

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.039

赵怡,王宁练,吴松柏,等.七一冰川融水径流中悬移质与推移质动态输沙特征[J].水土保持学报,2024,38(5):236-243.

ZHAO Yi, WANG Ninglian, WU Songbai, et al. Dynamic characteristics of suspended load and bed load transport in meltwater runoff of Qiyi Glacier[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 236-243.

七一冰川融水径流中悬移质与推移质动态输沙特征

赵怡^{1,2}, 王宁练^{1,2}, 吴松柏^{1,2}, 张泉^{1,2}, 石晨烈^{1,2}, 赵明杰^{1,2}

(1.陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,西安 710127;2.西北大学城市与环境学院,
地表系统与灾害研究院,七一冰川观测基地,西安 710127)

摘要: [目的] 冰川融水输沙不仅可以反映冰川侵蚀速率,而且是下游河流泥沙的重要来源之一,因此,认识青藏高原地区冰川融水径流中悬移质和推移质动态输沙特征对于冰川地貌演化预测和下游防灾减灾工作具有十分重要的意义。[方法] 基于2023年8月11—24日七一冰川下游河道的水文泥沙实测数据,分别构建流量—水位、悬移质含沙量—流量和单宽推移质输沙率—水流剪切应力之间的相关关系,进而重建整个研究时段的流量、悬移质和推移质动态输沙过程。[结果] 七一冰川融水径流中悬移质含沙量和推移质输沙率受径流变化控制,日变化十分剧烈。悬移质含沙量每日最小值一般出现在10:00,最大值出现在16:00,中值粒径约为0.3 mm。推移质输沙过程与悬移质含沙量的日变化趋势基本相同,但推移质中值粒径远大于悬移质,约12 mm,而且在每日05:00—09:00时段,由于水流搬运能力的限制,没有推移质输沙。就输沙量而言,七一冰川融水输沙以悬移质泥沙为主,推移质日输沙量远小于悬移质日输沙量,约占悬移质日输沙量的1.73%~2.81%。冰面气温是影响冰川融水径流量、悬移质含沙量和推移质输沙率的关键因素,随着冰面气温的增加,径流量和悬移质含沙量均呈线性增加趋势而推移质输沙率呈指数函数增加趋势。[结论] 在未来气候变化情景下冰川融水径流增加时,七一冰川融水径流中悬移质和推移质输沙均将变得更加显著,值得更加重视。

关键词: 冰川融水径流; 推移质; 悬移质; 输沙特征; 气候变化

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242-(2024)05-0236-08

Dynamic Characteristics of Suspended Load and Bed Load Transport in Meltwater Runoff of Qiyi Glacier

ZHAO Yi^{1,2}, WANG Ninglian^{1,2}, WU Songbai^{1,2}, ZHANG Quan^{1,2}, SHI Chenlie^{1,2}, ZHAO Mingjie^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Institute of Surface Systems and Hazards, QiYi Glacier Station, Xi'an 710127, China)

Abstract: [Objective] The transportation of sediment via glacial meltwater can not only reflect the glacial erosion and landform evolution, but also is one of the important sediment sources for the downstream river. Thus, understanding the suspended sediment and bedload dynamics in glacier meltwater runoff on the Tibetan Plateau is significant for predicting glacier landform evolution and conducting downstream disaster prevention and mitigation efforts. [Methods] To achieve the goal, the variations of flow discharge, sediment concentration of suspended load, and bed load transport rate per unit width were monitored at the downstream channel of Qiyi Glacier in the Qilian Mountains from August 11 to 24, 2023. Based on the observed data, the relationship curves of flow discharge-water level, sediment concentration of suspended load-flow discharge, and unit bed load transport rate-flow shear stress were developed to obtain the variations of both water flow and sediment transport throughout the study period. [Results] The sediment concentration

收稿日期:2024-06-09 修回日期:2024-07-08 录用日期:2024-07-26 网络首发日期(www.cnki.net):2024-09-10

资助项目:国家自然科学基金项目(42130516,42007056);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK020102)

第一作者:赵怡(2000—),女,硕士研究生,主要从事青藏高原水沙研究。E-mail: zhaoyi20220222@163.com

通信作者:王宁练(1966—),男,教授,主要从事冰芯气候环境记录、冰川变化与水资源研究。E-mail: nlwang@nwu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

of suspended load and the bed load transport rate in the downstream channel of Qiyi Glacier are predominantly influenced by the variations in meltwater runoff, exhibiting pronounced daily fluctuations. The daily nadir of suspended sediment concentration is observed around 10:00, while the acme occurs around 16:00. The median particle size of the sediments is approximately 0.3 mm, indicating a fine-grained sediment composition. The variation trend of bed load transport rate versus time is almost the same to the suspended load, excepting at 05:00—09:00. During this period, there is no bed load in the channel since the flow shear stress is insufficient to mobilize and transport the bed load. Note that the median particle size of bed load is about 12 mm. The sediment transport in the downstream channel of Qiyi Glacier is primarily dominated by suspended sediment, and the daily sediment transport amount of bedload is much smaller than that of suspended sediment, accounting for only 1.73% ~ 2.81% of the daily sediment transport amount of suspended sediment. Air temperature of glacier is a critical factor influencing the flow discharge of glacier meltwater, the sediment concentration of suspended load, and the transport rate of bed load. Moreover, as air temperature of glacier rises, both the flow discharge and suspended sediment concentration display linear increasing trends, while the bed load transport rate exhibits an exponential increase. [Conclusion] This implies that, in future climate change scenarios, where the flow discharge of glacier meltwater increases, the suspended and bed loads transport within the Qiyi Glacier meltwater will become more significant and deserve more attentions.

