

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.1085

DAI Licong, KE Xun, ZHANG Fawei, et al. Characteristics of hydro-thermal coupling during soil freezing-thawing process in seasonally frozen soil regions on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):390-398. [戴黎聪, 柯浔, 张法伟, 等. 青藏高原季节冻土区土壤冻融过程水热耦合特征[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):390-398.]

青藏高原季节冻土区土壤冻融过程水热耦合特征

戴黎聪^{1,2}, 柯浔^{1,2}, 张法伟¹, 杜岩功¹, 李以康¹, 郭小伟¹,
李茜¹, 林丽¹, 曹广民¹

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 青藏高原被誉为“中华水塔”, 其广泛分布的多年冻土和季节冻土在保证我国水资源安全上具有重要的地位。基于 2015 年 7 月 - 2016 年 6 月青海海北站季节冻土的水热监测数据(土壤含水量为未冻水含量), 分析了冻结深度的季节变化和冻融过程水热运移特征。结果表明: 各土层土壤温度与土壤水分含量变化均表现为“U”型。土壤温度变化规律与日平均气温基本一致, 但滞后于日平均气温的变化, 滞后时间取决于土层深度。与多年冻土冻融规律不同, 海北站季节冻土表现为单向冻结、双向融化特征, 冻融过程大致可划分为三个阶段: 冻结初期、冻结稳定期和融化期。同时, 季节冻土消融速率大于冻结速率, 且融化过程中以浅层土壤融化为主。在冻结过程中, 土壤水分沿上、下两个方向分别向冻结锋面迁移, 各土层土壤含水量迅速下降。而在融化过程中, 各土层土壤含水量逐渐增加, 且在浅层土壤形成一个土壤水分的高值区。土壤冻融过程中未冻水含量与各土层土壤温度具有较好的相关关系, 且浅层土壤拟合效果优于深层土壤。本研究对揭示高原关键水文过程以及寒区水热耦合模型构建具有重要意义。

关键词: 季节冻土; 季节变化; 冻融过程; 土壤温度; 土壤水分; 青藏高原

中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0390-09

0 引言

土壤冻融水热运移过程作为寒区水循环的关键水文过程, 在水资源、农业、人类活动及环境中具有重要地位^[1-5]。近年来, 随着全球气候变暖的加剧, 我国冻土面积退化严重, 其水热耦合过程也发生了一系列变化^[6]。研究土壤冻融过程水热耦合特征和机理, 对揭示高原水文过程并建立土壤水热耦合模型具有重要意义。

过去关于多年冻土的水热耦合特征已经做了大量工作, 如赵林等^[7]对青藏高原五道梁附近多年冻土活动层中水热传输过程研究发现, 根据水热运移特征的不同, 可将活动层冻融过程大致分为夏季

融化过程、秋季冻结过程、冬季降温过程和春季升温过程, 且在不同冻融过程其水热运移规律明显不同, 如在土壤冻结过程中, 土壤水分向冻结锋面迁移, 致使各土层土壤含水量在冻结期迅速下降, 而在融化期土壤水分向融化锋面迁移, 从而增加活动层底部水分含量^[8]。此外, 还有研究表明, 在多年冻土冻结过程中, 未冻水含量与土壤负温具有一定的相关关系, 如胡国杰等^[9]通过对青藏高原多年冻土区土壤冻融过程水热动态变化研究发现, 各土层土壤温度与未冻水含量具有较好的相关关系, 且随着土层深度的增加相关性越强。总的来说, 过去关于青藏高原土壤冻融过程水热耦合已做了大量工作并取得一定进展, 但以往研究多是侧重于水、热

收稿日期: 2018-07-09; 修订日期: 2018-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41730752; 31700395; 3177053; 31400483); 青海省海南州小流域的综合治理及示范项目(2019-SF-152)资助

作者简介: 戴黎聪(1993 -), 男, 江西上饶人, 2016年在江西农业大学获学士学位, 现为中国科学院西北高原生物研究所在读博士研究生, 从事高原水文生态学研究. E-mail: 278663147@qq.com

通信作者: 郭小伟, 高级工程师, 从事水文生态学研究. E-mail: guoxw@nwipb.cas.cn.

单一传输过程研究^[10-13], 对水热耦合过程研究较为匮乏。此外, 过去多集中于多年冻土水热耦合研究^[14], 对季节冻土冻融过程水热耦合及迁移特征研究较为薄弱。冻土作为不透水层或者弱透水层, 能够从性质上改变土壤水热运移规律^[3], 在土壤冻结过程中, 由于积雪和降水的入渗, 冻结层积累了较多的水分, 而在融化过程, 冻结层融水和积雪充满整个包气带, 在一定程度上起到蓄水调节作用; 其次, 冻土本身的不透水性能够减少土壤水分蒸发和入渗, 从而改变降水的入渗能力以及土壤含水量的变化^[15]。以往研究认为, 季节冻土的冻融过程大致可分为五个阶段: 不稳定封冻期、封冻期、不稳定融冻期、融冻期和无冻期, 且各时期水文特征明显不同于非冻土区域^[4]。另一方面, 土壤冻融过程能够显著增加表层土壤含水量, 增加幅度可达 20% ~ 40%^[16-17], 从而在一定程度上缓解干旱对植被水分的胁迫。此外, 还有研究者试图通过模型方法模拟季节冻土的水热耦合特征^[10], 如郑秀清等^[18]通过汽态水迁移和热对流迁移的水热耦合数值模型, 模拟了自然条件下季节冻土冻融过程及其水热耦合规律, 发现冬灌对土壤储水增墒具有较好的效果。但由于土壤冻融过程水热耦合规律较为复杂, 模型模拟效果较差, 且多数为经验模型, 缺乏水热运移过程关键机理研究; 另一方面模型缺乏野外实测数据验证, 导致模型的推广与运用受到极大的挑战^[19-20]。因此, 有必要结合野外实测数据, 为冻融水热耦合模型提供数据支持。

