

基于水热变化的青藏高原土壤冻融过程研究进展

陈 瑞^{1,2,3}, 杨梅学^{1*}, 万国宁¹, 王学佳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, 兰州 730000; 2. 阿尔弗雷德魏格纳研究所, 亥姆霍兹极地与海洋研究中心, 波兹坦 14473, 德国; 3. 柏林洪堡大学地理系, 柏林 10099, 德国)

摘 要: 青藏高原近地层土壤冻融过程是高原地表最显著的陆面特征之一, 也是判断冻土发育、存在以及反映气候变化的重要指标。近地层土壤昼夜、季节性的冻结、融化会导致青藏高原陆—气间能水平衡的变化甚至异常, 从而显著影响高原地表水文过程、生态环境、碳氮循环以及高原及其周边区域的天气和气候系统。论文从观测、模拟以及对气候的影响3个角度来探讨1990年以来青藏高原土壤冻融过程的最新研究进展。结果表明: ① 在一个完整的年冻融循环过程中, 近地表各层土壤大体都经历了夏季融化期、春秋季节融化—冻结期、冬季冻结期4个阶段。受局地因素的影响, 不同站点的冻结或消融起止时间、速率、类型均有差异。② 多年冻土区和季节冻土区的日冻融循环过程差异较大, 主要体现在日冻融循环持续时间上。③ 不同陆面模式都可以很好地抓住冻融过程中物理量的时空变化, 但都需要针对高原陆面过程的特点进行参数化改进。④ 规避不稳定的迭代计算并根据热力学平衡方程确定冻融临界温度可以改进不合理的冻融参数化方案。基于已有研究回顾, 发现增加高质量的观测站, 利用卫星遥感等多种手段来反演高原土壤冻融过程以及加强陆面模式与区域气候模式和全球气候模式的耦合, 并立足于高原冻融过程的特点发展相适应的参数化方案以及模拟结构的调整, 能够有助于高原冻融过程的模拟。

关键词: 土壤冻融过程; 陆面模式; 模式适应性; 参数化方案改进; 青藏高原

冻土是指温度在0℃或0℃以下并含有冰的各种岩石和土壤, 是由矿物颗粒、有机质、冰、液态水以及气体组成的多相物质, 是大气与陆地之间热交换的产物, 也是气候变化的敏感指示器^[1]。作为冰冻圈的重要组成部分, 冻土是全球中高纬度以及高海拔地区普遍存在的自然现象^[2]。由于热量的昼夜及季节变化而在近地层及其以下一定深度内土壤中产生的液态水反复冻结与解冻过程称为土壤冻融过程^[3]。近地层土壤季节和昼夜性的冻结、消融现象是寒区地表最显著的物理特征之一, 也是判断冻土存在和发育程度以及反映气候变化的重要指

标。冻融过程本质上是由土壤温度变化所引起土壤水分发生相变的过程, 由于冰与水导热率(冰: $2.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; 水: $0.57 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)以及热容量(冰: $1.9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; 水: $4.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)的显著差异, 在冻融过程的不同阶段土壤含冰量和未冻水含量之间比值的不断变化, 使得土壤冻融过程会显著地改变地表反射率、土壤热力学和水力学性质以及下垫面状况, 对水文过程^[4-6]、基础工程^[7-9]、生物地球化学循环^[10-12]、地表生态系统^[13-15]以及气候变化^[16-18]产生深远影响。同时, 作为一类特殊的陆面过程, 是否能准确认识土壤冻融过程极大地制约着对陆—气

收稿日期: 2019-11-18; 修订日期: 2020-06-10。

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)项目(XDA20100102, XDA19070204); 国家自然科学基金项目(41601077, 41571066, 41771068); 中国科学院青年创新促进会项目(20180460); 国家留学基金委项目(201804910129, 201904910442)。[**Foundation:** The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Class A), No. XDA20100102 and XDA19070204; National Natural Science Foundation of China, No. 41601077, 41571066 and 41771068; The Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences, No. 20180460; The Program of China Scholarship Council, No. 201804910129 and 201904910442.]

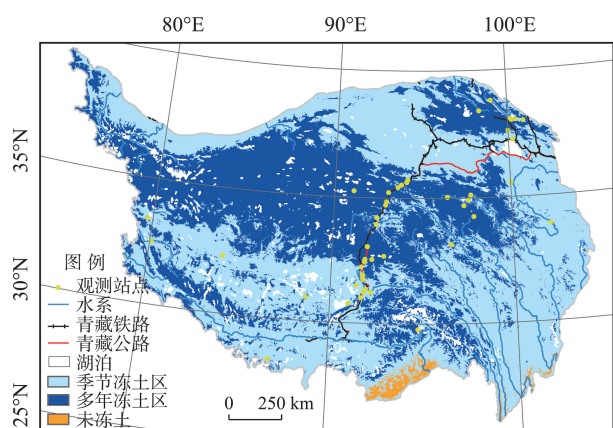
第一作者简介: 陈瑞(1992—), 男, 陕西西安人, 博士生, 主要从事寒区陆面过程及其模拟研究。E-mail: rui.chen@awi.de

***通信作者简介:** 杨梅学(1968—), 男, 甘肃岷县人, 研究员, 主要从事寒区环境与全球变化相关研究。E-mail: mxyang@lzb.ac.cn

引用格式: 陈瑞, 杨梅学, 万国宁, 等. 基于水热变化的青藏高原土壤冻融过程研究进展 [J]. 地理科学进展, 2020, 39(11): 1944-1958. [Chen Rui, Yang Meixue, Wan Guoning, et al. Soil freezing-thawing processes on the Tibetan Plateau: A review based on hydrothermal dynamics. Progress in Geography, 2020, 39(11): 1944-1958.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.11.014

相互作用的理 解以及陆面模式和气候模式的模拟能力^[19-21]。

位于中低纬地区,平均海拔超过4000 m,面积大约为250万 km²的青藏高原是世界上海拔最高、地形最复杂的高原,素有“世界屋脊”和“第三极”之称^[22-23](图1),并含有地球系统所含有的所有圈层^[24]。作为中国乃至全球冰冻圈的重要组成部分,高原上发育着世界上面积最大的高海拔冻土,其中多年冻土和季节冻土的面积分别约为106万 km²(约占高原总面积的40%)和144万 km²(约占高原总面积的56%)^[25]。并且由于高原特殊的地理位置,其上存在的多年冻土与高纬地区的多年冻土差异显著,具有地温高、厚度薄、自身热稳定性差等特点^[26],对气候变化和人类活动也更为敏感。大量研究表明,1980年以来高原出现明显增温趋势^[27-29],且在中等排放情景(RCP4.5)下,预估到2100年青藏高原年平均气温会上升0.9~4.9℃^[30]。在这种背景下,高原冻土层出现明显退化现象,包括土壤温度升高^[31-32]、活动层厚度增加^[33-34]、季节冻土最大冻结深度减小^[35-36]以及冻土面积缩小^[37-38]等。因此,作为控制寒区陆—气间能水交换的重要过程,土壤冻融过程必会受到显著影响。青藏高原土壤冻融过程一直是陆面过程的研究热点,目前所进行的研究主要是基于站点观测资料、卫星遥感资料和陆面模式的模拟结果。因此,本文从观测、模拟以及对近地面大气和气候的影响3个方面详细阐述1990年以来对青藏高原土壤冻融过程的研究,以期加深对高原土壤冻融过程的认识,为进一步改进陆面模式的参数化方案提供依据。



