing-thawing period[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2008(5):56 – 58. (in Chinese)
- 12 王子龙,付强,姜秋香,等. 季节性冻土区不同时期土壤剖面水分空间变异特征研究[J]. 地理科学,2010,30(5):772 – 776.  
Wang Zilong, Fu Qiang, Jiang Qiuxiang, et al. Spatial variability of soil moisture profile in seasonal frozen soil region in different stages[J]. Scientia Geographica Sinica, 2010,30(5):772 – 776. (in Chinese)
- 13 王学佳,杨梅学,万国宁,等. 藏北高原 D105 点土壤冻融状况与温湿特征分析[J]. 冰川冻土,2012,34(1):56 – 63.  
Wang Xuejia, Yang Meixue, Wan Guoning, et al. Processes of soil thawing-freezing and features of ground temperature and moisture at D105 on the northern Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012,34(1):56 – 63. (in Chinese)
- 14 Domisch T, Finér L, Lehto T. Effect of soil temperature on nutrient allocation and mycorrhizas in Scots pine seedlings[J]. Plant and Soil, 2002, 239(2): 173 – 185.
- 15 Boucher J F, Bernier P Y, Munson A D. Radiation and soil temperature interactions on the growth and physiology of eastern white pine (*Pinus strobus* L.) seedlings[J]. Plant and Soil, 2001, 236: 165 – 174.
- 16 Zhang Yu, Chen Wenjun, Smith S L, et al. Soil temperature in Canada during the twentieth century: complex responses to atmospheric climate change[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(D3):DOI:10.1029/2004JD004910.
- 17 冯学民,蔡德利. 土壤温度与气温及纬度和海拔关系的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(3): 489 – 491.  
Feng Xuemin, Cai Deli. Soil temperature in relation to air temperature, altitude and latitude[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(3): 489 – 491. (in Chinese)
- 18 张慧智,史学正,于东升,等. 中国土壤温度的季节性变化及其区域分异研究[J]. 土壤学报,2009,46(2):227 – 234.  
Zhang Huizhi, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, et al. Seasonal and regional variation of soil temperature in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(2):227 – 234. (in Chinese)
- 19 陈军锋,郑秀清,臧红飞,等. 季节性冻融期灌水对土壤温度与冻融特性的影响[J]. 农业机械学报,2013,44(3):104 – 109.  
Chen Junfeng, Zheng Xiuqing, Zang Hongfei, et al. Effects of irrigation on soil temperature and soil freeze-thaw characteristics during the seasonal freeze-thaw period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(3):104 – 109. (in Chinese)
- 20 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)
- 21 张伟,汪春,梁远,等. 残茬覆盖对寒地旱作区土壤温度的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(5):70 – 73.  
Zhang Wei, Wang Chun, Liang Yuan, et al. Effect of crop residue cover on soil temperature in cold and dry farming areas[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 70 – 73. (in Chinese)
- 22 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)
- 23 苗春燕,郑秀清,陈军锋. 季节性冻融期不同地下水埋深下土壤温度变化特征[J]. 中国农学通报,2008,24(1):496 – 502.  
Miao Chunyan, Zheng Xiuqing, Chen Junfeng. Soil temperature characteristics under different groundwater level during seasonal freezing-thawing period[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008,24(1):496 – 502. (in Chinese)
- 24 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 Akai, et al. Characteristics of air temperature and water-salt transfer during freezing and thawing period[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(4):70 – 74. (in Chinese)

indispensable parameters of heat transfer medium in refrigerated road transport carriage, according with start points of energy conservation synergistic equation and turbulent kinetic energy equation. Considering temperature distribution homogeneity as evaluation objective, the simulation distribution condition of three fields in longitudinal cross sections was qualitatively analyzed and experimentally verified. The heat transfer and pressure drop performance were fulfilled using numerical simulation analysis and comparison method for inlet orifice with three different shapes as circle holes, elliptic or regular hexagon. The test data of inside temperature in refrigerated transport carriage in fully loaded process showed that the highest temperature in cross sections with width direction dropped from 2.53°C to 1.27°C, and the standard deviation amplitude of temperature values dropped from 0.642°C to 0.332°C, respectively. The results also demonstrated that the flow resistance of elliptic air inlet orifice was smaller than other two shapes, and the consumption power of refrigeration motor-pump was fewer. The temperature distribution was more stable and homogeneity, and velocity field, temperature gradient field and pressure gradient field had favorable harmonious degree.

**Key words:** Refrigerated road transport carriage Temperature field Velocity field Pressure field  
Numerical simulation

(上接第 151 页)

- 25 解文艳,樊贵盛. 土壤质地对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报,2004,35(5):537-540.  
Xie Wenyan, Fan Guisheng. Influence of soil structure on infiltration characteristics in field soils[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2004,35(5):537-540. (in Chinese)
- 26 李久生,杨风艳,栗岩峰. 层状土壤质地对地下滴灌水氮分布的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(7):25-31.  
Li Jiusheng, Yang Fengyan, Li Yanfeng. Water and nitrogen distribution under subsurface drip fertigation as affected by layered-textural soils[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(7):25-31. (in Chinese)
- 27 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.

## Variation of Soil Temperature and Moisture under Unidirectional Freezing with Shallow Groundwater

Chen Junfeng<sup>1</sup> Yang Junyao<sup>1</sup> Zheng Xiuqing<sup>1</sup> Qin Zuodong<sup>2</sup> Liu Ping<sup>1</sup> Zang Hongfei<sup>1</sup>

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

2. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** In order to reveal the influence of decreasing range of freezing air temperature (DRFT) and soil texture on soil temperature variation and soil moisture migration with shallow groundwater, three freezing schemes, less DRFT, medium DRFT and larger DRFT, were conducted with the groundwater level depth of 87.5 cm, and the temperature and moisture content of sandy loam and silty clay loam were monitored. The results showed that the surface temperature of sandy loam was lower than that of silty clay loam freezing by less DRFT, medium DRFT and larger DRFT about 0.88°C, 2.06°C and 2.81°C, and soil profile temperature reached steady decreasing stage in 31 d, 33 d and 37 d respectively. Soil moisture of sandy loam mainly gathered at the depth of 10 cm to 30 cm and that of silty clay loam gathered at the depth of 10 cm to 40 cm. Soil moisture of sandy loam at the depth of 0 cm to 10 cm freezing by less DRFT was higher than that freezing by medium DRFT and larger DRFT about 1.5% and 7.3%, while it was 2.3% and 2.7% respectively for silty clay loam.

**Key words:** Soil temperature Soil moisture content Freezing air temperature Soil texture  
Groundwater Moisture migration