

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0027

MA Junjie, LI Ren, LIU Hongchao, et al. A review on the development of study on hydrothermal characteristics of active layer in permafrost areas in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1):195–204. [马俊杰, 李韧, 刘宏超, 等. 青藏高原多年冻土区活动层水热特性研究进展[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1):195–204.]

青藏高原多年冻土区活动层水热特性研究进展

马俊杰^{1,2}, 李 韧¹, 刘宏超³, 吴通华¹, 肖 瑶¹,
杜宜臻^{1,2}, 杨淑华^{1,2}, 史健宗¹, 乔永平¹

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室 青藏高原冰冻圈观测研究站, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 兰州大学 大气科学学院 半干旱气候变化教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 青藏高原多年冻土作为我国冰冻圈的重要组成部分, 其水热状况是影响寒区生态环境、陆气间水热交换、气候变化以及地面路基建设等重要因素。为增进对青藏高原多年冻土区活动层水热特性的认识, 对影响活动层水热特性的主要因素以及主要研究方法做进一步梳理, 并指出了当前研究中的不足。研究认为, 气象条件、植被覆盖度、土壤性质、积雪等是影响多年冻土区活动层水热过程的主要因素, 目前针对活动层水热特性的研究主要通过站点实测资料分析和模型模拟等方式展开。未来工作的重点应放在改进适合于高寒山区的陆面模式以及增强水热动态过程与气候系统的相互作用上。

关键词: 青藏高原; 多年冻土; 活动层; 冻融过程; 水热特性

中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)01-0195-10

0 引言

青藏高原平均海拔高度在4 000 m以上, 有着“世界屋脊”和“第三极”之称^[1-2]。青藏高原由于其高大的地形隆升于周围大气之中, 产生了强大的动力及热力作用, 使其在东亚季风的形成和演化中扮演着重要的角色, 进而对我国甚至全球气候系统有着重要的影响, 被认为是“全球气候变化的驱动力与放大器”^[3-6]。较高的海拔和特殊的气候条件使得青藏高原成为我国最主要的冰冻圈分布区, 这里不仅分布着大量的冰川, 而且还孕育着广阔的冻土。青藏高原多年冻土总面积约为106万平方公里^[7], 是青藏高原下垫面的重要组成部分。多年冻土在地气交换、地表过程、水文循环中扮演着重要的角色^[8]。活动层作为多年冻土与大气之间的“缓冲层”, 是多年冻土与大气间水热交换的过渡层, 是联系大气圈、水圈、生物圈的纽带, 其变化不仅影

响土壤自身的水热力特性, 改变土壤内部的水热平衡, 而且会对水循环、能量交换、碳循环、生态系统、气候系统等产生重要的影响^[9-14]。冻土与生态环境以及人类活动之间的相互作用及其反馈也是全球变化研究中的重要内容^[15]。

多年冻土与大气之间的相互作用主要是通过活动层内水热过程来实现的^[14]。研究青藏高原多年冻土区活动层土壤的水热状况, 对深入了解高原活动层的厚度变化特征、下垫面的热力作用以及对气候变化预测均有重要意义^[16]。近年来, 青藏高原及周围地区气候正逐渐变暖^[17-19]、降水量增加^[20-21]、人类活动加剧, 活动层的水热状况也随之发生改变。水热状况的改变不仅会改变冻融循环, 而且控制着地表状态的变化, 对地表热通量的季节变化以及寒区生态环境有着重要的影响^[22-23]。因此, 活动层内水热动态过程成为多年冻土变化研究的一个重要内容, 其对气候变化的响应和反馈也成

收稿日期: 2019-10-14; 修订日期: 2020-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671070; 41690142; 41771076; 41601078; 41271081); 冰冻圈科学国家重点实验室创新群体项目(41421061); 中国科学院百人计划项目(51Y251571)资助

作者简介: 马俊杰(1990—), 女, 河南项城人, 2014年在兰州大学获学士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读硕士研究生, 从事多年冻土区活动层水热过程研究. E-mail: majunjie@lzb.ac.cn

通信作者: 李韧, 研究员, 从事寒区陆面过程、气候变化研究. E-mail: liren@lzb.ac.cn.

为国内外关注的焦点。“世界气候研究计划(WCRP)”中“全球能水循环试验计划(GEWEX)”以及“气候和冰冻圈计划(CliC)”均与冻土研究关系密切,这些计划中明确提出要重点研究多年冻土区陆面过程,并提议对全球冰冻圈包括多年冻土区域内积雪、活动层水热过程等陆面过程开展长期的野外观测^[24-25]。在全球变化背景下,活动层水热状况的动态特征受到越来越多学者的关注,成为青藏高原地区陆气相互作用的关键问题之一。赵林等^[15]利用站点观测资料,结合SHAW模型,分析了唐古拉地区活动层水热特性,为进一步认识多年冻土区活动层水热特性提供参考。李韧等^[26]研究了青藏公路沿线多年冻土区活动层的动态变化规律,并对对比分析了区域特征差异。张伟等^[27]结合观测资料和CoupModel模型,综合分析了积雪和有机质对活动层水热特性的影响。吴青柏等^[23]利用实测数据,比较分析了高原活动层水热特性与植被的关系,认为冻土及其水热过程不仅控制着地表状态的变化,影响植被的发育程度,且与植被之间存在着强烈的相互作用关系。然而,这些研究多基于试验点尺度的分析,缺乏对青藏高原整体的长时间序列资料的分析。罗立辉等^[28]使用WRF模式对全球再分析数据进行动力降尺度,制备了青藏高原面上的驱动数据,以此作为CLM模式的驱动场数据,来研究青藏高原的陆面过程特点。卓嘎等^[29]使用数据同化与融合产品驱动陆面模式,对青藏高原土壤湿度进行研究,但该方法无法获取深层土壤水分的含量。而据已有的研究表明,冻融过程中活动层的水热过程极为复杂^[30-31],水分在发生相变时会释放或吸收大量的热量,从而影响土壤中热量的分布,二者之间相互影响,使其研究非常困难,另外二者对于活动层土壤的特性和结构也有较深的影响^[32]。因此,青藏高原多年冻土区活动层的水热过程也成为目前陆面过程研究的难点之一,活动层水热迁移特性和规律有待进一步的研究。

梳理有关青藏高原多年冻土区活动层土壤水热过程的研究发现,大多学者集中在分析气候条件因素、植被覆盖、土质类型、积雪等因素对水热输送过程的影响。其研究方法多集中在定点监测土壤温度湿度变化特征、模型模拟分析等研究手段。本文根据所搜集的资料,旨在对青藏高原多年冻土区活动层水热过程进行总结和梳理,为今后开展相关研究作科学的参考。

