

干旱区季节性冻土冻融状况及对融雪径流的影响

习阿幸^{1,2}, 刘志辉^{1,2,3,4}, 卢文君^{1,2}

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 教育部绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3. 新疆大学 干旱生态环境研究所, 乌鲁木齐 830046; 4. 干旱半干旱区可持续发展国际研究中心, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 利用天山北坡季节性冻土区的军塘湖流域观测场 2013 年和 2014 年冻融期冻土深度及各层土壤的温湿度数据, 研究季节性冻土的冻融规律及冻融过程中土壤含水量的变化特征, 探讨各层土壤水分分布及迁移特征对融雪径流的影响。结果表明: 冻融过程中冻土深度会发生变化, 且温度不同冻融速率不一; 土壤水分的迁移受制于土壤温度的变化, 特别是表层 10 cm 土壤温湿度相关性极大; 对比 2013 年, 2014 年数据, 土壤表层 10 cm 内的含水量变化会对融雪水的下渗有调控作用, 从而影响下垫面的径流量。研究季节性冻土冻融过程及对融雪径流的影响, 会对准确预报融雪性洪水有重要意义。

关键词: 季节性冻土; 冻融过程; 水分运移; 融雪径流

中图分类号: P642.14

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)02-0333-07

Processes of Seasonal Frozen Soil Freezing-thawing and Impact on Snowmelt Runoff in Arid Area

XI Axing^{1,2}, LIU Zhihui^{1,2,3,4}, LU Wenjun^{1,2}

(1. School of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

3. Institute of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 4. International Center for Desert Affairs-Research on Sustainable Development in Arid and Semi-arid Lands, Urumqi 830046, China)

Abstract: The freezing thawing process and variation of soil moisture were analyzed with the measured data of temperature and soil depth with each layer in Juntang Lake Basin on the northern slope of Tianshan Mountains in seasonal frozen soil area during the period from 2013 to 2014. Both freezing and thawing process within seasonal frozen soil was investigated, and the effect of soil moisture distribution and migration characteristics in different layers on the snowmelt runoff was examined. The results showed that the process of freezing and thawing permafrost depth changed, and the temperature of different freezing and thawing rate was not a subject; migration of soil moisture and soil temperature was subject to change, correlation between soil temperature and humidity in surface 10 cm was significant; the correlation between the ground temperature in 10 cm above snow surface and soil moisture in 10 cm depth was analyzed in 2013 ($R=0.924$), and 2014 ($R=0.908$). Compared to the data of 2013 and 2014, the changes in seasonal frozen soil surfer moisture played the regulatory role in water infiltration, soil moisture transferred between the surface and underground, in the meantime, the migration of soil water had the impact on the seasonal freezing-thawing process, and resulted in the generation of snowmelt flood. The results revealed that there was the significant correlation between these factors. So study on freezing and thawing process of seasonal frozen soil and effects on snowmelt runoff has the important significance to forecast snowmelt flood, and the results can be used for the modeling and prediction of spring snowmelt flood in the Juntang River Basin.

Keywords: seasonal frozen soil; freezing-thawing process; migration of soil moisture; snowmelt runoff

冻土在我国分布较为广泛,约占陆地总面积的70%,分为季节性冻土和多年冻土。季节性冻土是一种温度在0℃或以下,且含冰晶的特殊土水体系,一般存在冬季冻结到春季或夏季融化的过程,通常被认为是**不透水层**^[1]。季节性冻土水文的复杂性从性质上改变了土层结构和土壤水分的运移规律^[2],特别是在冻融过程中,冻土深度的变化、土壤温湿度的变化、水分的迁移等都会一定程度影响冻土水热状况,改变冻土区水循环过程,会对生态系统的稳定性有一定影响^[3]。在我国西北干旱区,积雪覆盖下的季节性冻土普遍存在,由于它的不透水性,所以在周期性的冻融中会改变融雪水的下渗,进而改变土壤里的水热平衡状态^[4],影响积雪—土壤界面的水分运移过程,会造成流域产汇流的不稳定,既而对洪水的形成与发展有很大的作用,会造成一定程度的融雪性洪水灾害。所以,研究干旱区季节性冻土冻融状况对融雪径流的影响是非常重要的,对建立分布式融雪径流模型ARRSSVM中冻土模块有一定理论参考^[5-6],并能准确确定其模型参数,从而可提高融雪径流量模拟的准确性,对洪水预警预报提供决策支持。

