

冰冻圈影响下的雅鲁藏布江产输沙机制、规律及影响

李东锋, 李一一

(北京大学 环境科学与工程学院 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 气候变化背景下, 雅鲁藏布江(雅江)流域的冰川退缩、积雪减少、冻土退化改变了水文过程、泥沙来源和河流泥沙通量。本文系统梳理1980年代以来流域实测水沙资料, 并结合气象、冰冻圈(冰川、积雪与冻土等)、植被等多源数据, 综合分析流域产输沙机制、时空演变规律及工程生态影响。雅江流域泥沙主要来源于降雨侵蚀、冰川侵蚀、融雪侵蚀、冻融侵蚀及突发地质灾害。雅江上游(拉孜以上)温度低、降水少, 泥沙通量较低; 中游(拉孜—奴下)受年楚河和拉萨河等支流补给及河道展宽影响, 沿程泥沙通量先升高后降低; 下游(奴下—巴昔卡)受冰川侵蚀和突发地质灾害影响, 产沙能力强, 对河流泥沙通量贡献大并呈明显年际波动。气候变暖加剧冰川消融和冻土退化, 增加了泥沙来源、泥沙连通性和输沙能力, 奴下水文站的实测泥沙通量整体呈增加趋势(1981—2009年)。河流泥沙通量增加会带来水库淤积和水轮机磨损等问题, 同时悬浮泥沙改变了水体浊度与碳通量, 影响水质和碳循环。未来需强化基于水文观测—示踪—遥感—AI的“天—空—地”一体化泥沙监测体系, 研发面向冰冻圈流域的分布式水沙模型, 加强以泥沙为纽带的多圈层交互作用机理研究, 推动雅江流域系统科学研究新范式。

关键词: 雅鲁藏布江; 泥沙; 气候变化; 演变规律; 流域生态

中图分类号: TV141

文献标识码: A

doi: 10.3724/j.slxb.20250651

1 研究背景

在全球气候变暖背景下, 青藏高原冰川快速退缩、积雪面积减少、冻土显著退化, 叠加降水时空分布的变化, 使高寒高海拔地区冰冻圈的河流水文过程发生改变, 进而影响到流域泥沙的来源和输移规律^[1-4]。雅鲁藏布江(简称雅江)作为青藏高原南缘最具代表性的冰冻圈主导型河流, 在区域水资源调控、生态安全维护和清洁能源供给中发挥着关键作用, 其泥沙输移变化正日益受到气候变化与冰冻圈退化的双重影响^[5-7]。雅江发源于喜马拉雅山北侧的杰马央宗冰川, 流域平均海拔约4600 m, 是全球海拔最高的河流之一, 同时也是青藏高原重要的水汽通道^[1]。雅江干流全长约2230 km, 拥有年楚河、拉萨河、尼洋河和帕隆藏布江等主要支流, 流域总面积达24.2万 km²。雅江水资源丰富, 上游拉孜水文站的年均径流量为50亿 m³, 中游奴各沙、羊村水文站年均径流量分别为154亿和294亿 m³, 经奴下水文站入下游年均径流量为587亿 m³^[8-9]。

河流泥沙的产输机制、演变规律及其影响是雅江水利工程安全和生态环境保护面临的关键问题^[10-11]。据西藏水文站观测资料统计, 雅江上游拉孜水文站年均输沙量约为130万 t, 中游奴各沙水文站和羊村水文站约为1400万和2000万 t, 经奴下水文站入下游约为1600万 t(图1)。河流泥沙变化对水库库容、河流水质以及水资源—能源—粮食—生态系统安全具有显著影响^[11-12]。例如, 河流泥沙通量的增加会加速水库淤积、磨损水轮机、缩短水电设施的生命周期; 泥沙携带的生物化学物质能够

收稿日期: 2025-10-20; 网络首发日期: 2026-02-26

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.1882tv.20260225.1726.007>

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(52595702); 国家自然科学基金面上项目(52479055)

