

陆地冰冻圈水文过程的研究现状及展望*

王磊^{1,3)†} 刘虎^{1,3)} 雍斌²⁾ 宋蕾^{1,3)} 李秀萍¹⁾

(1)中国科学院青藏高原研究所, 100101, 北京; (2)河海大学, 210098, 江苏南京; (3)中国科学院大学, 100049, 北京)

摘要 在全球变暖的背景下,作为固态淡水资源库的冰冻圈发生剧烈变化,进而直接影响流域水文过程。因此,冰冻圈水文的研究对于流域水资源利用与管理具有重要意义。近年来,冰冻圈普遍呈现退缩趋势,主要表现为:冰川面积减小、物质亏损,冰川径流增加;积雪面积和雪水当量减小,积雪融化时间提前;多年冻土面积减小、活动层增厚、季节性冻土最大冻结深度和冻结时间减小,但是其对径流的影响效应仍然存在争议。目前研究仍存在数据具有较大的不确定性、对冰冻圈水文内在机制的物理过程认识不足,以及缺乏考虑完整冰冻圈要素的系统研究等几个方面的不足。未来关于新型观测技术手段的研发、包含完整冰冻圈水文过程的物理模型的研发及其应用,将是冰冻圈水文学研究的重点。

关键词 冰冻圈水文; 冰雪; 冻土; 河流; 气候变化

中图分类号 P343.6

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022276

0 引言

冰冻圈是指地球表层连续分布且具有一定厚度的负温圈层,其作为气候系统5大圈层的重要组成部分,与大气圈、水圈、生物圈、岩石圈发生复杂的相互作用,对大气环流、水循环、生态环境以及人类经济社会发展具有重要影响。冰冻圈主要由冰川、积雪、冻土、湖冰和海冰等组成,其覆盖了超过50%的地球陆地面积,其中北半球的积雪和冻土的多年平均最大覆盖可分别占陆地的49%和33%,此外,全球77.2%的淡水资源集中在冰川,是巨大的固态淡水资源库^[1]。在全球变暖背景下,以冰雪消融、冻土水分释放等为主要特征的冰冻圈水文过程受到显著影响。气温升高导致冰雪融化速度增快、消融期提前、冰雪融化量增加,导致海平面加速上升,高山区的冰冻圈释放的融水改变了下游河川径流总量及其组分,对下游地区的水资源利用和管理带来巨大挑战。因此,近年来有关冰冻圈水文过程的研究受到科学界的广泛关注^[2]。

冰冻圈水文过程主要可分为冰川水文过程、积雪水文过程及冻土水文过程3部分(图1)。其中,冰川消融是流域水文过程的重要组成部分,特别在干旱区,冰川径流能够起到“削峰填谷”,稳定水源的作用^[3]。近年来,全球冰川普遍退缩,由此产生的冰川融水使流域水资源量及组成发生显著变化,因此研究冰川变

化的径流效应对流域水资源评价、利用与管理具有重要参考价值^[4]。同样地,作为冰冻圈的重要组成部分,积雪具有更加显著的季节变化,通过改变地表反照率影响陆气能量平衡收支,同时融雪径流是干旱半干旱区在春季最重要的淡水资源,对流域水循环起到重要作用^[5]。冻土作为一种特殊的区域性隔水层或弱透水层,是发育和保存冻土区水均衡的重要基础,在整个水文过程中,因其低透水性、高储水力、季节性冻融过程及冻结/融化水再分配的水文特性,在一定时空尺度上改变地表水体和水分之间的水力联系,同时也会限制大气与土壤的水汽交换等,对地下水径流、水循环和水资源量具有显著影响^[6]。

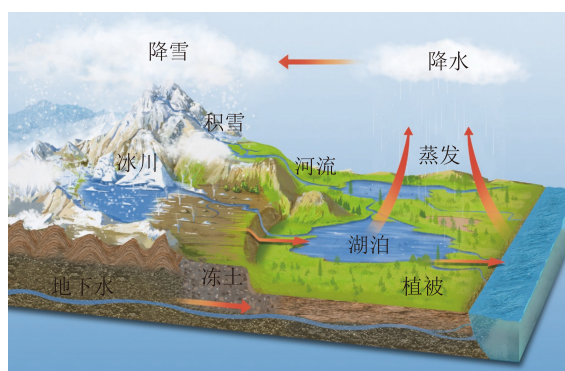


图1 陆地冰冻圈水文过程示意

政府间气候变化专门委员会(IPCC)最新的第6次评估报告指出,未来全球气温将持续升高^[7],因此

* 国家自然科学基金资助项目(41988101)

