

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0073

LIU Hu, WANG Lei. A review of glacier runoff studies in the Third Pole region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3):737-752.
[刘虎, 王磊. 第三极地区冰川径流研究进展[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3):737-752.]

第三极地区冰川径流研究进展

刘 虎^{1,2}, 王 磊^{1,2}

(1. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 青藏高原是地球上除南北极之外冰川面积最大的区域, 被称为地球“第三极”。全球变暖导致该地区冰川普遍退缩, 融水释放成为冰川径流, 使得下游河川径流发生重大变化, 给下游流域水资源利用与管理带来挑战。然而由于第三极地区特殊的地形和复杂的气候, 加上冰川水文过程内在的复杂性, 使得冰川径流的研究十分困难。本文总结了目前关于冰川径流研究的几类主要方法: 直接观测法、遥感观测法、水量平衡法、水化学示踪法和冰川水文模型法, 其中冰川水文模型法使用最为广泛。在第三极地区, 前人利用这些方法对于冰川径流的研究结果表明, 自20世纪90年代以来, 冰川径流普遍呈现上升趋势, 但是其对于总径流的贡献同时受气候条件和流域内冰储量的影响, 存在显著的空间差异; 总体来看, 位于西风控制区的流域的冰川径流贡献普遍大于季风控制区的流域。未来变化方面, 除部分冰储量较大的西风区流域(塔里木河、印度河)外, 第三极地区大多数流域冰川径流将在本世纪中叶前达到峰值。但是由于目前由于观测不足、模型物理机制简化等制约, 对于第三极地区冰川径流的研究存在很大的不确定性, 未来需要开展更多观测、开发更先进的冰川水文模型以提高第三极地区冰川径流研究的准确性, 进而为该地区水资源利用与管理和防洪减灾工作提供科学依据。

关键词: 冰川径流; 第三极地区; 冰川水文模型; 冰储量; 水资源

中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)03-0737-16

0 引言

冰川是巨大的淡水资源宝库, 全球77.2%的淡水资源储存在冰川中。其中, 尽管中低纬度的山地冰川的冰储量仅占0.6%, 但其对气候变化十分敏感, 且山地冰川分布区的下游流域大多是人口密集的地区, 因此其对于下游邻近地区的水资源具有重要意义。特别是在干旱区流域, 冰川融水是流域径流量的重要组成部分, 冰川径流能够起到削峰填谷、稳定水源的作用, 因此冰川又被称为固态水库^[1-4]。20世纪60年代以来, 全球气温上升, 导致冰川普遍退缩, 由此产生的冰川融水引起海平面上升, 有研究表明, 近二十年间(2000—2019年), 全球冰川融水速率为 $(267 \pm 16) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$, 这些融水相当于海平面上升量的 $21\% \pm 3\%$, 且冰川融水贡献在未来将会持续增加^[5]。而在中低纬度的山地冰川的融化

导致下游流域径流总量及组分发生剧烈变化, 对下游地区的经济社会发展产生重大影响, 因此近年来冰川径流的研究受到科学界的广泛关注^[4-10]。

青藏高原及周边高海拔地区山峰林立, 分布有喜马拉雅山、喀喇昆仑山和昆仑山等众多山脉, 是中低纬度山地冰川最为发育的地区, 同时覆盖有大面积的积雪和冻土, 因此该地区被称为地球的“第三极”^[11-12]。该地区的冰川所产生的融水哺育了长江、黄河、雅鲁藏布江等在内的多条大江大河, 缓解了下游大约8亿亚洲人民的用水压力, 同时为下游印度-恒河平原最大的农业灌溉区提供水源, 因此第三极地区又被称为“亚洲水塔”, 对下游地区的生态环境和经济社会发展具有重要意义^[13-18]。在全球变暖的大背景下, 第三极地区作为对气候变化最为敏感的地区之一, 其升温幅度更大, 近50年来第三

收稿日期: 2021-12-29; 修订日期: 2022-04-08

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK020604)资助

作者简介: 刘虎, 硕士研究生, 主要从事冰川水文过程研究. E-mail: liuhu2016@itpcas.ac.cn

通信作者: 王磊, 研究员, 主要从事青藏高原水文学研究. E-mail: wanglei@itpcas.ac.cn

极地区的变暖速率是全球同期平均的升温率的2倍^[19-20]。在温升的驱动下,第三极地区的冰冻圈发生剧烈变化,主要表现为冻土退化、冰川积雪加速融化^[21-22]。至2000年,相比于20世纪80年代,青藏高原地区的冰川面积减少了20%,而近20年冰川消融的速率在进一步加剧,但是冰川的变化存在显著的空间差异^[23]。冰川加速融化产生的大量融水,使得第三极地区的水资源发生剧烈变化,20世纪90年代以来,长江、怒江和雅鲁藏布江等多条河流源区径流呈现不同程度的上升趋势^[24]。

尽管不同气候模式对于未来气候变化的预估结果存在较大差异,但是对于未来全球气温将持续上升这一结论达成共识,政府间气候变化专门委员会(IPCC)最新的第六次评估报告指出,由人类活动所导致的全球温升在未来将进一步加剧^[25],因此在可预见的未来,第三极地区的冰川将持续退缩,冰川径流的变化将导致下游地区的河川径流组成进一步发生变化^[26-27],同时温度上升将导致冰川不稳定性增加,再加上未来极端气温和极端降水事件的发生频率增加,使得第三极地区由冰川变化引起的灾害(洪水、冰崩、冰湖溃决等)发生将更为频繁,对下游地区的经济社会发展以及居民的生命财产安全造成巨大威胁^[28-30]。因此,为了解目前科学界关于第三极地区冰川径流的研究现状,本文将从冰川径流的计算方法、第三极地区冰川径流的历史变化及其对总径流的贡献以及冰川径流的未来发展趋势这三个方面进行综述,旨在了解目前第三极地区冰川径流的研究进展及存在的不足,进而为后续第三极地区冰川径流的研究提供重要参考。

1 冰川径流的研究方法

由于冰川的存在需要极端低温条件,因此第三极山地冰川均位于高海拔低温区,地形复杂,气候条件恶劣,人为很难到达,使得冰川覆盖区的实测资料十分有限,给冰川径流的研究带来很大的困难。然而,随着全球变暖背景下冰川变化给下游水资源造成的巨大影响,科学界对于冰川径流研究的关注日益加强,另外,随着近些年遥感测量技术的发展以及计算机模拟技术的提高,使得冰川径流的计算成为可能。目前已经有许多学者开发了多种不同方法对冰川径流进行了相关研究。这些方法总结来看大致可分为五种类型:①直接观测法;②遥感观测法;③水量平衡法;④水化学示踪法;⑤冰

川水文模型法^[29,31-32]。

1.1 直接观测法和遥感观测法

研究冰川径流最直接的方法便是在冰川末端布设水文观测点,实际测量冰川融水产生的径流量,该方法简单直接,且最能真实反映冰川融水对于径流的贡献量^[33-34]。我国对于冰川径流的实地观测研究开展了大量工作,以中国科学院西北生态环境资源研究院及中国科学院青藏高原研究所为代表的研究团队长期在第三极地区的多条冰川末端布设站点,监测冰川径流的变化,积累了大量可靠的实测资料,为更好地进行第三极地区冰川变化的相关研究提供了重要的基础数据^[35-36]。

然而,尽管直接观测法进行冰川径流研究简单有效,但是这种实地布设站点的方法仅能适用于少数的冰川小流域,同时该方法耗时费力,因此很难进行大尺度的冰川径流研究。近年来,随着卫星遥感技术的不断发展,对于这些高海拔地区的冰川面积和厚度变化的遥感观测成为可能,大量学者利用遥感观测资料定量计算了第三极地区乃至全球尺度下的冰川变化,并预估冰川融水对于下游径流的贡献量^[37-39],但是该方法计算的冰川径流是冰川的储量变化量,不能直接计算得到冰川融化的产流量。

1.2 水量平衡法

因为受到观测条件等的制约,直接观测冰川径流的方法困难较大,因此有学者提出了利用水量平衡公式间接计算冰川径流的方法。该方法的主要思想是,冰川径流是流域水循环的重要组成部分,基于水量平衡原理,可通过分别计算得到在水循环中除冰川径流外的其他分量(降水、蒸发、水储量变化等)的值,进而利用水量平衡公式间接求得冰川径流量(式1)。

$$Q_g = Q_t - (P - E - \Delta G) \quad (1)$$

式中: Q_g 为冰川区的融冰产流量; Q_t 为冰川流域出水口的总产流量; P 为冰川流域总降水量; E 为冰川流域总蒸发量; ΔG 为冰川流域土壤和地下水储量变化量。

水量平衡法原理简单,计算量较小,因此得到国内外学者的广泛应用^[40-43]。然而,由于水量平衡公式中的其他分量在冰川覆盖区的观测同样缺乏,导致计算得到的冰川径流不确定性较大,在大部分流域的适用性较差。

