

DOI: 10.5846/stxb201901040044

张音, 海米旦·贺力力, 古力米热·哈那提, 刘迁迁, 苏里坦. 天山北坡积雪消融对不同冻融阶段土壤温湿度的影响. 生态学报, 2020, 40(5): 1602-1609.

Zhang Y, HAIMIDAN · Helili, GULIMIRE · Hanati, Liu Q Q, Su L T. The influence of snowmelt on soil temperature and moisture in different freezing-thawing stages on the north slope of Tianshan mountain. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1602-1609.

天山北坡积雪消融对不同冻融阶段土壤温湿度的影响

张 音^{1,2}, 海米旦·贺力力³, 古力米热·哈那提⁴, 刘迁迁^{1,2}, 苏里坦^{1,*}

1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3 中共新疆维吾尔自治区委员会党校, 乌鲁木齐 830000

4 新疆水利水电科学研究院水资源研究所, 乌鲁木齐 830049

摘要: 积雪作为一种特殊的覆被, 直接影响着土壤温度、土壤水分分布及其冻结深度、冻结速率等, 影响当地的生态水文过程。利用 2017 年 11 月 1 日至 2018 年 3 月 31 日天山北坡伊犁阿热都拜流域的土壤含水率资料, 划分土壤不同冻融阶段, 结合积雪不同阶段, 进而分析积雪消融对季节性冻土温湿度的影响。结果表明: 在整个土壤冻融期间, 土壤温湿度的变化取决于积雪深度、大气温度和雪面温度的高低, 且与其稳定性有关。土壤冻结阶段, 土壤温湿度持续下降, 表层土壤温湿度受气温影响较大, 且波动明显, 而深层土壤的温湿度变化平缓; 土壤完全冻结时, 有稳定积雪覆盖, 由于积雪的高反射性、低导热性, 影响着地气之间的热量传递, 因此土壤的温湿度变化较为平稳, 积雪有一定的保温作用; 冻土消融阶段, 气温回升, 积雪消融, 地表出露, 各层土壤温度随气温变化而变化, 且越靠近地表, 土壤温度越高, 变幅越大, 与冻结期完全相反。由于融雪水的下渗, 土壤湿度快速增加。进一步分析积雪与土壤温湿度的相关性得出, 积雪对土壤温湿度的影响分不同时期, 对土壤温度的影响主要在积雪覆盖时, 对土壤湿度的影响主要是在积雪消融时期, 这对于研究该地生态水文循环及后续融雪性洪水的模拟与预报具有一定的参考价值。

关键词: 天山北坡; 积雪消融; 季节性冻土; 不同冻融阶段; 土壤温湿度

The influence of snowmelt on soil temperature and moisture in different freezing-thawing stages on the north slope of Tianshan mountain

ZHANG Yin^{1,2}, HAIMIDAN · Helili³, GULIMIRE · Hanati⁴, LIU Qianqian^{1,2}, SU Litan^{1,*}

1 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Party School of Xinjiang Uygur Autonomous Region Committee of the Communist Party of China, Urumqi 830000, China

4 Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi 830049, China

Abstract: As a special cover, snow cover directly affects soil temperature, soil moisture distribution, freezing depth and freezing rate, and affects the local eco-hydrological processes. The existence of snow can affect the frozen soil, the interaction of surface-atmosphere, and change the energy exchange and temperature transfer between the soil and the atmosphere. The freezing-thawing process of soil has an important impact on soil water content. It is of great significance for the effective utilization of frozen soil resources, the guidance of irrigation water, the study of soil evaporation, groundwater recharge and local eco-hydrological cycle. In this paper, meteorological data, soil temperature and moisture data and snow

基金项目: 自治区重点实验室课题(2018D04024); 国家自然科学基金项目(U1603342, 41961002)

收稿日期: 2019-01-04; **网络出版日期:** 2019-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sulitan@ms.xjb.ac.cn

