

文章编号: 1008-2786-(2017)5-717-10

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000271

贡嘎山海洋型冰川监测与研究: 历史、现状与展望

刘巧^{1*}, 张勇²

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041

2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 贡嘎山是我国典型海洋型现代冰川发育中心之一, 冰川动态与环境演替关系密切。20 世纪 80 年代初的系统科考, 将其东坡海螺沟冰川定位为我国典型海洋型冰川并开展了连续监测, 之后逐步建立与完善的野外台站为冰川研究及其相关的环境与生态系统定位监测提供了重要基础平台。本文主要围绕冰冻圈地理学领域, 对贡嘎山地区典型海洋型冰川的科考、定位监测及相关研究进行了回顾, 并结合近年来国内外冰川学领域的发展趋势, 探讨与展望未来在该地区亟需关注的与冰川学科相关的科学问题。

关键词: 贡嘎山; 海洋型冰川; 定位监测; 冰川变化; 冰冻圈

中图分类号: P931.4

文献标志码: C

引言

我国藏东南的横断山及念青唐古拉山中东段地区是季风海洋型冰川的主要分布区^[1], 这些冰川约占我国西部冰川总面积的 22%^[2], 其冰川融水是西南主要河流的重要径流补给来源。海洋型冰川是指发育在海洋型气候条件下, 冰体大部分接近零度的冰川, 相对于大陆型气候条件下的“冷冰川”冰温高, 因此又称“温冰川”。受海洋型气候和季风影响, 我国海洋型冰川区降水充沛, 冰川具有平均海拔相对较低、消融强烈、运动速度快和物质交换水平高等强动态变化特征^[3-7], 这不仅对下游水资源开发利用^[8-10]及生态环境演变^[11, 12]产生显著影响, 也是导致我国海洋型冰川作用区如藏东南和横断山区泥石流/滑坡和冰湖溃决洪水等山地灾害频发的主要诱因之一^[13-16]。

贡嘎山位于青藏高原东南缘, 位于四川盆地向青藏高原过渡的大雪山中段, 是横断山地区最高峰。由于其气候上受海洋型季风影响, 高海拔区降雨量

充沛, 加之其有利的冰川发育地形, 使之成为我国西部地区除藏东南、念青唐古拉山中东部之外最大的海洋型冰川群发育中心, 也是横断山地区最大的冰川作用中心。贡嘎山地区第四纪冰川作用强烈, 现代冰川海洋型特征明显, 冰川动态与毗邻山地的生态环境演化及灾害发育关系密切, 长期以来, 吸引了众多从事冰川学、地貌学以及生态、水文和灾害等领域的学者前往开展研究工作。本文围绕冰冻圈地理学领域, 简要回顾过去以来针对贡嘎山地区典型海洋型冰川的科学考察、定位监测及相关研究的进展, 结合近年来国内外冰川学领域的发展趋势, 探讨与展望未来在该地区亟需关注的与冰川学科相关科学问题。

1 概述

贡嘎山的现代冰川是在季风海洋型气候条件下形成的, 属季风海洋型温冰川, 其西部和北部与青藏高原和巴颜喀拉山相接地带, 有少数复合过渡型冰川发育^[17]。据我国第一次冰川编目, 贡嘎山主峰周围共发育冰川 74 条^[18], 是我国主要海洋型冰川分

收稿日期 (Received date): 2017-06-22; 改回日期 (Accepted date): 2017-09-26

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41371094; 41671057) [National Nature Science Foundation of China (41371094; 41671057)]

作者简介 (Biography): 刘巧 (1980-), 男, 湖北随州人, 副研究员, 主要从事冰川学研究 [Liu Qiao (1980-), male, born in Suizhou, Hubei, associate professor, mainly research on glaciology] E-mail: liuqiao@imde.ac.cn

布区之一^[2]。受水汽输送方向的影响,贡嘎山东坡气候条件比西坡相对湿润^[19],因此东坡冰川更为发育,代表性的较大型山谷冰川如海螺沟冰川、磨子沟冰川、燕子沟冰川和南门关沟冰川等均位于其东坡;西坡较大冰川如大、小贡巴冰川,二者末端曾经相连,近期已分开为两条。西坡较东坡冰川数量多,但规模普遍小于东坡;东西坡现代冰川雪线高度差异明显,东坡(4800 ~ 5000 m)低于西坡(5000 ~ 5200 m)^[20]。

贡嘎山地区的冰川研究,最早始于 20 世纪 20—30 年代德国和奥地利地理学家的科考报道,之后伴随国内登山与科考活动的兴起,对贡嘎山地区冰川及其相关领域的研究逐渐由野外半定位向定位监测转变,研究内容也随之不断丰富和深入(表 1)。其中,早期的横断山冰川考察^[17](隶属于青藏高原综合科学考察)不仅为后来研究冰川变化积累了宝贵的对比研究资料,同时也为贡嘎山海螺沟冰川定位监测奠定了基础,继之建立的中国科学院四川贡嘎山森林生态系统国家野外科学观测研究站(简称贡嘎山站),成为冰川定位监测与研究的重要平台^[21]。

2 贡嘎山海洋型冰川相关领域研究进展

2.1 第四纪冰川研究

20 世纪 30 年代在对贡嘎山地区地貌考察过程中,奥地利学者 Heim 等^[22]首次基于贡嘎山周边的地质、地貌、冰川和古冰川遗迹等调查开展了冰川第四纪研究。崔之久先生是最早报道贡嘎山冰川相关地貌的国内学者,其 1957 年对贡嘎山大、小贡巴冰川和海螺沟冰川流域的古冰川沉积与地貌进行了描

述^[23]。20 世纪 80 年代初横断山冰川考察期间^[17],首次系统的对贡嘎山地区第四纪中期尤其末次冰期作用以来保留的遗迹进行了全面研究。之后,1990 年中苏联合冰川考察^[31]期间,郑本兴等^[32]首次引入定年方法对该地区全新世以来的冰川沉积进行了年代学研究,并系统讨论了冰川变化与河流阶地发育以及磨西台地成因的关系^[33, 40]。基于上述成果,基本完成贡嘎山第四纪冰川遗迹与冰期的划分^[41]。近年来,随着定年技术的发展,如 ESR 和 OSL 测年技术在第四纪冰川研究中的应用,王杰等^[46]对贡嘎山地区第四纪以来的冰川沉积进行了新的定年,确认贡嘎山东坡至少经历了 5 次规模较大的冰进,分别对应于小冰期、新冰期、MIS2, MIS3 中期和 MIS6,并纠正了早期划定的贡嘎、南门关和雅家埂冰期,分别对应于末次冰期晚冰阶、中冰阶和倒数第二次冰期(MIS6)。