Keywords: glacial meltwater runoff; bed load; suspended load; sediment transport; climate change

Received: 2024-06-09

Revised: 2024-07-08

Accepted: 2024-07-26

Online(www.cnki.net): 2024-09-10

近几年来,青藏高原河流输沙量的异常增加已引发全世界的强烈关注^[1-2]。有研究^[3-5]表明,冰川自身运动不断侵蚀基岩形成大量泥沙碎屑,再通过冰川融水输运排出,是下游河流泥沙的重要来源之一^[6-7]。而且,在当前全球变暖导致大多数冰川加速消融的背景下,冰川区泥沙贡献量可能进一步提升^[8-11]。这些泥沙一方面可以反映冰川侵蚀与地貌演化的速率^[3-5];另一方面,能为极端降雨情况下的泥石流灾害提供丰富的物源,影响下游牧场、道路、水库等基础设施的服务功能,威胁当地人民生命财产安全^[12-13]。因此,深入了解冰川融水径流动态输沙特征对于冰川地貌演化预测和下游防灾减灾具有十分重要的意义。

对于冰川融水径流中的悬移质输沙,国内外学者已开展较多研究。例如,STOTT等^[14]研究发现,随着气候变暖,阿尔卑斯山托朗冰川融水径流量和悬移质输沙量显著提高,2003年消融季平均气温比2004年的高1.2℃,对应平均径流量高2.3倍,悬移质输沙量高3.1~4.1倍;DELANEY等^[8]和赵艳霞等^[15]研究发现,消融季冰川融水径流量与悬移质输沙两者的变化趋势基本一致,均在消融季开始后逐渐增加,达到峰值后转而呈下降趋势。值得注意的是,上述关于悬移质输沙特征的研究取样频率较粗,主要关注季节或年尺度,而对其日变化特征的描述较少,事实上消融季冰川融水径流日变化十分剧烈,缺乏日尺度的研

究可能忽略一些关键过程。推移质泥沙粒径较粗,对下游牧场、道路、水库等基础设施的影响较悬移质泥沙更大,但由于复杂自然环境和观测条件的限制,冰川融水径流中推移质输沙常被忽略。近年来,仅少数国外学者才开始关注冰川融水径流中的推移质输沙。例如,COVIELLO等^[16]通过地震波反演冰川融水径流中的推移质输沙过程发现,推移质输沙率与径流量密切相关;PEROLO等^[17]研究发现,冰川补给河流的推移质输沙率相对于径流量变化有一定的滞后性。但目前这些工作主要是在冰川融水径流的推移质输沙与径流的关系方面进行一些尝试,而关于推移质输沙的日变化过程、级配特征及其与悬移质输沙的关系研究尚不充分,而且国内关于这方面的研究仍属空白,亟需开展研究。

本研究以青藏高原北部边缘祁连山脉的七一冰川为例,在消融季对其融水径流、悬移质和推移质输沙过程进行监测,基于监测数据分别构建流量—水位、悬移质含沙量—流量和单宽推移质输沙率—水流剪切应力之间的相关关系,进而重建整个研究时段的流量、悬移质和推移质动态输沙过程。在此基础上,分析悬移质含沙量和推移质输沙率的日变化特征及其级配特征,探讨冰面气温和冰川融水径流量变化对悬移质和推移质输沙量的影响,揭示高寒山区冰川河流输沙特征及其对气候变化的响应机制。研究成果

以期能为我国高寒山区冰川补给河流的水沙预测、下游防灾减灾及工程建设提供科技支撑。

1 研究区概况

“七一冰川”(冰川目录编号:5Y437C18)地处甘肃省张掖市肃南裕固族自治县祁丰藏族乡的祁连山腹地,距离嘉峪关市区 116 km,冰川融水注入北大河支流柳沟泉河,研究区位置概况见图 1。根据第二次冰川编目,七一冰川面积为 2.53 km²,末端海拔 4 223.7 m,冰川最高峰海拔 5 114.7 m。七一冰川末端逐年退缩,物质亏损严重,冰川零平衡线持续上升,冰川的强烈消融同时也造成融水径流的普遍增加,但冰川融水径流输沙变化目前尚无系统观测^[18]。七一冰川规模较小,其按形态属冰斗-山谷型冰川,按冰川的物理特性分类,属于亚大陆型冰川。相对于海洋型冰川而言,亚大陆型冰川对气候变化响应偏慢,研究其融水径流中的悬移质和推移质输沙特征,对未来气候变化情景下青藏高原大陆型冰川融水径流输沙预测具有重要启示意义。



图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

2 数据与方法

七一冰川下游河道地形复杂且坡陡流急,为获取冰川融水径流和输沙过程,在七一冰川下游河道选择合适的位置设置水文监测断面,水文监测断面控制流域面积约为 12.45 km²,监测断面地形通过水尺获取,且于 8 月 11—15 日和 8 月 20—21 日,每日的 8:00, 11:00, 13:00, 15:00 和 17:00 在水文监测断面进行融水径流和输沙过程监测。首先,在水文监测断面上布设 7 条垂直测线,采用水尺和螺旋桨流速仪监