青藏高原是我国冻土的主要分布区域, 同时也是中、低纬度地带冻土厚度最深、分布面积最广的地区之一^[21], 其中季节冻土面积为 $1.46 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[22]。由于其独特的气候环境, 季节冻土的冻融过程对气候变化更为敏感, 水热迁移过程相比于其他地区更为复杂。因此研究该区域季节冻土的水热耦合特征, 对预测未来气候变化对高原水文过程影响具有

重要的意义。

本文以中国科学院西北高原生物研究所青海海北站为例, 该区域分布着典型的季节冻土, 通过获取 2015 年 7 月 - 2016 年 6 月水热实测数据, 详细探讨季节冻土水热耦合特征, 以期水热模型的模拟及高原水资源合理利用提供理论基础。

1 研究区概况

本研究以青海海北站 (37°37' N、101°19' E) 季节冻土为研究对象, 该区以山间滩地和丘陵低山为主, 滩地平均海拔 3 200 m, 地处祁连山东段北支冷龙岭南麓, 大通河河谷的西北部。其中, 冷龙岭主峰岗什卡海拔 5 254.5 m, 常年积雪, 并发育有现代冰川。站区受高原大陆性气候的影响, 一年无明显四季之分, 仅有冷暖二季, 干湿季分明。暖季温暖多雨, 冷季寒冷干燥, 多年平均降水量为 590.1 mm, 生长季 (5 - 9 月) 降水占全年降水总量的 80% 以上。该区年均气温约为 -1.7 °C, 极端最低气温为 -37.1 °C, 极端最高气温为 27.6 °C。年内无绝对无霜期, 相对无霜期仅 20 天左右。全年日照时间平均为 2 462.7 h, 年总辐射量为 2 182.54 MJ·m⁻²。植被类型为高寒矮嵩草草甸, 土壤类型为草毡寒冻锥形土 (mat-cryosod soil)^[23]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

土壤水热数据来源于青海海北站气象观测场, 观测数据包括各土层土壤温度和体积含水量、1.5 m 处气温和 0.5 m 处降水量等。具体信息见表 1。所有气象数据每 30 min 测量一次, 本文使用的气象数据为每天的平均值。另外, 季节冻土数据采用冻土管测量, 每天测一次, 空缺数据采用线性插值法补充。需要注意的是, 本文测得的土壤含水量均为未冻水含量。

表 1 海北站气象观测场仪器信息

Table 1 Information of instruments in the meteorological observation field of Haibei Station

测定指标	仪器型号	生产国及公司	埋设深度或架设高度	测量精度	测量范围
土壤含水量	Hydra Probe II	美国 Stevens	地下 5、10、15、20、30、40、50、60、80、100 cm	3%	0 ~ 100%
土壤温度	Hydra Probe II	美国 Stevens	地下 10、15、20、40、50、60、100 cm	0.1 °C	-30 ~ 70 °C
气温	HMP45C	芬兰 Vaisala	地上 1.5 m	0.1 °C	-50 ~ 80 °C
降水量	52203	美国 RM Young	地上 0.5 m	0.1 mm	0 ~ 999.9 mm

2.2 分析方法

土壤未冻水含量主要受土质、外界条件和冻融

历史三大因素影响, 且未冻水含量与负温具有一定的相关关系, 可用如下公式表达^[24]。

$$W_u = a\theta^b \quad (1)$$

式中： W_u 为土壤未冻水含量； θ 为土壤负温的绝对值； a 和 b 为与土质有关的经验常数。通过对土壤冻结过程中不同深度土壤负温绝对值与未冻水含量进行曲线拟和，可得到系数 a 、 b 。

3 结果与分析

3.1 土壤冻结深度变化规律

由土壤冻融过程(图1)可知，土壤冻结始于11月13日，结束于翌年6月21日，冻结持续时间为222天，其中冻结过程天数为139天，消融过程天数为83天，冻结过程时间约为消融过程时间的1.6

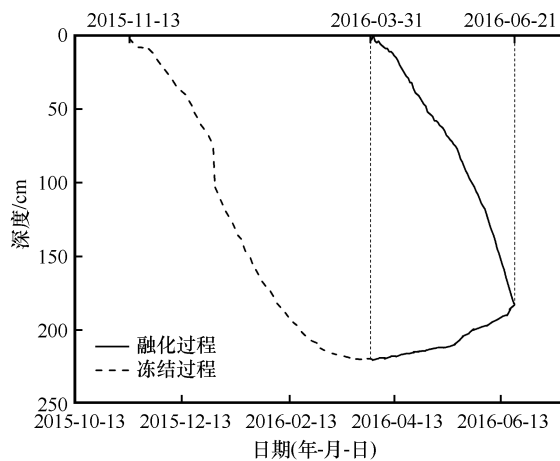


图1 土壤冻融过程

Fig. 1 The freezing-thawing process of soil

倍。冻融过程大致可分为冻结初期、冻结稳定期和融化期等三个时期。冻结初期为11月13日-11月23日，该时期冻土厚度较薄，约为8 cm，且表现为夜冻昼消特征。随着地温稳定 $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，开始进入冻结稳定期，该时期冻结锋面不断向下发展，冻土厚度逐渐增大，于3月31日达到最大，为220 cm。之后，随着土壤温度的升高，当地表温度稳定 $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，进入融化期，并于6月21日完全融化。需要注意的是，与多年冻土冻融规律不同，季节冻土冻融过程受地表温度和地下热流双重因素影响，呈现单向冻结(即浅层土壤向下开始冻结)、双向融化(即从土壤表层向下解冻和土壤冻层底部向上解冻)过程特征，且消融速率明显高于冻结速率。在融化过程中，以浅层土壤融化为主。

