



藏东南地区的河流水文研究: 进展与挑战

余国安^{1*}, 岳蓬胜^{1,2}, 张晨笛¹, 李志威³, 侯伟鹏^{1,2}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072

* 联系人, E-mail: yuga@igsnr.ac.cn

2023-01-29 收稿, 2023-04-18 修回, 2023-05-29 接受, 2023-05-30 网络版发表

第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0903)和国家自然科学基金(41971010)资助

摘要 西藏自治区东南部地区(简称藏东南)是青藏高原的降水、产流和产输沙高值区,也是高原气候变化的敏感区,其河流水文过程不但受气候变化影响,还与区域植被、冰川、积雪、冻土、冰湖等下垫面变化和偶发地质灾害事件密切相关. 深入认识藏东南地区河流水文特征、径流/泥沙产输机制和主要影响因子,明晰全球气候变化大背景下水文情势变化和未来趋势,对于区域水能及水资源合理开发利用、工程安全和长期运行,以及泥石流、山洪等自然灾害的科学防控,具有重要的科学价值和实践意义. 新中国成立以来(尤其近50年来),通过青藏高原科考等野外综合科学考察和几代科学工作者的不懈努力,对藏东南地区的气候、水文、自然地理、地质地貌等开展了较为系统的调查分析和研究. 本文梳理总结了藏东南河流水文研究的主要进展,包括区域气候变化及其影响、径流泥沙特征及变化等,并探讨目前研究面临的主要挑战和未来应加强的若干方面. 藏东南地区的野外气象及水文监测依然薄弱,实测数据资料匮乏,这是未来区域河流水文研究应着力克服和解决的基础问题.

关键词 藏东南, 气候变化, 下垫面变化, 地质灾害, 径流, 泥沙

西藏自治区东南部地区(以下简称藏东南)在行政区划上大致囊括林芝市米林、波密、墨脱和察隅四县(图1). 从宏观自然地理上看,这一区域地处青藏高原南部偏东,涵盖雅鲁藏布江(以下简称雅江)下游、察隅河和丹巴曲上游等河流,其中关注的核心区域为雅江下游,本文的分析和讨论也主要围绕此区域展开.

藏东南地区降水丰沛,水系密布,核心区域除雅江干流(雅鲁藏布大峡谷,以下简称雅江大峡谷)外,还发育众多支流(如帕隆藏布、易贡藏布、拉月曲、金珠曲、白马西路河等). 藏东南地区是青藏高原的产流和产输沙高值区,如雅江奴下水文站下游集水面积(约5.15万km²)仅占雅江流域面积(以出境断面巴昔卡统计,图1)约1/5,但巴昔卡断面约2/3径流量和90%以上的产

沙量来自这一区域^[1-4],因而雅江流域下游(简称雅下)的水文情势与藏东南地区的产汇流和产输沙过程密切相关.

藏东南地区水能和水资源十分丰富^[5,6],生态和景观资源得天独厚^[7],且区位优势显著,国道318线和新219线贯穿其中,是连接西藏和川滇两省的战略交通廊道,也是未来10~20年我国多项重大战略工程(如雅下水电开发、川藏铁路、滇藏铁路、南水北调西线等)施工建设和运行区. 但同时,由于区域断裂构造发育,地质环境脆弱,山高谷深坡陡,气候差异大,冰雪活动强烈,海洋性冰川发育,藏东南地区是青藏高原乃至全世界构造隆升与地震活动最强烈、海拔高差最大、地形地貌空间分异最为剧烈、气候变化影响最显著的地

引用格式: 余国安, 岳蓬胜, 张晨笛, 等. 藏东南地区的河流水文研究: 进展与挑战. 科学通报, 2024, 69: 394–413

Yu G A, Yue P S, Zhang C D, et al. River hydrology studies in Southeast Xizang: Progress and challenges (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 394–413, doi: 10.1360/TB-2023-0075

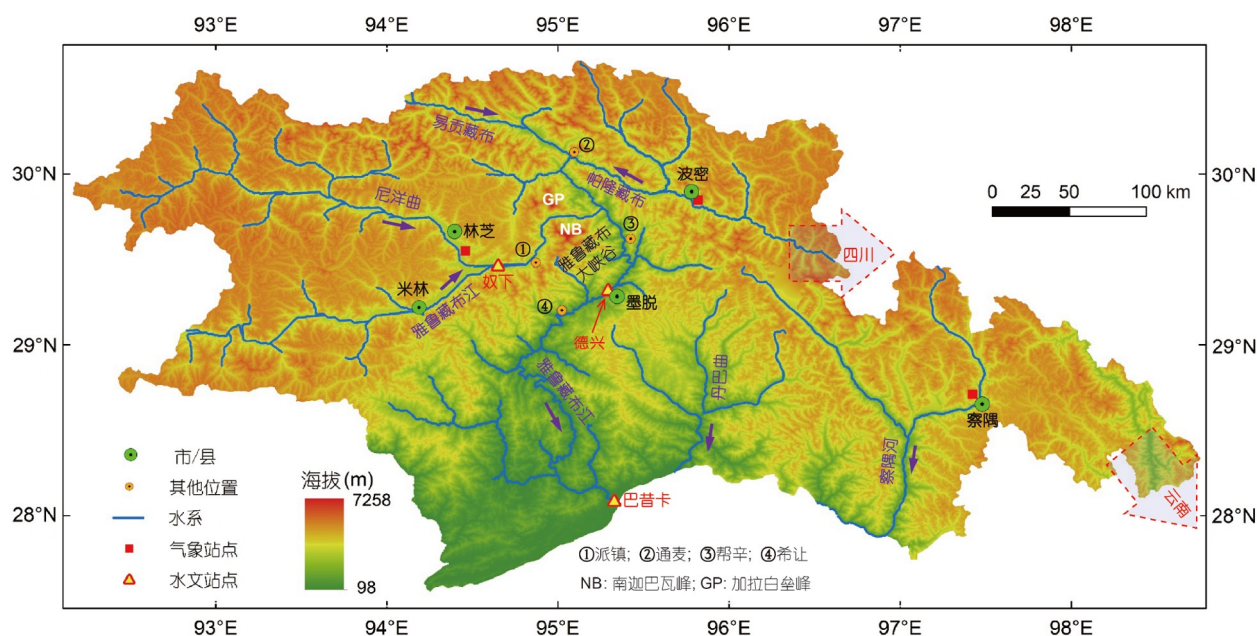


图1 (网络版彩色)藏东南地区位置和水系分布. 雅江下游: 大峡谷及主要支流

Figure 1 (Color online) Location of Southeast Xizang and river networks. The lower reaches of the Yarlung Tsangpo: Yarlung Tsangpo Grand Canyon and its tributaries

区之一, 冰崩、滑坡、泥石流、山洪等自然灾害多发, 强烈影响区域径流和泥沙过程。因而, 藏东南地区是一个具有突出战略价值, 但自然环境脆弱、复杂、多变, 灾害易发频发的“矛盾”体。深入认识藏东南地区河流水文特征、径流/泥沙产输机制及其主要影响因素, 明晰全球气候变化大背景下水文情势变化和未来趋势, 对于区域水能水资源合理开发利用、重大工程安全和长期运行、泥石流山洪等自然灾害的科学防控, 以及区域生态环境保护和经济社会可持续发展, 具有重要的科学价值和实践意义。

本文系统梳理藏东南河流水文研究已有的主要工作和进展, 分析区域径流、泥沙的基本特征、未来变化趋势和主要影响因素, 并探讨目前研究面临的困难和亟须加强的方面, 以期推动藏东南河流水文研究进一步深入, 有效服务区域水电水资源开发和工程安全等国家需求。

1 藏东南河流水文研究的发展历程及逻辑体系

由于地处偏僻, 交通不便, 新中国成立之前有关藏东南地区河流水文的相关研究十分稀少, 仅有少许国外探险者(植物/博物学家)的工作稍有涉及。20世纪上半叶, 国外学者曾在雅江大拐弯地区(雅江大峡谷及周

边)进行野外调查, 收集动植物标本, 并零星报道这一区域的地形地貌、自然景观和河流水系情况^[8-11]。

新中国成立后的20世纪50~60年代, 国家在经济十分困难、科研力量薄弱的情况下, 组织了区域性、专题性的科学考察工作, 其中包括西藏东中部科学考察(1951~1953年), 内容涵盖地质、地理、气象、水利等方面, 取得了重要的基础资料^[12]。20世纪70年代以来, 国家系统组织规模宏大且持续时间更长的第一次青藏高原综合科学考察(1973~1992年)。其中的4次南迦巴瓦峰地区科学考察研究(1982~1984年)及横断山区综合科学考察研究(1981~1984年)等对藏东南地区的自然地理、地质地貌、冰川、河流水系分布/组成等开展了较为系统的野外踏勘调查和分析, 基本摸清了藏东南地区气候和水文特征, 初步阐述了区域水文径流时空分异与补给来源^[1,2,13-16]。藏东南地区也是正在进行的第二次青藏高原综合科学考察研究(2017~2024年)和近年立项开展的“西南河流源区径流变化和适应性利用(2016~2023年)”国家自然科学基金重大研究计划关注的典型区域之一。

在区域气候和河流水文观测方面, 自20世纪50年代以来, 在藏东南地区的主要市县级行政区(如林芝、波密、察隅等)逐步建立了国家级气象站, 并在雅江干

流下游及重要支流建立若干水文站点(如雅江干流奴下站、易贡藏布贡德大桥站等),开展基本水文要素观测。近年,为配合雅下水电开发,新增雅江德兴大桥站及希让站、白马西路河出口站、易贡藏布茶场站等开展水文测验。中国科学院在藏东南设立高山环境和地质灾害综合观测等研究站点,开展区域大气物理及环境、冰川及湖泊动态、河流水文、冰雪崩、泥石流等系统监测。此外,近年利用国家自然科学基金、第二次青藏高原综合科学考察等科研项目的支持,由科研团队自发组织的观测研究也逐渐开展,如涵盖藏东南地区的雅江流域多圈层水文过程定位观测网络^[17]等。

近50年来,几代科学工作者基于区域野外科学考察和定位观测,借助遥感、地理信息系统、沉积物测年、树轮、水文模型等技术手段,围绕藏东南河流水文过程开展了大量研究探索,在一定程度上明晰了藏东南水文总体特征、影响因素和变化趋势。

由于藏东南地区在地质、地壳运动、地形地貌、气候等方面的独特性,其河流水文过程不仅受气候变化影响,还与区域下垫面动态及偶发自然地质灾害事件等相关。因而,区域河流水文研究主要涵盖两个层面的内容:在成因溯源及驱动机制方面,分析气候变化(气温/降水变化和极端气象事件)及其影响(区域植被变化、冰川/积雪/冻土/冰湖动态;冰/雪崩、滑坡、泥石流、堰塞湖溃决等自然地质灾害事件);在河川径流及泥沙情势方面,分析其总体特征、补给来源和演变趋势等,其总体逻辑关系如图2所示。

2 气候变化及其影响

2.1 气候变化

专门针对藏东南地区气候变化的研究较少,多数研究将其作为青藏高原或雅江流域的子区域开展分析。青藏高原是对全球气候变化响应最敏感的地区之一^[18]。全球气候变化大背景下,青藏高原气温整体呈上升趋势,藏东南地区也不例外^[19,20](图3)。然而,与西藏其他地区相比,藏东南地区气温上升趋势相对较为平缓^[21,22],区域等温线沿雅江大峡谷及其支流呈树枝状分布^[23]。从日极端气温变化看,近50年(1965~2014年)区域日最高和日最低气温也呈明显增加的趋势,且20世纪90年代以来的增温变暖速率相对于20世纪90年代以前在加快^[24]。

藏东南地区是青藏高原的降水高值中心。雅江大

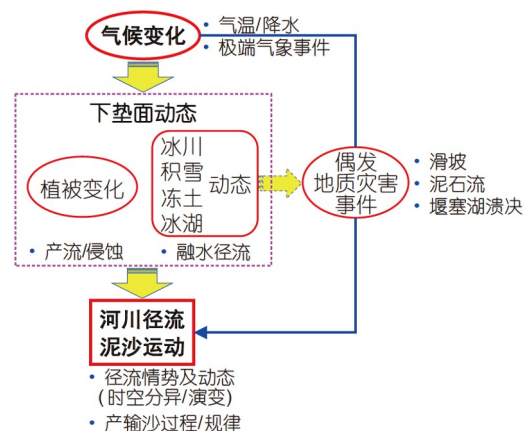


图2 (网络版彩色)藏东南河流水文过程的主要影响因素和逻辑关系
Figure 2 (Color online) Major factors influencing hydrological processes in Southeast Xizang and its logic connection

峡谷等水汽通道的存在和孟加拉湾季风水汽输送显著影响区域降水的时空分布格局和变化^[25,26]。藏东南地区降水的空间分异显著,年降水总体上沿河谷走向自下游向上游递减(雅江下游巴昔卡年均降水>3000 mm,墨脱2000~3000 mm,波密~800 mm,林芝~700 mm)。同时,区域降水的海拔梯度效应受地形和水汽来源的影响颇为复杂^[27,28],大部分地区降水随海拔升高而下降。但海拔4000 m以上地区降水量高于海拔3000~4000 m地区,从非冰川区过渡到冰川区,年降水量随海拔上升而递增^[29]。