2.2 现代冰川变化研究

在全球变暖背景下,海洋型冰川分布区是中国西部冰川退缩最显著的地区之一^[47]。作为贡嘎山地区典型海洋型冰川的代表性冰川,对海螺沟冰川的变化开展了较多研究。近年来,随着气候变暖,海螺沟冰川后退趋势明显。根据 1930 年的冰川末端标记位置^[22],自 20 世纪 30 年代至今,冰川已累计退缩 2 km 左右,其中 1966 至 2010 年间退缩了 1.15 km^[48],冰川平均年退缩速率约 25 ~ 30 m/a。冰川退缩的同时也在减薄,与 1930 年冰川照片对比可发现海螺沟冰川消融区减薄明显,其中 2 号冰川目前已和海螺沟冰川分离(图 1)。根据近期测得的冰川高程变化推测,1989—2008 年间冰川消融区冰舌端的冰川厚度平均减薄 33.9 ± 11.2 m,相当于 1990 年左右平均厚度(约 130 m)的 26%^[4],厚度减薄近 1/4。1989—2008 年间海螺沟冰川厚度减薄速率高

表 1 贡嘎山地区冰川监测及相关研究历程
Tab. 1 Observation and research history of glaciers in Mt. Gongga

时间	研究方式	主要研究内容	参考文献
1930	科考探险	冰川地貌、冰川摄影与早期制图	[22]
1957	登山科考	冰川、冰缘地貌、古冰川作用	[23]
1981—1983	横断山科考	短期气象、冰川消融、运动、冰川测厚、冰川水文、大地测量与冰川制图等	[17, 24]
1983—1989	半定位监测	标准气象观测、冰川消融、运动、冰川测厚、冰川水文等	[25—30]
1990	中苏联合 冰川考察	首次开展积累区观测取样;东西坡典型冰川第四纪地貌调查与定年;常规冰川过程监测以及气象水文等要素协同观测	[31—34]
1988—今	定位监测 (贡嘎山站)	流域梯度气象、水文观测;冰川消融与运动、冰川水文过程、冰川表碛、摄影测量、冰川变化监测、冰川退缩与植被演替等	[7, 35—45]

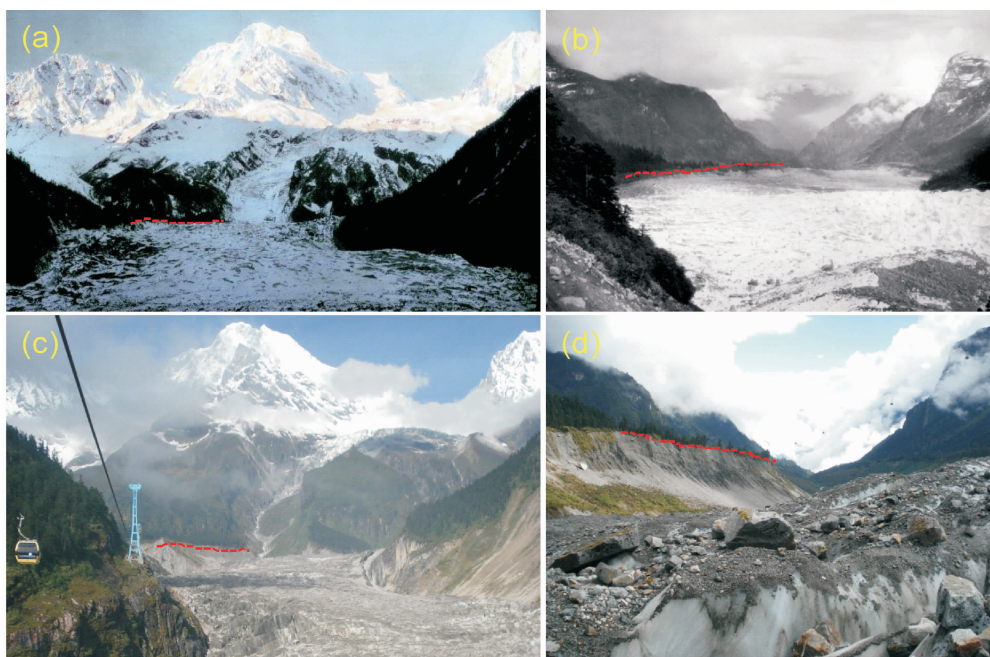


图1 海螺沟冰川变化对比(1930—2013): 1930年照片(a、b)拍摄于Heim考察期间^[22], 2013年照片(c、d)由刘巧拍摄(注:红色虚线标出了对应时期的大致冰面高度)

Fig. 1 Changes of Hailuoguo Glacier by comparing historical photographs between 1930 and 2013.

(a) and (b) were taken by Heim in 1930s^[22], (c) and (d) by Liu Qiao in 2013.

达 -1.78 ± 0.59 m/a, 甚至高于藏东南念青唐古拉东部一些海洋型冰川减薄速率的最高估计值 -1.34 ± 0.29 m/a^[49]。基于重复花杆观测的运动速度变化表明, 冰川运动速度总体呈减缓趋势, 1981—2008年间夏季冰川消融区运动速度平均减小了31%^[50]。

随着遥感技术在冰冻圈变化监测中的应用与发展, 近年来使用多源卫星影像存档数据开展了针对整个贡嘎山地区的冰川变化研究^[48, 51]。结果表明, 1966—2009年间, 贡嘎山地区冰川总面积由257.7 km² 缩减为228.5 km², 面积减少了29.2 km² (-11.3%), 仅次于藏东南岗日嘎布地区, 明显高于青藏高原西部和内陆地区^[51]。贡嘎山东西坡冰川变化差异显著, 面积减少率分别为9.8%和14.6%, 西坡冰川呈现更明显的物质亏损。通过对典型冰川冰面高程变化的重复测量, 获取了部分较大冰川消融区冰川减薄情况^[48]: 1966—2010年间, 海螺沟冰川、燕子沟冰川和西坡大贡巴冰川消融区年均厚度减薄率分别为 0.90 ± 0.45 m/a, 1.12 ± 0.45 m/a 和 1.06 ± 0.45 m/a。西坡的大贡巴冰川, 尽管消融区大部分为相对厚的表碛所覆盖^[52], 但发现其冰川减薄速率并不低, 甚至在部分时段高于东坡的海螺沟冰川^[48]。

2.3 现代冰川的海洋型特征及物质平衡过程

海洋型冰川消融期相对较长, 一般始于3月, 结束于12月, 5月至10月为冰川的主要消融期。由于海洋型冰川冰温高, 大部分冰体处于压力融点, 因此对外界热量输入更敏感^[53], 液态降水、冰面河/湖以及薄层表碛等热量传输过程对冰川消融的促进作用更为明显^[54-56]。近期研究表明, 受不同的季风环境影响, 我国西南地区的海洋型冰川物质平衡过程存在显著的区域差异^[5, 6], 但总体来说海洋型气候条件下的冰川较大陆型更敏感。Aizen等^[57]基于短期观测资料的冰川消融与气温关系的经验公式获取了海螺沟冰川1989—1990年的物质净平衡为-0.12 m。随后, 谢自楚等^[7]基于零平衡线法和最大熵法, 估算了海螺沟冰川1988—1997年间的物质平衡平均为-0.47 m, 与高亚洲边缘山脉的冰川一致处于强烈的物质损失状态。随着在贡嘎山冰川区观测资料的积累, Zhang等^[58]发展了基于物理机制的流域尺度冰川能量-物质平衡模型。该模型除了考虑冰川区不同下垫面的能量变化过程, 还考虑了冰川表面积雪转化为冰川冰的物理过程、融水再冻结过程, 同时耦合了表碛覆盖消融模型和冰川面积变化模型。模拟结果表明, 海螺沟冰川流域在过去的几十年间(1952—2009)总体处于物质亏损状态, 平均