注:底图来源于“国家青藏高原科学数据中心”(http://data.tpd.ac.cn),数据说明见文献[25]。

图1 研究区地理位置

Fig.1 Location of the study area

1 基于观测的土壤冻融过程研究进展

1.1 土壤年冻融过程

受制于太阳辐射的年际变化以及融区、积雪、土壤有机质、植被盖度、径流等局地因素的不同,冻融过程存在显著的区域差异。杨梅学等^[16,39-40]利用GAME-Tibet和CAMP-Tibet试验期间所获取的藏北高原土壤温湿度资料对8个观测点(D66、TUO-TUOHE、D110、WADD、NODA、AMDO、MS3608、MS3637)的土壤冻融过程进行了初步分析发现(表1),各点4 cm深处土壤均在10月开始冻结,次年4月开始消融,平均冻结时间长达半年左右并且冻结过程有利于土壤维持其水分,为夏季风的爆发打下了基础。各观测点土壤含水量的分布不全是随着土壤深度的增加而增大或者减少,而是表现出一定的高含水层。同时还有学者利用相同资料分析后指出,海拔和纬度均对冻融过程产生影响,表现出明显的水平地带性和垂直地带性。并且冻融深度与4 cm处土壤的累计地温有很好的正相关关系,土壤冻结和消融都是从表层开始,随土壤深度增加,冻结速率加快,消融速率减慢^[41-44]。除大规模野外观测实验所获取的资料外,一些学者也对高原其他单独站点和区域的冻融过程进行研究和分析,如北麓河站^[33,45-46]、五道梁站^[47]、黑河上游^[48-51]、唐古拉站^[52-53]、黄河源区^[54]、申扎站^[55-56]和青藏公路与铁路沿线^[57]等,由于各站点所处地理位置以及局地因素的不同,其冻融过程,例如冻结或消融开始以及结束时间、速率、类型等,有很大区别。除了针对空间尺度和时间尺度讨论以外,还有研究者基于坡面尺度、不同冻土类型对高原的冻融过程进行分析,发现同一区域南、北坡冻融过程呈现空间差异性。融化、冻结初期,北坡冻结程度均高于南坡。低温冻土区比高温冻土区融化开始时间滞后、冻结开始时间提前^[33,58]。尽管高原土壤冻融过程受局地因素的影响,但以日平均土壤温度开始持续<0℃为开始冻结日期,>0℃为开始消融日期。在一个完整的年冻融循环过程中,高原上各站点各层土壤大体都可划分为夏季融化期、春秋季节融化—冻结期、冬季冻结期4个阶段^[41,47]。并且在不同的冻融阶段,土壤中的水热耦合过程伴随着水分运输的不同方式而发生变化^[47]。

1.2 土壤日冻融循环

高原冻土的冻融过程不仅存在着年冻融循环,

表1 不同观测站土壤冻结持续天数^[16]
Tab.1 The duration (days) of frozen soil at various depths for different sites^[16] (d)

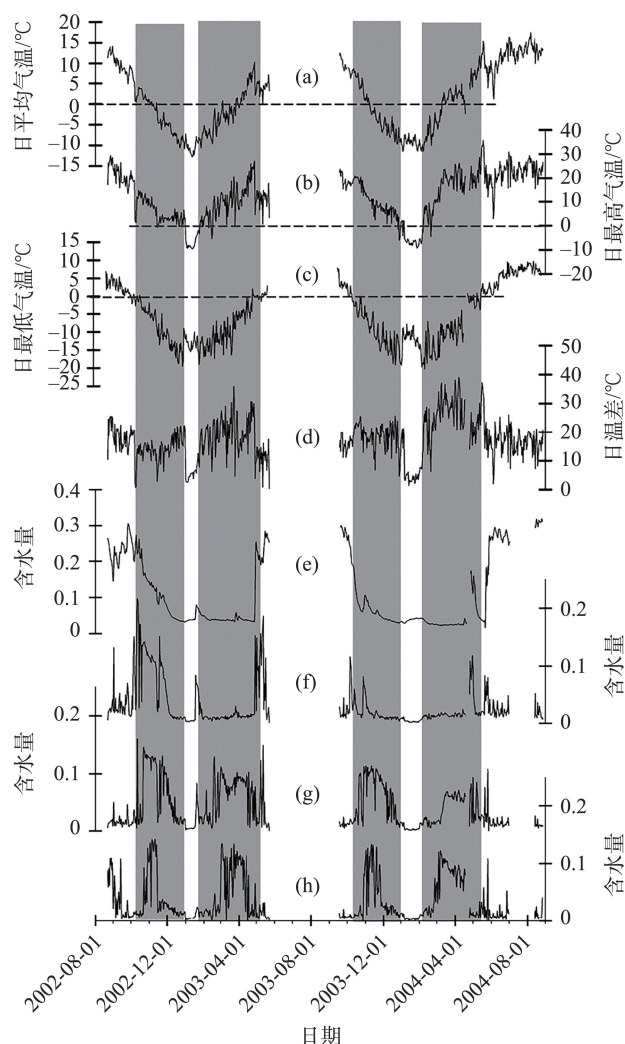
站点名称	土壤深度								
	4 cm	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	130 cm	160 cm	200 cm
D66	172	177	182	175	174	177	178	180	185
TUOTUOHE	170	169	171	170	169	165	165	162	157
D110	202	206	206	210	205	202	213	173	180
WADD	200	194			209	209	164		
NODA	185	186	182			184	176	172	176
AMDO	184	179	174	177	173	172	163	162	155
MS3608	158	155	162	155	143	147	141	130	
MS3637	159	165	148	138	132		95		

而且在春秋季节融化—冻结期还存在着日冻融循环。但由于资料分辨率的限制(土壤冻融过程在垂直方向上的时空变化),对于高原日冻融循环的研究比较欠缺。在不考虑土壤盐分、质地等对土壤冻结点的影响下,土壤日最大值温度连续 $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,认为土壤完全冻结或完全消融,当土壤日最大值 $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 而日最小值 $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,认为存在日冻融循环(即是白天消融、夜间冻结)^[17]。对于地处季节冻土区的那曲地区, Yang等^[17]利用CAMP-Tibet所获得的观测资料对那曲地区浅层土壤的日冻融循环进行分析发现,该地区表层土壤(0~3 cm)真正冻结的日数较少(约为1个月),而存在日冻融循环过程的日数则较多(6个月左右),土壤冻融状态的频繁变化会极大地影响土壤与大气之间的能水交换过程(图2)。王学佳等^[59]和焦永亮等^[53]分别对位于多年冻土区的D105点和唐古拉站进行了日冻融循环研究并与季节冻土区进行对比的结果表明,多年冻土区和季节冻土区的日冻融循环过程有很大的不同,多年冻土区发生日冻融循环的时间较短(2002—2005年D105点4 cm深度处存在日冻融循环的天数平均为71 d;2007—2008年唐古拉站5 cm深度处存在日冻融循环的天数为61 d)。但无论是多年冻土区还是季节冻土区,随着土壤深度的加深,土壤日冻融循环持续日数明显减少,春季土壤日冻融循环的存在时间长于秋季。万国宁^[60]对位于不同冻土类型的BJ站和D105点的土壤日冻融过程进行分析发现,在日冻融循环过程中土壤温度的日变幅很大且波动性显著,土壤水分频繁相变。

1.3 冻融状态时空变化

利用近地面气温和地温数据、遥感资料以及模式模拟对土壤冻融状态时空变化的研究所得出的结论较为一致:尽管时间尺度、研究手段以及研究

区不尽相同,但是在高原明显的增温背景下,高原表层土壤冻结起始时间滞后,融化起始时间提前,冻结持续时间缩短,活动层厚度增加,最大季节冻结深度减小,融化指数和冻结指数分别表现出增加和减少的趋势(表2)。从表2可以看出,虽然不同研究手段对土壤冻融状态有着相同的变化趋势,但其幅度差异较大。对比之后,分析得出造成这种原因可能有:①研究区不同。例如就冻融起始时间的滞后天数来说,CLM的模拟结果大约为10.1 d,而实测资料为26 d。这是由于虽然实测资料来源于高原全部气象站点,但是高原站点的分布并不均匀,从Wang等^[61]的研究可以看出,气象站点在高原东部分布较多,高原西部几乎没有气象站点。从而造成实测资料结果会大于模式模拟。②研究时间尺度不同。例如冻结/融化指数的变化速率,长时间序列的研究的结果会显著小于短时间序列。1980—2013年冻结/融化指数的变化速率分别为13.6/13.9 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d/a}$,而1901—2015年的速率则仅有1.58/0.98 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d/a}$ 。这是因为在20世纪上半叶,高原土壤温度的变暖幅度远远小于最近几十年,进而造成长时间序列研究的数值较小。③研究手段不同。尽管微波遥感可以提供连续空间尺度和持续时间尺度的分析资料,但相较于站点观测资料仍有不可避免的缺陷,这是由于微波遥感在地形复杂区域的空间分辨率和精度较低,反演深度较浅,并且需要用长期观测数据进行验证。陆面模式模拟结果会显著受到强迫资料、模式结构以及参数化方案的影响,从而造成模拟误差。④不同研究对各个冻融状态定义不同。例如有些学者将当连续日最低温度低于/高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时定义为冻结开始时间和融化开始时间;而有些学者认为日平均温度低于/高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冻结/融化开始;并且不同研究所认定的连续日数也



注: e和f为0~3 cm深处土壤未冻水含量和日变幅; g和h分别为3~6 cm和6~9 cm深处土壤未冻水含量日变幅; 图中阴影部分表示存在土壤的日冻融循环。

图2 BJ站2 cm深处土壤温度状况、不同深度未冻水含量及其变幅^[17]