1 多年冻土区活动层水热输送过程的主要影响因素

活动层又称为季节融化层,是地表和多年冻土层之间受季节影响能够冻结和融化的土层^[33]。冻融过程是指在多年冻土和季节冻土区,随着周期性的气温变化导致活动层土壤反复冻结和融化的过程。冻融过程影响着土壤的水热特性,土壤在冻融过程中水分发生着液态水和水汽的迁移过程,水分的冻结和融化必将伴随着热量的交换,而土壤的热力特性也影响着水分的传输过程。活动层季节冻融过程及其土壤水热动态复杂,影响因素较多。研究显示^[34],活动层的水热过程主要受气象条件、土壤性质、植被覆盖度、积雪等因素的影响。

1.1 气象条件

气候因素是制约多年冻土动态变化的主要因素。气象条件的改变将直接影响多年冻土和高原生态系统的稳定性。气象条件中降水、气温对活动层水热过程的影响最为强烈。降水(包含降雨和降雪)是影响活动层水热动力学的主要因素之一,同时也是活动层内主要水源^[35],能通过对土壤热参数和含水量的改变来影响路基冻融循环和水热动态过程^[32,36]。降水对活动层的影响与降水强度、降水频率等有关。青藏高原多年冻土分布广泛,不同季节和一天内不同时刻的集中降雨都会对活动层产生不同的影响。暖季的高频率、小雨量降水对冻土活动层具有明显的冷却效果;冷季降水以少量降雪为主,雪盖厚度薄、持续时间短,不能起到保温层作用,快速融化的雪水反而会导致活动层温度升高^[37]。张明礼等^[38]分析了夏季降水对活动层水热特性的影响,认为夏季高频率、小量降雨事件有减少地表净辐射、增加地表蒸发潜热、降低土壤表层温度的作用,有利于土壤的热稳定性;夏季降水对表层土壤水分和温度有明显影响,然而其绝大部分通过蒸散发扩散到空气中,未能在土壤内形成有效累积,因而深层土壤基本不受降水影响。Zhu等^[39]分析了极端降水事件对青藏高原唐古拉站活动层水热状况的影响,认为夏季极端降水相对于小量以及平稳降水而言,对水热状况的影响更大,且其影响持续时间更长。相对于极端降水事件,频繁发生的少量降水事件则会造成土壤水分和潜热的损失^[40]。北麓河地区多为该类型少量降水事件,此类降水的增加将会增强对活动层热力系统的影响,对青藏高原多年冻土的退化有一定的减缓作用^[41]。

气温与活动层温度之间有着密切的关系,且活动层不同深度土壤对气温的变化的响应程度有着很大的差异。浅层土壤温度对气温的相关性较为显著,随着深度的增加土壤温度和气温的相关性逐渐减弱。气温对土壤温度的影响还有一定的滞后性,且其滞后时间随着土壤深度的增加而增大^[42]。近年来,气温升高已经引起多年冻土的广泛退化,多年冻土对气候变化的响应主要体现在地表温度的升高以及活动层厚度的增加^[43]。地表温度的变化将引起多年冻土土壤热量机制发生改变,对于冻土的空间分布也有着重要的影响^[44]。另外,高原地表温度的改变也将影响地表与大气之间的水热交换^[45]。

1.2 土壤性质

土壤对活动层水热特性的影响主要体现在土壤有机质含量、土壤质地等方面。

青藏高原广泛分布多年冻土,其土壤中含有较高的有机质,土壤有机质是影响青藏高原冻土发育、保护和退化的重要因素。地表有机质的存在能够减少冬季下伏土壤向大气的热扩散,以及夏季大气向土壤的热传输,总体而言有机质会降低土壤热状况对太阳辐射和气温波动的响应。活动层厚度随土壤有机质的增大而减小^[27]。随着全球变暖现象日益凸显,产生了气温升高、降水增多等现象,这将有利于地表植被的生长,从而使得表层土壤有机质含量增加,相对于矿物质来说,有机质的绝热特性将减少地气间的热量交换^[46]。

土壤的水热特性还受土壤质地控制,土壤的持水性与土壤细粒组分的含量密切相关^[47]。土壤持水能力随土壤颗粒的增大而增大,导热系数则反之。在冻结状态下,土壤质地还会影响活动层土壤的未冻水含量。Wang等^[48]在对祁连山高寒草地活动层水热状况的研究中指出,砾石含量和土壤质地对冻土中未冻水含量有很大影响。经统计分析发现^[49],青藏公路沿线土壤细粒组分与活动层厚度有着明显的反相关关系,活动层厚度随着细粒组分百分含量的增大而减小。另外,土壤质地也对土壤热导率有很大影响,研究发现土壤质地越粗,土壤热导率越大^[50]。而土壤热导率又极大地影响着地表能量通量的变化^[51]。

1.3 植被覆盖度

活动层内水热过程与寒区生态环境有着重要的联系,在全球变暖背景下,青藏高原多年冻土与

生态环境之间的关系得到越来越多的关注,不同植被覆盖度下活动层水热过程是多年冻土区水热过程中一个重要的不确定因素。植被在夏季起到降低土温,而冬季提高土温的效果。在冷季,植被有延缓冻结的作用;而在暖季,由于植被有阻碍增热的效果,从而阻碍融化。植被覆盖对青藏高原活动层温度变化有显著影响,高植被覆盖延缓了冻融过程,抑制了由气温变化引起的土壤温度年际变化,低植被覆盖土壤的导热系数普遍高于高植被覆盖土壤的导热系数^[52]。Yi等^[53]认为植被以及有机层的广泛存在将显著调节气候变暖对环极地地区冻土融化的影响。陆子健等^[54]通过对青藏高原北麓河附近不同地表覆被下活动层的水热差异进行研究,认为不同的下垫面性质会造成不同场地的活动层的冻融过程以及活动层厚度的差异。刘光生等^[55]就同一地区植被盖度变化对青藏高原高寒草甸水热变化过程的影响分析表明,在植被盖度不断减少的情景下,活动层冻结持续时间明显缩短,开始冻结和消融的时间都有一定的提前,活动层地表温度和水分变化速率也随之增大;植被对土壤地表温度和水分变化速率有一定的抑制作用。