物质平衡为 -0.42 m , 尤其是在 2001—2009 年间, 冰川物质亏损加速, 其平均物质平衡为 -0.79 m , 大约是 1959—2000 年间平均物质平衡的 2.3 倍, 该结果与在藏东南帕隆藏布 94 号冰川获取的结果相类似^[5]。

表碛覆盖是贡嘎山地区海洋型冰川的另一典型特征, 该地区几条较大型冰川如海螺沟冰川、燕子沟冰川、南门关沟冰川以及大小贡巴冰川的消融区均为厚度不一的表碛所覆盖。贡嘎山地区表碛覆盖型冰川占冰川总量的 68%, 表碛覆盖 (32 km^2) 占冰川面积的 13.5%^[52]。表碛广泛分布不仅反映了海洋型冰川的强烈侵蚀与搬运作用, 其空间范围与厚度状况也会改变冰川表面热量传输进而影响冰川消融、物质平衡和融水产流过程; 同时, 表碛覆盖区由于差异消融导致的更复杂的冰面结构, 如冰崖/冰裂隙、冰面河/湖、冰内/冰下排水系统等, 均会不同程度的对冰川消融过程产生促进作用^[59]。近年来, 关于表碛覆盖对冰川消融的综合效应是促进或抑制作用存在广泛争议^[60-63]。利用贡嘎山东坡海螺沟冰川表碛分布及厚度的野外调查资料, 采用遥感热红外波段对贡嘎山地区冰川的表碛分布和厚度进行了区域反演, 并结合能量-物质平衡模型模拟分析了表碛覆盖的综合效应^[52, 64]。结果表明, 贡嘎山地区冰川的表碛覆盖总体上促进了冰川消融, 近十分之一的冰川消融区因薄层表碛的存在而消融加剧^[52], 约 40.8% 的区域表碛抑制冰川消融; 同时表碛空间分布的差异性对于贡嘎山冰川消融的梯度变化和空间变化有着显著的影响, 进而影响冰川物质平衡的变化趋势。

2.4 海洋型冰川水文过程

海洋型冰川比大陆型冰川对气候变化的响应更为敏感, 伴随冰川变化引发的流域径流变化也更为显著。自有观测记录以来, 海螺沟冰川流域径流增加非常明显^[43, 65]。海螺沟冰川流域年径流总量从 1994 年的 $232.4 \times 10^6\text{ m}^3$ 增至 2005 年的 $684.5 \times 10^6\text{ m}^3$; 而与毗邻的非冰川森林小流域却表现出轻微的减少趋势, 表明不同类型流域(下垫面类型差异)在相同的气候变化背景下, 径流及其变化特征差别显著。气候变化通过冰川及其消融变化影响流域径流量和过程, 冰川近期的强烈消融是引发海螺沟冰川流域径流显著增加的直接原因。

冰川后退与物质亏损的加快, 对所在地区河河源区的水文、水循环过程将产生重要的影响, 导致河

川径流呈现复杂的变化特征。为了进一步分析海洋型冰川变化对流域径流过程及其未来趋势的影响, Zhang 等^[58]基于多源数据集(遥感、气象、冰川等)和能量守恒原理, 在海螺沟冰川流域发展了耦合冰冻圈过程的流域冰川-水文模型(Glacio-Hydrological Model)。该模型充分考虑流域空间异质性的特征、冰川变化及其径流产汇流的物理过程, 利用数理方程估算整个流域的产汇流, 进而完整地描述了冰川流域水文过程。模型结果表明, 在海螺沟冰川流域, 尽管冰川消融与降雨同期, 在 1950—2013 年间, 冰川融水对流域径流的贡献占主导地位, 其平均补给为 53.4%。基于该模型, 同时开展了两种典型浓度路径(RCP4.5 和 RCP8.5)下 21 世纪流域径流各组分(冰川径流、积雪径流、降雨径流和地下水补给)变化情景预估研究^[66], 分析发现, 海螺沟冰川流域径流在两种气候情景下呈现不同的变化趋势, 冰川径流在 2006—2010 年间处于峰值, 在未来则呈减少趋势, 即对流域径流的补给比例会逐渐降低。目前许多流域冰川径流总体呈现增加趋势, 但其过程存在显著差异^[67-69], 从全球尺度上来说, 冰川径流将在 2075 年左右达到峰值, 此后开始出现减少趋势^[69]。在海螺沟冰川流域的冰川径流峰值出现时间的不同, 反映了海洋型冰川对气候变化的敏感性与独特性。

冰内及冰下水系发育是海洋型温冰川消融区的另一典型特征, 其形成与演化具有时空变化性, 其变化不仅影响着冰川汇水储水及融水径流过程, 而且会通过冰下水力状况的变化影响冰川运动、冰川侵蚀等过程^[70]。我国学者最早关于温冰川排水系统的研究即是在海螺沟冰川上开展的, 如黄茂桓等^[71]在海螺沟冰川消融区通过热水钻进行的钻孔内水位观测; 吕儒仁等^[72]分析了海螺沟冰川水文站 1994 年观测的水位过程, 发现具有陡降急升现象, 推断海螺沟冰川冰下水系存在频繁的堵溃事件。近年来, 刘巧等^[73]针对海螺沟冰川消融区冰舌段开展了消融期内的重复示踪试验, 结合冰川末端径流过程的分析^[74, 75], 揭示了冰舌段冰下排水通道的形成及其季节演化的主要过程和相关特征。进一步的模拟分析表明^[76], 海螺沟冰川冰下排水通道存在明显的季节变化, 表现为夏季扩张与消融期始末的收缩, 存在收缩-扩张-收缩的周期变化特征; 受海螺沟冰川消融区狭长的冰舌形态制约, 冰舌段的冰下水系空间结构相对单一, 冰下排水干道基本上沿冰舌中线分

布,不同冰下水压系数情况下,均存在明显的主要排水干道,支流并不发达。

2.5 海洋型冰川作用区生态与环境演化

由于海洋型冰川区气候暖湿,加之小冰期以来冰川退缩剧烈,冰川前缘为陆地生态系统的原生演替提供了理想之地。海螺沟冰川退缩迹地植被演替即是典型的原生演替^[77],与原生水生演替与旱生演替相比存在显著差异^[78],成为研究陆地生态系统原生演替的天然实验室。自1988年以来,贡嘎山站在海螺沟冰川前缘大约两公里范围内小冰期以来的冰川退缩迹地,开展了详细的冰川后退观测与植被群落演化调查,发现在不足百年的时期内,由冰川末端的裸岩砾石滩地可发展演化形成地带性的顶级森林群落-峨嵋冷杉,同时根据各等级生态群落的演化年龄,揭示出演替阶段与冰川退缩过程密切相关^[79]。

