

中国典型季风海洋性冰川区“冰川 - 径流”系统的全球变化敏感性研究

李宗省¹, 何元庆¹, 贾文雄¹, 庞洪喜¹, 院玲玲¹,
宁宝英, 刘巧², 和献中¹, 宋波¹, 张宁宁¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000

2 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 分析多种数据和资料, 再现海螺沟冰川过去 100 年来的冰川进退过程, 分析发现, 冰川末端变化阶段在滞后后期的基础上, 与北半球和中国气温变化的阶段相对应。运用水量 - 物质平衡法恢复海螺沟冰川 45 年来的物质平衡变化情况, 通过相关性检验发现, 物质平衡变化与北半球和中国同期 (1960~2004 年) 气温变化表现出显著负相关。20 世纪 80 年代全球加速变暖, 海螺沟冰川冰舌段消融速率为 7.86 m/a 冰川河径流量年际和季节变化表明流量主要贡献者是冰雪融水。分析表明, 全球变暖是冰川后退、持续亏损及径流量增加的主要原因。

关键词: 季风海洋性冰川; 海螺沟; “冰川 - 径流”系统; 全球变化

中图分类号: P512.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-0690(2008)02-0229-06

全球变化问题已成为世界各国政府和人民所关注与重视的主要环境问题。根据 IPCC(2001) 报告^[1], 自 20 世纪 80 年代以来, 全球变暖呈现出明显加速趋势, 20 世纪 90 年代升高大约 1.0℃, 预测到 2100 年全球平均温度将上升 1.3~5.8℃。相关研究表明^[2-25], 在全球变化背景下, 冰川面积和体积正在加剧减小, 冰川正在使水循环加剧, 而且这种趋势自 20 世纪 80 年代以来更加明显。海螺沟冰川河流域位于贡嘎山东坡, 集水面积 80.5 km², 河道比降 6.93%, 地面坡度 45。据冰川编目统计^[26], 冰川面积 36.44 km², 该流域面积大于 1 km² 的冰川有海螺沟冰川、海螺沟 1 号冰川和海螺沟 2 号冰川, 其中海螺沟冰川是中国最具有代表性的一条季风海洋性冰川, 三条冰川总面积 34.81 km², 冰储量 4.09 km³。据海螺沟 3000 m 站实测数据计算, 流域上游冰舌末端区年平均气温 4℃, 年均降水量为 1960 mm, 5~8 月降水量占全年降水量的 80% 以上, 冰川平衡线处 (4900 m) 年均气温为 -4.4℃, 年降水量 3000 mm 左右。本研究核心是通过“冰川 - 径流”系统变化研究, 探讨中国温冰川对全球变化的敏感性问题的。

1 资料来源

冰川变化资料主要来自于实地考察观测记录 (1982~2006)、文献记载^[16-26]、1966 年 12 月和 1982 年 12 月贡嘎山的航空照片、1966 年所测得的 1:200 000 地形图等资料。物质平衡资料源于文献 [14] (1959/1960~1992/1993) 和笔者的计算 (1993/1994~2003/2004)。康定站气象数据来自中国气象科学资料共享服务网 <http://cdc.mn.gov.cn>。海螺沟冰川区气象数据和水文数据取自贡嘎山区 3000 m 高山生态系统观测研究站 (于 1988 年建成运行)。北半球和中国气温变化资料借鉴了王绍武等的研究成果^[27]。

2 讨论与分析

2.1 冰川进退变化对全球变化的敏感性分析

表 1 分析表明^[18], 近百年来海螺沟流域的现代冰川末端变化, 表现出以长期的后退为主和短期的前进或稳定为辅的特点, 20 世纪初至 30 年代为冰川相对稳定或前进阶段; 20 世纪 30~60 年代末为冰川退缩阶段, 20 世纪 70~80 年代中期为冰川

收稿日期: 2007-03-17 修订日期: 2007-07-19

基金项目: 中国科学院重要方向性项目 (CX-YW-317)、国家自然科学基金重点项目 (90511007)、国家自然科学基金项目 (40121101)、中国科学院创新团队国际合作伙伴计划 (CXTD-2005-2)、国家自然科学基金项目 (40501014)、玉龙雪山地方项目资助。

作者简介: 李宗省 (1984-), 男, 甘肃会宁人, 硕士, 研究方向为冰川与全球变化。E-mail: yxm.lz@1982822@163.com

表 1 海螺沟冰川河流域主要冰川的进退变化

Table 1 Advances and retreats of main glaciers of Bingduanhe River Basin in Haikou since the early 20th century

