

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.099

LIU Yuting, LIU Jingshi, Guligena Halimulati, et al. Comparison of hydrological regime between two glacier-fed watersheds in the north Himalayas [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3):1063–1069. [刘玉婷, 刘景时, 古丽格纳·哈力木拉提, 等. 喜马拉雅山北坡典型冰川流域水文过程比较研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3):1063–1069.]

# 喜马拉雅山北坡典型冰川流域水文过程比较研究

刘玉婷<sup>1</sup>, 刘景时<sup>1,2</sup>, 古丽格纳·哈力木拉提<sup>1</sup>, 纳麦提·托合提<sup>1</sup>

(1. 新疆喀什大学 生命与地理学院 新疆维吾尔自治区帕米尔高原生物资源与生态重点实验室, 新疆 喀什 844000;

2. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100085)

**摘要:** 2005年为喜马拉雅山中段的暖干年, 夏季气温为历年最高。本文利用2005年珠穆朗玛峰绒布冰川下游水文观测资料及附近定日气象站资料、羊卓雍湖卡鲁雄曲冰川流域水文资料及附近浪卡子站气象资料, 分析了两个流域的融水过程, 建立冰雪消融数值模型, 并进行了对比研究。结果表明: 统计相关得到两流域气温和降水高度相关性( $r>0.8$ ), 说明在区域尺度上两个地区的气候过程相似。绒布冰川消融强度比卡鲁雄曲冰川约大2倍, 冰川退缩速率二者也差2.5倍, 说明用冰川消融气温估计的水量损失基本反映两地冰川变化的事实。本文提出的冰雪融水模型, 可以用于两个冰川区之间广大无资料冰川流域融水及冰川变化的估计, 以及恢复珠穆朗玛和喜马拉雅山脉其他地区的长期水文过程及水资源变化的计算。

**关键词:** 喜马拉雅山; 绒布河流域; 卡鲁雄曲流域; 融水径流; 夏季气温

**中图分类号:** P343.6    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-0240(2022)03-1063-07

## 0 引言

面对全球变暖的趋势, 冰川作为最大的淡水储存资源, 正在日益退缩, 对于以冰川融水补给为主的河流影响巨大<sup>[1-2]</sup>。以亚洲地区的中国为例, 这类河流主要分布于我国的西部地区, 冰川水资源对其下游及干旱、半干旱地区居民的生产生活乃至经济的可持续发展提供了基础<sup>[3-4]</sup>。有研究表明, 20世纪下半叶以来, 青藏高原由于冰川退缩造成的水资源净损失量高达 $5\,869.24\times10^8\text{ m}^3$ , 为10条黄河的水量<sup>[5]</sup>。虽然冰川退缩消融能够大量释放储存的水资源, 短期内带来可利用水资源的增多, 但也会增加以冰川融水补给为主的河流径流的不稳定性, 日积月累也会超越临界点而造成冰川水资源的耗竭, 并最终导致严重后果<sup>[6-7]</sup>。

喜马拉雅山脉是我国以及南亚、东南亚很多河流的发源地, 在河流的径流资源补给中冰雪融水占

据较大比例。因冰雪融水变化受气候影响较大, 所以径流对气候变化较为敏感。20世纪60—70年代, 李吉均等<sup>[8]</sup>对喜马拉雅山冰川及水文做过一定研究, 谢自楚等<sup>[9]</sup>于1975年观测珠峰绒布、羊卓雍错卡鲁雄曲流域的冰川, 并对冰川径流、冰川积累和消融及物质平衡等进行研究。Azam等<sup>[10]</sup>对喜马拉雅—喀喇昆仑山河流对气候变化的响应做了相关研究, 研究表明冰川和积雪融化是河流的重要组成部分。Nie等<sup>[11]</sup>讨论了喜马拉雅—喀喇昆仑山冰川和融水供应如何以及为什么发生了变化, 它们在未来可能会如何演变, 以及这些变化如何影响水资源和与其相关的危害。赵华秋等<sup>[12]</sup>研究了喜马拉雅山冰川面积的退化及对气候的响应。近些年来, 印度、尼泊尔境内的喜马拉雅山冰川与气候变化的相关观测研究较多, 对中国境内的喜马拉雅山冰川相关研究, 多局限于遥感影像, 缺少实测数据及相关流域对比归因化研究。

收稿日期: 2022-01-05; 修订日期: 2022-04-24

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技计划项目(2021D01B06); 新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(XJEDU2020Y035); 喀什大学高层次人才培养项目(GCC18ZK-008); 喀什大学校内课题项目(19(2643))资助