1.3 水化学示踪法

由于不同来源的径流在汇合前其所流经的路径不同,因此其水环境中往往进行不同的生物和化学过程,导致不同水源的径流通常具有不同的水化学特征,因而很多学者将这一特性应用到流域冰川径流的计算中,即通过使用水中的稳定同位素作为示踪剂,定量分析其在不同断面的径流中的含量,进而分离出融水的水化学特征,并利用端元混合模型估计冰川融水对于径流的贡献量^[44-48]。但是该方法是基于一系列假设的前提下进行计算的,其中最基本的假设即认为不同水源的同位素示踪剂含量差异明显,同时假设示踪剂在随着水流的流动过程中其水化学特征不发生改变,然而现实情况通常更加复杂,很难满足这些假设,因此给冰川径流的计算带来很大困难^[31]。

1.4 冰川水文模型法

水文模型是基于水量平衡、能量平衡等理论,通过一系列数学嵌套公式描述水流在水循环各个过程中的时空变化,并通过计算机代码实现计算的系统方法。早在19世纪80年代,有学者便在冰川变化的研究中发现了冰川消融与温度之间存在着高度的相关关系,并首次将此关系应用于高山区冰川径流的研究中^[49]。经过近几十年的发展,国内外学者开发了大量的冰川消融模型并将其耦合至水文模型中,广泛应用于全球各大冰川流域,取得了大量成果。目前按照模型的冰川消融算法的不同,冰川水文模型主要可分为两大类:温度指数模型和基于能量平衡的冰川消融模型^[31-32,49-52]。

由于冰川的消融主要受到能量变化的驱动,而气温是表征能量变化最简单直接的变量,因此温度指数模型的主要思想是认为冰川消融量与气温之间存在相关关系,可通过气温的时空变化来再现冰川的消融过程。温度指数模型机理简单,计算方便,且主要输入的气温数据相对降水等其他气象数据更易获取,因此得到广泛应用^[49]。然而,由于该方法对冰川的内在过程进行了很大程度的简化,模拟效果对于关键参数度日因子的依赖性较强,同时温度指数模型只能计算冰川表面的消融量,无法表征冰川能量的传输过程,以及冰川反照率、密度等重要属性的变化。而基于能量平衡建立的冰川水文模型能够很好地描述冰川水文的内在过程,该方法的主要思想是通过计算冰川与大气之间的能量收支情况得到冰川表面剩余的热通量,进而利用能

量与冰川融化量之间的物理联系计算得到冰川融化量,该方法物理机制更为完善,理论上模拟结果更加准确,但是其计算复杂且对输入数据的精度要求较高。

冰川的消融算法是冰川水文模型中计算冰川径流最核心的部分,但是冰川水文模型的其他模块也对冰川径流计算的准确性产生影响。由于热量和重力等的作用,冰川的分布和面积将随着时间不断发生变化,导致冰川的消融量发生改变,因此模型中对于这一过程的刻画同样关键,而由于冰川数据的缺乏以及冰川动态变化过程的复杂性,目前大多数水文模型使用的是较为简单的体积和面积之间的相关关系公式(V-A公式)来刻画冰川分布和面积随时间变化的过程^[53-56],部分模型在模拟过程中不考虑冰川面积变化,采用静态的冰川分布方案^[57]。尽管存在物理机制更为完善的冰川动力学模型算法,但是目前仅在空间尺度较小的流域进行适用性研究,无法推广至大尺度流域的冰川径流研究^[58]。此外,由于冰川径流发源于上游的高山区,对于下游出山口径流的补给存在滞后性,因此水文模型中的汇流模块的准确性也将影响流域冰川径流的计算精度。

除了以上介绍的五种常见的研究方法外,还存在基于不同径流组分在年内的分布特征差异进行组分分离的流量过程线分割法^[59]以及基于冰川系统,结合冰川平衡线高度、冰川径流变化与冰川面积的关系等重要理论开发的冰川系统学模型^[60]估算冰川径流的方法等其他一些方法。而在目前存在的这些方法中,冰川水文模型法因其能够系统地定量描述冰川的消融及产汇流过程,同时进行未来预估,因此该方法已经成为目前科学界进行冰川径流研究中使用最为广泛的方法。由于不同学者对于冰川水文各个过程的刻画方式不同,开发出了大量不同类型的冰川水文模型,表1简单总结了目前存在的主要冰川水文模型及其应用案例。由表1可以看出,目前使用的冰川水文模型大多以温度指数模型为主,尽管有基于能量平衡的模型存在,但是这些模型大多只在一些冰川小流域得到验证。同时冰川水文模型对影响冰川消融的其他因素考虑得并不完全,例如目前存在的基于能量平衡建立的冰川水文模型对于冰川动力学过程的刻画较为简单,同时没有考虑冰川表碛覆盖物对于能量传输的影响以及人类活动引起的黑碳沉积物的影响,因此

表1 主要冰川水文模型及其应用案例总结
Table 1 Summary of main glacio-hydrological models and their applications

冰川消融 算法	模型名称	研究区	空间尺度*	时间步长	冰川消融算法创新点	冰川动态变化方案
温度指数 模型	SRM ^[53]	印度河、恒河、雅鲁藏布江、长 江和黄河流域	大尺度	逐日	—	V-A公式
	VIC-glacier ^[55]	萨尔温江和湄公河流域上游	大尺度	逐日	—	V-A公式
	HBV-D ^[54]	玛纳斯河源区	中尺度	逐日	—	V-A公式
	SWAT ^[56]	叶尔羌河流域上游	大尺度	逐日	考虑太阳辐射的日内变化	V-A公式
	SPHY ^[26]	第三极地区流域上游	大尺度	逐日	冰川网格次网格化计算;考 虑表碛覆盖物的影响	考虑流域地形的 V-A公式
	TOPKAPI ^[58]	印度河和恒河子流域	中尺度	逐日	考虑表碛覆盖物的影响	Weertman 滑动理 论公式
	J2000 ^[57]	开都河流域	大尺度	逐日	考虑表碛覆盖物的影响	静态冰川分布
	FEST-WB ^[61]	瑞士冰川覆盖流域	中尺度	逐日	—	—
	GERM ^[62]	瑞士冰川覆盖区	小尺度	逐日	考虑辐射的影响	Δh-parameterization
	GSM-SOCONT ^[63]	喜马拉雅山区冰川覆盖区	中尺度	逐日	考虑高程和辐射的影响	—
	SNOWMOD ^[64]	喜马拉雅山区冰川覆盖区	中尺度	逐日	—	—
	WaSiM-ETH ^[65]	瑞士阿尔卑斯山冰川覆盖区	中尺度	逐日	考虑辐射的影响	—
	WATFLOOD ^[66]	加拿大落基山脉冰川覆盖区	中尺度	逐时	—	V-A公式
	ITGG-2.0-R ^[67]	秘鲁冰川覆盖区	中尺度	逐月	—	—
	OEZ ^[68]	天山冰川覆盖流域	中尺度	逐月	—	—
	PREVAH ^[69]	奥地利阿尔卑斯山冰川覆盖区	小尺度	逐时	考虑辐射的影响	—
	GDM ^[70]	恒河上游冰川覆盖子流域	中尺度	逐日	考虑表碛覆盖物的影响	—
	DWHC ^[71]	黑河上游	大尺度	逐日	—	—
	FLEX ^Q -Δh ^[72]	冬克玛底河流域	小尺度	逐日	—	Δh-parameterization
能量平衡 模型	UBC Watershed ^[73]	巴基斯坦冰川覆盖流域	大尺度	逐时	—	—
	VIC-glacier ^[74]	帕米尔高原东部冰川小流域	小尺度	3小时	—	V-A公式
	DHSVM-GDM ^[75]	喜马拉雅山区冰川覆盖小流域	中尺度	逐时	考虑表碛覆盖物的影响	—
	PROMET ^[76]	欧洲中部高山区流域	大尺度	逐时	—	—
	WEB-DHM-S ^[77]	印度河子流域	大尺度	逐时	考虑表碛覆盖物的影响;考 虑能量在冰川内部的传递	—

注：*研究空间尺度的分类阈值分别为：大尺度：研究区面积>10 000 km²；中尺度：100 km²<研究区面积<10 000 km²；小尺度：研究区面积<100 km² [31]。

未来的冰川水文模型需从这些方面进一步完善,进而更好地适用于不同地区的冰川径流模拟。

2 第三极地区冰川径流的历史变化

在全球变暖的背景下,自20世纪90年代以来,第三极地区的冰川发生巨大变化。其中,冰川面积和冰川物质平衡变化是衡量冰川变化最重要的指标,但是在第三极的冰川覆盖区,地势险峻,气候条件复杂,使得冰川相关指标的实测资料难以获取^[4]。近年来,随着冰川观测代表站的广泛布设,以及遥感测量技术的不断发展,二者的结合使得区域分析冰川面积及物质平衡的变化成为可能,取得许多关键性的成果。尽管不同研究对于第三极地区的冰

川变化研究结果存在差异,但是对于第三极地区过去几十年来冰川的整体变化趋势基本达成共识,即第三极地区冰川整体呈现面积减小、物质亏损的趋势,但是不同地区的冰川变化幅度存在较大的空间差异,主要表现为青藏高原东南部、阿尔泰山和天山东部地区冰川面积大幅度减小、物质亏损量大,而位于昆仑山西部、帕米尔高原和喀喇昆仑地区的冰川变化较小,部分地区冰川甚至存在物质正累积,即“喀喇昆仑异常”现象^[4,23,36,38,78-85]。冰川变化的空间差异使得第三极地区不同流域的冰川径流也呈现出不同的变化特征。