† 通信作者:王磊(1981—)男,博士,研究员。研究方向:高寒区水文过程。E-mail: wanglei@itpcas.ac.cn

收稿日期: 2022-09-08

在可预见的未来,冰雪消融、冻土退缩将进一步加剧,冰冻圈水资源的剧烈变化将使得流域水资源利用与管理面临更大挑战。此外,升温将增加冰冻圈的不稳定性,由此导致与冰冻圈变化相关的自然灾害(如冰崩、雪崩、冰湖溃决等)发生频率增加,给下游地区的居民安全及社会发展带来巨大威胁^[8]。因此,有关气候变化背景下冰冻圈水文过程的研究亟待加强。基于此背景,本文将对目前有关冰冻圈水文过程的研究现状及存在的不足进行梳理,进而为冰冻圈水文学的发展思路及方向提出思考和建议。

1 研究现状

1.1 冰川水文过程 冰川作为巨大的淡水资源储存库,受到科学界的广泛关注,然而由于其存在需要极端低温的条件,人员难以到达,给实地观测带来很大困难。随着近年来遥感技术的发展以及高山区冰川观测站的布设,二者的结合使得对于冰川变化的研究成为可能。尽管不同研究的结果存在差异,但是对于全球的冰川整体呈现面积萎缩、物质亏损的趋势这一结论达成共识。最新研究成果表明,近 20 年(2000—2019 年),全球的冰川物质亏损速率达到 $(267\pm 16) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$,其亏损速率在未来呈现不断加剧的趋势,大量的冰川融水注入海洋,对海平面的上升贡献了 $(21\pm 3)\%$ ^[9],而高山区的冰川融水对流域的水文过程造成重大影响,因此近年来有关高山区的冰川水文过程得到广泛研究。目前,冰川水文模型是研究流域冰川径流的主要手段,主要分为 2 大类:温度指数模型和能量平衡模型^[10]。前者基于温度与冰川融化量的相关关系建模,模型相对简单,主要输入数据温度易获取,因此得到广泛应用,包括 VIC 模型^[11]和 SPHY 模型^[12]等。此外,也存在部分基于能量平衡建模的冰川模型,但目前大多应用于小流域的研究中。

对于历史时期的冰川水文过程研究,量化流域内冰川径流的变化趋势及其对于总径流的贡献是关键的科学问题。Bash 等^[13]开发出改进后的温度指数模型对加拿大 Bow 流域冰川融水进行模拟,发现冰川融水占流域径流的 3%,且在夏季占比更大;Gao 等^[14]利用温度指数模型,在塔里木河流域计算得到冰川径流对于总径流的贡献为 41.5%,且在 1961—2006 年流域冰川径流均呈现一致的上升趋势;Shrestha 等^[15]基于能量平衡,在 WEB-DHM 多圈层水文模型的基础上耦合冰川模块,对印度河上游子流域 Hunza 流域进行径流模拟,计算得到冰川径流占流域总径流的 33%。不同流域的冰川径流对总径流的贡献不同,其主要受到流域冰储量以及气候条件的影响,流域冰储量越

大,气候越干旱,冰川径流对于总径流的贡献越大。然而,由于研究方法及输入数据的不同,得到的结果存在差异^[3, 8]。

在气候变暖的背景下,冰川将加速融化,冰川径流进一步增加,然而当冰储量降低到某一水平,冰川融水不足以支撑径流的增加时,即到达“融化拐点”,冰川径流便会发生下降,因此对于冰川径流的未来发展趋势的相关研究同样广受关注。Huss 等^[16]预测了全球 56 个大型冰川流域到 2100 年的冰川径流变化,结果表明,冰川较大、冰盖比例较高的流域冰川径流峰值出现较晚(例如美国 Susitna、冰岛 Jökulsá),一些冰川覆盖率低的流域峰值已经到达(例如加拿大西部、中欧和南美)。然而,由于冰川径流的未来模拟需要输入未来的气象驱动数据,而在不同的气候情景假设下,使用不同的气候模式驱动所得到的未来气象数据存在较大的不确定性,不同研究对于同一流域甚至得到截然不同的结果。例如,Immerzeel 等^[17]和 Lutz 等^[18]分别基于 IPCC 第 4 次评估报告提出的未来气候情景 A1B 和 IPCC 第 5 次评估报告提出的 CMIP5 计划下的气候模式,在不同排放浓度路径下对未来气候的预估结果,使用温度指数模型对于第三极地区的 3 条大河(印度河、恒河、雅鲁藏布江)进行未来模拟:前者表明 3 条大河在 21 世纪中叶前冰川径流已经到达峰值,而后开始下降;而后的研究结果却指出,21 世纪中叶后,这 3 条大河的冰川径流仍将持续上升,融水拐点并未到来。Khanal 等^[19]基于最新的未来气候预估结果,预测了第三极地区的主要大河未来的径流变化趋势,结果表明在研究的 15 条大河中,大部分流域冰川径流将在 21 世纪中叶前到达峰值,而位于西风区的印度河上游流域及塔里木河西部流域冰川径流在 21 世纪中叶后仍将持续上升。