目前冻土的研究正越来越得到国内外学者的关注,已有一定的基础。Kane等^[7]常年对北美亚极地冻土区融雪径流进行观测研究,发现由于冻土存在,融化期径流系数高达0.7~0.8;Niu等^[8]提出季节性冻土中由于冰的存在,其水文与热力学特性发生改变,使得冻融期土壤入渗能力降低;杨针娘等^[9]在祁连山冰沟流域进行冻土观测试验,首次指出冻土存在会对流域产流量有一定调节作用;肖迪芳等^[10]通过试验研究季节性冻土水分运移规律、地下水分割等,指出冻土具有不透水性和蓄水调节作用,并提出冻土存在在降水与径流的关系;付强等^[11]采用土壤水动力学建立积雪覆盖下的季节性冻土水分迁移模型,模拟了冬季土壤冻结条件下水分的动态迁移。刘杨等^[12]利用SHAW水文模型对冻土层土壤的水热迁移状况进行模拟研究,效果较好;张伟等^[13]用CoupModel水文模型对积雪和土壤层影响下的多年冻土层水热运移状况进行了研究。以上学者对冻土存在下的影响已有突出的研究,由于冻土层深度的不同以及其对外界条件的敏感性,使得冻土冻融过程中水分运移具有一定的复杂性,且土壤水分变化会对冻土层和地表层有较大的影响。但是目前在这方面的研究相对较少,特别是对于水资源匮乏、生态环境脆弱的西北干旱区,在季节性冻土对融雪洪水的调控方面尚缺乏深入认识。

为此,本文以新疆天山北坡为例,通过2013年和2014年两年的冻结期和融雪期土壤性质的野外试验,对比分析了积雪覆盖下土壤冻融过程的特征,包括冻融深度、土壤温度和土壤液态水含量的变化特征,进而

探讨土壤水分分布特征和运移特征,并主要研究其对融雪径流形成过程的影响,以期对融雪期的洪水预报提供理论支持,为推进这一领域的研究具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文以新疆呼图壁县境内的军塘湖流域为研究区,该流域发源地为天山北坡中段,位于塔西河与呼图壁河间的中低山带,主体高程为1 000~1 500 m,山势较平缓。流域面积为841 km²,地表覆盖主要以裸地和农田为主;土壤类型从海拔高到低依次为高山草甸土、灰褐土、黑钙土、栗钙土及棕钙土,且有季节性冻土存在。此次试验选择研究区中段一封闭的小流域(86°28'30"E,43°51'44"N)作为研究的观测点,平均海拔1 080 m。试验场土壤类型主要为粉壤土,每年11月积雪覆盖,季节性冻土出现于积雪覆盖前后至次年3月融化,平均最大冻结深度为1.3 m。每年2月底气温开始回升,随之积雪和冻土开始逐渐融化,融雪水不断形成径流。该流域水资源大部分为季节性融雪水补给,具有明显的干旱区河流水文特性,且多年年平均径流量为3.89亿m³。

1.2 数据获取与方法

本研究团队已在此流域有多年的研究基础,每年选用自动气象仪CR23X和DL2e定点测量气象数据和土壤数据(分别架设在试验场流域的出口处和沟谷中间位置),包括太阳辐射、空气温湿度等,以及利用其采集器的探头测量各层土壤温湿度和未动水含量,埋深为每隔5,10,20,30,40 cm。观测期为每年的3月至4月份融雪期,期间最高气温可达16.78℃,最低气温为-15.55℃。为了研究冻结期土壤特征,每年11月将美国Decagon公司EM50采集器自土表层以下5,10,20,40,60以及80 cm深处埋下,自动采集土壤温湿度和未冻水含量。土壤冻融的测定是每年11月冻结期前在试验场流域中心位置安装LQX-DT冻土器,每天测量记录土壤冻结深度和融化深度。

2 结果与分析

2.1 冻融过程冻土深度与温度的变化

季节性冻土冻融过程的一个重要指标就是冻土深度,由于季节性冻土的活动层接近于地表,对温度的变化较为敏感,反映较迅速,所以冻土深度能够表征土壤受外界因素的影响作用^[14]。本研究试验以2012年11月到2013年3月中旬为第一期,以2013年11月到2014年3月为第二期,分别用两年的数据进行对比分析。图1为不同时期军塘湖流域观测场的地温等值线图,横坐标为冻结期到融雪期的时间,纵