3.2 冻融过程中气温与土壤温度的变化规律

不同深度土壤温度均呈单峰曲线趋势，并在1月达到最低，且不同土层温度在土壤冻融过程存在较大差异(图2)。冻结过程土壤温度从上往下逐渐升高，土壤层处于放热过程；而融化过程深层土壤温度从上往下逐渐降低，土壤处于吸热过程。此外，在50 cm处土壤温度存在一个突变层。就土壤温度而言，浅层(0~60 cm)土壤温度波动较大，而深层(60~100 cm)土壤温度波动较小，这主要是由于浅层土壤温度受气温影响相对剧烈，且气温对土壤温度的影响随着土壤深度的增加逐渐减小，气温

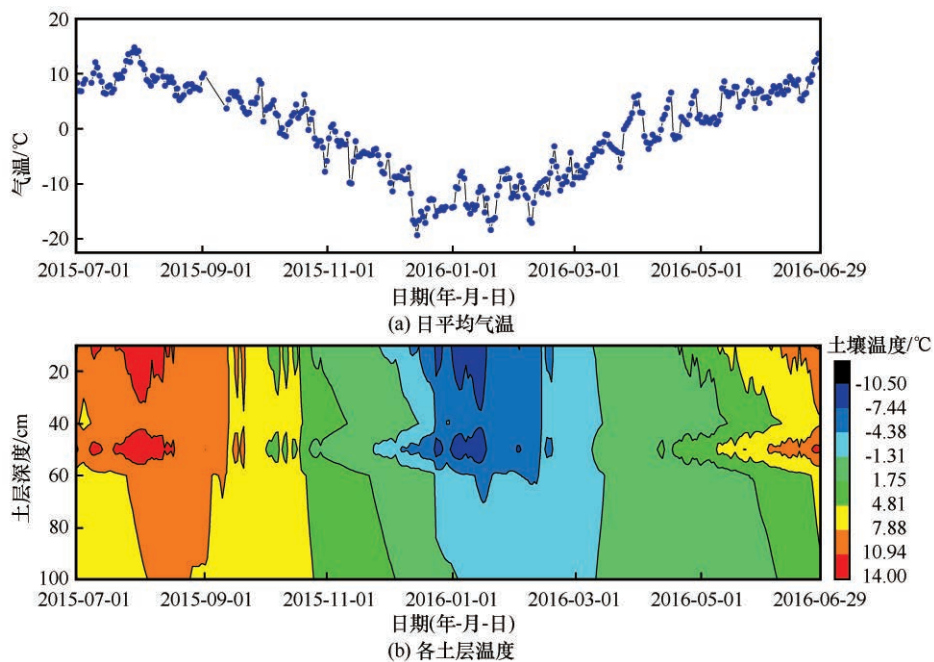


图2 一年中日平均气温(a)与各土层温度(b)变化

Fig. 2 Variations of daily mean air temperature (a) and soil temperature profile (b) during the year

对深层土壤温度影响较小。在整个冻融过程中,各土层土壤温度与气温变化趋势基本一致,但存在一定的滞后效应,滞后时间的长短取决于土层深度,浅层土壤滞后时间较短,深层土壤滞后时间较长。如气温在 2015 年 12 月 14 日达到最低值,为 $-19.29\text{ }^{\circ}\text{C}$,而 10、15、20、60 和 100 cm 深度土壤温度分别在 2016 年 1 月 21 日、1 月 22 日、1 月 23 日、1 月 25 日和 2 月 18 日达到最低值,分别滞后于气温 37、38、39、40 和 65 天。

3.3 冻融过程中土壤含水量变化规律

在整个冻融过程中,土壤含水量变化与土壤温度变化趋势大致相同[图 3(a)]。在非冻结时期,浅层(0~20 cm)土壤含水量变化较大,而深层(80~100 cm)土壤含水量变化较小,这主要是由于 5~9 月

降水丰富,且 70% 降水发生在 7~9 月[图 3(b)],致使表层土壤含水量变化剧烈,且含水量高于深层土壤。在土壤冻结过程中,各土层深度土壤含水量均有不同程度下降,且中层(20~90 cm)土壤含水量高于浅层(0~20 cm)含水量和深层(90~100 cm)土壤含水量,这主要是由于该时期气温持续下降,冻结深度逐渐加大,冻结锋面之下的水在温度梯度下开始向冻结锋面运移,不断补充冻结锋面以下的水分,从而导致各土层含水量均有不同下降,并在中层土壤形成一个水分高值区。随着气温的逐渐升高,冻土进入融化期,由于消融过程是双向融化过程(即从地表开始向下融化和地下向中间融化),该时期各土层含水量均逐渐增加,且浅层土壤含水量高于深层土壤含水量,在浅层土壤形成一个水分高值区。