作者简介: 刘玉婷, 讲师, 主要从事资源利用与生态安全研究. E-mail: xiaoxiao861211@163.com

通信作者: 刘景时, 教授, 主要从事寒区水文水资源研究. E-mail: 550648120@qq.com

已有的观测数据表明,青藏高原近40 a来气温呈上升趋势<sup>[13]</sup>,降水东部增多,西部减少<sup>[14]</sup>。在青藏高原喜马拉雅山中段珠穆朗玛峰(珠峰)地区,开展的冰芯气候和冰川末端变化的研究,结果显示:自1960年代该地区的冰川净积累量急剧减少,一直到1990年代初期冰川一直保持在较低的物质平衡状态;位于珠峰北坡的22条冰川,全部处于退缩状态且平均冰川末端年退缩5.8 m,其中该地区最大的冰川——绒布冰川自20世纪60年代以来以5.5~8.7 m·a<sup>-1</sup>的平均速度退缩<sup>[15]</sup>。另外,在对临近珠峰地区近40 a来的定日气象站气温进行分析,结果表明:自20世纪70年代以来,年平均气温不断升高,尤其是90年代以后上升更快;6—8月份气温始终保持相对较快的升高速度。以上研究表明,在近40年来珠峰地区出现了暖干化的特征<sup>[16]</sup>。珠峰地区在气温升高、冰川积累量减少、冰川后退的背景下,该地区的冰雪融水径流必会有相应的响应。前人在本地区所做的水文工作仅限于1959—1960年珠峰综合考察<sup>[17]</sup>一整年观测和1966年所做的绒布河水文短期观测<sup>[18]</sup>。本文根据2005年4—9月在珠峰绒

布冰川所做的水文观测得到的相对完整的资料,与2005年有水文气象观测的羊卓雍湖的卡鲁雄曲冰川流域进行对比,分析全球气候变暖背景下,绒布河流域与卡鲁雄曲流域冰川消融的增减状况及冰川水文规律,为喜马拉雅广大无水文气象观测流域提供参数。

## 1 流域概况

珠峰海拔8 848.63 m,位于喜马拉雅山中段。该地区极高的海拔为现代冰川的发育提供了有利条件。珠峰地区冰川总面积约为1 600 km<sup>2</sup>,占整个珠峰地区总面积的32%<sup>[15]</sup>。该地区的冰川分布集中,以大型山谷冰川为主。珠峰北坡地形陡峻,河谷坡降大,冰川补给区狭窄,限制了冰川的发育;珠峰北坡河谷比降小,且受高原冷空气影响,冰川发育条件较南坡有利。珠峰冰川面积在北坡和南坡的差异较大,北坡的冰川面积比南坡的多75%。珠峰绒布河流域和羊卓雍湖卡鲁雄曲流域均位于青藏高原南部,喜马拉雅山北坡(图1),两地相距500 km。