流域冰川径流受到流域冰储量和气候条件的共同影响。第三极地区同时受到西风和季风两大

环流系统影响,在不同环流控制区的气候条件不同,使得不同区域的冰川以及其所产生的冰川径流对于气候变化的响应不同。按照第三极地区不同冰川流域所处的气候区,主要可分为三大类(图1):①西风控制区流域(塔里木河、疏勒河、黑河、阿姆河、锡尔河、伊犁河和印度河),这些河流主要分布

在西部和北部的干旱半干旱区,径流主要靠冰雪融水补给;②南部季风控制区流域(雅鲁藏布江、恒河、湄公河和萨尔温江),这些河流的径流主要靠5—10月份的降水补给;③西风-季风过渡区的流域(长江和黄河源区),河流的径流主要靠夏季降水补给^[18,20,86-87]。

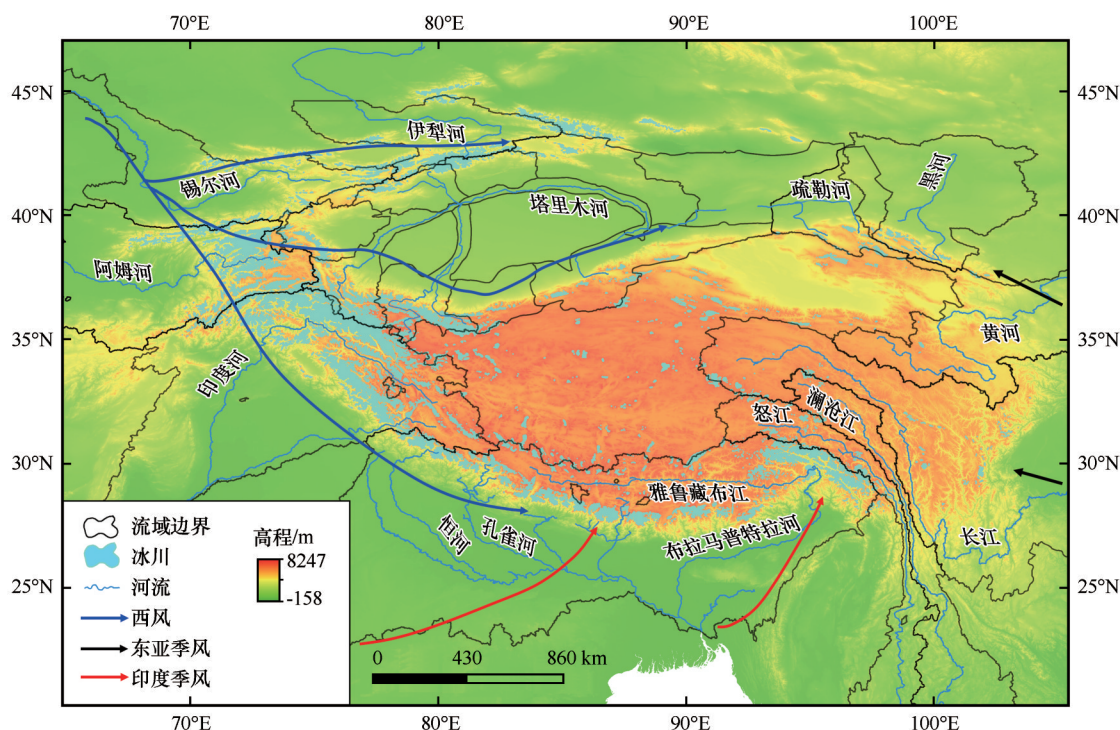


图1 第三极地区冰川及主要大河流域分布概况

Fig. 1 Distribution of glaciers and major river basins on the Third Pole

印度河上游流域是第三极地区冰川覆盖面积最广的流域,同时该流域位于西风控制的干旱半干旱区,流域降水量在年内分布较为平均,在流域内帕米尔高原和喀喇昆仑西部的高海拔地区,超过三分之二的降水出现在冬季^[88],因此印度河的降水形式主要以降雪为主,而夏季降雨较少,年径流主要受冰雪径流主导,Lutz等^[89]的研究结果表明,印度河上游流域的冰雪径流对于总径流的贡献超过60%,其中冰川径流占比为40.6%,且在研究时段内冰川径流呈现上升趋势。同样位于西风控制区的塔里木河流域冰川面积仅次于印度河流域,因此该流域的冰川径流对总径流的贡献同样显著,Gao等^[90]在塔里木河的模拟结果表明,冰川径流对于总径流的贡献为41.5%,在1961—2006年间,不同子流域冰川径流均呈现一致的上升趋势,且冰川径流对总径流的贡献占比在不断增加,特别是自20世纪90年代以来,有85.7%的总径流增加来自于冰川径

流的增加。位于咸海流域上游的阿姆河和锡尔河流域由于其冰川覆盖面积较小,流域年径流主要受融雪径流主导,Armstrong等^[91]的模拟结果表明,在研究时段2001—2014年间,阿姆河和锡尔河流域的融雪径流的贡献分别为69%和74%,而冰川径流的贡献分别为8%和2%。黑河是我国西北河西走廊内河流系中最大的河流,Wu等^[92]在黑河上游的模拟结果表明,在1960—2010年间,黑河上游的总径流及冰川径流均呈现上升趋势,而降水的增加是驱动总径流增加的主要因素,冰川径流对总径流的贡献为8.9%;李洪源等^[93]对于河西走廊第二大内流河疏勒河上游的径流组分分析结果表明,近45年来,冰川径流和总径流均呈现上升趋势,且冰川融水的增加对总径流的增加的贡献达到48%,冰川径流是流域年径流量的第二大补给源,贡献为30.5%。

而位于南部季风控制区的河流,受到印度季风的影响,其降水量主要集中在夏季,降水形式以降

雨为主,因此该区域的河流径流量主要受降雨径流补给,冰川径流的贡献较小。Lutz等^[89]对于季风控制区的四条大河上游流域的系统研究表明,四个流域的冰川径流在模拟时段内均呈现上升趋势;而尽管在雅鲁藏布江和恒河地区的冰川的分布面积较大,但由于其丰富的夏季降水,导致冰川融水的贡献被稀释,降雨径流对于流域年径流的贡献量均超过50%,冰川径流的贡献量分别为15.9%和11.5%,萨尔温江的冰川融水贡献量为8.3%,而在冰川面积覆盖比最低的湄公河流域,冰川径流对总径流的贡献仅为0.9%。

长江源区和黄河源区流域位于西风和季风的过渡区,由于季风在夏季带来的丰富的水汽,导致长江和黄河源区流域的径流同南部季风控制区的流域类似,流域年径流均受降雨径流主导,而冰川在两个流

域的覆盖面积较小,因此冰川融水对于径流的贡献有限。Zhang等^[94]在长江和黄河源区的模拟结果指出,在1961—2009年间,长江和黄河源区流域的降雨径流对总径流的贡献均超过70%,冰川径流在长江和黄河源区的贡献量分别为6.5%和0.8%。但是与20世纪90年代之前时期相比,长江源区流域的冰川径流对于总径流的贡献占比在增大^[95]。

表2总结了目前关于第三极地区冰川径流的代表性研究案例,由表2可以看出,对于同一流域,不同学者的研究结果相差较大,而造成这些差异的原因主要有以下四个方面:①研究方法不同,不同方法的原理存在差异,因此其系统误差的来源不同,导致结果存在差异,例如在印度河,对于同一个出水口控制的流域,Boral和Sen^[48]采用同位素示踪法计算得到的冰川径流对于总径流的贡献大于Lutz

表2 第三极地区不同流域冰川径流研究总结。

Table 2 Summary of the researches of glacier runoff in different basins on the Third Pole