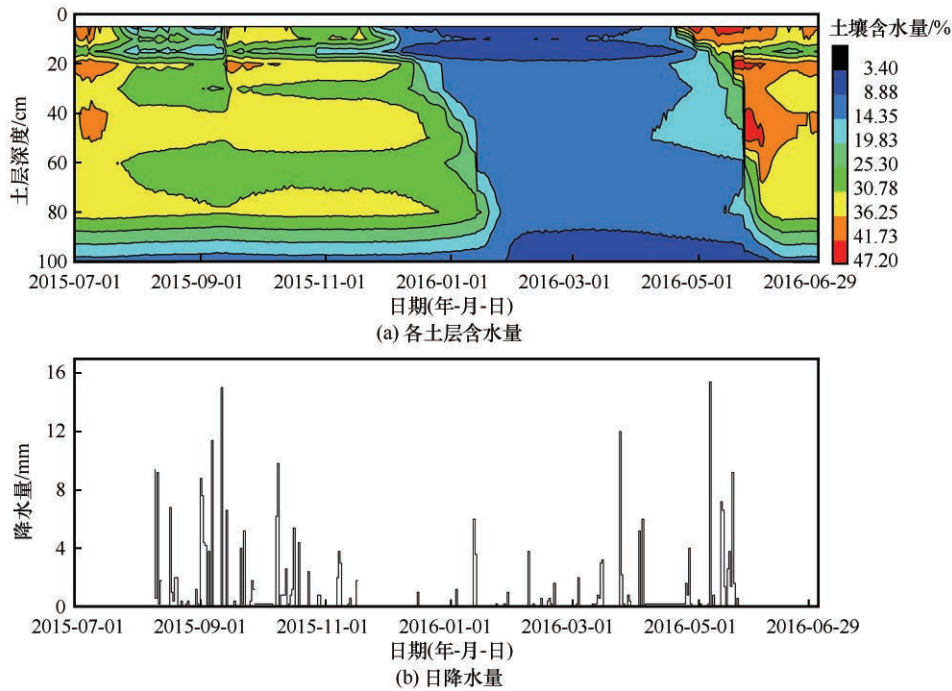


图 3 一年中各土层含水量(a)与日降水量(b)变化

Fig. 3 Variations of soil water content profile (a) and daily precipitation (b) during the year

3.4 冻融过程中土壤含水量和温度剖面特征

由图 4 可知,在土壤冻结初期和冻结稳定期,不同土层温度差异较大,在 50 cm 处存在一个突变点,0~40 cm 土壤温度表现为随着土壤深度的增加呈逐渐升高趋势,而 40~50 cm 土壤温度快速下降,之后随着土壤深度的增加逐渐升高。当气温稳定 $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,冻土进入融化期,该时期土壤温度除了 50 cm 处土层外,总体表现为稳定下降。对于土壤含水量而言,5~80 cm 土壤含水量在冻结初期和冻结稳定期总体均呈波动增加趋势,80~100 cm 土

壤含水量迅速下降,而在融化期土壤含水量表现为随着土层深度的增加逐渐减小,该时期的土壤含水量显著高于冻结初期和冻结稳定期。该结果进一步证实土壤冻结过程有利于土壤深层含水量的富集,而土壤融化过程有利于在表层土壤形成一个水分高值区。

此外,冻融过程中土壤含水量与各土层土壤温度具有一定的相关关系(图 5)。浅层(10、15 和 20 cm)土壤温度与土壤含水量拟合较好,而深层土壤温度与土壤含水量拟合的 R^2 值均较小。在 0~

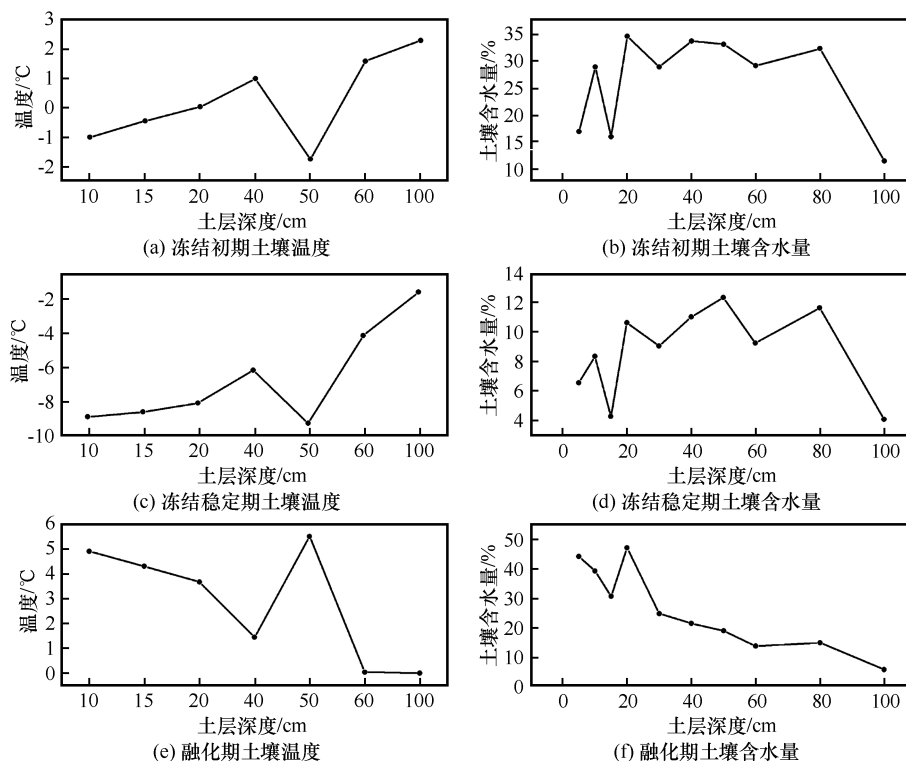


图4 不同冻融阶段的土壤温度与含水量剖面

Fig. 4 Profiles of soil temperature (a, c, e) and soil water content (b, d, f) in initial freezing period (a, b), stable freezing period (c, d) and thawing period (e, f)