坐标为土壤深度,等值线图表征了 2013 年和 2014 年不同时期不同土壤深度各层的土壤温度变化特征,图

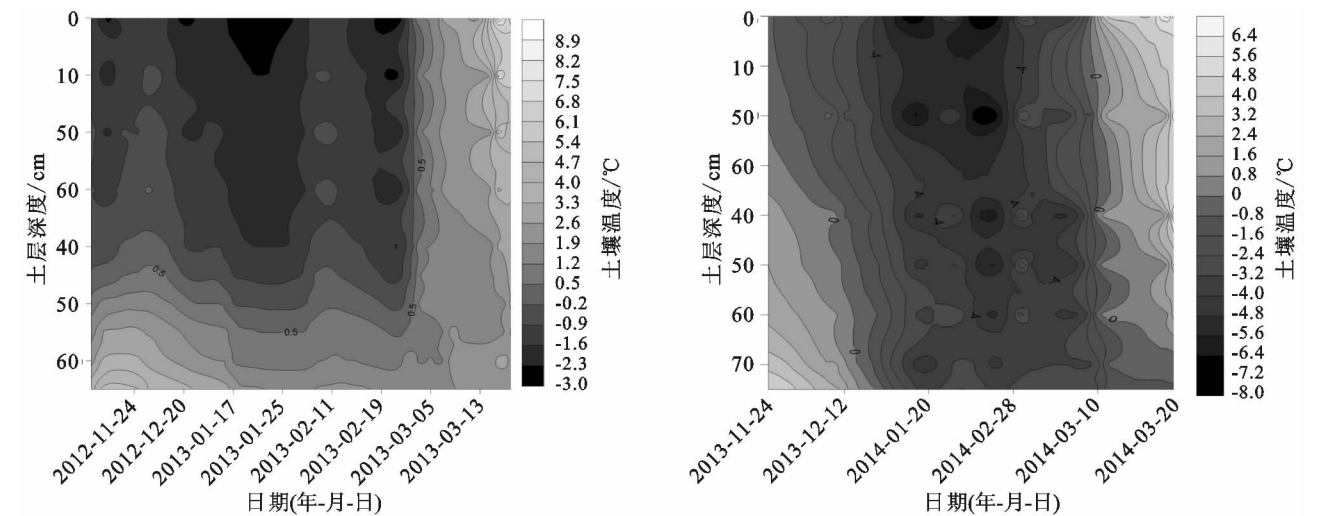


图 1 不同时期军塘湖观测场土壤层地温等值线

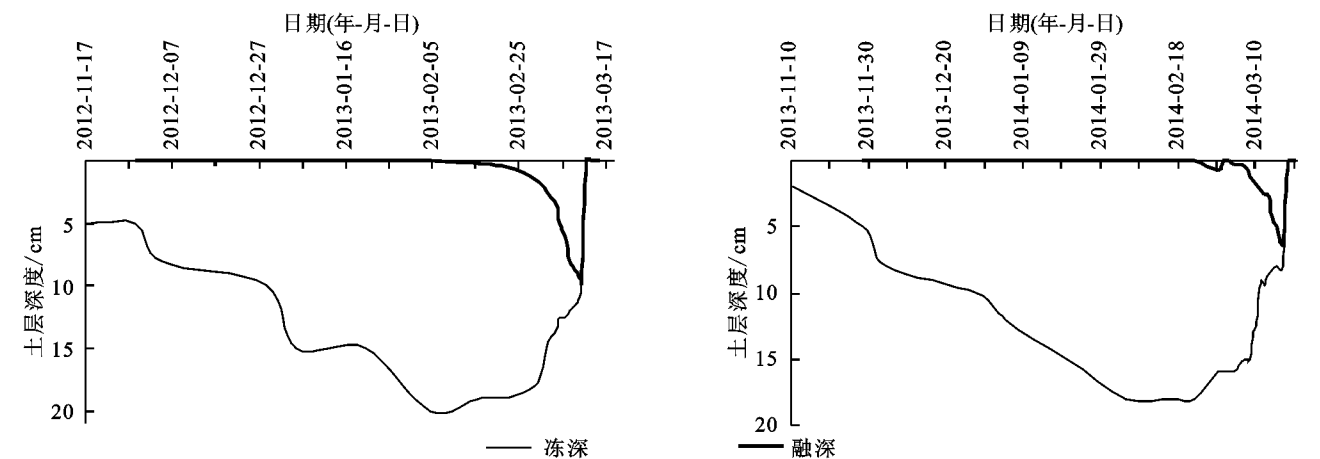


图 2 冻融过程冻土深度随时间的变化曲线

从图 1 中可以看出,2012 年 11 月土壤整体温度逐渐降低,且上层土壤比下层土壤温度低,随着时间的持续,表层土壤温度越来越低,一直持续到 2013 年 1 月底,且从上到下温度梯度差逐渐增大,到 3 月初随着气温的上升,土壤表层温度也逐渐增大。再到 2013 年 11 月土壤温度又开始降低,土壤冻结继续,一直持续到 2014 年 3 月 10 日左右,土壤温度上升此时土壤消融开始。土壤温度的这种循环变化是因为在冻结初期,空气逐渐降温,土壤层内部的热量由底层传输至地表,地表由于放热冷却温度逐渐降低。随着地温降低和雪层厚度的积累土壤冻结持续,各层土壤的温度也逐渐降至最低点。之后,由于气温的升高,地表温度逐渐增大,土壤各层的温度也较之前增大,从图 1 中可以明显看到。这是因为随着温度的升高,土壤的热量又由地表传输至下层,所以土壤各层温度升高。此过程中冻土的冻结深度一直发生着变化,在冻结期,由于地温的逐渐降低,土壤从表层开始冻结,且冻结速率较大冻深不断增加。但之后由于积雪的覆盖影响地温,在进入融雪期前冻土冻结速度会逐渐减小,冻深增加缓慢,随