近年来,随着学科发展,对海螺沟冰川退缩迹地的生态环境演化研究逐渐侧重于对生态系统包括土壤的演化过程和机理的分析。如通过年龄序列方法,探索了冰川退缩迹地上阔叶林碳动态以及碳氮计量学关系,阐明了各演替阶段上碳氮关系的动态变化及其与植被和土壤发育之间的关系^[11];由于土壤磷的生物有效性对植被原生演替具有重要影响^[80],利用土壤磷连续提取技术分析贡嘎山海螺沟冰川退缩迹地不同成土年龄的土壤磷形态^[81],重建了土壤磷形态随成土年龄的变化序列,发现与植被的原生演替存在一定的耦合关系,为气候变暖如何影响高山地区生物地球化学循环提供了新的证据^[82, 83]。

2.6 贡嘎山东坡的冰川灾害

由于海洋型冰川对山区地表的强力改造作用,冰川区各类山地灾害如山洪、泥石流和滑坡等活动频繁。我国藏东南海洋型冰川区一个显著特点即是各类冰湖(如冰面湖、冰下湖、冰碛湖等)溃决引发的泥石流或洪水灾害分布广泛且爆发频繁,加之冰川融水叠加暴雨型泥石流等灾害,已给冰川区下游造成巨大生命财产损失^[13, 84]。贡嘎山地区在第四纪地质时期就曾发生过多期次的泥石流活动,海螺沟和燕子沟景区进口所在的磨西台地就是冰川、泥石流和河流堆积共同形成的^[40]。早期通过对贡嘎山地区的地貌演化研究,对贡嘎山全新世以来的冰川变化与泥石流发育的关系进行过深入探讨,指出在气候转暖与冰川退缩阶段泥石流发生频率剧增^[33]。

贡嘎山东坡的几个主要冰川流域:如海螺沟、燕子沟和南门关沟等,近年来山洪泥石流、山体滑坡等山地灾害日益频繁,一些极端年份甚至发生区域群发性泥石流。自1955年有泥石流事件记录以来,贡嘎山地区发生泥石流近20次,泥石流爆发大致存在10a左右的准周期,以1955, 1966, 1976, 1989和2005年的泥石流灾害较为严重^[14]。贡嘎山地区降雨充沛,加之雨热同季,夏季的冰雪强消融往往叠加强降雨引发山洪泥石流。有详细记载的特大型泥石流事件,如1989年7月26日燕子沟泥石流^[85]和2005年8月11日东坡群发性泥石流^[86],均为冰雪消融和雨水混合型泥石流。贡嘎山地区冰碛湖并不发育,目前仅在西坡贡巴冰川和上日乌且冰川末端发现有较小规模的冰湖发育。但根据历史记载,贡嘎山北坡曾在1977年6月2日发生过冰湖溃决事件,引发泥石流并淹没康定县城^[87]。

3 展望

3.1 典型冰川定位监测

目前贡嘎山地区野外监测主要集中在东坡,有必要将定位监测逐步拓展到其西坡,建立贡嘎山地区较大型海洋型冰川对比监测体系,开展东西坡冰川区气象以及不同典型冰川下垫面的消融过程及冰川物质平衡、冰川水文等对比监测,探索针对较大型海洋型冰川的定位监测方法和体系(图2)。贡嘎山东坡海螺沟冰川区:在已有监测项目(梯度气象、水文、冰川消融过程等)的基础上,重点补充高海拔区积雪监测(包括积累区雪坑观测与取样、总雨/雪量观测等)、不同厚度表碛区地温/冰温监测及冰川动力过程监测;开展冰崖/冰裂隙分布及其动态变化重复测量,监测典型冰崖的表面温度及其消融过程;开展典型冰面河/冰面湖变化及其水文过程(水位、水温变化等)监测,并测量与冰面河、冰面湖接触及周边冰体的消融过程。贡嘎山西坡大贡巴冰川区:重点布设梯度气象与冰川流域径流观测,开展消融期不同典型冰川下垫面(裸冰、表碛覆盖、冰崖、冰面河/湖等)的消融过程监测,选取典型冰面湖监测其动态及热量平衡/传输过程。

3.2 复杂下垫面海洋型冰川综合观测与模拟

近年来,针对藏东南海洋型冰川物质平衡过程的监测与模拟研究取得了较大进展,但对较大型海洋型冰川物质平衡的系统研究还相对缺乏,主要有

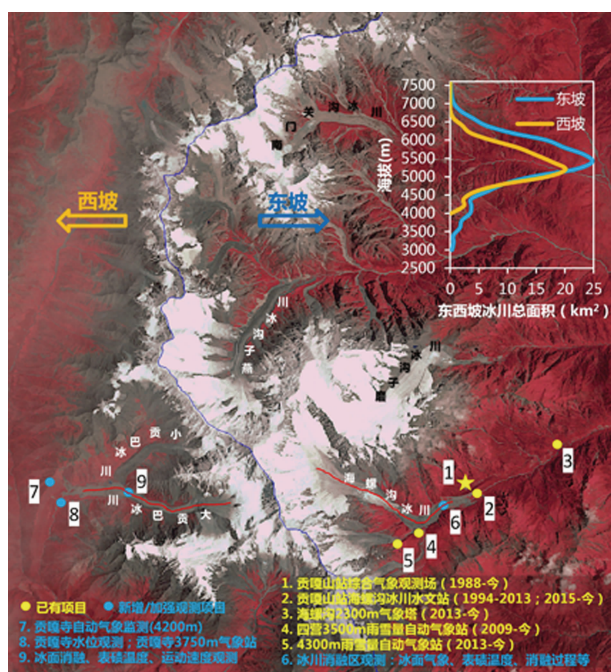


图2 贡嘎山东西坡典型海洋型冰川野外对比定位监测

Fig. 2 Current and prospected monitoring networks on typical temperate glaciers in Mt. Gongga

以下原因:1)大冰川本身监测难度大;2)海洋型冰川消融区破碎、积累区条件恶劣增加了野外定位监测的难度;3)冰川物质交换水平高,冰川运动速度快,野外复测工作量大。然而,较大型冰川由于其相对高的融水产流总量和相对强的地貌改造作用,在区域/流域水资源变化、生态演化以及灾害发育过程中往往发挥主导影响,监测、研究其动态演化过程显得尤为重要。

认识较大型海洋型冰川对气候变化的响应过程,需全面考虑复杂冰面状况对冰川消融进而物质平衡过程的影响,基于多源全方位监测,构建综合集成模型,全面剖析不同地形与气候条件、不同冰川下垫面结构等因素影响下的冰川物质平衡过程分异规律。未来可选取贡嘎山地区典型较大型海洋型冰川(如海螺沟冰川、大小贡巴冰川和燕子沟冰川等)为研究对象,针对它们复杂的冰川下垫面结构:裸冰、表碛覆盖区、冰崖/冰裂隙以及冰面河/湖等,探索发展基于不同下垫面的冰川消融过程模型,开展系统、全方位、多要素野外定位与遥感监测和模型模拟对比研究,深入剖析我国典型海洋型冰川物质平衡特征及其对气候变化的动态响应过程。基于贡嘎山区域冰川物质平衡的模拟对比,分析区域海洋型冰川物质平衡对气候变化的响应过程,同时揭示贡嘎山东西坡差异性气候、地形条件等对区域冰川物质平