近几十年来,气候变化已使得青藏高原多年冻土出现大面积退化,年平均地温升高,活动层厚度增大^[56],这种退化已在一定程度上引起了地表状况的改变。地表状况的改变又打破了冻土水热过程与植被间的动态平衡,导致了地表荒漠化现象的凸显^[23]。蒋观利等^[57]对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进行研究,认为多年冻土活动层水热过程与高寒生态系统类型具有明显的关联性,高寒生态系统会影响近地表能量通量,从而使地-气热量交换产生差异,这一差异又将反过来改变活动层土壤水热分布特征及其动力学过程。

另外,植被覆盖度对土壤有机碳的组成和代谢也有着重要的影响^[58]。王长庭等^[59]通过对三江源地区主要草地类型中土壤有机碳的变化特点及其与环境因素之间的相互作用关系的分析中发现,土壤有机碳同植被盖度之间有着正相关关系。而土壤氮和碳循环密切相关,氮含量不仅是土壤微生物分解碳的影响因素,其自身也通过硝化与反硝化过程产生氧化亚氮等温室气体。土壤中的碳氮循环将显著影响土壤有机质含量,从而对活动层水热过程产生影响^[60]。

1.4 积雪

积雪不仅显著地影响着寒区地表能量平衡和热状况,还对青藏高原冻土发育、保护有着重要的作用。积雪有着较高的反照率和较低的热传导,对近地面陆-气间能量传输过程产生影响^[61-62],是研究地面冻融过程、气候变化等的重要参数。积雪深度是促进或者抑制冻土发育的关键参数,较浅积雪情景比完全忽略积雪的情景模拟的冬季土壤冻结深度深,但随着积雪深度逐渐增加,模拟的冬季土壤冻结深度反而越来越浅^[27]。积雪的保温效果减少了土壤热量的流失,从而对土壤的热量状况和冻结深度产生影响。Mellander等^[63]在瑞典北部寒区森林地区使用 CoupModel 模拟研究了积雪和土壤温度间的关系,其结果表明冬季土壤融化的时间和速度受积雪分布和持续时间的影响很大。Ling等^[64]研究了积雪密度对阿拉斯加北部活动层温度和厚度的影响,结果表明积雪密度对近地表土壤温度和热通量有着显著的影响。

2 主要研究方法

梳理分析有关青藏高原地区活动层土壤水热动态变化相关研究可以发现,目前对青藏高原地区土壤水热的研究多集中在利用站点实测资料和模型模拟两个方面。青藏高原山区地形复杂,下垫面种类多样,站点观测可以准确获得试验点的活动层水热数据;然而由于高原恶劣的自然环境,使得野外试验难度加大,监测站点数目有限,数据采集以及维护难度较大,缺少长序列、高质量的土壤水热观测资料,难以满足相关研究的需要。因此在野外综合观测基础上,利用陆面过程模型来开展活动层水热特性及其与气候系统的相互作用研究成为了较为有效的手段。

2.1 基于站点实测数据的数理统计分析

地面实测研究是获取活动层水热数据最为直接和精确的手段。近20年来,通过野外观测等手段,青藏高原建立起了长期连续自动观测网络,获得了大量的活动层温度和水分观测数据,为进行活动层水热特性研究提供了良好的数据基础。胡国杰等^[65]使用唐古拉站实测资料,对不同深度土层中未冻水含量随温度的变化进行了拟合,分析了冻融期间活动层土壤的水热特征。张明礼等^[66]基于北麓河站的观测资料,以实测的活动层水分、温度、基质势等参数为基础,对多年冻土区活动层水热迁

移规律及其耦合机理进行分析。焦永亮等^[67]利用唐古拉站活动层土壤剖面温度和水分数据,揭示了高原多年冻土区活动层的冻融规律,同时还分析了活动层土壤液态水含量的变化特征。

2.2 模型模拟研究

多年冻土活动层水热变化及其对气候变化的响应和反馈,主要通过发展陆面模式或将冻土参数化过程融入已有的模式中开展模拟研究,并已在世界各地得到广泛应用。国内外许多科学家已经建立了大量的陆面过程模型,其中代表性的陆面过程模式有 SSIB^[68-69]、BATS^[70]、CLM^[71]和 VIC^[72-73]等。冻土中水热力耦合运移问题与陆面过程的关系最为紧密,第一个水热力耦合运移模型于1973年由 Harlan 建立,该模型较为简单,形式与水动力学方程类似,将冻土中的未冻水的迁移类比于非饱和土体中水分的迁移^[74]。随后,很多学者基于 Harlan 思想建立了大量冻土水热耦合模型,总体来看,可将这些模型分为两大类:一类是基于冻融过程来研究土壤内部水热特性的规律,不考虑外部径流^[75];另一类是考虑外部降水、融雪等过程的水文过程模型^[76]。在国内,许多学者利用 Simultaneous Heat and Water (SHAW) 模型,对青藏高原活动层水热特性进行模拟,并与观测数据进行对比分析,研究认为,SHAW 模型能够较好地模拟多年冻土区活动层土壤温度特征,而在土壤含水量模拟方面不太理想,但能较好地反映其变化趋势^[15,77]。CoupModel 模型在对活动层水热特性的模拟方面也有着类似的效果^[30,78-79]。阳勇等^[80]对这两个模型进行对比分析,结合黑河上游生态-水文试验研究站,根据冻土、植被以及土壤类型选择4个典型下垫面为研究对象,研究发现,两个模型模拟的土壤温度结果均好于土壤湿度,且浅层土壤温湿结果均好于深层土壤,综合各试验点多层结果,CoupModel 模型在计算结果方面要略好于 SHAW 模型,但是 SHAW 模型模拟的冻融阶段土壤的液态水含量的变化曲线更平滑,趋势上与实测值更为接近。Wang等^[71]使用 CLM 模型对藏北高原活动层水热特性进行模拟研究,其结果显示土壤温度的模拟与观测结果基本一致,未冻水含量的变化趋势与观测结果趋势基本一致,量值存在一定偏差,且浅层的模拟要略好于深层。

模拟精度的提高还可以通过对陆面模式进行改进以及高原山区特定参数化来实现。Xiao等^[81]

对 Common Land Model (CoLM) 模型的结构和积雪参数化方案进行了调整和改进, 使得原模型在土壤含水量的模拟方面得到了很大的改进。Li 等^[82]对 SIB2 模型中水平衡和表面热平衡方程加以改进, 对于土壤温度和水分变化的模拟更为合理。夏坤等^[83]利用苏里站的气象观测资料, 使用 CLM3.0 模式, 对青藏高原东北部季节性冻土区域进行模拟, 并调整了模式中土壤冻融的临界温度, 调整后的模拟结果与真实的冻融过程更为接近, 较为清楚地反映了冻土融化过程中伴随着冻结过程的发生。但该试验仅在单点进行, 由于高原地形较为复杂, 其适用性需通过进一步开展试验来验证。针对陆面