2 为试验场冻土冻融过程中受地温影响下冻结及融化深度随时间的变化曲线。

之达到最大深度,至此地表土壤完全冻结。由图 2 可知,土壤冻结过程从上年 11 月持续到下年 2 月,2013 年最大冻土深度为 20 cm 出现在 2 月 4 日,2014 年最大冻土深度出现于 2 月 16 日左右,为 18 cm。3 月初气温开始快速升温,此时进入融雪期,积雪也开始融化,其低导热性对冻土的影响也渐弱,冻土层中的冰体从表层开始快速融化,且下界面土壤又受到底部地热的作用也开始融化。如图 2 所示,土壤从上下两界面同时融化,且上界面速度相对较快,主要原因是土壤上层得到传输的热通量较大,加快了冻土融化。

然而,在积雪覆盖下,日平均气温不同,各层地温不同,冻土消融的时间也就会不同,如图 2 所示,2013 年比 2014 年土壤融化的时间短、速度快。这是由于 2013 年从 3 月 4 日至 3 月 10 日左右,气温迅速升高,地表温度逐渐增大,热量由地表向下传输时致土壤消融速度加快,而 2014 年融雪期前期从 2 月底到 3 月初,虽然温度在升高但平均气温上升速率持续较低,土壤消融速度相对较慢,在 3 月 8 日之后随着地温不断增加,土壤开始不断融化。所以,气温对冻土

深度有正反馈影响作用,即冻土的融化过程受控于从地表层传输到消融界面的热量。

2.2 土壤冻融过程中水分变化特征

季节性冻土在冻融过程中不仅冻深会发生改变,其土壤的干湿和热量状况还会显著改变,是因为在冻融过程中受到外界条件的制约,土壤水分存在使得土壤自身特性发生改变,其中包括水力学和热力学特征,从而改变土壤水热平衡^[15-16]。通常是用土壤含水量来表征土壤水分,冻结期的土壤含水量为土壤的未冻水量,融化期的土壤含水量是指土层中总水量。土壤含水量的多少会影响土壤的冻融状况以及土壤各层热量的分布。所以说,土壤含水量是表征土壤冻融过程中水分迁移的重要因子^[17-18]。

图 3 为 2012 年至 2014 年不同时期冻结到融化时土壤含水量随土壤深度变化的等值线图,对比土壤冻融深度图可以看出,在 2013 年和 2014 年冻结初期土壤冻结深度较浅,未冻水含量较大,随着时间的持续,在土壤温度梯度的影响下冻结锋面发生改变,土壤中的未冻水从冻结界面下层迁移至冻结界面,使冻结界面处含水量较大,未冻水在温度影响下冻结成冰。且土壤温度越低,冻结速度越快,所以此时等值线图较为紧密,是因为在冻结期随着土壤温度的不断降低,含水量变化剧烈,特别是表层土壤,不断的放热冷却与外界发生着能量的交换,致使土壤含水量变化

较为显著。之后,土壤各层的含水量较稳定,基本保持不变的状态,这时冻土层完全冻结。但此时在土壤温度梯度下土壤中少量的未冻水有明显向上层运移的趋势,也就是说,从整体上看土壤上层含水量较下层含水量多。在 2013 年 2 月底和 2014 年 3 月初随着温度的升高,进入融雪期,此时较厚的积雪层开始融化,冻土层由于吸热也开始从上下界面慢慢融化,则上层土壤和下层土壤含水量逐渐变化,之后气温增温较快影响土温急剧上升,含水量的等值线图又重新紧密,意味着冻土层中冰快速融化,土壤含水量明显增大。再加上大量的积雪融化水在重力下下渗至土壤层,土壤的液态水及下渗的融雪水随着融化层的变化不断向下运移,所以土壤中的液态水含量较多且存在向下运移的趋势,以到达完全融化状态,之后土壤含水量不断增大至饱和到达一定稳定状态。而对比 2013 年和 2014 年,融化前期土壤含水量 2014 年比 2013 年整体较小,且等值线图也未达到 2013 年紧密程度,是因为温度的影响使得 2014 年冻结期持续较长,土壤含水量先逐渐减小达到稳定,在 3 月 10 日左右才逐渐增大,且此时融雪期积雪已开始慢慢融化,但温度上升速度持续较低,土壤融化速度较慢,大量融雪水下渗至土壤表层时,受到冻土中未融化层的阻隔导致雪水下渗量极少且大部分迁移至地表形成径流。所以,土层中的含水量不多且变化较小。