流域	出水口	流域面积/ km ²	冰川覆 盖比/%	研究时段	降水 量/mm	研究方法	径流组成/%			冰川径 流定义*
							降雨	积雪	冰川	
印度河	Besham ^[94]	162 000	9.5	—	425	VIC-glacier	20.8	31.0	48.2	1
	Tarbela ^[89]	200 677	4.9	1998—2007年	346	SPHY	26.8	21.8	40.6	1
	Kotri ^[91]	349 972	8.9	2001—2014年	—	温度指数模型	23.0	73.0	3.0	3
	Tarbela ^[48]	200 677	—	—	—	同位素示踪法	—	—	47.0	3
	>2 000 m ^[26]	473 494	6.3	1985—2014年	832	SPHY	43.9	39.7	5.1	1
	Dainyor ^[77]	13 733	20.0	2002—2004年	1 238	WEB-DHM-S	17.3	49.3	33.3	3
	Dainyor ^[96]	13 761	20.9	2000—2010年	731	J2000	8.0	45.0	47.0	1
	Shigar ^[97]	7 000	31.0	1985—1997年	—	温度指数模型	28.0	40.0	33.0	3
塔里木河	全流域 ^[90]	1 020 000	2.0	1961—2006年	608	温度指数模型	—	—	41.5	1
	西部流域(>2 000 m) ^[26]	481 481	5.8	1985—2014年	373	SPHY	44.4	28.4	5.8	1
	东部流域(>2 000 m) ^[26]	600 182	0.9	1985—2014年	305	SPHY	49.7	20.2	1.1	1
	协合拉 ^[98]	12 800	21.3	1971—2010年	—	温度指数模型	60.6	11.2	28.2	3
	库鲁克栏杆站 ^[99]	32 900	14.3	1961—2006年	—	温度指数模型	—	—	51.3	2
阿姆河	Chatly ^[91]	187 387	6.9	2001—2014年	—	温度指数模型	23.0	69.0	8.0	3
	>2 000 m ^[26]	268 280	4.4	1985—2014年	676	SPHY	5.4	74.4	4.4	1
锡尔河	Tyumen-Aryk ^[91]	86 937	2.9	2001—2014年	—	温度指数模型	23.0	74.0	2.0	3
	>2 000 m ^[26]	172 704	1.7	1985—2014年	942	SPHY	5.6	72.9	1.3	1
黑河	莺落峡 ^[92]	—	—	2010年	—	SWAT	—	—	8.9	3
疏勒河	昌马堡 ^[93]	10 961	—	1971—2015年	230	SPHY	13.5	12.9	30.5	1
恒河	Paksey ^[91]	123 483	9.3	2001—2014年	—	温度指数	52.0	47.0	<1	3
	上游 ^[89]	—	5.4	1998—2007年	900	SPHY	66.0	8.6	11.5	1
	上游 ^[48]	—	—	—	—	同位素示踪法	—	—	44.0	3
	>2 000 m ^[26]	202 420	4.4	1985—2014年	1 763	SPHY	64.7	10.3	3.1	1
	Trishuli ^[70]	4 600	14.0	2007—2013年	—	GDM	29.9	13.9	10.7	3
	Marsyangdi ^[70]	4 060	13.0	2004—2010年	—	GDM	38.0	7.8	12.9	3
	Tamor ^[70]	3 990	10.0	2000—2010年	—	GDM	39.0	9.4	6.6	3

续表 2

流域	出水口	流域面积/ km ²	冰川覆 盖比/%	研究时段	降水 量/mm	研究方法	径流组成/%			冰川径 流定义*
							降雨	积雪	冰川	
雅鲁藏布江	奴下 ^[94]	201 200	2. 1	—	405	VIC-glacier	65. 4	23. 0	11. 6	1
	奴下 ^[100]	240 000	—	2003—2014 年	—	CREST	—	10. 6	9. 9	3
	奴下 ^[101]	240 000	—	1981—1997 年	—	WEB-DHM	71. 5	16. 6	7. 2	2
	奴下 ^[101]	240 000	—	1998—2019 年	—	WEB-DHM	70. 2	22. 3	3. 5	2
	奴下 ^[102]	204 863	2. 1	1971—2010 年	—	VIC-CAS	—	23. 1	5. 5	1
	Bahadurabad ^[91]	344 977	6. 3	2001—2014 年	—	温度指数模型	26. 0	73. 0	1. 0	3
	上游 ^[89]	—	3. 1	1998—2007 年	573	SPHY	58. 9	9. 0	15. 9	1
	上游 ^[48]	—	—	—	—	同位素示踪法	—	—	29. 0	3
	>2 000 m ^[26]	400 182	2. 7	1985—2014 年	2 018	SPHY	62. 1	13. 2	1. 8	1
	拉萨 ^[103]	26 235	1. 4	1963—2012 年	650	VIC-glacier	81. 9	12. 2	5. 9	1
萨尔温江	工布江达 ^[103]	6 417	3. 6	1963—2012 年	790	VIC-glacier	70. 5	11. 9	17. 6	1
	嘉玉桥 ^[94]	67 740	1. 7	—	607	VIC-glacier	74. 8	20. 4	4. 8	1
	嘉玉桥 ^[55]	67 700	1. 7	1964—2013 年	—	VIC-glacier	85. 8	6. 9	7. 3	1
	嘉玉桥 ^[102]	75 506	1. 4	1971—2010 年	—	VIC-CAS	—	28. 3	4. 4	1
	上游 ^[89]	—	1. 3	1998—2007 年	595	SPHY	42. 0	27. 5	8. 3	1
湄公河	>2 000 m ^[26]	119 377	1. 5	1985—2014 年	1 091	SPHY	55. 7	14. 7	1. 4	1
	昌都 ^[94]	53 800	0. 4	—	527	VIC-glacier	77. 7	20. 9	1. 4	1
	昌都 ^[55]	53 800	0. 4	1964—2013 年	—	VIC-glacier	85. 7	12. 4	2. 0	1
	昌都 ^[102]	53 644	0. 4	1971—2010 年	—	VIC-CAS	—	28. 8	1. 3	1
	上游 ^[89]	—	0. 2	1998—2007 年	642	SPHY	43. 9	32. 5	0. 9	1
长江	>2 000 m ^[26]	110 678	0. 3	1985—2014 年	1 066	SPHY	55. 1	7. 4	0. 3	1
	直门达 ^[94]	137 704	1. 0	—	333	VIC-glacier	71. 3	22. 2	6. 5	1
	直门达 ^[102]	140 073	0. 9	1971—2010 年	—	VIC-CAS	—	12. 2	3. 7	1
黄河	>2 000 m ^[26]	687 150	0. 4	1985—2014 年	1 127	SPHY	71. 0	5. 5	0. 2	1
	唐乃亥 ^[94]	121 972	0. 1	—	515	VIC-glacier	76. 8	22. 4	0. 8	1
	唐乃亥 ^[102]	123 023	0. 1	1971—2010 年	—	VIC-CAS	—	15. 3	0. 4	1
	>2 000 m ^[26]	272 857	0. 1	1985—2014 年	751	SPHY	63. 9	9. 6	0. 1	1

注：*表中冰川径流定义分别为：1. 冰川区的总径流量；2. 冰川区的所有融水产流；3. 冰川冰的产流量^[32]。不同研究结果存在差异，总体来看，位于西风控制区的流域冰川径流对于总径流的贡献大于季风控制区流域。不同的模型径流组分结果各异；即使同一模型，不同的研究者使用不同的参数，结果也存在较大差异。今后研究中需要更多的冰川水文观测来约束和验证模型结果，提升模拟结果的可靠性；此外冰川径流的定义也需要进一步统一。

等^[89]利用温度指数模型 SPHY 计算得到的结果；②对于冰川径流的定义不同，部分温度指数模型无法区分冰川区融雪径流和冰川冰融化的径流，将冰川区的冰雪融水径流或者冰川区总径流（包括降雨径流）定义为冰川径流，导致其计算结果远大于将冰川冰产流量定义为冰川径流的研究；③输入的气象数据的差异，由于第三极地区高海拔气象站的稀缺，导致对该地区的降水量估算仍存在很大不确定性，不同数据源的降水数值相差甚远，Lutz 等^[89]和 Khanal 等^[26]的研究均基于 SPHY 模型进行计算，但是对于冰川径流占比的计算结果相差很大，特别是在印度河流域，前者的结果（40. 6%）数值远大于后者（5. 1%），而其中用于输入的降水数据的差异是主

要原因，Khanal 等^[26]（842 mm）的研究中流域的年降水量是 Lutz 等^[89]（346 mm）的两倍多，丰富的降水稀释了冰川径流的贡献，导致冰川径流的占比结果远小于 Lutz 等^[89]的研究；④冰川数据的差异，目前，对于第三极地区冰川的分布和冰储量等信息仍存在争议，不同数据源的结果不同，此外，冰川表面的表碛覆盖对冰川的融化也具有重要影响，但是目前关于第三极地区冰川表碛覆盖的分布数据十分缺乏，且大多数研究并未考虑该因素，导致研究结果不确定性较大。这些差异使得目前关于第三极地区不同流域冰川径流对于总径流的贡献仍存在争议，而要想获得更加准确的研究结果，除了完善模型机理、提高研究数据精度外，还需要利用多源观测数

据,对于模拟结果进行多方面验证,例如:在传统的对于出山口径流的准确性验证的基础上,利用遥感陆面温度和积雪,以及冰川物质平衡观测等开展冰冻圈水文过程验证,进而提高模型结果的可信度和准确性。

尽管在第三极地区不同的研究结果存在较大差异,但是第三极地区不同流域的冰川径流的整体变化趋势基本一致,即自 20 世纪以来,特别是 20 世纪 90 年代以来,由于第三极地区气温逐渐升高,该地区冰川普遍退缩,导致该地区的冰川径流量呈现上升趋势,而冰川径流对总径流的贡献由流域的气候特点以及流域内冰川分布情况决定,从总体上看,位于西风控制区的流域冰川径流对于总径流的贡献大于季风控制区流域。

3 第三极地区冰川径流的未来发展趋势

IPCC 第六次评估报告指出,全球变暖的趋势已不可逆转,即使基于低排放情景下进行气候预估,未来全球气温也将持续上升,这将加剧第三极地区山地冰川的退缩趋势^[25]。有学者指出,即使在满足《巴黎协定》条件下,即把全球温升控制在工业革命前水平以上的 1.5℃,基于最低排放情景下(RCP2.6)进行预估,在本世纪末第三极地区的冰川仍将减少 36%±7%,如果在其他更高浓度排放的情景下,冰川亏损量将更大^[22]。随着冰川退缩,大量融水从冰川这一固态淡水水库中释放出来,将补给

径流导致径流量升高,可是冰储量也会随之减少,当冰储量减少至某一水平,导致冰川的融化量不足以支撑径流进一步上升时,即达到拐点,之后冰川径流便会下降^[104-105]。