作者简介: 李东锋(1991—), 研究员, 主要从事河流水沙物质通量研究。E-mail: dongfeng.li@pku.edu.cn

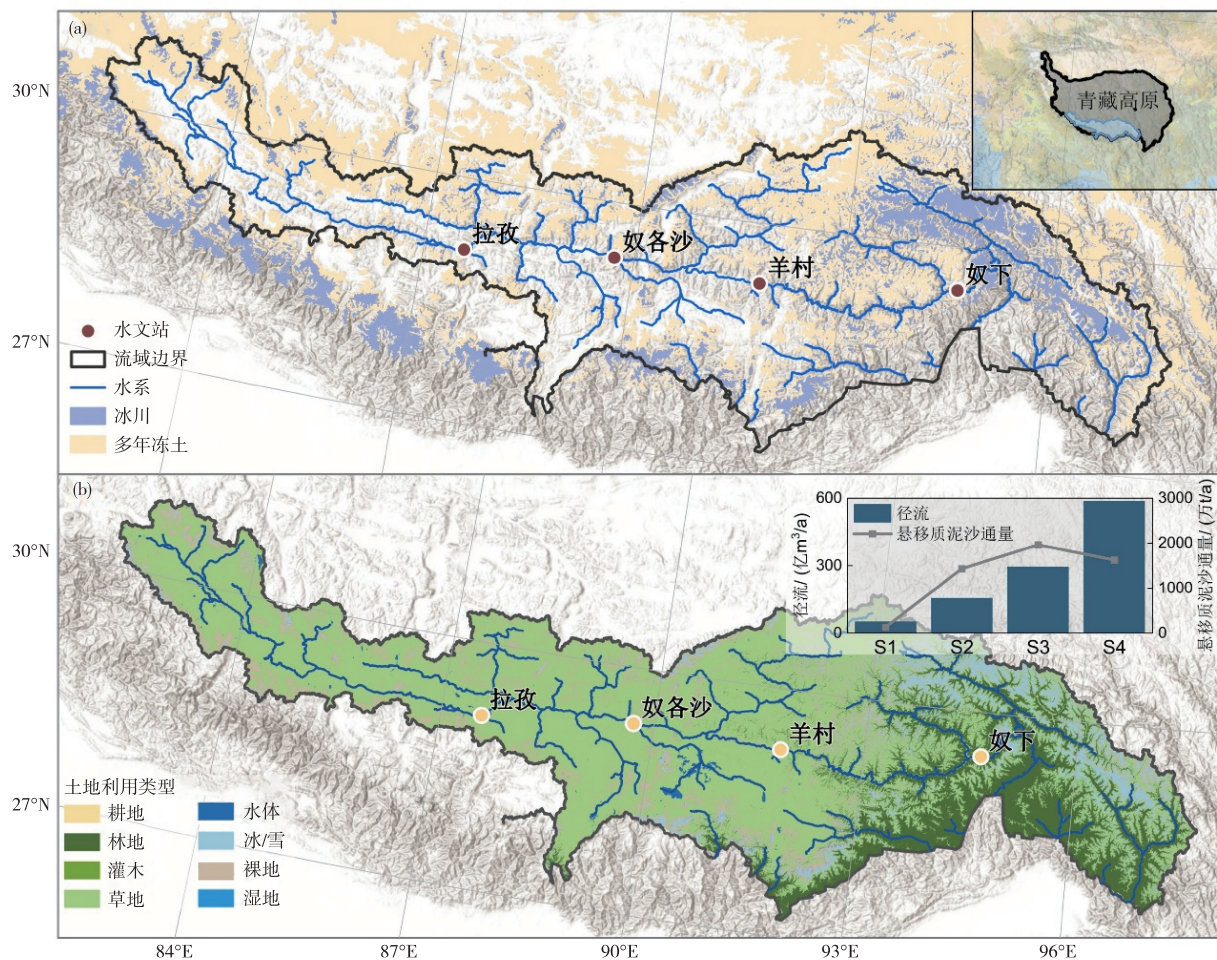


图1 雅江流域概况

Fig. 1 Overview of the Yarlung Tsangpo River (YTR) Basin

影响河流生态系统的稳定性^[10,13]；此外，泥沙输移还将大量的有机碳输入河流系统，增加水体二氧化碳等温室气体排放，影响区域碳循环^[14]。因此，厘清雅江泥沙通量的时空变化机制、规律及影响，对于流域内水利工程的规划设计、生态环境保护 and 适应性调控策略制定具有重要意义。

与黄河、长江等典型水蚀主导型流域相比，雅江流域泥沙来源更加多元，除降雨侵蚀外，还受冰川侵蚀、融雪侵蚀、冻融侵蚀及突发地质灾害等共同控制，具有典型的高寒高海拔山区侵蚀产沙特征^[9,15]。当前，雅江面临快速升温 and 降水模式的转变，冰冻圈加速退化，导致河流泥沙的来源及输移过程发生显著变化^[16-17] (图2)。流域内的降水分布具有显著的空间异质性，西部源头地区年均降水量约 200 mm，而东部下游地区年均降水量则超过 2000 mm^[9]。雅江流域冰川和多年冻土广布，分别占流域总面积的 4% 和 30%，随着气候变暖，冰川侵蚀和融水携沙效应为流域带来大量泥沙^[18]。冻土冻融侵蚀和热融灾害能够提供额外的泥沙来源^[2]。此外，冰岩崩、滑坡、泥石流等突发地质灾害进一步增加了泥沙来源^[10,19]。

本文聚焦于气候变化和冰冻圈退化背景下雅江泥沙来源、演变规律及其影响，分析气温、降水、冰川、积雪、冻土、植被以及突发地质灾害对流域产沙和输沙过程的影响机制，揭示过去几十年雅江流域泥沙通量的时空演变规律，探讨泥沙通量变化对水电工程和生态环境的潜在影响。在此基础上，提出构建以泥沙为纽带的多圈层交互作用和“水-沙-能-粮-生”系统耦合为核心的流域系统科学研究新范式。相关分析基于西藏水文站实测水沙数据、ERA5再分析气象数据及近年公开发表的冰川、积雪、植被等遥感反演产品。

2 雅江流域产沙机制

2.1 降雨侵蚀与风蚀 在雅江流域,降雨侵蚀是重要泥沙来源之一^[1,15],表现为降雨引发的坡面径流对地表土壤、岩屑和植被覆盖层产生的强烈冲刷(图2)。在高寒高海拔流域,地表土、岩石长期受冻融作用影响,岩体破碎、松散堆积广泛分布,为降雨侵蚀过程提供了丰富的物源条件^[2,11,15]。流域分布有大面积多年冻土,冻土活动层较浅,降雨难以渗入深层土壤中,地表径流在强降雨作用下迅速形成,易引发坡面滑塌、沟道冲刷等侵蚀过程^[20]。此外,在地形陡峭、植被稀疏的区域,降雨驱动的坡面侵蚀和沟蚀的叠加效应尤为显著^[21]。强降雨将坡面松散泥沙输入河流,增加河流流量和水位波动,加剧河岸侵蚀,引发崩岸和滑塌等极端输沙过程,进一步增加河流泥沙通量^[19,22]。

雅江泥沙输移受季节性降雨强度变化影响,降雨侵蚀力在空间上呈现出显著“东高西低、大峡谷区高于源区”的变化趋势^[20]。流域强降雨主要集中在夏季(6—9月),引发大量泥沙输移和泥沙通量峰值,且年际间泥沙通量峰值变异性大。冬季降雨量少时,泥沙通量也较低,且波动较小。

此外,雅江中游河段具备一定的风蚀环境(如河谷沙丘地貌)^[23],风力作用下的地表沙粒搬运亦为流域泥沙输移提供补给,尤其在裸露地表和河岸风积沙地带,风蚀与水蚀共同作用,加剧了河流含沙量的波动。

2.2 冰川侵蚀与融雪侵蚀 冰川侵蚀与融雪侵蚀是高寒区特有的产沙过程^[11]。冰川侵蚀受冰川运动和冰川消融影响,是雅江流域泥沙的重要来源之一。流域内冰川主要分布于上游高寒源区及大拐弯(米林县的派镇—墨脱县的巴昔卡)附近支流山系,整体覆盖约占流域面积的4%^[24],统计数量逾一万条,为青藏高原东南部冰川高密度区,且海洋性冰川占比较高(图1(a))^[24]。研究表明,冰川占比大于20%的河流产沙模数是非冰川河流的10倍^[22]。尽管冰川占比与流域泥沙通量之间存在正相关关系,但未来气候暖湿化和冰川退缩也可能会加剧近冰川区的侵蚀,导致山地地貌的不稳定性增加,从而进一步增加泥沙来源^[22]。季节性融水进入冰川底部后会升高孔隙内水压力并润滑基底,从而在短时间内加速冰川底部滑动,进而增强磨蚀与拔蚀作用。随着冰川退缩,冰川侧碛与终碛、冰缘沉积物逐步暴露于地表成为新的物源,而冰川、冰下水系则显著增强冰川系统内的泥沙连通性,增加冰川泥沙的输移强度和效率^[11]。

流域受气候变暖的影响显著,尤其是气温上升引发的冰川消融使极端事件(如冰崩、冰湖溃决洪水等)增多,导致河流泥沙通量在极端年份骤增^[25-27];冰崩的发生促使大量松散泥沙和碎屑短时间内涌入河道,形成突发性的泥沙高峰(图2),冰崩也可能改变河道形态,加剧局部河段的河岸侵蚀过程。冰湖溃决洪水是指由于冰湖中的水体快速、大量溢出或排泄而引发的洪水灾害^[27]。冰前湖通常作为冰川区重要的“泥库”,截留并沉积大量上游泥沙。然而气温升高加速冰川融水汇入湖体,提高了水位与堤坝失稳风险^[18]。冰湖溃决形成的高能洪水在短时段内将大量水沙排放至下游河道中,造成河流泥沙通量大幅上升,导致下游河床与岸坡剧烈冲刷和重塑^[28]。例如,2020年6月26日西藏嘉黎县吉翁错冰湖溃决,溃口深约20 m、最宽约80 m,瞬时释水量约 $1.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ ^[29],冰湖溃决洪水还对河岸产生强烈的冲刷作用,甚至引发次生地质灾害,威胁沿岸生态和工程设施^[10]。