测各条测线处水深和纵向流速分布(图 2a)。同时,采用 1 000 mL 的塑料瓶对七一冰川融水径流中悬移质进行取样并保存,在陕西省地表系统与环境承载力重点实验室中烘干并称重,计算得到悬移质含沙量。最后,采用 Bunte 便携式推移质取样器(图 2b)对七一冰川融水径流输送推移质泥沙进行采样。Bunte 便携式推移质取样器框架长 0.3 m,宽 0.2 m,深 0.1 m,由 6.4 mm 厚的铸铁制成。取样器框架后挂有拖网,拖网由细尼龙纱钩织,网孔开度为 3.5 mm,这种开度既能有效减小水流对取样器的冲击力,又能保证细颗粒悬移质泥沙能够随水流通过拖网。采样时先将推移质捕集器平置在河床上,开始计时采样,进入取样器的推移质泥沙被拖网捕获。对捕获的推移质泥沙样品在实验室烘箱中烘干,而后进行称量,计算得到单宽推移质输沙率。为通过水位-流量关系曲线获取研究时段内详细径流过程,在 2023 年 8 月 11—24 日期间,采用 HOBO 水位计对水文监测断面处的水位进行实时监测。

同时,为了探究冰面气温变化对七一冰川融水径流和输沙的影响,在七一冰川表面海拔 4 499.5 m 处安装 ClimaVue™50 自动气象传感器(图 1),每 10 min 采样 1 次,该传感器使用 SDI-12 获取冰面气温数据,SDI-12 测量温度范围在 -50~60 °C,误差为 ±0.6 °C。

3 结果与分析

3.1 融水径流量与输沙日变化特征

为了获取整个观测时段内冰川融水径流的时间变化序列,根据水尺实测数据,建立监测断面水位流量关系曲线,结合 HOBO 水位计实时水位数据获取详细径流过程。其中,特定时间点实测水位与流量呈幂函数关系($r^2=0.96$)(图 3a)。具体关系式为:

$$Q=9.2h^{2.3} \quad (1)$$

式中: Q 为过水断面流量(m³/s); h 为水位(m)。

为了获取冰川融水径流中悬移质含沙量的变化过程,在前人^[19]研究的基础上,构建悬移质含沙量与流量之间的相关关系($r^2=0.72$)(图 3b)。具体表达式为:

$$SSC=0.32Q^{0.37} \quad (2)$$

式中: SSC 为悬移质含沙量(g/L)。

为了获取冰川融水径流中推移质输沙率的变化过程,前人^[20-21]研究表明,单宽推移质输沙率与床面水流剪切应力呈多项式关系,根据实测数据拟合得到的关系式为:

$$Q_b=6.9 \times 10^{-5} \tau(\tau-278.65) \quad (3)$$

式中: Q_b 为单宽推移质输沙率[kg/(m·s)]; τ 为径流剪切应力(N/m²),可表示为 $\tau=\rho gHS$; ρ 为水的密度(kg/m³); g 为重力加速度(N/kg); H 为径流深

(m),可基于断面地形数据与水位 h (m) 进行相互转换; S 为坡度,可表示为 $S = \tan \theta$ (—);(θ) 为坡度角

(°)。拟合结果图 3(c),计算值与实测值之间吻合良好,相关系数达到 0.66。

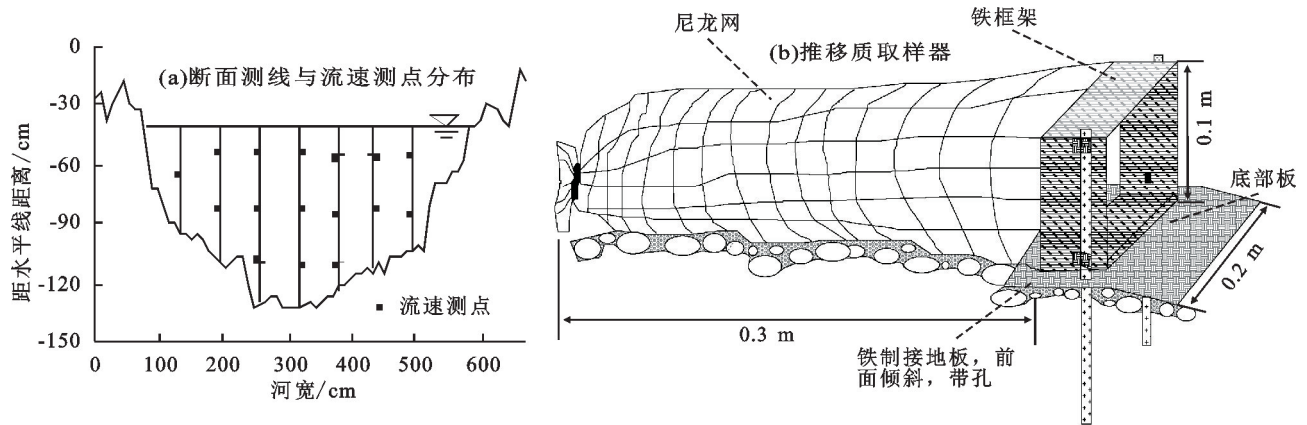
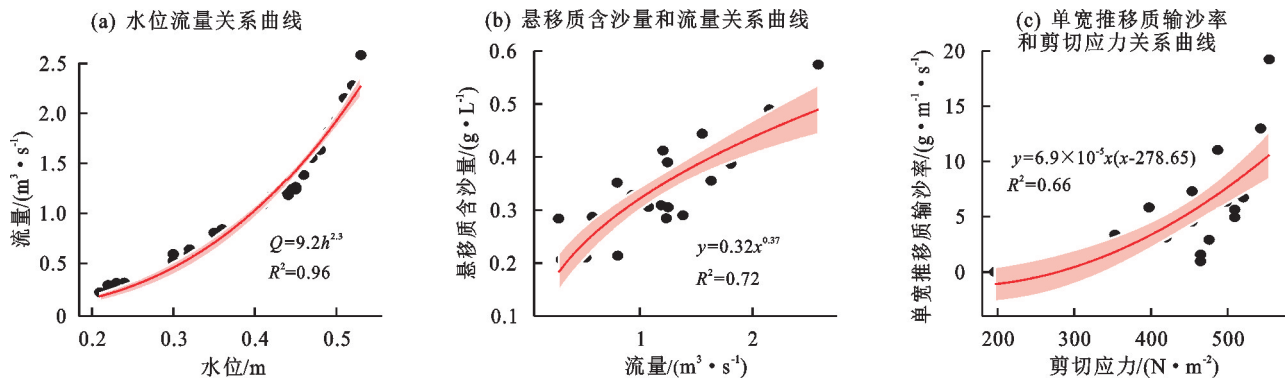