近年来,许多学者在第三极地区对于冰川的未来变化开展了定量研究,这些研究均是基于冰川水文模型的方法,通过输入气候模式预估的各气象要素结果进行冰川径流的未来分析。流域的冰川径流未来如何发展由流域冰储量和未来气候变化情况共同决定。依据冰川学理论,冰储量越大的冰川对于气候变化的响应越慢,因此在同等的气候条件下,第三极地区冰川覆盖越多的流域冰川径流峰值出现的时间应该越晚,而部分冰川覆盖面积小的流域冰川径流峰值已经过去^[105-108]。

然而目前对于第三极地区未来冰川径流的预估仍存在很大的不确定性,主要表现在使用的冰川模型本身以及用于驱动模型的未来气象数据两方面存在的不确定性,冰川模型本身的不确定性在 1.4 节中已有介绍,而未来气象数据的不确定性主要来源于气候情景假设和用于生成未来气象数据所使用的气候模式的不确定性,不同气候模式基于不同的情景得到的未来气候预估结果相差较远,同时将气候模式输出的时空分辨率低的气象数据进行区域降尺度的方法的不确定性也给未来气象输入数据带来较大误差。因此由于不同学者使用的冰川水文模型和输入的未来气象数据的不同,导致

表 3 第三极地区不同流域冰川径流的未来变化研究总结
Table 3 Summary of the researches of future changes in glacier runoff in different basins on the Third Pole

流域	出水口	流域面积/ km ²	冰川覆盖 比/%	水文模型	冰川径流 占比/%	模式对比 计划	气候情景	冰川径流拐点 出现时间段
印度河	全流域 ^[105]	1 139 075	2.4	GloGEM	—	CMIP5	RCP2.6	2020s
							RCP4.5	2040s
							RCP8.5	2060s
	>2 000 m ^[53]	402 314	5.5	SRM	—	CMIP4	A1B SRES	2050s 前
	>2 000 m ^[26]	473 494	6.3	SPHY	5.1	CMIP6	dTdP	2070s
塔里木河	Baltoro ^[58]	1 415	48.0	TOPKAPI	39.0	CMIP5	RCP4.5	2030s
	全流域 ^[105]	1 051 731	2.3	GloGEM	—	CMIP5	RCP8.5	2060s
							RCP2.6	2030s
							RCP4.5	2050s
							RCP8.5	2060s
阿姆河	西部流域(>2 000 m) ^[26]	481 481	5.8	SPHY	5.8	CMIP6	dTdP	2100s 后
	东部流域(>2 000 m) ^[26]	600 182	0.9	SPHY	1.1	CMIP6	dTdP	2050s
	>2 000 m ^[26]	268 280	4.4	SPHY	4.4	CMIP6	dTdP	2060s
锡尔河	>2 000 m ^[26]	172 704	1.7	SPHY	1.3	CMIP6	dTdP	2040s

续表 3

流域	出水口	流域面积/ km ²	冰川覆盖 比/%	水文模型	冰川径流 占比/%	模式对比 计划	气候情景	冰川径流拐点 出现时间段
恒河	全流域 ^[105]	1 024 462	1. 1	GloGEM	—	CMIP5	RCP2. 6	2020s
							RCP4. 5	2040s
							RCP8. 5	2050s
	>2 000 m ^[53]	138 644	7. 1	SRM	—	CMIP4	A1B SRES	2050s 前
	>2 000 m ^[26]	202 420	4. 4	SPHY	3. 1	CMIP6	dTdP	2020s
雅鲁藏布江	全流域 ^[105]	518 011	3. 2	GloGEM	—	CMIP5	RCP2. 6	2030s
							RCP4. 5	2040s
							RCP8. 5	2040s
	奴下 ^[102]	204 863	2. 1	VIC-CAS	5. 5	CMIP5	RCP2. 6	2000s 前
							RCP4. 5	2000s 前
萨尔温江	全流域 ^[105]	258 475	0. 9	GloGEM	—	CMIP5	RCP2. 6	2020s
							RCP4. 5	2040s
							RCP8. 5	2040s
	嘉玉桥 ^[102]	75 506	1. 4	VIC-CAS	4. 4	CMIP5	RCP2. 6	2000s 前
							RCP4. 5	2000s 前
湄公河	全流域 ^[105]	787 256	0. 1	GloGEM	—	CMIP5	RCP2. 6	2020s
							RCP4. 5	2040s
							RCP8. 5	2040s
	昌都 ^[102]	53 644	0. 4	VIC-CAS	1. 3	CMIP5	RCP4. 5	2000s
							RCP4. 5	2000s
长江	全流域 ^[105]	1 745 094	0. 1	GloGEM	—	CMIP5	RCP2. 6	2020s
							RCP4. 5	2020s
							RCP8. 5	2040s
	直门达 ^[102]	140 073	0. 9	VIC-CAS	3. 7	CMIP5	RCP2. 6	2000s
							RCP4. 5	2000s
黄河	全流域 ^[105]	988 062	0. 0	GloGEM	—	CMIP5	RCP2. 6	2020s
							RCP4. 5	2050s
							RCP8. 5	2040s
	唐乃亥 ^[102]	123 023	0. 1	VIC-CAS	0. 4	CMIP5	RCP2. 6	2000s
							RCP4. 5	2000s
	>2 000 m ^[26]	272 857	0. 1	SPHY	0. 1	CMIP6	dTdP	2050s
	冬克玛底河流域 ^[72]	38	40	FLEX ^G -Δh	—	CMIP6	RCP2. 6 RCP8. 5	2060—2085

注：基于目前最新的气候预估结果对于第三极地区冰川径流的未来变化研究表明，除部分冰储量大的西风区河流（塔里木河、印度河）外，第三极地区大多数流域冰川径流将在本世纪中叶前达到峰值，峰值之后冰川径流将呈减少趋势。

目前关于第三极地区不同流域的冰川径流未来的预估结果相差很大(表 3)^[6,26,53,58,68,89,102,109–113]。例如，Immerzeel 等^[53]利用 SRM 模型基于 IPCC 第四次评估报告提出的未来气候情景 A1B SRES 对第三极地区的主要五条大河(印度河、恒河、雅鲁藏布江、长江和黄河)未来径流变化进行预估,结果表明,到本世纪中叶(2046—2065 年),除黄河外,其他四条河流的径流量将降低,相较于 2000—2007 年,印度河、

恒河、雅鲁藏布江和长江的径流量将分别降低 8.4%、17.6%、19.6% 和 5.2%，且冰川径流的减少量更大，这表明在 2046—2065 年之前，这四条河流的冰川径流早已到达拐点；而 Lutz 等^[89]利用 SPHY 模型，基于 IPCC 第五次评估报告提出的 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，对第三极地区五个主要大河上游（印度河、恒河、雅鲁藏布江、萨尔温江和湄公河）径流的未来变化进行预估，却得到与 Immerzeel 等完全相反的结果，该研究结果表明，到本世纪中叶（2050 年），五条河流上游的总径流量和冰川径流均呈现上升趋势，冰川径流拐点还未到达。

目前，IPCC 提出了最新的基于共享社会经济路径（SSP）和强迫路径（RCP）组合的情景，同时，CMIP6 计划下的新一代气候模式较之前相比也更加先进，特别是在模拟包括印度夏季风在内的一些复杂气候系统特征方面显示出明显改进，因此基于最新的情景，CMIP6 给出的预估结果相较于之前的结果在不同时空尺度上的不确定性均有所下降^[25,114-115]。基于最新的未来气候预估结果，学者对第三极地区十五条河流的上游流域的冰川径流的未来变化进行了系统预估，结果表明，不同流域冰川径流对于气候变化的响应结果不同，但是总体来看，除位于西风区的印度河上游和塔里木河西部流域外，其他流域的冰川径流均将在本世纪中叶之前到达拐点，而后冰川径流开始下降，印度河上游流域冰川径流将在本世纪末之前到达拐点，而位于西风区的塔里木河西部流域，到本世纪末，该流域的冰川径流仍呈现持续增加的趋势，另外，在季节尺度上，随着气候变化，积雪融化提前，将导致积雪径流的峰值在年内出现时间也提前，而冰川径流的年内分布情况变化不大^[26]。

然而，尽管目前不同学者对于第三极地区不同流域的冰川径流未来变化趋势及拐点出现的时间存在较大争议，但是可以肯定的是，在气候变化的驱动下，未来的几十年内，第三极地区的冰川径流必将发生剧烈变化。从总量上看，对于部分季风区冰储量很小的流域，如长江、黄河、湄公河和萨尔温江，冰川径流的变化对于总径流量的影响不大，但是对于冰储量较大的流域，冰川径流的变化将对总径流量产生重大影响，未来由于冰储量的减少导致对下游的淡水资源补给减少，将产生许多重大的水安全问题^[10,15-16]，此外由于温度升高，冰川的不稳定

性也将增加，将导致冰川灾害的发生更为频繁^[27-30]，对下游地区的居民生命财产安全造成重大威胁，因此，如何准确定量地预估冰川径流的未来变化趋势，进而为下游地区做好应对措施提供可靠的科学依据，仍是目前科学界亟待解决的重大难题。