Fig.2 Soil temperature regime at 2 cm and the diurnal variation of soil moisture regime at variable depths^[17]

不同(例如: 3 d或5 d)。

2 基于模拟的土壤冻融过程研究进展

陆面与气候系统其他圈层间各种时空尺度的相互作用, 以及动量、能量和物质间的交换和辐射传输会对大气环流和气候状况产生极大影响^[81], 在某个局部或某个时段内甚至还起着关键性的作用^[82]。由于土壤冻融过程可以强烈影响寒区土壤温、湿度的时空分布, 并且水分液相变化将影响水分运动及能量平衡, 从而对其上大气产生作用, 因此土壤冻融

过程是陆面过程中极其重要的部分, 其参数化方案对数值天气预报、区域以及全球气候模拟有重要的影响。

2.1 针对青藏高原冻融过程的模式适应性研究

土壤冻融过程的实质上是由于土壤温度变化所引起的土壤水分发生相变的过程, 因此, 选择土壤温度和土壤湿度来阐述陆面模式在青藏高原的适用性。

2.1.1 土壤温度

不同模式已经能够较好地抓住土壤温度在不同时空尺度的变化, 但由于参数化方案的不完善, 陆面模式在不同时空尺度上会部分低估或者高估土壤温度。土壤热量传输遵循以下热量扩散公式:

$$C_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_h \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

式中: C_s 为土壤热容($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$), k_h 为土壤热导率($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), z 为土壤深度(m), T 为时间(s)。

季节尺度上, Zheng等^[83]采用玛多和玛曲的实测数据(2009年11月—2010年12月)对Noah模式进行验证的结果表明, Noah原模式会显著低估浅层土壤温度(5、25 cm)。并设计3个参数化改进方案(湍流和土壤热传输、土壤水分传输、冻土过程)来探究造成偏差的原因。通过与实测资料进行对比, 结果表明, Noah模式高估潜热通量导致土壤温度被显著低估。不同陆面模式(CLM、COUPMODEL、CoLM)对高原不同地区土壤温度季节变化的模拟具有较为一致的结论, 即夏季土壤温度的模拟结果要好于冬季, 夏季土壤温度模拟偏高, 冬季土壤温度模拟偏低。对各模式参数化方案分析后得知, 造成这种现象的原因在于各模式土壤冻融参数化方案并不完善以及土壤热导率模拟过大。过大的土壤热导率使得热量能够传递到更深的土层, 因而造成上述偏差。对冻结期陆面过程进行模拟时, 不完善的冻融方案造成含冰量高估, 从而进一步增大土壤导热率^[84-86]。

日尺度上, CoLM在冻结期的模拟结果表现出低估浅层夜晚土壤温度, 而高估白天土壤温度^[87]。SiB2对BJ站夏季土壤温度日变化的模拟同样也展现出白天土壤温度模拟更暖, 夜晚更冷^[88]。Zheng等^[89]采用Noah模式对冻结期土壤温度进行模拟却得出与CoLM模式相反的结论, 原模式在白天高估了感热、潜热通量而低估土壤温度。由于日尺度上土壤温度的变化主要受太阳辐射日变化的影响, 不同模式之所以在日尺度上低估或者高估土壤温度,

表2 基于不同方法所得到的青藏高原近地表土壤冻融状态变化

Tab.2 Change of surface soil freeze-thaw state obtained by different methods

时间尺度	研究区	资料来源	冻结起始 时间/d	滞后天 数/d	融化起始 时间/d	提前 天数/d	冻结持续 时间/d	缩短天 数/d	冻结天数/d	活动层 厚度/m	活动层厚度 变化速率/ (cm/a)	最大冻结 深度/m	最大冻结深度 变化速率 (cm/a)	冻结/融化指数 变化速率 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d/a}$)	参考文献
1995—2007年	青藏公路沿线	实测资料	—	—	—	—	—	—	—	2.41	7.5	—	—	—	[33]
1988—2007年	青藏高原	遥感资料	—	10.1	—	14.3	—	—	33.7	—	—	—	—	—	[62]
2006—2010年	青藏铁路沿线	实测资料	—	—	—	—	—	—	—	3.1	6.3	—	—	—	[63]
1981—2010年	青藏高原	模式模拟	290	5.1	107	14.1	182	19.2	—	2.01	1.5	2.47	3.4	—	[37, 64]
1980—2007年	青藏高原中部	实测资料	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11.12/12.50	[65]
1954—2006年	黑河流域	实测资料	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.54/—	[66]
1972—2006年	黑河流域	实测资料	—	7	—	14	—	21	—	—	—	—	1960—2007 年: 0.4	—	[67]
1990—2015年	北半球	实测资料	—	—	—	—	—	—	—	2.3	—	—	—	—	[68]
1960—2014年	三江源	实测资料	—	17.6	—	19.5	—	41.4	—	—	—	—	0.398	—	[69]
1970—2000年	中国境内	实测资料	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.658	0.22	—	[35]
1980—2013年	黑河流域	模式模拟	—	—	—	—	—	—	SFG: 21.4~115.4 PF: 176.8~210	—	—	—	—	—	[70]
2002—2011年	黄河源区	遥感资料	—	0.9	—	3.1	—	5.2	—	—	—	—	—	—	[71]
1980—2013年	青藏高原	模式模拟	—	—	—	—	—	—	—	2.30	3.1	—	—	—	[72]
1980—2015年	青藏高原	实测资料	—	26	—	14	—	41	—	—	—	—	—	—	[73]
1971—2013年	黑河上游	模式模拟	—	—	—	—	—	—	—	—	0.43	—	0.32	—	[74]
1965—2014年	黄河源区	模式模拟	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.347	—	[75]
1980—2013年	青藏高原	实测资料	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13.6/13.9	[76]
1981—2018年	青藏公路沿线	实测资料	—	—	—	—	—	—	—	—	1.95	—	—	—	[77]
1901—2015年	北半球	再分析资料	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.58/0.98	[78]
1961—2010年	中国境内	实测资料	—	11	—	17.5	—	29.5	—	—	—	—	0.47	—	[79]
1988—2008年	怒江上游	遥感资料	275	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[80]

注:—代表文献中未提及;平均冻结起始时间、融化起始时间定义为积日;SFG为季节冻土,PF为多年冻土。

产生偏差的原因在于对辐射通量、能量通量以及土壤热通量模拟的误差。

2.1.2 土壤湿度

陆面模式中由 Richard 方程所定义的土壤水流迁移公式如下:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) \right] + S(\theta) \quad (2)$$

式中: θ 为土壤含水量, K 为土壤导水率 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), D 为水流扩散率 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), S 代表源、汇项(如降水、露水、蒸发和迁移等) ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$), t 代表时间(s)。

由于含冰量无法通过观测得到,因此本文的土壤湿度为土壤未冻水含量。VIC、Noah、Mosaic 以及 CLM 模式对那曲和玛曲观测网的模拟都可以抓住土壤湿度的时间变化,但所有模式都系统地低估表层土壤湿度。造成这种偏差的原因在于高原土壤垂直异质性强^[90]以及模拟的土壤深度与观测土壤深度不匹配^[91]。相比于土壤温度,不同陆面模式对土壤含水量的模拟结果更差,在不同时空尺度表现为更为复杂的规律。一般来说,大部分陆面模式会显著地低估甚至无法模拟冻结期的土壤含水量^[83,92-93],这是因为大部分陆面模式认为当土壤温度低于 0°C 时,土壤中不存在液态水,液态水全部转换为冰。但实际上由于受到土壤盐分的影响,土壤温度低于 0°C 时依然会有液态水存在。还有一部分陆面模式认定 0°C 或者 0°C 以下的某个固定温度区间为土壤发生冻融的临界温度,但真实的冻融过程是一个连续缓慢的变化过程,不存在固定的冻融临界温度^[94]。也就是说,冻融过程参数化方案的不合理导致冬季土壤湿度模拟产生偏差。随着模式冻融过程参数化方案的不断改进(例如 CLM4.5 通过修正永久冻土区土壤的干偏差,改进冻土的水力学特征参数化方案等改善了模式土壤湿度的模拟),陆面模式对冻结期土壤湿度的模拟结果显著提高,最新的陆面模式对土壤湿度模拟的误差主要来自高原雨季。高原的降雨事件大多出现在夏季(6—9月),具有较强的空间异质性和降水频率^[95],并且地表蒸发是水汽的主要来源^[96]。表层土壤中大量的砾石、土壤有机质以及表层植被根系会改变土壤导水率,而且多数模式产汇流机制不完善,不能反映土壤水分侧向移动及河流与地下水的相互作用,模拟的径流大多不再参与随后的垂向水量平衡计算^[97-98]。因此,陆面模式的模拟结果无法很好地抓住频繁的降水、蒸发以及径流所带来的土壤表层含水量的变化,并且低估表层土壤湿度,高估深层