在降水的季节分配上,藏东南地区湿季(5~9月)降水占全年降水的70%左右^[28,30],然而,近60年(1960~2019年)观测数据显示夏季降水有减少的趋势^[31,32]。藏东南(及周边地区)降水年际变化研究的主要成果如表S1所示。基于地面站点观测数据或由站点数据插值生成的地面气象要素驱动数据集(China Meteorological Forcing Dataset, CMFD)的多数研究显示,藏东南地区年降水量强烈变化,存在增加/减小转换和波动的小周期^[32~35],尽管总体上呈弱上升趋势,但并不显著^[36](图3),且降水年际变化存在明显的空间差异^[30]。基于遥感和气候再分析降水产品数据的部分研究认为,区域降水总体上呈减少趋势^[37,38]。因而,藏东南地区降水年际变化的趋势分析结果并不一致,不同结果应综合考虑研究所采用的具体数据源(时空分辨率)、系列长度(起止年份)、定量指标和分析方法。

已有观测数据显示,1965年以来,藏东南的极端气象事件(极端气温、极端降雨)发生频率呈上升趋势,特别是20世纪90年代以来,气温变暖趋势和极端降雨多

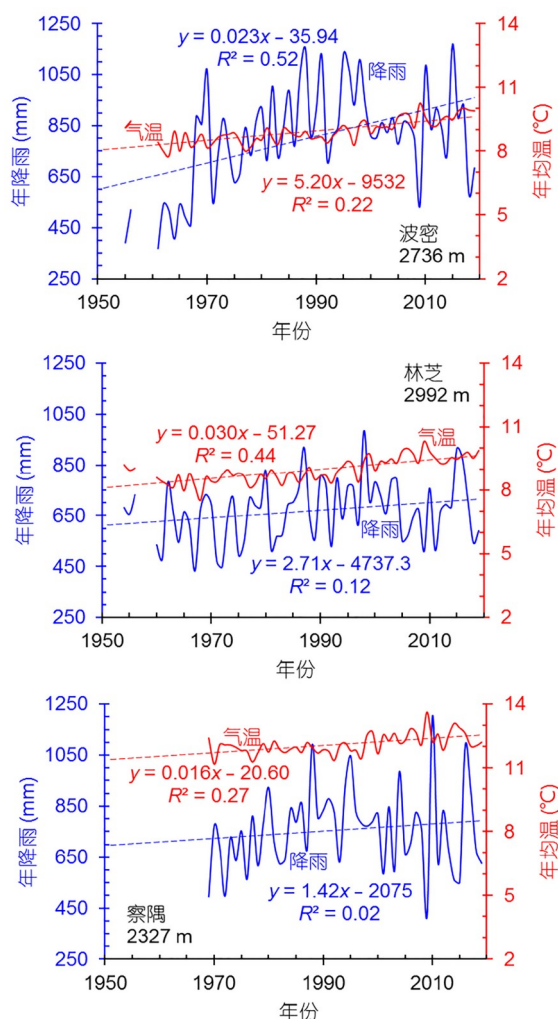


图3 (网络版彩色)近60年藏东南典型气象站点年降雨/年均温变化
Figure 3 (Color online) Variations of annual precipitation/mean annual air temperature in last 6 decades at typical meteorological stations in Southeast Xizang

发趋势更为明显^[24,34]。从反映极端降水事件的相关指标(如年最大1 d降水量、年最大3 h降水量、极端降水量等)来看,藏东南地区(尤其墨脱下游)多为雅江流域甚至青藏高原极端降水的高值区^[30,39]。然而,区域内极端降水指标变化的一致性差(有增有减),且空间分异显著^[20,30,33~36,39]。

通过冰芯、树轮和同位素分析,反演重建了藏东南地区500年~1万年的气候变化特征。基于冰芯^[40]和树轮^[41,42]资料重建的过去500~800年青藏高原帕默尔干旱强度指数(palmer drought severity indices, PDSI)变化显示,相对于观测数据反映的气候特征和变化,历史上藏东南地区在干旱/湿润幅度及持续时间、极端事件频率等方面的变化幅度更大,存在多个干湿交替的波动

周期,且总体上以较现状(近60年测验期)更湿润的气候特征占主导^[42~44]。 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素反演的万年尺度数据系列则显示,末次冰盛期以来存在持续时间更长的降水增加(1.5~1万年前)和减小(1万年前到现在)大周期^[45]。

青藏高原东南部地区未来气候变化的研究多基于全球气候模式(Global Climate Model, GCM)比较计划(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)第五阶段(CMIP5)、第六阶段(CMIP6)不同气候模式和排放情景^[46]开展预估;或基于全球气候模式降尺度生成更高空间分辨率的区域气候模式(Regional Climate Model, RCM)进行分析^[47,48]。总体上,预估研究认为,未来近期(至21世纪中叶)和远期(21世纪下半叶)区域升温趋势将会延续,降水也呈增加趋势^[48,49]且年内分配可能会趋于均匀^[50,51]。部分研究还显示,区域未来降雨变化可能呈现与地形海拔相关的空间差异。例如,考虑未来冰川退化情景,印度洋水汽将易于爬升至更高海拔,导致区域高海拔地区降水增加,而低海拔地区降水则可能相应减少^[52],且未来极端降水频率和强度随海拔高度增加而上升^[53]。

然而,相关研究认为,CMIP5模式对青藏高原降水的模拟能力有限^[54,55],CMIP6模式尽管对高原降水的模拟效果优于CMIP5模式^[50],但仍与观测资料存在偏差,难以准确反映降水与地形海拔之间的关系^[56,57]。较GCM模式,分辨率更高的RCM气候模式对地形复杂的青藏高原地区更具优势,但目前阶段也还存在“冷偏/湿偏”问题,难以再现基于观测数据的气温/降水趋势空间模态,且各模式结果之间差异显著,反映青藏高原气候模拟有很强的模式依赖性^[47,58,59]。

2.2 下垫面变化

植被变化和冰川/积雪/冻土/湖泊动态是藏东南地区下垫面变化的两个重要方面,前者反映地表陆生生态系统的演变,后者反映在气候变化背景下固体水源及其消融引起的高山湖泊水量变化。

在植被变化方面,基于美国航天局开发的GIMMS NDVI第三代数据集(1982~2014年,时间分辨率15 d,空间分辨率8 km×8 km)得到的归一化植被参数(normalized difference vegetation index, NDVI)分析结果显示,藏东南地区NDVI呈显著下降的趋势,反映区域植被存在退化现象^[60,61]。这一方面固然是气候变化影响的结果;另一方面,可能与本区域日益增强的人类活动(开山修路、毁林开荒)也有一定关系。

冰川变化动态(累积前进/消融退缩)影响融水径流、冰湖数量及面积变化,并进一步影响区域水循环和河川径流^[18,62]。全球变化背景下,青藏高原及周边地区冰川整体上处于快速消融状态,而藏东南地区尤为显著,其冰量亏损及面积萎缩幅度最大^[63],近期的冰川平均物质亏损速率大于每年0.6 m水当量^[64],且末端发育冰湖的冰川较末端未发育冰湖的冰川物质亏损速率更高(高~45%)^[65]。1995~2015年间,藏东南冰川面积从9517.5 km²减小到6675.4 km²,且呈加速退缩趋势^[66]。南迦巴瓦峰地区1980和2015年冰川编目对比显示,冰川面积共减少75.2±4.7 km²,占1980年冰川总面积的25.2%±1.6%,且冰川面积缩减速度也在加快^[67]。帕隆藏布^[68,69]和易贡藏布^[70]流域的冰川动态也呈现相似退缩趋势。有关藏东南地区冰川强烈退化的原因,除升温因素外,相关研究还认为,区域季风季节降水量减少和降水形态变化(从降雪向降雨转变)也发挥重要的促进作用^[71],而南亚黑碳排放被认为是青藏高原东南部季风降水减少的重要原因^[72]。

在区域积雪变化方面,基于近30(1981~2010年)和45年(1971~2016年)地面站点观测的积雪日数据资料显示,藏东南林芝、波密年积雪日数呈减少趋势^[73],且在1998年出现突变,减少速率加快^[74]。近40年(1980~2019年)被动微波遥感逐日积雪深度数据也显示,藏东南地区积雪深度波动下降^[35,75],年平均雪深变化率大致在-0.1~0 cm/a^[76]。然而,基于微波遥感和MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)雪产品数据的其他研究发现,藏东南存在冰雪冻融时间延长^[77]、高海拔区域年积雪日增加^[78,79]、积雪面积扩大^[80]的趋势。这说明,尽管积雪变化主要受控于气候条件(气温相对于降水对积雪变化的影响更大^[81,82]),但其变化特征的分析结果与采用的数据源有关,且过程和模式会随海拔、地形等其他因素的不同而存在复杂响应。相关研究显示,藏东南地区高海拔与低海拔区域的积雪融雪主控因子存在差异,前者以降水驱动的积雪模式主导,而后者以温度驱动为主^[78]。这可能是在升温 and 降水增加的总体背景下,藏东南高海拔区域积雪日仍有所延长,积雪面积明显增加的重要原因。从另外一个角度看,由于积雪地面观测站点多位于区域海拔相对较低的位置(如藏东南林芝站和波密站海拔均低于3000 m),其海拔范围在区域的代表性不强(藏东南海拔<3000 m的区域面积在地区总面积的占比仅为~30%,而>4000和>5000 m的高海拔区域面积占比分别为~50%和

~12%),因而基于地面站点实测积雪数据的分析结果能否可靠反映藏东南地区(尤其高海拔区域)的真实积雪动态,可能需要重新审视。

受纬度、气候、海拔等因素的共同影响,藏东南地区是西藏冻土发生概率最低的区域,大部分区域概率<0.1^[83],但高海拔区域发育季节性冻土(seasonally frozen ground, SFG),部分更高海拔区域发育多年冻土(permafrost)。季节性冻土的冻融(freeze-thaw)作用及其变化是气候变化的重要表征。反映冻土动态特征的两个重要因子——年均土壤温度(mean annual ground temperature, MAGT)和土壤活跃层厚度(active layer thickness, ALT)的分析显示,藏东南地区土壤活跃层厚度是整个高原最大的区域之一,冻土多处在不稳定或极不稳定状态^[84]。然而,也有研究显示,近60年来,尽管青藏高原大部分地区土壤增暖、增湿,季节冻土冻结深度和冻融期显著减小,但藏东南部分地区(如林芝)土壤有变干趋势^[85,86],导致该区域季节性冻土冻结深度和冻融期时长略有增加(年内土壤封冻时间有所提前,而消融时间有所推后)^[86]。

近30年来,藏东南地区湖泊面积和数量总体呈增加趋势。区域湖泊面积(数量)由1995年的452.98 km²(4376个)增加到2015年的480.12 km²(4921个),面积(数量)增加6.0%(12.5%)^[66]。其中,区域冰湖面积和数量也显著增加^[24],且冰湖在2005~2015年的扩张速率较1995~2005年明显加快^[66]。由于藏东南地区近年显著的冰川消融退缩和冰湖扩张,冰崩和冰湖溃决风险上升,并可能进一步引发滑坡、泥石流、山洪等链生自然灾害过程。

气候变化(升温、降水增加/减小等)及其引起的流域下垫面变化(植被演替、冰川/积雪/冻土消融退化等)影响流域产-汇流及水循环过程^[87~90]。冰川/积雪状态变化通过反照率对气候有反馈作用,并影响土壤表层能量吸收,冰川/积雪融水增加河道径流,改变降水-径流关系^[78,89]。升温影响冻土热力状态,造成冻土活动层厚度增加,影响局地水文过程^[85],使径流增加,其对湖泊扩张的贡献或可达10%以上^[91];多年冻土退化导致流域储水容量增加,减少蓄满产流^[92],改变地下水运移、储存和循环动态^[88,93]。然而,这种影响的主控因素存在区域差异,不同于雅江上中游地区河川径流的增加主要受控于冰川/积雪/冻土消融退化,雅江下游藏东南地区的径流变化则主要受控于降水变化,冰川/积雪消融和冻土退化的贡献居于次要地位^[31,89]。

2.3 偶发地质灾害事件

藏东南地区地壳运动、构造隆升与地震活动强烈,山高谷深坡陡,地形地貌空间分异显著,自然环境本底脆弱、复杂、多变,地质灾害易发^[94]。气候变化引起的升温、降雨变化(如强降雨事件增多)、冰川退缩、冰湖扩张等变化导致区域成灾风险上升^[95],冰崩、滑坡、泥石流等地质灾害事件频发,强烈影响区域河川径流、泥沙和地貌过程^[96~98]。由于河谷深切,藏东南地区大规模地质灾害事件常伴随“堵江-壅水-溃决”链生过程,如第四纪期间雅江大峡谷入口段多次冰川跃动^[99]、2000年易贡滑坡泥石流^[96]和2018年雅江大峡谷色东普沟冰崩碎屑流^[100,101]均发生堵江,且蓄积巨量水体,后堰塞体溃决形成极端洪水和高强度输沙过程,显著影响河流水沙动态(表1)。

3 水文情势

3.1 径流特征及变化

藏东南地区河川径流研究主要涵盖三方面,即现

状径流特征及动态、历史径流反演和未来径流预估。

3.1.1 现状径流特征及动态

藏东南地区现状径流特征及动态基于区域气象、水文观测数据开展分析,涵盖径流补给来源(融水、降雨、地下水等)和相对贡献、基本情势及变化等。采取的研究方法主要包括统计分析和水文模型两大类^[60,87,110~113]。