cover data were used to analyze the characteristics of seasonal frozen soil temperature and moisture changes in the study area. Based on the data of soil water content from November 1, 2017 to March 31, 2018 in the Alatobe Basin, Ili, on the northern slope of Tianshan Mountains, the different freezing-thawing stages of soil were divided, and the effects of snow melting on the temperature and moisture of seasonal frozen soil were analyzed. The results show that snow melting has a great influence on the temperature and moisture of seasonal frozen soil. The soil was frozen beginning in November in Alatoobe Basin, and the soil freezing time lagged with the increase of soil depth. The soil freezing process is one-way, starting from the surface, while the melting process is two-way, starting from both the surface and the bottom. During the whole freezing-thawing period, the change of soil temperature and moisture depends on the depth of snow cover, atmospheric temperature and snow surface temperature. And it mainly affects the surface soil temperature. The deeper the soil depth is, the more slightly the change of soil temperature and moisture is. During the soil freezing stage, the soil temperature and moisture continued to decline, the surface soil temperature and moisture were greatly affected by temperature, and the fluctuation was obvious, while the deep soil temperature and moisture changed slightly. When the soil was completely frozen, there was stable snow cover. Because the high reflectivity and low thermal conductivity of snow affected the heat transfer of surface-atmosphere, the change of soil temperature and moisture was relatively stable, and the snow cover had a certain degree. During the thawing stage, the temperature rises, the snow melts and the surface exposes. The soil temperature varies with the change of temperature. The closer to the surface, the higher the soil temperature, the larger the change range, which is completely contrary to the freezing period. Soil moisture increases rapidly due to the infiltration of snowmelt water. Further analysis of the correlation between snow cover and soil temperature and moisture shows that the influence of snow cover on soil temperature and moisture can be divided into different periods. The influence on soil temperature is mainly in snow cover, and the influence on soil moisture is mainly in snow melting period, which has a certain reference value for the study of the eco-hydrology cycle and the simulation and prediction of subsequent snowmelt flood in this area.

Key Words: northern slope of the Tianshan Mountains; snow cover and melting; seasonal frozen soil; different freezing-thawing stages; soil temperature and moisture

积雪是一种特殊的覆被,能调节地表水循环,影响当地的水文过程,同时也是重要的淡水资源,是干旱与半干旱区重要的土壤水分补给源^[1]。冻土是 0℃ 以下,并含有冰的各种岩石和土壤。其中存在于年均温高于 0℃ 环境中,冬季冻结、春季融化的土壤或疏松岩石层称为季节性冻土^[2-3]。随着冻土区温度周期性地发生正负变化,冻土层中的水分相应地发生相变与迁移,使得冻土层发生变形,产生冻胀、融陷和流变等一系列复杂的过程^[4-6]。积雪的存在可对冻土产生影响,积雪具有导热性弱、反射率高、热容量大等特性^[7-8],会影响地气之间的相互作用,改变土壤与大气之间的能量交换与温度传递。

近年来,国内外学者对土壤水分变化的相关研究越来越多。以天山北坡军塘河流域为研究区,杨绍富等人^[9]分析了土壤湿度在融雪期的变化情况以及与土壤温度和气温之间的关系,发现二者有很高的相关性。蒋睿奇、付强等人^[10-11]讨论了不同积雪覆盖条件下冻融土壤水分迁移规律和土壤温度变化规律。Cheng 等人^[12]认为不同植被覆盖度对季节性冻土土壤温度和水分的变化也有一定的影响。针对天山北坡融雪期季节性冻土的融化过程和特点,王敬哲^[13]等人进行了详细地分析。已有研究表明^[14],土壤中冰的存在极大地改变了土壤的水文和热性质。Yukiyoshi 等人^[15]研究发现,积雪沉积的时间和厚度的变化会导致土壤霜冻深度的急剧下降和土壤水分动态的变化。上述研究主要针对积雪、融雪期季节性冻土的变化情况,而对于土壤不同冻融阶段的研究较少,鉴于土壤不同冻融阶段土壤温度、土壤水分及水分迁移过程等存在差异,因此基于土壤不同冻融阶段的相关研究很有必要。

土壤的冻融过程对土壤含水量有着重要影响,对有效利用冻土资源,指导农田灌溉用水,研究土壤的蒸发、地下水补给和当地生态水文循环具有重要的意义^[16]。因此本研究拟利用天山北坡伊犁阿热都拜流域

2017 年 11 月—2018 年 3 月观测资料,划分土壤不同冻融阶段:土壤冻结、土壤完全冻结、冻土消融 3 个阶段,结合积雪不同阶段,旨在研究积雪消融对季节性冻土区土壤温湿度变化的影响。

1 研究区与实验方法

1.1 研究区概况

伊犁哈萨克自治州,位于中国西北边陲,新疆西北部,伊犁河谷东端,巩乃斯河河谷地带,地处巩乃斯河上游。深居内陆,远离海洋,地势东高西低,北东南三面环山,西部敞开,湿润气流难以进入,属于半干旱的大陆性气候^[17],山地气候特点明显。研究区土壤冬季冻结,夏季消融,属于典型的季节性冻土区。