土壤湿度^[99]。

总而言之,土壤温度的模拟偏差具有时空分异性,夏季土壤温度模拟结果好于冬季,浅层土壤温度模拟好于深层,在日尺度上不同模式会高估或者低估土壤温度。造成土壤温度模拟出现偏差的主要原因在于土壤热导率和热容量参数化方案的不完善。大部分陆面模式会显著低估甚至无法模拟冻结期的土壤含水量。随着模式发展,陆面模式对冻结期土壤湿度的模拟结果显著提高,但模式还是无法很好地抓住频繁的降水、蒸发所带来的土壤表层含水量的变化,导致土壤湿度模拟的误差主要来自高原雨季。通过耦合水文模型,加强对蒸散发、土壤水分的横纵向流动等关键过程的描述可以使得陆面—水文模式更好地刻画寒区陆气间能量、水分以及物质的交换^[100]。

2.2 针对青藏高原冻融过程的参数化改进

应用于陆面模式中的冻融过程参数化大体可以分为4类:①认为只在 0°C 发生土壤的冻融;②假设冻融过程发生在冰点到冰点下的某一固定温度区间;③利用土壤液态水含量与温度的经验关系去确定土壤液态水的含量;④利用土壤基质势去定义当土壤温度低于冰点时的最大液态水含量^[101-102]。第一,二类冻融过程参数化方案明显不符合实际情况,野外观测证明在非饱和土壤中,当土壤温度在 0°C 时土壤不含冰。非饱和土壤的结冰过程是连续发生的过程,即使温度较低,土壤中也存在液态水。不同土质、不同含水量的土壤在结冰—融化过程中,不可能在某一共同固定温度区间完成冻结—融化。第三类方案经验性较强,通用性较差,不适合作为陆面模式的参数化方案^[103]。因此,大多数针对高原冻融过程的参数化方案主要就是利用土壤基质势去定义当土壤温度低于冰点时,土壤中所存在的最大液态水含量^[84,89,93,104],并且过冷水方案的不同导致冻融过程期间土壤液态水含量模拟值差异显著^[105]。即

$$\Psi = \begin{cases} \Psi_{\text{sat}} \left(\frac{\theta_{\text{liq}}}{\theta_{\text{sat}}} \right)^{-b} & (T > T_{\text{frz}}) \\ 10^3 \times \frac{L_f (T - T_{\text{frz}})}{gT} & (T \leq T_{\text{frz}}) \end{cases} \quad (3)$$

或

$$\Psi = \begin{cases} \Psi_{\text{sat}} \left(\frac{\theta_{\text{liq}}}{\theta_{\text{sat}}} \right)^{-b} (1 + c_k \theta_{\text{ice}})^2 & (T > T_{\text{frz}}) \\ 10^3 \times \frac{L_f (T - T_{\text{frz}})}{gT} & (T \leq T_{\text{frz}}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: Ψ 为土壤基质势(mm), Ψ_{sat} 为饱和土壤基质势(mm), θ_{liq} 为土壤体积含水量($m^3 \cdot m^{-3}$), θ_{sat} 为饱和土壤含水量($m^3 \cdot m^{-3}$), b 为 Clapp-Hornberger 常数, L_f 为融解潜热(0.336×10^6 J/kg), g 为重力加速度, T_{frz} 为冰点温度, c_k 为考虑冰的形成使得土壤表面积增加的影响(取平均值为 8.0), θ_{ice} 为含冰量。联立式(3)或(4),就可得出当温度低于冰点时,土壤能保持的最大液态水含量。改进后的参数化方案显著提高了模拟结果,尤其是冻结期的土壤含水量和土壤温度。但是上述方法认定土壤冻融发生在 0°C ,真实的冻融过程是一个连续缓慢变化的过程,不存在固定的冻融临界温度,必须根据平衡情况下土壤水势和温度之间的关系以及固有的土壤水力学本构关系来确定土壤含水量和温度之间的关系。因此,李倩等^[106]提出利用土壤水势定义土壤冻融发生的临界温度,采用这个方法调整的 CLM4.0 模式模拟结果更加接近于真实的冻融过程^[92]。虽然上述方法可以更好地模拟冻融过程,但在求解冻融过程的控制方程时一般采用迭代法,并且控制方程是将土壤温度和体积含水量作为方程预报量,因此在每次迭代开始时都要对含冰量进行估计,其估计的偏差将直接影响土壤温度的正确计算,进而影响冰水相变速率,从而对模拟精度和计算速度产生影响。为了规避相变速率的不确定性引起的模式计算不稳定性, Li 等^[94]用土壤总含水量和总焓来代替体积含水量和土壤温度作为方程预报量。对高原 DY、D66 和阿里站的陆面过程进行模拟的结果表明,改进后的模式相较于调整最大液态水含量和临界温度的方案模拟效果更好^[94,107-108]。但是利用这种方案对高原进行模拟的时间较短(一年甚至是半年),并且由于较为简单的积雪参数方案,在对融化过程中土壤温度和土壤湿度的模拟仍然存在较大偏差。在上述研究的基础上, Yang 等^[109]又将相变效率和相变对土壤热传导的影响引入 CLM4.5 模式并进行验证,结果表明模式对于土壤水分的日变化和季节变化的模拟结果更加接近实测值。在土壤冻融过程中,土壤水热传输过程是相互耦合的,土壤温度决定相变是否发生,土壤冻融过程影响地气间、土壤层间的能量平衡。因此在修改土壤冻融过程参数化方案时,不仅要考虑垂直方向上的能量变化及其随着的土壤温湿变化,更要考虑能量在土壤层中横向的传输。这可能是影响高原陆面过程模拟的重要因素。

3 青藏高原土壤冻融过程对近地面大气和气候的影响

青藏高原因尺度,纬度,经度,高度和坡度的特殊性决定了其对区域和全球气候具有重要影响^[110]。众多研究表明,土壤冻融过程作为高原地表最显著的物理特征,因冰水比在其不同阶段的巨大差异会直接影响地气间的能水循环,进而对区域和东亚的气候状况产生影响。无论是王澄海等^[111-112]利用长期最大冻土深度资料结合观测的降水资料以及 NCAR/NCEP 风场资料分析,还是张宇等^[113]利用模式模拟结果,他们均指出,高原季节冻土的年冻融过程对青藏高原上空及东亚的大气环流有显著的影响,并与中国夏季降水呈现明显的负相关关系,使得高原最大土壤冻结深度可以被作为中国夏季降水的预测信号。Yang 等^[114-115]在王澄海等研究的基础上利用在时空尺度更精细的格点资料和实测资料,进一步分析了高原土壤冻融与中国东部夏季降水之间的关系。其结论表明,高原土壤秋季冻结融化过程可以使土壤保留大量的液态水并一直持续到第二年的春季,春季高原东部土壤湿度的异常值为正时会导致华南和黄河流域夏季降水减少、长江流域和中国东北地区夏季降水增加,因此高原秋季土壤水分异常值可以视为第二年中国东部夏季降水的预测信号。高原土壤冻融过程除了会对东亚地区气候产生影响外,对高原自身气候变化也有重要作用。杨梅学等^[40]和王澄海等^[116]利用 GAME-Tibet 试验期获得的资料分析都指出,与冻融过程紧密联系的土壤温湿度在高原季节转换过程中起着不可忽视的作用。高原大气辐射加热场的变化与冻融开始时间一致并且春季高原土壤湿湿度的增加造成地表感潜热的变化,同时在局地尺度的水循环过程中土壤湿度的变大力地促进了高原湿季的开始。

土壤冻融过程使得土壤中水分不断发生相变,造成土壤在冻融过程不同阶段吸收和释放大量的能量,从而影响能量在地气间的平衡状态。Li 等^[117]的研究表明,能量分量的最大值都出现在夏季,冬季则为最小值,并且在冻融过程中活动层温度和季节融化深度都与地表能量呈现显著相关。针对高原典型植被类型高寒草原, Shang 等^[118]利用玛曲站的实测数据分析了不同冻融状态下地气间能量平衡的变化。由于土壤反照率和土壤湿度的明显不