模式一般只用来模拟试验点的水热状况, 考虑将大气模式与陆面模式耦合, 则能够得到更大尺度范围的模拟结果。鉴于此, 一些学者已开展了将高原陆面过程融入区域气候模式中的尝试。高艳红等^[84]将中尺度大气模式 MM5 与改进的 Noah 模式相耦合, 对黑河中上游的地表水热过程进行模拟。然而由于高原山区地形的多样性, 区域模式的空间分辨率将会对计算结果产生直接影响。另外, 由于高寒山区陆面过程中冻融过程以及积雪、融雪等过程本身的复杂性和特殊性, 使得该领域的研究还有待深入^[85]。对一些典型的模拟活动层水热特性的参数化方案总结如表 1。

表 1 冻土水热模式比较
Table 1 Different frozen soil hydrothermal models

模型	理论基础	特点与不足	文献来源
SSIB	有三层土壤分层以及一层冠层, 冠层温度的控制方程基于能量守恒方程, 并假定第三层达到 0℃ 时冻结, 降水全部形成径流, 不直接计算地表下渗、总含水量	SSIB 能够对表面通量进行真实的模拟。土壤水分的模拟需要改进, 总含水量变化趋势模拟较好, 量值偏差较大	[68-69]
BATS	该方案较为详细地对土壤、大气、植被之间的水汽、动量以及能量交换。共划分为 1 层植被、1 层积雪以及 3 层土壤	假设在 -4 ~ 0℃ 中, 土壤全部且均匀冻结。土壤的热扩散率被限制为常数 $1.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	[70]
CLM	对土壤水分考虑较为细致, 土壤水分的垂直运动受入渗、地表和地下水径流, 以及植物根系等的影响	未冻水含量变化趋势模拟效果较好, 在数值上存在一定的偏差	[71]
VIC	基于网格嵌套基础上处理了能量和水分平衡的大尺度水文模型, 该模型考虑了土层的冰含量, 将三层土壤分别细分为解冻层、冻结层和未冻结层	含冰量模拟很精确, 能够较好的模拟积雪、土壤液态水含量, 另外, 冻结期的模拟结果远好于消融期	[72-73]
水动力学模型	认为未冻水迁移类似于非饱和土体中水分迁移, 并将冻结机理归结为未冻水含量和温度的函数	模型较为简单, 是较早的水热耦合模型。液态水含量变化趋势模拟较好, 量值误差大	[74]
CoupModel	由 SOIL 和 SOILN 发展而来的一维动态模型。依据数学物理方法和概念, 利用偏微分方程计算公式来模拟水、热过程。其原理是质量和能量守恒定律, 认为流动是由水势的梯度和温度产生的	对浅层土壤温湿结果要好于深层, 且土壤温度结果好于土壤湿度	[80]
SHAW	利用基于物理机制的数学方程和经验方程详尽的参数化了植被冠层、积雪层、枯枝落叶层、腐殖质层、冻土层的能量水分传输过程, 把气象条件的变化与活动层水热动态过程结合在一起	在土壤温度方面模拟效果较好, 但是对于土壤水分的模拟存在一定的偏差, 但对其趋势模拟较好	[86]
BASE	土壤温度低于 0℃ 且未冻水量达到其阈值, 形成冰, 冰与液态水可同时存在, 水分运移采用一维 Darcy 方程	水分年际变化模拟较好, 春季的模拟结果不太好	[87]
GIPL2	基于 Stefan 相变问题, 通过热传导的计算来解决土壤冻融问题的数值模型	需要的参数较少, 不仅能模拟单点情况, 也能在区域范围进行模拟	[88]

注: SSIB 为简化的简单生物圈模型 (Simplified Simple Biosphere Model); BATS 为生物圈大气传输方案 (Biosphere atmosphere transfer scheme); CLM 为通用陆面过程模式 (Community land model); VIC 为分布式水文模型 (Variable Infiltration Capacity Scheme); SHAW 为水热耦合模型 (Simultaneous Heat and Water); BASE 为表面交换最佳近似模型 (Best Approximation of Surface Exchange); GIPL2 为地球物理研究所冻土实验室模型 (Geophysical Institute Permafrost Lab)

3 主要问题

目前, 青藏高原多年冻土区活动层水热传输过程的研究还存在一些问题。由于高原活动层水热传输过程十分复杂, 其迁移规律区域差异较大, 且

对水热耦合机理认识不足, 该领域还需要进一步研究。关于青藏高原多年冻土区水热迁移的主要问题可以归纳为以下几个方面。

3.1 观测数据的缺乏

青藏高原地区地形复杂, 野外观测较难展开,

容易造成数据的缺失。且其下垫面种类多样,站点实测数据虽然能够准确地研究活动层水热特性,但是仅限于试验点尺度上,其分析结果具有较大的局限性,难以直接扩展到区域尺度。另外,现有的观测站点相对于整个高原来说十分有限,对于研究整个高原活动层水热迁移变化情况十分不利。观测资料的匮乏,使得区域多年冻土水热过程的数值模拟缺少数据验证以及一些关键参数的获取。

3.2 水热耦合机制认识不明确

多年冻土区活动层冻融过程中水热迁移规律十分复杂,目前许多学者对如何计算热量传输方面开展了大量而细致的研究,但对于相变热的计算和变化规律仍需进一步研究。另外,由于青藏高原多年冻土区冻融过程中水热特性及其相互耦合机制的复杂性,针对土壤水分迁移机理的研究仍相对薄弱,许多学者通过实验和理论分析来研究冻土中水分迁移规律^[89],但其结果与实际仍有较大差异。水分迁移过程复杂,是综合了力学、物理和物理化学多种因素的总和。目前的研究大多是针对实验以及模拟研究等某种特定条件下的水分迁移,仍需探索一种具有广泛适用性的水分迁移参数化方案。

3.3 模型参数化的改进

土壤的水热参数是土壤水热传输最重要的因素,青藏高原地形复杂,土壤类型差异也较大,野外土壤中深层砂砾石含量较多,而其存在会对土壤的导热系数和导水系数产生很大的影响,然而,在现有的区域和气候模式中都设定这些参数为理想的均值状态,对冻土水热过程的参数化描述较为粗糙,这会对模拟结果造成很大的误差。一些学者使用改进后的陆面模型来研究高原水热过程,但是也只限于部分过程和参数化方案,仍存在较多的问题,由于对冻融循环过程中的一些关键过程考虑不完善,不同模式对高原冬季地表温度的模拟均存在较大的冷偏差^[81,90]。另外,许多陆面模式中对于积雪参数化方案的处理并不适合于青藏高原等一些特殊的下垫面,需要进一步的改进来提高模型模拟精度。