藏东南地区的径流补给总体上以降雨为主,但在帕隆藏布、易贡藏布、尼洋曲等支流,融水补给占较高比例,地下水补给与降雨补给大致接近^[1]。易贡藏布(1968年)和尼洋曲(1988年)数据显示,融水补给在总径流补给中的占比约为50%,地下水补给占比约为22%~23%^[5]。最近,基于分布式水文模型的研究认为,帕隆藏布、易贡藏布等冰川密集发育流域的融水补给在河川总径流补给中的比重或可达~70%(其中,冰川融水~45%,积雪融水~25%)或更高,其次为地下水补给(占比~20%)^[114,115]。在雅江干流下游径流来源构成的解析上,第一次青藏高原科考(1973~1992年)的调查分析认为,雅江径流组成在尼洋曲入汇后发生变化,奴下河段

表 1 20世纪50年代以来藏东南地区典型地质灾害事件及其成因

Table 1 Typical geological hazards and their causes in Southeast Xizang since 1950s

流域	发生时间(年/月/日)	规模(10 ⁶ m ³)	成因/机制	文献来源
则隆弄沟	1950/8/15	~11	地震引起冰崩/冰川跃动 升温/降雨引起冰崩/岩崩/滑坡-碎屑流-泥石流	[102,103]
	1968/9/2			
	1984/4/13			
	2020年夏季			
古乡沟	1953/9	~11	地震造成岩崩/冰崩/冰碛物滑坡, 堵塞山谷上游; 1953年强降雨和气温上升导致坝体失稳溃决	[104]
	1953年以来, ~1000场事件	0.01~10	强降雨和(或)升温	
米堆冰湖	1988/7/14	5.4; 1270 ^{a)}	高温引起终碛堤冰体融化, 发生潜蚀、管涌, 冰湖溃决形成泥石流	[105]
排龙沟	1983/7/29	2950 ^{a)}	强降雨/快速冰雪融化/冰崩、雪崩等综合作用形成泥石流	[106]
	1984/8/23	5245 ^{a)}		
	1985/6/20	8195 ^{a)}		
	2015/8/17			
扎木弄沟	2000/4/29	200~300	温度变化和降雨引起滑坡	[96]
嘎隆拉	2002/5/23	1242 ^{a)}	冰崩导致冰碛湖溃决	[107]
	2002/6/29			
德嘎错	2002/9/18		冰崩和滑坡导致冰碛湖溃决	[107]
天摩沟	2007/9/4	~1.0	温度上升和降雨引起冰崩、岩崩并转化为泥石流	[108]
	2010/7/25	0.1~0.5	强降雨和温度上升; 雪崩/滑坡形成冰坝, 后破坏溃决形成泥石流	
	2010/9/3			
	2018/7/11			
色东普沟	2018/10/17	~15	2017年11月, 米林地震和温度上升引发冰崩-碎屑流	[109]
	2018/10/29	~7		

a) 洪峰流量(m^3/s)

融水补给量显著增加至径流量的38%，雨水补给约占32%，属混合补给类型；在帕隆藏布入汇后，融水补给量进一步增加至径流量的43%左右；但由于帕隆藏布入汇口至雅江下游巴昔卡出境断面之间区域降雨量大，且冰川和积雪面积小，因此雅江下游下部地区的年径流组成以雨水补给为主。然而，对于融水补给在河川总径流中的贡献，受采用的模型、数据源及参数取值影响，不同研究结果差异较大。例如，对于雅江奴下站融水补给在总径流中的贡献，近期研究结果为20.5%（其中，冰川融水9.9%，积雪融水10.6%）^[112]到34.6%（冰川融水11.6%，积雪融水23%）^[111]不等。此外，在藏东南区域尺度上，1981~1997和1998~2019年两个时期，融水径流深分别为389.7 mm（其中，冰川融水196.2 mm，积雪融水193.5 mm）和363.9 mm（冰川融水144.8 mm，积雪融水219.1 mm），说明雅江下游地区融水径流正由冰川融水向积雪融水转变，但径流补给仍以降雨为主^[31]。

受河流水文站点稀疏、实测资料系列较短等客观条件限制，藏东南地区河川径流动态的分析多针对雅江干流^[116,117]，且多限于奴下站，奴下站下游及主要支流径流动态的相关研究较少。尽管藏东南地区径流过程受气候（降水、气温）、下垫面（植被、冰川、积雪、冻土、冰湖等）和偶发地质灾害事件等多重因素的共同影响，但气候变化影响占主导^[31,89,118]。

与降水季节变化相似，区域径流年内多集中于夏季，季风季节（5~9月）径流约占到全年径流的80%^[31]，雅江干流奴下至墨脱河段径流量高值一般在8月中下旬至9月初^[5]，帕隆藏布、易贡藏布、尼洋曲等融水补给型河流以及墨脱下游降水补给型河流最大径流一般出现在7月。由于春季降雨量较大^[32]，察隅河下游径流量高值一般多出现在4月前后^[1]。

从河川径流的年际变化看，近60年（1960~2020年）雅江干流奴下站径流量（即雅江进入藏东南地区的径流量）总体呈微弱增加的趋势，但波动强烈（图4）。20世纪60年代初和90年代末~21世纪初为丰水期，20世纪70~80年代为枯水期，大致在1962和1998年出现转折^[119]。雅江奴下和巴昔卡断面近40年（1981~2019年）的径流分析显示，来自藏东南地区的径流量呈明显增加的趋势^[31]。

雅江出境断面巴昔卡站1949~1962和1976~1978年多年平均年径流量为~1851亿m³（年均流量为~5869.5 m³/s），约占布拉马普特拉河（Brahmaputra River，以下简称布河）年径流量的35%^[3,120]。这一时期

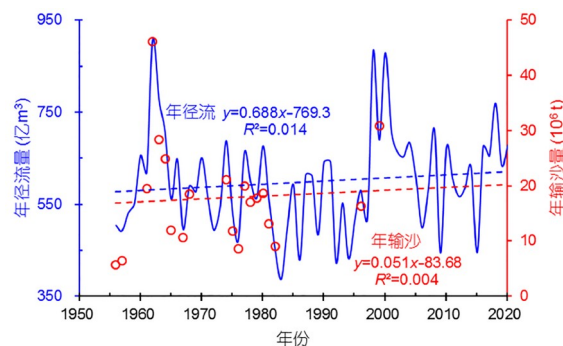


图4 (网络版彩色)雅江奴下站近60年实测径流和悬移质输沙量变化

Figure 4 (Color online) Variations of measured runoff and suspended sediment load at Nuxia Gauging Station in the last 6 decades

（1950~1970年），雅江干流奴下站实测多年平均年径流量为~600亿m³，而帕隆藏布多年平均年径流量为~300亿m³^[1]。这意味着，雅江出境断面巴昔卡年径流量的2/3由藏东南地区补给，而这其中帕隆藏布入汇口下游区域径流补给量约占雅江出境年径流量的一半。

3.1.2 历史径流反演

历史径流反演或基于区域河流沉积物测年，推算历史古洪水时间、过程及规模；或基于树木年轮数据和数学模型，结合目前藏东南地区约50~70年实测数据，回溯河川径流历史变化。

古洪水研究主要通过寻找历史洪水沉积物或其他遗迹，借助光释光、放射性碳等测年技术辨析洪水事件和发生时间，并通过数学模型重建和反演洪水过程^[121~125]。相关研究显示，雅江大峡谷入口处的则隆弄冰川第四纪堵江溃决洪水的洪峰流量可能高达 $1 \times 10^6 \sim 5 \times 10^6$ m³/s^[99,124,126]；2000年，易贡巨型滑坡堰塞湖溃决形成的洪峰流量估算高达12万m³/s^[96]，对峡谷地貌产生巨大影响，峡谷两岸边坡形成高达10 m的刮蚀带，洪水到达下游巴昔卡时，其洪峰流量仍高达4.4万m³/s^[127]。雅江墨脱下游河道（印度称Siang River）距今7和14.5 ka年前的两场极端古洪水事件，估计最小流量为 $0.5 \times 10^6 \sim 1.3 \times 10^6$ m³/s，其流量级别是出境断面巴昔卡1978~2014年实测最大汛期流量的50~130倍^[123]。藏东南地区洪水沉积物多来源于南迦巴瓦峰及周边区域^[125,128]，洪水侵蚀搬运能力巨大，可重塑溃决口下游河流地貌^[121]。

过去800年尺度（1200~2012年）的径流反演结果显示，雅江下游历史径流存在多个高值和低值波动周期，且其周期持续时间和径流波动幅度比现状（近60年测验期）可能更长、更大^[44]。在万年时间尺度上，基于 $\delta^{18}\text{O}$

同位素代用记录与区域气候数值物理模型, 模拟分析自末次冰盛期(Last Glacial Maximum, LGM)以来雅江下游的径流变化. 结果显示, 约1.5万年前, 雅江巴昔卡断面年径流量约为1450亿 m^3 , 之后显著增加, 并在全新世早期(距今约1万年)达到峰值(约2500亿 m^3), 随后又波动下降至1800亿 m^3 ^[45]. 雅江下游径流量的变化可能与区域气候变化(降水对径流的贡献差异、冰盖发育和消融等)有关.

3.1.3 未来径流预估

未来径流分析主要是基于未来气候情景(气候模式)驱动水文模型, 预估未来的径流动态. 如, 基于CMIP5中4个全球气候模式(GCM)的气候数据模拟研究认为, 由于未来区域降水增加并伴随升温, 雅江下游径流量呈上升趋势, 相对于1998~2007年, 2041~2050年雅江下游年径流将增加3%~8%(RCP4.5情景)或1%~13%(RCP8.5情景)^[87]. 利用CMIP5气候模式的统计降尺度数据驱动VIC-glacier模型的预估结果也显示^[129], 在RCP2.6和RCP4.5情景下, 雅江流域径流量呈增加趋势, 相对于1971~2010年, 21世纪末雅江年总径流量或将增加16%~31%. 由于同时受到西风和季风影响, 雅江流域约14.0%~35.0%的未来径流增加来自冰川融水径流^[87]. 远期(2041~2070年)雅江河川径流的14%~21%由冰川融雪补给贡献, 其中河川径流增加量约50%来自冰川融雪径流补给^[130]. 相关研究认为, 季风主导的雅江流域下游未来径流增加或将主要集中在降水较多的暖湿季节(5~10月)^[87,130]. 然而, 也有研究基于5个GCM模式和RCP2.6/RCP4.5情景, 认为雅江奴下站径流在2066~2099年可能会下降(概率>60%), 融雪、降雨和地下水径流补给量均会减少^[131].

总体上, 已有的径流预估研究使用的基准期、预估时段、气候情景、模型个数以及降尺度方法各不相同, 尽管雅江流域未来径流量呈上升趋势的结论占主导, 但结论差异明显^[87,129,130,132,133]. 应该指出, 由于现阶段不同气候模式(CMIP5或CMIP6)对高原降水和气温的模拟预估存在显著高(低)估^[56], 因而降雨、雪深^[134]以及冰川融雪径流模拟仍存在较大不确定性, 其预估的径流变化趋势很大程度上取决于所采用的气象输入(气候模式)和水文模型^[135].

3.2 侵蚀产沙及输沙特征

由于山高谷深坡陡, 藏东南地区峡谷河道占主导, 部分河段因滑坡泥石流等极端输沙过程堵江, 而在上

游淤积泥沙, 形成宽谷段, 并发育辫状冲积河道. 藏东南地区河流泥沙监测极为匮乏, 除雅江下游干流奴下站开展泥沙(仅限于悬沙)测验外, 奴下站至下游巴昔卡出境断面约500 km干流(和主要支流)河段缺乏泥沙观测, 使得藏东南河流泥沙运动和输沙特征分析缺乏实测数据支撑, 客观上限制了这一区域的河流泥沙研究.

基于奴下站1956~1995年悬沙含沙量数据, 估算年均输沙量为1490万 t ^[5]; 基于奴下站1960~2000年部分年份(共20年)实测悬沙数据, 得到年均输沙量为~1782万 t ; 另外, 2007~2009年3年年均悬沙量约为1043万 t ^[136]. 按上述3个不同数据来源平均考虑, 奴下站年输沙量大致在0.16亿 t 量级(年均含沙量为0.11~0.45 kg/m^3 , 均值为~0.28 kg/m^3). 基于雅江下游出境断面巴昔卡1971~1979年实测悬沙数据, 年输沙量为~2.1亿 t ^[137]. 文献[4]认为, 巴昔卡断面年输沙量约为2.33±0.92亿 t , 这两个数据均远高于文献[5]推算的巴昔卡年输沙量2400万 t 的量级. 这样来看, 即便保守估计, 由雅江奴下断面进入干流下游的悬沙量也不到雅江下游出境断面巴昔卡悬沙量的10%(~8%), 巴昔卡断面年悬沙量超过90%(即~1.9亿 t)来自藏东南地区(图5).