图2 雅江流域的主要泥沙来源示意

Fig. 2 Schematic of sediment sources in the YTR Basin

融雪侵蚀是指由于雪融水导致的土壤侵蚀现象^[30],是融水水力侵蚀与热融侵蚀的协同作用。春季解冻早期,冻土活动层尚未完全解冻,渗透率低、产流系数大,融雪易在陡坡与疏松覆盖物上形成表层径流从而增强坡面剥蚀^[11]。观测与试验结果显示,早春冻土活动层的解冻不完全,土壤渗透率低、产流系数大;积雪融化易形成地表径流并增强坡面剥蚀,使同等水量条件下,早春融雪期的侵蚀效率普遍高于夏季降雨期^[31]。与冰川融水不同,积雪融水通常不含有像冰川底部的较大碎屑岩石,但其冲刷与热融过程同样能引起明显的水土流失。气候变暖导致融雪期提前^[32],进一步改变了流域内泥沙通量的季节性分配。

2.3 冻土冻融侵蚀 多年冻土区的产沙主要来源于两类过程。其一为活动层的季节性冻融侵蚀:冻结期孔隙水结冰产生胀裂,岩土体发生解体^[33];解冻期土体强度与黏聚力下降,浅表径流在陡坡与疏松覆盖物上迅速形成,易诱发坡面剥蚀、沟蚀与岸坡崩解,使悬移质含沙量升高^[34]。其二为富冰冻土解冻引发的热融灾害:地下冰消融后地表沉降,常伴随热融滑塌、热侵蚀沟、融冻泥流、热崩岸与热融沉陷等现象^[11];当地下冰融水与降雨在短时间内汇聚,沟槽迅速侵蚀扩展,坡面物源被集中向下输送,导致短时间内输沙量增加(图2)。

雅江流域约30%是多年冻土(多年冻土是地表下温度低于0℃、含有冰、并存在2年以上的岩、土层)^[11],主要分布在高寒谷坡、阶地边缘与河岸带,活动层浅、含冰量高,对温度与水分变化敏感^[35]。从空间格局看,冻融侵蚀易发区主要位于流域北部的高海拔带(约4500~6000 m),南部湖盆与谷地相对较弱^[36]。在这些地质地形条件下,春末至夏初的解冻期往往与融雪和早汛降雨同时出现,加速了近地表冻土的消融过程。此时,短历时的强径流易在支沟源区与阶地边缘诱发热侵蚀沟和热融滑塌,使大量细粒物源迅速汇入河道^[2]。在暖湿降雨时段,多年冻土的融化深度和活动层厚度会明显增加,且增幅为每10年0.1 m^[28],同时年均融冰量约为2.97 kg/m²^[37]。这些变化导致热融灾害的扩张,岸线后退、坡脚失稳,沿河阶地及工程走廊常出现季节性冻胀融沉、多年期沉降、以及突发热融灾害^[33,38]。这些过程一方面增加了松散物质的供给,另一方面也加强了坡面与河道的水力联系,使泥沙更容易进入河流并被输送至下游^[39]。同时,局部人类活动如道路切坡、场地开挖与过度放牧减少了植被覆盖,增加了地表吸热与产流系数,会进一步增加解冻期的河流输沙量^[40]。

2.4 突发地质灾害 雅江下游的大拐弯地区地质灾害频发,地震、强降雨和冰川消融等因素常引发冰崩、滑坡、泥石流等突发地质灾害,大量松散岩屑和泥沙被迅速输入到河道系统,成为流域主要的泥沙来源。已有研究基于元素示踪结果^[41]表明,该区域贡献了雅江流域总泥沙通量的约90%,是全流域最重要的产沙区。这些地质灾害使河流泥沙通量在短时间内激增数个数量级,引发下游泥沙淤积、河流改道等次生灾害,对工程安全构成严重威胁^[5,42-44]。

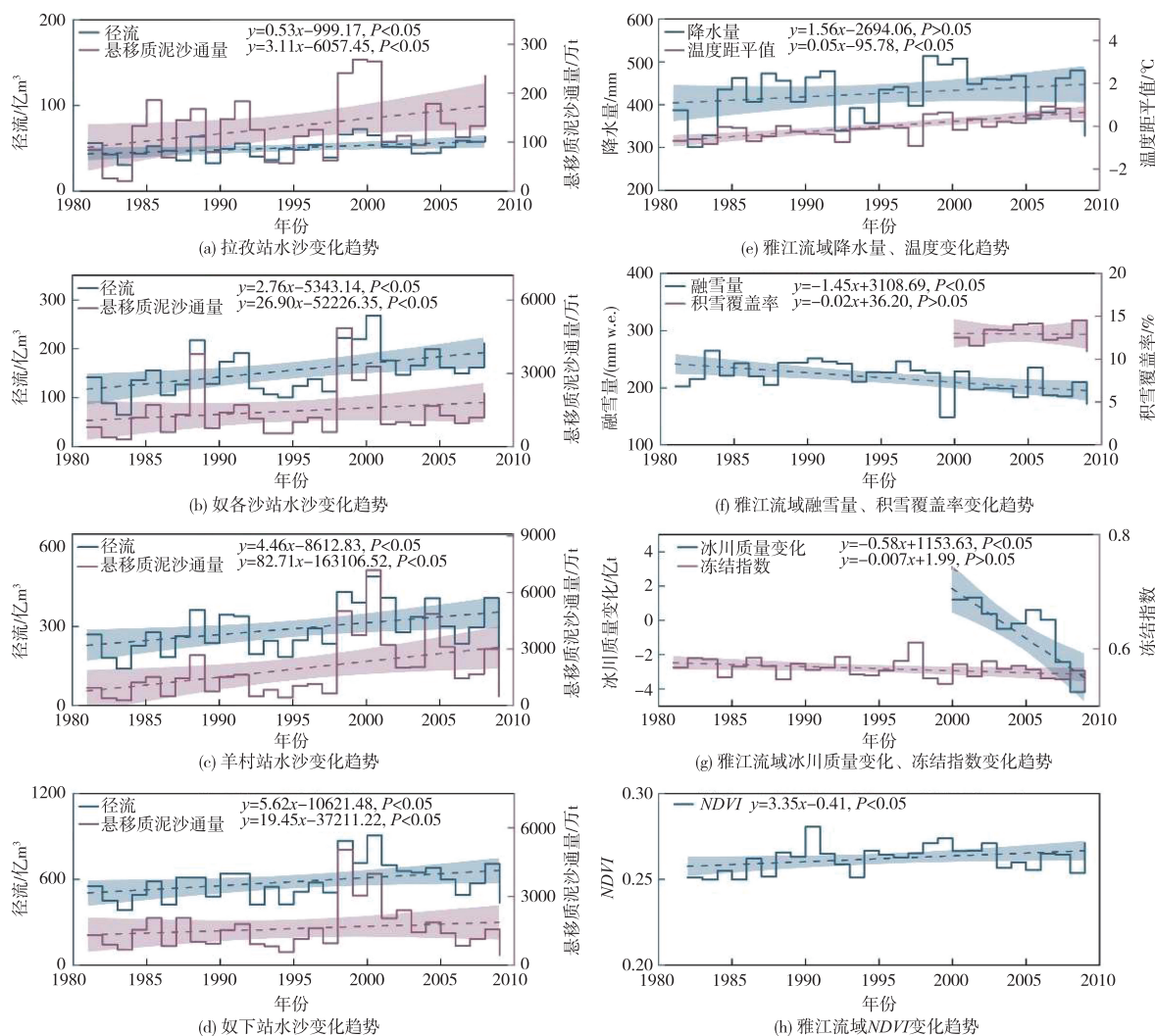
泥石流,特别是冰川泥石流,是雅江下游最具代表性的地质灾害类型之一。融水、暴雨或持续降水使地表土壤饱和,引发泥石流,将大量泥沙、砾石甚至巨石携带入河,短时间内显著增加泥沙通量并冲击下游河段与沿岸地区。与普通泥石流相比,冰川泥石流具有更强的突发性和破坏性,其能量来源不仅包括降雨径流,还包括冰川融水和冰湖溃决洪水的集中释放,这显著增强了侵蚀与搬运能力,导致河道形态在极短时间内发生剧烈调整^[45]。2009年,边坝县错嘎湖发生溃决,洪水引发泥石流,导致下游沟谷强烈下切与岸坡坍塌,并改变了局地河道形态^[46]。天摩沟冰川(西藏波密县)在过去二十多年多次发生泥石流,其中2018年7月11日,由冰川前缘崩滑、冰碛物与降雨共同作用触发,冰川运动流速高达 $0.80\pm 0.02\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,加剧了物源不稳定与灾害风险^[47]。这些典型事件表明,在气候变暖和极端天气频发背景下,冰川消融与暴雨的共同作用增加了下游地质灾害风险,对流域防灾减灾和工程安全提出更高要求。