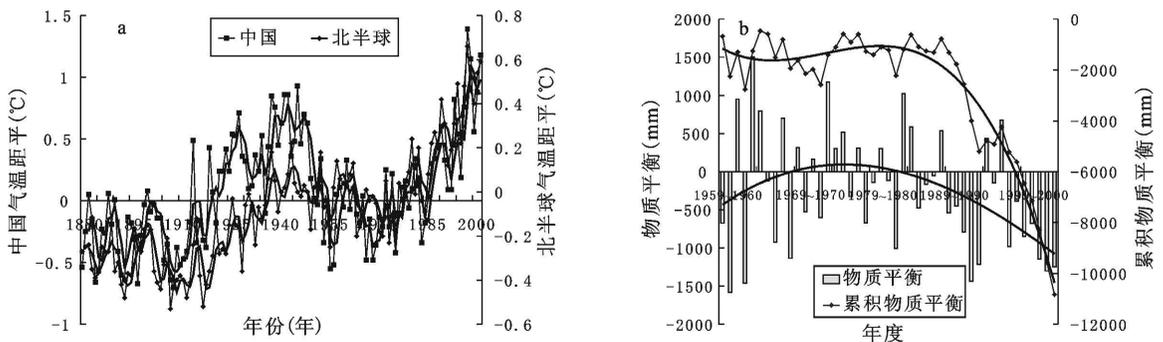
冰川名称	观测时段	末端进退距离 (m) (“-”表示后退)	末端海拔高度变化 (m)	末端进退的年平均距离 (m)	备注
海螺沟冰川	20世纪初至 1930	稳定或前进	2 850(1930年)	稳定或前进	文献资料
	1930~1966-12	-1150	2 880~2 900(1966年)	-31.1	航片、地形图
	1966-12~1983-01	-200	2 920(1982年)	-11.8	航片实地考察
	1983-01~1989-12	-147.8	2 940(1989年)	-21.1	考察复测
	1990-04~2004-03	-274	2 980(1994年)	-18.2	考察复测
	2004-03~2006-06	-30左右	3 000(2006年)	-15左右	考察复测
海螺沟 2 号冰川	20世纪初至 1930	末端与海螺沟冰川相连		稳定或前进	文献资料
	1930~1966-12	-800		-21.6	航片、地形图
	1966-12~1981-01	稳定		稳定	航片与实地考察
	1981-01~1990-12	-250~-300		-25~-30	考察复测
	1991-01~2006-06	强烈后退	3880(2006)	强烈后退	考察复测

相对稳定或减速后退的阶段; 20世纪 80年代中期至今为冰川剧烈后退阶段。如图 1a所示, 中国与北半球近百年来气温变化均表现出以升温为总趋势的阶段变化, 将海螺沟冰川和海螺沟 2号冰川近百年来末端变化阶段, 与中国和北半球近百年来气温变化阶段相对照发现, 在考虑 10~20年左右的冰川末端变化对全球变化的滞后期后, 二者表现出明显的对应性, 19世纪末至 20世纪初的降温期对应于冰川稳定或相对前进阶段; 20世纪 20~60年代的升温期对应于冰川退缩阶段; 20世纪 70~80年代中期的降温期对应于冰川相对稳定或减速后退阶段; 20世纪 80年代中期至今的强烈升温期对应于 20世纪 80年代中期以来的冰川强烈后退阶段。对比发现从第一阶段到第四阶段冰川末端变化对全球变化的滞后期有明显的缩短, 第

一阶段为 20年左右, 而到第四阶段则为同步变化, 这是由于: ① 该区冰川持续剧烈的后退导致冰川规模不断变小, 从而对全球变化响应的滞后期会越短; ② 进入 80年代以后的全球加速升温导致该阶段冰川消融速率加快; ③ 局地地理因素的影响, 特别是在雨热同期的季风气候背景下, 高温期、高消融期、高降水期具有同时性, 这更进一步加快了冰川消融的速度和后退的幅度。以上分析证明, 全球变暖是冰舌不断后退的主因, 冰川末端变化对全球变化表现出高敏感性。

2.2 冰川物质平衡变化对全球变化敏感性分析

1959~1960年度至 2003~2004年度, 45年来海螺沟冰川累积水量-物质平衡值为 -10 825.5 mm, 年均平衡值为 -240.6 mm, 表明 45年来海螺沟冰川以亏损状态为主, 这一趋势与中国和北半球



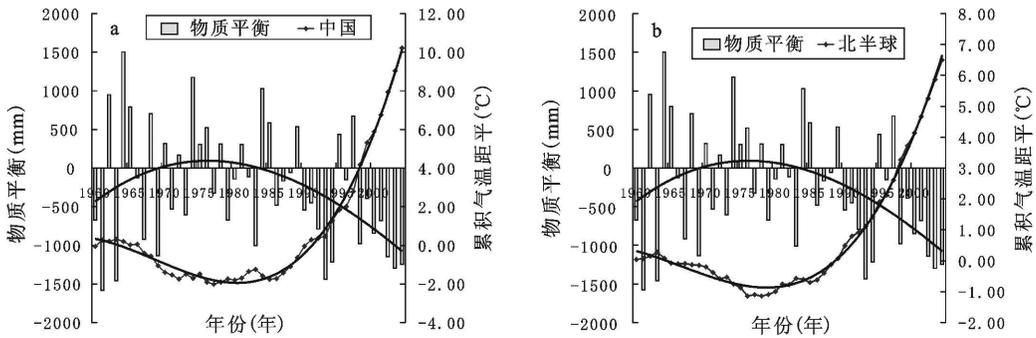
平滑线为 3次多项式拟合曲线; 方框部分为正平衡阶段

图 1 近百年来中国和北半球气温变化趋势图 (a), 海螺沟冰川物质平衡变化和累积物质平衡变化曲线图 (b)