1.2 积雪水文过程 积雪是冰冻圈的重要组成部分,与冰川只分布在高纬度或者高海拔地区不同,积雪的覆盖面积更为广泛,此外,积雪具有很高的反照率,积雪覆盖可通过改变地表的反照率进而影响区域乃至全球的地气能量收支平衡。同时积雪融水也是重要的淡水资源,是高山区多条大江大河的主要水源,为全球 17% 的人口提供用水^[20]。自 20 世纪中叶以来,随着气温升高,全球的积雪覆盖和总量同样呈现减小趋势,研究表明,北半球在 1980—2018 年,3 月份的积雪量以每十年 49 Gt 的趋势递减^[21],但是积雪的变化趋势存在较大的空间差异,中国 3 大积雪区主要分布在青藏高原地区、新疆北疆和天山地区、东北和内蒙古地区,过去半个世纪里青藏高原降雪呈明显地减少趋势^[22],而新疆和东北地区积雪有缓慢增加趋势^[23-24]。积雪的变化对流域水文过程造成重要影响,有关积雪

水文过程的研究成为科学界关注的热点问题。

与冰川类似,积雪水文模型是研究积雪水文过程使用最为广泛的方法。对于积雪水文过程的模拟研究已经得到广泛开展,目前在单点尺度的积雪水文过程模拟研究已经较为成熟,开发了不同环境下物理过程描述完善的一维模型,包括1976年Anderson^[25]最早开发的基于能量平衡的融雪模型,考虑雪层内部力学结构的SNOWPACK模型^[26]及考虑风吹雪过程的PBSM模型^[27]等,然而由于积雪覆盖的下垫面具有很强的异质性,使得将一维的积雪模型扩展应用至流域尺度具有较大困难。近年来,随着遥感技术的发展,许多学者开发出了不同的考虑流域空间异质性的分布式积雪水文模型,根据融化过程的算法分类,同样可分为温度指数模型和基于能量平衡建立的模型。前者包括发展较早的SRM模型^[28],以及目前在第三极应用广泛的SPHY模型^[12]等。这些积雪模型只考虑温度或者其他简单的辐射项对于积雪融化的影响,基于能量平衡建立的模型物理机制较为完善,但是由于不同能量平衡模型对于内部的子过程的描述同样存在差异,例如VIC模型^[11]的积雪模块基于能量平衡建立,同时将雪块分为2层进行计算,而JULES模型^[29]采用多层积雪分层方案,同时考虑了积雪反照率的动态变化,以及采用3层积雪分层方案,同时考虑积雪反照率及雪块压密成冰作用的WEB-DHM-S模型^[15]等。这些模型被广泛应用于研究融雪径流的历史变化及未来发展趋势,取得大量成果。

在对融雪径流的历史变化研究方面:Li等^[30]利用基于能量平衡建立的分布式水文模型GBEHM,在黑河上游进行水文模拟,结果表明,在研究时段2004—2015年,融雪径流对于总径流的贡献为15.6%,且融雪主要发生在没有降雪的阶段;Armstrong等^[31]模拟第三极地区主要的5条大河上游流域的径流过程,结果表明,除恒河流域外,其他4条大河流域径流均主要受融雪径流主导,融雪径流的占比均超过65%;关于塔里木河流域的模拟研究结果,同样表明该流域为融雪径流主导型流域,其子流域叶尔羌河与玉龙喀什河流域融雪径流对总径流的贡献分别达到68.6%、70.2%,且贡献率呈现上升趋势^[32]。不同流域的积雪径流贡献同时受到流域降雪量以及气温和辐射的影响,部分干旱半干旱区流域径流主要受融雪主导,尽管部分流域融雪径流占比较小,但是由于融雪主要发生在春季,与作物生长关键期重合,因此融雪对于径流的补给至关重要。

对于融雪径流的未来发展,许多学者利用水文模型模拟结果做出了预测。随着气候变化,融雪径流一

方面因为降水的雨雪分配和融化持续时间的变化而导致融水量发生变化,另一方面融雪开始时间及融雪峰值在年内出现的时间也将发生变化。Islam等^[33]基于CMIP5未来气候变化情景预估数据,利用VIC模型对加拿大的Fraser流域进行积雪的未来变化预估,结果表明尽管到21世纪中叶,流域降水量将增加,但降雪量将减少近50%,导致子流域Stuart和Nautley的融雪径流减少近20%,且流域春季融雪径流的开始时间比历史时期早了25d;Khanal等^[19]基于最新的气象预估数据,利用SPHY模型对第三极地区15条大河的上游流域进行径流的未来预测,结果发现大部分流域的径流峰值发生变化,在历史时期径流峰值出现在6月或7月,到21世纪末,径流峰值主要出现在5月,而冰川径流和降雨径流的年内分布基本不变,导致这一变化的原因主要是融雪径流的峰值出现时间提前。