此外,雅江流域毗邻喜马拉雅造山带,受冰川消融、强降雨及地震等作用影响,极易发生高位远程地质灾害^[48]。此类灾害会将大量土体和岩石高速输送入河,显著增加泥沙通量,并可能造成短时堵江、形成堰塞湖及溃决洪水等次生灾害,对流域工程安全构成严重威胁^[49-50]。这类灾害多发生于高山峡谷地段,具高速、远程输移和高含沙特征,可在短时间内将大量固体物质输送至下游,对河道稳定

性、水库运行及沿岸居民区造成严重威胁^[48]。例如，2000年波密县易贡滑坡体积约2.8亿~3.0亿m³，滑程约8 km，形成库容约2.88亿m³的堰塞湖，是典型的高位滑坡—堵江—溃决灾害^[51]；2018年林芝市色东普沟连续发生冰崩—堵江—溃决事件，运动距离超过8 km，堰塞湖在堵江56 h后漫顶溃决，对下游居民区与基础设施造成严重威胁^[52]；2020年米林直白沟在强降雨条件下发生大型滑坡，崩滑物经后续降雨多次冲刷与再搬运，短期内诱发了主槽形态的反复调整^[46]。这些高位远程地质灾害通过瞬时释放巨量物源，显著增加了雅江下游的产沙强度与泥沙通量波动，是流域极端泥沙事件的重要驱动机制。

3 雅江泥沙演变规律及机理

3.1 时间变化 在1981—2009年期间，雅江流域水沙通量变化显著，且各区域变化趋势存在差异（图3(a)—(d)）。上游拉孜水文站多年平均径流量为50亿m³，多年平均输沙量为131万t，径流和悬移质泥沙通量呈稳定的上升趋势。中游奴各沙水文站和羊村水文站的多年平均径流量分别为154亿和294亿m³，多年平均输沙量分别为1429万和1960万t。下游奴下水文站多年平均径流量为587亿m³，多年平均输沙量为1623万t，径流和悬移质泥沙通量表现出显著上升趋势。



注:图中虚线表示趋势线,阴影部分为95%的置信区间。

图3 雅江流域水沙通量及气候环境因子变化趋势

Fig. 3 Trends in water-sediment and hydrometeorological factor changes in the YTR Basin

同期,雅江流域的水文气候条件也发生着显著变化(图3(e)(f))。气温呈现明显的上升趋势,年均增幅为 0.05°C ,而降水量的变化趋势不显著。积雪覆盖率从2000年的13%下降至2009年的11%,变化较为平缓。相比之下,融雪量则发生了显著变化,从1981年的202 mm w.e.(millimeter water equivalent,毫米水当量)逐步减少至2009年的171 mm w.e.,呈现持续下降的趋势。此外,冰川质量负增长,年均减少0.5亿t,而冻结指数(即每年冻土层的冻结周期,反映冻土层的稳定性)也呈下降趋势。

气温升高加速冰川和积雪消融,增加春夏融水季的悬移质泥沙通量。降水增加增强降雨侵蚀作用,尤其突发性的强降水往往导致泥沙的剧烈波动^[15]。冻结指数下降表明雅江流域冻土发生了显著退化,可能导致冻土解冻时期局部侵蚀加剧^[35]。雅江流域气温升高、降水增加、冰雪和冻土的变化共同驱动了悬移质泥沙通量的显著增加^[19,22]。但是,雅江中游在2010年之后陆续建坝(如藏木、加查等),导致奴下水文站2010年之后的悬移质泥沙通量呈下降趋势^[53]。

3.2 空间分布特征 雅江流域的含沙量在干流上的分布呈现显著的空间异质性^[53]。随着流域内各主要支流的汇入,干流含沙量和通量整体累积增加,这一过程受到冰冻圈退化、地形、降水量、植被覆盖率、连通性和人类活动的多重影响,在上游、中游及下游区域表现出不同的泥沙源汇模式^[9](图4)。

流域含沙量的空间异质性受自然因素与人为活动的综合作用^[12]。具体而言,拉孜水文站(上游)由于降水量较少,温度较低,侵蚀作用相对较弱,因此悬移质泥沙通量仅为130万t(1981—2009年);至奴各沙水文站(中游)显著上升至1400万t,增长率高达约980%,表明流域中部受冰雪融水与降水共同驱动的产沙强度显著增加;羊村水文站进一步上升至2000万t,增长率约为43%,悬移质泥沙通量在此达到(大拐弯以上)流域峰值;至奴下水文站,通量下降至1600万t,下降幅度约17%,与河道展宽、水流减缓、水库拦沙效应及泥沙沉积过程共同作用有关(图4(c))。其中,中游的深厚覆盖层为长期泥沙淤积与多次堰塞湖沉积的结果^[54]。下游巴昔卡附近的年均悬移质泥沙通量约为2亿t,而奴下水文站至巴昔卡的大峡谷地区贡献了雅江流域总泥沙通量的约90%^[41]。

此外,人类活动如农业耕作、土地开垦和放牧活动等,加剧了局部地区的土壤侵蚀,导致植被稀疏区域的含沙量波动更大^[55]。总体来看,雅江流域含沙量呈现上游较低(拉孜以上河段)、中游先升高后降低(拉孜—奴下河段)、下游逐渐升高的变化趋势(奴下—巴昔卡河段),这一空间分布受气候植被、冰冻圈、地形特征、地质灾害和人类活动等多重因素的共同影响^[22,43,55](图4)。

4 雅江泥沙演变的影响及对策

作为青藏高原典型的冰冻圈主导型流域,雅江不仅是青藏高原“生态安全屏障”和“亚洲水塔”的核心区,也承担着区域水资源配置、水电能源开发、生态稳定维系与社会经济繁荣的重要功能^[4,42,56]。在气候变暖与人类活动双重驱动下,流域冰雪消融加剧、冻土退化加快,极端地质灾害发生频率上升,叠加基础设施建设加速推进,共同导致流域泥沙通量及其时空分布格局发生显著变化,水沙过程呈现出更强的非线性、突发性与区域异质性^[1,11]。