必须指出, 奴下和巴昔卡断面年输沙量数据仅包含悬沙, 并未包含推移质. 一条河流的推移质在总输沙量中所占的比重与河床比降和泥沙颗粒组成密切相关. 对坡度平缓的冲积河流(如长江和黄河中下游)而言, 悬移质输沙占主导, 推移质输沙比重很小(甚至<1%), 因而可以忽略. 但对坡度较大来沙强烈的山区河流而言, 推移质输沙在总输沙量中的比重显著上升, 甚至达到悬沙量的同等量级. 如长江流域上游云南小江流域吊嘎河的实测数据显示, 其推移质输沙量与悬移质输沙量比值(即推悬比)能达到1/6~1/2^[138], 在这种情况下, 推移质输沙不能被忽略.

就输沙推悬比而言, 雅江奴下站应该显著小于巴昔卡站. 奴下河段河床平均坡降为~0.2%, 泥沙级配构成粗沙和沙质细砾^[136], 为典型的冲积河段. 而雅江下游出境断面巴昔卡河段尽管已是雅江离开陡峻的大峡谷向下游冲积平原转换的节点, 但仍为砾卵石粗砂河床, 其坡降为~0.8%, 推悬比应该较大. 甚至有研究认为, 推移质输沙可能接近悬沙量级^[139]. 这样来看, 奴下站和巴昔卡站推移质输沙量的比值较两站悬沙量的比值(<10%)还要小. 如此, 由奴下断面进入雅江下游(藏东南地区)的年输沙量(悬沙+推移质泥沙)更小于巴

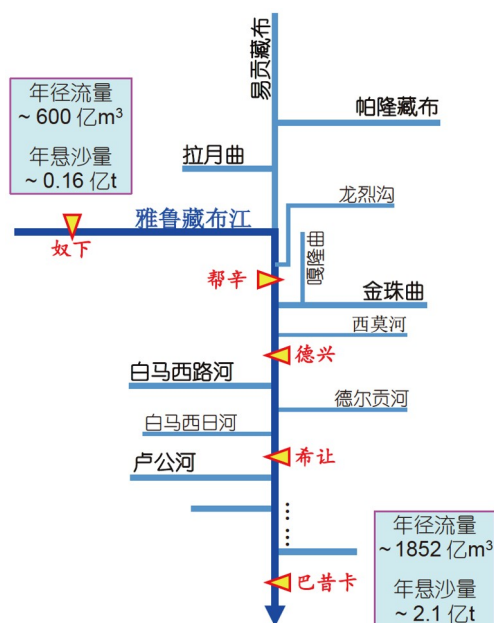


图5 (网络版彩色)藏东南雅江下游主要支流组成、多年平均年径流和输沙规模

Figure 5 (Color online) Composition of the major tributaries of the lower Yarlung Tsangpo and mean annual runoff & sediment load in Southeast Xizang

昔卡断面年输沙量的1/10。

上述估算得到其他研究结果的支撑。如,布河下游Bahadurabad水文站(孟加拉国)在20世纪60~90年代的年输沙量大致在5.4~11.6亿t^[140],其中~45%(即约2.4~5.2亿t)来自藏东南(雅江大拐弯)地区,自大峡谷上游青藏高原输送下来的泥沙量占比小于1%^[141]。地质、构造和沉积学等学科的研究也从侧面提供了藏东南地区产输沙动态的线索。相关研究认为,雅江侵蚀最强区域在喜马拉雅东构造节(即南迦巴瓦峰为核心的雅江大拐弯地区)附近,其侵蚀速率可达~14 mm/a^[142]。文献^[138]得到相似的结论,认为此区域剥蚀速率(exhumation rate)大致在7~21 mm/a,巴昔卡断面来沙的约50%由此区域产生。有研究甚至认为,雅江下游来沙的60%~70%由南迦巴瓦峰地区产生^[143]。这一区域高强度的侵蚀产沙,一方面固然与其地壳快速抬升有关,另一方面,也与区域极端溃决洪水事件密不可分,其极端洪水过程所形成的侵蚀产沙强度可能较一般径流过程高3个数量级^[123]。然而,稀遇冰湖/滑坡溃决洪水(glacial lake outburst floods/landslid lake outburst floods, GLOFs/LLOFs)未必都发生在喜马拉雅山东构造结(南迦巴瓦峰)地区,故而也有研究认为,这一区域未必一直

都是雅江下游最强的产沙区^[125,144]。区域地球化学方面的研究显示,喜马拉雅山地区河流的悬沙主要来自物理侵蚀,化学侵蚀居于次要地位(仅贡献悬沙含量约9%±2%)。东喜马拉雅山区(雅江大拐弯地区)的侵蚀速率(2.9 mm/a)较西喜马拉雅山区(恒河上游)的侵蚀速率(2.1 mm/a)更高,因为雅江(布河)的径流相对于恒河更高,季风强度发挥首要作用^[139]。一般认为,南迦巴瓦峰-加拉白垒峰(NB-GP)区域(图1)是雅江高侵蚀产沙区的核心,其面积约为3300±550 km²,不到雅江流域面积的1.5%。也有研究认为,这一高侵蚀产沙区范围可能不是不变的,而是向NB-GP区域西南方向(即雅江下游)和帕隆藏布上游延展,其面积可达4800±550 km²,约占雅江流域面积的2%^[143,145]。尽管如此,这一高侵蚀产沙区仍十分集中。

在区域未来产输沙动态方面,大多研究认为,与径流变化趋势类似,产输沙会呈上升趋势。如,基于一维HEC-RAS模型和未来气候情景,估算布河孟加拉国Bahadurabad站2075~2100年的年输沙量较1980~2010年的年输沙量可能上升40%,达到2.6~7.2亿吨^[146]。恒河-布河-麦格娜Meghna三角洲未来输沙量的模拟^[147]结果也显示出显著上升的趋势,到21世纪中叶,布河年输沙量将增加25%~28%,到21世纪90年代,年输沙量将增加52%~60%。基于HEC-HMS模型和RCP8.5气候情景开展水沙模拟分析,得到的未来变化趋势大体类似,以1983~2010年Bahadurabad站年输沙量为基准期(约3.7亿t),21世纪20年代(2010~2039年)、50年代(2040~2069年)和80年代(2070~2099年)年输沙量预计分别增加34%、67%和115%^[148]。然而,由于区域产输沙过程与气候/径流过程密切相关,其模拟预估精度和可靠性直接受制于采用的气候模式和水文模型,考虑到未来气候和径流预估研究自身存在的不确定性,应谨慎审视未来产输沙的不同研究结果。

4 挑战和展望

藏东南地区的河流水文研究关乎区域水能水资源合理开发利用、工程安全及自然灾害科学防控等国家需求,同时也是十分有吸引力的科学命题。应该指出,尽管近年藏东南地区河流水文特征和情势变化持续受到关注,但其主要认识仍多来源于第一次青藏高原综合科学考察研究(1973~1992年)的相关成果。彼时距今已30~50年,这期间高原的自然环境发生了巨大变化^[46],区域水循环过程呈加速趋势^[149],河流水文情势

不可避免地受到影响,开展变化环境下区域河流水文研究势在必行。然而,藏东南地区气象及水文监测仍十分薄弱,区域河川径流、泥沙数据极为匮乏且存在共享壁垒,难以支撑径流泥沙时空分异特征、产输机制、变化动态及归因分析等研究。因而,藏东南地区水沙研究的重要性和挑战性并存,从根本上看,区域(特别是雅江奴下站下游河段)河流水文研究应着力解决“基础本底不清、变化规律不明”的问题(图6),表现在:(1)区域径流产汇机制、变化动态(年内/年际)和不同来源(冰川、积雪、降雨)、不同支流相对贡献不清,时空分异规律不明;(2)泥沙产输机制和过程不清。区域(冰川/流水)侵蚀过程和(崩塌、滑坡、泥石流等)偶发地灾事件产沙规模、沙源特征(级配、岩性等)及相对贡献不清;雅江下游河段泥沙运动过程和河道冲淤演变机制不明;主导输沙过程和方式、泥沙推悬比及时空变化规律不明。

要回答这些问题,未来应在以下方面加强藏东南地区的河流水文研究。

(1) “天-空-地”融合的区域高时空分辨率气象和水文观测网络。

构建“天-空-地”融合的高时空分辨率气象和水文观测站点(网络),获取连续、可靠、准确的系列观测数据。这不但摸清区域气象和河流水文情势本底,明晰变化动态和规律的前提,也是率定和修正间接观测方法和产品(如多源降水产品、径流/泥沙数值模拟结果等)的基础。

藏东南地区气候和水文要素时空分异显著,崩塌、滑坡、泥石流等自然地质灾害易发、频发,且年内不同季节都有可能发生,而不仅限于汛期或汛后。如雅江墨脱县帮辛河段2021年3月23日(雅江年内径流最枯季节)曾发生历时不到4 h、水位高达6 m的快速涨落过程(图7),其原因可能是上游地质灾害事件堵江-溃决过程形成的洪水波(涌浪)。

因而,由于偶发自然地质灾害事件或日益增强的人类活动扰动(图8),雅江下游径流泥沙过程的不确定性和波动十分强烈,开展高时空分辨率监测以有效捕捉水文情势脉动十分必要。

一方面,充分利用卫星、雷达、无人机等遥感遥测和地声探测等技术手段;另一方面,加密区域气象和水文观测点,提升站点空间分布密度和数据采集频率,加强不同数据源耦合匹配和相互验证,尽可能系统、可靠地刻画区域气象水文要素的时空分异特征。地面监测站点的布设重点考虑两个空间维度:水系沿程维度和海拔维度。水系沿程维度:沿雅江干流(派镇-加拉-甘登-帮辛-墨脱-背崩-希让)及主要支流河谷(易贡藏布、帕隆藏布、白马西路河、金珠曲等),明晰水沙时空分异规律。海拔维度:选择藏东南地区不同区域(干流及支流)若干典型小流域(如喜马拉雅山南侧-嘎隆曲及北侧-嘎隆沟、多雄拉河),系统监测流域上-中-下游至出口的不同气象因子、水文要素及其环境梯度,涵盖冰川积雪动态、滑坡/泥石流/山洪等地貌动力过程,明晰气候变化背景下流域产流产沙机制和水沙动态。

(2) 面向藏东南地区的水文和(水下)三维地形监测方法、降水产品及河流动力地貌模型。

藏东南地区的河流水文研究应在监测方法、数据产品和数学模型方面不断探索和改进。

基于遥感的河流水位/水面宽监测及流量反演方法是近年新兴的交叉研究方向。随着光学和雷达卫星空间分辨率的不断提升(如新一代测高卫星SMOT发射应用)和流量反演模型算法的改进,遥感水文监测的适用河道将可以从以前的大河宽冲积河流(水面宽一般大于1000 m)拓展到河宽较窄的河道(河宽为百米量级),如最近针对百米级河宽山区河流的遥感流量反演取得了新进展^[150]。藏东南地区为典型的高山峡谷区,其河流宽度多小于100 m,因而,进一步研究面向高山峡谷区窄河道(河宽小于100 m)水位、水面宽信息提取及径

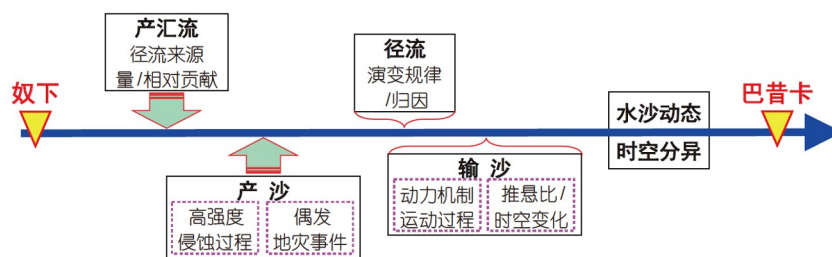


图6 (网络版彩色)藏东南地区河流水文研究应力图明晰的科学问题

Figure 6 (Color online) Scientific questions need to be investigated on river hydrology research in Southeast Xizang

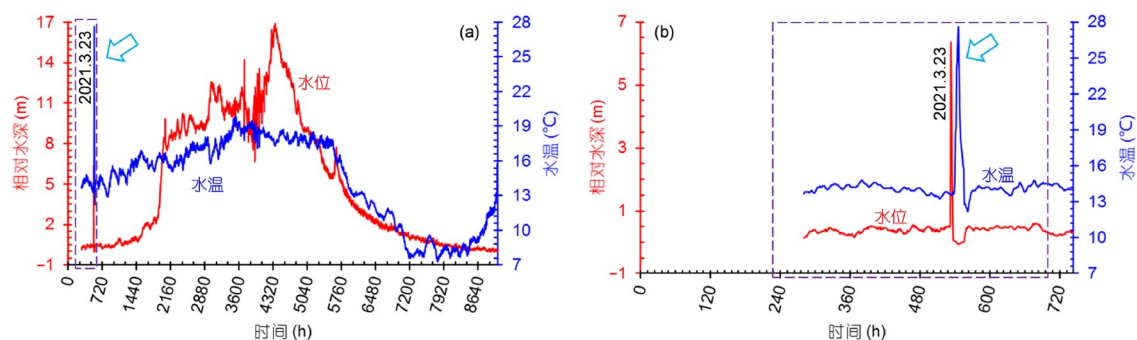


图 7 (网络版彩色)雅江大峡谷帮辛河段水位/水温变化及异动(2021年3月12日15:00:00~2022年3月12日12:00:00)。数据来自HOBO-U20L-02水位计监测结果,采集频率为1 h。(a) 帮辛河段2021年3月1日~2022年3月12日逐小时水位和水温变化,显示年内非汛期-汛期-非汛期的水位/水温波动过程,自2021年3月12日15:00:00开始采集数据,横轴主刻度为720 h(30 d)。(b) 2021年3月1~30日水位/水温变化,显示3月23日水位强烈波动的过程,横轴主刻度为120 h(5 d)。水位采用相对水深,即相对于水位计安装位置的水深,正值表示水位计没于水下,负值则表示水位计出露水面。需要指出,3月23日水位波动过程大致自凌晨3时开始(其时水位为-0.5 m),4时水位陡涨至6.2 m后开始回落,7时水位回落至1 m,13时水位接近于0 m(即接近水位计安装位置),14~22时雅江水位低于水位计安装位置,这一时段监测的温度是气温而非水温。由于雅江河谷气温变化大,水位计监测温度相应飙升/陡降

