

采煤沉陷区冻结滞水消融过程中土壤水分变化规律^①

包斯琴¹, 高永^{1*}, 丁延龙¹, 罗凤敏², 吕新丰³, 单玉兵⁴, 王剑然⁴

(1 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010019; 2 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古磴口 015200;

3 内蒙古自治区水土保持工作站, 呼和浩特 010020; 4 内蒙古自治区水利水电勘测设计院, 呼和浩特 010020)

摘要: 冻结滞水的倒置富水性和双向融化特性, 使其消融过程中土壤水分迁移向发生变化。采用烘干法, 对采煤沉陷区不同立地类型冻结滞水消融过程中的土壤含水率进行了测定。结果表明: 随着融化时间的延长, 采煤沉陷区阴坡土壤含水率峰值沿着垂直方向逐渐向下推移。冻结滞水融化第 2 天和第 5 天, 土壤含水率峰值出现在 0~10 cm 土层; 融化第 8 天土壤含水率最大值出现在 20~30 cm 土层; 融化第 11、14 和 17 天土壤含水率最大值均出现在 50~60 cm 土层; 采煤沉陷区沟坡地冻结滞水融化第 2 天和第 5 天土壤含水率峰值均出现在 20~30 cm 土层; 融化第 8、11、14 和 17 天土壤含水率最大值均出现在 30~40 cm 土层; 采煤区和非采煤区的冻结滞水含水率峰值在冻土层之下。

关键词: 冻结滞水; 土壤含水率; 消融过程; 采煤沉陷区

中图分类号: S152.3 **文献标识码:** A

冻结滞水的形成是由于冬季的冻结作用在包气带冻土层内产生冻结势, 强烈吸附包气带水、支持毛管水、潜水以及空气中的水分, 以液态和汽态形式向冻层迁移富集, 然后冻结成冰晶, 最后形成季节性滞留于冻土层内的固态地下水^[1], 冻结滞水是土壤中除毛管水、重力水、薄膜水和上层滞水之外, 另外一种可以供给植物利用的水分存在状态^[2]。在冻土层厚度为 1 m 左右的区域, 冻结滞水主要分布在 20~80 cm 土层内, 冻结滞水融化后, 除地面蒸发、排泄以及向下渗流以外, 大部分都以毛管水以及薄膜水的形态滞留在原位置。冻结滞水的含水率有明显的分布特征, 在冻结势作用下包气带水和空气中水分以液态和汽态向冻结滞水层迁移富集, 主要富集在 0~20 cm 的深度, 形成倒置富水性^[3]。冻结滞水在解冻期间由上向下融化, 其融水以蒸发为主消耗, 部分向下运动^[4]。

中国干旱、半干旱区普遍气候干旱, 生态恢复难度很大^[5], 而季节性冻土在中国分布十分广泛, 约占中国陆地总面积的 46%, 从最北端的大小兴安岭地区到长江流域均有分布^[6-7], 因此, 对西北地区的生态建设来说, 季节性冻土形成的冻结滞水应是一部分宝贵的水分资源。掌握冻结滞水的理论和动态规律, 根据土壤水分状

况合理安排造林时间, 对提高造林成活率及生长量, 恢复干旱、半干旱地区植被及生态环境具有深远意义。

神东矿区位于鄂尔多斯高原东南部和陕北黄土高原北缘接壤处, 为季节性冻土分布区, 冻结滞水现象普遍存在。大规模的采煤活动引起地表沉陷, 破坏了季节冻结滞水原有的倒置富水性结构, 造成季节冻结滞水水分运移状态的改变, 从而对地表降雨的入渗与蒸发、地下水的补给、地表植被水分和养分的吸收等都产生重要影响^[8-9]。而目前关于采煤沉陷区的研究多集中于土壤水分动态变化^[10-13]、土壤理化性质空间分异^[14-15]、采煤沉陷区水资源开发利用^[16-17]及生态恢复^[18-20]等方面, 由于地理位置和社会经济意识等社会因素, 目前有关采煤沉陷区冻结滞水消融水分变化过程尚未见报道。因此, 在该区研究冻结滞水消融过程中土壤水分变化特征, 能够完善季节冻结滞水理论, 对矿区的植被恢复以及生态环境综合治理提供一定的理论依据和技术支撑。