本研究选择位于天山北麓的伊犁新源县阿热都拜小流域作为研究区,研究积雪对土壤温湿度变化的影响,时间选择冬春季,此时地表植被覆盖度小,降雪直接覆盖到地面,并且将观测站建在山区流域下游汇流区的出山口,远离人类居住区,受人类干扰小,因此具有重要的研究价值。

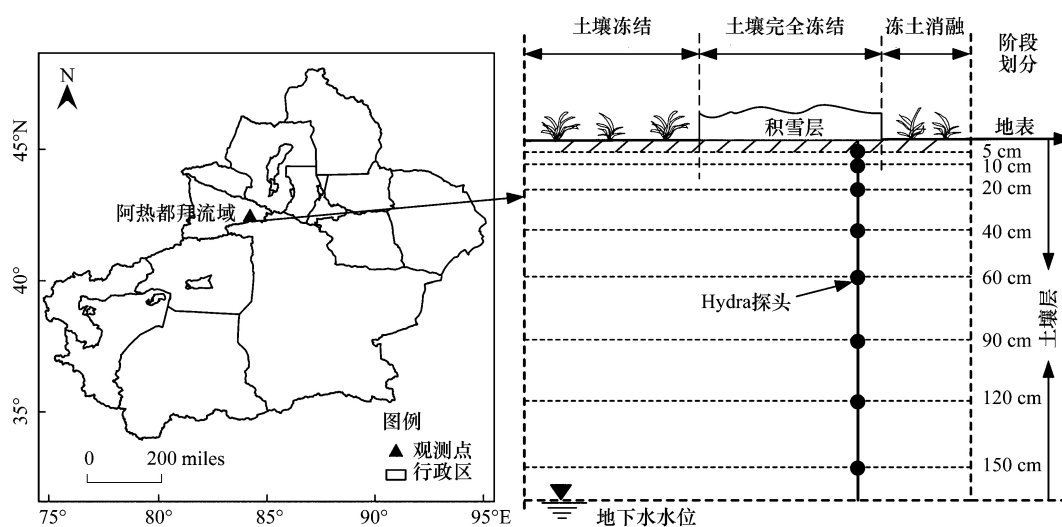


图 1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

1.2 实验方法和数据处理

2017 年 8 月 31 日在研究区观测站建立土壤剖面观测系统,划分 5、10、20、40、60、90、120、150 cm 共 8 个土壤层(图 1),测量土壤温度和土壤含水率,数据采集时间始于 2017 年 9 月 1 日,时间间隔为 1 天。由于研究区降雪融雪主要集中在 11 月—3 月,且土壤从 11 月开始冻结,2 月底开始消融,因此截取研究时段为 2017 年 11 月 1 日—2018 年 3 月 31 日,历经冬季降雪期和春季融雪期。

土壤水分与土壤温度密切相关,土壤温度决定土壤的冻融状态,参照唐文政等人^[4]的划分标准,利用土壤含水率数据划分土壤不同冻融阶段为土壤冻结、土壤完全冻结、冻土消融 3 个阶段。冻结阶段,受地面气温的影响,土壤表层发生“昼融夜冻”日循环;完全冻结阶段,土壤自表面向下冻结达到最大冻结深度;消融时期,受气温影响,冻结土层开始解冻,含水率上升。

本研究所用数据包括气象数据、土壤温湿度数据和积雪数据。其中气象与积雪数据来自天山北坡阿热都拜小流域汇流区出山口的观测点 1 号气象站(43°22′35″N,83°45′20″E),其海拔高度为 1400 m,土壤温湿度数据的测量采用来自澳大利亚 Stevens 公司的 Hydra Probe II 型土壤水热传感器,分别对 8 个不同土壤层的土壤温度和土壤含水率进行测量。将所测数据进行整理分类,并绘制相关图表,进而分析天山北坡积雪消融对季节性冻土不同冻融阶段土壤温湿度变化的影响。

2 结果与分析

2.1 土壤冻融阶段的划分

为了具体分析研究区土壤冻融期土壤温湿度的变化规律,利用新疆伊犁阿热都拜流域 2017 年 11 月—2018 年 3 月(整个冻结融化期)野外实验站观测的季节性冻土的土壤温度和土壤水分数据对该地区季节性冻土土壤温湿度变化的特点进行分析,作各层土壤含水率及土壤温度变化曲线(图 2)。由图 2 可知,在 11 月下旬,土壤温度低于 0℃,此时土壤含水率下降,土壤开始冻结;2 月下旬,土壤温度逐渐升高,高于 0℃,含水率上升,冻土层快速消融(图 2)。因此按照前面所述划分标准,结合图 2,划分了研究区土壤的不同冻融阶段(表 1)。