图2 水文监测断面、过程与部分监测设备

Fig. 2 Hydrological monitoring cross-section, process and some equipment



注:图中红色阴影区域表示对应拟合曲线的 95% 置信区间。

图3 径流输沙关系曲线

Fig. 3 Relation curves for glacier melt runoff and sediment transport

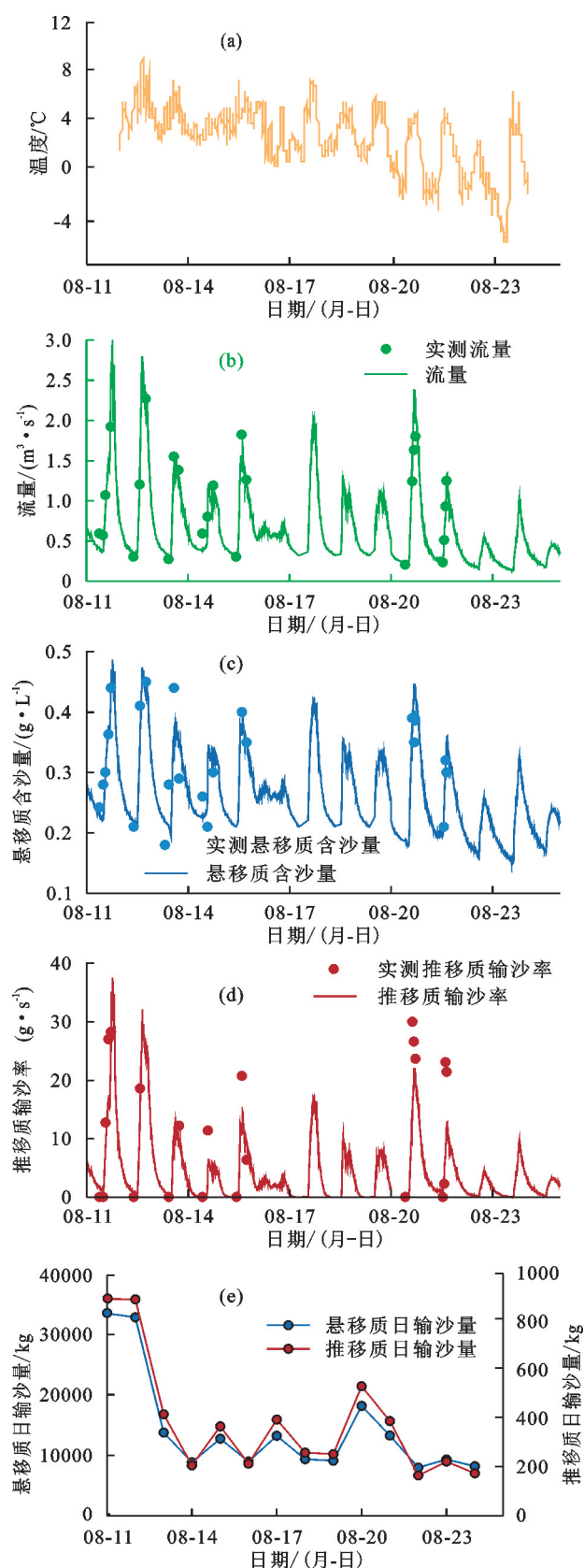
结合 HOBO 实测水位变化过程和图 3 中得到的水位-流量关系曲线、悬移质含沙量-流量关系曲线和推移质-水流剪切应力关系曲线,依次计算获取监测时段内水文监测断面处的融水径流量、悬移质含沙量和推移质输沙率随时间的详细变化过程,进而计算得到悬移质和推移质日输沙量,相关结果与实测冰面气温见图 4。

图 4a 为冰面气温的时间变化序列,冰面气温的观测时间段为 8 月 12—23 日。观测时段内,冰面气温最大值为 8.66 °C,出现的时间点为 8 月 12 日 15:50;最小值为 -5.91 °C,出现的时间点为 8 月 23 日的 06:10,整个观测时段内的冰面气温平均值为 2.36 °C。

由图 4b 可知,在无降雨影响情况下,融水径流量日变化情况为以夜晚 00:00 为界,径流量首先逐渐降低,再快速升高,到达峰值后,又呈快速降低趋势。研究时段内,最大流量出现在 8 月 11 日 18:20,为 3.00 m³/s,最小流量出现在 8 月 19 日 08:40,为 0.16 m³/s,平均流量为 0.66 m³/s。统计研究时段内每日最大和最小径流量出现的时间可知,最小值一般出现在 08:30—11:40,大多数集中在 10:00 左右;而最大值一般出现在 14:20—