1 研究区概况

研究区位于神东公司采煤沉陷区, 为鄂尔多斯高

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金重大项目(2014ZD03)资助。

* 通讯作者(13948815709@163.com)

作者简介: 包斯琴(1972—), 女(蒙古族), 内蒙古通辽人, 博士研究生, 主要从事采煤沉陷区土壤修复、荒漠化防治研究。E-mail: baosiqin163@163.com

原东南部和陕北黄土高原北缘接壤处，地理坐标为 39°13' ~ 39°15' N, 110°08' ~ 110°10' E。该区属典型干旱半干旱大陆性季风气候，年均气温 7.3℃，年均蒸发量 2 220.65 mm，年均降水量 362 mm，主要集中在 6—9 月份，占全年降雨量的 65% ~ 70%；年均风速 2.5 ~ 3.0 m/s，最大风速 19 ~ 20 m/s；地貌形态主要包括丘陵和沟谷，地形破碎，沟壑密度 2 ~ 3 km/km²；土壤以风沙土为主，区内季节性冻土平均厚度为 1.2 m；沙生植物占主要优势，包括：沙柳 (*Salix psammophila* C.Wang et)、油蒿 (*Artemisia ordosica* Krasch.)、虫实 (*Corispermum. Patelliforme* Iljin.)、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng.)、沙米 (*Agriophyllum pungens* (L.) Moq.) 和百里香 (*Thymus mongolicus* (Ronnig.) Ronnig.) 等^[8]。

2 研究方法

2.1 试验设计

试验样地于 2006 年发生沉陷，由于煤层规模开采，形成大面积采空区。笔者及其研究团队在前期对沉陷位置、沉陷程度、沉陷类型等全面调查的基础上，以发生沉陷的重点部位且存在明显冻结作用的阴坡和坡沟底作为研究区，坡面坡度 22° ~ 25°。考虑到坡位与沉陷区内地表的开裂情况，所有样点避开裂缝处，选择下垫面状况相近的未扰动区作为对照。每研究区平行设置 3 个样点。

2.2 土样采集及测定

研究区 11 月初土壤开始冻结，次年 3 月下旬土体持续解冻。分别于 2012 年、2013 年 3 月至 4 月中旬每隔 3 d 采集 1 次土样，挖掘土壤剖面：长 80 cm、宽 50 cm、深 100 cm，每 10 cm 一层，每层 3 次重复。将土样装入密封袋带回，烘干，计算土壤含水率。根据研究区实际情况，本文对土壤冻融过程持续时间长，且降水少的 2013 年数据进行分析。

3 结果与分析

3.1 采煤沉陷区阴坡冻结滞水融化过程

图 1 为研究时段内研究区域的气象变化情况，数据来源于神木县气象局地面气候资料。由图 1 可知，研究区在 2012 年 11 月初最低气温降至零下，此时最高气温仍在零度以上，土壤开始冻结。2012 年 12 月 15 日开始至 2013 年 1 月 9 日，研究区最高气温均不超过零度，土壤进入稳定冻结状态。随后最高气温回升至零度以上，偶有波动，最低气温多在零度以下，土壤开始融化。从 2013 年 3 月 2 日到 3 月 9 日，最

低气温持续在零度以上，土壤进入稳定融化状态。研究区在 2012 年 10 月 15 日至 2013 年 3 月 15 日，累积降水量 21.2 mm，单日降水量最大不超过 4.7 mm。