60 cm 土层中, 50 cm 处土壤含水量与土壤温度拟合效果最差, 这可能与土壤温度剖面在 50 cm 处的突变点有关。100 cm 处土壤温度与土壤含水量拟合效果较差, 主要是由于该层存在较多土壤含水量接近于零的值, 影响了土壤水分与温度的拟合效果。

4 讨论

4.1 冻融过程中水热迁移特征

本研究发现该区域季节冻土呈现单向冻结双向融化特征, 这与多年冻土不同, 与北方季节冻土规律一致^[25-26], 这主要由于季节冻土受地表温度和地下热流双重因素影响。此外, 在冻土融化过程中, 浅层的解冻速率显著快于深层, 这主要与土壤积温有关, 即正积温越大, 消融速率越大, 浅层的解冻速率显著快于深层可能是由于浅层土壤正积温大于深层土壤正积温^[18]。在土壤冻融过程中, 各土层土壤含水量与土壤温度均呈“U”型分布, 表明在土壤冻融过程中, 土壤水分与土壤温度具有较好的一致性, 与过去研究结果基本一致^[9]。相比于土壤温度, 土壤水分变化更为复杂, 且浅层土壤含水量变化较大, 而深层含水量变化较小, 这主要是由于在整个冻融过程中表层土壤含水量受外界因素

影响较大, 如降雨、地表径流和蒸散等。在冻结过程中, 各土层土壤含水量均有不同程度减小, 这与其他季节冻土变化规律一致, 主要是由于在土壤冻结期间, 影响包气带土壤水分运移的因素除了重力势和基质势外, 还有温度势, 且温度势是影响土壤水分运移的主要驱动因子^[27]。土壤冻结过程中各土层土壤温度发生较大变化, 且与冻结锋面形成一定的温度梯度, 土壤水分在温度梯度作用下向冻结锋面运移, 从而导致各土层土壤含水量下降。与过去研究不同的是, 在土壤冻结过程中, 尽管各土层土壤含水量均呈下降趋势, 但深层土壤含水量明显高于浅层土壤含水量, 这说明在土壤冻结过程中深层土壤形成一个水分高值区, 同时也进一步反映出冻结层具有一定的隔水作用, 在土壤冻结过程中, 土壤水分富集在冻结底板上, 从而导致深层土壤含水量高于浅层土壤含水量。随着气温的逐渐升高, 土壤开始进入融化期, 该时期各土层土壤含水量均有显著升高, 且浅层土壤含水量上升幅度明显高于深层土壤含水量上升幅度, 即在融化过程中浅层土壤形成水分的高值区, 当浅层土壤含水量超过田间持水量时, 开始向深层运移, 从而补充深层土壤含水量, 且随着土壤深度的增加向下补充的水分依次