1.3 冻土水文过程 冻土作为冰冻圈的重要组成部分,同时也是连接冰冻圈其他要素的重要纽带,主要可分为多年冻土和季节性冻土,其中季节性冻土是指地表夏季融化、冬季冻结的岩层或土层,而多年冻土定义为至少连续2年存在温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的岩层或土层。冻土层作为区域隔水层或者弱透水层,阻碍水分下渗至土壤中,减弱了地表水与土壤水及地下水之间的联系,同时冻土活动层在年内的季节性冻融循环对径流存在调节作用,即在冬季冻结,阻碍地表水下渗,增加地表径流,而在夏季融化,增大土壤蓄水容量导致地表水下渗量增加,因此冻土在流域水文循环过程中发挥着重要作用^[6]。

近年来多年冻土退化,冻土冰融化导致表层土壤水分含量较大,使得冻土区植被覆盖率增大(如西伯利亚南部、北美北部),蒸散发增加^[34]。但随着融化深度增厚,尤其寒旱区雨水补给不充足会导致植被覆盖率逐渐减小(如青藏高原黄河源区),蒸散发也相应减少^[35]。由于含水层渗透率增加,造成不同流域地下水储水量加大,基流随之增加,地表径流减小,因此冻土退化使得流域径流的季节分布更加平缓^[36]。此外多年冻土的退化还会引起热融池塘的发育和湖泊扩张,近年青藏高原有94个内陆湖泊水位增高,而增高的部分原因是多年冻土地下冰融化释放了大量的水资源^[37]。随着地下冰逐渐融化,多年冻土层的隔水作用不断减弱,融水补给路径延长并加深,从而改变了地下水的动力过程^[38]。也有研究表明,多年冻土退化会增加生态系统碳的释放量(如青藏高原、北极地区),而土壤中有有机碳对水热变化较敏感,因此将进一步影响冻土水热过程^[34]。

然而,由于冻土赋存于地下,现有的遥感技术只能探测到部分浅层冻土,目前主要使用的观测方式仍是通过钻孔进行探测,但该方法耗时费力,导致目前有关冻土的数据十分缺乏,再加上冻土水文过程包含的水分相态转化、迁移等多个复杂的非线性过程,因此给冻土水文过程的定量研究带来巨大困难.尽管如此,经过近年来的发展,仍有许多学者对于冻土的水文过程的定量模拟做出了尝试,开发了一些冻土过程模型并应用于冻土变化对于水文过程的影响研究,取得了大量成果. Qin^[39]利用常见的冻土经验模型 Stefan 结合实测数据研究祁连山地区冻土的变化趋势及其对径流的影响,结果表明在 1960—2014 年,该地区季节性冻土的最大冻结深度以每 10 年 7.4 cm 的速率减小,冻土的退化导致 11 月至次年 4 月份基流增加; Guo 等^[40]采用 CLM4.0 模型模拟青藏高原 1981—2010 年冻土的变化特征,结果表明,在温升的驱动下,高原冻土面积以每 10 年 $9.20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的速率减小,活动层厚度以每 10 年 0.15 m 的速率增加,季节性冻土的最大冻结深度以每 10 年 0.34 m 的速率减小; Gao 等^[41]利用考虑冻土过程的分布式水文模型 GBEM,分析黑河上游流域冻土变化及其对径流的影响,结果指出,在模拟时段内(1971—2013 年),黑河上游流域多年冻土面积缩小了 8.8%,冻土的退缩使得寒冷季节(11 月至次年 3 月)的径流明显增加.尽管各研究的结果不同,但是对于冻土退化这一结论达成共识,主要表现为多年冻土面积减小、活动层增厚、季节性冻土最大冻结深度减小、冻结时间减小^[6,34].但是对于冻土退化的水文效应,目前科学界仍存在争议:有学者认为,冻土退化导致之前储存在地下冰中的水分释放,导致径流增加;而其他观点认为,冻土退化活动层增厚导致土壤蓄水量增加,地表产流减少,同时土壤蒸散发增加,因此导致径流减小.由于冻土退化的时空异质性及冻土水文过程内部过程十分复杂,目前关于冻土的水文效应仍是科学界亟待解决的难题.

1.4 冰冻圈与其他圈层相互作用 冰冻圈作为气候系统的 5 大圈层之一,与其他圈层发生着紧密而又复杂的相互作用,而水文过程是连接冰冻圈和其他圈层的重要纽带.