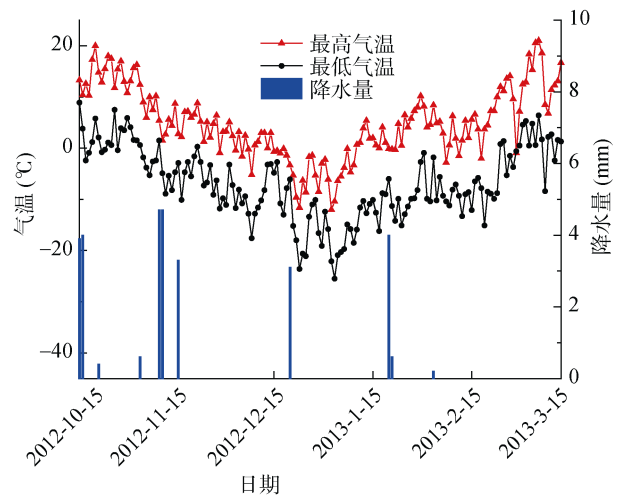


图 1 研究区土壤冻结前后最高气温和降水量
Fig.1 Maximum temperatures and precipitation in studied area before and after soil freezing

综合分析采煤沉陷区阴坡冻结滞水融化后土壤含水率的垂直分布特征(图 2)可知，在解冻开始时期(2013 年 3 月 2 日)，融化第 2 天(图 2A)和第 5 天(图 2B)的土壤含水率随土层深度的变化趋势均表现为先降低后增加，二者含水率在 0 ~ 10 cm 土层达到峰值，分别为 16.21% 和 14.91%；在 30 ~ 40 cm 土层达到最小值，其值分别为 13.05% 和 11.96%；其中融化第 2 天的 40 ~ 100 cm 土层土壤含水率随土层增加幅度较小(13.05% ~ 13.88%)，而在融化第 5 天的 40 ~ 100 cm 土层土壤含水率增加趋势较为明显(11.96% ~ 14.81%)。在融化第 8、11、14 和 17 天含水率随土层深度的变化趋势整体呈现出先增加后降低的趋势，从融化第 8 天到第 17 天，土壤含水率最小值均出现在 0 ~ 10 cm 土层，并且随着融化时间的延长，含水率最大值沿着垂直方向逐渐向下推移，融化第 8 天(图 2C)含水率最大值出现在 20 ~ 30 cm 土层，值为 17.91%；融化第 11 天(图 2D)和 14 天(图 2E)含水率最大值则均出现在 50 ~ 60 cm 土层，至融化第 17 天(图 2F)，土壤含水率最大值出现在 60 ~ 70 cm 土层。从达到峰值时土壤含水率变化来看，0 ~ 100 cm 土层土壤含水率峰值随着融化时间的推移呈逐渐降低趋势。

3.2 采煤沉陷区坡沟地冻结滞水融化过程

综合分析采煤沉陷区沟坡地冻结滞水融化后土壤含水率的垂直分布特征(图 3)可知，土壤含水率随着时间的推移整体呈现先增加后降低的趋势，融化第 2 天和第 5 天土壤含水率峰值均出现在 20 ~ 30 cm 土层，融化