同,冻结期和融化期的净辐射有显著差异并且感热通量和潜热通量分别为其主要的净辐射通量来源。但从年尺度来看,净辐射通量主要是由潜热通量提供。尽管Guo等^[43-44]和陈渤黎等^[119]利用不同陆面模式对高原不同站点的冻融过程进行了研究,但结论都指出冻融过程改变了地表能量通量的分配,波文比在春秋季节冻结融化期相差不大,但在完全冻结期会显著减小,并且冻融过程对潜热的影响则是在冻结融化期更为显著。

4 结论与展望

4.1 结论

针对青藏高原土壤冻融过程的特殊性和重要性,本文从观测、模拟及对近地面大气和气候的影响3个方面对1990年以来的研究进行了综述。利用观测资料对高原冻融过程进行的研究表明:①根据年冻结融化过程中土壤水热状况的不同,高原上一个完整的年冻融循环过程中,各层土壤大体都经历了夏季融化期、秋季融化—冻结期、冬季冻结期和春季冻结—融化期4个阶段。但由于不同站点所处地理位置的不同,冻融过程存在冻结或消融起止时间、速率、类型等区别。②多年冻土区和季节冻土区的日冻融循环过程差异较大,主要体现在多年冻土区日冻融循环时间较短,但均存在消融期土壤日冻融循环的存在时间长于冻结期;并随着土壤深度的加深,二者土壤日冻融循环持续日数均明显减少。③土壤温度的模拟偏差具有时空分异性,夏季土壤温度模拟结果好于冬季,浅层土壤温度模拟好于深层,在日尺度上不同模式会高估或者低估土壤温度;造成土壤温度模拟出现偏差的主要原因在于土壤热导率和热容量参数化方案的不完善。④大部分陆面模式会显著低估甚至无法模拟冻结期的土壤含水量。随着模式发展,陆面模式对冻结期土壤湿度的模拟效果显著提高,陆面模式的模拟结果无法很好地抓住频繁的降水、蒸发所带来的土壤表层含水量的变化,导致土壤湿度模拟的误差主要来自高原雨季。陆面模式模拟的结论表明:①大多数针对高原冻融过程的参数化方案主要就是利用土壤基质势去定义当土壤温度低于冰点时土壤中所存在的最大液态水含量。但是上述方法认定土壤冻融发生在0℃,真实的冻融过程是连续缓慢变化的过程,不存在固定的冻融临界温度,必须根据平

衡情况下土壤水势和温度之间的关系以及固有的土壤水力学特征本构关系来确定土壤含水量和温度之间的关系,并且为了规避相变速率的不确定性引起的模式计算不稳定性,需用土壤总含水量和总焓来代替体积含水量和土壤温度作为方程预报量。②土壤冻融过程的模拟不仅受制于冻融过程参数化方案,而且也受其他参数化方案的影响(如土壤热导率和导水率方案,积雪参数化方案以及地表粗糙度长度方案等)。③模拟过程中,随着热量的传导和含水量变化,目前对表层大气的反馈的研究不足。

4.2 展望

1990年以来,大量学者对青藏高原土壤冻融过程进行了大量的研究并取得了一系列显著成果,但在冻融过程的观测、陆面模式的适用性以及模式参数化改进等方面有待进一步发展。

(1) 由于青藏高原地域辽阔,下垫面复杂,自然环境恶劣,导致气象水文台站十分稀少,所获得观测资料时间较短,分辨率较低。土壤冻融过程的观测、模式适用性和参数化方案改进研究所用的观测站点主要位于青藏高原中东部地区以及青藏公路沿线(图1),结合高原气象站的分布特点^[60]可以得知大多数的观测站点是位于平坦的谷地。并且融区、积雪、土壤有机质、植被盖度、植物根系、径流等局地因素对土壤冻融过程影响显著,使得高原土壤冻融过程具有极强的地域空间异质性。因此,为了更准确地理解高原土壤冻融过程并在更广泛的时空尺度上评价模式的适用性,就必须在缺乏数据的地区特别是高原西部和高海拔地区建立更多的观测站,以及进行更大规模的陆面观测试验。

(2) 陆面模式的适用性分析和参数化改进最终目的就是為了更全面地理解土壤冻融过程并且更精确地模拟出区域气候模式和全球气候模式中的陆面过程,而目前模式适用性分析主要集中于短时空尺度,因此,应当加强陆面模式与区域气候模式和全球气候模式的耦合,对高原土壤冻融过程进行更大时空尺度的模拟研究。驱动陆面模式对更广泛时空尺度的模拟则需要以遥感资料和再分析数据为大气强迫资料,那么对遥感资料和再分析资料的精度检验就必不可少。

(3) 参数化方案的改进取得了不错的进展,从不合理、考虑较为简单的方案逐渐发展为合理、详细的方案。但是大部分的改进研究仅仅针对某一

参数化方案。陆面过程内部的各子过程不断发生着相互作用,多个参数化方案会影响同一个陆面过程物理量(例如:土壤温度、土壤湿度)。研究表明,多参数化方案的改进较单参数化方案具有更好的模拟效果^[83,89,98,107,120]。因此,未来努力方向应为避免局限于某一参数化方案的改进,而应该考虑对多参数化方案进行订正。

参考文献(References)

- [1] Pavlov A V. Current changes of climate and permafrost in the Arctic and sub-Arctic of Russia [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1994, 5(2): 101-110.
- [2] 周幼吾, 邱国庆, 郭东信. 中国冻土 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. [Zhou Youwu, Qiu Guoqing, Guo Dongxin. *China permafrost*. Beijing, China: Science Press, 2000.]
- [3] 刘帅, 于贵瑞, 浅沼顺, 等. 蒙古高原中部草地土壤冻融过程及土壤含水量分布 [J]. *土壤通报*, 2009, 46(1): 46-51. [Liu Shuai, Yu Guirui, Qian Zhaoshun, et al. The thawing-freezing processes and soil moisture distribution of the steppe in central Mongolian Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 46-51.]
- [4] Cheng G D, Jin H J. Permafrost and groundwater on the Qinghai-Tibet Plateau and in Northeast China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1): 5-23.
- [5] Chang J, Wang G X, Li C J, et al. Seasonal dynamics of suprapermfrost groundwater and its response to the freezing-thawing processes of soil in the permafrost region of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 58: 727-738.
- [6] Wang G X, Mao T X, Chang J, et al. Processes of runoff generation operating during the spring and autumn seasons in a permafrost catchment on semi-arid plateaus [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 550: 307-317.
- [7] Zhang T J, Baker T H W, Cheng G D. The Qinghai-Tibet Railroad: A milestone project and its environment impact [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 53(3): 229-240.
- [8] Li G Y, Yu Q H, Ma W, et al. Freeze-thaw properties and long-term thermal stability of the unprotected tower foundation soils in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Power Transmission Line [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 121: 258-274.
- [9] Wu Q B, Zhong Z Q, Gao S R, et al. Thermal impacts of engineering activities and vegetation layer on permafrost in different alpine ecosystems of the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *The Cryosphere*, 2016, 10(4): 1695-1706.
- [10] Wilson R M, Fitzhugh L, Whiting G J, et al. Greenhouse gas balance over thaw-freeze cycles in discontinuous zone permafrost [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(2): 387-404.
- [11] Congreves K A, Wagner-Riddle C, Si B C, et al. Nitrous oxide emissions and biogeochemical responses to soil freezing-thawing and drying-wetting [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 117: 5-15.
- [12] Mu C C, Li L L, Wu X D, et al. Greenhouse gas released from the deep permafrost in the northern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 4205. doi: 10.1038/s41598-018-22530-3.
- [13] Keryling J, Beierkuhnlein C, Jentsch A. Effects of soil freeze-thaw cycles differ between experimental plant communities [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2010, 11(1): 65-75.
- [14] Wang G X, Liu G S, Li C H, et al. The variability of soil thermal and hydrological dynamics with vegetation cover in a permafrost region [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 162: 44-57.
- [15] Satio K, Zhang T J, Yang D Q, et al. Influence of the physical terrestrial Arctic in the eco-climate system [J]. *Ecological Applications*, 2013, 23(8): 1778-1797.
- [16] Yang M X, Yao T D, Gou X H, et al. The soil moisture distribution, thawing-freezing processes and their effects on the seasonal transition on the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 21(5): 457-465.
- [17] Yang M X, Yao T D, Gou X H, et al. Diurnal thaw/freezing cycles of the surface ground on the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(1): 136-139.
- [18] Matsumura S, Yamazaki K. A longer climate memory carried by soil freeze-thaw processes in Siberia [J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4): 045402. doi: 10.1088/1748-9326/7/4/045402.
- [19] Rawlins M A, Nicolsky D J, McDonald K C, et al. Simulating soil freeze/thaw dynamics with an improved pan-Arctic water balance model [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2013, 5(4): 659-675.
- [20] You Q G, Xue X, Peng F, et al. Surface water and heat exchange comparison between alpine meadow and bare land in a permafrost region of the Tibetan Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 232: 48-65.
- [21] Zheng D H, Van der Velde R, Su Z B, et al. Evaluation of noah frozen soil parameterization for application to a Tibetan meadow ecosystem [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(6): 1749-1763.
- [22] Qiu J. The third pole [J]. *Nature*, 2008, 454: 393-396.
- [23] Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Cli-