4 结论与展望

作为陆面过程的重要影响部分,青藏高原活动层水热特性对气候系统的动力和热力机制具有重要的影响,准确描述多年冻土区水热过程对气候预测和全球变化评估具有重要意义。本文对影响活

动层水热过程的主要因素进行总结,研究认为,气象条件、植被覆盖度、土壤性质、积雪等对水热传输过程影响较大。另外,针对目前主要的研究方法进行梳理,发现有关青藏高原活动层土壤水热状况的研究主要分为两类:一类是在实测资料的基础上进行研究分析;另一类是对数值模型的模拟研究。最后对目前研究中存在的主要问题做一归纳:①观测数据的缺乏仍是当前研究的主要障碍;②弄清水热耦合内部机制将对进一步研究提供很大帮助;③在现有资料的基础上对模式进行合理的参数化改进将对模拟精度的提高有很大的影响。

青藏高原活动层水热状况的研究是其他陆面过程研究的基础,对此提出以下几点展望:

(1)青藏高原地区环境恶劣,站点资料相对较少,在今后的工作中,应当加强野外综合观测数据网的建立,这既是进行水热迁移规律研究的数据基础,同时也为相关陆面过程模式模拟提供数据验证。另外,针对高原地区地域辽阔,许多地区地形复杂、人迹罕至的现象,可有效结合卫星遥感以及当下较为流行的神经网络算法来弥补观测数据的缺乏。

(2)由于青藏高原多年冻土区冻融过程中水热特性及其相互耦合机制的复杂性,土壤水分迁移规律及其与土壤温度相互作用的物理机制仍需进一步研究。在合理结合现有的数据基础上,对不同冻土类型的水热过程进行对比分析,进一步深化对相关过程机理的理解。

(3)针对冻土、积雪、寒区生态环境以及气候系统之间的相互作用关系,分析多年冻土对气候变化的响应机理,以观测资料为基础,以模式模拟为手段,改进模式中冻融过程参数化方案,并逐步完善,将改进后的陆面模式应用到区域或全球气候模式中,从而提高区域乃至全球气候模式对青藏高原及周边区域气候的模拟能力,以及预估全球变暖背景下青藏高原多年冻土的变化和响应机制,并探讨多年冻土退化对气候系统的影响和反馈,为深入研究冰冻圈变化对水文、生态环境以及气候系统的影响奠定科学基础。

参考文献(References):

- [1] Li Jijun, Wen Shixuan, Zhang Qingsong, et al. Discussion on the age, amplitude and form of the rise of Qinghai-Tibet Plateau [J]. China Science, 1979(6): 608 - 616. [李吉均, 文世宣, 张青松, 等. 青藏高原隆生的时代、幅度和形式的探讨[J]. 中国科学, 1979(6): 608 - 616.]