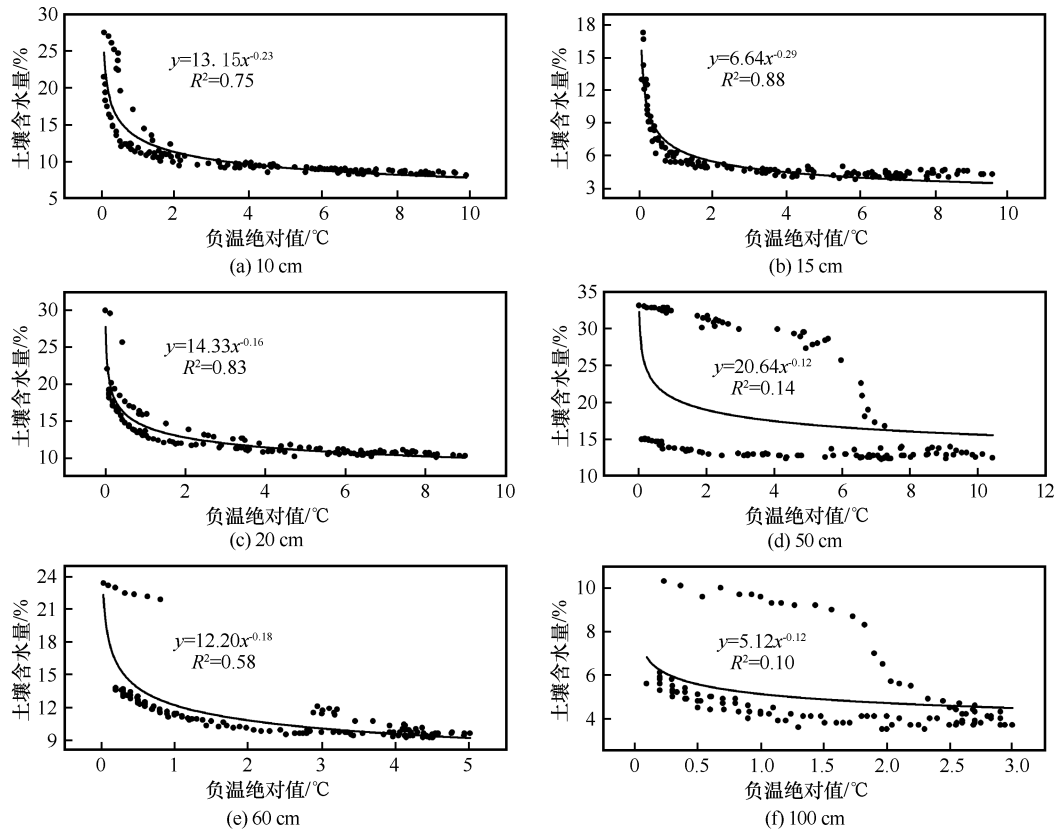


图5 各土层土壤负温绝对值与土壤含水量的关系

Fig. 5 Relationships between absolute value of the negative soil temperature and soil water content at depth of 10 cm (a), 15 cm (b), 20 cm (c), 50 cm (d), 60 cm (e) and 100 cm (f)

减小,这与过去在大兴安岭落叶松林冻结期水分变化基本一致^[15]。

高寒草甸土壤冻融过程水热耦合十分复杂,不仅受气候、海拔和地形地貌特征影响,还与土壤本身岩性、含盐量、土壤容重、孔隙度、透水性以及含水量有关^[28-30]。本研究只是基于一个站点一年水热观测数据,所得结论仅是对青海海北站季节冻土水热运移规律的初步认识,由于水热耦合具有较大的空间一致性,是否能反映其他季节冻土水热耦合规律,未来需要结合长时间尺度、多站点研究进一步明晰高寒草甸季节冻土土壤冻融过程水热耦合机制。

4.2 寒区水热耦合模型的不足与改进

近50年来,国内外关于寒区水文特征模型研究已做了大量工作^[4],但由于寒区气候环境恶劣,加之土壤冻融过程十分复杂,且影响因素较多,迄今为止涉及冻土的水文模型研究十分匮乏,尤其是关于季节冻土土壤冻融水热耦合模型。目前水热耦合特征模型分为两类:一类是热力学模型,其原理是运用不可逆热力学原理描述水热通量特征;另

外一类是基于多孔介质的液态水分黏性流动及热平衡原理模型^[31]。但总的来说,现有成果中的水热耦合模型主要基于多年冻土和高山冰雪区,不符合青藏高原季节冻土区规律,且多数模型只是基于物理成因的基本规律研究,为经验或半经验模型^[31],对一些关键水热迁移特征要素,如土壤水分运移驱动机制、土壤温度分布特征、土壤冻结深度、土壤冻融机理及土壤冻融蒸发作用缺乏本质机理研究。此外,多数寒区水文模型由于野外观测条件有限,缺乏必要的野外观测数据作为支持,致使多数水文模型的推广运用受到较大限制。因此,本研究以海北站为例,通过野外实测数据,针对青藏高原季节冻土的关键水文特征做了详细探讨,如水热迁移特征、土壤冻结深度、土壤冻融蒸发作用以及未冻水含量与土壤温度关系等,为未来寒区季节冻土水文模型的构建、增加模型的适应性以及提高模型的精度提供了重要理论依据。当然,研究者也有通过对非冻土区模型的改进来运用于冻土区,如陈仁升等^[32]通过对分布式水文模型土壤冻融过程嵌入流域的产流、蒸散发和入渗,从而构建了一个分布式

水热耦合模型, 弥补了分布式水文模型在冻土区域运用的不足。因此, 未来可以结合一些非冻土区的水文模型适当考虑冻融水热迁移特征进行改进, 从而运用于寒区。

5 结论

本研究以青海海北站为例, 分析了青藏高原季节冻土水热迁移特征, 得出以下几点结论:

(1) 就土壤温度而言, 各土层土壤温度季节变化基本一致, 冷季土壤温度梯度较大, 而暖季温度梯度较小, 反映了土壤冻融对土壤温度的显著影响。冻结过程中土壤温度从上往下逐渐升高, 土壤处于放热过程; 而融化过程中深层土壤温度从上往下逐渐降低, 土壤处于吸热过程。此外, 在 50 cm 处土壤温度存在一个突变层。

(2) 季节冻土的冻融过程大致可分为冻结初期、冻结稳定期和融化期等三个时期, 与多年冻土冻融规律不同, 季节冻土表现为单向冻结、双向融化特征, 且消融速率大于冻结速率。在整个冻融过程中, 各土层土壤温度与土壤含水量变化规律基本一致, 但相比于土壤温度, 土壤含水量变化更为复杂。土壤冻结过程中中层土壤形成一个水分高值区, 而消融时期在浅层土壤形成一个水分高值区, 这与多年冻土水分规律明显不同。

(3) 通过拟合冻结期末冻水含量与土壤温度的关系可知, 各土层未冻水含量与土壤温度具有较好的相关关系, 且深层土壤拟合效果好于浅层土壤。因此, 未来可基于未冻水含量与土壤温度关系, 建立一个季节冻土水热耦合模型。

参考文献(References):