19:00,大多数集中在 16:00。值得注意的是,不同日期的径流量日变化过程差异较大,本研究通过计算日径流量过程的标准差来表征其日内离散程度,如 8 月 11 日、12 日、17 日和 20 日融水径流过程的标准差相对较大,分别达到 0.49,0.60,1.16,0.46 m³/s,而 8 月 16 日、22 日、23 日和 24 日融水径流过程的标准差相对较小,分别为 0.003,0.01,0.08,0.02 m³/s。日径流过程的标准差出现较大差异的原因可能是因为冰川融水径流受到冰面气温、降水和太阳辐射双重因素共同影响下所造成。

图 4c 为七一冰川融水径流中悬移质含沙量时间变化序列。由图 4c 可知,8 月 11—24 日的悬移质含沙量在 0.15~0.49 g/L 变化,含沙量平均值约为 0.26 g/L。研究时段内,悬移质含沙量日内变化过程同样比较剧烈,8 月 11 日、12 日、17 日和 20 日每日最大含沙量与最小含沙量比值分别为 2.19,2.22,2.01 和 2.50。8 月 11 日和 12 日融水径流中悬移质含沙量较高,并且在 8 月 11 日 18:20 出现最大值,为 0.49 g/L,与出现融水径流量最大值的时间基本一致。



注: (a) 为冰面气温时间变化序列; (b) 为融水径流量时间变化序列; (c) 为悬移质含沙量时间变化序列; (d) 为推移质输沙率时间变化序列; (e) 为悬移质和推移质日输沙量对比。

图 4 研究时段内七一冰川冰面气温、融水径流与输沙过程
Fig. 4 The air temperature of glacier, melt runoff and sediment transport processes of Qiye Glacier in the study period

推移质输沙率随时间的变化过程见图 4d。整体而言,推移质日内输沙过程与径流量和悬移质含沙量的变化趋势基本相同,8月 11—24 日的推移质输沙率在 $0 \sim 37.57 \text{ g/s}$ 变化,输沙率平均值为 4.33 g/s ,但在某些时间段没有推移质输沙,一般集中在早晨 05:00—09:00,这是因为融水径流的剪切应力较小,没有超过推移质泥沙起动的临界剪切应力,导致推移质泥沙无法起动。由公式(3)可知,在本次的研究时段内,发生推移质输沙的临界剪切应力为 278.65 N/m^2 。推移质输沙率随时间呈单峰型趋势,即随时间首先快速升高达到峰值后又快速下降的趋势。在整个观测时间段内,推移质输沙率在 8 月 11 日 18:20 左右达到最大值,为 37.57 g/s ,与融水径流量和悬移质含沙量达到最大值的时间基本一致。研究时段内悬移质含沙量的日平均值在 $0.28 \sim 0.31 \text{ g/L}$,标准差约为 $0.28 \sim 0.31 \text{ g/L}$ 。推移质输沙率日平均值约为 $1.59 \sim 9.88 \text{ g/s}$,标准差约为 $0.63 \sim 9.85 \text{ g/s}$ 。可见,悬移质日变化幅度较推移质小,这主要是因为推移质输沙需要满足一定的条件,导致其日变幅较大。研究时段内悬移质和推移质日输沙量存在明显差异,由图 4e 可知,冰川融水径流中悬移质输沙量远高于推移质输沙量,推移质输沙量约占总输沙量的 $1.70\% \sim 2.74\%$,推移质日输沙量与悬移质日输沙量的比值约为 $1.73\% \sim 2.81\%$,平均值为 2.39% ,而且二者的比值随着融水径流量的增加而增加,8 月 11 日和 12 日推移质日输沙量与悬移质日输沙量比值分别为 2.55% 和 2.60% 。

3.2 悬移质和推移质输沙级配特征

悬移质和推移质泥沙级配对河流输沙和维持河流生态健康非常重要。对监测时段内的悬移质和推移质泥沙样品进行收集和筛分,确定悬移质和推移质输沙级配见图 5。其中,悬移质粒径大小集中在 $0.08 \sim 0.90 \text{ mm}$,中值粒径约为 0.3 mm (图 5a)。而推移质粒径大小集中在 $2.36 \sim 63.00 \text{ mm}$,中值粒径约为 12 mm ,中值粒径约为悬移质泥沙的 40 倍(图 5b)。将推移质分为 11:00—14:00,14:00—16:00,16:00—18:00 3 个时间段进行统计(图 5c)发现,11:00—14:00 时间段的推移质中值粒径为 5.25 mm ,14:00—16:00 时间段的推移质中值粒径为 4.82 mm ,16:00—18:00 时间段的推移质中值粒径为 4.65 mm ,均为悬移质泥沙中值粒径的 16 倍。而且 11:00—14:00 和 14:00—16:00 的 2 个时段内推移质中粗颗粒泥沙($16 \sim 37.50 \text{ mm}$)占比为 13% ,明显多于 16:00—18:00 时段的 4% 。可能是因为每日流量陡升过程中流速较大,导致水流推动粗颗粒泥沙的能力亦较大。