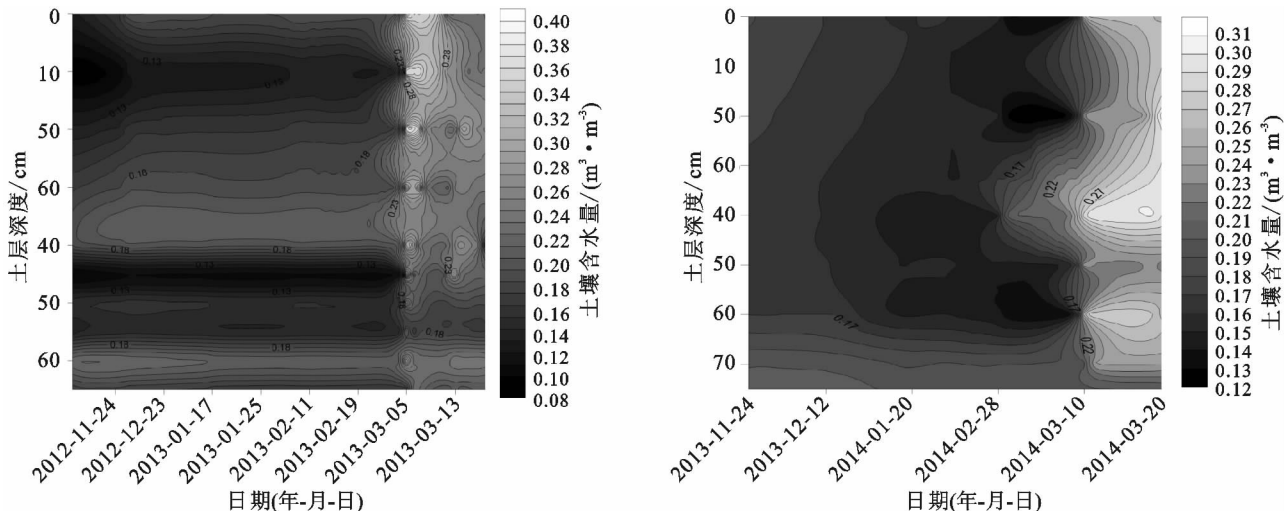


图 3 不同时期军塘湖观测场各层土壤含水量等值线

对比分析 2013 年和 2014 年冻融阶段土壤含水量的变化特征,可以得出,冻结期温度降低,土壤中水分不断冻结成冰,少量未冻水由于土壤内部温度梯度的形成有向上层运移的趋势。所以土壤温度状况决定了土壤水分的相变^[19],融化期土壤水分和融雪水的迁移受制于温度变化下的冻土融化程度,迁移量的多少也受到积雪层厚度的影响。

土壤水分的这种变化特征与土壤各层的温度有较大的相关性^[20],如图 4 所示,2013 年和 2014 年各

层土壤温度和土壤含水量的变化特征。从整体上看,土壤各层的温度以及含水量的变化趋势基本相似,通过相关分析且在 0.01 显著性水平下检验,如表 1 结果显示,土壤含水量与土温整体相关性较高,特别是在浅层 10 cm 处相关性系数达到最高,2013 年为 0.924,2014 年 10 cm 相关系数为 0.908,而随着深度的增加,相关系数有明显减少的趋势,也就是说,10 cm 土壤温度对土壤含水量影响最大,之后土层越深土温对土壤水分影响渐渐减弱。是因为土壤层受到