衡过程分异的影响。

3.3 海洋型冰川动态及其环境与灾害效应研究

贡嘎山海洋型冰川进退与环境演化密切相关,今后应继续深入开展冰川退缩迹地陆地生态系统演化的过程和机理研究,结合生态系统演化模型开展量化模拟研究,综合分析各环境要素变化及相关阈值对原生系统发育和演化的影响,尤其应关注伴随海洋型冰川动态的水热过程变化与生态环境之间的物能交换关系,不断开展海洋型冰川学与生态学的学科交叉研究^[88, 89]。此外,海洋型冰川强烈退缩后冰碛物(冰川末端的松散堆积物)富集,冰川厚度减薄,冰面湖扩张,伴随极端降水事件的频发,增加了海洋型冰川区山洪和泥石流灾害的形成概率。随着气候变暖的加剧和极端气候事件的增加,加之贡嘎山地区旅游开发的不断深入和人类活动的时空范围大大扩展,该地区冰川引发灾害问题将日益严峻。研究海洋型冰川区各类灾害的形成过程和发生机制,发展监测与预警技术,是近期亟需关注并开展深入研究的课题,对于我国西南山区防灾减灾也具有借鉴意义。

参考文献 (References)

- [1] SU Z, SHI Y. Response of monsoonal temperate glaciers to global warming since the Little Ice Age [J]. Quaternary International, 2002, **97-98**: 123-131.
- [2] 施雅风, 刘时银. 中国冰川对21世纪全球变暖响应的预估 [J]. 科学通报, 2000, **45**(4): 434-438. [SHI Yafeng, LIU Shiyin. Estimate of the response of glaciers in China to the global warming-up in the 21th century [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, **45**(4): 434-438.]
- [3] 何元庆, 张忠林, 姚檀栋, 等. 中国季风温冰川区近代气候变化与冰川动态 [J]. 地理学报, 2003, **58**(4): 550-558. [HE Yuanqing, ZHANG Zhonglin, YAO Tandong, et al. Modern changes of the climate and glaciers in China's Monsoonal temperate-glacier region [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, **58**(4): 550-558.]
- [4] 刘巧, 刘时银, 张勇, 等. 贡嘎山海螺沟冰川消融区表面消融特征及其近期变化分析 [J]. 冰川冻土, 2011, **33**(2): 227-236. [LIU Qiao, LIU Shiyin, ZHANG Yong, et al. Surface ablation features and recent variation of the lower ablation area of the Hailuoguo Glacier [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(2): 227-236.]
- [5] YANG W, GUO X, YAO T, et al. Recent accelerating mass loss of southeast Tibetan glaciers and the relationship with changes in macroscale atmospheric circulations [J]. Climate Dynamics, 2016, **47**(3): 805-815.
- [6] YANG W, YAO T, GUO X, et al. Mass balance of a maritime glacier on the southeast Tibetan Plateau and its climatic sensitivity

- [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118** (17): 9579–9594.
- [7] 谢自楚, 苏珍, 沈永平, 等. 贡嘎山海螺沟冰川物质平衡、balance and water exchange of Hailuoguo Glacier in Mount Gongga and 水交换特征及其对径流的影响 [J]. *冰川冻土*, 2001, **23** (1): 7–15. [XIE Zichu, SU Zhen, SHEN Yongping, et al. Mass their influence on glacier melt runoff [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, **23** (1): 7–15.]
- [8] SU F, ZHANG L, OU T, et al. Hydrological response to future climate changes for the major upstream river basins in the Tibetan Plateau [J]. *Global and Planetary Change*, 2016, **136**: 82–95.
- [9] LUTZ A F, IMMERZEEL W W, SHRESTHA A B, et al. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation [J]. *Nature Climate Change*, 2014, **4** (DOI: 10.1038/NCLIMATE2237): 587–592.
- [10] KASER G, GRO HAUSER M, MARZEION B. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes [J]. *PNAS*, 2010, **107** (47): 20223–20227.
- [11] YANG Y, WANG G X, SHEN H H, et al. Dynamics of carbon and nitrogen accumulation and C:N stoichiometry in a deciduous broadleaf forest of deglaciated terrain in the eastern Tibetan Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, **312**: 10–18.
- [12] HODSON A, ANESIO A M, TRANTER M, et al. Glacial Ecosystems [J]. *Ecological Monographs*, 2008, **78** (1): 41–67.
- [13] 程尊兰, 朱平一, 党超, 等. 藏东南冰湖溃决泥石流灾害及其发展趋势 [J]. *冰川冻土*, 2008, **30** (6): 954–959. [CHENG Zunlan, ZHU Pingyi, DANG Chao, et al. Hazards of debris flow due to glacier-lake outburst in southeastern Tibet [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, **30** (6): 954–959.]
- [14] 何德伟, 马东涛, 黄海, 等. 贡嘎山旅游景区泥石流灾害及减灾对策 [J]. *水土保持通报*, 2008, **28** (1): 140–144. [HE Dewei, MA Dongtao, HUANG Hai, et al. Debris Flow Hazards and Mitigation Countermeasures of the Scenic Spot in Mt. Gongga [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, **28** (1): 140–144.]
- [15] WANG W, YAO T, GAO Y, et al. A first-order method to identify potentially dangerous glacial lakes in a region of the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Mountain Research and Development*, 2011, **31** (2): 122–130.
- [16] WANG W C, YAO T D, YANG X X. Variations of glacial lakes and glaciers in the Boshula mountain range, southeast Tibet, from the 1970s to 2009 [J]. *Annals of Glaciology*, 2011, **52** (58): 9–17.
- [17] 李吉均. 横断山冰川 [M]. 北京: 科学出版社, 1996. [LI Jijun, SU Zhen. *Glaciers in Hengduan Mountains* [M]. Beijing: Science Press, 1996.]
- [18] 蒲健辰. 中国冰川目录(长江水系) [M]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1994: 117–129. [PU Jiancheng. *Glacier Inventory of China (the Changjiang River Drainage Basin)* [M]. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1994: 117–129.]
- [19] 宋明琨. 贡嘎山的主要气候特征 [J]. *大自然探索*, 1987, **6** (20): 145–148. [SONG Mingkun. The climate characters of the Gongga Mountain [J]. *Exploreaton of Nature*, 1987, **6** (20): 145–148.]
- [20] 苏珍, 梁大兰, 洪明. 贡嘎山海洋型冰川发育条件及分布特征 [J]. *冰川冻土*, 1993, **15** (4): 551–558. [SU Zhen, LIANG Dalan, HONG Ming. Developling conditions, amounds and distributions of glaciers in Gongga Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1993, **15** (4): 551–558.]
- [21] CHENG G. Gongga Alpine Ecosystem Observation Station of the Chinese Academy of Sciences [J]. *Journal of Mountain Science*, 2004, **1** (2): 192.
- [22] HEIM A. The glaciation and Solifluction of Minya Gongkar [J]. *The Geographical Journal*, 1936, **87** (5): 444–450.
- [23] 崔之久. 贡嘎山现代冰川的初步观察——纪念为征服贡嘎山而英勇牺牲的战友 [J]. *地理学报*, 1958, **24** (3): 318–338. [CUI Zhijiu. Priliminary observation of present glaciers in the Mt. Gongga [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1958, **24** (3): 318–338.]
- [24] 宋明琨. 横断山冰川考察 [J]. *冰川冻土*, 1985, **1**: 98. [SONG Mingkun. Exploration of the glaciers in the Hengduan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, **1**: 98.]
- [25] 王彦龙, 邵文章. 贡嘎山海螺沟雪崩与冰川 [J]. *冰川冻土*, 1984, **6** (2): 37–45. [WANG Yanlong, SHAO Wenzhang. Avalanches and glacier at Hailuoguo in the Mt. Gongga [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1984, **6** (2): 37–45.]
- [26] 陈建明. 贡嘎山冰川图简介 [J]. *冰川冻土*, 1985, **7** (3): 204. [CHEN Jianming. Introduction of the Gongga Mountain glacier map [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, **7** (3): 204.]
- [27] 陈建明, 杨长泰. 地面和航空摄影联合测绘贡嘎山冰川图的尝试 [J]. *冰川冻土*, 1987, **9** (1): 47–53. [CHEN Jianming, YANG Changtai. Attempt to map of the glaciers on Gongga Mountain using a combination of terrestrial and aerial photogrammetry [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1987, **9** (1): 47–53.]
- [28] 康建成. 贡嘎山贡巴冰川冰川岩屑的粒度特征及意义 [J]. *冰川冻土*, 1987, **9** (1): 61–68. [KANG Jiancheng. Grain-size characteristics of glacial debris, and explanation of the processes of glacial transports and sediments at the Gongba Glaciers in Mt. Gongga [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1987, **9** (1): 61–68.]
- [29] 李树德, 姚河清. 贡嘎山山地石冰川的初步研究 [J]. *冰川冻土*, 1987, **9** (1): 55–60. [LI Shude, YAO Heqing. Preliminary study of the rock glaciers in the Gongga Mt. area [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1987, **9** (1): 55–60.]
- [30] 曹真堂. 贡嘎山贡巴冰川的水文特征 [J]. *冰川冻土*, 1988, **10** (1): 57–65. [CAO Zhentang. The hydrologic characteristics of the Gongba Glacier in the Mount Gongga area [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1988, **10** (1): 57–65.]
- [31] 苏珍, 奥尔洛夫 A B. 中苏联合贡嘎山冰川 1990 年考察简况 [J]. *冰川冻土*, 1991, **13** (2): 181–184. [SU zhen, ORLOV A B. The preliminary report on the Sino-Ussr Joint glaciological expedition to Gongga Shan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1991, **13** (2): 181–184.]