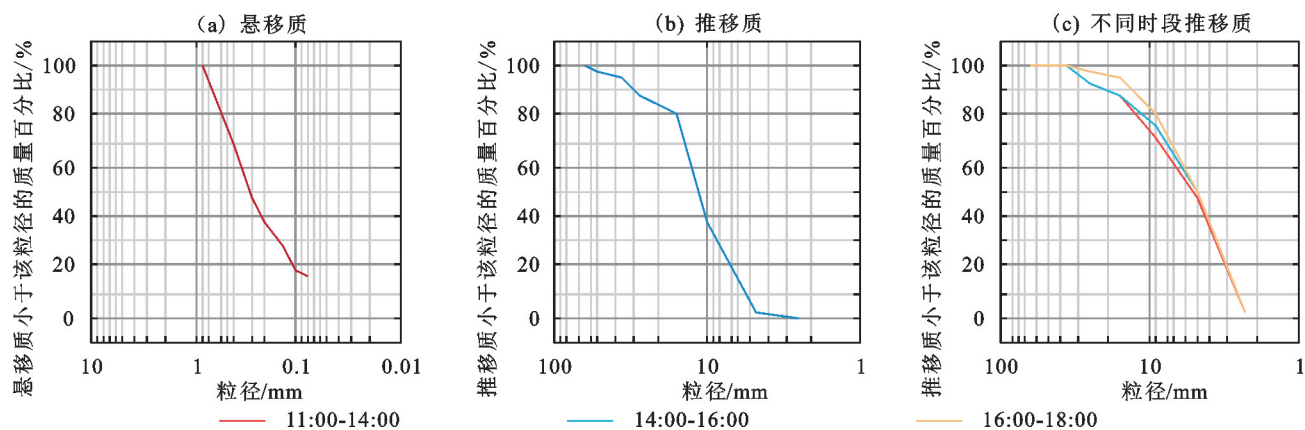


图5 泥沙颗粒级配曲线

Fig. 5 Sediment particle size distributions

3.3 断面推移质输沙的时空变化特征

推移质输沙受径流剪切应力控制,由于径流剪切应力在断面上差异较大,故推移质输沙率在断面上分布并不均匀。准确描述推移质输运的空间变化特征,是确定断面推移质输沙率的重要因素。以8月11日为例,推移质输沙主要集中在水文监测断面中间水深较深的位置,而在两边河岸附近几乎没有推移质输沙。主要是因为断面中间处,径流剪切应力最大,水流输沙能力强,在靠近两岸处,水流输沙能力较弱,不足以让粗颗粒推移质泥沙起动(图6)。

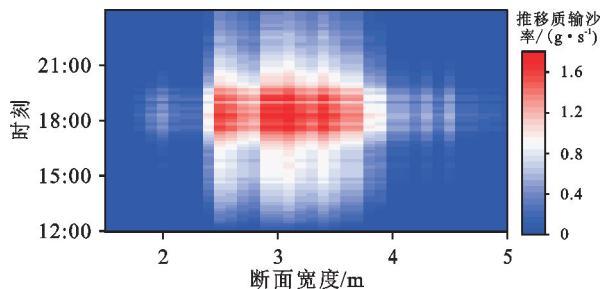


图6 8月11日断面推移质输沙时空变化

Fig. 6 Temporal and spatial variations of bed load transport rate on August 11

3.4 冰面气温对冰川融水径流输沙的影响

由于太阳辐射和冰面气温变化,冰川融水径流过程日变化剧烈,进而影响下游输沙过程。为了探讨冰面气温变化对径流输沙的影响,拟选取不受降雨影响的8月12—19日及22日9天的日平均径流量和输沙量与冰面气温建立相关关系。

由图7a可知,日平均冰川融水径流量与冰面气温呈线性正相关关系,相关系数较高,达到0.79。影响其相关性的主要原因是监测断面距冰川末端有一定距离,监测断面融水径流量变化相对冰面气温变化有一定的滞后性。例如,8月12日、13日和14日日平均冰面气温呈下降趋势,最低冰面气温出现在凌晨05:30,04:50和03:58,最高冰面气温出现在15:48,

14:31和14:04;而监测断面最小流量出现在上午10:32,09:57和08:46,最大流量出现在16:10,14:50和14:30。可见,监测断面最小径流量相较于最低冰面气温滞后约5 h,而最大径流量相较于最高冰面气温滞后约20 min。随着日平均冰面气温的下降,每日最低和最高气温出现的时间点有前移的现象,对应的最小和最大流量出现的时间点同样前移。

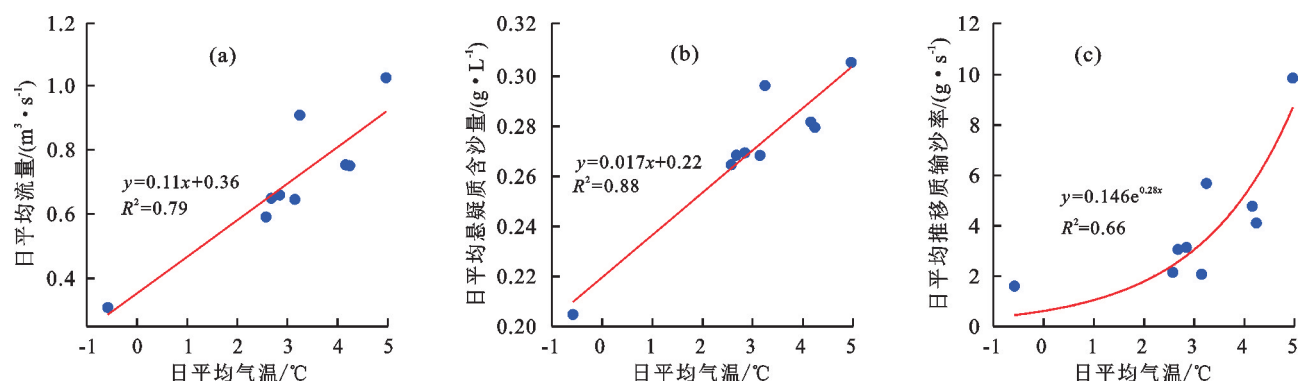
冰面气温同样可以通过影响径流量改变融水径流中泥沙输运过程,图7b与7c分别显示日平均冰面气温和悬移质含沙量与推移质输沙率之间的相关关系。对于悬移质含沙量而言,其与冰面温度呈线性正相关关系,相关系数达到0.88。推移质输沙率在温度较高时受冰面气温的影响更为显著,两者呈指数正相关关系,相关系数为0.66。说明在未来气温增加导致冰川融水径流增加的情景下,悬移质和推移质输沙均将显著增加,七一冰川融水径流输沙将更加值得关注。