- [2] Qiu J. China: the third pole [J]. *Nature*, 2008, 454(24): 393 – 369.
- [3] Bao Lang, Wang Nan, Ni Zhiyao, et al. Influence of the Tibetan Plateau uplift on climate evolution in southwestern China: from the monsoon perspective [J]. *Journal of Earth Environment*, 2018, 9(5): 444 – 454. [包浪, 王楠, 倪志耀, 等. 青藏高原隆升对我国西南地区气候的影响——从季风角度研究[J]. *地球环境学报*, 2018, 9(5): 444 – 454.]
- [4] Yang Meixue, Wang Xuejia, Pang Guojin, et al. The Tibetan Plateau cryosphere: observations and model simulations for current status and recent changes [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 190: 353 – 369.
- [5] Wu Guoxiong, Liu Yimin, Liu Xin, et al. How the Heating over the Tibetan Plateau affects the Asian climate in summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 29(1): 47 – 58. [吴国雄, 刘屹岷, 刘新, 等. 青藏高原加热如何影响亚洲夏季的气候格局[J]. *大气科学*, 2005, 29(1): 47 – 58.]
- [6] Pan Baotian, Li Jijun. Qinghai-Tibetan Plateau: a driver and amplifier of the global climatic change [J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 1996, 32(1): 108 – 115. [潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器——Ⅲ. 青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. *兰州大学学报(自科版)*, 1996, 32(1): 108 – 115.]
- [7] Zou Defu, Zhao Lin, Sheng Yu, et al. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau [J]. *The Cryosphere*, 2017, 11: 2527 – 2542.
- [8] Cao Wei, Sheng Yu, Wu Jichun, et al. Seasonal variation of soil hydrological processes of active layer in source region of the Yellow River [J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(1): 1 – 10. [曹伟, 盛煜, 吴吉春, 等. 黄河源区多年冻土活动层土壤水文过程季节变异分析[J]. *水科学进展*, 2018, 29(1): 1 – 10.]
- [9] Jorgenson M T, Romanovsky V, Harden J, et al. Resilience and vulnerability of permafrost to climate change [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2010, 40(7): 1219 – 1236.
- [10] Yang Yong, Chen Rensheng. Research review on hydrology in the permafrost and seasonal frozen regions [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(7): 711 – 723. [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.]
- [11] Li Ren, Yang Wen, Ji Guoliang, et al. The 40 a variational characteristics of surface heating field over Wudaoliang in the northern Tibetan Plateau [J]. *Acta Energy Solaris Sinica*, 2006, 26(6): 868 – 873. [李韧, 杨文, 季国良, 等. 40年来藏北高原五道梁地区地表加热场的变化特征[J]. *太阳能学报*, 2006, 26(6): 868 – 873.]
- [12] Schuur E A G, Bockheim J, Canadell J G, et al. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: implications for the global carbon cycle [J]. *Bioscience*, 2008, 58(8): 701 – 714.
- [13] Jorgenson M T, Osterkamp T E. Response of boreal ecosystems to varying modes of permafrost degradation [J]. *Can. J. For. Res.* 2005, 35(9): 2100 – 2111.
- [14] Poutou E, Krinner G, Genthon C, et al. Role of soil freezing in future boreal climate change [J]. *Climate Dynamics*, 2004, 23(6): 621 – 639.
- [15] Zhao Lin, Li Ren, Ding Yongjian. Simulation on the soil water-thermal characteristics of the active layer in Tanggula Range [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6): 930 – 937. [赵林, 李韧, 丁永建. 唐古拉地区活动层土壤水热特征的模拟研究[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(6): 930 – 937.]
- [16] Qin Yanhui, Wu Tonghua, Li Ren, et al. Thermal condition of the active layer on the Qinghai-Tibet Plateau simulated by using the Model of GIPL2 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(6): 1153 – 1166. [秦艳慧, 吴通华, 李韧, 等. 基于GIPL2模型的青藏高原活动层土壤热状况模拟研究[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(6): 1153 – 1166.]
- [17] Zhang Yancheng, Hou Shugui, Pang Hongxi. Preliminary study on spatiotemporal pattern of climate change over Tibet plateau during past millennium [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(3): 135 – 146. [张彦成, 侯书贵, 庞洪喜. 青藏高原地区近千年气候变化的时空特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(3): 135 – 146.]
- [18] Wang Haiyan, Guo Liangcai. Climatic change in Qinghai-Tibet Plateau and the surrounding areas in 130 years [J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.*, 2013, 41(10): 4537 – 4541. [王海燕, 郭良才. 130年来青藏高原及周边地区气候变化[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(10): 4537 – 4541.]
- [19] Hu Guojie, Zhao Lin, Wu Xiaodong, et al. Evaluation of re-analysis air temperature products in permafrost regions on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019. DOI: org/10. 1007/s00704-019-02888-8.
- [20] Han Yizhe, Ma Weiqiang, Wang Bingyun, et al. Climatic characteristics of rainfall change over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1980 to 2013 [J]. *Plateau Meteorology*, 2017, 36(6): 1477 – 1486. [韩熠哲, 马伟强, 王炳贇, 等. 青藏高原近30年降水变化特征分析[J]. *高原气象*, 2017, 36(6): 1477 – 1486.]
- [21] Zhu Zhaorong, Li Yong, Xue Chunxiao, et al. Changing tendency of precipitation in permafrost regions along Qinghai-Tibet Railway during last thirty years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(4): 846 – 850. [朱兆荣, 李勇, 薛春晓, 等. 1976—2010年青藏铁路沿线多年冻土区降水变化特征[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(4): 846 – 850.]
- [22] Hu Guojie, Zhao Lin, Li Ren, et al. Simulation of land surface heat fluxes in permafrost regions on the Qinghai-Tibetan Plateau using CMIP5 models [J]. *Atmospheric Research*, 2019, 220: 155 – 168.
- [23] Wu Qingbai, Shen Yongping, Shi Bin. Relationship between frozen soil together with its water-heat process and ecological environment in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(3): 250 – 255. [吴青柏, 沈永平, 施斌. 青藏高原冻土及水热过程与寒区生态环境的关系[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(3): 250 – 255.]
- [24] Allison I, Barry R G, Goodison B E. Climate and cryosphere (CliC) project science and co-ordination plan; version 1 [M]. Joint Planning Staff for WCRP, World Meteorological Organization, 2001: WMO/TD No. 1053:1 – 96.
- [25] Steffen K, Yang D, Ryabinin V, et al. ACSYS: a scientific foundation for the climate and cryosphere (CliC) project [M]// *Arctic Climate Change*. Springer, Dordrecht, 2012: 437 – 459.
- [26] Li Ren, Zhao Lin, Ding Yongjian, et al. Temporal and spatial variations of the active layer along the Qinghai-Tibet Highway in a permafrost region [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(35): 4609 – 4616. [李韧, 赵林, 丁永建, 等. 青藏公路沿线多年冻土区活动层动态变化及区域差异特征[J]. *科学通报*, 2012, 57(30): 2864 – 2871.]
- [27] Zhang Wei, Zhou Jian, Wang Genxu, et al. Monitoring and modeling the influence of snow cover and organic soil on the active layer of permafrost on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 528 – 540. [张伟, 周剑, 王根绪, 等. 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.]