流域泥沙变化作为多圈层相互作用的结果,是影响工程安全、水生态系统稳定性及碳循环的重要因子之一^[10]。泥沙问题的复杂性,不仅体现为其来源和输移过程的多元性与不确定性,更在于其与气候、冰冻圈、生态系统及社会经济系统之间的深层耦合机制。因此,亟需在系统识别泥沙通量变化影响机制的基础上,构建全过程、多要素的泥沙观测—模拟—调控体系,推动形成以“多圈层耦合—多目标权衡—多系统协同”为核心的冰冻圈流域系统科学研究范式。

4.1 水沙变化对工程系统与生态的影响 雅江流域泥沙通量的动态变化,在短期内可能通过极端泥沙事件、水体浑浊度升高等过程,对小型水利设施和道路桥梁等基础设施安全、水质和水生态系统安全构成一定风险;从长期看,其对河流洪水、水库库容及水体碳循环产生影响^[10,27,57]。突发地质灾害和极端泥沙事件能够破坏小型水电站和道路桥梁等涉水工程。近年来,冰湖溃决洪水引发的泥石流已经

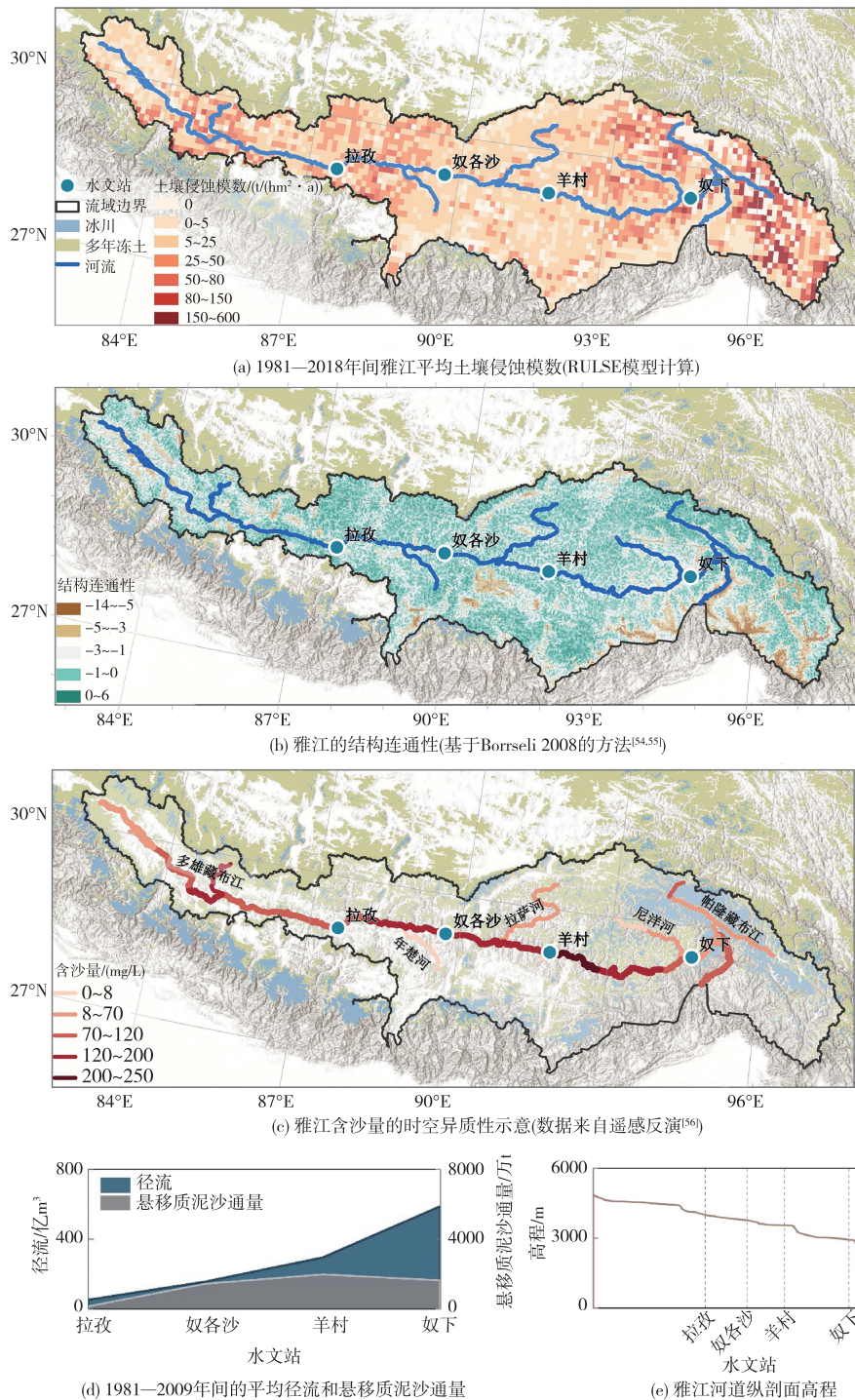


图4 雅江流域河流泥沙源汇空间格局

Fig. 4 Spatial pattern of sediment sources and sinks in the YTR Basin

导致多个小型水电站被冲毁^[10]。此外，融水变化导致的泥沙季节性波动加大，使得河道的形态发生变化，进而影响水生生物栖息地和生态系统的结构与功能^[31]。泥沙的增加可能导致水体浑浊，阳光被阻挡，进而影响水中光合作用和溶解氧，改变水质以及底栖动物和鱼类的生存条件^[31]。特别是在高山河流，细颗粒泥沙沉积可能掩埋鱼卵，降低部分鱼类的繁殖数量^[31]。

然而，泥沙变化的影响也并非全然负面。在部分高寒流域，泥沙输入可维持河道自然演化与下游湿地补给；粗颗粒沙源的累积也能缓解局地建筑材料和砂石资源紧张^[58]。此外，泥沙所携带的有机碳是陆地-河流连续体碳循环的重要组成部分，对流域碳收支及区域碳汇功能具有潜在贡献^[14,59]。因此，

亟需厘清泥沙对工程系统、河湖水质、生态系统和碳循环的综合影响机制，在此基础上，强化利弊权衡与系统调控能力，支撑流域多功能协调发展和水沙资源的高效利用。

4.2 构建冰冻圈流域泥沙综合监测与水沙模拟体系 雅江流域土壤侵蚀模数高、泥沙来源复杂、河流泥沙通量变化快，并对下游水电开发和生态环境保护有较大影响，但仍面临着泥沙监测数据时间短、范围小，推移质泥沙监测能力不足等问题，亟需构建基于水文观测-示踪-遥感-AI技术的“天-空-地”一体化的泥沙来源-输移-沉积全过程综合监测体系。建议通过野外资料观测、元素示踪、无人机、遥感GIS技术和AI等手段，构建从冰川到冻土坡面到河道的水沙要素、冰冻圈要素(冰川-冻土-积雪)和气候植被要素等多要素连续观测网络，同步监测流量、含沙量、推移质输沙率、泥沙粒径、气象、植被、冰川运动、冻土活动层厚度及土壤水热等环境要素，量化不同产沙区对泥沙通量的相对贡献，系统揭示气候、冰冻圈、植被和地质灾害协同变化对流域泥沙过程影响的机制。