- mate change will affect the Asian water towers [J]. *Science*, 2010, 328: 1382-1385.
- [24] 姚檀栋. “第三极环境(TPE)国际计划”: 应对区域未来环境生态重大挑战问题的国家计划 [J]. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 884-892. [Yao Tandong. TPE international program: A program for coping with major future environmental challenges of The Third Pole region. *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 884-892.]
- [25] Zou D F, Zhao L, Sheng Y, et al. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau [J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(6): 2527-2542.
- [26] Wang B L, French H M. Permafrost on the Tibet Plateau, China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1995, 14(3): 255-274.
- [27] Duan A M, Xiao Z X. Does the climate warming hiatus exist over the Tibetan Plateau? [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13711. doi: 10.1038/srep13711.
- [28] You Q L, Min J Z, Kang S C. Rapid warming in the Tibetan Plateau from observations and CMIP5 models in recent decades [J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(6): 2660-2670.
- [29] Wang X J, Pang G J, Yang M X, et al. Evaluation of climate on the Tibetan Plateau using ERA-Interim reanalysis and gridded observations during the period 1979—2012 [J]. *Quaternary International*, 2017, 444: 76-86.
- [30] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [31] Wu Q B, Zhang T J, Liu Y Z. Permafrost temperatures and thickness on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Global and Planetary Change*, 2010, 72(1-2): 32-38.
- [32] Zhu F X, Cuo L, Zhang Y X, et al. Spatiotemporal variations of annual shallow soil temperature on the Tibetan Plateau during 1983–2013 [J]. *Climate Dynamics*, 2018, 51(5-6): 2209-2227.
- [33] Wu Q B, Zhang T J. Changes in active layer thickness over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1995 to 2007 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D9): D09107. doi: 10.1029/2009JD012974.
- [34] Wu Q B, Hou Y D, Yun H B, et al. Changes in active-layer thickness and near-surface permafrost between 2002 and 2012 in alpine ecosystems, Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China [J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 124: 149-155.
- [35] Peng X Q, Zhang T J, Frauenfeld O W, et al. Response of seasonal soil freeze depth to climate change across China [J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(3): 1059-1073.
- [36] Wang T H, Yang D W, Qin Y, et al. Historical and future changes of frozen ground in the upper Yellow River Basin [J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 162: 199-211.
- [37] Guo D L, Wang H J. Simulation of permafrost and seasonally frozen ground conditions on the Tibetan Plateau, 1981–2010 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(11): 5216-5230.
- [38] Ran Y H, Li X, Cheng G D. Climate warming over the past half century has led to thermal degradation of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(2): 595-608.
- [39] 杨梅学, 姚檀栋, 勾晓华. 青藏公路沿线土壤的冻融过程及水热分布特征 [J]. *自然科学进展*, 2000, 10(5): 443-450. [Yang Meixue, Yao Tandong, Gou Xiaohua. Soil melting-freezing processes and water-heat distribution feature along the Qinghai-Xizang highway. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(5): 443-450.]
- [40] 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. [Yang Meixue, Yao Tandong, He Yuanqing. The role of soil moisture-energy distribution and melting-freezing processes on seasonal shift in Tibetan Plateau. *Mountain Research*, 2002, 20(5): 553-558.]
- [41] 丁永建, 叶佰生, 刘时银, 等. 青藏高原大尺度冻土水文监测研究 [J]. *科学通报*, 2000, 45(2): 208-211. [Ding Yongjian, Ye Baisheng, Liu Shiyang, et al. Monitoring and study of large scale permafrost hydrological process in Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(2): 208-211.]
- [42] 陈学龙, 马耀明, 李茂善, 等. 藏北地区近地层大气和土壤特征量分析 [J]. *高原气象*, 2008, 27(5): 941-948. [Chen Xuelong, Ma Yaoming, Li Maoshan, et al. Analyses on near surface layer atmospheric characteristics and soil features in Northern Tibetan Plateau. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(5): 941-948.]
- [43] Guo D L, Yang M X, Wang H J. Characteristics of land surface heat and water exchange under different soil freeze/thaw conditions over the central Tibetan Plateau [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(16): 2531-2541.
- [44] Guo D L, Yang M X, Wang H J. Sensible and latent heat flux response to diurnal variation in soil surface temperature and moisture under different freeze/thaw soil conditions in the seasonal frozen soil region of the central Tibetan Plateau [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63(1): 97-107.
- [45] 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. [Zhang Mingli, Wen Zhi, Xue Ke. Soil moisture-heat migration characteristics within the permafrost ac-

- tive layer in Beiluhe. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(9): 176-181.]
- [46] Zhang Z Q, Wu Q B, Gao S R, et al. Response of the soil hydrothermal process to difference underlying conditions in the Beiluhe permafrost region [J]. *Environmental Earth Science*, 2017, 76(5): 194. doi: 10.1007/s12665-017-6518-8.
- [47] 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. [Zhao Lin, Cheng Guodong, Li Shuxun, et al. Thawing and freezing processes of active layer in Wudaoliang region of Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(11): 1205-1211.]
- [48] 王庆锋, 金会军, 张廷军, 等. 祁连山区黑河上游高山多年冻土区活动层季节冻融过程及其影响因素 [J]. *科学通报*, 2016, 61(24): 2742-2756. [Wang Qingfeng, Jin Huijun, Zhang Tingjun, et al. Active layer seasonal freeze-thaw processes and influencing factors in the alpine permafrost regions in the upper reaches of the Heihe River in Qilian Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(24): 2742-2756.]
- [49] Wang Q F, Zhang T J, Jin H J, et al. Observational study on the active layer freeze-thaw cycle in the upper reaches of the Heihe River of the north-eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Quaternary International*, 2017, 440(Part B): 13-22.
- [50] Wang Q F, Jin H J, Zhang T J, et al. Hydro-thermal processes and thermal offsets of peat soils in the active layer in an alpine permafrost region, NE Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 156: 1-12.
- [51] Wang Q F, Yang Q Q, Guo H, 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(3-4): 929-941.
- [52] 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. [Hu Guojie, Zhao Lin, Li Ren, et al. Characteristics of hydro-thermal transfer during freezing and thawing period in permafrost regions. *Soils*, 2014, 46(2): 355-360.]
- [53] 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. [Jiao Yongliang, Li Ren, Zhao Lin, et al. Processes of soil thawing-freezing and features of soil moisture migration in the permafrost active layer. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(2): 237-247.]
- [54] 罗栋梁, 金会军, 吕兰芝, 等. 黄河源区多年冻土活动层和季节冻土冻融过程时空特征 [J]. *科学通报*, 2014, 59(14): 1327-1336. [Luo Dongliang, Jin Huijun, Lv Lanzhi, et al. Spatiotemporal characteristics of freezing and thawing of the active layer in the source areas of the Yellow River (SAYR). *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(14): 1327-1336.]
- [55] 李卫鹏, 范继辉, 沙玉坤, 等. 藏北高原草原土壤温度变化与冻融特征 [J]. *山地学报*, 2014, 32(4): 407-416. [Li Weipeng, Fan Jihui, Sha Yukun, et al. Soil temperature variation and thaw-freezing cycle in the alpine cold steppe, northern Tibetan Plateau. *Mountain Research*, 2014, 32(4): 407-416.]
- [56] 范继辉, 鲁旭阳, 王小丹. 藏北高原草地土壤冻融循环过程及水热分布特征 [J]. *山地学报*, 2014, 32(4): 385-392. [Fan Jihui, Lu Xuyang, Wang Xiaodan. The freezing-thawing processes and soil moisture-energy distribution in permafrost active layer, Northern Tibet. *Mountain Research*, 2014, 32(4): 385-392.]
- [57] 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. [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. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(30): 2864-2871.]
- [58] 张寅生, 马颖钊, 张艳林, 等. 青藏高原坡面尺度冻融循环与水热条件空间分析 [J]. *科学通报*, 2015, 60(7): 664-673. [Zhang Yingsheng, Ma Yingzhao, Zhang Yanlin, et al. Hillslope patterns in thaw-freeze cycle and hydrothermal regions on Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(7): 664-673.]
- [59] 王学佳, 杨梅学, 万国宁. 藏北高原D105点土壤冻融状况与温湿特征分析 [J]. *冰川冻土*, 2012, 34(1): 56-63. [Wang Xuejia, Yang Meixue, Wan Guoning. Processes of soil thawing-freezing and features of ground temperature and moisture at D105 on the northern Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1): 56-63.]
- [60] 万国宁. 青藏高原中部土壤冻融过程及水热时空变化研究 [D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2012. [Wan Guoning. Study on soil freezing-thawing processes and spatiotemporal variations in soil hydrological and thermal regimes on the central Tibetan Plateau. Lanzhou, China: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, 2012.]
- [61] Wang X J, Pang G J, Yang M X. Precipitation over the Tibetan Plateau during recent decades: A review based on observations and simulations [J]. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(3): 1116-1131.
- [62] Li X, Jin R, Pan X D, et al. Changes in the near-surface

