

季节性冻融期覆砂对太谷农田 土壤含水率时空变化的影响

冯慧君¹,赵浩然¹,郑秀清¹,陈军锋¹,苗春燕^{1,2},薛静¹

(1.太原理工大学水利科学与工程学院,山西太原 030024;2.山西省第一水文地质工程地质队,山西太原 030024)

摘要:研究了冻融期砂层覆盖对剖面土壤含水率的影响。野外试验于2016年11月—2017年3月在山西省大谷均衡实验站进行,主要监测3种地表处理剖面0~100 cm土壤含水率,各处理分别为无覆盖(LD)、0.5~1.5 mm粒径(XS)和1.5~2.0 mm粒径砂层覆盖(CS)。结果表明:冻融期砂层覆盖及土壤水分冻融使得XS和CS处理土壤剖面出现两个水分高值区,即近地表(15.40%~21.79%)和剖面20~40 cm间(15.99%~19.94%);砂层覆盖对近地表有储水效果,储水效果随土壤深度增加而逐渐减小。覆砂处理对地表处储水效果最佳,平均土壤含水量较LD处理高8.45%~10.94%。覆砂对剖面0~40 cm有明显的储水效果,平均土壤含水率较LD处理高1.56%~1.62%。40 cm以下3种处理土壤含水率相差较小,平均土壤含水率差值为0.09%~0.40%;砂层覆盖储水效果还与砂层粒径有关,XS处理0~5 cm储水效果优于CS处理,其土壤含水率高于CS处理0.57%~2.39%;地表砂层覆盖可以平抑地表土壤含水率变化,覆砂处理地表土壤含水率变幅较LD处理低约4.42%。

关键词:季节性冻融期;砂层覆盖;农田土壤含水率;动态变化

中图分类号:S157 **文献标志码:**A

Effect of sand mulching on spatiotemporal variation of soil water content during the seasonal freezing-thawing period

FENG Hui-jun¹, ZHAO Hao-ran¹, ZHENG Xiu-qing¹, CHEN Jun-feng¹, MIAO Chun-yan^{1,2}, XUE Jing¹
(1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;
2. First Hydrogeology and Engineering Geological Team of Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: The effect of sand mulching on soil water content was studied during the seasonal freezing-thawing period. A field experiment, involving bare plot (LD), sand mulches of particle size of 0.5~1.5 mm (XS) and 1.5~2.0 mm (CS), was set up in Taigu Water Balance Experimental Field to monitor soil water content in the soil layer of 0~100 cm. The results showed that, two higher-soil-moisture areas were formed with sand mulching treatments, which located at the near-surface of 20~40 cm. Soil water content on surface varied from 15.40% to 21.79% and ranged from 15.99% to 19.94% in the layer of 20~40 cm. Sand mulches had a significant effect on storing water, and the effect decreased with increasing soil depth. Sand mulching treatments resulted in more stored water in surface soil with value-added ranging from 8.45% to 10.94% of soil water content. Sand mulching treatments resulted less water storage in the layer of 0~40 cm with value-added varying from 1.56% to 1.62%. The differences of soil water content between the three treatments in the layer of 40~100 cm were slight, ranging from 0.09% to 0.40%. In addition, the effect of sand mulching on water storage was related to the particles size of sand. The water storage of XS treatment in the 0~5 cm layer was better than that of CS treatment. Soil water content of XS treatment in the layer of 0~5 cm was 0.57%~2.39% higher than that of CS treatment. Sand mulching resulted in a reduction of variations on surface soil water content, which reduced variations about 4.42%.

收稿日期:2018-10-18

修回日期:2019-08-11

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41572239);国家自然科学基金青年基金项目(41502243)

作者简介:冯慧君(1995-),女,山西吕梁人,硕士研究生,研究方向为冻融期土壤水热迁移规律。E-mail:fenghuijun1995@126.com

通信作者:郑秀清(1958-),女,山西交口人,教授,博士生导师,主要从事孔隙介质流体力学、水资源与水环境等研究。E-mail:zhengxiuqing@tyut.edu.cn

Keywords: seasonal freezing-thawing period; sand mulching; soil water content in farmland; dynamic change