外界大气与地表间的能量和水分平衡的影响土壤湿度发生变化,以及积雪融化时的下渗量对土壤水分的影响等因素,使得冻融过程中土壤温度对含水量的变

化有大的影响^[21-22],且各因素综合下导致 10 cm 土层含水量受到土温的影响最大。结果表明,土壤含水量的变化与土壤温度的变化紧密相关。

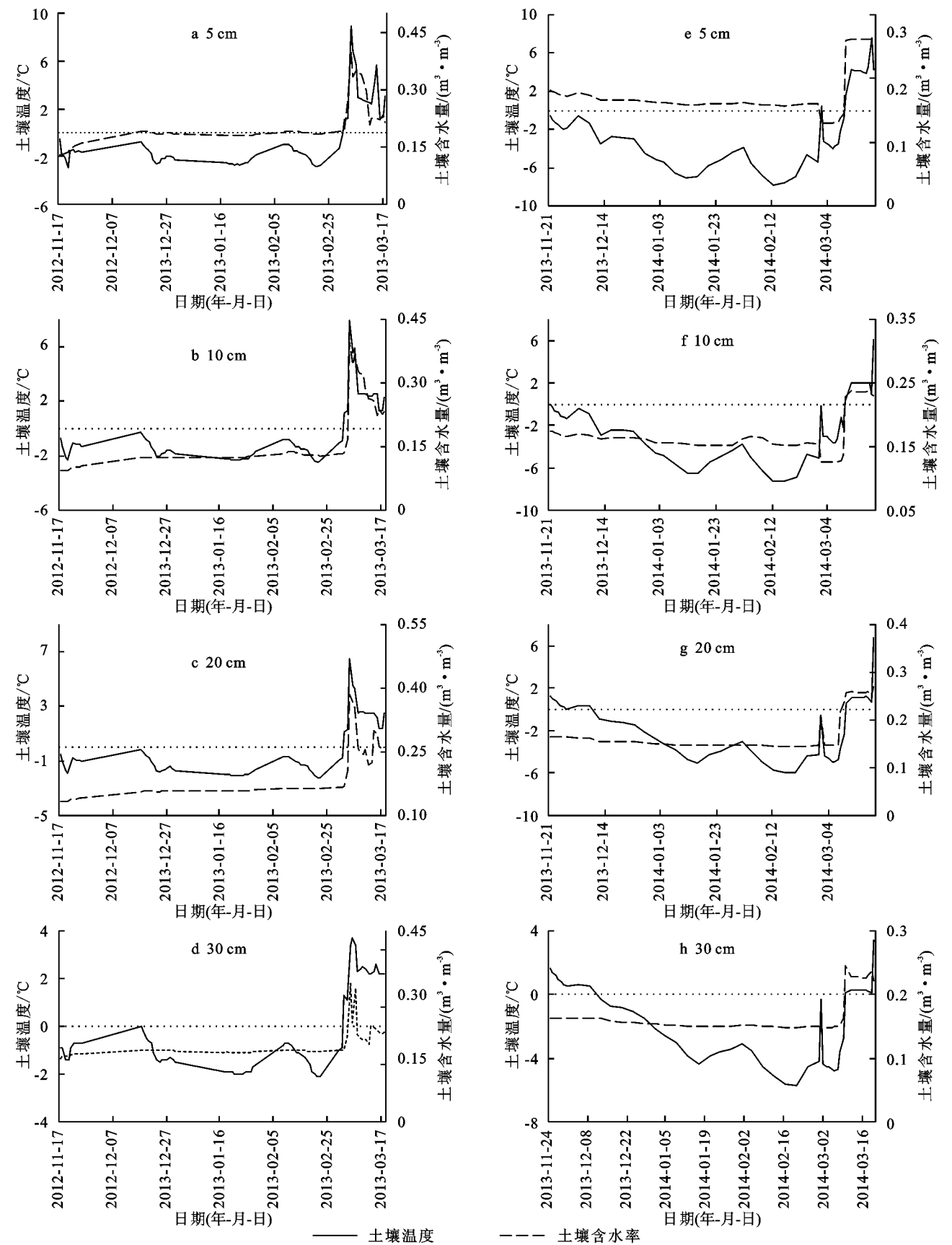


图 4 军塘湖观测场各层土壤温度水分变化特征

表 1 各层土壤温度与含水量相关系数

土壤深度/cm	5	10	20	30
2013 年相关系数	0.82179	0.924153	0.912976	0.798278
2114 年相关系数	0.86652	0.907881	0.842500	0.7801

2.3 土壤冻融过程对融雪径流的影响

季节性冻土在冻融过程中的冻深的变化、水分特征的变化都会影响融雪水的运移。在不同的融雪期,土壤冻结状况不同,且在温度影响下的土壤消融程度不同,都会影响融雪水的下渗,最终影响融雪径流及区域生态环境^[23-24]。图 5a 为 2013 年土壤各层含水量与融雪径流量的关系图,可以看出,在 3 月 3 日至 3 月 7 日,5—20 cm 土壤含水量变化较为明显,这是因为积雪在气温增温下融化较快,再加上冻土大部分消融使得融雪水从土壤表层向较深层下渗,从一定程度上改变了土壤中的水分含量特别是表层,与此同时减少了融雪水的产流量,从而减少地表径流量致使洪水发生几率较小。但在此之后,由于雪水完全下渗致