4 目前研究存在的不足

近年来，随着科学界对于第三极地区冰川径流的关注，涌现出大量关于第三极地区不同流域的冰川径流研究。然而，由于该地区缺乏实测资料，同时冰川水文的内在过程十分复杂，导致目前关于第三极地区冰川径流的研究结果仍存在不确定性，总结来说主要体现在以下几个方面：

（1）对于冰川水文过程内在机理认识不足，目前在该区域研究使用的冰川水文模型大多为温度指数模型，即使存在一些基于能量平衡过程的冰川水文模型模拟研究，但是这些模型对于冰川融化的内在过程仍存在很大程度的简化，如对于冰川动力学过程的刻画较为简单，同时未考虑冰川能量的内在传递、表碛覆盖物以及黑碳的影响等。

（2）被用于研究的冰川数据存在很大的不确定性，不同数据集的冰川数据差异较大。

（3）模型输入的气象数据同样存在很大的不确定性，由于缺乏实测，对于该区域的气象数据特别是高山区降水数据的估算仍存在不足，对于未来的气象要素的预估都是基于历史数据进行校正，因此不确定性更大。

目前研究存在的这些问题使得第三极地区冰川径流的变化和其对总径流的贡献，以及未来发展趋势的研究结果存在一定的不确定性，为下游地区的水资源利用与管理带来挑战。

5 结论

在全球变暖的背景下，第三极地区的山地冰川普遍退缩，冰川融水释放导致下游地区的河川径流组分发生剧烈变化，对下游地区的经济社会发展产生重大影响，因此受到科学界的广泛关注。随着近些年来的发展，针对第三极地区特殊的地理环境和复杂的气候条件，学者开发了多种不同方法来解决有关冰川径流的科学问题，这些方法被应用于第三极地区的不同流域，取得了大量成果，总结来看可分为以下几点：

（1）关于冰川径流的研究方法主要可分为五种：

直接观测法、遥感观测法、水量平衡法、水化学示踪法和冰川水文模型法,其中冰川水文模型法又可分为温度指数模型法和基于能量平衡模型法,该方法因其系统性且可进行定量预估,目前使用最为广泛。

(2)自 20 世纪 90 年代以来,第三极地区冰川径流普遍呈现上升趋势,但是其对于总径流的贡献同时受气候条件和流域冰储量的影响,存在显著的空间差异,总体来看,位于西风控制区的流域冰川径流对于总径流的贡献普遍大于季风控制区的流域。

(3)对于第三极地区冰川径流的未来预估方面,不同研究由于使用的未来气候预估结果不同,导致结论存在很大不确定性,但是基于目前最新的气候预估结果对于第三极地区冰川径流的未来变化研究表明,除部分冰储量大的西风区河流(塔里木河、印度河)外,第三极地区大多数流域冰川径流将在本世纪中叶前达到峰值。

然而,目前对于第三极地区的冰川径流研究中,仍存在使用的模型物理机制简化以及由于观测不足导致的研究数据的不确定性较大等问题,因此未来在第三极地区开展更广泛的实地观测和更高精度的遥感监测,同时开发出物理机制更为完善的冰川水文模型是未来冰川水文研究的发展方向。

参考文献(References):

- [1] Wang Ninglian, Yao Tandong, Xu Baiqing, et al. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1220-1232. [王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1220-1232.]
- [2] Wang Ninglian, Zhang Xiangsong. Mountain glacier fluctuations and climatic change during the last 100 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, 14(3): 242-250. [王宁练, 张祥松. 近百年来山地冰川波动与气候变化[J]. *冰川冻土*, 1992, 14(3): 242-250.]
- [3] Kaser G, Grosshauser M, Marzeion B. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(47): 20223-20227.
- [4] Bolch T, Kulkarni A, Kääb A, et al. The state and fate of Himalayan glaciers[J]. *Science*, 2012, 336(6079): 310-314.
- [5] Hugonnet R, McNabb R, Berthier E, et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century[J]. *Nature*, 2021, 592(7856): 726-731.
- [6] Hock R, Bliss A, Marzeion B E N, et al. GlacierMIP - A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections[J]. *Journal of Glaciology*, 2019, 65(251): 453-467.
- [7] Zemp M, Huss M, Thibert E, et al. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016[J]. *Nature*, 2019, 568(7752): 382-386.
- [8] Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Chen Rensheng. Cryospheric hydrology: decode the largest freshwater reservoir on earth[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(4): 414-424. [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): 414-424.]
- [9] Rounce D R, Hock R, Shean D E. Glacier mass change in High Mountain Asia through 2100 using the open-source python glacier evolution model (PyGEM)[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 7: 331.
- [10] Viviroli D, Kumm M, Meybeck M, et al. Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(11): 917-928.
- [11] Yao Tandong. TPE international program: a program for coping with major future environmental challenges of The Third Pole region[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 884-892. [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际计划[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 884-892.]
- [12] Yao Tandong, Chen Fahu, Cui Peng, et al. From Tibetan Plateau to Third Pole and Pan-Third Pole[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(9): 924-931. [姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 从青藏高原到第三极和泛第三极[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(9): 924-931.]
- [13] Tang Qihong, Lan Cuo, Su Fengge, et al. Streamflow change on the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2807-2821. [汤秋鸿, 兰措, 苏凤阁, 等. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2807-2821.]
- [14] Tang Qihong, Liu Xingcai, Zhou Yuanyuan, et al. Cascading impacts of Asian Water Tower change on downstream water systems[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1306-1312. [汤秋鸿, 刘星才, 周园园, 等. “亚洲水塔”变化对下游水资源的连锁效应[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1306-1312.]
- [15] Biemans H, Siderius C, Lutz A F, et al. Importance of snow and glacier meltwater for agriculture on the Indo-Gangetic Plain[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(7): 594-601.
- [16] Pritchard H D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress[J]. *Nature*, 2019, 569(7758): 649-654.
- [17] Immerzeel W W, Lutz A F, Andrade M, et al. Importance and vulnerability of the world's water towers[J]. *Nature*, 2020, 577(7790): 364-369.
- [18] Wang L, Yao T, Chai C, et al. TP-river: monitoring and quantifying total river runoff from the Third Pole[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2021, 102(5): E948-E965.
- [19] Chen Deliang, Xu Baiqing, Yao Tandong, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(32): 3025-3035. [陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来[J]. *科学通报*, 2015, 60(32): 3025-3035.]
- [20] Yao T, Xue Y, Chen D, et al. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, 100(3): 423-444.

- [21] Cuo L, Zhang Y, 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.
- [22] Kraaijenbrink P D A, Bierkens M F P, Lutz A F, et al. Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers[J]. *Nature*, 2017, 549(7671): 257-260.
- [23] Bhattacharya A, Bolch T, Mukherjee K, et al. High Mountain Asian glacier response to climate revealed by multi-temporal satellite observations since the 1960s [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1-13.
- [24] Zhang Jianyun, Liu Jiufu, Jin Junliang, et al. Evolution and trend of water resources in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1264-1273. [张建云, 刘九夫, 金君良, 等. 青藏高原水资源演变与趋势分析[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1264-1273.]
- [25] IPCC. *Climate change 2021: the physical science basis* [M]. Cambridge: Cambridge University 11 Press, 2021.
- [26] 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): e2020WR029266.
- [27] 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): 91-106.
- [28] Wu Guangjian, Yao Tandong, Wang Weicai, et al. Glacial hazards on Tibetan Plateau and surrounding alpine [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1285-1292. [邬光剑, 姚檀栋, 王伟才, 等. 青藏高原及周边地区的冰川灾害[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1285-1292.]
- [29] Azam M F, Kargel J S, Shea J M, et al. Glaciohydrology of the Himalaya-Karakoram [J]. *Science*, 2021, 373 (6557): eabf3668.
- [30] Zheng G, Allen S K, Bao A, et al. Increasing risk of glacial lake outburst floods from future Third Pole deglaciation[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(5): 411-417.
- [31] La Frenierre J, Mark B G. A review of methods for estimating the contribution of glacial meltwater to total watershed discharge [J]. *Progress in Physical Geography-Earth and Environment*, 2014, 38(2): 173-200.
- [32] Yin Zhenliang, Feng Qi, Liu Shiyin, et al. The application progress of hydrological model in quantifying the contribution of glacier runoff to total watershed runoff[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 248-258. [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): 248-258.]
- [33] Thayyen R J, Gergan J T. Role of glaciers in watershed hydrology: a preliminary study of a "Himalayan catchment" [J]. *Cryosphere*, 2010, 4(1): 115-128.
- [34] Gascoin S, Kinnard C, Ponce R, et al. Glacier contribution to streamflow in two headwaters of the Huasco River, Dry Andes of Chile[J]. *Cryosphere*, 2011, 5(4): 1099-1113.
- [35] Yao Tandong, Zhang Yinsheng, Pu Jianchen, et al. Twenty-year observations of glacier, hydrology and meteorology at the Tanggula Pass of the Tibetan Plateau: significance and achievements [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(6): 1152-1161. [姚檀栋, 张寅生, 蒲健辰, 等. 青藏高原唐古拉山口冰川、水文和气候学观测 20 a: 意义与贡献[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(6): 1152-1161.]
- [36] Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663-667.
- [37] kääb A, Berthier E, Nuth C, et al. Contrasting patterns of early twenty-first-century glacier mass change in the Himalayas [J]. *Nature*, 2012, 488(7412): 495-498.
- [38] Brun F, Berthier E, Wagnon P, et al. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(9): 668-673.
- [39] Liu L, Jiang L, Wang H, et al. Estimation of glacier mass loss and its contribution to river runoff in the source region of the Yangtze River during 2000—2018 [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: 125207.
- [40] Singh P, Jain S K. Snow and glacier melt in the Satluj River at Bhakra Dam in the western Himalayan region [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2002, 47(1): 93-106.
- [41] Baraer M, Mark B G, Mckenzie J M, et al. Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca [J]. *Journal of Glaciology*, 2012, 58(207): 134-150.
- [42] Shen Yongping, Xie Zichu, Ding Liangfu, et al. Estimation of average mass balance for glaciers in a watershed and its application [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1997, 19(4): 303-307. [沈永平, 谢自楚, 丁良福, 等. 流域冰川平均物质平衡的计算方法及其应用[J]. *冰川冻土*, 1997, 19(4): 303-307.]
- [43] Jia Yufeng, Li Zhongqin, Jin Shuang, et al. Changes of the runoff and its components in Urumqi Glacier No. 1 catchment, Tianshan Mountains, 1959—2017 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(6): 1302-1312. [贾玉峰, 李忠勤, 金爽, 等. 1959—2017年天山乌鲁木齐河源1号冰川流域径流及其组分变化[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(6): 1302-1312.]
- [44] Christophersen N, Hooper R P. Multivariate-analysis of stream water chemical-data: the use of principal components-analysis for the end-member mixing problem [J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(1): 99-107.
- [45] Mark B G, Mckenzie J M, Gomez J. Hydrochemical evaluation of changing glacier meltwater contribution to stream discharge: Callejon de Huaylas, Peru [J]. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 2005, 50(6): 975-987.
- [46] Song Mengyuan, Li Zhongqin, Jin Shuang, et al. Characteristics of water isotopes and hydrograph separation in the glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(3): 156-160. [宋梦媛, 李忠勤, 金爽, 等. 托木尔峰青冰滩72号冰川流域同位素特征及径流分割研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(3): 156-160.]
- [47] Jeelani G, Shah R A, Jacob N, et al. Estimation of snow and glacier melt contribution to Liddar stream in a mountainous catchment, western Himalaya: an isotopic approach [J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2017, 53(1): 18-35.
- [48] Boral S, Sen I S. Tracing 'Third Pole' ice meltwater contribution to the Himalayan rivers using oxygen and hydrogen isotopes [J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 2020, 13: 48-53.
- [49] Hock R. Temperature index melt modelling in mountain areas [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 282(1): 104-115.
- [50] Hock R. Glacier melt: a review of processes and their modelling [J]. *Progress in Physical Geography-Earth and Environment*, 2005, 29(3): 362-391.
- [51] Qing Wenwu, Chen Rensheng, Liu Shiyin. Progress in study