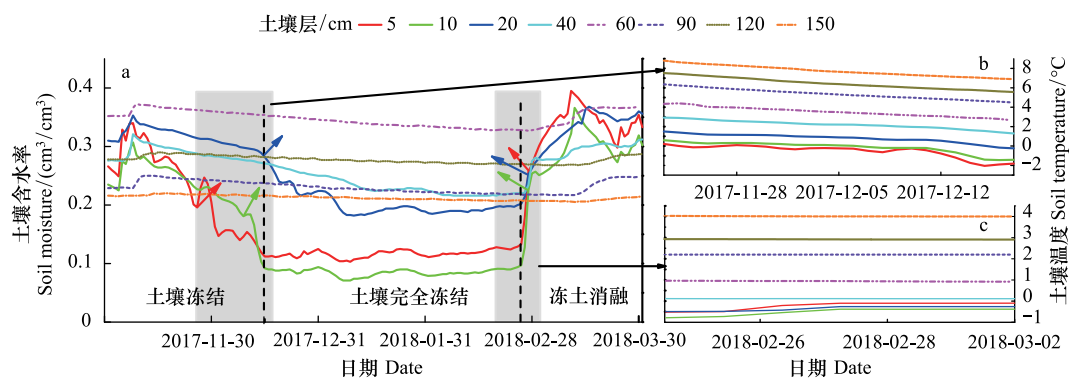


图 2 土壤冻融时期各层土壤含水率及土壤温度变化曲线

Fig.2 Curve of soil moisture content and soil temperature in freezing-thawing stage

研究表明,在整个研究时段中,土壤从 11 月下旬开始冻结,土层冻结深度最大到 20 cm 左右,40 cm 及以下的土层受上层土壤的保护作用,不发生冻融过程,冻结开始时间随土壤深度的增加而滞后,且冻结时长也在减少。在整个土壤冻融过程中,冻结过程单向进行,从表层开始冻结,向深层延伸,而消融过程是双向进行,从表层和底层同时进行,这与边晴云、胡铭等人^[18-19]的研究是一致的。

表 1 研究区各层土壤冻融情况的划分

Table 1 The division of freezing-thawing condition of each layer of soil in the study area

土壤层/cm Soil layers	土壤冻结阶段 Soil freezing stage		土壤完全冻结阶段 The stage of complete freezing of soil		冻土消融阶段 Permafrost ablation stage	
	起止时间	天数/d	起止时间	天数/d	起止时间	天数/d
5	11-25—12-13	19	12-14—2-25	74	2-26 以后	34
10	12-7—12-14	8	12-15—2-26	74	2-27 以后	33
20	12-16—1-4	20	1-5—2-26	53	2-27 以后	33
>40	无	0	无	0	无	0

2.2 土壤冻融期土壤温湿度变化规律

在整个土壤的冻结融化过程中,表层土壤温湿度随时间的变化幅度较大,而深层土壤的变化幅度较小。冻土层消融从 2 月下旬开始,到 3 月中旬以后完全消融。当土壤完全冻结阶段时,20 cm 土壤层的平均温度小于 0℃,说明该地区土壤冻结深度超过 20 cm。可见积雪对表层土壤影响较大,表层土壤的温湿度随着时间的推移,土壤温湿度变化趋势为“下降-平稳-上升”,变化较大,而深层土壤变化小,波动不明显。

为进一步分析土壤温湿度在时间和空间上的变化规律,对不同冻融阶段的土壤温湿度变化进行了对比(图 3)。时间尺度上,土壤的 3 个不同冻融阶段中,土壤完全冻结时的土壤含水率和温度最低,土壤含水率最高发生在冻土消融阶段,土壤温度最高发生在土壤冻结阶段;空间尺度上,3 个阶段土壤含水率随着深度的增

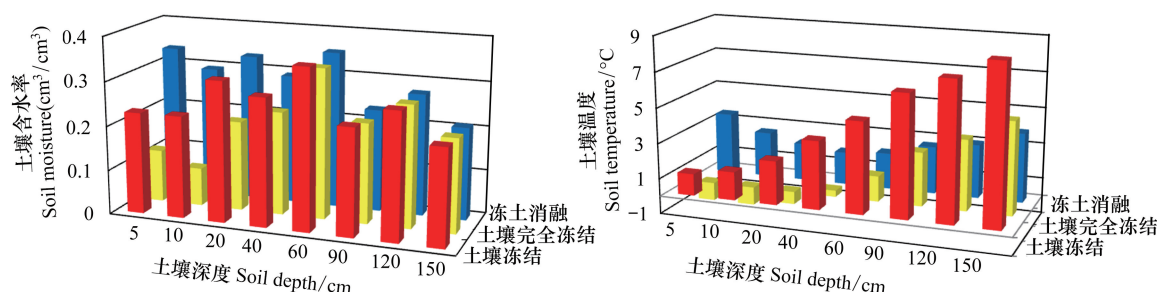


图3 不同冻融阶段土壤温湿度变化情况

Fig.3 Changes of soil temperature and moisture at different freezing-thawing stages