- [32] 郑本兴, 马秋华. 贡嘎山地区全新世的冰川变化、气候变化与河谷阶地发育 [J]. 地理学报, 1994, **49**(6): 500–508. [ZHENG Benxing, MA Qiuhua. The glacier variation, climatic change and the river valley development in the holocene on the Gongga Mountains [J]. Acta Geographica Sinica, 1994, **49**(6): 500–508.]
- [33] 郑本兴, 马秋华. 贡嘎山区全新世冰川变化与泥石流发育的关系 [J]. 山地研究, 1994, **12**(1): 1–8. [ZHENG Benxing, MA Qiuhua. Relationship between the glacier variation and the debris flow development of the holocene in the Gongga Mountains region [J]. Mountain Research, 1994, **12**(1): 1–8.]
- [34] XIE Z. Glaciers and environment in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau (1)—The Gongga Mountain [C] [J]. Beijing: Science Press, 1994.
- [35] 钟祥浩. 贡嘎山高山生态系统观测试验站总体设想 [J]. 山地研究, 1989, **7**(4): 266. [ZHONG Xianghao. General Design of Gongga Mountain Alpine Ecosystem Observation Experiment Station [J]. Mountain Research, 1989, **7**(4): 266.]
- [36] 曹真堂. 贡嘎山地区的冰川水文特征 [J]. 冰川冻土, 1995, **17**(1): 73–83. [CAO Zhen tang. The characteristics of glacier hydrology in the area of the Gongga Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, **17**(1): 73–83.]
- [37] 程根伟. 贡嘎山极高山区的降水分布特征探讨 [J]. 山地研究, 1996, **14**(3): 177–182. [CHENG Genwei. Exploration of precipitation features on extra-high zone of Mt., Gongga [J]. Mountain Research, 1996, **14**(3): 177–182.]
- [38] 苏珍, 宋国平, 曹真堂. 贡嘎山海螺沟冰川的海洋型特征 [J]. 冰川冻土, 1996, **18**(Special Issue): 51–59. [SU Zhen, SONG Guoping, CAO Zhen tang. Maritime characteristics of Hailuoguo Glacier in the Gongga Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, **18**(Special issue): 51–59.]
- [39] 吕儒仁. 海螺沟冰川水文情势的年内变化 [G]//陈富斌. 贡嘎山高山生态环境研究. 北京: 气象出版社, 1998: 73–76. [LU Ruren. Annual variation of hydrological processes of Hailuoguo Glacier [G]//CHEN Fubin. Study on Alpine Ecological Environment of Gongga Mountain. Beijing, China Meteorological Press, 1998: 73–76.]
- [40] 郑本兴. 贡嘎山东麓第四纪冰川作用与磨西台地成因探讨 [J]. 冰川冻土, 2001, **23**(3): 283–291. [ZHENG Benxing. Study on the quaternary glaciation and the formation of the Moxi Platform in the east slopes of the Mount Gongga [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23**(3): 283–291.]
- [41] 苏珍, 施雅风. 贡嘎山第四纪冰川遗迹及冰期划分 [J]. 地球科学进展, 2002, **17**(5): 639–647. [SU Zhen, SHI Yafeng. Quaternary glacial remains on the Gongga Mountain and the division of glacial period [J]. Advance in Earth Sciences, 2002, **17**(5): 639–647.]
- [42] 李伟, 程根伟, 罗辑, 等. 贡嘎山东坡海螺沟的河川径流特征 [J]. 山地学报, 2004, **22**(6): 698–701. [LI Wei, CHENG Genwei, LUO Ji, et al. Features of the nature runoff of Hailuo Ravine in Mt. Gongga [J]. Mountain Research, 2004, **22**(6): 698–701.]
- [43] 吕玉香, 王根绪. 1990—2007 年贡嘎山海螺沟径流变化对气候变化的响应 [J]. 冰川冻土, 2008, **30**(6): 960–966. [LU Yuxiang, WANG Genxu. Response of runoff variation to climate changes in Hailuoguo drainage basin in Gongga Mount in 1990—2007 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, **30**(6): 960–966.]
- [44] 余涛, 谢洪, 王士革, 等. 贡嘎山东坡湾东河泥石流的特征及危险度评价 [J]. 水土保持研究, 2008, **15**(3): 242–245. [SHE Tao, XIE Hong, WANG Shige, et al. Characteristics and hazard assessment of Wandong River debris flow on east slope of Gongga Mountain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, **15**(3): 242–245.]
- [45] 张国梁, 潘保田, 王杰, 等. 基于遥感和 GPS 的贡嘎山地区 1966—2008 年现代冰川变化研究 [J]. 冰川冻土, 2010, **32**(3). [ZHANG Guoliang, PAN Baotian, WANG Jie, et al. Research on the glacier change in the Gongga Mountain based on remote-sensing and GPS from 1966 to 2008 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(3): 454–460.]
- [46] 王杰, 潘保田, 张国梁, 等. 贡嘎山东坡中更新世晚期以来冰川作用年代学研究 [J]. 中国科学, 2012, **42**(12): 1889–1900. [WANG J, PAN B T, ZHANG G, et al. Late Quaternary glacial chronology on the eastern slope of Gongga Mountain, eastern Tibetan Plateau, China [J]. Science China-Earth Sciences, 2012, **42**(12): 1889–1900.]
- [47] YAO T, THOMPSON L, YANG W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings [J]. Nature Climate Change, 2012, **2**: 663–667.
- [48] ZHANG G, PAN B, CAO B, et al. Elevation changes measured during 1966–2010 on the monsoonal temperate glaciers' ablation region, Gongga Mountains, China [J]. Quaternary International, 2015, **371**: 49–57.
- [49] Kääb A, TREICHLER D, NUTH C, et al. Brief Communication: Contending estimates of 2003–2008 glacier mass balance over the Pamir-Karakoram-Himalaya [J]. The Cryosphere, 2015, **9**: 557–564.
- [50] ZHANG Y, FUJITA K, LIU S, et al. Multi-decadal ice-velocity and elevation changes of a monsoonal maritime glacier: Hailuoguo glacier, China [J]. Journal of Glaciology, 2010, **56**(195): 65–74.
- [51] PAN B T, ZHANG G L, WANG J, et al. Glacier changes from 1966–2009 in the Gongga Mountains, on the south-eastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau and their climatic forcing [J]. The Cryosphere, 2012, **6**: 1087–2012.
- [52] ZHANG Y, HIRABAYASHI Y, FUJITA K, et al. Heterogeneity in supraglacial debris thickness and its role in glacier mass changes of the Mount Gongga [J]. Science China Earth Sciences, 2015, **59**(1): 170–184.
- [53] OERLEMANS J. A note on the water budget of temperate glaciers [J]. The Cryosphere, 2013, **7**: 1557–1564.
- [54] ALEXANDER D, SHULMEISTER J, DAVIES T. High basal melting rates within high-precipitation temperate glaciers [J]. Journal of Glaciology, 2011, **57**(205): 789–795.
- [55] ANDERSON B, MACKINTOSH A, STUMM D, et al. Climate sensitivity of a high-precipitation glacier in New Zealand [J].