作者团队提出了针对冰冻圈流域能同时考虑动态泥沙来源和河流输沙能力变化的泥沙通量模拟理论框架，开发了适合冰冻圈流域河流输沙的SAT模型(Sediment-Availability-Transport Model)，模拟结果较经典水沙关系曲线方法有明显提升，并能有效模拟事件尺度中泥沙输移的复杂动态过程^[31,60]。未来建议构建冰川区和多年冻土区流域侵蚀输沙模型，通过耦合分布式流域水循环模型和河流输沙模型，研发适合冰冻圈流域的多过程耦合分布式水沙产输动力学模型。

4.3 建立雅江流域系统科学研究新范式 在气候变化、冰冻圈退化和人类活动的共同驱动下，雅江流域泥沙演变呈现出高度非线性、突发性、区域异质性以及多因子耦合驱动与多尺度响应的特征，传统以单要素、单目标为导向的研究范式难以适应水电开发背景下的水沙适配性调控需求^[10]。借鉴流域系统科学理论^[4,57,61-62]，本研究提出构建面向多圈层交互作用和“水-沙-能-粮-生”多维功能协同的雅江流域系统科学研究新范式(图5)。将流域泥沙产输过程视为由冰冻圈、水圈、大气圈、生物圈、岩石圈与人类圈交互作用的纽带，重点识别冰川消融、冻土退化、径流变化、坡面侵蚀、泥沙输移及生态响应等关键过程的耦合机制。在此基础上，构建“天-空-地”一体化协同观测体系，推进“水-风-光-储”一体化发展，融合人工智能、遥感、无人机平台、自动站与原位采样等技术手段，提升对圈层界面与多过程交互的智慧感知能力；同时，研发集成冰冻圈产流产沙模型、能源粮食系统模型、生态系统响应模型与人类活动干扰模型的“雅江系统模拟器”，实现多圈层、多过程、多目标协同下的复杂系统建模与情景推演。新范式着力建立面向系统整体性、功能耦合性与调控适配性的研究框架，为提升流域协同保护能力与气候变化适应水平提供理论基础与技术支持。

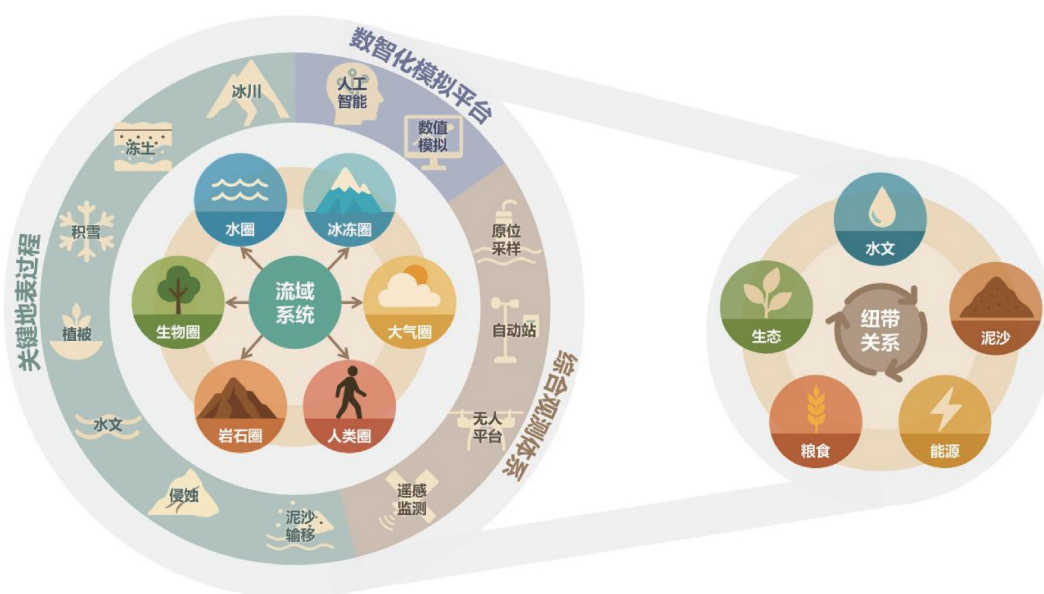


图5 雅江流域系统科学研究框架

Fig. 5 A systems science research framework for the YTR Basin

5 结论

本研究系统论述了雅江流域泥沙的主要产沙机制、输沙量演变规律及其对工程系统和生态环境的影响。主要结论如下：(1)雅江流域泥沙来源多元、产沙机制复杂，受降雨、冰川、融雪、冻融侵蚀及突发地质灾害等多过程共同控制。气候变化和冰冻圈退化背景下，边坡失稳-溃决洪水-极端泥沙事件的交互作用与级联关系显著增强。(2)流域内含沙量和输沙量在上游、中游和下游地区呈现显著空间异质性。上游(拉孜以上)温度较低、降水较少，含沙量和输沙量整体较小；中游(拉孜-奴下)长期泥沙淤积与多次堰塞湖沉积导致形成深厚覆盖层；下游(奴下-巴昔卡)受冰川侵蚀与突发地质灾害影响，产沙强度最高。观测表明，拉孜至羊村段泥沙通量增加约15倍，而奴下至巴昔卡河段贡献了全流域约90%的年均泥沙通量，是雅江最主要的产沙区。(3)雅江泥沙演变在一定程度上影响涉水工程安全、水库库容、水轮机磨损、洪水、水质、生态系统稳定性和水体碳循环。(4)未来建议构建泥沙来源-输移-沉积全过程监测体系，研发冰冻圈流域分布式水沙模型，加强以泥沙为纽带的多圈层交互作用机理、水-沙-能-粮-生系统耦合模拟与适应性调控研究，推动雅江流域系统科学研究新范式，研发“雅江系统模拟器”，优化水电开发与生态保护协同策略，应对气候变化和人类活动带来的新挑战。