- [28] Luo Lihui, Zhang Yaonan, Zhou Jian, et al. Simulation and application of the land surface model CLM Driven by WRF in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 553 – 546. [罗立辉, 张耀南, 周剑, 等. 基于 WRF 驱动的 CLM 模型对青藏高原地区陆面过程模拟研究[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 553 – 564.]
- [29] Zhuo Ga, Chen Tao, Zhou Kanshe, et al. Spatial and temporal distribution of soil moisture over the Tibetan Plateau during 2009–2010 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(3): 625 – 634. [卓嘎, 陈涛, 周刊社, 等. 2009—2010 年青藏高原土壤湿度的时空分布特征[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(3): 625 – 634.]
- [30] Yang Yong, Chen Rensheng, Ji Xibin, et al. Heat and water transfer processes on alpine meadow frozen grounds [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(1): 30 – 35. [阳勇, 陈仁升, 吉喜斌, 等. 黑河高山草甸冻土带水热传输过程[J]. *水科学进展*, 2010, 21(1): 30 – 35.]
- [31] Gao Yanhong, Cheng Guodong, Shang Lunyu, et al. Application of atmospheric model coupled with frozen soil parameterization to simulating spring soil condition in the Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(1): 82 – 90. [高艳红, 程国栋, 尚伦宇, 等. 耦合冻土方案的大气模式对祁连山区春季土壤状况的模拟[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(1): 82 – 90.]
- [32] Hinzman L D, Kane D L, Gieck R E, et al. Hydrologic and thermal properties of the active layer in the Alaskan Arctic [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1991, 19(2): 95 – 110.
- [33] Qin Dahe, Yao Shandong, Ding Yongjian, et al. Glossary of cryospheric science [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2014. [秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. *冰冻圈科学辞典* [M]. 北京: 气象出版社, 2014.]
- [34] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Chinese Permafrost [M]. Beijing: Science Press, 2000. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. *中国冻土* [M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [35] Zhu Xiaofan, Wu Tonghua, Zhao Lin, et al. Exploring the contribution of precipitation to water within the active layer during the thawing period in the permafrost regions of central Qinghai-Tibet Plateau by stable isotopic tracing [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 630 – 644.
- [36] Ishikawa M, Zhang Y, Kadota T, et al. Hydrothermal regimes of the dry active layer [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(4). DOI: 10.1029/2005WR004200.
- [37] Li Desheng, Wen Zhi, Zhang Mingli, et al. The quantitative analysis of the hydro-thermal dynamic of permafrost active layer effected by precipitation [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(7): 108 – 113. [李德生, 温智, 张明礼, 等. 降水对多年冻土活动层水热影响定量分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(7): 108 – 113.]
- [38] 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, 薛珂, 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.]
- [39] Zhu Xiaofan, Wu Tonghua, Li Ren, et al. Impacts of summer extreme precipitation events on the hydrothermal dynamics of the active layer in the Tanggula permafrost region on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geophysical Research Atmospheres*, 2017. DOI: 10.1002/2017JD026736.
- [40] Wythers K R, Lauenroth W K, Paruelo J M. Bare-soil evaporation under semiarid field conditions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5): 1341.
- [41] Wen Zhi, Niu Fujun, Yu Qihao, et al. The role of rainfall in the thermal-moisture dynamics of the active layer at Beiluhe of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Environ Earth Sci*, 2014, 71: 1195 – 1204.
- [42] Zhao Lin, Sheng Yu, et al. Permafrost and its changes on Qinghai-Tibet plateau [M]. Beijing: Science Press, 2019: 153 – 155. [赵林, 盛煜, 等. 青藏高原多年冻土及变化 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 153 – 155.]
- [43] Cheng Guodong, Wu Tonghua. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007. DOI: 10.1029/2006JF000631.
- [44] Wu Tonghua, Zhao Lin, Li Ren, et al. Recent ground surface warming and its effects on permafrost on the central Qinghai-Tibet Plateau [J]. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(4): 920 – 930.
- [45] Li Ren, Zhao Lin, Wu Tonghua, et al. The impact of surface energy exchange on the thawing process of active layer over the northern Qinghai-Xizang Plateau, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(6): 2091 – 2099.
- [46] Nicolsky D J, Romanovsky V E, Alexeev V A, et al. Improved modeling of permafrost dynamics in a GCM land-surface scheme [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(8). DOI: 10.1029/2007GL029525.
- [47] Xu Xuezu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Frozen soil physics [M]. Beijing: Science Press, 2001. [徐敦祖, 王家澄, 张立新. *冻土物理学* [M]. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [48] Wang Qingfeng, Yang Qianqian, Guo Hong, et al. Hydrothermal variations in soils resulting from the freezing and thawing processes in the active layer of an alpine grassland in the Qilian Mountains, northeastern Tibetan Plateau [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 136: 929 – 941.
- [49] Li Ren, Zhao Lin, Ding Yongjian, et al. Temporal and spatial variations of the active layer along the Qinghai-Tibet Highway in a permafrost region [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(35): 4609 – 4616.
- [50] Li Yi, Shao Ming'an, Wang Wenyan, et al. Influence of soil textures on the thermal properties [J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(4): 62 – 65. [李毅, 邵明安, 王文焰, 等. 质地对土壤热性质的影响研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(4): 62 – 65.]
- [51] Peter-Lidard C D, Blackburn E, Liang X, et al. The effect of soil thermal conductivity parameterization on surface energy fluxes and temperature [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, 55: 1209 – 1224.
- [52] Wang Genxu, Liu Lin'an, Liu Guangsheng, et al. Impacts of grassland vegetation cover on the active-layer thermal regime, northeast Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Permafrost and Periglac. Process*, 2010, 21: 335 – 344.
- [53] Yi S, Arain M A, Woo M K. Modifications of a land surface scheme for improved simulation of ground freeze-thaw in northern environment [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33. DOI: 10.1029/2006GL026340.
- [54] Lu Zijian, Wu Qingbai, Sheng Yu, et al. Heat and water difference of active layers beneath different surface conditions near Beiluhe in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 642 – 647. [陆子建, 吴青柏, 盛煜, 等. 青藏高原北麓河附近不同地表覆被下活动层的水热差异研究[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 642 – 647.]
- [55] Liu Guangsheng, Wang Genxu, Hu Hongchang, et al. Influ-

- ence of vegetation coverage on water and heat processes of the active layer in permafrost regions of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1): 89 – 95. [刘光生, 王根绪, 胡宏昌, 等. 青藏高原多年冻土区植被盖度变化对活动层水热过程的影响[J]. 冰川冻土, 2009, 31(1): 89 – 95.]
- [56] Wu Qingbai, Zhang Tingjun. Recent permafrost warming on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(D13): 1 – 22.
- [57] 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.]
- [58] Hobbie S E, Schimel J P, Trumbore S E, et al. Controls over carbon storage and turnover in high-latitude soils [J]. *Global Change Biology*, 2000, 6(Suppl 1): 196 – 210.
- [59] Wang Changting, Long Ruijun, Cao Guangmin, et al. Soil carbon and nitrogen contents along elevation gradients in the source region of Yangtze, Yellow and Lantsang Rivers [J]. *Journal of Plant Ecology (formerly Acta Phytocologica Sinica)*, 2006, 30(3): 441 – 449. [王长庭, 龙瑞军, 曹广民, 等. 三江源地区主要草地类型土壤碳氮沿海拔变化特征及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2006, 30(3): 441 – 449.]
- [60] Zhu Dan, Ciais P, Krinner G, et al. Controls of soil organic matter on soil thermal dynamics in the northern high latitudes [J]. *Nature Communications*, 2019, 7. DOI: 10.1038/s41467-019-11103-1.
- [61] Cohen J, Rind D. The effect of snow cover on the climate [J]. *Journal of Climate*, 1991, 4: 689 – 706.
- [62] Taras B, Sturm M, Liston G E. Snow-ground interface temperatures in the Kuparuk River basin, Arctic Alaska: measurements and model [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2002, 3: 377 – 394.
- [63] Mellander P E, Laudon H, Bishop K. Modelling variability of snow depths and soil temperatures in Scots pine stands [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 133: 109 – 118.
- [64] Ling Feng, Zhang Tingjun. Sensitivity of ground thermal regime and surface energy fluxes to tundra snow density in northern Alaska [J]. *Cold Reg Sci Technol*, 2006, 44: 121 – 130.
- [65] Hu Guojie, Zhao Lin, Li Ren, et al. Characteristics of hydro-thermal 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.]
- [66] Zhang Mingli, Wen Zhi, Xue Ke. Soil moisture-heat migration characteristics within the permafrost active layer in Beiluhe [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(9): 176 – 181. [张明礼, 温智, 薛珂. 北麓河多年冻土活动层水热迁移规律分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(9): 176 – 181.]
- [67] Jiao Yongliang, Li Ren, Zhao Lin, et al. Processes of soil thawing-freezing and features of soil moisture migration in the permafrost active layer [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(2): 237 – 247. [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.]
- [68] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. A simple biosphere model (SIB) for use within general circulation models [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1986, 43(6): 505 – 531.
- [69] Xue Yongkang, Zeng F J, Schlosser C A. SSiB and its sensitivity to soil properties: a case study using HAPEX-MOBILHY data [J]. *Global and Planetary Change*, 1996, 13: 183 – 194.
- [70] Yu Lian, Wang Chenghai. The simulation and revision of soil moisture over Tibetan Plateau [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(2): 531 – 538. [余莲, 王澄海. 青藏高原地区土壤湿度的模拟及订正[J]. 物理学报, 2012, 61(2): 531 – 538.]
- [71] Wang Aiwen, Xie Zhenghui, Feng Xiaobing, et al. A soil water and heat transfer model including changes in soil frost and thaw fronts [J]. *Science China, Earth Sciences*, 2014, 57(6): 1325 – 1339.
- [72] Cherkauer K A, Lettenmaier D P. Hydrologic effects of frozen soils in the upper Mississippi River basin [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D16): 19599 – 19610.
- [73] Xu Ling, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(D7): 14415 – 14428.
- [74] Harlan R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil [J]. *Water Resour Res*, 1973, 9(5): 1314 – 1323.
- [75] Taylor, George S, Luthin, James N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, 15(4): 548 – 555.
- [76] Flerchinger G N, Saxton K E. Simultaneous Heat and Water Model of a Freezing Snow-Residue-Soil System I. Theory and Development [J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(2): 0565 – 0571.
- [77] Liu Yang, Zhao Lin, Li Ren. Simulation of the soil water-thermal features within the active layer in Tanggula region, Tibetan Plateau, by using SHAW model [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 280 – 290. [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.]
- [78] Hu Guojie, Zhao Lin, Li Ren, et al. The Water-thermal characteristics of frozen soil under freeze-thaw based on CoupModel [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(3): 356 – 362. [胡国杰, 赵林, 李韧, 等. 基于 COUPMODEL 模型的冻融土壤水热耦合模拟研究[J]. 地理科学, 2013, 33(3): 356 – 362.]
- [79] Zhang Wei, Wang Genxu, Zhou Jian, et al. Simulating the Water-Heat processes in the permafrost Regions in the Tibetan Plateau Based on CoupModel [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1099 – 1109. [张伟, 王根绪, 周剑, 等. 基于 CoupModel 的青藏高原多年冻土区土壤水热过程模拟[J]. 冰川冻土, 2012, 34(5): 1099 – 1109.]
- [80] Yang Yong, Chen Rensheng, Ye Baisheng, et al. Heat and water transfer processes on the typical underlying surfaces of frozen soil in cold regions (I): model comparison [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1545 – 1554. [阳勇, 陈仁升, 叶柏生, 等. 寒区典型下垫面冻土水热过程对比研究 (I): 模型对比[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1545 – 1554.]
- [81] Xiao Yao, Zhao Lin, Dai Yongjiu, et al. Representing permafrost properties in CoLM for the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 87: 68 – 77.
- [82] Li Xin, Koike T. Frozen soil parameterization in SIB2 and its validation with GAME-Tibet observations [J]. *Cold regions science and technology*, 2003, 36: 165 – 182.
- [83] Xia Kun, Luo Yong, Li Weiping. Simulation of freezing and melting of soil on the northeast Tibetan Plateau [J]. *Chin Sci*