- [1] Lu Qing, Zhao Dongsheng, Wu Shaohong. Simulated responses of permafrost distribution to climate change on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 3845 - 3857.
- [2] Fu Qiang, Hou Renjie, Li Tianxiao, et al. Soil moisture-heat transfer and its action mechanism of freezing and thawing soil [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 99 - 110. [付强, 侯仁杰, 李天霄, 等. 冻融土壤水热迁移与作用机理研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 99 - 110.]
- [3] Yao Nan, Zhao Ying, Zhang Jianguo, et al. Soil water and heat dynamics during freezing and thawing period under three grazing densities in grassland of Inner Mongolia [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(5): 132 - 138. [姚楠, 赵英, 张建国, 等. 不同放牧条件下内蒙古草原土壤冻融期水热动态[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(5): 132 - 138.]
- [4] Dai Licong, Guo Xiaowei, Zhang Fawei, et al. Seasonal dynamics and controls of deep soil water infiltration in the seasonally-frozen region of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 740 - 748.
- [5] Dai Licong, Guo Xiaowei, Du Yangong, et al. The response of shallow groundwater levels to soil freeze-thaw process on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Groundwater*, 2019, 57(4): 602 - 611.
- [6] Taylor R G, Scanlon B, Döll P, et al. Ground water and climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 322 - 329.
- [7] Zhao Lin, Cheng Guodong, Li Shuxun, et al. Thawing and freezing processes of active layer in Wudaoliang region of Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(23): 2181 - 2187. [赵林, 程国栋, 李述训, 等. 青藏高原五道梁附近多年冻土活动层冻结和融化过程[J]. *科学通报*, 2000, 45(11): 1205 - 1211.]
- [8] Zhang Meng. Hydrological characteristics of seasonal frozen soil and the study of soil water movement in frozen soil [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2016. [张盟. 季节性冻土水文特性及冻层土壤水分运移规律研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2016.]
- [9] Hu Guojie, Zhao Lin, Li Ren, et al. Characteristics of hydrothermal transfer during freezing and thawing period in permafrost regions [J]. *Soils*, 2014, 46(2): 355 - 360. [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.]
- [10] Yin Zhifang, Ouyang Hua, Xu Xingliang, et al. Water and heat balance and water use of shrub grassland and crop fields in Lhasa River valley [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(3): 303 - 314. [尹志芳, 欧阳华, 徐兴良, 等. 拉萨河谷灌丛草原与农田水热平衡及植被水分利用特征[J]. *地理学报*, 2009, 64(3): 303 - 314.]
- [11] Yi Jun, Zhao Ying, Shao Ming'an, et al. Soil freezing and thawing processes affected by the different landscapes in the middle reaches of Heihe River basin, Gansu, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 1328 - 1338.
- [12] Ge Jun, Yu Ye, Li Zhenchao, et al. Impacts of freeze/thaw processes on land surface energy fluxes in the permafrost region of Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(3): 608 - 620. [葛骏, 余晔, 李振朝, 等. 青藏高原多年冻土区土壤冻融过程对地表能量通量的影响研究[J]. *高原气象*, 2016, 35(3): 608 - 620.]
- [13] Zhang Mingli, Wen Zhi, Xue Ke, et al. The effects of precipitation on thermal-moisture dynamics of active layer at Beiluhe permafrost region [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(4): 159 - 164. [张明礼, 温智, 薛柯, 等. 降水对北麓河地区多年冻土活动层水热影响分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(4): 159 - 164.]
- [14] Jiang Guanli, Wu Qingbai, Zhang Zhongqiong. Study on the differences of thermal-moisture dynamics in the active layer of permafrost in different alpine ecosystems on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(1): 7 - 17. [蒋观利, 吴青柏, 张中琼. 青藏高原不同高寒生态系统类型下多年冻土活动层水热过程差异研究[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(1): 7 - 17.]
- [15] Yang Meixue, Yao Tandong, He Yuanqing. The role of soil moisture-energy distribution and melting-freezing processes on seasonal shift in Tibetan Plateau [J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(5): 553 - 558. [杨梅学, 姚檀栋, 何元庆. 青藏高原土壤水热分布特征及冻融过程在季节转换中的作用[J]. *山地学报*, 2002, 20(5): 553 - 558.]
- [16] Guo Zhanrong, Jing Enchun. Analysis on the characteristics of