我国季节性冻土区主要分布在北纬 30° 以北的干旱、半干旱气候区,面积约为国土总面积的 53.5%。这些地区水资源短缺,降水少而蒸发大,地表蒸发损失高达降水量的 50% 以上,干旱缺水制约着当地农业生产的发展^[1-3]。近年来,为了减少地表无效蒸发损失、提高作物水分利用效率,农业生产中常采用地表覆盖的方法,常见的覆盖方式有:秸秆覆盖、地膜覆盖和砂砾石覆盖^[4-7]。秸秆和地膜覆盖均可以调节土壤温度进而影响土壤的冻融过程,有效抑制土壤蒸发,提高作物的水分利用效率,起到聚墒效果,从而增加作物产量^[8-13]。在我国宁夏、甘肃地区,当地农民采用土壤压砂的方式种植作物以减少土壤水分无效蒸发^[14-15]。

山西省位于北纬 34°36'~40°44' 之间,属于干旱半干旱气候区,为了缓解旱情通常以冬春灌溉或地表覆盖方式来满足越冬作物对水分的需求。研究冻融期地表覆盖对土壤水分的影响对合理制定灌溉制度有重要意义。目前,国内不少学者对冻融期秸秆覆盖下的土壤墒情进行了研究。例如,姚宝林等^[16]对整个冻融期玉米秸秆覆盖下的土壤储水量进行定量分析,发现玉米秸秆覆盖下的土壤储水量与裸地相比增加了 14.97%。Xing 等^[17]发现秸秆覆盖使得地表水分波动幅度减小,具有保水增墒效应。此外,在一定覆盖厚度下,储水保墒效果随秸秆覆盖厚度的增加而增加。研究表明覆盖厚度 5 cm 时耕作层的储水保墒效果最好^[18],覆盖厚度 15 cm 对整个土壤剖面的增墒效果最好,且增墒能力随着土壤深度的增加而降低^[19]。

纵观现有研究成果,冻融期不同秸秆覆盖厚度下的土壤水分特征研究成果较多,而覆砂条件下的研究成果较少。为了探讨冻融期薄层砂覆盖对剖面土壤水分的影响,本文在前人的研究基础上对季节性冻融期不同覆砂条件下的土壤水分进行了野外试验,分析其土壤水分变化规律,以期为北方干旱半干旱季节性冻土区的农业发展提供有效的参考数据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验于 2016 年 11 月至 2017 年 3 月在太谷均衡实验站进行。实验站位于山西省晋中盆地汾河冲洪积平原区(112°30'~112°33'E,37°26'~37°27'

N),属大陆性半干旱季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季雨热同期,降水多集中在 6—9 月。试验期间太阳总辐射量为 99.75 KJ·cm⁻²,12 月份太阳辐射量最低(17.02 KJ·cm⁻²),3 月份太阳辐射量最高(35.55 KJ·cm⁻²)。试验期间 1 月份月平均气温最低,为 -1.9℃。日内气温最低值 -17℃,出现在 1 月 19 日。试验期间日平均气温和太阳辐射见图 1a。

试验期间总降水量 32.1 mm。12 月份降水量最多,为 11.8 mm。最大日降水量发生在 12 月 20 日,为 5.8 mm,其余日降水量均低于 5 mm。试验期间土壤最大冻结深度为 35 cm,冻融历时约 128 d。根据裸露土壤自然冻融过程,将整个冻融期划分为:不稳定冻结阶段(11 月 7 日—12 月 26 日)、稳定冻结阶段(12 月 27 日—2 月 1 日)和融化阶段(2 月 2 日—3 月 15 日),冻深曲线见图 1b。试验区耕作层厚度约 20 cm,土壤干容重 1.41 g·m⁻³。试验区土壤物理特性见表 1。