1) 冰冻圈作为巨大的水资源库,可以源源不断地补给江河湖泊,由气候变化触发的冰冻圈退缩释放出大量的融水,使得下游河川流量发生重大变化,同时通过径流过程最终导致湖泊水量增加和海平面的上升. Zhou^[42]对于羌塘高原内流区的 10 个主要大湖的定量模拟结果表明,冰冻圈融水(冰川和积雪以及冻

土地下冰消融)对于这 10 个大湖扩张的贡献均超过 30%,最新的研究表明,2000—2019 年,冰川消融的对于海平面加剧上升的贡献可以达到 6%~19%^[9].

2) 气候条件决定了冰冻圈的形成和分布,太阳辐射增加导致近地表气温升高、冰冻圈退缩,而反照率高的冰冻圈面积减少使得地表反照率急剧下降,使更多的太阳辐射被地面吸收,进一步加剧冰冻圈的退缩,这便是冰冻圈与大气圈相互作用中重要的冰冻圈-反照率的正反馈机制.此外,多年冻土退化向大气圈释放出大量的温室气体也将加剧全球变暖^[43].

3) 地形也是冰冻圈特别是山地冰川形成的必要条件,同时不同的山地地形将影响冰川的运动速率和方向,进而影响冰川的消融量.冰冻圈对于岩石圈的作用主要表现在对于岩石的物理风化、剥蚀、搬运和堆积等作用,例如冰川运动过程中对于基岩的剥蚀和搬运作用形成的角峰、冰川悬谷等特殊的地貌类型,以及冻土的冻融作用导致地表塌陷和湖岸坍塌等.

4) 冰冻圈的变化也将对生物圈产生重要影响,近年来,随着冰冻圈的部分退缩,导致高山区的生态系统的物种组成和丰富度发生改变.由于冻土的退缩,活动层不断增厚,水分下渗深度增加,使得青藏高原地区的沙漠化土地增加了 17.2%^[44],而在我国西北干旱区流域,冰雪融水是下游绿洲发育的主要供水来源,冰雪的加速融化导致下游绿洲出现扩张的趋势^[1].

此外,由于人为活动所导致的冰冻圈变化将反过来威胁人类的生存环境,制约经济社会的发展.在第三极地区:一方面,冰冻圈退缩释放的大量冰川径流,再加上极端降水事件的增加导致下游河流洪水频发;另一方面,温度升高导致冰川不稳定性增加,冻土融化降低湖盆的稳定性,使得冰崩和冰湖溃决灾害发生频率增加,且在未来存在加剧的趋势,对下游地区的居民生命和财产安全造成重大威胁^[3].冰冻圈的变化同时影响多个圈层,因此未来为更好地解析冰冻圈水文过程,需要开展多圈层相互作用的系统研究.

2 研究不足与未来发展趋势

2.1 目前研究存在的不足 在全球变暖的背景下,作为对气候变化最为敏感的圈层之一,冰冻圈的水文过程受到科学界的广泛关注.经过近几十年的发展,特别是遥感观测和计算机技术的发展,使得冰冻圈水文学得到快速发展,从最初的基于经验理论和统计方法进行定性分析,发展至目前能够使用基于物理过程,结合遥感、机器学习等先进技术和方法开发的分布式冰冻圈水文模型,进行大尺度流域的系统定量分析,研究各流域冰冻圈要素的变化趋势及其对水文过

程的影响,同时进行未来预估,取得了大量的成果。

然而,由于冰冻圈的特殊性以及其内在过程的复杂性,目前关于陆地冰冻圈水文学的相关研究仍存在一些不足,表现在冰冻圈水文的各个过程。降水过程作为冰冻圈水文过程的起点,也是冰冻圈模拟的主要输入,但是其在高山区的总量及其时空分布仍存在很大的不确定性,此外,对于降水的形态划分(降雨/降雪)目前认识不足;冰冻圈的相态转换(冰雪消融、地下冰融化)是冰冻圈水文过程最关键的内容,现有研究对于积雪消融的认识相对完善,然而对于冰川的物理过程研究存在很大程度的简化,而对于冻土的冻融循环和地下冰的融化过程的认识十分不足;此外,现有研究缺乏对于冰冻圈水文的一些特殊过程的考虑,例如降雨降落至冰雪界面的能量交换过程,冰雪融水在冰川和积雪内部的运动和再冻结过程,以及冰冻圈不同要素之间的相互作用(冰川-积雪,积雪-冻土)等。对冰冻圈水文各个过程研究目前存在的不足,将导致有关冰冻圈水文的研究结果存在很大的不确定性,总结来看主要可分为以下几个方面^[1-3]:

1) 实测数据稀缺,研究数据存在不确定性。由于冰冻圈的发育需要长时间的低温条件,导致冰冻圈通常存在于南北极以及低纬度的高海拔地区(如青藏高原),这些地区地形陡峭、气候条件恶劣,人员很难到达,因此给实地观测工作带来很大困难。目前关于高山区的气象资料及冰冻圈要素相关的实测资料例如冰川厚度数据、冰川的表碛覆盖分布数据,积雪的雪水当量数据、风吹雪数据,以及冻土相关的土壤温湿度数据、地下冰含量数据等,仍十分缺乏。此外,目前对于高山区的降水估算仍存在不足,而用于预测的未来气象数据均是基于历史数据进行校正的,不确定性更大。