- soil freeze-thaw cycle on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 17: 33-42.
- [63] Wu Q B, Zhan T J, Liu Y Z. Thermal state of the active layer and permafrost along the Qinghai-Xizang (Tibet) Railway from 2006 to 2010 [J]. *The Cryosphere*, 2012, 6 (3): 607-612.
- [64] Guo D L, Wang H J. Simulated change in the near-surface soil freeze/thaw cycle on the Tibetan Plateau from 1981 to 2010 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59 (20): 2439-2448.
- [65] Wu T H, Zhao L, Li R, et al. Recent ground surface warming and its effect on permafrost on the central Qinghai-Tibet Plateau [J]. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(4): 920-930.
- [66] 曹斌, 张廷军, 彭小清, 等. 黑河流域年冻融指数及其时空变化特征分析 [J]. *地球科学进展*, 2015, 30(3): 357-366. [Cao Bin, Zhang Tingjun, Peng Xiaoqing, et al. Spatial variability of freezing-thawing index over the Heihe River Basin. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(3): 357-366.]
- [67] Wang Q F, Zhang T J, Peng X Q, et al. Changes of soil thermal regimes in the Heihe River Basin over Western China [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2015, 47(2): 231-241.
- [68] Luo D L, Wu Q B, Jin H J, et al. Recent changes in the active layer thickness across the northern hemisphere [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(7): 555. doi: 10.1007/s12665-015-5229-2.
- [69] Luo S Q, Fang X W, Lyu S H, et al. Interdecadal changes in the freeze depth and period of frozen soil on the three rivers source region in China from 1960 to 2014 [J]. *Advances in Meteorology*, 2017, 5931467. doi: 10.1155/2017/5931467.
- [70] Peng X Q, Mu C C. Changes of soil thermal and hydraulic regimes in the Heihe River Basin [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(10): 483. doi: 10.1007/s10661-017-6195-9.
- [71] Wang R, Zhu Q K, Ma H, et al. Spatial-temporal variations in near-surface soil freeze-thaw cycles in the source region of the Yellow River during the period 2002-2011 based on the Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E) data [J]. *Journal of Arid Land*, 2017, 9(6): 850-864.
- [72] Qin Y H, Wu T H, Zhao L, et al. Numerical modeling of the active layer thickness and permafrost thermal state across Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(21): 11604-11620.
- [73] 杨淑华, 吴通华, 李韧, 等. 青藏高原近地表土壤冻融状况的时空变化特征 [J]. *高原气象*, 2018, 37(1): 43-53. [Yang Shuhua, Wu Tonghua, Li Ren, et al. Spatial-temporal changes of the near surface soil freeze-thaw status over the Qinghai-Tibetan Plateau. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(1): 43-53.]
- [74] Gao B, Yang D W, Qin Y, et al. Change in frozen soils and its effect on regional hydrology, upper Heihe basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(2): 657-673.
- [75] Wang T H, Yang D W, Qin Y, et al. Historical and future changes of frozen ground in the upper Yellow River Basin [J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 162: 199-211.
- [76] Wu T H, Qin Y H, Wu X D, et al. Spatiotemporal changes of freezing/thawing indices and their response to recent climate change on the Qinghai-Tibet Plateau from 1980-2013 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 132(3-4): 1187-1199.
- [77] 程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响 [J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2783-2795. [Cheng Guodong, Zhao Lin, Li Ren, et al. Characteristics, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2783-2795.]
- [78] Shi Y Y, Niu F J, Lin Z J, et al. Freezing/thawing index variations over the circum-Arctic from 1901-2015 and the permafrost extent [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 1294-1305.
- [79] Wang X Q, Chen R S, Liu G H, et al. Spatial distributions and temporal variations of the near-surface soil freeze state across China under climate change [J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 172: 150-158.
- [80] Luo X, Fan X M, Ji X, et al. Hydrological impacts of interannual variations in surface soil freezing processes in the upper Nu-Salween River Basin [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2020, 52(1): 1-12.
- [81] Wood E F. *Land surface-atmosphere interactions for climate modeling* [M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [82] 孙菽芬. 陆面过程的物理、生化机理和参数化模型 [M]. 北京: 气象出版社, 2005. [Sun Shufen. *Parameterization study of physical and biochemical mechanism in land surface process*. Beijing, China: China Meteorology Press, 2005.]
- [83] Zheng D H, Van der Velde R, Su Z B, et al. Impacts of Noah model physics on catchment-scale runoff simulations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(2): 807-832.

- [84] Luo S Q, Lv S H, Zhang Y. Development and validation of the frozen soil parameterization scheme in Common Land Model [J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 55(1): 130-140.
- [85] 陈渤黎, 罗斯琼, 吕世华, 等. 陆面模式 CLM 对若尔盖站冻融期模拟性能的检验与对比 [J]. 气候与环境研究, 2014, 19(5): 649-658. [Chen Boli, Luo Siqiong, Lv Shihua, et al. Validation and comparison of the simulation at Zoige Station during freezing and thawing with land surface model CLM. Climate and Environmental Research, 2014, 19(5): 649-658.]
- [86] 刘火霖, 胡泽勇, 杨耀先, 等. 青藏高原那曲地区冻融过程的数值模拟研究 [J]. 高原气象, 2015, 34(3): 676-683. [Liu Huolin, Hu Zeyong, Yang Yaoxian, et al. Simulation of the freezing-thawing processes at Nagqu area over the Qinghai-Xizang Plateau. Plateau Meteorology, 2015, 34(3): 676-683.]
- [87] 罗斯琼, 吕世华, 张宇, 等. 青藏高原中部土壤热传导率参数化方案的确立及在数值模式中的应用 [J]. 地球物理学报, 2009, 52(4): 919-928. [Luo Siqiong, Lv Shihua, Zhang Yu, et al. Soil thermal conductivity parameterization establishment and application in numerical model of central Tibetan Plateau. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(4): 919-928.]
- [88] Gao Z Q, Chae N, Kim J, et al. Modeling of surface energy partitioning, surface temperature, and soil wetness in the Tibetan prairie using the Simple Biosphere Model 2 (SiB2) [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109, D06102. doi: 10.1029/2003JD004089.
- [89] Zheng D H, van der Velde R, Su Z B, et al. Evaluation of Noah frozen soil parameterization for application to a Tibetan meadow ecosystem [J]. Journal of Hydrometeorology, 2017, 18(6): 1749-1763.
- [90] Chen Y Y, Yang K, Qin J, et al. Evaluation of AMSR-E retrievals and GLDAS simulations against observations of a soil moisture network on the central Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(10): 4466-4475.
- [91] Bi H Y, Ma J W, Zhang W J, et al. Comparison of soil moisture in GLDAS model simulations and in situ observations over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(6): 2658-2678.
- [92] 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. [Xia Kun, Luo Yong, Li Weiping. Simulation of freezing and melting of soil on the northeast Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(22): 1828-1838.]
- [93] Xiao Y, Zhao L, Dai Y J, et al. Representing permafrost properties in CoLM for the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau [J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 87: 68-77.
- [94] Li Q, Sun S F, Xue Y K. Analyses and development of a hierarchy of frozen soil models for cold region study [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115: D03107. doi: 10.1029/2009JD012530.
- [95] Yang M X, Yao T D, Gou X H, et al. The spatially heterogeneous distribution of precipitation of the Anduo area, Tibetan Plateau, in summer 1998 [J]. Hydrological Sciences Journal: Journal des Sciences Hydologiques, 2007, 52(4): 645-653.
- [96] Yang M X, Yao T D, Gou X H, et al. Water recycling between the land surface and atmosphere on the northern Tibetan Plateau: A case study at flat observation sites [J]. Arctic, Antarctic and Alpine Research, 2007, 39(4): 694-698.
- [97] 占车生, 宁理科, 邹靖, 等. 陆面水文—气候耦合模拟研究进展 [J]. 地理学报, 2018, 73(5): 893-905. [Zhan Chesheng, Ning Like, Zou Jing, et al. A review on the fully coupled atmosphere-hydrology simulations. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 893-905.]
- [98] Gao Y H, Li K, Chen F, et al. Assessing and improving Noah-MP land model simulations for the central Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(18): 9258-9278.
- [99] Sun S B, Chen B Z, Chen J, et al. Comparison of remotely-sensed and modeled soil moisture using CLM4.0 with in situ measurements in the central Tibetan Plateau area [J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 129: 31-44.
- [100] 杨大文, 徐宗学, 李哲, 等. 水文学研究进展与展望 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 36-45. [Yang Dawen, Xu Zongxue, Li Zhe, et al. Progress and prospect of hydrological sciences. Progress in Geography, 2018, 37(1): 36-45.]
- [101] Li X, Koike T. Frozen soil parameterization in SiB2 and its validation with GAME-Tibet observations [J]. Cold Regions Science and Technology, 2003, 36(1-3): 165-182.
- [102] Wang X J, Yang X M, Pang G J. Simulation and improvement of land surface processes in Nameqie, Central Tibetan Plateau, using the Community Land Model (CLM3.5) [J]. Environment Earth Sciences, 2015, 73(11): 7343-7357.
- [103] 李倩, 孙菽芬. 冻土模式的改进与发展 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(12): 1339-1349. [Li Qian, Sun Shufen. Development of frozen soil model. Advances in Earth Science, 2006, 21(12): 1339-1349.]