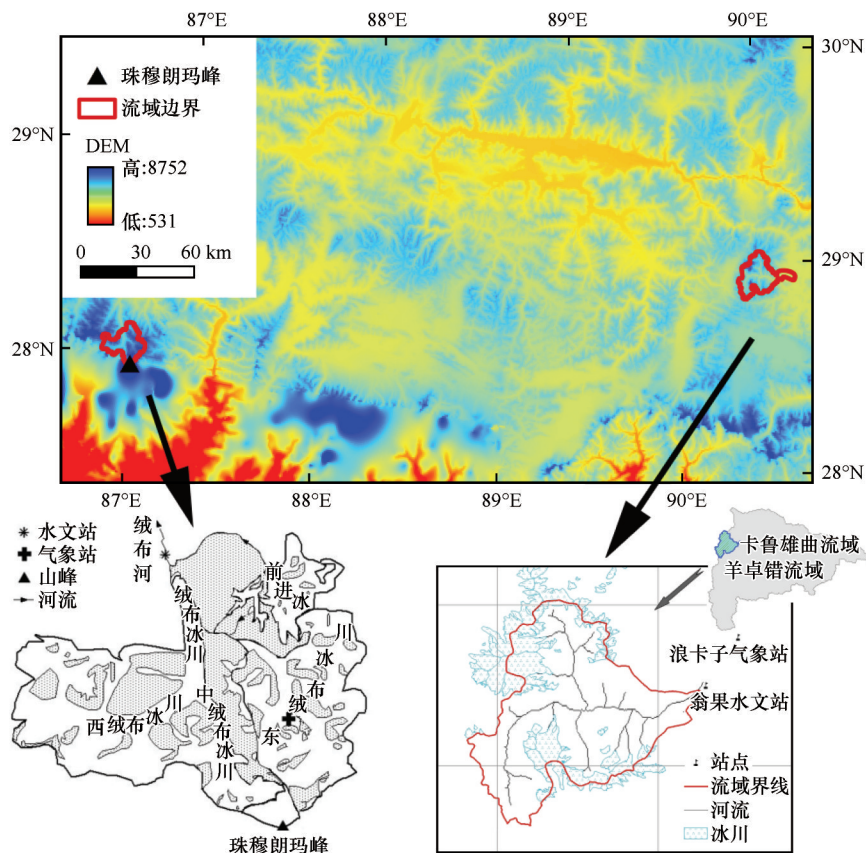


图1 绒布冰川(左侧)与卡鲁雄曲流域冰川(右侧)分布

Fig. 1 Glacial distribution in the Rongbuk (left) and Karuxung watershed (right)

珠峰绒布河流域的流域面积、冰川覆盖度分别为 326 km<sup>2</sup>、46.6%<sup>[15]</sup>, 流域内的绒布冰川属亚大陆性冰川, 是珠峰北坡的最大的冰川, 面积为 152 km<sup>2</sup>。绒布河发源于绒布冰川末端, 河源以中、西、东绒布冰川为主, 流向北偏西, 河谷平均海拔大于 5 900 m 且谷地外围相对高差较大。卡鲁雄曲流域的流域面积、冰川覆盖度分别为 286 km<sup>2</sup>、20.78%, 作为羊卓雍错流域西岸的最大支流, 其位于雅鲁藏布江以南, 源头为卡若拉冰川, 河源为宁金康桑峰。流域内海拔高度范围为 4 550~7 206 m, 50 条现代冰川在 4 900 m 以上, 总面积 59.42 km<sup>2</sup>; 以海拔 5 100 m 为界限, 划分为高山冻土区与深层季节冻土区。该流域气候属南亚季风气候区中的南亚Ⅳ型气候区, 处在喜马拉雅山的雨影地区且为半干旱地区。年平均气温为 2.0℃, 多年平均降水量 370.5 mm, 但年内降水量分配很不均匀, 主要集中分布于 6—9 月, 所占比例高于全年降水的 90%<sup>[5]</sup>。

## 2 数据来源

(1) 水文数据: 卡鲁雄曲流域翁果水文站, 位于浪卡子县翁果乡省拉村, 海拔 4 550 m, 建于 1975 年, 数据来源于西藏拉萨水文局。珠峰绒布河流域内珠峰绒布冰川大本营设立临时水文站, 海拔 5 170 m, 检测时段为 2005 年 4—10 月, 可检测整个绒布冰川的冰川融水径流。

(2) 气象站数据: 浪卡子气象站 (28°58′ N, 90°24′ E) 和定日气象站 (28°38′ N, 87°05′ E), 数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)。

(3) DEM 数据: DEM 数据来源于美国国家航空航天局 (NASA), 空间分辨率 30 m。

(4) 冰川数据: 冰川数据来源于中国第一次冰川编目。

## 3 研究结果与分析

### 3.1 绒布河流域与卡鲁雄曲流域冰川消融特征

对 2005 年内绒布河流域与卡鲁雄曲流域冰川

消融及气候变化特征分析, 喜马拉雅山区由于独特的高寒气候特征导致负温期较长, 流域冰川消融随气候的变化明显。当春末夏初, 气温稳定升至 0℃ 以上, 高山冰雪开始消融。4 月初, 通常绒布河每天下午 15:00 至 17:00 时河面解冻 (北京时间), 其他时间均处于封冻状态, 此时完全由非冰川区积雪融水提供给径流。5 月, 尤其是 5 月 7 日以后气温逐渐升高, 河面完全解冻, 绒布冰川消融区的冰面消融强度增强, 形成了冰面径流, 融水沿冰面河道下泄, 经过若干冰面湖后汇入绒布河。7、8 月份温度大幅度地升高, 径流量增加迅速, 达到年内最高值。9 月, 径流量缓慢降低, 到 10 月份, 河面封冻, 消融基本停止, 只存在较小的基流。