4 讨论

4.1 冰川融水径流量对推移质输沙的影响

为了进一步分析冰川融水径流量变化对推移质输沙的影响,拟在监测时间段内选取日平均流量最大、中等和最小的3天,即8月12日、8月18日和8月22日,分别对该日的融水径流量进行同比放大和缩小,结合公式(3)探讨冰川融水径流量增加或减少对推移质输沙的影响。由图8可知,冰川融水流量显著影响推移质日输沙量,当流量削减为50%时,这3日推移质日输沙量将分别减少到33%,16%和0。可见,在小流量时,推移质输沙量对冰川融水径流量十分敏感;当流量增加为150%时,推移质日输沙量将分别增加到177%,208%和519%;当流量增加为200%时,推移质日输沙量将分别增加到255%,320%和1087%,说明当日平均径流量较大时,推移质输沙比径流量增加的速度更快。由此可以推测,在全球气候变暖导致七

一冰川融水流量增加的情况下^[9-11],推移质输沙率也呈大幅度增加趋势。



注:(a)为日平均径流量和冰面气温关系;(b)为日平均悬移质含沙量和冰面气温关系;(c)为日平均推移质输沙率和冰面气温关系。

图 7 冰面气温变化对冰川融水径流输沙的影响

Fig. 7 The impact of ice surface temperature change on glacier melt runoff and sediment transport

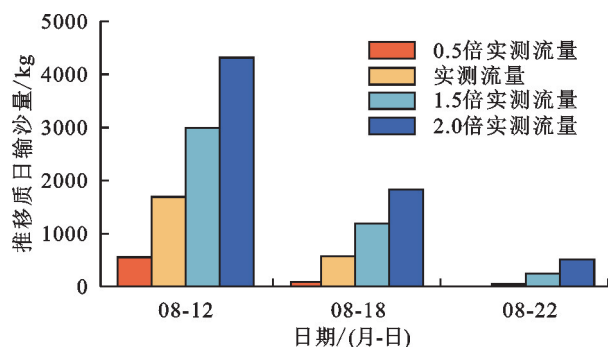


图 8 冰川融水径流量对推移质日输沙量的影响

Fig. 8 Effect of glacier melt runoff on daily sediment transport of bed load

4.2 不同冰川融水径流动态输沙特征对比

前人关于冰川融水径流悬移质输沙特征的研究主要集中在长时间尺度,例如,ZHANG 等^[19]和赵艳霞等^[15]分别从年际尺度和月尺度分析冰川融水径流中悬移质输沙的变化规律发现,悬移质输沙与融水径流量呈正相关关系,与本研究在日尺度发现的规律一致。HARITASHYA 等^[22]对冰川融水径流中悬移质输沙的日变化特征进行探讨,但由于该研究中实测数据较少,认为每日 08:30 和 17:30 的 2 个时间点可以代表冰川融水径流中悬移质含沙量日最小值和最大值,与本研究结果有所差异。本研究中冰川融水径流中悬移质含沙量最大最小值发生时间是动态变化的,最小值出现在 08:30—11:40,大多数集中在 10:00;最大值出现在 14:20—19:00,大多数集中在 16:00。对于推移质输沙,DELANEY 等^[23]在戈尔纳冰川发现,融水径流中推移质输沙量占总输沙量的 6%~12%;RIIHIMAKI 等^[24]在阿拉斯加 Bench 冰川观测到推移质输沙量甚至能占总输沙量的 40%,远大于本研究的观测结果(1.70%~2.74%)。是因为上述 2 个冰川面积较大,分别达到 52.0,7.5 km²,且属于海洋型冰川,融水径流量及其对推移质泥沙的输送能力远大于七一冰川。也从侧面论证在未来气候变暖情景下,冰川融水径流量进一步增

加,即使是大陆型冰川,其融水径流中悬移质和推移质输沙也显著增加,有待进一步研究。

5 结论

(1)七一冰川融水径流量、悬移质含沙量和推移质输沙率日变化均十分剧烈。其中,径流量和悬移质含沙量最小值一般出现在 10:00,最大值出现在 16:00。推移质输沙过程与悬移质输沙的日变化趋势有所不同,每日 05:00—09:00 由于冰川融水径流的剪切应力小于推移质泥沙的临界启动剪切应力,推移质输沙率最小值为 0。

(2)七一冰川融水径流输沙以悬移质泥沙为主,推移质日输沙量远小于悬移质日输沙量,约占悬移质日输沙量的 1.73%~2.81%,平均值为 2.39%。悬移质中值粒径约为 0.3 mm,而推移质中值粒径约为 12 mm。在每日冰川融水径流量陡升阶段(11:00—16:00),推移质输沙的粒径最粗。