Figure 7 (Color online) Variation & sudden change of water level/temperature at Bangxin Reach, Yarlung Tsangpo Grand Canyon (2021.3.12 15:00:00–2022.3.12 12:00:00). This figure is based on data from the HOBO-U20L-02 water-level logger (collection frequency of 1 h). (a) The variations in water level and temperature at the Bangxin Reach of the Yarlung Tsangpo Grand Canyon from March 1, 2021 to March 12, 2022, covering the non-flood to flood and then non-flood seasons. Data collection began at 3:00 p.m. on March 12, 2021, and the horizontal main axis was set at 720 h (30 d). (b) The variations in water level and temperature of the same reach from March 1 to 30, 2021, exhibiting a strong fluctuation in water level on March 23, 2021. The main horizontal scale was set at 120 h(5 d). Both figures use the relative water depth (i.e., the difference of water level to the installation position of the logger in vertical direction), where a positive value indicates that the water level logger is underwater, and a negative value indicates that the logger is above water. It is worth noting that the water level fluctuation on March 23 started at approximately 3:00 a.m., when the water level was 0.5 m. At 4:00 a.m., the water level suddenly rose to 6.2 m. Subsequently, the water level decreased. By 7:00 a.m., the water level had decreased to 1 m, and by 1:00 p.m., it was close to 0 m, indicating that the water level was near the installation position of the logger. From 2:00 to 10:00 p.m., the water level was lower than the installation position of the logger, and the monitored temperature data were from the air instead of water. Owing to the large daily fluctuations in air temperature in the Grand Canyon, the observed temperature increased and decreased violently

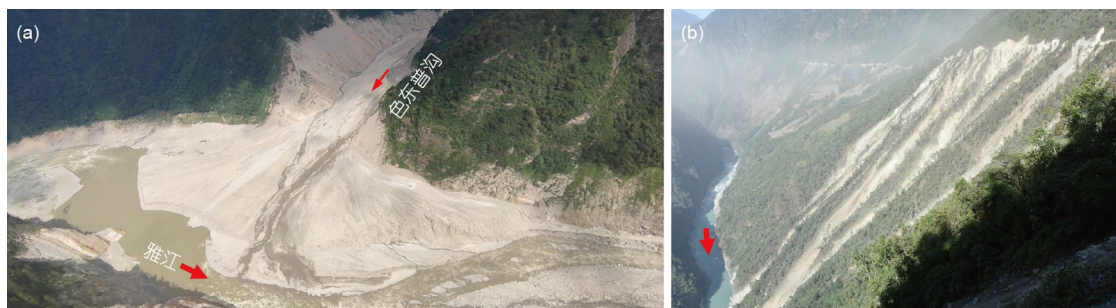


图 8 (网络版彩色)藏东南河流水沙过程受自然和人类活动引发的强输沙过程的强烈扰动。(a) 大峡谷色东普沟泥石流进入雅江; (b) 大峡谷帮辛-林多段山体开挖产生大量砂石成为雅江泥沙重要来源

Figure 8 (Color online) Flow/sediment dynamics in Southeast Xizang severely influenced by strong sediment transport caused by natural processes and human activities. (a) Debris flow from the Sedongpu Gully empties into the Grand Canyon; (b) mass material yielded due to mountain excavation is an important contribution of sediment input to the Yarlung Tsangpo (photo showing the Bangxin-Linduo Reach in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon)

流遥感反演方法,将显著提升这一区域河流水文数据的获取效率和精度。

河流泥沙(尤其推移质泥沙)测验关系到雅江下游输沙量的准确测算,并影响雅下水电开发工程安全和可持续运行,因此是研究的重点之一。雅江下游泥沙研究的关键应在于对偶发高强度输沙过程的高时空分辨

率追踪和输沙量的准确测算。目前,雅江下游干流奴下站有较长系列的悬沙测验,但无推移质测验,而整个藏东南地区雅江干流除新增的德兴和希让站外,几乎无其他水文测验站点,故而雅下河段泥沙(特别是推移质)测验工作亟待加强。

由于雅江下游河道坡度陡峻,水流流速和能量高,

泥沙颗粒粒径大,因而传统的接触式测验方法(如Pit trap、Helley-Smith等)难以胜任推移质测验。地声(地震动)、声学(如声学多普勒流速剖面仪)、运动图像识别、示踪粒子、无线电追踪等新兴非接触式测量技术和方法在推移质输沙监测方面具有很大的潜力。如基于地声信号的推移质运动监测方法近年发展迅速,在信号增益、(噪声)处理、解算模型等方面不断改进,能较为准确地测算输沙率。然而,这类监测方法的本质是监测推移质颗粒碰撞产生的声学(或振动)信号,对颗粒运动或中低强度群体运动有较好的识别能力,但高强度泥沙运动可能会导致信号饱和^[151],甚至运动形式由以颗粒碰撞占主导转为接触摩擦占主导,其识别和估算结果将产生显著误差。而对雅江下游而言,偶发事件产生的高强度(甚至超高强度)低频输沙过程是输沙的关键,对偶发低频产输沙过程(图8(a))的识别、追踪和输沙率准确估算才是重点。更为重要且无法回避的是,上述非接触式监测方法需要其他测量方法(特别是实测输沙)获得的可靠输沙率结果进行标定。缺乏标定这一基础环节,非接触式测验方法将无从率定和进行模型优化。故而,探索适合雅江下游的河道泥沙(特别是推移质输沙)测验理论和方法,将显著推动非接触式泥沙测验方法和仪器设备在这一区域的应用,并促进藏东南地区河流泥沙产输机制和动力过程的研究。

开展区域干支流河谷及河道高精度三维地形精细测量,改进基于声学和水下三维地形测量技术,实现区域地形地貌本底的快速获取和变化快速测算,以高效准确估算偶发地灾事件规模(方量),更清晰可靠地追踪沙源和来量。

卫星遥感降水产品(如TRMM、GPM、PERSIANN、IMERG等)、大气再分析数据(如GLDAS、ERA5、JRA55等)、区域气候模式输出数据HAR、全球网格降雨数据集CHIRPS等多源降水产品有助于分析区域降水的时空分异和动态。然而,对于藏东南这种地形复杂且空间分异非常显著的区域,这些降水产品通常空间精度不高,对极端降水事件的捕捉也不尽如人意^[152]。应通过地面站点观测数据和地形修正改进区域尺度栅格数据,形成适合藏东南地区的高精度降水产品。此外,改进河流动力地貌理论模型和数值方法,提高对藏东南地区偶发极端事件次生水文过程(如溃决洪水演进)、强输沙及河谷地貌变化(河床侵蚀/堆积、岸坡失稳等)的快速、精确模拟能力。

(3) 加强不同学科交叉融合,促进区域河流水文过

程和地貌演变机制研究。

以水文/河流动力学等学科为基础的研究方法和体系适宜开展区域产流产沙和水沙动力过程的分析 and 模拟;地质学、沉积学理论及其技术手段在藏东南地区历史气候/径流变化、河谷(河流)地貌演变和宏观长尺度产输沙研究方面发挥重要作用,对区域现代径流和泥沙研究思路与结论有宝贵的参考价值;而在区域水汽来源和形成/输送机制、大尺度大气环流(北半球副热带高压和北半球极涡)对区域降水的影响及作用机理、区域未来气候变化及水文响应等研究方面,则需要大气物理科学、地球系统科学(气候系统模式、全球系统模式)等学科理论和方法的支撑。进一步加强水文学、河流动力学等与地质学、沉积学、地理学(地貌学)、生态学、大气物理及地球系统科学等其他学科的交叉融合,促进不同时空尺度信息(数据)源和成果的衔接、互补与验证,将有助于拓展藏东南地区河流水文研究的深度和广度。

5 结语

藏东南地区是青藏高原气候变化最为敏感的地区之一,其河流水文过程不但受区域气候变化的影响,还与植被、冰川、积雪、冻土、冰湖等下垫面动态和偶发地质灾害事件等密切相关。近70年来,藏东南地区气温显著上升,降水年际变化趋势虽无统一结论,但基于站点观测数据的分析表明,降水呈弱增加趋势。藏东南地区冰川呈加速退缩趋势且退缩幅度远大于青藏高原其他区域,区域内冰湖面积与数量均有所增加,冰湖溃决风险上升。藏东南地区是青藏高原的产流和产输沙高值区,其中雅江下游巴昔卡断面径流量约为 $2/3$ (~ 1250 亿 m^3),输沙量超过90%(悬沙 ~ 1.9 亿t)来源于这一地区(特别是以南迦巴瓦峰-加勒白垒峰为核心的雅江大拐弯地区),因而这一区域的径流泥沙动态相当程度上决定了雅江下游的水沙情势。藏东南地区径流补给总体上以降水为主,但融水补给在帕隆藏布、易贡藏布等冰川密集发育流域的比重高(或可达 $\sim 70\%$)。近60年来,藏东南地区径流量呈增加趋势,但波动显著。未来气候变化情景下,预估本区域径流量呈增加趋势,输沙量与径流量的趋势基本相似,但相关结果存在较大的不确定性。

藏东南地区气象及水文监测仍十分薄弱,区域河川径流和泥沙数据极为匮乏,制约了径流泥沙时空分异、产输机制、变化动态及归因分析研究,难以满足

区域水能水资源合理开发利用、水沙灾害防控及工程安全/可持续运行的需求. 未来应进一步加强区域高时空分辨率气象和水文观测, 促进遥感技术在区域精细地形地貌和水文要素测量/径流反演上的应用, 改进和

形成适宜藏东南地区的多源降水产品, 推动偶发极端事件影响下的径流输沙过程研究, 为明晰全球气候变化大背景下区域河流水文情势变化和未来趋势, 提供方法、数据和科学理论支撑.