根据卡鲁雄曲流域内翁果水文站多年水文气象资料分析, 把冰川消融分为 4—6 月的季风前和 7—9 月的季风后。季风前基本无降水影响, 径流与气温关系稳定密切; 季风后降水补给卡鲁雄曲流域径流, 消融与气温的关系复杂。由于冰川末端位置较低和春季温度较高, 卡鲁雄曲流域内冰川 4 月开始冰雪消融, 4—6 月主要冰雪消融, 7—9 月为融水与降水混合补给<sup>[5]</sup>。

### 3.2 珠峰绒布河与卡鲁雄曲流域冰川消融对比分析

表 1 给出 2005 年珠峰绒布河流域与卡鲁雄曲流域冰川消融水深及水量组成比较。由于卡鲁雄曲流域内冰川末端位置相对较低和冬春季温度较高, 河流有地下水补给不断流, 冬春季有明显径流, 而绒布河流域内冰川 4 月仅有微弱消融, 两河 5 月即开始冰雪消融。5—7 月绒布河流域内径流各月比例都大于卡鲁雄曲流域的, 一是绒布河流域冰川纬度稍偏南, 定日站夏季气温比浪卡子站高 1.5℃, 二是卡鲁雄曲流域春季有降水, 高山降雪增大反射, 抑制消融。月消融深绒布河流域冰川区 5 月是卡鲁雄曲流域的 2.5 倍, 6—7 月是 2 倍, 8—9 月是 1.4 倍, 总消融量绒布河流内冰川区基本是卡鲁雄曲流域的 2 倍。

表 1 2005 年珠峰绒布流域与羊湖卡鲁雄曲流域水量组成比较  
Table 1 Runoff components in Rongbok and Kaluxun watershed in 2005

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年消融
绒布河流域/mm				2.5	20.8	97.7	176.0	157.4	84.0	71.5			560.0
月比例/%				0.4	3.85	16.2	28.8	25.8	14.0	11.5			
卡鲁雄曲流域/mm	5.24	4.28	4.74	5.26	7.64	49.5	78.1	95.3	69.2	27.9	13.0	6.5	275.0
月比例/%	1.4	1.2	1.3	1.4	2.1	13.5	21.3	26.0	18.9	7.6	3.5	1.8	



2005 年绒布冰川水文观测的流量与气温关系如下<sup>[15]</sup>:

$$Q = 1.64e^{0.20(T+6.0)}, R^2 = 0.5625 \quad (1)$$

式中:  $T$  为水文点 5 180 m 处气温( $^{\circ}\text{C}$ );  $Q$  为流量( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )。其中,  $Q$  包含降水补给径流带来的水量, 为进一步探讨融水与温度关系, 本文剔除含降水的日流量点。改进的绒布冰川消融与气温的相关性, 在显著性水平  $\alpha=0.005$ , 取  $f=67$ , 根据检验相关系数  $\rho=0$  的临界表,  $r_{0.005}=0.2500$ , 显然, 改进表达式的  $r_{DT}$  远远大于  $r_{0.005}=0.2500$ , 这表明改进的绒布冰川消融与气温高度相关[图 2(a)], 统计关系为:

$$D = 0.3718e^{0.2752T}, R^2 = 0.8919 \quad (2)$$

式中:  $T$  为水文点 5 180 m 处气温( $^{\circ}\text{C}$ );  $D$  为消融深(mm)。

同样利用 2005 年卡鲁雄曲翁果站水文气象观测资料, 得到无降水日的径流深与气温关系。在显著性水平  $\alpha=0.005$ , 取  $f=12$ , 根据检验相关系数  $\rho=0$  的临界表,  $r_{0.005}=0.5324$ , 显然, 改进表达式的  $r_{DT}$  远远

大于  $r_{0.005}=0.5342$ , 这表明改进的绒布冰川消融与气温高度相关[图 2(b)], 统计关系式为:

$$D = 0.1206e^{0.2498T}, R^2 = 0.8086 \quad (3)$$

式中:  $T$  为水文站 4 550 m 处气温( $^{\circ}\text{C}$ );  $D$  为消融深(mm)。

以上两个冰川消融关系都符合一般指数函数表达式, 且消融深与气温成正比。指数函数前的系数表示消融强度, 即气温升高  $1^{\circ}\text{C}$  所增加的消融深, 且消融深随气温升高(非线性)增多。