- of glacier hydrological model[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(6): 893-902. [卿文武, 陈仁升, 刘时银. 冰川水文模型研究进展[J]. *水科学进展*, 2008, 19(6): 893-902.]
- [52] Farinotti D, Huss M, Bauder A, et al. A method to estimate the ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers [J]. *Journal of Glaciology*, 2009, 55(191): 422-430.
- [53] 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): 1382-1385.
- [54] Zhang Y, Hao Z, Xu C, et al. Response of melt water and rainfall runoff to climate change and their roles in controlling streamflow changes of the two upstream basins over the Tibetan Plateau[J]. *Hydrology Research*, 2020, 51(2): 272-289.
- [55] Wang X, Yang T, Xu C, et al. The response of runoff components and glacier mass balance to climate change for a glaciated high-mountainous catchment in the Tianshan Mountains [J]. *Natural Hazards*, 2020, 104(2): 1239-1258.
- [56] Yin Z, Feng Q, Liu S, et al. The spatial and temporal contribution of glacier runoff to watershed discharge in the Yarkant River Basin, Northwest China[J]. *Water*, 2017, 9(3): 159.
- [57] Shen Y, Shen Y, Fink M, et al. Unraveling the hydrology of the glacierized Kaidu Basin by integrating multisource data in the Tianshan Mountains, northwestern China [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(1): 557-580.
- [58] Immerzeel W W, Pellicciotti F, Bierkens M F P. Rising river flows throughout the twenty-first century in two Himalayan glacierized watersheds [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(9): 742-745.
- [59] Mukhopadhyay B, Khan A. A reevaluation of the snowmelt and glacial melt in river flows within Upper Indus Basin and its significance in a changing climate [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 119-132.
- [60] Xie Zichu, Feng Qinghua, Liu Chaohai. Modeling the variation of glacier system: taking the southern Tibet region as an example [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(1): 16-27. [谢自楚, 冯清华, 刘潮海. 冰川系统变化的模型研究——以西藏南部外流水系为例[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(1): 16-27.]
- [61] Boscarello L, Ravazzani G, Rabuffetti D, et al. Integrating glaciers raster-based modelling in large catchments hydrological balance: the Rhone case study [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(3): 496-508.
- [62] Huss M, Zemp M, Joerg P C, et al. High uncertainty in 21st century runoff projections from glacierized basins [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 510: 35-48.
- [63] Singh V, Jain S K, Goyal M K. An assessment of snow-glacier melt runoff under climate change scenarios in the Himalayan basin [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2021, 35(10): 2067-2092.
- [64] Chelamallu H P, Venkataraman G, Murti M V R, et al. Comparison of SRM and SNOWMOD models using MODIS snow cover data for Bhagirathi river basin in the Himalayas [J]. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2014: 4010-4013.
- [65] Alaoui A, Willmann E, Jasper K, et al. Modelling the effects of land use and climate changes on hydrology in the Ursern Valley, Switzerland [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(10): 3602-3614.
- [66] Comeau L E L, Pietroniro A, Demuth M N. Glacier contribution to the North and South Saskatchewan Rivers [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(18): 2640-2653.
- [67] Juen I, Kaser G, Georges C. Modelling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (Cordillera Blanca, Peru) [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 59(1): 37-48.
- [68] Hagg W, Braun L N, Kuhn M, et al. Modelling of hydrological response to climate change in glacierized central Asian catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 332(1/2): 40-53.
- [69] Koboltschnig G R, Schoner W, Holzmann H, et al. Glacier-melt of a small basin contributing to runoff under the extreme climate conditions in the summer of 2003 [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(7): 1010-1018.
- [70] Kayastha R B, Steiner N, Kayastha R, et al. Comparative study of hydrology and icemelt in three Nepal river basins using the Glacio-Hydrological Degree-Day Model (GDM) and observations from the Advanced Scatterometer (ASCAT) [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 7: 354.
- [71] Chen R, Lu S, Kang E, et al. A distributed water-heat coupled model for mountainous watershed of an inland river basin of northwest China (I) model structure and equations [J]. *Environmental Geology*, 2008, 53(6): 1299-1309.
- [72] Gao H, Feng Z, Zhang T, et al. Assessing glacier retreat and its impact on water resources in a headwater of Yangtze River based on CMIP6 projections [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 765: 142774.
- [73] Naeem U A, Hashmi H N, Habib Ur R, et al. Flow trends in river Chitral due to different scenarios of glaciated extent [J]. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 2013, 17(1): 244-251.
- [74] Ren Z, Su F, Xu B, et al. A coupled glacier-hydrology model and its application in eastern Pamir [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2018, 123(24): 13692-13713.
- [75] Mimeau L, Esteves M, Zin I, et al. Quantification of different flow components in a high-altitude glacierized catchment (Dudh Koshi, Himalaya): some cryospheric-related issues [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(9): 3969-3996.
- [76] Mauser W, Bach H. PROMET - large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 376(3/4): 362-377.
- [77] 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): 4889-4919.
- [78] Cogley J G. Glacier shrinkage across High Mountain Asia [J]. *Annals of Glaciology*, 2016, 57(71): 41-49.
- [79] Patel L K, Sharma A, Sharma P, et al. Glacier area changes and its relation to climatological trends over Western Himalaya between 1971 and 2018 [J]. *Journal of Earth System Science*, 2021, 130(4): 1-15.
- [80] Maurer J M, Schaefer J M, Rupper S, et al. Acceleration of ice loss across the Himalayas over the past 40 years [J]. *Science advances*, 2019, 5(6): eaav7266.
- [81] Hewitt K. The Karakoram anomaly? Glacier expansion and the 'elevation effect,' Karakoram Himalaya [J]. *Mountain Research and Development*, 2005, 25(4): 332-340.
- [82] Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y. Slight mass gain of Karakoram glaciers in the early twenty-first century [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(5): 322-325.
- [83] Neckel N, Kropáček J, Bolch T, et al. Glacier mass changes on the Tibetan Plateau 2003—2009 derived from ICESat laser