加变化趋势相同,大致先增加后减少,且表层土壤含水率的变化大,而40 cm以下土层的含水率变化较为稳定。土壤温度在土壤冻结前后的变化趋势相反,冻结期间呈递增的趋势,温度变化明显,而消融期间土壤温度随深度的增加先减少后增加。

综合图2、图3可知,在土壤冻结消融期间,阿热都拜流域表层土壤的温湿度变化明显,且土壤的冻结深度最深到20 cm左右,20 cm深度以下由于受上层土壤的保护作用,并未发生冻融过程,因此后面着重分析积雪对表层土壤温湿度变化的影响。

2.3 积雪对土壤温度的影响分析

在整个土壤冻融期间,土壤温度的变化取决于大气温度、雪面温度和积雪深度的高低,且与其稳定性有关(图4)。由于积雪包括新鲜雪和旧雪,雪密度不同,因此为了方便对比分析,将松软雪深转化为雪水当量。将土壤分不同冻融阶段进行分析。

12月中旬之前,土壤处于冻结阶段,土壤冻结从表层开始。此时积雪较少,大气温度和雪面温度在同步持续降低,土壤温度也随之降低,其中表层土壤温度(5、10、20 cm)受温度影响较大,波动明显。

在12月中旬到2月下旬,土壤完全冻结,积雪覆盖增加,太阳辐射能量本应由土壤表面向下传输,但由于积雪的高反射率和低导热性,被积雪阻碍,隔离了地气之间的直接作用,因此在积雪覆盖下,虽然气温回升,但土壤温度并没有立刻随着气温的升高而升高,而是较之前没有积雪覆盖时更为稳定。

3月份土壤中的冻土层处于消融阶段,此时气温回升,雪面温度和各层土壤温度也迅速回升,积雪快速消融,到3月8日左右,积雪覆盖几乎为0,地表出露。整体上土壤温度随气温的变化而变化,但表层土壤气温变化波动明显,升温最快,变幅最大,随着土壤深度的增加,变幅减小,且越靠近地表,温度越高,土壤温度5 cm>10 cm>20 cm,与冻结期完全相反。此时土壤温度主要受大气温度的影响。

综合分析表明,大气温度、雪面温度和积雪深度都影响着土壤温度的变化,且主要影响表层。结合图5可以看出,冻结只发生在土壤表层,且越靠近地表,土壤温度就越低。随着土壤层深度的增加,土壤温度逐渐升高;40 cm以下土壤层的最低温高于0℃,不发生土壤冻融过程。另外当有积雪覆盖时,积雪隔绝了土壤与大气之间的热量交换,能够保持土壤中的热量不受损失,使得土壤层温度变幅减小,因此当有积雪覆盖时,积雪对地温起到了保温作用。

2.4 积雪对土壤湿度的影响分析

新疆深居内陆,远离海洋,水资源相对短缺,而季节性融雪水是新疆很重要的水资源,是其农业灌溉用水的主要来源。积雪消融后,融雪水向土壤下渗,使得土壤层含水率增加。由图4可知,11月—3月土壤整个冻融期间,5、10、20 cm土壤层含水率呈“下降-平稳-上升”趋势,即土壤含水率随时间变化规律是先逐渐下降,降至最低点后,维持平衡一段时间后,逐渐升高。40 cm土壤层含水率变化不太明显,40 cm土壤层以下包括60、90、120、150 cm土壤层的含水率,随时间的推移,基本无太大变化。可见,积雪对土壤含水率的影响深度最多到达20 cm左右,当土壤剖面深度超过40 cm后,有积雪覆盖和无积雪覆盖的土壤层含水率基本一致。