根据公式(2)、(3)得出, 绒布冰川消融强度大于卡鲁雄曲, 约 2 倍, 这与我们对冰川的实地考察结果一致。绒布冰川消融强烈是因为其冰川覆盖率高, 消融区降水(雪)小, 以高山雪崩补给积累, 消融区有大量表碛覆盖, 有利于冰雪消融<sup>[19-20]</sup>。而卡鲁雄曲流域冰川覆盖率略小, 冰川表面清洁, 降水稍大, 以降雪补给, 反射强烈, 不利于冰雪消融<sup>[4, 21]</sup>。二者长期的差别也可从它们的冰川退缩速度反映出来。

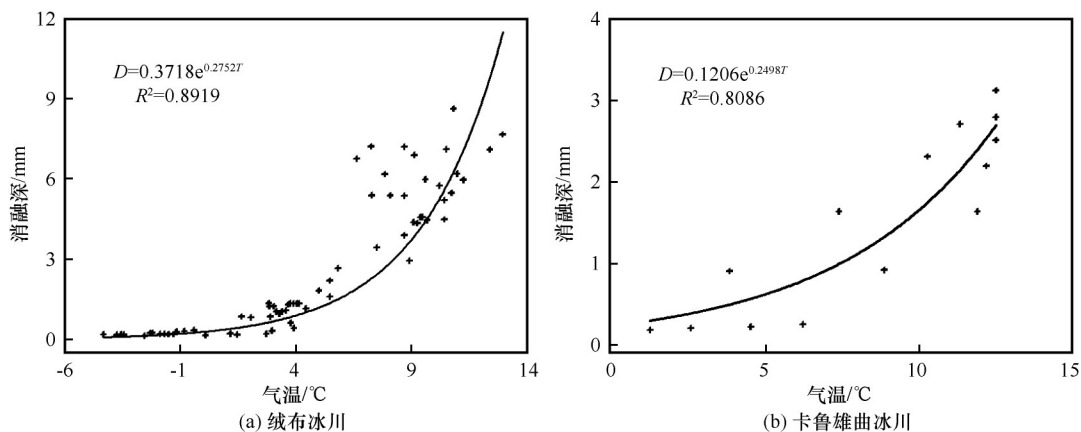


图2 绒布冰川(a)与卡鲁雄曲冰川(b)无降水日的日消融深与气温关系

Fig. 2 Relationship between daily melting depth and temperature on non precipitation days of Rongbuk glacier (a) and Karunxunu glacier (b)

喜马拉雅山中段的珠穆朗玛峰地区的现代冰川在最近几十年曾进行多次考察, 根据考察中对冰川末端位置重复测量和对比发现这些地区的冰川均处于退缩状态。近 40 年来对两个冰川区的监测表明, 珠峰地区中绒布冰川、东绒布冰川和远东绒布冰川 1966—1997 年的平均退缩速度分别为 8.7、5.5 和 7.4  $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$ , 1997—2011 年的退缩速度增加到 9.3  $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$ , 消融区冰川表面高度平均减薄约 30~40 m<sup>[16]</sup>。2005 年采用 GPS 与数字地面立体摄影测量相结合的方法重新测绘了枪勇冰川图(1:2.5 万比例尺)。根据 2005 年的冰川图测得枪勇冰川长度

是 4.8 km, 面积为 7.1  $\text{km}^2$ , 雪线高度为 5 850 m a. s. l., 与 1979 年的冰川相比冰川末端退缩约 100 m, 平均 3.8  $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$ , 冰川面积比 1979 年的冰川面积减小了 0.6  $\text{km}^2$  (7.8%), 消融区冰川表面高度平均减薄约 10~15 m<sup>[22]</sup>。可见绒布冰川的退缩速率也比卡鲁雄区冰川大很多, 约 2.5 倍。

## 4 讨论

### 4.1 冰川水文状况

由图 1 和表 2 可以看出, 绒布河流域和卡鲁雄曲流域同在喜马拉雅山北坡, 基本在同一纬度, 同

表2 绒布河大本营站与卡鲁雄曲翁果站冰川水文特征值  
Table 2 Hydrological and glaciological characteristics of studied catchments

站名	高度/ m a. s. l.	流域面积/ km <sup>2</sup>	冰川末 端/m	冰川面积*/ km <sup>2</sup>	雪线高 度/m	融水比例*/%	平均高度**/ m a. s. l.	年降水量/ mm	资料年限
翁果	4 550	286	5 000	58.31	5 800	75.0	5 370	330~650	1975年,1983—2016年
大本营	5 180	326	5 180	152.00	5 850	80.7	5 900	300~500	1959年,2005年