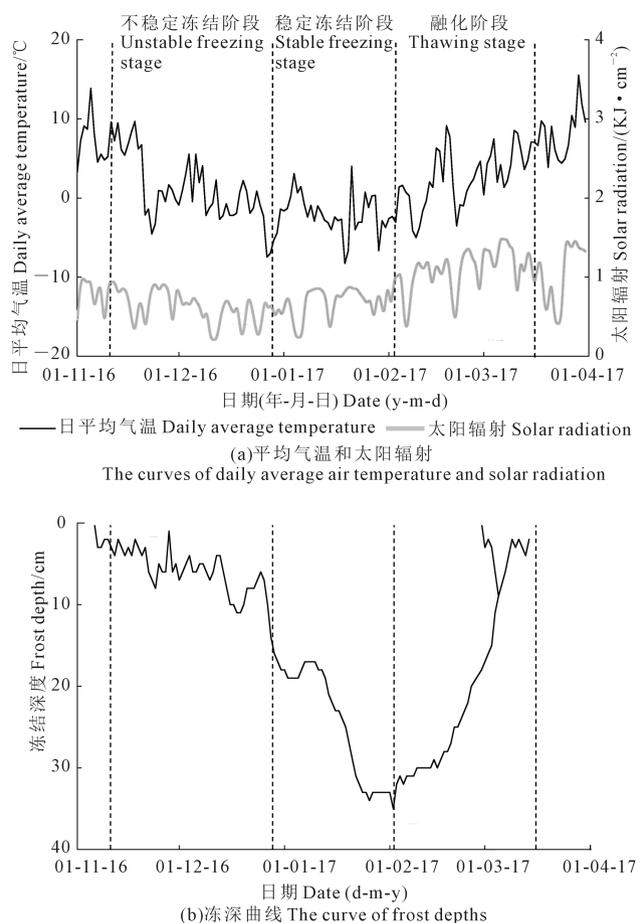


图 1 试验期间日平均气温、太阳辐射和冻深曲线
Fig.1 The curves of average air temperature, solar radiation and frost depths in the test period

表 1 试验区土壤物理特性

Table 1 Soil properties of the study site

土壤深度 Soil depth /cm	土壤粒径/mm Particle distribution			土壤类型 Soil texture classification
	<0.002	0.002~0.02	0.02~2	
0~30	0.82	7.93	91.22	壤质砂土 Loamy sand
30~60	1.27	12.11	86.61	壤质砂土 Loamy sand
60~80	0.88	8.57	90.55	壤质砂土 Loamy sand
80~100	0.41	4.02	95.57	壤质砂土 Loamy sand

1.2 试验方案

试验在秋耕休闲地块进行。试验设置了无覆盖(LD)、粒径 0.5~1.5 mm 砂层覆盖(XS)和粒径 1.5~2.0 mm 砂层覆盖(CS)3 种处理,覆盖厚度均为 1 cm。试验期间土壤含水率采用人工土钻取土烘箱烘干法测量,监测时间为上午 9:00,监测间隔 5~7d。稳定冻结阶段监测频次较低,不稳定冻结阶段和融化阶段监测频次较高。监测深度:0、5、10、15、20、25、30、35、40、50、60、70、80、90 cm 和 100 cm。本次试验初始土壤含水率监测时间为 11 月 22 日。试验期间,所有气象数据采自实验站安装的自动气象站监测数据。

2 结果与分析

2.1 不同冻融阶段土壤剖面含水率的变化

本文主要研究剖面 0~100 cm 土壤含水率变化规律,重点研究水分相变区(0~40 cm)及土壤耕作层(0~20 cm)。3 种处理土壤剖面初始含水率相同。初始时刻地表土壤含水率较低,约 5.40%;20~50 cm 范围内出现土壤水分高值区(19.66%~23.74%);50~100 cm 土壤含水率随土壤深度增加呈小幅度下降趋势。试验期间 3 种处理不同冻融阶段的剖面土壤含水率变化见图 2,不同深度处的平均土壤含水率见表 2。

不稳定冻结阶段,LD 处理地表含水率较低(7.73%)。砂层覆盖切断土壤水分上升路径,上升水分聚集在地表附近。XS 和 CS 处理地表含水率由初始时刻 5.40%增加至 17.37%和 16.39%,约为 LD 处理的 2.1~2.2 倍。由图 2a 可知,3 种处理 0~20 cm 土壤含水率随土壤深度增加呈先升高后降低趋势,20 cm 附近出现极小值。这是因为该阶段地表附近出现冻层,表层土壤附近的未冻水含量减小导致土壤基质势降低,冻层下部未冻水在土壤基质势梯度作用下向冻层附近迁移,导致 10~20 cm 土壤含水率由下向上呈增加趋势。而 0~10 cm 土壤含