- [104] Zhang X, Sun S F, Xue Y K. Development and testing of a frozen soil parameterization for cold region studies [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 8(4): 690-701.
- [105] 刘火霖, 胡泽勇, 韩庚, 等. 基于 Noah-MP 模式的影响青藏高原冻融过程参数化方案评估 [J]. *高原气象*, 2020, 39(1): 1-14. [Liu Huolin, Hu Zeyong, Han Geng, et al. Assessment of freeze-thaw process simulation in Qinghai-Tibetan Plateau by different parameterization schemes based on Noah-MP land surface model. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(1): 1-14.]
- [106] 李倩, 孙菽芬. 通用的土壤水热传输耦合模型的发展和改进研究 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2007, 37(11): 1522-1535. [Li Qian, Sun Shufen. Development of the university and simplified soil model coupling heat and water transport. *Scientia Sinica Terrae*, 2007, 37(11): 1522-1535.]
- [107] Bao H Y, Koike T, Yang K, et al. Development of an enthalpy-based frozen soil model and its validation in a cold region in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(10): 5259-5280.
- [108] Wang C H, Yang K. A new scheme of considering soil water-heat transport coupling based on Community Land Model: Model description and preliminary validation [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2018, 10(4): 927-950.
- [109] Yang K, Wang C H, Li S Y. Improved simulation of frozen-thawing process in land surface model (CLM4.5) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(23): 13238-13258.
- [110] Liu Y M, Lu M M, Yang H J, et al. Land-atmosphere-ocean coupling associated with the Tibetan Plateau and its climate impacts [J]. *National Science Review*, 2020, 7(3): 534-552.
- [111] 王澄海, 董文杰, 韦志刚. 青藏高原季节性冻土年际变化的异常特征 [J]. *地理学报*, 2001, 68(5): 523-531. [Wang Chenghai, Dong Wenjie, Wei Zhigang. The feature of seasonal frozen soil in Qinghai Tibet Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 68(5): 523-531.]
- [112] 王澄海, 董文杰, 韦志刚. 青藏高原季节冻融过程与东亚大气环流关系的研究 [J]. *地球物理学报*, 2003, 46(3): 309-316. [Wang Chenghai, Dong Wenjie, Wei Zhigang. Study on relationship between the frozen-thaw process in Qinghai-Xizang Plateau and circulation in East-Asia. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(3): 309-316.]
- [113] 张宇, 宋敏红, 吕世华, 等. 冻土过程参数化方案与中尺度大气模式的耦合 [J]. *冰川冻土*, 2003, 25(5): 541-546. [Zhang Yu, Song Minhong, Lv Shihua, et al. Frozen soil parameterization scheme coupled with meso-scale model. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(5): 541-546.]
- [114] Yang K, Wang C H. Seasonal persistence of soil moisture anomalies related to freeze-thaw over the Tibetan Plateau and prediction signal of summer precipitation in eastern China [J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(3-4): 2411-2424.
- [115] Yang K, Wang C H. Water storage effect of soil freeze-thaw process and its impacts on soil hydro-thermal regime variations [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 265: 280-294.
- [116] 王澄海, 尚大成. 藏北高原土壤温湿度变化在高原干湿季转换中的作用 [J]. *高原气象*, 2007, 26(4): 677-685. [Wang Chenghai, Shang Dacheng. Effect of the variation of the soil temperature and moisture in the transition from dry season to wet season over Northern Tibetan Plateau. *Plateau Meteorology*, 2007, 26(4): 677-685.]
- [117] Li R, Zhao L, Wu T H, 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.
- [118] Shang L Y, Zhang Y, Lv S H, et al. Energy exchange of an alpine grassland on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(4): 435-446.
- [119] 陈渤黎, 罗斯琼, 吕世华, 等. 基于 CLM 模式的青藏高原土壤冻融过程陆面特征研究 [J]. *冰川冻土*, 2017, 39(4): 760-770. [Chen Boli, Luo Siqiong, Lv Shihua, et al. Land surface characteristics in soil freezing and thawing process on the Tibetan Plateau based on Community Land Model. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(4): 760-770.]
- [120] Wang X J, Pang G J, Yang M X, et al. Effects of modified soil water-heat physics on RegCM4 simulations of climate over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(12): 6692-6712.

Soil freezing-thawing processes on the Tibetan Plateau: A review based on hydrothermal dynamics

CHEN Rui^{1,2,3}, YANG Meixue^{1*}, WAN Guoning¹, WANG Xuejia¹

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China;

2. Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Potsdam 14473, Germany;

3. Department of Geography, Humboldt University of Berlin, Berlin 10099, Germany)

Abstract: The freezing and thawing processes of near-surface soil are one of the most significant physical characteristics of the land surface on the Tibetan Plateau (TP), as well as an essential index for estimating the existence and development of the permafrost and reflecting the climate change. The seasonal and diurnal freezing-thawing processes of the near-surface soil cause the changes and even anomalies of water and energy balance between the land and the atmosphere on the TP, and thus significantly affect surface hydrological processes, ecological environment, carbon and nitrogen cycles, and the weather and climate system on the plateau and of the surrounding areas. This article discusses the observational and simulated changes and the impact on the climate by reviewing latest research progress in soil freezing-thawing processes (SFTPs) over the past 20 years. Our review shows that: 1) During a complete annual freezing-thawing cycle, each layer of soil generally experiences four stages: summer thawing period, autumn thawing-freezing period, winter freezing period, and spring thawing-freezing period. Due to the influence of local factors, the SFTPs show differences in the start and end dates, rate, and type of change. 2) Diurnal freezing-thawing cycles show large differences between the permafrost regions and the seasonally frozen regions, which are mainly reflected in the duration of diurnal freezing-thawing cycles. 3) Although different land surface models (LSMs) can well capture the spatiotemporal variations of physical quantity of SFTPs, all of them need to be revised according to the characteristic of LSMs of the TP. 4) Unreasonable freezing-thawing model parameterization schemes can be improved through avoiding the unstable iterative computation and determining the critical freezing-thawing temperature according to the thermodynamic equilibrium equation. According to the review of existing research, adding high-quality observation stations, using satellite remote sensing data to retrieve SFTPs and deepen the coupling of LSMs with regional climate models and global climate models, developing parameterization schemes that are suitable for SFTPs of the TP, and adjusting the model structures can be helpful for the simulation of SFTPs on the TP.

Keywords: soil freezing-thawing processes; land surface models; model applicability; parameterized modification; Tibetan Plateau