第 8、11、14 和 17 天土壤含水率最大值均出现在 30~40 cm 土层, 分别为 13.64%、18.61%、16.31%和 15.20%,

融化第 8 天温度降低, 因此土壤含水率峰值较低, 之后随着融化时间的推移土壤含水率峰值逐渐降低。

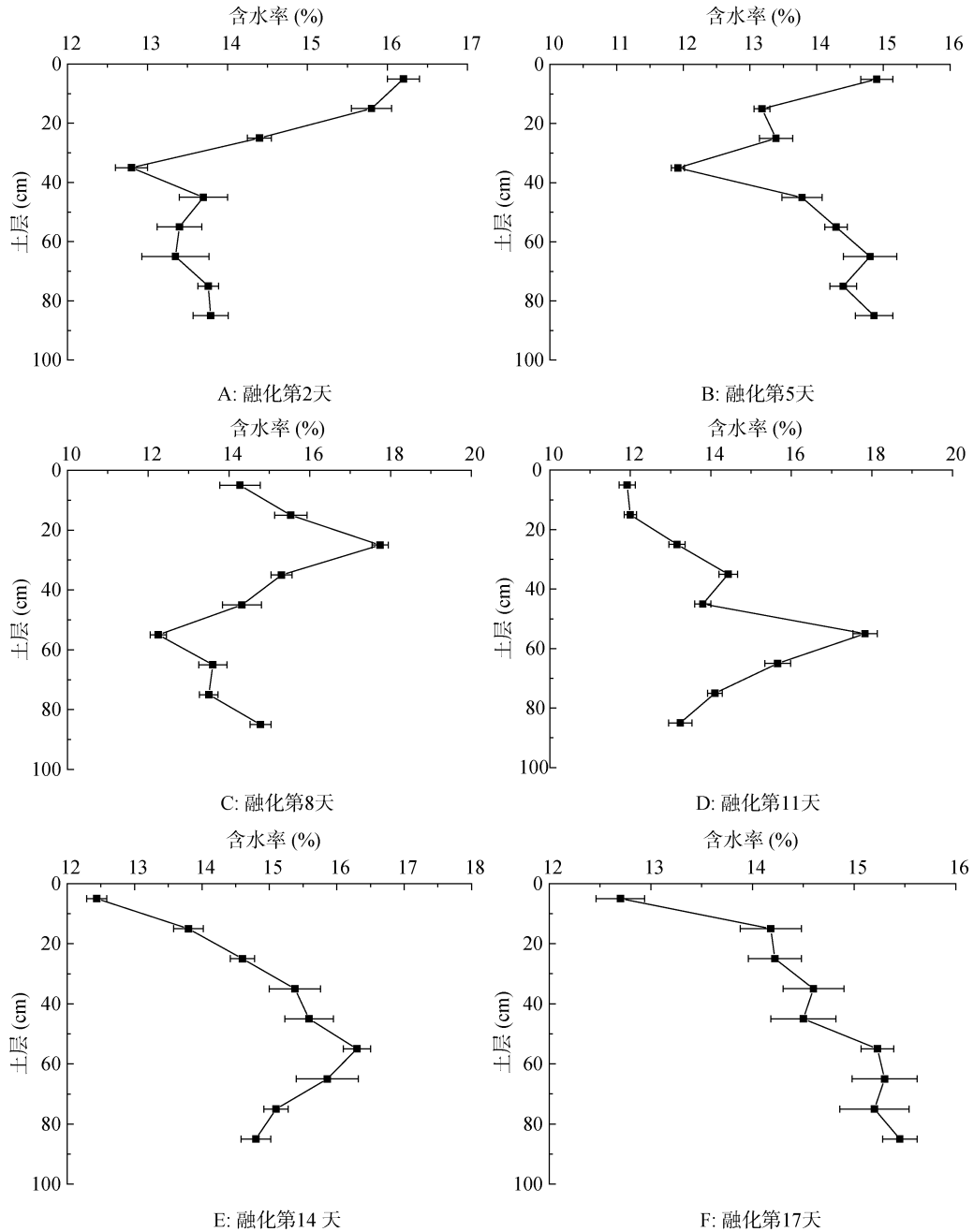


图 2 采煤沉陷区阴坡各样点冻结滞水平均含水率的垂直分布
Fig. 2 Vertical distribution of frozen stagnant water of shady slope in mining subsidence area

由图 3A 可以看出, 土壤解冻后, 20~30 cm 土层含水率最大(15.73%), 比冻结期增加了 28.30%, 向下迅速减少, 在 40~50 cm 土层内含水率最小(10.29%), 之后又逐渐增加。至融化第 5 天(图 3B), 土壤含水率在 20~30 cm 土层内含水率达到最大值 15.36%。随着土层的加深, 土壤含水率迅速减少, 在 50~60 cm 土层内含水率最低, 为 13.21%。融化第 8