注：\*中国第一次冰川编目；\*\*数字高程模型DEM。

为大陆性冰川,两个流域冰川末端高度分别为5 180 m和5 000 m,雪线高度5 850 m,流域面积接近,产流均可当日出现在测流断面,冰雪融水贡献比例相当。

4.2 气候条件

2005年定日站与浪卡子站年平均气温都高于多年平均1℃,但定日站年平均气温较浪卡子站低0.4℃。两站夏季平均气温都出现了极高值,定日站6—8月平均气温达12.3℃,仅次于1995年夏季的12.4℃;浪卡子站2005年夏季气温为10.8℃,为45年记录的最高值。但两站年降水量较多年平均少30%左右(70.0 mm和87.7 mm),所不同的是定日站7月降水最多,浪卡子站8月降水最大;春季浪卡子站有较大降水,而定日站没有。定日夏季降水比浪卡子更集中。这种极端暖干的夏季气候是准确计算冰川消融的有利条件。另外2005年4—10月定日站和绒布大本营气温也有很好的相关性<sup>[5]</sup>。说明两地水热过程有一致性,可以进行两个冰川流域水文过程的比较。

4.3 消融对比

5—7月绒布河流域内径流各月比例都大于卡鲁雄曲流域,这可能因为:一是绒布河流域冰川纬度稍偏南,定日站夏季气温比浪卡子站高1.5℃;二是卡鲁雄曲流域春季有降水,高山降雪增大反射,抑制消融。

通过建立模拟公式得出,两个冰川消融关系都符合一般指数函数表达式,且绒布冰川消融强度为卡鲁雄曲的2倍,这与我们对冰川的实地考察结果一致。两个冰川消融关系都符合一般指数函数表达式,且消融深与气温成正比<sup>[23]</sup>,表示二者受同一气候的控制和影响<sup>[5,15]</sup>。2005年的初步研究显示,气温升高是径流量增大的关键因素。且关于珠峰绒布冰川的研究表明,在气温和冰雪融水径流之间存在相关性较好的指数函数关系<sup>[24]</sup>,故本文提出的冰雪融水模型,可以用于两个冰川区流域融水及冰川变化的估计,为计算提供了一定的参考依据。

本文研究表明,随着全球气候变暖形势加剧,研究区冰雪消融量较大。1954年以来珠穆朗玛峰地区两支冰芯记录的对比分析中也表明,由于气候变化导致的增温作用对冰芯积累量变化的影响不容忽视。在气候变暖背景下,依据寒区气象、水文数据研究气温与冰川消融的关系,可为进一步认识喜马拉雅山北坡地区冰川融水特征提供重要参考依据。另一方面,有研究认为冰雪消融存在差异主要是由下垫面感热通量的不均衡性导致的<sup>[25]</sup>,因此依据坡度、坡向、植被覆盖度等环境因素的差异性分布研究流域冰雪消融的规律变化值得更为深入的探讨。

5 结论

本文利用2005年珠峰大型科学考察时对绒布冰川水文观测及附近定日站气象资料、羊湖卡鲁雄曲冰川流域水文及附近浪卡子站气象资料,依据绒布河流域与卡鲁雄曲冰川流域的融水过程,建立冰雪消融数值模型,并进行了对比研究。统计相关得到气温极好的相关性( $r>0.8$ )和降水的可靠相关( $r>0.8$ ),说明在区域尺度两个地区的气候过程基本一致;绒布冰川消融强度是卡鲁雄曲的约2倍,冰川退缩速率二者也差2.5倍,说明用冰川消融气温估计的水量损失基本反映冰川变化的事实。

本文提出的冰雪融水模型,可以用于两个冰川区之间其他无资料冰川流域融水及冰川变化的估计。由于喜马拉雅山区水文、气象台站十分稀少,且大多数站点分布在高原东部地区和边缘,以上结果表明喜马拉雅山卡鲁雄曲唯一有长期冰川水文气象观测资料可以用于帮助恢复珠峰绒布冰川水文过程及冰川变化。

致谢：本文得到中国科学院西北生态环境资源研究院康世昌研究员的指导。珠峰大本营水文资料为2005年珠峰科学考察队冰川水文组集体观测成果,卡鲁雄曲流域冰川水文气象观测得到西藏水文