水率受土壤蒸发影响由下至上呈减小趋势。由表 2 可知,XS 和 CS 处理 0~20 cm 平均土壤含水率为 18.47%和 18.54%,较 LD 处理高 2.67%和 2.74%;20~40 cm 平均土壤含水率与 LD 处理的差值明显小于 0~20 cm 处;40~100 cm 平均土壤含水率与 LD 处理的差值较小。经单因素方差分析可得除 20~40 cm 外,XS 和 CS 处理 0~100 cm 土壤含水率与 LD 处理的存在显著性差异。综上所述,不稳定冻结阶段砂层覆盖对剖面 0~20 cm 有明显的储水效果,距离地表越近储水效果越好,地表处效果最佳。砂层的储水效果还与砂的粒径有关,粒径越小对水的吸附能力越强。因此,近地表处(约 0~5 cm)XS 处理储水效果略好于 CS 处理,其土壤含水率高于 CS 处理 0.57%。

稳定冻结阶段,XS 和 CS 处理地表含水率分别为 21.79%和 20.12%,为 LD 处理的 1.7~1.8 倍;0~20 cm 平均土壤含水率分别为 19.62%和 19.89%,高于 LD 处理 3.36%和 3.63%。由图 2b 可以看出覆砂处理 5~10 cm 范围内出现土壤水分高值区,土壤含水率最大值可达 24%;受冻层向下推进和土壤未冻水向冻层附近迁移的影响,XS 和 CS 处理 20~40 cm 范围内出现土壤水分次高值区,平均土壤含水率分别为 17.46%和 17.69%,受水分迁移及土壤蒸发影响该值低于不稳定冻结阶段;40 cm 以下 3 种处理的土壤含水率相差不大。经单因素方差分析可得除 40~60 cm 外,该阶段 XS 和 CS 处理 0~100 cm 土壤含水率仍与 LD 处理的存在显著性差异。综上所述,稳定冻结阶段砂层覆盖对剖面 0~20 cm 有明显储水效果,其规律与不稳定冻结阶段一致。该阶段近地表处(约 0~5 cm)XS 处理储水效果略好于 CS 处理,其土壤含水率高于 CS 处理 1.36%。

融化阶段,地表冻层融化使得近地表土壤液态含水率增加,加快土壤水分蒸发。经过前两个阶段的蒸发,3 种处理 0~100 cm 土壤含水率较不稳定冻结阶段明显减小。LD 处理地表存在干土层,平均含水率较上一阶段减小至 5.80%。XS 和 CS 处理地表平均土壤含水率分别为 16.74%和 15.40%,约为 LD 处理的 2.7~2.9 倍,较上一阶段减少 5.05%和 4.72%;XS 和 CS 处理 0~20 cm 平均土壤含水率约为 LD 处理的 1.1~1.2 倍,较上一阶段减少 1.40%和 2.99%;其 20~40 cm 平均土壤含水率与 LD 处理(15.99%)的差值较稳定冻结阶段减小,说明冻层融化后 XS 和 CS 处理 20~40 cm 土壤水分向上部或下

部迁移量较大;40 cm 以下 3 种处理平均土壤含水率约 14%~16%,与上一阶段相比减小了 1%~2%。该阶段 LD 处理土壤聚墒区范围出现在 30 cm 附近,土壤含水率最高值也出现在 30 cm 附近(约 17%)。由图 2c 可以看出 LD 处理 5 cm 附近土壤水分较高,这可能与该阶段降水入渗有关。经单因素

方差分析可得 3 种处理 60~100 cm 平均土壤含水率间不存在显著差异。该结果与前两个阶段不同,说明经过一个冻融期土壤水分迁移并蒸发,砂层覆盖对 60~100 cm 土壤含水率影响逐渐减小。该阶段近地表处(约 0~5 cm)XS 处理储水效果略好于 CS 处理,其土壤含水率高于 CS 处理 2.39%。