- soil moisture transfer during freezing and thawing period [J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(3): 298 - 302. [郭占荣, 荆恩春. 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.]
- [17] Xiao Difang, Yan Chenrong, Wang Chunlei, et al. Outline of frozen soil hydrology in cold regions [C]// Professional papers on the 3rd Conference on Ice Engineering in China. Dalian, Liaoning: National Society of Ice Engineering, 1997: 345 - 368. [肖迪芳, 阎琛荣, 王春雷, 等. 寒区冻土水文学概论 [C]//第三届全国冰工程会议论文集. 辽宁大连: 全国冰工程学会, 1997: 345 - 368.]
- [18] Zheng Xiuqing, Fan Guisheng. Numerical emulation on simultaneous soil moisture and heat transfer under freezing and thawing conditions [J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2001, 13(3): 308 - 311. [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.]
- [19] Zhou Jiazuo, Wei Changfu, Li Dongqing, et al. A moving-pump model for moisture and heat transfer during soil freezing [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(4): 1083 - 1089. [周家作, 韦昌富, 李东庆, 等. 正冻土水热迁移的移动泵模型[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 1083 - 1089.]
- [20] Wang Xiaowei. Study of soil freezing and thawing law and simulation of hydrologic properties in the northern seasonally frozen soil area [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010. [王晓巍. 北方季节性冻土的冻融规律分析及水文特性模拟[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010.]
- [21] Zhao Shuping, Nan Zhuotong, Huang Yingbing, et al. The application and evaluation of simple permafrost distribution models on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2017, 28(2): 391 - 404.
- [22] Zou Defu, Zhao Lin, Sheng Yan, et al. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau [J]. *The Cryosphere*, 2017, 11: 2527 - 2542.
- [23] Zhang Fawei, Cao Guangmin. Resilience of energy and CO₂ exchange to a summer heatwave in an alpine humid grassland on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2017, 26(1): 385 - 394.
- [24] Xu Xuezu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Physics of frozen soil [M]. Beijing: Science Press, 2001: 43 - 175. [徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 43 - 175.]
- [25] Wang Yu, Zhou Li, Jia Qingyu, et al. Soil freeze-thaw characteristics of *Phragmites australis* marshes in Panjin [J]. *Wetland Science*, 2016, 14(3): 295 - 301. [王宇, 周莉, 贾庆宇, 等. 盘锦芦苇沼泽的土壤冻融特征[J]. 湿地科学, 2016, 14(3): 295 - 301.]
- [26] Wang Yongjie, Luo Jinming, Ye Yajie, et al. Influence on Zhalong Wetland succession by seasonal frozen-thawing action [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5): 34 - 38. [王永洁, 罗金明, 叶雅杰, 等. 季节性冻融对扎龙湿地演化的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 34 - 38.]
- [27] Zhang Lijie, Deng Guoli, Qin Zidong, et al. A study of phreatic forming character in seasonal frozen ground region [J]. *Natural Science Journal of Harbin Normal University*, 2000, 16(1): 96 - 98. [张立杰, 邓国立, 秦紫东, 等. 季节性冻土区潜水形成特征的研究[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2000, 16(1): 96 - 98.]
- [28] Han Binghong, Zhou Bingrong, Wu Rang, et al. Characteristics of hydrothermal factors in soil freezing and thawing alternation over southern alpine grasslands in Qinghai Province [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2018, 46(2): 361 - 368. [韩炳宏, 周秉荣, 吴让, 等. 青海南部高寒草地土壤冻融交替期水热特征分析[J]. 气象科技, 2018, 46(2): 361 - 368.]
- [29] Wang Yinxue, Zhao Lin, Li Ren, et al. A study of factors which control variation of permafrost table [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(5): 1064 - 1067. [王银学, 赵林, 李韧, 等. 影响多年冻土上限变化的因素探讨[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 1064 - 1067.]
- [30] Zhang Wei, Ji Ran. Response of maximum seasonally frozen depth and duration of soil frozen to climate change in Chaoyang Prefecture of Liaoning Province [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(1): 18 - 25. [张威, 纪然. 辽宁朝阳地区季节冻土最大冻土深度和持续冻结时间与气候变化的响应研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 18 - 25.]
- [31] Guan Zhicheng, Duan Yuansheng. Modeling the hydrological process of drainages in cold regions [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(Suppl 2): 266 - 272. [关志成, 段元胜. 寒区流域水文模拟研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(增刊2): 266 - 272.]
- [32] Chen Rensheng, Lü Shihua, Kang Ersi, et al. A distributed water-heat coupled (DWHC) model for mountainous watershed of an inland river basin (I): model structure and equations [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(8): 806 - 818. [陈仁升, 吕世华, 康尔泗, 等. 内陆河高寒山区流域分布式水热耦合模型(I): 模型原理[J]. 地球科学进展, 2006, 21(8): 806 - 818.]

Characteristics of hydro-thermal coupling during soil freezing-thawing process in seasonally frozen soil regions on the Tibetan Plateau

DAI Licong^{1,2}, KE Xun^{1,2}, ZHANG Fawei¹, DU Yangong¹, LI Yikang¹, GUO Xiaowei¹,
LI Qian¹, LIN Li¹, CAO Guangmin¹

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Tibetan Plateau is known as the “Chinese water tower”, where widely distributed permafrost and seasonally frozen soil, which playing an important role in ensuring the safety of water resources in China. Here, based on seasonally frozen soil and hydro-thermal data sets (the soil water content is unfrozen water content) from July 2015 to June 2016 in Haibei Station, Qinghai, we analyzed the seasonal variation of frozen depth and the characteristics of hydro-thermal coupling during freezing-thawing process. The results show that: Both soil temperature and soil water content profiles display a U-shape, indicating that there is a consistency between soil temperature and soil water content. The soil temperature profile shows a similar changing trend with mean air temperature, but the variation in mean air temperature is greater than the variation in soil temperature. Moreover, the change of soil temperature has lagged behind the change of mean air temperature, and the lag time depends on the depth of soil. The seasonal freezing-thawing process can be divided into three periods, i. e., initial freezing period, stable freezing period and thawing period; and the soil freezing-thawing process is characterized by unidirectional freezing and bidirectional thawing. Moreover, the thawing rate is greater than the freezing rate, and in thawing process the thawing from surface downwards is the main. During freezing process of soil, the unfrozen soil water migrates to the frozen front, leading to a decline for soil water content across different soil layers. However, the soil water content in shallow soil decreases more than that in deep soil. During thawing process of the frozen soil, the unfrozen soil water content across different soil layers increases successively. In addition, a high water content region is observed in shallow soil layers. There is a good correlativity between unfrozen water content and soil temperature across different soil layers during freezing process, and the correlation is better in shallow soil than in deep soil. This study would be useful for revealing the key hydrological process of plateau and constructing the hydro-thermal coupling model in cold regions.

Key words: seasonally frozen soil; seasonal variation; freezing-thawing process; soil temperature; soil water content; Tibetan Plateau

(责任编辑: 温智; 编辑: 武俊杰)