- Journal of Glaciology, 2010, **56**(195):114–128.
- [56] FOUNTAIN A G, WALDER J S. Water flow through temperate glaciers [J]. Reviews of Geophysics, 1998, **36**(3):299–328.
- [57] AIZEN V B, AIZEN H M. Regime and Mass-Energy Exchange of Subtropical Latitude Glaciers under Monsoon Climatic Conditions: Gongga Shan, Sichuan, China [J]. Mountain Research and Development, 1994, **14**(2):101–118.
- [58] ZHANG Y, HIRABAYASHI Y, LIU S. Catchment-scale reconstruction of glacier mass balance using observations and global climate data: Case study of the Hailuoguo catchment, south-eastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2012, **444**–**445**:146–160.
- [59] BENN D, BENN T, HANDS K, et al. Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards [J]. Earth-Science Reviews, 2012, **114**:156–174.
- [60] VINCENT C, WAGNON P, SHEA J M, et al. Reduced melt on debris-covered glaciers: investigations from Changri Nup Glacier, Nepal [J]. The Cryosphere, 2016, **10**(4):1845–1858.
- [61] SALERNO F, THAKURI S, TARTARI G, et al. Debris-covered glacier anomaly? Morphological factors controlling changes in the mass balance, surface area, terminus position, and snow line altitude of Himalayan glaciers [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017, **471**:19–31.
- [62] SCHERLER D, BOOKHAGEN B, STRECKER M R. Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover [J]. Nature Geoscience, 2011, **4**:156–159.
- [63] BANERJEE A. Brief communication: Thinning of debris-covered and debris-free glaciers in a warming climate [J]. The Cryosphere, 2017, **11**(1):133–138.
- [64] ZHANG D, ZENG X D, LI W, et al. Selection of optimum formulation for biosorbing lead and cadmium from aquatic solution by using PVA-SA's immobilizing Lentinus edodes residue [J]. Desalination and Water Treatment, 2011, **31**(1–3):107–114.
- [65] LIU Q, LIU S, ZHANG Y, et al. Recent shrinkage and hydrological response of Hailuoguo Glacier, a monsoonal temperate glacier in east slop of Mount Gongga, China [J]. Journal of Glaciology, 2010, **56**(196):215–224.
- [66] ZHANG Y, HIRABAYASHI Y, LIU Q, et al. Glacier runoff and its impact in a highly glacierized catchment in the southeastern Tibetan Plateau: past and future trends [J]. Journal of Glaciology, 2015, **61**(228):1–18.
- [67] CASASSA G, LOPEZ P, POUYAUD B, et al. Detection of changes in glacial run-off in alpine basins: examples from North America, the Alps, central Asia and the Andes [J]. Hydrological Processes, 2009, **23**(1):31–41.
- [68] BLISS A, HOCK R, RADIĆ V. Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2014, **119**(4):717–730.
- [69] RADIĆ V, HOCK R. Regionally differentiated contribution of mountain glaciers and ice caps to future sea-level rise [J]. Nature Geoscience, 2011, **4**(2):91–94.
- [70] 刘巧, 刘时银. 冰川冰内及冰下水系研究综述 [J]. 地球科学进展, 2012, **27**(6):660–669. [LIU Qiao, LIU Shiyin. Progress in the study of englacial and subglacial drainage system of glaciers [J]. Advances in Earth Science, 2012, **27**(6):660–669.]
- [71] 黄茂桓, 王茂海, 宋国平, 等. 海螺沟冰川消融区的水力状况 [J]. 冰川冻土, 1996, **18**(Special):46–50. [HUANG Maohuan, WANG Maohai, SONG Guoping, et al. Hydraulic effects in the ablation area of the Hailuoguo Glacier [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, **18**(Special):46–50.]
- [72] 吕儒仁, 钟祥浩. 海螺沟冰川冰下河堵塞问题 [J]. 冰川冻土, 1996, **18**(Special):257–263. [LU Ruren, ZHONG Xianghao. Block and burst of the water channels inside Hailuoguo Glacier [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, **18**(Special):257–263.]
- [73] 刘巧, 刘时银. 冰内及冰下水系演化的示踪试验及其应用研究 [J]. 冰川冻土, 2012, **34**(5):1206–1219. [LIU Qiao, LIU Shiyin. Tracer test of englacial and subglacial drainage system evolution and a case study at the Hailuoguo Glacier [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(5):1206–1219.]
- [74] LIU Q, LIU S. Seasonal evolution of the englacial and subglacial drainage systems of a temperate glacier revealed by hydrological analysis [J]. Sciences in Cold and Arid Regions 2010, **2**(1):51–58.
- [75] 刘巧, 刘时银. 温冰川冰内及冰下水系季节演化及其水文学分析 [J]. 冰川冻土, 2009, **31**(5):857–865. [LIU Qiao, LIU Shiyin. Seasonal evolution of englacial and subglacial drainage system of temperate glacier revealed by hydrological analysis [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, **31**(5):857–865.]
- [76] 刘巧. 海螺沟冰川冰内及冰下水系季节演化示踪与模拟研究 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文. 2011. [LIU Qiao. Seasonal Evolution of Englacial and Subglacial Drainage System of Hailuoguo Glacier as Revealed by Dye Tracer Experiments and Numerical Modelling [D]. PhD Thesis of Chinese Academy of Science. 2011.]
- [77] 罗辑, 亚高山暗针叶林区冰川退缩迹地植被原生演替 [G]// 钟祥浩, 罗辑, 吴宁, 等. 贡嘎山森林生态系统研究. 成都:成都科技大学出版社, 1997, 76–80. [LUO Ji. Primary Succession on Deglaciation Slash in Subalpine Dark Coniferous Forest Zone [G]// ZHONG Xianghao, LUO Ji, WU Ning, et al. Researches on the Forest Ecosystem in Mt. Gongga. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1997, 76–80.]
- [78] 罗辑, 亚高山暗针叶林区泥石流迹地与冰川退缩迹地植被原生演替的比较 [G]// 钟祥浩, 罗辑, 吴宁, 等. 贡嘎山森林生态系统研究. 成都:成都科技大学出版社, 1997, 80–84. [LUO Ji. Comparison of Primary Succession between Debris Flow Slash and Deglaciation Slash in Subalpine Dark Coniferous Forest Zone [G]// ZHONG Xianghao, LUO Ji, WU Ning, et al. Researches on the Forest Ecosystem in Mt. Gongga. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press. 1997, 80–84.]
- [79] ZHONG X, ZHANG W, LUO J. The Characteristics of the Mountain Ecosystem and Environment in the Gongga Mountain Region [J]. Ambio, 1999, **28**(8):648–654.
- [80] WU Y H, ZHOU J, YU D, et al. Phosphorus biogeochemical