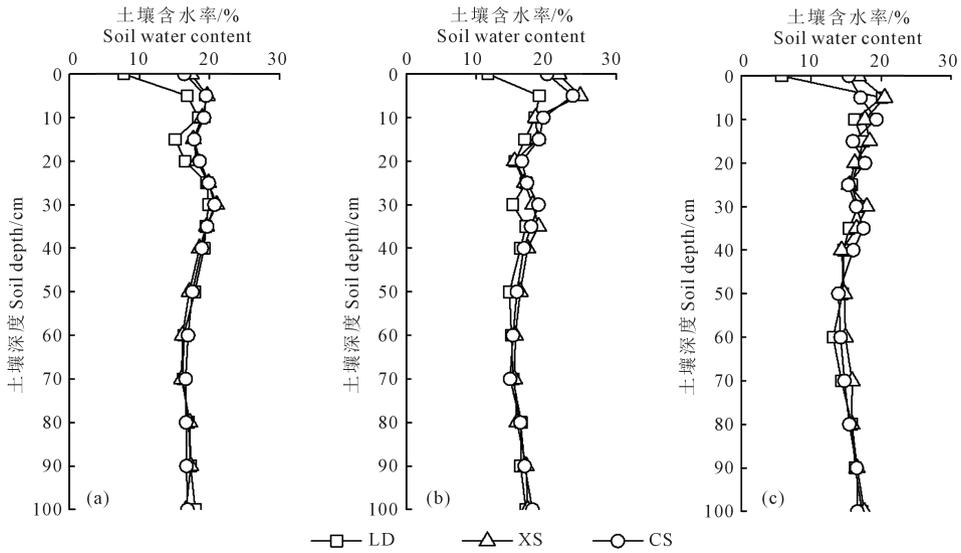


图 2 不稳定冻结阶段(a)、稳定冻结阶段(b)和融化阶段(c)土壤剖面含水率分布

Fig.2 Soil water content of three treatment in (a) unstable freezing stage, (b) stable freezing stage, and (c) thawing stage

表 2 不同冻融阶段各处理各土层土壤平均含水率

Table 2 Average soil water content of three treatments at different depths

土壤深度 Soil depth /cm	不稳定冻结阶段 Unstable freezing stage			稳定冻结阶段 Stable freezing stage			融化阶段 Thawing stage		
	LD	XS	CS	LD	XS	CS	LD	XS	CS
0~20	15.80b	18.47 a	18.54a	16.26c	19.62b	19.89a	15.29c	18.22a	16.90b
20~40	19.79a	19.25b	19.94a	16.59c	17.46b	17.69a	15.99b	16.43a	16.11b
40~60	17.79b	17.26c	18.30a	16.00b	16.41a	15.95b	14.11c	14.68a	14.30b
60~100	16.94 a	16.65b	16.97b	16.39a	16.56b	16.72b	15.94a	16.16a	16.16a

注:表中相同阶段同行数值后不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: The different letters after the value of same stage in the same line mean significant difference between treatments ($P<0.05$).

2.2 冻融期不同深度处土壤水动态变化

冻融期间土壤含水率受融雪水入渗、未冻水迁移及蒸发等多种因素影响。试验期间 3 种处理地表土壤含水率见图 3。3 种处理不同深度土壤水分变化特征用变异系数 C_v 和极差 Ka 表示,见表 3。

由图 3 可知,冻融期覆砂处理地表土壤含水率与 LD 处理的变化趋势基本一致。3 种处理地表含水率受降水影响较大,通常在降水后出现峰值。较为明显的峰值有 17-01-19 和 17-02-26 两处,由气象数据可知这两个日期前均发生降水事件,降水量分别为 2.9 mm 和 6.6 mm。整个冻融期 LD 处理地

表含水率处于较低水平,发生降水后地表含水率骤增,随土壤蒸发又降低至较低水平。LD 处理地表受外界气象变化影响较大,降水降落到地表或水分从地表蒸发直接引起土壤含水率变化,整个冻融期地表土壤含水率 C_v 值最大(0.66),变化幅度为 24.52%。XS 和 CS 处理地表土壤含水率与 LD 处理相比均处于较高水平。砂层覆盖削弱外界气象变化对地表的影响,融雪水入渗或降雨入渗须通过砂层,地表土壤水分须以水汽方式通过砂层蒸发到大气中,土壤含水率变化幅度小于 LD 处理,分别为 20.10%和 20.09%。冻融期 XS 和 CS 处理地表土壤