界面,使土壤含水量达到饱和即形成蓄满产流,所以会形成小洪峰,但却没发生融雪性洪水,说明冻土的消融速度较快增加了融雪水的下渗量。特别是 10 cm 以下冻土的消融与融雪水入渗有很大的关系。图 5b 为 2014 年土壤各层含水量与融雪径流量的关系图,由图可知,从 3 月 10 日左右开始,土壤层 5—10 cm 含水量变化显著,是因为积雪大部分已经开始融化,但还有一部分冻土未消融,融雪水下渗至土壤表层后受阻,其余融雪水形成地表径流,易形成小洪峰。之后随着时间的持续,温度升高,土壤逐渐消融此时有部分融雪水下渗,土壤表层含水量增大,但当土壤含水量达到饱和时融雪水不在下渗且大部分形成地表径流,称为蓄满产流。再加上之前积累的大量融雪水,融雪径流量较大容易形成大的洪水,如图 5b。其主要原因是由于地温影响下冻土消融时间比积雪消融时间晚,导致冻融深度不同及融雪水的下渗量不同。

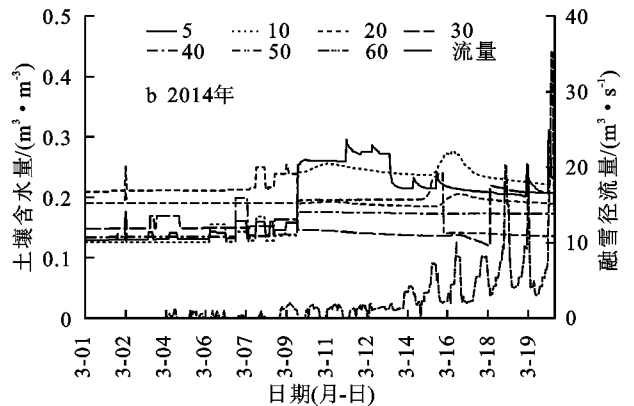
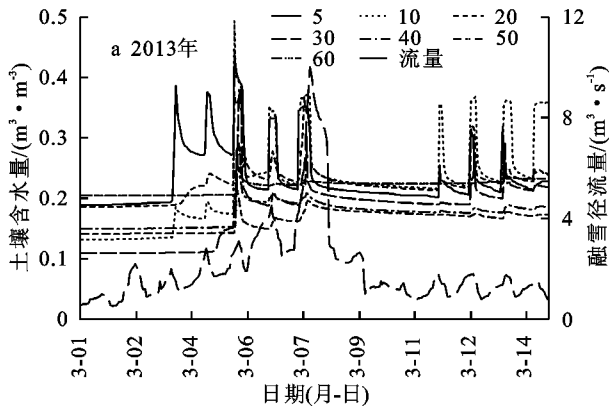


图 5 融雪期观测场土壤各层含水量与融雪径流量的关系

对比 2013 年和 2014 年融雪期土壤含水量与流量关系图可知,融雪水的下渗受到了土壤的调蓄作用。因为冻土的不透水性致使冻结土壤如隔水层一样会阻止融雪水的下渗,或者当温度升高时影响冻土消融使得融雪水大量下渗,都影响着土壤各层含水量,特别是表层 10 cm 以内,进而影响洪水发生。也就是说,土壤温度及土壤水分迁移在 10 cm 内变化较明显时,会对洪水的调控有很大的影响作用。所以在融雪期,了解冻土的消融状况是非常重要的。一方面,冻土未消融但积雪大量融化时,融雪水受下渗调蓄作用小,即易在地表形成超渗产流,径流量较大时容易形成大的融雪性洪水,如 2014 年所示;另一方面,当冻土已经大部分消融时,融雪水下渗至土壤层,改变了表层含水量,且在积雪冻土界面形成蓄满产流,一般情况下融雪径流量较少,消减了洪峰,不易形成较大的融雪性洪水,如 2013 年所示。

3 结论

(1) 在冻结期 11 月,由于空气气温较低,土壤内部的热量由底层传输至地表,地表由于放热冷却温度逐渐降低,此时土壤从表层开始冻结,且冻结速率较大冻深不断增加。在 2 月底或 3 月初融化期,由于表层地温和底部地热的作用土壤从上下层同时融化,且 2013 年和 2014 年融化的速率不一。也就是说不同时期气温不同,各层地温不同,冻土消融的时间也就会不同。所以,冻融过程中地温对冻土深度有很大的影响作用。

(2) 不同阶段的土壤水分运移特征不同,在冻结期少量未冻水由于土壤内部温度梯度的形成有向上层运移的趋势,在融化期冻土层中的冰融化成的液态水及下渗的融雪水随着土壤中融化层的变化不断向下运移至完全融化状态,之后土壤含水量不断增大至