- cycle research in mountainous ecosystems [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, **10**(1): 43–53.
- [81] PRIETZEL J, DUMIG A, WU Y H, et al. Synchrotron-based P K-edge XANES spectroscopy reveals rapid changes of phosphorus speciation in the topsoil of two glacier foreland chronosequences [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2013, **108**: 154–171.
- [82] ZHOU J, WU Y H, JORG P, et al. Changes of soil phosphorus speciation along a 120-year soil chronosequence in the Hailuoguo Glacier retreat area (Gongga Mountain, SW China) [J]. *Geoderma*, 2013, **195**: 251–259.
- [83] 周俊, 海螺沟冰川退缩迹地风化-成土过程与土壤磷形态研究 [D], 中国科学院大学博士学位论文. 2014. [ZHOU Jun. Weathering, pedogenesis and changes of soil phosphorus speciation of Hailuoguo Glacier foreland chronosequence [D]. PhD Thesis of Chinese Academy of Science. 2011.]
- [84] 张祥松, 施雅风. 中国的冰雪灾害及其发展趋势 [J]. *自然灾害学报*, 1996, **5**(2): 76–85. [ZHANG Xiangsong, SHI Yafeng. The snow and ice disasters and its tendency in future on China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 1996, **5**(2): 76–85.]
- [85] 吕儒仁. 贡嘎山区一次特大泥石流 [J]. *冰川冻土*, 1992, **14**(2): 174–177. [LU Ruren. An extreme heavy debris flow in Mt. Gongga [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, **14**(2): 174–177.]
- [86] 陈晓清, 崔鹏, 陈斌如, 等. 海螺沟 050811 特大泥石流灾害及减灾对策 [J]. *水土保持通报*, 2006, **26**(3): 122–126. [CHEN Xiaoqing, CUI Peng, CHEN Binru, et al. 050811 large-scale debris flow in Hailuoguo Valley and prevention countermeasures [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, **26**(3): 122–126.]
- [87] 吕儒仁. 贡嘎山东坡和北坡的山地灾害 [J]. *山地研究*, 1991, **9**(2): 131–135. [Lu Ruren. Mountain hazards in the east and north slopes in Mt. Gongga [J]. *Mountain Research*, 1991, **9**(2): 131–135.]
- [88] ANDERSON S Biogeochemistry of glacial landscape systems [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2007, **35**: 375–399.
- [89] FOUNTAIN A G, CAMPBELL J L, SCHUUR E A G, et al. The disappearing cryosphere; impacts and ecosystem responses to rapid cryosphere loss [J]. *Bioscience*, 2012, **62**(4): 405–415.

Studies on the Dynamics of Monsoonal Temperate Glaciers in Mt. Gongga: a Review

LIU Qiao¹ and ZHANG Yong²

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China*

2. *School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Sciences and Technology, Xiangtan 411201, China*)

Abstract: Most glaciers in Mt. Gongga, east edge of Tibet Plateau, physically belong to the type of monsoonal temperate, generally with low altitude of ablation area and highly interacted with environments in their proglacial zones. Due to the strong influence of maritime climate and monsoon, temperate glaciers in Mt. Gongga are characterized by high level of mass balance, low altitude of terminals, strong surface ablation and fast ice flow speed. This has not only impacted the hydrological processes and variation of glacial runoff, but also has driven remarkable dynamics of mountain surface processes and preglacial ecological environment. During the comprehensive scientific expedition to Qinghai-Xizang Plateau in Hengduan Mountains in 1980s and the Sino-USSR joint glaciological expedition to Mt. Gongga in 1990s, repeat glacial investigations or short-term observations have carried out on several larger glaciers in Mt. Gongga, with main information of modern temperate glaciers and quaternary glaciations were detailed investigated by field expeditions. With the foundation of Gongga Alpine Ecosystem Observation and Research Station since 1988, detailed monitoring of typical monsoonal temperate glaciers were carried out by the station. This paper gave a review of the monitoring and research progress of monsoonal temperate glaciers in Mt. Gongga. Several research areas, including glaciology, ecology, catastrophology and other environmental sciences that related to the changing glaciers, are introduced and prospected.

Keywords: Mt. Gongga; monsoonal temperate glacier; station monitoring; glacier change; cryosphere