2) 模型对冰冻圈水文过程的机制刻画不足。尽管近年来冰冻圈水文模型得到广泛发展,模型的物理机制也得到进一步完善,但是仍存在一定程度的简化,特别是对于大尺度冰冻圈流域的模拟。对于冰川水文过程,目前大多数仍是使用温度指数模型,且基于能量平衡的模型仍存在冰川动力学过程简化、未考虑冰川表碛覆盖物及黑碳的影响等问题;对于积雪水文过程,尽管在单点尺度的物理刻画较为完善,但是对于流域尺度的模拟,仍存在对于风吹雪过程、积雪升华过程、积雪压密成冰作用、积雪内部水下渗及再冻结过程等子过程进行简化的问题;对于冻土水文过程,目前很多冰冻圈水文模型进行了简化,部分模型甚至不考虑冻土对流域水文过程的影响,对于冻土在流域尺度上改变水分的相态转化及运移过程的物理

机制刻画不够全面,进而使得冻土变化影响径流过程的研究仍存在较大不足。

3) 缺乏考虑完整冰冻圈要素的系统研究。目前,已有的研究大多只关注某一冰冻圈水文过程,而对其他水文过程进行简化甚至不考虑,缺乏考虑完整冰冻圈过程的系统研究。同时未考虑冰冻圈要素之间的相互作用,例如积雪覆盖以及积雪融水下渗对于冰川消融的影响,大多研究只采用简单的顺序消融的方法进行刻画,即积雪消融后冰川才开始消融,而未考虑二者之间的相互作用,同时缺乏对于积雪-冻土之间的相互作用的刻画,增加了流域尺度的冰冻圈模拟的不确定性。此外,对于其他圈层对于冰冻圈水文过程的影响,目前大多采用改变输入数据的方法进行表征,缺乏冰冻圈和其他圈层的相互作用的系统研究。

4) 传统临界温度法计算冰水相变时的求解不稳定问题。无论是冰川水文过程、积雪水文过程,还是冻土水文过程的计算中,都要考虑水的相变问题,目前相关数值模拟研究中,主要采取冰点临界温度法(比如零摄氏度)判断和计算水的相变。该方法简单易用,但在数值模拟中会导致在(冰川/积雪/土壤等)温度达到临界温度时,液态水(或固态冰)的质量计算结果出现突变,从而导致水文过程模拟的不稳定问题。另一方面,焓是能量的一种表达方式,又与冰/水的质量相关,因而用焓来(替代冰川中的冰温、积雪中的雪温、冻土中的土温等)表征水的相变可以突破传统临界温度法计算冰水相变时的质量突变和求解不稳定问题。因此,基于焓的理论描述多相态水体转换和能量变化,创建统一的以焓为求解变量的陆地冰冻圈水文模型,是未来水文物理模型发展的一个重要方向。

基于最新的气候情景预估结果,不同气候模式的模拟结果均表明,未来全球气温将进一步上升,由此将导致冰冻圈进一步发生变化,对流域水文过程产生影响,关于冰冻圈水文过程的研究的重要性未来将进一步提升,有关冰冻圈水文过程的发展趋势和研究重点将发生变化。

2.2 关键科学问题 为后续更好地开展有关冰冻圈的研究,本文对冰冻圈水文研究的未来发展趋势提出了思考,未来研究的关键科学问题包括:

1) 如何改进现有观测手段,开发出能够适应于高寒环境的观测技术,获取更加准确的研究数据?

2) 如何融合冰川、积雪、冻土变化等冰冻圈过程,开发考虑完整冰冻圈物理过程的多圈层分布式水文模型,以适应不同冰冻圈流域的模拟研究?

3) 历史时期冰冻圈各要素的变化趋势如何,以及各分量对于径流的定量贡献有多大?此外,冰冻圈变

化如何定量影响水文循环的其他过程?

4) 冰冻圈要素未来的定量变化趋势如何及其对于流域水文过程的定量影响多大? 其中包括冰川径流和地下冰融水的拐点何时到达?