- altimetry measurements [J]. *Environmental research letters*, 2014, 9(1): 014009.
- [84] Wei J, Liu S, Guo W, et al. Surface-area changes of glaciers in the Tibetan Plateau interior area since the 1970s using recent Landsat images and historical maps [J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(66): 213-222.
- [85] Pieczonka T, Bolch T. Region-wide glacier mass budgets and area changes for the Central Tien Shan between similar to 1975 and 1999 using Hexagon KH-9 imagery [J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 128: 1-13.
- [86] Tian L, Yao T, MacClune K, et al. Stable isotopic variations in west China: a consideration of moisture sources [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112: D10112.
- [87] Yao T, Masson-Delmotte V, Gao J, et al. A review of climatic controls on $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the Tibetan Plateau: observations and simulations [J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, 51(4): 525-548.
- [88] Hewitt K. Glacier change, concentration, and elevation effects in the Karakoram Himalaya, Upper Indus Basin [J]. *Mountain Research and Development*, 2011, 31(3): 188-200.
- [89] 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): 587-592.
- [90] 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): 880-891.
- [91] 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): 1249-1261.
- [92] Wu F, Zhan J, Wang Z, et al. Streamflow variation due to glacier melting and climate change in upstream Heihe River basin, Northwest China [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2015, 79-82: 11-19.
- [93] Li Hongyuan, Zhao Quidong, Wu Jinkui, et al. Quantitative simulation of the runoff components and its variation characteristics in the upstream of the Shule River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(4): 907-917. [李洪源, 赵求东, 吴锦奎, 等. 疏勒河上游径流组分及其变化特征定量模拟 [J]. *冰川冻土*, 2019, 41(4): 907-917.]
- [94] Zhang L, Su F, Yang D, et al. Discharge regime and simulation for the upstream of major rivers over Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2013, 118(15): 8500-8518.
- [95] Liu S, Zhang Y, Zhang Y, et al. Estimation of glacier runoff and future trends in the Yangtze River source region, China [J]. *Journal of Glaciology*, 2009, 55(190): 353-362.
- [96] Shrestha S, Nepal S. Water balance assessment under different glacier coverage scenarios in the Hunza Basin [J]. *Water*, 2019, 11(6): 1124.
- [97] Soncini A, Bocchiola D, Confortola G, et al. Future hydrological regimes in the upper Indus basin: a case study from a high-altitude glacierized catchment [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16(1): 306-326.
- [98] Li Z, Shi X, Tang Q, et al. Partitioning the contributions of glacier melt and precipitation to the 1971—2010 runoff increases in a headwater basin of the Tarim River [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124579.
- [99] Gao Xin, Zhang Shiqiang, Ye Baisheng, et al. Glacier runoff change in the upper stream of Yarkant River and its impact on river runoff during 1961—2006 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(3): 445-453. [高鑫, 张世强, 叶柏生, 等. 1961—2006年叶尔羌河上游流域冰川融水变化及其对径流的影响 [J]. *冰川冻土*, 2010, 32(3): 445-453.]
- [100] Chen X, Long D, Hong Y, et al. Improved modeling of snow and glacier melting by a progressive two-stage calibration strategy with GRACE and multisource data: How snow and glacier meltwater contributes to the runoff of the Upper Brahmaputra River basin? [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(3): 2431-2466.
- [101] Wang Y, Wang L, Zhou J, et al. Vanishing glaciers at south-east Tibetan Plateau have not offset the declining runoff at Yarlung Zangbo [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(21): e2021GL094651.
- [102] Zhao Q, Ding Y, Wang J, et al. Projecting climate change impacts on hydrological processes on the Tibetan Plateau with model calibration against the glacier inventory data and observed streamflow [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 60-81.
- [103] Zhang Y, Xu C Y, Hao Z, et al. Variation of melt water and rainfall runoff and their impacts on streamflow changes during recent decades in two Tibetan Plateau Basins [J]. *Water*, 2020, 12(11): 3112.
- [104] Gleick P H, Palaniappan M. Peak water limits to freshwater withdrawal and use [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(25): 11155-11162.
- [105] Huss M, Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(2): 135-140.
- [106] Ye Baisheng, Ding Yongjian, Liu Chaohai. Response of valley glaciers in various size and their runoff to climate change [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001(2): 103-110. [叶柏生, 丁永建, 刘潮海. 不同规模山谷冰川及其径流对气候变化的响应过程 [J]. *冰川冻土*, 2001(2): 103-110.]
- [107] Yao Tandong, Yao Zhijun. Impacts of glacial retreat on runoff on Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2010, 32(1): 4-8. [姚檀栋, 姚治君. 青藏高原冰川退缩对河水径流的影响 [J]. *自然杂志*, 2010, 32(1): 4-8.]
- [108] Zhang S, Gao X, Zhang X. Glacial runoff likely reached peak in the mountainous areas of the Shiyang River Basin, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(2): 382-395.
- [109] Su F, Zhang L, Ou T, et al. Hydrological response to future climate changes for the major upstream river basins in the Tibetan Plateau [J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 136: 82-95.
- [110] Wijngaard R R, Lutz A F, Nepal S, et al. Future changes in hydro-climatic extremes in the Upper Indus, Ganges, and Brahmaputra River basins [J]. *PloS one*, 2017, 12(12): e0190224.
- [111] Young J C, Pettit E, Arendt A, et al. A changing hydrological regime: Trends in magnitude and timing of glacier ice melt and glacier runoff in a high latitude coastal watershed [J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(7): e2020WR027404.
- [112] Xie Zichu, Wang Xin, Feng Qinghua, et al. Glacial runoff in China: an evaluation and prediction for the future 50 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 457-466. [谢自楚, 王欣, 康尔泗, 等. 中国冰川径流的评估及其未来 50 a 变化趋势预测 [J]. *冰川冻土*, 2006, 28(4): 457-466.]
- [113] Zhao Quidong, Zhao Chuancheng, Qin Yan, et al. Response

- of the hydrological processes to climate change in the Muzati River basin with high glacierization, southern slope of the Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(4): 1285-1298. [赵求东, 赵传成, 秦艳, 等. 天山南坡高冰川覆盖率的木扎提河流域水文过程对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(4): 1285-1298.]
- [114] Zhu Y, Yang S. Evaluation of CMIP6 for historical temperature and precipitation over the Tibetan Plateau and its comparison with CMIP5 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2020, 11(3): 239-251.
- [115] Wang Yu, Li Huixin, Wang Huijun, et al. Evaluation of CMIP6 model simulations of extreme precipitation in China and comparison with CMIP5 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2021, 79(3): 369-386. [王予, 李惠心, 王会军, 等. CMIP6 全球气候模式对中国极端降水模拟能力的评估及其与 CMIP5 的比较[J]. *气象学报*, 2021, 79(3): 369-386.]

A review of glacier runoff studies in the Third Pole region

LIU Hu^{1,2}, WANG Lei^{1,2}

(1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Tibetan Plateau and its surrounding mountains contain the largest amount of glaciers outside the polar regions and therefore is called the “Third Pole” (TP). The TP is very sensitive to climate change. In the context of elevation-dependent warming over the mountainous TP, river runoff has changed dramatically due to the accelerated glacier melting, bringing grand challenges to integrated water resources management over the TP and its downstream regions. However, it is very difficult to quantify glacier runoff owing to very sparse in-situ glacier-hydrology observations over the TP and the inherent complexity of glacio-hydrological processes.

This paper reviewed the major research progresses and problems of glacier runoff studies in the TP region. Comprehensive literatures indicate that the research methods of glacier runoff can be roughly classified into five categories: direct discharge measurement, remote sensing monitoring, water balance calculation, hydrochemical tracers, and glacio-hydrological modeling. The glacio-hydrological modeling can be further divided into temperature-index and energy-balance methods. The modeling approach is the most widely used since it can systematically and quantitatively describe the glacio-hydrological processes and project future changes.

Previous studies on glacier runoff based on these methods showed that glacier runoff has generally increased since the 1990s induced by atmospheric warming over the TP, but the contribution of glacier runoff to total river runoff is influenced by both climate and glacier storage in the basin. The results of the contribution of glacier runoff to total river runoff have significant uncertainties among different studies mainly due to the following reasons, e. g., different methods used, distinct definition of glacier runoff, different meteorological inputs (especially the precipitation), and different glacier data (glacier extent, volume, and debris cover). In general, studies suggested that the contribution of glacier runoff to total river runoff in the westerlies-dominated region was greater than that in the monsoon-dominated region.

As for the projections for future changes in the glacier runoff over the TP, the results varied widely among previous studies based on different climate change projection scenarios. The latest research indicates that glacier runoff in most basins will reach the peak before 2050 and decrease after the peak except for some basins in the westerlies-dominated region with large glacier storage (e. g., Tarim and upper Indus), based on the climate change projections in the CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) climate model ensemble.

There are considerable uncertainties among the studies or literatures in the estimates of glacier runoff over the TP, mainly caused by sparse in-situ observations and highly-simplified models. Limited by available ground-based observations, most studies have used the temperature-index glacio-hydrological models for the TP basins, while the energy-balance models were applied to small basins. In addition, even the state-of-the-art energy-balance glacio-hydrological models do not fully consider some factors that affect glacier ablation, e. g. the glacier

dynamics, debris covers, and black carbon. These factors may bring significant uncertainties to the simulated results. Therefore, we suggest that comprehensive observations and new advanced glacio-hydrological models need to be constructed and developed in the future studies; and, on the other hand, process-based multi-variable calibration/verification should be adopted in the glacio-hydrological modeling studies to improve the accuracy of glacier runoff studies over the TP. Doing so will provide a scientific basis for water resources utilization and management, flood prevention and mitigation in the downstream of TP.

Key words: glacier runoff; glacio-hydrological model; Third Pole; glacier storage; water resources

(责任编辑: 陈仁升)