局拉萨水文局米玛次仁帮助,在此一并致以衷心感谢。

## 参考文献(References):

- [1] Qin Dahe, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. The Cryospheric Science for sustainable development[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 1-10. [秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 面向可持续发展的冰冻圈科学[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 1-10.]
- [2] Qin Dahe, Zhou Botao, Xiao Cunde. Progress in studies of cryospheric changes and their impacts on climate of China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(5): 869-879. [秦大河, 周波涛, 效存德. 冰冻圈变化及其对中国气候的影响[J]. *气象学报*, 2014, 72(5): 869-879.]
- [3] Shi Yafeng, Shen Yongping, Ding Yongjian, et al. An assessment of the issues of climatic shift from warm-dry to warm-wet in Northwest China[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002: 7-75. [施雅风, 沈永平, 丁永建, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型评价[M]. 北京: 气象出版社, 2002: 7-75.]
- [4] Yao TanDong, Liu Shiyin, Pu Jianchen, et al. Impacts of glacier shrinkage to water resources in the northwest China[J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2004, 34(6): 535-543. [姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2004, 34(6): 535-543]
- [5] Zhang Fei, Liu Jingshi, Gong Tongliang, et al. Hydrological regime of the Karuxung watershed in north Himalayas[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(11): 1141-1148. [张菲, 刘景时, 巩同梁, 等. 喜马拉雅山北坡卡鲁雄曲径流与气候变化[J]. *地理学报*, 2006, 61(11): 1141-1148]
- [6] Yang Yong, Chen Rensheng. Research review on hydrology in the permafrost and seasonal frozen regions[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(7): 711-723. [阳勇, 陈仁升. 冻土水文研究进展[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(7): 711-723.]
- [7] Shen Yongping, Liang Hong. Global ice melting accelerated would threaten to human environmental safety[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(2): 208-211. [沈永平, 梁红. 全球冰川消融加剧使人类环境面临威胁[J]. *冰川冻土*, 2001, 23(2): 208-211.]
- [8] Li Jijun, Zheng Benxing, Yang Xijin. *Glaciers of Xizang (Tibet)*[M]. Beijing: Science Press, 1986: 67-98. [李吉均, 郑本兴, 杨锡金. *西藏冰川*[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 67-98.]
- [9] Xie Zichu. 1975 Melt characteristics of the Rongbuk Glacier, scientific report on expedition in Mount Qomolangma (1966—1968)[M]. Beijing: Science Press, 1974: 65-70. [谢自楚. 1975 绒布冰川的消融特征, 珠穆朗玛峰地区科学考察报告(1966—1968)[M]. 北京: 科学出版社, 1974: 65-70]
- [10] Azam M F, Kargel J S, Shea J M, et al. Glaciology of the Himalaya-Karakoram[J]. *Science*, 2021, 373(6557): eabf3668.
- [11] Nie Yong, Pritchard H D, Liu Qiao, et al. Glacial change and hydrological implications in the Himalaya and Karakoram[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(2): 91-106.
- [12] Zhao Huaqiu, Wang Xin, Zhao Xuanru, et al. Analysis of glacier changes in China from 2008 to 2018[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(4): 976-986. [赵华秋, 王欣, 赵轩茹, 等. 2008—2018 年中国冰川变化分析[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(4): 976-986.]
- [13] Du Jun. Change of temperature in Tibetan Plateau from 1961 to 2000[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(6): 682-690. [杜军. 青藏高原近 40 年的气温变化[J]. *地理学报*, 2001, 56(6): 682-690.]
- [14] Du Jun, Ma Yucai. Climatic trend of rainfall over Tibetan Plateau from 1971 to 2000[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3): 375-382. [杜军, 马玉才. 青藏高原降水变化趋势的气候分析[J]. *地理学报*, 2004, 59(3): 375-382.]
- [15] Liu Weigang, Ren Jiawen, Qin Xiang, et al. Astudy of hydrological process around Rongbuk glacier, Mt. Qomolangma[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 663-667. [刘伟刚, 任贾文, 秦翔, 等. 珠穆朗玛峰绒布冰川水文过程初步研究[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 663-667.]
- [16] Ren Jiawen, Qin Dahe, Kang Shichang, et al. 2003 Glacier variability and climate warm-dry character in middle Himalayas[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(23): 2478-2482. [任贾文, 秦大河, 康世昌, 等. 喜马拉雅山中段冰川变化及气候暖干化特征[J]. *科学通报*, 2003, 48(23): 2478-2482]
- [17] Chinese Science Team to Mount Everest. Scientific Report on Mount Everest Exploration[M]. Beijing: Science Press, 1962: 152-180. [中国珠穆朗玛峰登山队科学考察队. 珠穆朗玛峰地区科学考察报告[M]. 北京: 科学出版社, 1962: 152-180.]
- [18] Ren Jiawen, Qin Dahe, Jing Zhefan. Climatic warming causes the glacier retreat in Mt. Qomolangma[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(2): 88-89. [任贾文, 秦大河, 井哲帆. 气候变暖使珠穆朗玛峰地区冰川处于退缩状态[J]. *冰川冻土*, 1998, 20(2): 88-89.]
- [19] Hou Shugui, Zhang Dongqi. Comparison of two ice core records since 1954 from Mt. Qomolangma (Everest) region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(3): 256-260. [侯书贵, 张东启. 1954 年以来珠穆朗玛峰地区两支冰芯记录的对比如分析[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(3): 256-260.]
- [20] Hou Shugui, Qin Dahe, Wake C P, et al. Glacier net accumulation variation in ice core and its climatic significance in Mount Everest[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(21): 2336-2341. [侯书贵, 秦大河, C. P. Wake, 等. 珠穆朗玛峰地区冰川净积累量变化的冰芯记录及其气候意义[J]. *科学通报*, 1999, 44(21): 2336-2341.]
- [21] Zhang Dongqi, Xiao Cunde, Qin Dahe. Himalayan glaciers fluctuation over the latest decades and its impact on water resources[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(5): 885-895. [张东启, 效存德, 秦大河. 近几十年来喜马拉雅山冰川变化及其对水资源的影响[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(5): 885-895]
- [22] Jing Zhefan. Movement and change of some typical glaciers in China under the background of climate change[D]. Lanzhou: Institute of Environment and Engineering in Cold and Arid Regions, Chinese Academy of Sciences, 2007. [井哲帆. 气候变化背景下中国若干典型冰川的运动及其变化[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2007.]
- [23] Chen Fei, Cai Guoqiang, Zheng Mingguo, et al. Melting characteristics and ablation calculation in Nam Co basin[J]. *Mountain Research*, 2015, 33(4): 465-472. [陈飞, 蔡强国, 郑明国, 等. 纳木错流域冰雪消融特性研究及融水量估算[J]. *山地学报*, 2015, 33(4): 465-472]
- [24] Liu Weigang, Ren Jiawen, Liu Jingshi, et al. Runoff simulation of the Rongbuk glacier watershed around the Mt. Qomolangma, Central Himalaya, using Hycymodel[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(6): 1149-1459. [刘伟