天(图 3C), 土壤含水率均降低, 含水率的垂直变化特征与融化第 5 天相似, 只是变化幅度不同。融化第 11 天(图 3D), 土壤含水率整体都增加。融化第 14 天(图 3E), 土壤含水率在 30~40 cm 土层内含水率达到峰值, 其值为 16.31%, 最小值出现在 0~10 cm 土层, 值为 11.02%, 前者是后者的 1.48 倍。融化第 17 天(图 2F), 随着土层深度的增加, 土壤含水率的垂线分布

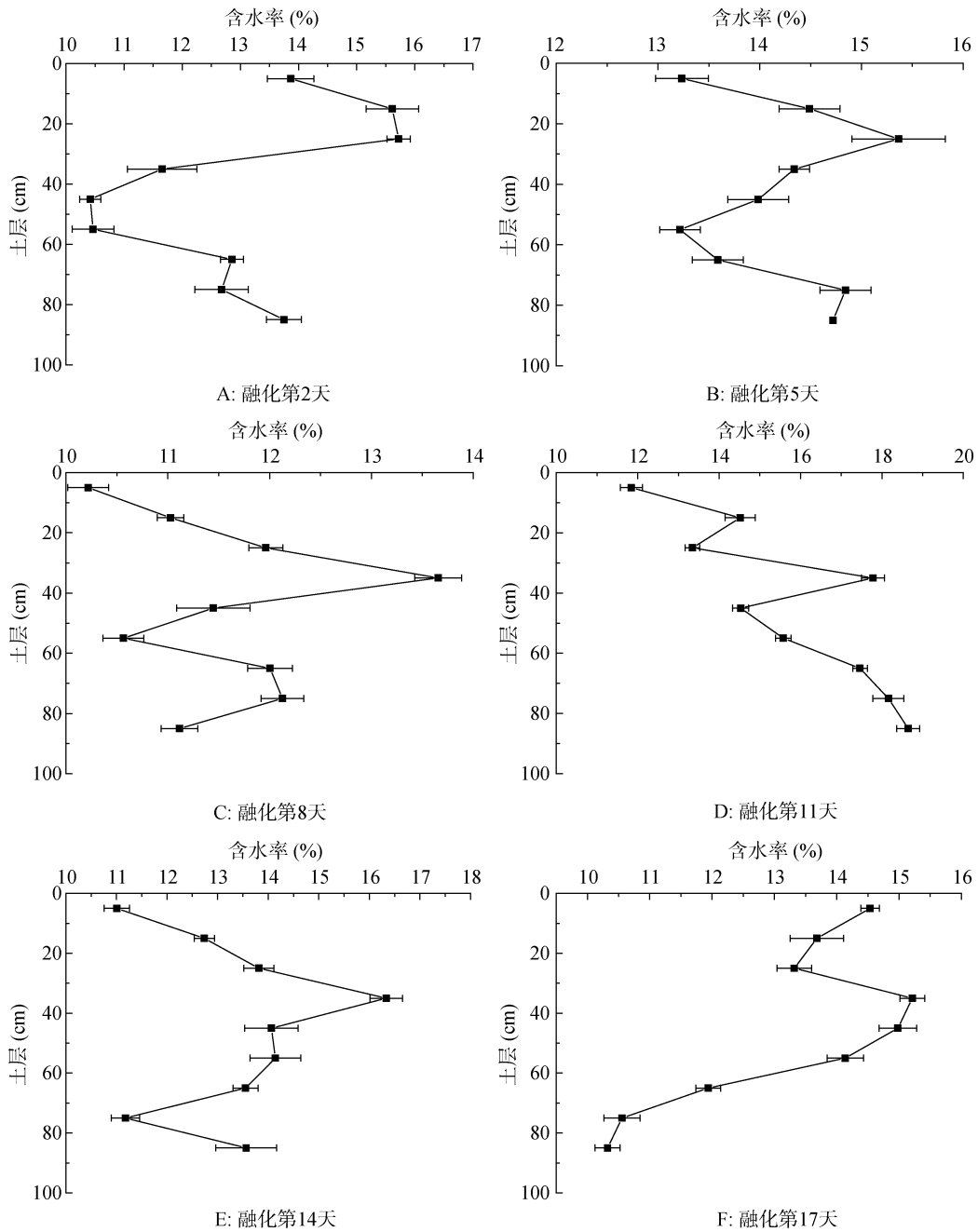


图 3 采煤沉陷区坡沟地各样点冻结滞水平均含水率的垂直分布
 Fig. 3 Vertical distribution of frozen stagnant water of gully-slop lands in mining subsidence area

特征呈现“S”型曲线变化规律，在 30~40 cm 土层内含水率达到峰值，其值为 15.20%，含水率最小值出现在 80~100 cm 土层内，该层含水率为 10.31%，前者是后者的 1.47 倍。

3.3 冻结滞水融化过程中土壤含水率峰值层与冻结层的关系

季节性冻土在冻结期内土壤水分由表层逐渐向深层冻结。冻土冻结时，土壤含水率增加并冻结，在冻土层形成结晶体。由于冻结滞水存在倒置富水和双向融化特性，导致垂直方向上的土壤含水率分布特征

发生变化^[21]。到了融冻期，外界降雨和融雪入渗的水量，主要积蓄在融冻锋面以上，因此导致土壤含水率的垂线分布成为弧线型逆分配，即上层大于下层^[22]。因而在融化开始时期，土壤含水率峰值出现在 10~20 cm 土层。之后随着温度的升高，土壤水分的蒸发作用也逐渐增强，水分逐渐向上层土壤转移。同时由于冻结滞水的双向融化会使得水分缓慢下移，所以含水率最大值会逐渐下移，且由于水分下移速度大于向上移动，因此在 0~100 cm 土层范围内土壤含水率峰值随着时间的推移逐渐降低(图 2)。而在沟坡地，由