2.3 未来研究的重点领域 针对以上科学问题, 未来冰冻圈水文的研究重点将集中在以下几个领域:

1) 创新高海拔山区降雪和积雪的多源遥感反演技术, 提出基于卫星、雷达和站点的高精度多源降水融合方法。

2) 发展冰川面积、厚度及储量变化监测的新技术、新手段、新方法。

3) 研制冻土监测的新方法和新手段, 并结合数值模拟和遥感反演在流域尺度上揭示冻土的水热交换过程与动态产流机制。

4) 研发物理机制明确且包含冰川-积雪-冻土等冰冻圈过程的寒区水文模型。

5) 模拟评估冰冻圈关键要素(如冰川、积雪、冻土等)变化对流域水文过程的综合影响, 定量解析气候-冰冻圈-植被协同演变的径流效应, 并预估未来变化趋势。

3 结论

在气候变化的背景下, 冰冻圈发生剧烈变化, 对流域水文过程产生重要影响, 因此受到科学界的广泛关注。经过近几十年的发展, 学者开发了大量方法对不同流域的冰冻圈水文过程进行研究, 取得了丰硕成果, 但是目前仍存在一些问题。本文在前人研究成果的基础上, 梳理了有关冰冻圈水文过程的研究现状及存在的不足, 并对冰冻圈水文学的未来发展趋势提出了一些思考。主要结论为以下 3 点:

1) 在全球变暖的背景下, 冰冻圈普遍呈现退缩趋势, 主要表现为冰川面积减小、物质亏损, 冰川径流增加; 积雪面积和雪水当量减小, 积雪融化时间提前; 多年冻土面积减小、活动层增厚、季节性冻土最大冻结深度减小、冻结时间减小, 然而其对径流的影响效应存在争议。

2) 由于冰冻圈发育的特殊条件及冰冻圈水文过程内在的复杂性, 目前关于冰冻圈水文过程的研究仍存在研究数据具有较大的不确定性、对冰冻圈水文内在机制的物理过程认识不足, 以及缺乏考虑完整冰冻圈要素的系统研究 3 方面的不足。

3) 未来冰冻圈水文学的研究将重点关注新型观测技术手段的研发和应用、基于物理过程包含完整冰冻圈水文过程的综合水文模型的研发、定量解析历史时期冰冻圈的变化及其对水文过程的影响, 以及

未来的定量预测等问题和领域。

4 参考文献

- [1] 丁永建, 张世强, 陈仁升. 冰冻圈水文学: 解密地球最大淡水水库[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(4): 414
- [2] YAO T D, BOLCH T, CHEN D L, et al. The imbalance of the Asian water tower[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 618
- [3] NIE Y, PRITCHARD H D, LIU Q, et al. Glacial change and hydrological implications in the Himalaya and Karakoram[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(2): 91
- [4] PRITCHARD H D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress[J]. *Nature*, 2019, 569(7758): 649
- [5] HENDERSON G R, PEINGS Y, FURTADO J C, et al. Snow-atmosphere coupling in the Northern Hemisphere[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(11): 954
- [6] 赵林, 胡国杰, 邹德富, 等. 青藏高原多年冻土变化对水文过程的影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1233
- [7] IPCC. *Climate change 2021: the physical science basis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
- [8] AZAM M F, KARGEL J S, SHEA J M, et al. Glaciohydrology of the Himalaya-Karakoram[J]. *Science*, 2021, 373(6557): eabf3668
- [9] HUGONNET R, MCNABB R, BERTHIER E, et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century[J]. *Nature*, 2021, 592(7856): 726
- [10] 尹振良, 冯起, 刘时银, 等. 水文模型在估算冰川径流研究中的应用现状[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 248
- [11] ANDREADIS K M, STORCK P, LETTENMAIER D P. Modeling snow accumulation and ablation processes in forested environments[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(5): 483
- [12] TERINK W, LUTZ A F, SIMONS G W H, et al. SPHY v2.0: spatial processes in HYdrology[J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(7): 2009
- [13] BASH E A, MARSHALL S J. Estimation of glacial melt contributions to the Bow River, Alberta, Canada, using a radiation-temperature melt model[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(66): 138
- [14] GAO X, YE B S, ZHANG S Q, et al. Glacier runoff variation and its influence on river runoff during 1961-2006 in the Tarim River basin, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(6): 880
- [15] SHRESTHA M, KOIKE T, HIRABAYASHI Y, et al. Integrated simulation of snow and glacier melt in water and energy balance-based, distributed hydrological modeling framework at Hunza River basin of Pakistan Karakoram