参考文献

- 1 Tibetan Plateau Scientific Expedition Team of the Chinese Academy of Sciences. Rivers and Lakes in Xizang (in Chinese). Beijing: Science Press, 1984. 5–114 [中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏河流与湖泊. 北京: 科学出版社, 1984. 5–114]
- 2 Tibetan Plateau Scientific Expedition Team of the Chinese Academy of Sciences. Physical Geography and Natural Resources in the Mount Namcha Barwa Region (in Chinese). Beijing: Science Press, 1996. 154–186 [中国科学院青藏高原综合科学考察队. 南迦巴瓦峰地区自然地理与自然资源. 北京: 科学出版社, 1996. 154–186]
- 3 Sarma J N. Fluvial process and morphology of the Brahmaputra River in Assam, India. *Geomorphology*, 2005, 70: 226–256
- 4 Stewart R J, Hallet B, Zeitler P K, et al. Brahmaputra sediment flux dominated by highly localized rapid erosion from the easternmost Himalaya. *Geology*, 2008, 36: 711–714
- 5 Liu T C. Hydrological Characteristics of Yalung Zangbo River (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 1999, 54(Suppl): 157–164 [刘天仇. 雅鲁藏布江水文特征. 地理学报, 1999, 54(增刊): 157–164]
- 6 Xu D M, Chen C Y, Liang W Y. Hydropower development at the Yalu Tsangpo River (in Chinese). *Strateg Study CAE*, 2002, 4: 47–52 [徐大懋, 陈传友, 梁维燕. 雅鲁藏布江水能开发. 中国工程科学, 2002, 4: 47–52]
- 7 Wang F, Zhang Z, Li C, et al. Add Himalaya's Grand Canyon to China's first national parks. *Nature*, 2021, 592: 353
- 8 Ward F K. Explorations in south-eastern Tibet. *Geogr J*, 1926, 67: 97–119
- 9 Ward F K. The Riddle of the Tsangpo Gorges. London: Edward Arnold & Co., 1926
- 10 Bailey F M. No Passport to Tibet. 2nd ed. London: Hart-Davis, 1957. 294
- 11 Chen F H, Wang Y J, Ding L, et al. The expedition and scientific investigation activities on the Tibetan Plateau before 1949 (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2022, 77: 1565–1585 [陈发虎, 王亚军, 丁林, 等. 1949年以前青藏高原探险和科学考察活动概况. 地理学报, 2022, 77: 1565–1585]
- 12 Yao T D, Wang W C, An B S, et al. The scientific expedition and research activities on the Tibetan Plateau in 1949–2017 (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2022, 77: 1586–1602 [姚檀栋, 王伟财, 安宝晟, 等. 1949–2017年青藏高原科学考察研究历程. 地理学报, 2022, 77: 1586–1602]
- 13 Guan Z H, Chen C Y. River water resources in Tibet (in Chinese). *Resour Sci*, 1980, (2): 25–35 [关志华, 陈传友. 西藏河流水资源. 自然资源, 1980, (2): 25–35]
- 14 Xiong Y, Li X Y, Zhang J Z. Hydrological features of the Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *J Chin Hydrol*, 1982, (3): 48–55, 10 [熊怡, 李秀云, 张家桢. 青藏高原的水文特性. 水文, 1982, (3): 48–55, 10]
- 15 Liu D S. Achievements in scientific expedition in the Mt. Namjagbarwa region (in Chinese). *Mt Res*, 1985, 3: 193–195 [刘东生. 南迦巴瓦峰地区科学考察成果. 山地研究, 1985, 3: 193–195]
- 16 Tibetan Plateau Scientific Expedition Team of the Chinese Academy of Sciences. Glaciers in Xizang (in Chinese). Beijing: Science Press, 1986 [中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏冰川. 北京: 科学出版社, 1986]
- 17 Wang L, Cuo L, Luo D, et al. Observing multisphere hydrological changes in the largest river basin of the Tibetan Plateau. *Bull Am Meteorol Soc*, 2022, 103: E1595–E1620
- 18 Yao T D, Qin D H, Shen Y P, et al. Cryospheric changes and their impacts on regional water cycle and ecological conditions in the Qinghai-Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin J Nat*, 2013, 35: 179–186 [姚檀栋, 秦大河, 沈永平, 等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响. 自然杂志, 2013, 35: 179–186]
- 19 Feng S, Yao T D, Jiang H, et al. Temperature variations over Qinghai-Xizang Plateau in the past 600 years (in Chinese). *Plat Meteorol*, 2001, 20: 105–108 [冯松, 姚檀栋, 江灏, 等. 青藏高原近600年的温度变化. 高原气象, 2001, 20: 105–108]
- 20 You Q, Kang S, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in the eastern and central Tibetan Plateau during 1961–2005. *J Geophys Res*, 2008, 113: D07101
- 21 Du J. Change of temperature in Tibetan Plateau from 1961 to 2000 (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2001, 56: 682–690 [杜军. 西藏高原近40年的气温变化. 地理学报, 2001, 56: 682–690]
- 22 Ding J, Cuo L, Zhang Y, et al. Monthly and annual temperature extremes and their changes on the Tibetan Plateau and its surroundings during 1963–2015. *Sci Rep*, 2018, 8: 11860
- 23 Lin Z Y, Wu X D. A preliminary analysis of the climate in the MT. Namjagbarwa region (in Chinese). *Mt Res*, 1985, 3: 250–257 [林振耀, 吴祥定. 南迦巴瓦峰地区气候基本特征. 山地研究, 1985, 3: 250–257]

- 24 Jia Y. The impact mechanism of climate warming on mountain hazards in the southeast of Xizang (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2018 [贾洋. 气候变暖对藏东南山地灾害的影响机制. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2018]
- 25 Yang Y C, Gao D Y, Li B S. A preliminary study on the water vapor channel in the lower valley of the Yalung Zangbo River (in Chinese). *Sci China Ser B*, 1987, 8: 893–902 [杨逸畴, 高登义, 李渤生. 雅鲁藏布江下游河谷水汽通道初探. *中国科学B辑*, 1987, 8: 893–902]
- 26 Yuan X, Yang K, Lu H, et al. Impacts of moisture transport through and over the Yarlung Tsangpo Grand Canyon on precipitation in the eastern Tibetan Plateau. *Atmos Res*, 2023, 282: 106533
- 27 Lu C X, Wang L, Xie G D, et al. Altitude effect of precipitation and spatial distribution of Qinghai-Tibetan Plateau (in Chinese). *Mt Res*, 2007, 25: 655–663 [鲁春霞, 王菱, 谢高地, 等. 青藏高原降水的梯度效应及其空间分布模拟. *山地学报*, 2007, 25: 655–663]
- 28 Cuo L, Zhang Y. Spatial patterns of wet season precipitation vertical gradients on the Tibetan Plateau and the surroundings. *Sci Rep*, 2017, 7: 5057
- 29 Chen B X, Wang J S, Ran C Y, et al. Characteristics of climate change in forestry region in Southeast Tibet during 1954–2009 (in Chinese). *Adv Clim Change Res*, 2012, 8: 43–47 [陈宝雄, 王景升, 冉琮千, 等. 1954—2009年藏东南林区的气候变化特征. *气候变化研究进展*, 2012, 8: 43–47]
- 30 Zhang Y H, Liu C M, Liang K, et al. Spatio-temporal variation of precipitation in the Yarlung Zangbo River Basin (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2022, 77: 603–618 [张仪辉, 刘昌明, 梁康, 等. 雅鲁藏布江流域降水时空变化特征. *地理学报*, 2022, 77: 603–618]
- 31 Wang Y W, Wang L, Zhou J, et al. Vanishing glaciers at Southeast Tibetan Plateau have not offset the declining runoff at Yarlung Zangbo. *Geophys Res Lett*, 2021, 48: e2021GL094651
- 32 Dong Q X, Luo S Q, Wen X H, et al. Changes of precipitation and its effects on soil temperature and freeze-thaw process in southeastern Xizang in recent 60 years (in Chinese). *Plat Meteorol*, 2022, 41: 404–419 [董晴雪, 罗斯琼, 文小航, 等. 近60年来藏东南降水变化及其对土壤温度与冻融过程的影响. *高原气象*, 2022, 41: 404–419]
- 33 Deng M F, Chen N S, Wang T, et al. Fluctuation of daily rainfall extreme in southeastern Tibet (in Chinese). *J Nat Disasters*, 2017, 26: 152–159 [邓明枫, 陈宁生, 王涛, 等. 藏东南地区日降雨极值的波动变化. *自然灾害学报*, 2017, 26: 152–159]
- 34 Bai Y X, Du J, Wang T, et al. Spatio-temporal change of extreme precipitation index of southeastern Tibet from 1971 to 2020 (in Chinese). *Plat Mt Meteorol Res*, 2022, 42: 31–40 [白宇轩, 杜军, 王挺, 等. 1971~2020年藏东南极端降水指数的时空变化特征. *高原山地气象研究*, 2022, 42: 31–40]
- 35 Li C Y, Cui P, Hao J S, et al. Variation characteristics of temperature and precipitation over the Southeast Xizang since 1960 (in Chinese). *Plat Meteorol*, 2023, 42: 344–358 [李朝月, 崔鹏, 郝建盛, 等. 1960年以来藏东南地区气温和降水的变化特征. *高原气象*, 2023, 42: 344–358]
- 36 Zhang J, Shen X, Wang B. Changes in precipitation extremes in southeastern Tibet, China. *Quat Int*, 2015, 380–381: 49–59
- 37 Ren L Y. Spatial-temporal variation of precipitation in Southeast Tibet from 1980 to 2018 and its predictions (in Chinese). Master Dissertation. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2021 [任丽莹. 1980~2018年藏东南降水时空变化及其预估. 硕士学位论文. 西安: 陕西师范大学, 2021]
- 38 Sun C. Spatial-temporal variation of precipitation on the Qinghai-Tibet Plateau and its impact under the background of climate change (in Chinese). Doctor Dissertation. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2022 [孙婵. 气候变化背景下青藏高原降水时空变化及其影响. 博士学位论文. 南京: 南京信息工程大学, 2022]
- 39 Liu J T, Xu Z X, Zhao H, et al. Spatiotemporal variation of extreme precipitation events in the Yarlung Zangbo River Basin from 1973 to 2016, China (in Chinese). *Mt Res*, 2018, 36: 750–764 [刘江涛, 徐宗学, 赵焕, 等. 1973~2016年雅鲁藏布江流域极端降水事件时空变化特征. *山地学报*, 2018, 36: 750–764]
- 40 Duan K Q, Yao T D, Wang N L, et al. The difference in precipitation variability between the north and south Tibetan Plateaus (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2008, 30: 726–732 [段克勤, 姚檀栋, 王宁练, 等. 青藏高原南北降水变化差异研究. *冰川冻土*, 2008, 30: 726–732]
- 41 Yang T. Climate change research in southeastern Tibetan Plateau from tree-ring data (in Chinese). Doctor Dissertation. Lanzhou: Lanzhou University, 2012 [杨涛. 藏东南地区气候变化的树轮记录研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2012]
- 42 Liu J, Yang B, Huang K, et al. Annual regional precipitation variations from a 700 year tree-ring record in South Tibet, western China. *Clim Res*, 2012, 53: 25–41
- 43 Zhang Q B, Evans M N, Lü L. Moisture dipole over the Tibetan Plateau during the past five and a half centuries. *Nat Commun*, 2015, 6: 8062
- 44 Wu Y, Long D, Lall U, et al. Reconstructed eight-century streamflow in the Tibetan Plateau reveals contrasting regional variability and strong nonstationarity. *Nat Commun*, 2022, 13: 6416
- 45 Liu S, Hu K, Liu W, et al. Hydro-climatic characteristics of Yarlung Zangbo River Basin since the Last Glacial Maximum. *Adv Atmos Sci*, 2022, 39: 415–426
- 46 Chen D L, Xu B Q, Yao T D, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2015, 60: 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. *科学通报*, 2015, 60: 3025–3035]
- 47 Guo D L, Sun J Q, Yu E T. Evaluation of CORDEX regional climate models in simulating temperature and precipitation over the Tibetan Plateau.

- Atmos Oceanogr Sci Libr, 2018, 11: 219–227
- 48 Fu Y H, Gao X J, Zhu Y M, et al. Climate change projection over the Tibetan Plateau based on a set of RCM simulations. *Adv Clim Change Res*, 2021, 12: 313–321
- 49 Zhang H W, Gao Y H. Projected changes of precipitation over the Qinghai-Tibetan Plateau based on dynamical downscaling (in Chinese). *Plat Meteorol*, 2020, 39: 477–485 [张宏文, 高艳红. 基于动力降尺度方法预估的青藏高原降水变化. *高原气象*, 2020, 39: 477–485]
- 50 Lun Y, Liu L, Cheng L, et al. Assessment of GCMs simulation performance for precipitation and temperature from CMIP5 to CMIP6 over the Tibetan Plateau. *Int J Climatol*, 2021, 41: 3994–4018
- 51 Zhang J Y, Lun Y R, Liu L, et al. CMIP6 evaluation and projection of climate change in Tibetan Plateau (in Chinese). *J Beijing Norm Univ (Nat Sci)*, 2022, 58: 77–89 [张佳怡, 伦玉蕊, 刘浏, 等. CMIP6多模式在青藏高原的适应性评估及未来气候变化预估. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 58: 77–89]
- 52 Ren L, Duan K, Xin R. Impact of future loss of glaciers on precipitation pattern: A case study from south-eastern Tibetan Plateau. *Atmos Res*, 2020, 242: 104984
- 53 Na Y, Lu R, Fu Q, et al. Precipitation characteristics and future changes over the southern slope of Tibetan Plateau simulated by a high-resolution global nonhydrostatic model. *J Geophys Res Atmos*, 2021, 126: e2020JD033630
- 54 Hu Q, Jiang D B, Fan G Z. Evaluation of CMIP5 models over the Qinghai-Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2014, 38: 924–938 [胡琴, 姜大膀, 范广洲. CMIP5全球气候模式对青藏高原地区气候模拟能力评估. *大气科学*, 2014, 38: 924–938]
- 55 Wang X J, Pang G J, Yang M X. Precipitation over the Tibetan Plateau during recent decades: A review based on observations and simulations. *Int J Climatol*, 2018, 38: 1116–1131
- 56 Cui T, Li C, Tian F Q. Evaluation of temperature and precipitation simulations in CMIP6 models over the Tibetan Plateau. *Earth Space Sci*, 2021, 8: e2020EA001620
- 57 Xiao Y J, Li J, Li N N. Evaluation of CMIP6 HighResMIP models in simulating precipitation over Tibetan Plateau (in Chinese). *Torrent Rain Disaster*, 2022, 41: 215–223 [肖雨佳, 李建, 李妮娜. CMIP6 HighResMIP 高分辨率气候模式对青藏高原降水模拟的评估. *暴雨灾害*, 2022, 41: 215–223]
- 58 Gu H, Yu Z, Peltier W R, et al. Sensitivity studies and comprehensive evaluation of RegCM4.6.1 high-resolution climate simulations over the Tibetan Plateau. *Clim Dyn*, 2020, 54: 3781e3801
- 59 Gu C L, Huang A N, Zhang Y C, et al. The wet bias of RegCM4 over Tibetan Plateau in summer reduced by adopting the 3D sub-grid terrain solar radiative effect parameterization scheme. *J Geophys Res Atmos*, 2022, 127: e2022JD037434
- 60 Xu Z X, Ban C G, Zhang R. Evolution laws and attribution analysis in the Yarlung Zangbo River Basin (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2022, 33: 519–530 [徐宗学, 班春广, 张瑞. 雅鲁藏布江流域径流演变规律与归因分析. *水科学进展*, 2022, 33: 519–530]
- 61 Liu L, Niu Q K, Heng J X, et al. Characteristics of dry and wet conversion and dynamic vegetation response in Yarlung Zangbo River Basin (in Chinese). *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2020, 36: 175–184 [刘浏, 牛乾坤, 衡静霞, 等. 雅鲁藏布江流域干湿转换特征及植被动态响应. *农业工程学报*, 2020, 36: 175–184]
- 62 Shi Y F. Estimation of the water resources affected by climatic warming and glacier shrinkage before 2050 in west China (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2001, 23: 333–341 [施雅风. 2050年前气候变暖冰川萎缩对水资源影响情景预估. *冰川冻土*, 2001, 23: 333–341]
- 63 Wu G J, Yao T D, Wang W C, et al. Glacial hazards on Tibetan Plateau and surrounding alpine (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 1285–1295 [邬光剑, 姚檀栋, 王伟财, 等. 青藏高原及周边地区的冰川灾害. *中国科学院院刊*, 2019, 34: 1285–1295]
- 64 Wang N L, Yao T D, Xu B Q, et al. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 1220–1238 [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. *中国科学院院刊*, 2019, 34: 1220–1238]
- 65 Zhao F Y, Long D, Li X D, et al. Rapid glacier mass loss in the southeastern Tibetan Plateau since the year 2000 from satellite observations. *Remote Sens Environ*, 2022, 270: 112853
- 66 Zhang J X. Understanding of the dynamics and climate implications of glaciers and lakes on the southeastern Tibetan Plateau using long-term time series satellite observations (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019 [张静潇. 基于遥感数据的藏东南冰川和湖泊动态变化监测及其对气候变化的响应研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2019]
- 67 Wu K P, Liu S Y, Guo W Q. Glacier variation and its response to climate change in the Mount Namjagbarwa from 1980 to 2015 (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2020, 42: 1115–1125 [吴坤鹏, 刘时银, 郭万钦. 1980–2015年南迦巴瓦峰地区冰川变化及其对气候变化的响应. *冰川冻土*, 2020, 42: 1115–1125]
- 68 Yang W, Yao T D, Xu B Q, et al. Recent changes in glaciers in the Palung Zangbo River Basin in southeastern Tibet (in Chinese). *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2010, 55: 1775–1780 [杨威, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 近期藏东南帕隆藏布流域冰川的变化特征. *科学通报*, 2010, 55: 1775–1780]
- 69 Liu S Y, Yao X J, Guo W Q, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2015, 70: 3–16 [刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. *地理学报*, 2015, 70: 3–16]