参 考 文 献：

- [1] LI D F, LU X X, OVEREEM I, et al. Exceptional increases in fluvial sediment fluxes in a warmer and wetter High Mountain Asia[J]. *Science*, 2021, 374(6567): 599–603.
- [2] ZHAO Y, LI D F. Accelerated permafrost thaw linked to rising river temperature and widening channels[J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, 52: e2024GL112752.
- [3] LI D F, OVEREEM I, KETTNER A J, et al. Air temperature regulates erodible landscape, water, and sediment fluxes in the permafrost-dominated catchment on the tibetan Plateau[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(2): e2020WR028193.
- [4] 胡春宏, 郑春苗, 王光谦, 等. “西南河流域区径流变化和适应性利用”重大研究计划进展综述[J]. *水科学进展*, 2022, 33(3): 337–359. (HU C H, ZHENG C M, WANG G Q, et al. Reviews of the major research plan “runoff change and its adaptive management in the source region of major rivers in Southwestern China” [J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(3): 337–359. (in Chinese))
- [5] 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. (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[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1220–1232. (in Chinese))
- [6] 姚檀栋, 王伟财, 杨威, 等. 亚洲水塔失衡与冰雪变化[J]. *气候变化研究进展*, 2024, 20(6): 689–698. (YAO T D, WANG W C, YANG W, et al. Imbalance of the Asian Water Tower characterized by glacier and snow melt[J]. *Climate Change Research*, 2024, 20(6): 689–698. (in Chinese))
- [7] 张凡, 史晓楠, 曾辰, 等. 青藏高原河流输沙量变化与影响[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1274–1284. (ZHANG F, SHI X N, ZENG C, et al. Variation and influence of riverine sediment transport from Tibetan Plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1274–1284. (in Chinese))
- [8] YAO T D, BOLCH T, CHEN D L, et al. The imbalance of the Asian water tower[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 618–632.
- [9] LI Y Y, ZHANG T, ZHAO Y, et al. Impact of climate change and vegetation greening on sediment transport in the Yarlung Tsangpo River[J]. *Catena*, 2025, 261: 109557.
- [10] LI D F, LU X X, WALLING D E, et al. High Mountain Asia hydropower systems threatened by climate-driven landscape instability[J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15(7): 520–530.
- [11] ZHANG T, LI D F, EAST A E, et al. Warming-driven erosion and sediment transport in cold regions[J]. *Nature*

Reviews Earth & Environment, 2022, 3(12): 832–851.

- [12] 王光谦, 方红卫, 倪广恒, 等. 大江大河源区河网结构与径流特性研究前沿和重要基础科学问题[J]. 中国科学基金, 2016, 30(1): 27–33. (WANG G Q, FANG H W, NI G H, et al. River networks and runoff characteristics in Tibetan Plateau: advancements and future strategies[J]. Fundamental Research, 2016, 30(1): 27–33. (in Chinese))
- [13] 欧阳文宇, 张弛, 马昊然, 等. 人工智能驱动水文预报与水库调度研究的探索与思考[J]. 水利学报, 2025, 56(9): 1119–1131. (OUYANG W Y, ZHANG C, MA H R, et al. Exploration and consideration of AI-driven hydrological forecasting and reservoir operation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(9): 1119–1131. (in Chinese))
- [14] TIAN S, SHA A M, LUO Y Z, et al. A novel framework for river organic carbon retrieval through satellite data and machine learning[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2025, 221: 109–123.
- [15] DENG R, LI D F, ZHAO Y, et al. Intensified rainfall overrides vegetation greening in driving erosion and carbon loss on the Tibetan Plateau[J]. Science Bulletin, 2025, 70(2): 3698–3702.
- [16] 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 [J]. Earth-Science Reviews, 2022, 226: 103932.
- [17] 覃超, 吴保生, 汪舸, 等. 青藏高原山区河流广义河相关系与多频率沿程河相关系[J]. 水利学报, 2022, 53(2): 176–187. (QIN C, WU B S, WANG G, et al. Generalized hydraulic geometry and multi-frequency downstream hydraulic geometry of mountain rivers originated from the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(2): 176–187. (in Chinese))
- [18] HERMAN F, DE DONCKER F, DELANEY I, et al. The impact of glaciers on mountain erosion[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(6): 422–435.
- [19] LI J L, WANG G X, SONG C L, et al. Recent intensified erosion and massive sediment deposition in Tibetan Plateau rivers[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 722.
- [20] 魏梦美, 符素华, 刘宝元. 青藏高原水力侵蚀定量研究进展[J]. 地球科学进展, 2021, 36(7): 740–752. (WEI M M, FU S H, LIU B Y, et al. Quantitative research of water erosion on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(7): 740–752. (in Chinese))
- [21] HASSON M, FINOTELLO A, IELPI A, et al. Vegetation changes the trajectory of river bends[J]. Science, 2025, 389(6763): 915–920.
- [22] LI D F, ZHANG T, WALLING D E, et al. The competing controls of glaciers, precipitation, and vegetation on high-mountain fluvial sediment yields[J]. Science Advances, 2024, 10(48): eads6196.
- [23] 褚佳琦, 严平, 苏志珠, 等. 雅鲁藏布江米林段爬坡沙丘形态演变及移动规律[J]. 中国沙漠, 2024, 44(6): 220–230. (ZHU J Q, YAN P, SU Z Z, et al. Morphological evolution and migration characteristics of a climbing dune in Mainling Great Valley section of Yarlung Zangbo River[J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(6): 220–230. (in Chinese))
- [24] 姚檀栋, 李治国, 杨威, 等. 雅鲁藏布江流域冰川分布和物质平衡特征及其对湖泊的影响[J]. 科学通报, 2010, 55(18): 1750–1756. (YAO T D, LI Z G, YANG W, et al. Glacial distribution and mass balance in the Yarlung Zangbo River and its influence on lakes[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(18): 1750–1756. (in Chinese))
- [25] PATTON H, HUBBARD A, HEYMAN J, et al. The extreme yet transient nature of glacial erosion[J]. Nature Communications, 2022, 13: 7377.
- [26] ZHENG G X, ALLEN S K, BAO A M, et al. Increasing risk of glacial lake outburst floods from future Third Pole deglaciation[J]. Nature Climate Change, 2021, 11(5): 411–417.
- [27] BAI Y Y, LI D F, WANGCHUK S, et al. Flood complexity and rising exposure risk in High Mountain Asia under climate change[J]. Science Bulletin, 2025, 70(10): 1601–1604.
- [28] KOPPES M, HALLET B, RIGNOT E, et al. Observed latitudinal variations in erosion as a function of glacier dynamics[J]. Nature, 2015, 526(7571): 100–103.
- [29] ZHENG G X, MERGILI M, EMMER A, et al. The 2020 glacial lake outburst flood at Jinwuco, Tibet: Causes,