- region[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(10): 4889
- [16] HUSS M, HOCK R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(2): 135
- [17] IMMERZEEL W W, VAN BEEK L P H, BIERKENS M F P. Climate change will affect the Asian water towers[J]. *Science*, 2010, 328(5984): 1382
- [18] LUTZ A F, IMMERZEEL W W, SHRESTHA A B, et al. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(7): 587
- [19] KHANAL S, LUTZ A F, KRAAIJENBRINK P D A, et al. Variable 21st century climate change response for rivers in high Mountain Asia at seasonal to decadal time scales[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(5): 1
- [20] BORMANN K J, BROWN R D, DERKSEN C, et al. Estimating snow-cover trends from space[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(11): 924
- [21] PULLIAINEN J, LUOJUS K, DERKSEN C, et al. Patterns and trends of Northern Hemisphere snow mass from 1980 to 2018[J]. *Nature*, 2020, 581(7808): 294
- [22] 刘义花, 鲁延荣, 周强, 等. 1961—2017年青海高原降雪时空变化分析研究[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(4): 809
- [23] QIN D H, LIU S Y, LI P J. Snow cover distribution, variability, and response to climate change in Western China[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(9): 1820
- [24] 张晓闻, 臧淑英, 孙丽. 近40年东北地区积雪日数时空变化特征及其与气候要素的关系[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(9): 958
- [25] Anderson E A. A point energy and mass balance model of a snow cover[R]. Silver Spring, MD: US Department of Commerce & National Oceanic and Atmospheric Administration & National Weather Service, NOAA Technical Report NWS 19, 1976: 1
- [26] BARTELT P, LEHNING M. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2002, 35(3): 123
- [27] POMEROY J W. The prairie blowing snow model: characteristics, validation, operation[J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 144(1/2/3/4): 165
- [28] MA H, CHENG G D. A test of snowmelt runoff model (SRM) for the Gongnaisi River basin in the western Tianshan Mountains, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(20): 2253
- [29] BEST M J, PRYOR M, CLARK D B, et al. The joint UK land environment simulator (JULES), model description: part 1: energy and water fluxes[J]. *Geoscientific Model Development*, 2011, 4(3): 677
- [30] LI H Y, LI X, YANG D W, et al. Tracing snowmelt paths in an integrated hydrological model for understanding seasonal snowmelt contribution at basin scale[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(16): 8874
- [31] ARMSTRONG R L, RITTGER K, BRODZIK M J, et al. Runoff from glacier ice and seasonal snow in High Asia: separating melt water sources in river flow[J]. *Regional Environmental Change*, 2019, 19(5): 1249
- [32] 魏光辉, 向怡衡, 陈杰, 等. 塔里木河流域积雪时空变化及融雪径流模拟[J]. *中国农村水利水电*, 2020(4): 49
- [33] ISLAM S U, DÉRY S J, WERNER A T. Future climate change impacts on snow and water resources of the Fraser River basin, British Columbia[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(2): 473
- [34] 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
- [35] QIN Y. Impacts of climate warming on the frozen ground and eco-hydrology in the Yellow River source region, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 605/606: 830
- [36] MCMILLAN H. Linking hydrologic signatures to hydrologic processes: a review[J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(6): 1393
- [37] ZHANG G Q, YAO T D, SHUM C K, et al. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(11): 5550
- [38] CHANG J, YE R Z, WANG G X. Review: progress in permafrost hydrogeology in China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(5): 1387
- [39] QIN Y. Long-term change in the depth of seasonally frozen ground and its ecohydrological impacts in the Qilian Mountains, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 542: 204
- [40] 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
- [41] 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
- [42] ZHOU J. Quantifying the major drivers for the expanding lakes in the interior Tibetan Plateau[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(5): 474
- [43] 罗勇, 秦大河, 翟盘茂, 等. 方兴未艾的冰冻圈科学分支学科: 冰冻圈气候学[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(4): 407
- [44] 康世昌, 郭万钦, 钟歆玥, 等. 全球山地冰冻圈变化、影响与适应[J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(2): 143

Hydrological processes in land cryosphere: current status and some perspectives

WANG Lei^{1, 3)} LIU Hu^{1, 3)} YONG Bin²⁾ SONG Lei^{1, 3)} LI Xiuping¹⁾

(1) Institute of Tibetan Plateau Research Chinese Academy of Sciences, 100101, Beijing, China;

2) Hohai University, 210098, Nanjing, Jiangsu, China;

3) University of Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing, China)

Abstract Due to global warming effects, land cryosphere as a solid freshwater resource reservoir, has undergone drastic changes, directly affecting basin-scale hydrological processes. The study of cryosphere hydrology is therefore of great importance in regards to the utilization and management of basin-wide water resources. The cryosphere has, in recent years, generally shown a shrinking trend. The manifestations are manifold: vanishing glacier area, mass loss, increased glacier runoff; decreasing snow area and snow water equivalent, as well as time advances in snow melting; shrinking area and thickening active layer for permafrost, as well as reduction in maximum freezing depth and freezing time for seasonally frozen ground, with impacts on runoff still being controversial. Difficulties in cryosphere-hydrology studies include large uncertainty in research data, lack of clear understanding of internal physical processes of cryosphere-hydrology, and lack of systematic and integrated research taking into account of all land cryosphere elements. Development of new observation technology and methods, development/application of physically-based cryosphere-hydrology modeling including complete cryosphere elements should be the focus of future land cryosphere-hydrology studies.

Keywords cryosphere-hydrology; glacier and snow; frozen ground; river; climate change

【责任编辑:刘先勤】