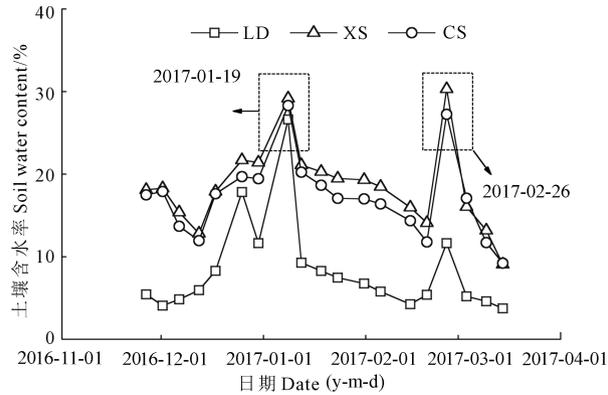


图 3 冻融期地表土壤含水率变化图

Fig.3 Surface water content during the freezing-thawing period

表 3 冻融期土壤含水率统计分析结果

Table 3 Statistical analysis results of soil water content during the freezing-thawing stages

土壤深度 Soil depth/cm	LD		XS		CS	
	C_v	$Ka/\%$	C_v	$Ka/\%$	C_v	$Ka/\%$
0	0.66	24.52	0.27	20.10	0.27	20.09
0~20	0.14	10.65	0.10	9.60	0.12	9.95
20~40	0.13	7.97	0.12	7.25	0.12	6.80
40~60	0.12	8.14	0.08	6.81	0.07	7.32
60~100	0.06	3.29	0.04	3.26	0.04	2.41

注: C_v 表示变异系数; Ka 表示极差。

Note: C_v means variable coefficient of sample and Ka means sample range.

含水率 C_v 值小于 LD 处理 (0.27), 说明地表砂层覆盖可以平抑地表土壤含水率变化幅度。

冻融期地表以下土壤含水率受外界气象变化影响逐渐减弱。LD 处理 0~20 cm 平均土壤含水率变化幅度和 C_v 值与地表处相比明显减小, 分别为 10.65% 和 0.14。砂层覆盖对 0~20 cm 土壤含水率变化幅度有平抑作用, XS 和 CS 处理土壤含水率变幅分别为 9.60% 和 9.95%, C_v 值为 0.10 和 0.12, 与地表处相比明显减小。随着土壤深度增加, 土壤含水率变化幅度逐渐减小, LD 处理 20~40 cm 土壤含水率变化幅度和 C_v 值分别为 7.97% 和 0.13, 均大于覆砂处理。CS 处理 C_v 值最小, 这是因为冻融期砂层粒径不同对土壤蒸发的影响不同, 通过实测土壤蒸发量可得 XS 处理土壤蒸发速率大于 CS 处理, 土壤含水率受蒸发影响较大。稳定冻结阶段末冻层深度达到最大并保持不变约 10d 左右, 冻层下部 40~60 cm 未冻水在基质势梯度作用下向上迁移, 冻层融化时冻层内部土壤水分在土水势作用下向下迁移, 因此冻融期 3 种处理 40~60 cm 土壤含水率 Ka

值大于 20~40 cm 处的, 仍表现为 LD 处理最大。冻融期 3 种处理 60~100 cm 土壤含水率变化规律同 40~60 cm 处一致。通过对比冻融期 3 种处理不同深度处土壤含水率动态变化, 发现随着土壤深度增加土壤含水率变化幅度呈减小趋势。

3 讨论

试验期间地表覆盖层阻碍地气界面间的水热交换, 下层水分迁移上升储存在地表附近, 使得近地表出现水分高值区。覆砂处理土壤剖面的储水效果与土壤深度有关, 越接近地表其储水效果越好。此结果与冻融期秸秆覆盖和地膜覆盖对近地表有储水效果一致, 可见砂层覆盖对土壤的储水效果与秸秆或地膜覆盖一致^[16-17]。通过分析可得地表处储水效果最佳; 覆砂处理 0~40 cm 储水效果优于 LD 处理; 40 cm 以下 3 种处理土壤含水率相差不大。冻融期土壤水分相变破坏了土水系统原有的动态平衡, 未冻水在土水势梯度作用下由未冻区向冻结区迁移, 冻结区土壤水分不断增加, 形成水分高值区。因此, 冻融期地表覆盖处理其土壤剖面会出现两个水分高值区: 近地表和冻结区, 该结果与邢述彦等^[17]的研究成果一致。本次试验条件为薄层砂覆盖, 同时使用微型蒸发器监测覆砂条件下的土壤蒸发量。试验过程中未监测土壤剖面未冻水迁移转化情况, 无法定量描述冻结期土壤不同深度处未冻水含量变化。除此之外, 薄层砂覆盖对土壤耕作层水分影响较为明显, 耕作层以下 3 种处理含水率相差不大。在今后的研究过程中可以考虑不同砂层覆盖厚度对剖面土壤未冻水和总含水率的影响。