饱和,土壤水分到达一定稳定状态。由2013年和2014年土壤各层含水量的不同得出土壤水分迁移量的多少与冻土的冻融深度及融雪水的下渗量有关。土壤水分的这种变化特征与土壤温度变化趋势相似且相关性较大,土壤水分的分布会影响地热的传输,土壤温度又反过来影响水分的迁移。特别是表层10 cm,对其进行相关分析得出2013年土壤层10 cm的水分与温度相关系数为0.924,2014年相关系数为0.908。所以,土壤含水量的变化与土壤温度的变化具有明显的相关性。

(3) 土壤层10 cm内的冻土消融状况及土壤湿度的变化会对融雪径流量有一定的反馈作用。由于地温的影响2013年冻土先于大量积雪融化,之后融雪水下渗增加了表层湿度且调蓄了融雪产流量,减少了洪水发生的机率。而2014年大量积雪先于冻土融化,融雪水下渗到土壤表层由于部分冻土的存在阻挡了大量融雪水,地表径流量较多,容易形成洪水。之后冻土消融融雪水下渗,再加上土壤层中的液态水至土壤含水量达到饱和,此时融雪水不再下渗,形成蓄满产流,这时全部积雪融化后除过极少量蒸发,全部形成地表径流则造成更大的洪水。

参考文献:

[1] 冯功堂,山希尧,李人康,等. 干旱区潜水蒸发埋深及土质关系试验分析[J]. 干旱区研究,1995,12(3):78-84.

[2] 阳勇,陈仁升. 冻土水文研究进展[J]. 地球科学进展,2011,26(7):711-723.

[3] 杨建平,杨岁桥,李曼,等. 中国冻土对气候变化的脆弱性[J]. 冰川冻土,2013,35(6):1436-1445.

[4] 郭玲鹏,李兰海,徐俊荣,等. 天山巩乃斯河谷积雪深度及季节冻土温度对气温变化的响应[J]. 资源科学,2012,34(4):636-643.

[5] 乔鹏,秦艳,刘志辉. 基于能量平衡的分布式融雪径流模型[J]. 水文,2011,31(3):22-27.

[6] 房世峰,裴欢. 遥感和GIS支持下的分布式融雪径流过程模拟研究[J]. 遥感学报,2008,12(4):655-662.

[7] Kane D L, Stein J. Water movement into seasonally frozen soils[J]. Water Resources Research, 1983,19(6):1547-1557.

[8] Niu G Y, Yang Z L. Effects of frozen soil on snowmelt

runoff and soil water storage at a continental scale[J]. Journal of Hydrometeorology,2006,7(5):937-952.

[9] 杨针娘,杨怀志,梁凤仙,等. 祁连山冰沟流域冻土水文过程[J]. 冰川冻土,1993,15(2):235-241.

[10] 肖迪芳,陈培竹. 冻土影响下的降雨径流关系[J]. 水文,1983(6):10-15.

[11] 付强,马效松,王子龙,等. 稳定积雪覆盖下的季节性冻土水分特征及其数值模拟[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(1):151-154.

[12] 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.

[13] 张伟,周剑,王根绪. 积雪和有机质土对青藏高原冻土活动层的影响[J]. 冰川冻土,2013,35(3):528-540.

[14] 胡列群,武鹏飞,梁凤超,等. 新疆冬春季积雪及温度对冻土深度的影响分析[J]. 冰川冻土,2014,36(1):48-54.

[15] 冯宝平,张展羽,张建丰,等. 温度对土壤水分运动影响的研究进展[J]. 水科学进展,2002,13(5):643-658.

[16] 高红贝,邵明安. 温度对土壤水分运动基本参数的影响[J]. 水科学进展,2011,22(4):484-494.

[17] 焦永亮,李韧,赵林,等. 多年冻土区活动层冻融状况及土壤水分运移特征[J]. 冰川冻土,2014,36(2):237-247.

[18] Romanovsky V, Osterkamp T. Effects of unfrozen water on heat and mass transport processes in the active layer and permafrost [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2000,11(3):219-239.

[19] 汪志荣,张建丰. 温度影响下土壤水分运动模型[J]. 水利学报,2002(10):46-50.

[20] 郭东林,杨梅学. SHAW模式对青藏高原中部季节性冻土区土壤温、湿度的模拟[J]. 高原气象,2010,29(6):1369-1377.

[21] Osterkamp T E. Establishing long - term permafrost observatories for active-layer and permafrost investigations in Alaska: 1977—2002[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2003,14(4):331-342.

[22] 王荣军,刘志辉,李诚志,等. 融雪期季节性冻土湿度变化对融雪洪水的影响[J]. 水土保持研究,2013,20(4):277-281.

[23] 张殿发,郑琦宏,董志颖. 冻融条件下土壤中水盐运移机理探讨[J]. 水土保持通报,2005,25(6):14-18.

[24] 王爱娟,张平仓. 水土保持措施对小流域洪水过程的影响研究[J]. 水土保持研究,2008,15(6):18-20.