- Bull, 2011, 56(22): 2145 – 2155. [夏坤, 罗勇, 李伟平. 青藏高原东北部土壤冻融过程的数值模拟[J]. 科学通报, 2011, 56(22): 1828 – 1838.]
- [84] Gao Yanhong, Cheng Guodong, Cui Wenrui, et al. Coupling of enhanced land surface hydrology with atmospheric mesoscale model and its implement in Heihe River Basin[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(12): 1283 – 1292. [高艳红, 程国栋, 崔文瑞, 等. 陆面水文过程与大气模式的耦合及其在黑河流域的应用[J]. 地球科学进展, 2006, 21(12): 1283 – 1292.]
- [85] Zhou Yuhua, Ye Baisheng, Hu Heping. Review of the study on land surface process in soil freezing and thawing [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(6): 887 – 891. [周余华, 叶伯生, 胡和平. 土壤冻融条件下的陆面过程研究综述[J]. 水科学进展, 2005, 16(6): 887 – 891.]
- [86] Wang Chenghai, Dong Wenjie, Wei Zhigang. The development of study on the soil freezing-thaw process in land surface model [J]. Advance in Earth Science, 2002, 17(1): 44 – 52. [王澄海, 董文杰, 韦志刚. 陆面模式中土壤冻融过程参数化研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 44 – 52.]
- [87] Desborough C E. The impact of root-weighting on the response of transpiration to moisture stress in a land surface scheme [J]. Mon Wea Rev, 1997, 125: 1920 – 1930.
- [88] Yanhui Qin, Tonghua Wu, Lin Zhao, et al. Numerical Modeling of the Active Layer Thickness and Permafrost Thermal State Across Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017. DOI: 10.1002/2017jd026858.
- [89] Jing Jihong, Han Shuangping, Wang Xinzong, et al. The mechanism of water movement in the freezing-thawing process [J]. Acta Geosciencia Sinica, 2007, 28(1): 50 – 54. [荆继红, 韩双平, 王新忠, 等. 冻结-冻融过程中水分运移机理[J]. 地球学报, 2007, 28(1): 50 – 54.]
- [90] Cuo Lan, Zhang Yongxin, Bohn T J, et al. Frozen soil degradation and its effects on surface hydrology in the northern Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(16): 8276 – 8298.

A review on the development of study on hydrothermal characteristics of active layer in permafrost areas in Qinghai-Tibet Plateau

MA Junjie^{1,2}, LI Ren¹, LIU Hongchao³, WU Tonghua¹, XIAO Yao¹, DU Yizhen^{1,2},
YANG Shuhua^{1,2}, SHI Jianzong¹, QIAO Yongping¹

(1. Cryosphere Research Station on Qinghai-Xizang Plateau, State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: As an important part of China's cryosphere, the hydrothermal condition of the permafrost on Qinghai-Tibet Plateau is an important factor affecting the ecological environment of cold regions, the exchange of water and heat between land and air, climate change and the construction of embankment. In order to enhance the understanding of the hydrothermal characteristics of the active layer in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau, this paper summarizes the main factors that affect the hydrothermal characteristics of the active layer and the main research methods, and points out the main problems in the current research. It is believed that meteorological conditions, vegetation coverage, soil properties and snow cover are the main factors affecting the hydrothermal process of the active layer. At present, researches on the hydrothermal characteristics of the active layer are mainly carried out through the in situ measured data and model simulation. The future work should focus on improving the land surface model suitable for alpine mountains and enhancing the interaction between hydrothermal dynamic processes and climate system.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; permafrost; active layer; freeze-thaw process; hydrothermal characteristics

(责任编辑: 周成林; 编辑: 庞瑜, 周成林)