- 70 Li L Y. Study on variation and mass balance estimations of glacier in Yigong Zangbu Basin, Tibet using multi-source remote sensing data (in Chinese). Doctor Dissertation. Nanjing: Nanjing University, 2017 [李澜宇. 基于多源遥感数据的易贡藏布流域冰川变化与物质平衡研究. 博士学位论文. 南京: 南京大学, 2017]
- 71 Jouberton A, Shaw T E, Miles E, et al. Warming-induced monsoon precipitation phase change intensifies glacier mass loss in the southeastern Tibetan Plateau. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2022, 119: e2109796119
- 72 Yang J H, Gillies R R, Kang S C, et al. Monsoon precipitation decrease due to black carbon also causes glacier mass decline over the southeastern Tibetan Plateau. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2023, 120: e2301016120
- 73 Chu D, Yang Y, Luobu J C, et al. The variations of snow cover days over the Tibetan Plateau during 1981–2010 (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2015, 37: 1461–1472 [陈多, 杨勇, 罗布坚参, 等. 1981–2010年青藏高原积雪日数时空变化特征分析. 冰川冻土, 2015, 37: 1461–1472]
- 74 Jiang Y C, Li D L, Zheng R, et al. Variation characteristics of snow cover and frozen soil and their relationships with vegetation in the Tibetan Plateau from 1971 to 2016 (in Chinese). *Trans Atmos Sci*, 2020, 43: 481–494 [蒋元春, 李栋梁, 郑然, 等. 1971–2016年青藏高原积雪冻土变化特征及其与植被的关系. 大气科学学报, 2020, 43: 481–494]
- 75 Wang Z L, Zhang F M, Wang C H, et al. Analysis on spatial and temporal difference of snow depth over the Tibetan Plateau from 1980 to 2019 (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2022, 44: 810–821 [王芝兰, 张飞民, 王澄海, 等. 1980–2019年青藏高原积雪深度时空差异性分析. 冰川冻土, 2022, 44: 810–821]
- 76 Che T, Hao X H, Dai L Y, et al. Snow cover variation and its impacts over the Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 1247–1253 [车涛, 郝晓华, 戴礼云, 等. 青藏高原积雪变化及其影响. 中国科学院院刊, 2019, 34: 1247–1253]
- 77 Xiong C, Yao R Z, Shi J C, et al. Change of snow and ice melting time in High Mountain Asia (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 2885–2893 [熊川, 姚汝桢, 施建成, 等. 高亚洲地区冰雪融化时间变化. 科学通报, 2019, 64: 2885–2893]
- 78 Gao J. Spatiotemporal distribution of snow and snowmelt modeling in alpine regions (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Tsinghua University, 2011 [高洁. 高山积雪的时空分布特征及融雪模型研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2011]
- 79 Huang X D, Ma Y, Li Y X, et al. Spatiotemporal variation of snow cover over the Tibetan Plateau from 1980–2020 (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2023, 45: 1–12 [黄晓东, 马英, 李雨馨, 等. 1980–2020年青藏高原积雪时空变化特征. 冰川冻土, 2023, 45: 1–12]
- 80 Guo R, Ji X, Liu C, et al. Spatiotemporal variation of snow cover and its relationship with temperature and precipitation in the Yarlung Tsangpo-Brahmaputra River Basin. *J Mt Sci*, 2022, 19: 1901–1918
- 81 Ban C, Xu Z, Zuo D, et al. Vertical influence of temperature and precipitation on snow cover variability in the Yarlung Zangbo River Basin, China. *Int J Climatol*, 2021, 41: 1148–1161
- 82 Liu J P, Zhang W C, Deng C, et al. Spatiotemporal variations of snow cover over Yarlung Zangbo River Basin in Tibet from 2000 to 2014 and its response to key climate factors (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2018, 40: 643–654 [刘金平, 张万昌, 邓财, 等. 2000–2014年西藏雅鲁藏布江流域积雪时空变化分析及对气候的响应研究. 冰川冻土, 2018, 40: 643–654]
- 83 Zou M J, Shao C K, Yang K. Changes in climate, glaciers and permafrost during 1979–2018 in Tibetan Autonomous Region and their potential impacts on renewable energy (in Chinese). *Trans Atmos Sci*, 2020, 43: 980–991 [邹宓君, 邵长坤, 阳坤. 1979–2018年西藏自治区气候与冰川冻土变化及其对可再生能源的潜在影响. 大气科学学报, 2020, 43: 980–991]
- 84 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 Geophys Res Atmos*, 2017, 122: 11604–11620
- 85 Zhao L, Hu G J, Zou D F, et al. Permafrost changes and its effects on hydrological processes on Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 1233–1246 [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. 中国科学院院刊, 2019, 34: 1233–1246]
- 86 Luo S Q, Wang J Y, Pomeroy J W, et al. Freeze-thaw changes of seasonally frozen ground on the Tibetan Plateau from 1960 to 2014. *J Clim*, 2020, 33: 9427–9446
- 87 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. *Nat Clim Chang*, 2014, 4: 587–592
- 88 Cheng G D, Zhao L, Li R, et al. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 2783–2795 [程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响. 科学通报, 2019, 64: 2783–2795]
- 89 Wang J R, Chen X, Liu J T, et al. Changes of precipitation runoff relationship induced by climate variation in a large glaciated basin of the Tibetan Plateau. *J Geophys Res Atmos*, 2021, 126: e2020JD034367
- 90 Xin J L, Sun X Y, Liu L, et al. Quantifying the contribution of climate and underlying surface changes to alpine runoff alterations associated with glacier melting. *Hydrol Process*, 2021, 35: e14069
- 91 Zhang G, Yao T, Shum C K, et al. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin. *Geophys Res Lett*, 2017, 44: 5550–5560
- 92 Wang Y H. Simulation and analysis of changes in frozen ground and hydrology in typical basins of the Tibetan Plateau (in Chinese). Doctor

- Dissertation. Beijing: Tsinghua University, 2019 [王宇涵. 青藏高原典型流域的冻土水文变化模拟与分析. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2019]
- 93 Feng Y Q. Changes of glaciers and permafrost in Qinghai-Tibet Plateau and their ecological and hydrological effects—Take the Yellow River source, Brahmaputra River Basin and permafrost degradation turning zone as typical study regions (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 2020 [冯雨晴. 青藏高原冰川冻土变化及其生态与水文效应研究——以黄河源、雅鲁藏布江流域和冻土退化带为典型区. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学, 2020]
 - 94 Shang Y J, Yang Z F, Liao Q L, et al. Geological hazard distribution and prevention in North of Yalu Canyon, Tibet (in Chinese). *Chin J Geol Hazard Control*, 2001, 12: 30–41 [尚彦军, 杨志法, 廖秋林, 等. 雅鲁藏布江大拐弯北段地质灾害分布规律及防治对策. *中国地质灾害与防治学报*, 2001, 12: 30–41]
 - 95 Cui P, Guo X J, Jiang T H, et al. Disaster effect induced by Asian Water Tower change and mitigation strategies (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 1313–1321 [崔鹏, 郭晓军, 姜天海, 等. “亚洲水塔”变化的灾害效应与减灾对策. *中国科学院院刊*, 2019, 34: 1313–1321]
 - 96 Shang Y, Yang Z, Li L, et al. A super-large landslide in Tibet in 2000: Background, occurrence, disaster, and origin. *Geomorphology*, 2003, 54: 225–243
 - 97 Ding Y, Zhang S, Zhao L, et al. Global warming weakening the inherent stability of glaciers and permafrost. *Sci Bull*, 2019, 64: 245–253
 - 98 Yu G A, Lu J Y, Li Z W, et al. Geomorphic effects of debris flows in high mountain areas of the Parlung Zangbo Basin, Southeast Tibet under the influence of climate change (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2022, 77: 619–634 [余国安, 鲁建莹, 李志威, 等. 气候变化影响下藏东南帕隆藏布流域高山区泥石流的地貌效应. *地理学报*, 2022, 77: 619–634]
 - 99 Liu Y P, Montgomery D R, Hallet B, et al. Quaternary glacier blocking events at the entrance of Yarlung Zangbo Great Canyon, Southeast Tibet (in Chinese). *J Quat Sci*, 2006, 26: 52–62 [刘宇平, Montgomery D R, Hallet B, 等. 西藏东南雅鲁藏布大峡谷入口处第四纪多次冰川阻江事件. *第四纪研究*, 2006, 26: 52–62]
 - 100 Chen C, Zhang L M, Xiao T, et al. Barrier lake bursting and flood routing in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon in October 2018. *J Hydrol*, 2020, 583: 124603
 - 101 An B, Wang W, Yang W, et al. Process, mechanisms, and early warning of glacier collapse-induced river blocking disasters in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon, southeastern Tibetan Plateau. *Sci Total Environ*, 2022, 816: 151652
 - 102 Zhang W J. A surging glacier in the Nanjiabawa peak area, Himalayas (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 1983, 3: 45–76 [张文敬. 南迦巴瓦峰的跃动冰川. *冰川冻土*, 1983, 3: 45–76]
 - 103 Li J, Chu H L, Li B, et al. Analysis of development characteristics of high-elevation chain geological hazard in Zelongnong, Nyingchi, Tibet based on high resolution image and InSAR interpretation (in Chinese). *Chin J Geol Hazard Control*, 2021, 32: 42–50 [李军, 褚宏亮, 李滨, 等. 基于高分影像与InSAR解译的西藏林芝则隆弄高位链式地质灾害发育特征分析. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32: 42–50]
 - 104 Zhu P Y, Luo D F, Kou Y Z. Debris flow development trend of Guxiang ravine, Xizang (in Chinese). *Mt Res*, 1997, 15: 296–299 [朱平一, 罗德富, 寇玉贞. 西藏古乡沟泥石流发展趋势. *山地研究*, 1997, 15: 296–299]
 - 105 Li D J, You Y. Bursting of the Midui moraine lake in Bomi, Xizang (in Chinese). *Mt Res*, 1992, 10: 219–224 [李德基, 游勇. 西藏波密米堆冰湖溃决浅议. *山地研究*, 1992, 10: 219–224]
 - 106 Zhu P Y, Cheng Z L, You Y. Research on causes of river blocking by sediment delivery of Peilonggou Gully debris flow in the Sichuan-Xizang Highway (in Chinese). *J Nat Disasters*, 2000, 9: 80–83 [朱平一, 程尊兰, 游勇. 川藏公路培龙沟泥石流输砂堵江成因探讨. *自然灾害学报*, 2000, 9: 80–83]
 - 107 Cui P, Dang C, Cheng Z, et al. Debris flows resulting from glacial-lake outburst floods in Tibet, China. *Phys Geogr*, 2010, 31: 508–527
 - 108 Wei R, Zeng Q, Davies T, et al. Geohazard cascade and mechanism of large debris flows in Tianmo gully, SE Tibetan Plateau and implications to hazard monitoring. *Eng Geol*, 2018, 233: 172–182
 - 109 Hu K, Zhang X, You Y, et al. Landslides and dammed lakes triggered by the 2017 *M*_s6.9 Milin earthquake in the Tsangpo gorge. *Landslides*, 2019, 16: 993–1001
 - 110 Zhang L, Su F, Yang D, et al. Discharge regime and simulation for the upstream of major rivers over Tibetan Plateau. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118: 8500–8518
 - 111 Li F, Zhang Y, Xu Z, et al. The impact of climate change on runoff in the southeastern Tibetan Plateau. *J Hydrol*, 2013, 505: 188–201
 - 112 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? *Water Resour Res*, 2017, 53: 2431–2466
 - 113 Liu L Y, Zhou Z H, Liu J J, et al. Distributed hydrological model of the Qinghai-Tibet Plateau based on the hydrothermal coupling: II. Simulation of water cycle processes in the Niyang River Basin considering glaciers and frozen soils (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2021, 32: 201–210 [刘扬李, 周祖昊, 刘佳嘉, 等. 基于水热耦合的青藏高原分布式水文模型——II. 考虑冰川和冻土的尼洋河流域水循环过程模拟. *水科学进展*, 2021, 32: 201–210]