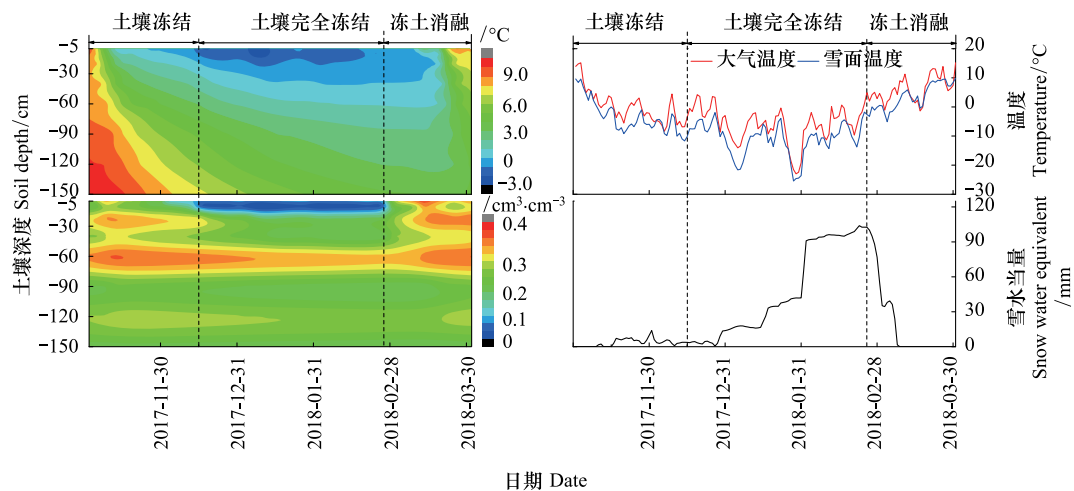


图4 各层土壤温湿度与大气温度、雪面温度和雪水当量的关系

Fig.4 Relationship between soil temperature and moisture in each layer and atmospheric temperature, snow surface temperature and snow water equivalent

将土壤分不同冻融阶段进行分析:

土壤处于冻结阶段时,大气温度持续降低,雪面温度和土壤温度也随之降低,当土壤深度达到冻结温度时,土壤层的液态水分发生冻结,土壤含水率也开始减少。表层土壤(5、10、20 cm)受外界影响较大,土壤含水率变化较快,深层土壤的土壤层含水率较为稳定。

直到12月中旬之后,积雪深度增加,稳定覆盖,积雪的高反射性使得土壤温度降低,土壤表层完全冻结,冻土层的存在使得融雪水很难下渗,因此土壤层的含水率下降到最低含量后维持稳定。

自2月26日开始土壤含水率快速上升。此时气温回升,冻土层开始消融,土壤层中的冻结水融化,加上雪面温度同步上升,积雪快速消融,融雪水的下渗使得土壤含水率快速上升一直到达最高点,土壤水分的迁移量增加。到3月10日左右,气温骤降到0℃以下,导致消融的土壤再次冻结,土壤含水率出现短暂的下降。在这一阶段,积雪不仅能够通过自身的消融增加土壤湿度,还可以通过影响土壤温度间接改变土壤湿度。

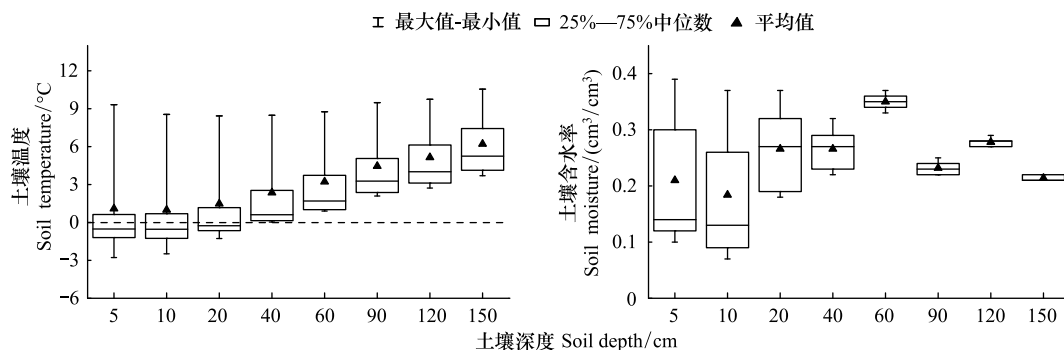


图5 土壤冻融期各层土壤温湿度变化情况

Fig.5 Changes of soil temperature and moisture at different layers during freezing-thawing period

综合图4、图5分析表明,在整个土壤冻融期间,各个箱形图的箱体大小呈逐渐减小的趋势,在箱型图中,箱体的大小反映了样本的离散程度,可见,随着土壤层深度的增加,各层土壤含水率的离散程度逐渐减小,数据更集中于样本均值,即表层土壤在冻结前后土壤含水率的变幅较大,深层土壤含水率变化较为稳定。其中在土壤冻结阶段,土壤温度在0℃以下,土壤中的液态水分冻结,冻土层的存在阻隔了融雪水的下渗,此时积