- impacts, and implications for hazard and risk assessment[J]. *The Cryosphere*, 2021, 15(7): 3159–3180.
- [30] WU Z L, FANG H Y. Snowmelt erosion: A review[J]. *Earth–Science Reviews*, 2024, 250: 104704.
- [31] ZHANG T, LI D F, EAST A E, et al. Shifted sediment–transport regimes by climate change and amplified hydrological variability in cryosphere–fed rivers[J]. *Science Advances*, 2023, 9(45): eadi5019.
- [32] HAN J T, LIU Z W, WOODS R, et al. Streamflow seasonality in a snow–dwindling world[J]. *Nature*, 2024, 629(8014): 1075–1081.
- [33] DOBIŃSKI W. Permafrost active layer[J]. *Earth–Science Reviews*, 2020, 208: 103301.
- [34] GANTI V, WHITTAKER A C, LAMB M P, et al. Low–gradient, single–threaded rivers prior to greening of the continents[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(24): 11652–11657.
- [35] ZHAO Y, NAN Z T, JI H L, et al. Convective heat transfer of spring meltwater accelerates active layer phase change in Tibet permafrost areas[J]. *The Cryosphere*, 2022, 16(3): 825–849.
- [36] 欧阳琰, 沈渭寿, 杨凯, 等. 近 20a 雅鲁藏布江流域冻融侵蚀演变趋势[J]. *山地学报*, 2014, 32(4): 417–422. (OUYANG Y, SHEN W S, YANG K, et al. The trend of freeze–thaw erosion in Yarlung Zangbo River Basin in nearly twenty years[J]. *Mountain Research*, 2014, 32(4): 417–422. (in Chinese))
- [37] 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.
- [38] BISKABORN B K, SMITH S L, NOETZLI J, et al. Permafrost is warming at a global scale[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 264.
- [39] PFEIFFER A M, COLLINS B D, ANDERSON S W, et al. River bed elevation variability reflects sediment supply, rather than peak flows, in the uplands of Washington State[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(8): 6795–6810.
- [40] HJORT J, STRELETSKIY D, DORÉ G, et al. Impacts of permafrost degradation on infrastructure[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(1): 24–38.
- [41] DONG X L, HU X M, GARZANTI E, et al. The extraordinary Namche Barwa sediment factory in the Eastern Himalayan Syntaxis[J]. *Basin Research*, 2023, 35(6): 2193–2216.
- [42] 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[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1313–1321. (CUI P, GUO X J, JIANG T H, et al. Disaster effect Induced by Asian Water Tower change and mitigation strategies[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1313–1321. (in Chinese))
- [43] 王岩, 王昊, 崔鹏, 等. 气候变化的灾害效应与科学挑战[J]. *科学通报*, 2024, 69(2): 286–300. (WANG Y, WANG H, CUI P, et al. Disaster effects of climate change and the associated scientific challenges[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(2): 286–300. (in Chinese))
- [44] 崔鹏, 王岩, 张国涛, 等. 气候变化灾害风险防范: 现状、挑战与科学问题[J]. *气候变化研究进展*, 2025, 21(4): 449–460. (CUI P, WANG Y, ZHANG G T, et al. Disaster risk prevention under climate change: current status, challenges, and scientific issues[J]. *Climate Change Research*, 2025, 21(4): 449–460. (in Chinese))
- [45] 高少华, 殷跃平, 李滨, 等. 雅鲁藏布江大峡谷则隆弄高位冰岩崩灾害链动力学特征[J]. *工程地质学报*, 2024, 32(3): 996–1009. (GAO S H, YIN Y P, LI B, et al. Dynamic characteristics of the rock–ice avalanche disaster chain in the Zelongnong Basin, Yarlung Zangbo River Canyon Region[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32(3): 996–1009. (in Chinese))
- [46] 年廷凯, 赵润东, 郑德凤, 等. 藏东南雅江流域冰–岩崩灾害链研究进展[J]. *水利学报*, 2024, 55(10): 1146–1162. (NIAN K T, ZHAO R D, ZHENG D F, et al. Advances in the study of ice–rock avalanche disaster chains in Yarlung Zangbo River Basin in southeast Tibet[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, 55(10): 1146–1162. (in Chinese))
- [47] 徐浩栋, 李佳, 吴立新, 等. 西藏天摩沟冰川遥感监测及泥石流触发成因分析[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(6): 2370–2385. (XU H D, LI J, WU L X, et al. Monitoring the glaciers with remote sensing techniques to investigate the triggering mechanism of debris flow in Tianmogully, Tibet[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(6): 2370–2385. (in Chinese))

- [48] 殷跃平, 高少华. 高位远程地质灾害研究: 回顾与展望[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 1–18. (YIN Y P, GAO S H. Research on high-altitude and long-runout rockslides: Review and prospects[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(1): 1–18. (in Chinese))
- [49] 贾洋, 崔鹏. 西藏冰湖溃决灾害事件极端气候特征[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(4): 395–404. (JIA Y, CUI P. The extreme climate background for glacial lakes outburst flood events in Tibet[J]. Climate Change Research, 2020, 16(4): 395–404. (in Chinese))
- [50] 倪晋仁. 论泥沙灾害学体系建立的理论基础[J]. 应用基础与工程科学学报, 2003(1): 1–9. (NI J R. On the new discipline of sediment disaster[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2003(1): 1–9. (in Chinese))
- [51] 张明, 殷跃平, 吴树仁, 等. 高速远程滑坡-碎屑流运动机理研究发展现状与展望[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 805–817. (ZHANG M, YIN Y P, WU S R, et al. Development Status and Prospects of Studies on Kinematics of Long-Runout Rock Avalanches[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 805–817. (in Chinese))
- [52] 刘传正, 吕杰堂, 童立强, 等. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江灾害初步研究[J]. 中国地质, 2019, 46(2): 219–234. (LIU C Z, LÜ J T, TONG L Q, et al. Research on glacial/rock fall-landslide-debris flows in Sedongpu basin along Yarlung Zangbo River in Tibet[J]. Geology in China, 2019, 46(2): 219–234. (in Chinese))
- [53] ZHAO D, HE K, XIONG D, et al. Dam-induced alternations of flow and sediment regimes in the Tibetan Plateau: An example of the Yarlung Tsangpo River[J]. Water Resources Research, 2025, 61(5): e2024WR039016.
- [54] 罗玉龙, 张兴杰, 张海彬, 等. 深厚覆盖层地基潜蚀研究综述[J]. 岩土力学, 2022, 43(11): 3094–3106. (LUO Y L, ZHANG X J, ZHANG H B, et al. Review of suffusion in deep alluvium foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(11): 3094–3106. (in Chinese))
- [55] PIAO S L, WANG X H, PARK T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(1): 14–27.
- [56] 胡春宏, 张晓明. 我国江河演变新格局与系统保护治理[J]. 中国水利, 2024(7): 1–8, 16. (HU C H, ZHANG X M. New pattern of river evolution and systematic protection and governance in China[J]. China Water Resources, 2024(7): 1–8, 16. (in Chinese))
- [57] 夏军, 占车生, 曾思栋, 等. 长江模拟器的理论方法与实践探索[J]. 水利学报, 2022, 53(5): 505–514. (XIA J, ZHAN C S, ZENG S D, et al. Theoretical method and practical exploration of Yangtze River Simulator construction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(5): 505–514. (in Chinese))
- [58] 胡修棉, 安慰, GARZANTI E, 等. 碰撞造山带海沟盆地的识别——以雅鲁藏布缝合带为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(12): 1893–1905. (HU X M, AN W, GARZANTI E, et al. Recognition of trench basins in collisional orogens: Insights from the Yarlung Zangbo suture zone in southern Tibet[J]. Science China Earth Sciences, 2020, 50(12): 1893–1905. (in Chinese))
- [59] BATTIN T J, LAUERWALD R, BERNHARDT E S, et al. River ecosystem metabolism and carbon biogeochemistry in a changing world[J]. Nature, 2023, 613(7944): 449–459.
- [60] ZHANG T, LI D F, KETTNER A J, et al. Constraining dynamic sediment-discharge relationships in cold environments: The sediment-availability-transport (SAT) Model [J]. Water Resources Research, 2021, 57(10): e2021WR030690.
- [61] 江恩慧, 屈博, 王远见, 等. 流域系统科学理论与方法解析——以黄河流域为例[J]. 水利学报, 2025, 56(5): 551–563. (JIANG E H, QU B, WANG Y J, et al. Theoretical and methodological analysis of watershed system science: A case study of the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(5): 551–563. (in Chinese))
- [62] 王浩, 王芳, 严登华, 等. 中华水塔面临的挑战与应对战略[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(6): 485–491. (WANG H, WANG F, YAN D H, et al. Challenges and coping strategies of China's Water Tower[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(6): 485–491. (in Chinese))

(下转第 781 页)