4 结论

1) 冻融期砂层覆盖影响土壤剖面水分分布。砂层覆盖切断了下层水分的上升路径, 上升水分聚集在地表附近, 近地表出现水分高值区。不稳定冻结阶段覆砂处理地表含水率约 16.39%~17.37%, 稳定冻结阶段约 20.12%~21.79%, 融化阶段约 15.40%~16.74%。

2) 冻融期 3 种处理土壤未冻水在基质势梯度作用下向冻层附近迁移并冻结成冰, 在冻层范围内 (20~40 cm) 形成水分高值区。不稳定冻结阶段 3 种处理 20~40 cm 平均土壤含水率约 19.25%~19.94%, 稳定冻结阶段约 16.59%~17.69%, 融化阶

段约 15.99%~16.43%。

3) 砂层覆盖对近地表的储水效果与土壤深度有关。地表储水效果最佳,平均土壤含水量较 LD 处理高 8.45%~10.94%,随着土壤深度增加储水效果逐渐减弱。覆砂对剖面 0~40 cm 有明显的储水效果,平均土壤含水率较 LD 处理高 0.86%~2.37%,40 cm 以下 3 种处理土壤含水率相差较小,平均土壤含水率差值为 0.09%~0.40%。砂层覆盖对近地表的储水效果还与砂层粒径有关,砂粒径越小对近地表储水效果越好。XS 处理 0~5 cm 储水效果最佳,其土壤含水率高于 CS 处理 0.57%~2.39%。

4) 3 种处理地表土壤含水率受降雨入渗和蒸发等因素影响较大,整个冻融期其变化幅度最大。地表砂层覆盖可以平抑地表土壤含水率变化,覆砂处理地表土壤含水率变幅较 LD 处理低约 4.42%。

参考文献:

- [1] Li R, Shi H, 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.
- [2] 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社, 2010:1-378.
- [3] 杨建英,赵廷宁. 坡面侵蚀研究现状及展望[J]. 北京林业大学学报,1994,16(1):95-101.
- [4] Mahdavi S M, Neyshabouri M R, Fujimaki H. Coupled heat and moisture transfer and evaporation in mulched soils[J]. *CATENA*, 2017, 151:34-48.
- [5] Singh C B, Singh S, Arora V K, et al. Residue mulch effects on potato productivity and irrigation and nitrogen economy in a subtropical environment [J]. *Potato Research*, 2015, 58 (3): 245-260.
- [6] Yin W, Feng F, Zhao C, et al. Integrated double mulching practices optimizes soil temperature and improves soil water utilization in arid environments[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(9):1423-1437.
- [7] 由国栋,虎胆·吐马尔白,邵丽盼·卡尔江,等. 膜下滴灌棉田冻融期土壤水分盐分变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4):124-128.
- [8] 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.
- [9] 陈素英,张喜英,裴冬,等. 玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10):171-173.
- [10] 邢述彦,刘虎,郑秀清,等. 秸秆覆盖厚度对冻融期土壤温度的影响[J]. 太原理工大学学报, 2012, 43(6):741-744.
- [11] 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.
- [12] 白巴特尔,郑和祥,任杰,等. 寒旱灌区冻融期冬小麦不同覆盖条件土壤温度变化[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 134-137.
- [13] 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.
- [14] 马波,田军仓,沈晖,等. 压砂地西瓜光合作用干物质及产量水氮耦合模型及验证[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 129-136.
- [15] 赵文举,李晓萍,范严伟,等. 西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17):144-151.
- [16] Yao B, Li G, Wang F. 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.
- [17] Xing S, Zheng X, Chen J. Experimental study on effect of corn residue management on soil water content during freezing-thawing period [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(2):90-94.
- [18] 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.
- [19] 付强,李铁男,李天霄,等. 秸秆覆盖对季节性冻融期土壤水分特征的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6):141-146.