雪的覆盖对土壤含水率的影响小;在冻土消融阶段,积雪消融,融雪水的下渗是土壤含水率增加的主要原因。

2.5 积雪与土壤温湿度相关性分析

由前面分析可知,积雪消融主要影响土壤表层的温湿度,因此只研究积雪与表层土壤温湿度的相关性。已有研究表明^[20-21],积雪覆盖对冻土的水热状况具有显著的影响,因此划分不同阶段:选取 2017 年 11 月 1 日—2017 年 12 月 25 日为非稳定积雪覆盖阶段,2017 年 12 月 26 日—2018 年 2 月 25 日为稳定积雪覆盖阶段,2018 年 2 月 26 日—2018 年 3 月 8 日为积雪消融阶段,分析不同时期积雪深度(用雪水当量代替)与土壤温湿度的相关性。

表 2 不同时期雪水当量与土壤温湿度的相关系数

Table 2 The correlation coefficient between snow water equivalent and soil temperature and moisture in different periods

阶段类型 Stage type	土壤温度 Soil temperature				土壤含水率 Soil moisture			
	5 cm	10 cm	20 cm	40 cm	5 cm	10 cm	20 cm	40 cm
非稳定积雪覆盖 Non-stable snow cover	-0.474 **	-0.485 **	-0.507 **	-0.526 **	-0.323 *	-0.136	-0.103	-0.164
稳定积雪覆盖 Stable snow cover	0.506 **	0.467 **	0.194	-0.748 **	0.531 **	0.173	-0.226	-0.828 **
积雪消融 Snow ablation	-0.711 *	-0.627 *	-0.559	-0.706 *	-0.897 **	-0.746 **	-0.929 **	-0.763 **

** 和 * 分别表示显著性达到 0.01 和 0.05 水平

由表 2 可知,在非稳定积雪覆盖阶段,雪深与表层土壤温度为显著负相关,在稳定积雪覆盖阶段,雪深与表层土壤温度的相关性达到显著性水平,且雪深对表层土壤温度的影响程度要高于更深层次的土壤;积雪消融时,雪深与土壤温度的相关性与积雪覆盖时情况一致。

雪深与土壤含水率同样具有一定的相关性。在积雪覆盖时,雪深对土壤含水率的影响较小,这与前面所说“积雪覆盖时,土壤温度小于 0℃,土壤层中的液态水分迁移少,冻土层的存在阻止了水分下渗”的结论一致;积雪消融时,雪深与表层土壤含水率的相关性均达到了显著性水平。此时,气温回升,融雪水下渗,增加了土壤层的含水率。

对比分析雪水当量与土壤温湿度的相关系数可以得出,积雪对土壤温湿度的影响程度分不同时期,对土壤温度的影响主要是在积雪覆盖时期,对土壤湿度的影响主要是在积雪消融时期。

3 结论与讨论

通过对天山北坡伊犁阿热都拜流域土壤冻融状况及不同土壤冻融阶段积雪消融对土壤温湿度变化的分析,得到如下结论:

(1)阿热都拜流域土壤从 11 月开始冻结,冻结开始日期随着土壤深度的增加而滞后,3 月中旬过后,冻土层完全消融。土壤冻结深度到 20 cm 左右,20 cm 以下的土层基本不发生冻结过程。且冻结过程单向进行,消融过程双向进行。在整个土壤冻融期间,土壤温湿度的变化取决于积雪深度和大气温度的高低,且与其稳定性有关。并且主要影响表层土壤温度,土壤层深度越深,土壤温湿度变化越平缓。

(2)土壤冻结阶段,土壤温湿度持续下降,这一阶段的表层土壤温湿度受气温影响较大,且波动明显,而深层土壤的温湿度变化平缓;当土壤完全冻结时,处于稳定积雪覆盖期,由于积雪的高反射性、低导热性,影响着地气之间的热量传递,因此土壤的温湿度变化较为平稳,积雪对土壤起到了一定的保温作用;冻土消融时,气温回升,积雪消融,地表出露,各层土壤温度随气温变化而变化,且越靠近地表,土壤温度越高,变幅越大,与冻结期完全相反。由于融雪水的下渗,土壤湿度快速增加。