于沟坡地的局部气温较低,因此地表蒸发作用较小,由此产生的蒸腾拉力也较小,因此冻结滞水主要向下运移,使得融化初期含水率峰值出现在冻结滞水的下层(20~30 cm);但是随着土壤持续融化,渗透作用

的逐渐增强,加之温度逐渐升高,融化深度也逐渐加深,冻结滞水的双向融化也会使得水分缓慢上移,土壤含水率最大值下移,由于水分下移速度大于向上移动,含水率峰值随时间的推移逐渐降低(图 3)。

表 1 冻结滞水融化过程中土壤含水率峰值层与冻结层的深度(cm)
Table 1 Depths of peak moisture layer and frozen layer during thaw process of frozen stagnant water

样地	融化第 2 天		融化第 5 天		融化第 8 天		融化第 11 天		融化第 14 天		融化第 17 天	
	冻土层	峰值层	冻土层	峰值层	冻土层	峰值层	冻土层	峰值层	冻土层	峰值层	冻土层	峰值层
非采煤区	20 ± 1	70 ± 2	40 ± 3	70 ± 3	70 ± 2	70 ± 4	80 ± 4	70 ± 3	80 ± 4	70 ± 5	100 ± 4	70 ± 4
沉陷区阴坡	30 ± 3	10 ± 2	30 ± 4	80 ± 5	40 ± 2	30 ± 4	60 ± 3	60 ± 4	70 ± 3	60 ± 6	100 ± 5	60 ± 3
沉陷区沟坡地	30 ± 2	30 ± 2	40 ± 2	30 ± 3	60 ± 3	40 ± 3	60 ± 3	90 ± 3	60 ± 4	40 ± 4	-	40 ± 3