- 114 Ban C G, Xu Z X, Zuo D P, et al. Hydrological simulation and runoff components analysis in the high cold alpine region: Case study in the Bomi watershed of the Yarlung Zangbo River Basin (in Chinese). *J Beijing Norm Univ (Nat Sci)*, 2023, 59: 85–93 [班春广, 徐宗学, 左德鹏, 等. 高寒流域水文模拟与径流水源解析——以雅鲁藏布江帕隆藏布上游流域为例. 北京师范大学学报(自然科学版), 2023, 59: 85–93]
- 115 Gao H, Dong J, Chen X, et al. Stepwise modeling and the importance of internal variables validation to test model realism in a data scarce glacier basin. *J Hydrol*, 2020, 591: 125457
- 116 Xu Z X, Zhou Z H, Jiang Y, et al. Variation laws and future evolution trends of runoff in the headwaters region of Southwestern rivers (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2022, 33: 360–374 [徐宗学, 周祖昊, 姜瑶, 等. 西南河流源区径流量变化规律及其未来演变趋势. 水科学进展, 2022, 33: 360–374]
- 117 Cuo L, Zhang Y, Zhu F, et al. Characteristics and changes of streamflow on the Tibetan Plateau: A review. *J Hydrol-Reg Stud*, 2014, 2: 49–68
- 118 Wang X, Liu L, Niu Q, et al. Multiple data products reveal long-term variation characteristics of terrestrial water storage and its dominant factors in data-scarce alpine regions. *Remote Sens*, 2021, 13: 2356
- 119 Liu J, Yao Z J, Chen C Y. Evolution trend and causation analysis of the runoff evolution in the Yarlung Zangbo River Basin (in Chinese). *J Nat Resour*, 2007, 22: 471–477 [刘剑, 姚治君, 陈传友. 雅鲁藏布江径流变化趋势及原因分析. 自然资源学报, 2007, 22: 471–477]
- 120 WAPCOS (Water and Power Consultancy Services, India). *Morphological Studies of the River Brahmaputra*. New Delhi: North Eastern Council, 1993
- 121 Lang K A, Huntington K W, Montgomery D R. Erosion of the Tsangpo Gorge by megafloods, eastern Himalaya. *Geology*, 2013, 41: 1003–1006
- 122 Turzewski M D, Huntington K W, Licht A, et al. Provenance and erosional impact of Quaternary megafloods through the Yarlung-Tsangpo Gorge from zircon U-Pb geochronology of flood deposits, eastern Himalaya. *Earth Planet Sci Lett*, 2020, 535: 116113
- 123 Borgohain B, Mathew G, Chauhan N, et al. Evidence of episodically accelerated denudation on the Namche Barwa massif (eastern Himalayan syntaxis) by megafloods. *Quat Sci Rev*, 2020, 245: 106410
- 124 Montgomery D R, Hallet B, Liu Y P, et al. Evidence for Holocene megafloods down the Tsangpo River gorge, southeastern Tibet. *Quat Res*, 2004, 62: 201–207
- 125 Panda S, Kumar A, Das S, et al. Chronology and sediment provenance of extreme floods of Siang River (Tsangpo-Brahmaputra River valley), northeast Himalaya. *Earth Surf Process Landf*, 2020, 45: 2495–2511
- 126 Liu W, Lai Z, Hu K, et al. Age and extent of a giant glacial-dammed lake at Yarlung Tsangpo gorge in the Tibetan Plateau. *Geomorphology*, 2015, 246: 370–376
- 127 Tewari P. A study on soil erosion in Pasighat Town (Arunachal Pradesh) India. *Nat Hazards*, 2004, 32: 257–275
- 128 Wang H, Wang P, Hu G, et al. An Early Holocene river blockage event on the western boundary of the Namche Barwa Syntaxis, southeastern Tibetan Plateau. *Geomorphology*, 2021, 395: 107990
- 129 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 Hydrol*, 2019, 573: 60–81
- 130 Su F, Zhang L, Ou T, et al. Hydrological response to future climate changes for the major upstream river basins in the Tibetan Plateau. *Glob Planet Change*, 2016, 136: 82–95
- 131 Xuan W D, Xu Y P, Fu Q, et al. Hydrological responses to climate change in Yarlung Zangbo River Basin, Southwest China. *J Hydrol*, 2021, 597: 125761
- 132 Gao C, Liu L, Ma D, et al. Assessing responses of hydrological processes to climate change over the southeastern Tibetan Plateau based on resampling of future climate scenarios. *Sci Total Environ*, 2019, 664: 737–752
- 133 Alam S, Ali M M, Rahaman A Z, et al. Multi-model ensemble projection of mean and extreme streamflow of Brahmaputra River Basin under the impact of climate change. *J Water Clim Change*, 2021, 12: 2026–2044
- 134 Zhang H, Zhang F, Zhang G, et al. Why do CMIP6 models fail to simulate snow depth in terms of temporal change and high mountain snow of China skillfully? *Geophys Res Lett*, 2022, 49: e2022GL098888
- 135 Tang Q H, Lan C, Su F G, et al. Streamflow change on the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 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. 科学通报, 2019, 64: 2807–2821]
- 136 Shi X, Zhang F, Lu X, et al. Spatiotemporal variations of suspended sediment transport in the upstream and midstream of the Yarlung Tsangpo River (the upper Brahmaputra), China. *Earth Surf Process Landf*, 2018, 43: 432–443
- 137 Goswami D C. Brahmaputra River, Assam, India: Physiography, basin denudation, and channel aggradation. *Water Resour Res*, 1985, 21: 959–978
- 138 Yu G, Wang Z, Zhang K, et al. Effect of incoming sediment on the transport rate of bed load in mountain streams. *Int J Sediment Res*, 2009, 24: 260–273
- 139 Galy A, France-Lanord C. Higher erosion rates in the Himalaya: Geochemical constraints on riverine fluxes. *Geology*, 2001, 29: 23–26
- 140 Islam M R, Begum S F, Yamaguchi Y, et al. The Ganges and Brahmaputra rivers in Bangladesh: Basin denudation and sedimentation. *Hydrol*

- [Process](#), 1999, 13: 2907–2923
- 141 Wasson R, Acharjee S, Rakshit R. Towards identification of sediment sources, and processes of sediment production, in the Yarlung-Tsangpo-Brahmaputra River catchment for reduction of fluvial sediment loads. [Earth-Sci Rev](#), 2022, 226: 103932
 - 142 Singh S K. Spatial variability in erosion in the Brahmaputra basin: Causes and impacts. *Curr Sci*, 2006, 90: 1272–1276
 - 143 Enkelmann E, Ehlers T A, Zeitler P K, et al. Denudation of the Namche Barwa antiform, eastern Himalaya. [Earth Planet Sci Lett](#), 2011, 307: 323–333
 - 144 Hu K H, Wei L, Yang A N, et al. Broad valleys and barrier dams in upstream Brahmaputra efficiently retain Tibetan-sourced sediments: Evidence from palaeoflood records. *Quat Sci Rev*, 2022, 285: 107538
 - 145 King G E, Herman F, Guralnik B. Northward migration of the eastern Himalayan syntaxis revealed by OSL thermochronometry. [Science](#), 2016, 353: 800–804
 - 146 Fischer S, Pietroni J, Bring A, et al. Present to future sediment transport of the Brahmaputra River: Reducing uncertainty in predictions and management. [Reg Environ Change](#), 2017, 17: 515–526
 - 147 Darby S E, Dunn F E, Nicholls R J, et al. A first look at the influence of anthropogenic climate change on the future delivery of fluvial sediment to the Ganges-Brahmaputra-Meghna delta. *Environ Sci Proc Imp*, 2015, 17: 1587–1600
 - 148 Haque S, Ali M M, Islam A K M S, et al. Changes in flow and sediment load of poorly gauged Brahmaputra River Basin under an extreme climate scenario. [J Water Clim Change](#), 2021, 12: 937–954
 - 149 Wang Y, Xie X, Shi J, et al. Accelerated hydrological cycle on the Tibetan Plateau evidenced by ensemble modeling of long-term water budgets. [J Hydrol](#), 2022, 615: 128710
 - 150 Huang Q, Long D, Han Z, et al. High-resolution satellite images combined with hydrological modeling derive river discharge for headwaters: A step toward discharge estimation in ungauged basins. [Remote Sens Environ](#), 2022, 277: 113030
 - 151 Nicollier T, Antoniazza G, Rickenmann D, et al. Improving the calibration of the Swiss plate geophone bedload monitoring system by filtering out Seismic signals from extraneous particle impacts. *Earth Space Sci*, 2022, 9: e2021EA001962
 - 152 Xu R, Tian F, Yang L, et al. Ground validation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 rainfall products over southern Tibetan Plateau based on a high-density rain gauge network. [J Geophys Res Atmos](#), 2017, 122: 910–924

补充材料

表S1 藏东南及周边地区降水变化研究的部分成果

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “藏东南地区的河流水文研究: 进展与挑战”

River hydrology studies in Southeast Xizang: Progress and challenges

Guo-An Yu^{1*}, Pengsheng Yue^{1,2}, Chendi Zhang¹, Zhiwei Li³ & Weipeng Hou^{1,2}

¹ CAS Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China

* Corresponding author, E-mail: yuga@igsnr.ac.cn

Southeast Xizang is one of the areas with the highest precipitation, runoff production, sediment yield, and transport on the Qinghai-Xizang Plateau and is also one of the areas most sensitive to climate change. The hydrological processes of the rivers in this area are not only affected by regional climate change. However, they are also closely related to changes in the underlying surface conditions, such as vegetation, glaciers, snow, seasonally frozen ground/permafrost, glacial lakes, and occasional natural geo-hazards, such as landslides and debris flows. An in-depth understanding of regional river hydrological characteristics, runoff production, sediment yield, and transport mechanisms, the main influencing factors, and clarification of runoff/sediment regime changes and future trends in the context of global climate change have important scientific value and practical significance for the rational development and utilization of flow energy and water resources in Southeast Xizang, (hydro-)engineering safety and long-term use, as well as scientific mitigation and control of natural geo-hazards (e.g., debris flow and mountain torrents). Since the 1950s (especially during the past 50 years), comprehensive field scientific investigations, such as the Qinghai-Xizang Plateau scientific expeditions and the unremitting efforts of several generations of scientific researchers, relatively deep explorations, and studies on climate, hydrology, physical geography, geology, and geomorphology in southeastern Xizang have been conducted. This review systematically summarizes the main progress in river hydrology research in Southeast Xizang, including regional climate change and its impact, runoff, sediment characteristics, and changes. It discusses also the main challenges of current research and certain aspects that should be strengthened in the future.

Over the past 70 years, the temperature in southeastern Xizang has increased significantly. Although there is no unified conclusion on the interannual variation trend of precipitation, analysis based on the observational data of surface weather stations indicates a weak, increasing trend. The glaciers in southeastern Xizang retreat at an accelerated rate, and the shrinkage is much greater than in other Qinghai-Xizang Plateau areas. The area and number of glacial lakes in this region have increased, increasing the potential risk of glacial lake outbursts. Southeast Xizang has high runoff and sediment production on the Qinghai-Xizang Plateau. Approximately 2/3 (~125 billion m³) of the runoff and more than 90% of the sediment (suspended sediment ~190 million tons) at the Pasighat in the lower reaches of the Yarlung Tsangpo River originate from this area (especially the bend area of the Yarlung Tsangpo Great Canyon centered around the Namcha Barwa and Gyala Peri peaks), the runoff and sediment dynamics in this area hence determine the water and sediment flow in the lower reaches of the Yarlung Tsangpo River to a considerable extent. Runoff in South Xizang is generally dominated by precipitation, but the proportion of meltwater is high (up to ~70%) in glacial-intensive watersheds, such as the main tributaries, Parlun Tsangpo and Yigong Tsangpo. Over the past 60 years, runoff in Southeast Xizang has shown an increasing trend but with significant fluctuations. Under future climate change scenarios, the runoff in this region is estimated to show an increasing trend, and sediment production and transport trends are similar but with large uncertainties. The meteorological and hydrological monitoring in Southeast Xizang is still weak, and flow and sediment data are scarce, which is a basic problem that future regional river hydrological research should strive to overcome and solve.

Southeast Xizang, climate change, underlying surface condition change, geo-hazards, runoff, sediment

doi: [10.1360/TB-2023-0075](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0075)