(3)七一冰川表面气温是影响冰川融水径流输沙过程的关键因子之一,日平均冰川融水径流量和悬移质含沙量与冰面气温均呈线性正相关,而推移质输沙率与冰面气温呈指数正相关。意味着在未来气候变暖情景下,随着冰川融水径流量的增加,冰川融水径流中悬移质和推移质输沙均显著增加,值得更加重视。

本研究揭示七一冰川消融季融水径流和输沙过程的日变化特征及其影响因素,对于七一冰川地貌演化预测和下游防灾减灾具有十分重要的意义。然而,本研究监测时段相对较短,无法反映七一冰川融水径流和输沙特征在整个消融季的变化,而且七一冰川属于大陆型冰川,一般而言,海洋型冰川融水径流量和输沙能力更大,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 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,

- China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1274-1284.
- [2] 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.
- [3] HERMAN F, DE DONCKER F, DELANEY I, et al. The impact of glaciers on mountain erosion[J]. Nature Reviews Earth and Environment, 2021, 2(6): 422-435.
- [4] 陈同德, 焦菊英, 王显霖, 等. 青藏高原土壤侵蚀研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 547-564.
- CHEN T D, JIAO J Y, WANG H L, et al. Progress in research on soil erosion in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 547-564.
- [5] PATTON H, HUBBARD A, HEYMAN J, et al. The extreme yet transient nature of glacial erosion[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): e7377.
- [6] ZHANG T, LI D F, EAST A E, et al. Warming-driven erosion and sediment transport in cold regions[J]. Nature Reviews Earth and Environment, 2022, 3(12): 832-851.
- [7] SWIFT D A, TALLENTIRE G D, FARINOTTI D, et al. The hydrology of glacier-bed overdeepenings: Sediment transport mechanics, drainage system morphology, and geomorphological implications[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2021, 46(11): 2264-2278.
- [8] DELANEY I, ADHIKARI S. Increased subglacial sediment discharge in a warming climate: Consideration of ice dynamics, glacial erosion, and fluvial sediment transport[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(7): e2019GL085672.
- [9] 姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1203-1209.
- YAO T D, WU G J, XU B Q, et al. Asian water tower change and its impacts[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1203-1209.
- [10] 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.
- [11] 邓春燕, 李向应, 苏昊海, 等. 21 世纪全球冰川将加速消融[J]. 科学通报, 2024, 69(14): 1810-1812.
- DENG C Y, LI X Y, SU H H, et al. Globally glacier melt will accelerate in the 21st century[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(14): 1810-1812.
- [12] YILMAZ K, DINÇER A E, KALPAKCI V, et al. Debris flow modelling and hazard assessment for a glacier area: A case study in Barsem, Tajikistan[J]. Natural Hazards, 2023, 115(3): 2577-2601.
- [13] HIRSCHBERG J, FATICHI S, BENNETT G L, et al. Climate change impacts on sediment yield and debris-flow activity in an alpine catchment[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2021, 126(1): e2020JF005739.
- [14] STOTT T, MOUNT N. Alpine proglacial suspended sediment dynamics in warm and cool ablation seasons: Implications for global warming[J]. Journal of Hydrology, 2007, 332(3/4): 259-270.
- [15] 赵艳霞, 马伟强, 韩海东, 等. 高寒山区冰川河流悬移泥沙的输移特征[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 94-102.
- ZHAO Y X, MA W Q, HAN H D, et al. Suspended sediment transport characteristics of glacial rivers in alpine mountainous areas[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 94-102.
- [16] COVIELLO V, VIGNOLI G, SIMONI S, et al. Bed-load fluxes in a glacier-fed river at multiple temporal scales[J]. Water Resources Research, 2022, 58(10): e2021WR031873.
- [17] PEROLO P, BAKKER M, GABBUD C, et al. Subglacial sediment production and snout marginal ice uplift during the late ablation season of a temperate valley glacier[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(5): 1117-1136.
- [18] 王盛, 姚檀栋, 蒲健辰, 祁连山七一冰川物质平衡的时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2020, 35(2): 399-412.
- WANG S, YAO T D, PU J C. Spatial and temporal variations in mass balance of Qiyi Glacier in Qilian Mountains[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(2): 399-412.
- [19] 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.
- [20] DEY S, ALI S Z, PADHI E. Bedload transport from analytical and turbulence phenomenological perspectives[J]. International Journal of Sediment Research, 2019, 34(6): 509-530.
- [21] SCHNEIDER J M, RICKENMANN D, TUROWSKI J M, et al. Applicability of bed load transport models for mixed-size sediments in steep streams considering macro-roughness[J]. Water Resources Research, 2015, 51(7): 5260-5283.
- [22] HARITASHYA U K, SINGH P, KUMAR N, et al. Suspended sediment from the Gangotri Glacier: Quantification, variability and associations with discharge and air temperature[J]. Journal of Hydrology, 2006, 321(1/2/3/4): 116-130.
- [23] DELANEY I, BAUDER A, WERDER M A, et al. Regional and annual variability in subglacial sediment transport by water for two glaciers in the Swiss Alps[J]. Frontiers in Earth Science, 2018, 6: e175.
- [24] RIIHIMAKI C A, MACGREGOR K R, ANDERSON R S, et al. Sediment evacuation and glacial erosion rates at a small alpine glacier[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2005, 110(F3): eF03003.