注:表中数值为冻结层深度平均值 ± 标准差。

采矿后地表沉陷,包气带土壤结构发生改变,原有致密结构层被破坏,土壤结构变得疏松,也使得包气带垂向裂隙(缝)十分发育,增加了入渗通道和土壤水分蒸发面积^[10]。因此,在同一融化时间,垂直方向上采煤区融化初期冻土层较非采煤区深。在冬季土壤冻结期,土壤水的垂向运动被冻结,深层蒸发被上层冻结层阻挡,这时的蒸发以土壤冻结层表面蒸发为主。冻融时,由于累积正气温的增加,土壤表层土质疏松,上层融化,但下层冻土依然存在,使土壤的毛管作用大大减弱,此时的蒸发以解冻层的水分蒸发为主,而下层含水率较高,如表 1 所示,融化第 2 天非采煤区冻土层出现在 20 cm 深度,而采煤区冻土层出现在 30~50 cm 深度范围内;融化第 2 天和第 5 天,采煤区和非采煤区的冻结滞水含水率峰值整体都在冻土层之下;随着累积正气温的增加,水分蒸发作用加强,冻结滞水融化后的水分在蒸腾拉力作用下逐渐向上移动,因此,冻土层出现在冻结滞水峰值层之下,由于 3 月份气温整体较低,气温降低后已经融化的土壤极易冻结,因此融化第 8 天至第 14 天冻土层与含水率峰值层波动比较频繁;至融化第 17 天,100 cm 深度内土壤冻土层出现在 100 cm 深度或全部解冻,由于冻结滞水的双向融化作用,因此冻土层在峰值层之下。

4 结论

1) 采煤沉陷区冻结滞水随融化时间延长,阴坡土壤含水率峰值沿着垂直方向逐渐向下推移。融化初期,土壤含水率呈现随土层深度增加先降低后增加的趋势,峰值出现在 0~10 cm 土层;融化第 8 天,土壤含水率表现为先增加后降低,最后又增加,含水率最大值下移至 20~30 cm 土层;融化第 11、14 和 17 天,土壤含水率整体表现为先增加后降低,含水率最

大值继续下移至 50~60 cm 土层;且融化第 8 天土壤含水率峰值为整个融化过程的最大值。

2) 沟坡地冻结滞水融化之后土含水率随着时间的推移整体呈现先增加后降低的趋势,融化第 2 天和第 5 天土壤含水率峰值均出现在 20~30 cm 土层;融化第 8、11、14 和 17 天土壤含水率最大值均出现在 30~40 cm 土层,融化第 8 天温度降低,因此含水率峰值较低,之后随着融化时间的推移含水率峰值逐渐降低。

3) 融化第 2 天非采煤区冻土层出现在 20 cm 深度,而采煤区冻土层出现在 30~50 cm 深度范围内;融化第 2 天和第 5 天,采煤区和非采煤区的冻结滞水含水率峰值均在冻土层之下;融化第 8 天至第 14 天,冻土层与含水率峰值层波动比较频繁;至融化第 17 天,冻土层出现在 100 cm 深度左右且在峰值层以下。

参考文献:

- [1] 那平山,周梅,王志刚,等.论三北地区冻结滞水的生态环境效益[J].内蒙古农业大学学报,2000,21(2):43-47
- [2] 那平山,徐树林.关于冻结滞水的探讨[J].内蒙古林学院学报,1994,16(2):46-51
- [3] 那平山,李寒雪,张汝民,等.试论冻结滞水[J].水文地质工程地质,1998,25(3):16-21
- [4] 那平山,李寒雪,张胜利,等.季节冻结滞水富水性 with 植物生长的相关性[J].中国水土保持科学,2003,1(2):52-55
- [5] 刘凯,高磊,彭新华,等.半干旱区科尔沁沙地土壤水分时空特征研究[J].土壤,2015,47(4):765-772
- [6] 赵其国,王浩清,顾国安.中国的冻土[J].土壤学报,1993,30(4):341-354
- [7] 胡国杰,赵林,李韧,等.青藏高原多年冻土区土壤冻融期间水热运移特征分析[J].土壤,2014,46(2):355-360
- [8] 马迎宾,黄雅茹,王淮亮,等.采煤塌陷裂缝对降雨后坡面土壤水分的影响[J].土壤学报,2014,51(3):497-504