- 刚, 任贾文, 刘景时, 等. 喜马拉雅山珠峰绒布冰川流域径流模拟[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1449-1459]
- [25] Zou Xiaowei, Sun Weijun, Yang Diyi, et al. Effect of cloud on surface energy balance of Laohugou Glacier No. 12, Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2): 342-356. [邹小伟, 孙维君, 杨堤益, 等. 云量对祁连山老虎沟 12 号冰川表面能量平衡的影响[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 342-356. ]

## Comparison of hydrological regime between two glacier-fed watersheds in the north Himalayas

LIU Yuting<sup>1</sup>, LIU Jingshi<sup>1,2</sup>, Guligena Halimulati<sup>1</sup>, Namaiti Tuoheti<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Biological Resources and Ecology of Pamirs Plateau in Xinjiang Uygur Autonomous Region, School of Life and Geography, Kashi University, Kashgar 844000, Xinjiang, China; 2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Climate of the middle Himalayas in 2005 was warm and dry, particularly with the highest summer temperatures. Used both observed hydrometeorologic data at the Rongbuk glacier of Mount Qomolangma and discharge data at glacier-fed Karuxung watershed and meteorologic data at the Nargaze station in the Yamdrok lake basin, the meltwater flow processes were analyzed for the two studied river, and established the numerical model for ice and snow ablation. The results showed that there was good statistical correlation ( $r>0.8$ ) between temperature and precipitation in the two basins, indicated that the climate processes in the two regions were similar at the regional scale. The melting intensity of Rongbuk glacier was 2 times of that of Kaluxiongqu glacier, and the glacial retreat rate was 2.5 times of that in Kaluxiongqu glacier, indicated that the water loss estimated by glacial melting temperature basically reflected the fact of glacier changed in two places. The proposed model can be used to estimate the melt water and glacier changes in the vast glacier basins between the two glacier regions, and to reconstruct the long-term hydrological processes and water resources changes in Qomolangma and other parts of the Himalayas.

**Key words:** Himalayas; Rongbuk watershed; meltwater flow; Karuxung watershed; summer temperature

(责任编辑: 张世强)