(3)根据积雪消融与土壤温湿度的相关性可知积雪对土壤温湿度的影响程度分不同时期,对土壤温度的影响主要在稳定积雪覆盖时,对土壤湿度的影响主要是在积雪消融时期。

本研究通过划分土壤不同冻融阶段,结合积雪不同阶段,对阿热都拜流域积雪消融对土壤温湿度变化的

影响进行了分析,考虑到积雪本身性质的复杂性和不同地区土壤冻融过程的差异性,因此需要更多年限的数据、多次土壤冻融过程来证明结论的可靠性。目前,关于积雪对不同冻融阶段土壤温湿度的影响机理和耦合关系方面的研究还较少,至于积雪-融雪以及土壤水热的耦合关系有待进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] 王慧, 刘志辉, 张波. 干旱区季节性积雪融雪期含水率变化及其模拟—以新疆军塘湖流域为例. 干旱区资源与环境, 2013, 27(8): 131-136.
- [2] 白磊, 李兰海, 李倩, 包安明. 新疆北疆地区季节性冻土结冻过程与日积温的关系. 冰川冻土, 2012, 34(2): 328-335.
- [3] Cheng B, Beijing. Characteristics of spatial and temporal variation of seasonal and short-term frozen soil in China in recent 50 years. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(3): 432-443.
- [4] 唐文政, 王春霞, 范文波, 蓝明菊. 积雪与地表联合覆盖条件下冻融土壤水盐运移规律. 水土保持学报, 2017, 31(3): 337-343.
- [5] 陈渤黎, 罗斯琼, 吕世华, 方雪薇, 常燕. 基于 CLM 模式的青藏高原土壤冻融过程陆面特征研究. 冰川冻土, 2017, 39(4): 760-770.
- [6] 高珊, 尹航, 傅民杰, 吴明根, 董闯, 李龙. 冻融循环对温带 3 种林型下土壤微生物量碳、氮和氮矿化的影响. 生态学报, 2018, 38(21): 7859-7869.
- [7] 付强, 蒋睿奇, 王子龙, 李天霄, 马梓昇. 不同积雪覆盖条件下冻融土壤水分运动规律研究. 农业机械学报, 2015, 46(10): 152-159.
- [8] 王元, 刘志辉, 陈冲. 天山北坡融雪期雪层含水率、密度和雪层温度研究. 干旱区研究, 2014, 31(5): 803-811.
- [9] 杨绍富, 刘志辉, 闫彦, 叶朝霞. 融雪期土壤湿度与土壤温度、气温的关系. 干旱区研究, 2008, 25(5): 642-646.
- [10] 蒋睿奇. 不同积雪覆盖条件下季节性冻融黑土水热迁移数值模拟. 东北农业大学, 2015.
- [11] 付强, 马效松, 王子龙, 李天霄. 稳定积雪覆盖下的季节性冻土水分特征及其数值模拟. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 151-154.
- [12] Cheng H Y, Wang G X, Hu H C, Wang Y B. The variation of soil temperature and water content of seasonal frozen soil with different vegetation coverage in the headwater region of the Yellow River, China. Environmental Geology, 2008, 54(8): 1755-1762.
- [13] 王敬哲, 刘志辉, 塔西甫拉提·特依拜, 王岚, 张波. 天山北坡融雪期季节性冻土融化过程分析. 干旱区研究, 2017, 34(2): 282-292.
- [14] Niu G Y, Yang Z L. Effects of frozen soil on snowmelt runoff and soil water storage at a continental scale. Journal of Hydrometeorology, 2006, 7(5): 937-952.
- [15] Yuki Yoshi I, Masaki H, Shinji S, Tomoyoshi H, Shuichi H. Effects of snow cover on soil freezing, water movement, and snowmelt infiltration: A paired plot experiment. Water Resources Research, 2010, 46(9): 2095-2170.
- [16] 杨阳, 朱元骏, 安韶山. 黄土高原生态水文过程研究进展. 生态学报, 2018, 38(11): 4052-4063.
- [17] 殷剑虹, 徐予洋. 伊犁河谷气候变化特征分析. 沙漠与绿洲气象, 2007, 1(6): 20-23.
- [18] 边晴云, 吕世华, 陈世强, 文莉娟, 李照国, 潘永洁, 方雪薇. 黄河源区降雪对不同冻融阶段土壤温湿变化的影响. 高原气象, 2016, 35(3): 621-632.
- [19] 胡铭. 天山北坡季节性冻土冻融过程及影响因子分析. 新疆大学, 2013.
- [20] Hardy J P, Groffman P M, Fitzhugh R D, Henry K S, Welman A T, Demers J D, Fahey T J, Driscoll C T, Tierney G L, Nolan S. Snow depth manipulation and its influence on soil frost and water dynamics in a northern hardwood forest. Biogeochemistry, 2001, 56(2): 151-174.
- [21] Goodrich L E. The influence of snow cover on the ground thermal regime. Canadian Geotechnical Journal, 1982, 19(4): 421-432.