- [9] 魏江生, 贺晓, 胡春元. 干旱半干旱地区采煤沉陷对沙质土壤水分特性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(5): 84-88
- [10] 赵红梅. 采矿沉陷条件下包气带土壤水分布与动态变化特征研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2006
- [11] 赵红梅, 张发旺, 宋亚新, 等. 神府东胜矿区不同沉陷阶段土壤水分变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(3): 92-96
- [12] 吴奇凡, 樊军, 杨晓莉, 等. 晋陕蒙接壤区露天矿层状土壤水分入渗特征与模拟[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1280-1290
- [13] 王健, 高永, 魏江生, 等. 采煤沉陷对风沙区土壤理化性质影响的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 52-55
- [14] 刘美英, 高永, 李强, 等. 神东矿区复垦地土壤酶活性变化和分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(1): 165-168
- [15] 何金军, 魏江生, 贺晓. 采煤沉陷对黄土丘陵区土壤物理特性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(12): 92-96
- [16] 白有社, 岳正喜, 杨占盈. 彬长矿区保水与采煤分析[J]. 中国煤炭地质, 2008, 20(1): 21-24
- [17] 李俊超, 党廷辉, 薛江, 等. 植被重建下露天煤矿排土场边坡土壤碳储量变化[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 453-460.
- [18] 许士国, 刘佳, 张树军. 采煤沉陷区水资源综合利用研究[J]. 东北水利水电, 2010, 28(8): 29-31, 45, 71
- [19] Cooper D J, MacDonald L H. Restoring the vegetation of mined peat lands in the Southern Rocky Mountains of Colorado, USA[J]. Restoration Ecology, 2000, 8(2): 103-111
- [20] 王莹, 李道亮. 煤矿废弃地植被恢复潜力评价模型[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(2): 88-92
- [21] 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
- [22] 郭占荣, 荆恩春, 聂振龙, 等. 冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 298-302

On Soil Moisture Variation During Thaw Process of Frozen Stagnant Water in Mining Subsidence Area

BAO Siqin¹, GAO Yong^{1*}, DING Yanlong¹, LUO Fengmin², LV Xinfeng³, SHAN Yubing⁴, WANG Jianran⁴

(1 College of Desert Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2 Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China; 3 Water and Soil Conservation Station of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010020, China; 4 Inner Mongolia Water Resources and Hydro-power Survey and Design Institute, Hohhot 010020, China)

Abstract: Frozen stagnant water possesses inverted enriching water and two-way melting characteristics, which make soil moisture migration trend change during its melting process. In this paper, soil moisture variation was studied during the thaw process of frozen stagnant water in different terrains in mining subsidence area by using the drying method. The results showed that :1) with the extension of melting time, soil moisture peak of shady slope in mining subsidence area decreased gradually along the vertical direction. Soil moisture peak of frozen stagnant water appeared in 0-10 cm on the melted 2nd day and 5th day, appeared in 20-30 cm on the melted 8th day, in 50-60 cm on the melted 11th day, 14th day and 17th day. 2) Soil moisture peak of gully-slope lands appeared in 20-30 cm on the melted 2nd day and 5th day, and in 30-40 cm on the melted 8th day, 11th day, 14th day and 17th day. 3) The moisture peak layer of frozen stagnant water was always under the frozen layer in the mining area and the non-mining area.

Key words: Frozen stagnant water; Soil moisture; Thaw process; Mining subsidence area