Fig. 1 Variations of annual mean temperature in Northern Hemisphere and China over the last 100 years (a); variations of mass balance and cumulative mass balance of Haikou glacier over the last 50 years (b)

气温变化的总趋势正好相反。图 1b 中, 物质平衡变化存在两个转折点: 1970~1971 年度和 1984~1985 年度, 据此将物质平衡变化分为三个阶段: 负平衡阶段 (1959/1960~1970/1971)、正平衡阶段 (1971/1972~1984/1985) 和剧烈负平衡阶段 (1985/1986~2003/2004), 结合图 2 分析发现, 20 世纪 60~70 年代初升温期与负平衡阶段相对应, 该阶段海螺沟冰川累积水量物质平衡值为 $-2\,145.6\text{ mm}$, 年均平衡值为 -178.8 mm ; 20 世纪

70~80 年代中期的降温期与正平衡阶段相对应, 该阶段海螺沟冰川累积水量物质平衡值为 $1\,532.2\text{ mm}$, 年均平衡值为 109.4 mm , 表现出正平衡; 20 世纪 80 年代中期至今的强烈升温期与剧烈负平衡阶段相对应, 该阶段海螺沟冰川累积水量物质平衡值为 $-10\,212\text{ mm}$, 年均平衡值为 -537.5 mm , 为 45 年来最强烈的负平衡阶段, 19 年累积的物质负平衡量占 45 年来累积物质负平衡量的 94.3%。



a 中国; b 北半球; 平滑线为 3 次多项式拟合曲线; 方框部分为降温阶段

图 2 海螺沟冰川物质平衡变化与累积气温变化的对比

Fig 2 The relationship between mass balance variation in Hailuoguo glacier and the annual mean temperature variation in China (a) and the Northern Hemisphere (b)

图 2 所示, 海螺沟冰川 45 年来的物质平衡变化与同期中国和北半球 1960~2004 时段的累积气温变化表现出明显的相反趋势, 通过相关分析发现, 均表现出显著的负相关 (表 2), 表明 45 年来冰川物质平衡以负平衡为总趋势的变化是全球变暖的结果, 在剧烈负平衡阶段温度的升高导致冰川消融强烈, 使冰川处于剧烈的亏损状态中, 而在正平衡阶段温度的降低使冰川消融减速且消融期缩短相反的积累增加且积累期变长, 冰川处于收入状态。就长尺度来看, 物质平衡变化与北半球气温变化的显著性总是大于中国同期, 这一方面表明物质

平衡变化对大尺度全球变化的高度敏感性, 另一方面也表明了中尺度的中国气温变化与大尺度的北半球气温变化之间的差异性^[21]。气温变化阶段与物质平衡变化阶段的对应关系及其负相关关系表明, 海螺沟冰川物质平衡的阶段变化, 对大尺度的北半球和中尺度的中国气候变暖的响应是积极的, 证明了该区近半个世纪物质平衡变化是全球变化的结果, 物质平衡在第三阶段的剧烈负平衡趋势是对 20 世纪 80 年代以来全球加速变暖的明显响应, 由此表明物质平衡变化对全球变化的高敏感性。

表 2 物质平衡变化与气温变化的相关系数

Table 2 The statistical relationship between mass balance and temperature

相关对象	R (相关系数)		N (样本数)	P (置信水平)	
	北半球	中国		北半球	中国
45 年累积物质平衡变化与同期 (1960~2004) 累积气温变化	-0.96	-0.94	45	< 0.000 1	< 0.000 1
正平衡阶段累积物质平衡变化与同期 1972~1985 累积气温变化	-0.69	-0.6	14	< 0.006	< 0.025
剧烈负平衡阶段累积物质平衡变化同期 1986~2004 累积气温变化	-0.96	-0.97	19	< 0.000 1	< 0.000 1

2 3 冰川河径流变化对全球变暖响应敏感性分析

北半球、中国和海螺沟 3 000 m 高山站 1988 年以来的气温(图 3d、e)均表现出上升趋势,对比发现,海螺沟 3 000 m 站 1997~2004 时段比 1988~1996 时段气温升高 0.4℃,这与距海螺沟 80 km 的康定地区同期气温升高 0.44℃相一致。何元庆的研究也表明,中国海洋性冰川区自 20 世纪 80 年代后升温更明显^[17]。与气温上升趋势相对应,海螺沟冰川消融强烈(图 3a),在实测的 6 个年度里,年均消融速率为 7.86 m/a 折合水当量为 7 199.76 mm,相当于该区 3.7 年的降水量之和(年均降水量 1 960 mm),冰川剧烈消融的主要原因是该区气温持续升高,造成冰川冷储减少,在这一背景下,气温稍许增加便会造成消融的非线性加速增加。海螺沟冰川河径流量也表现出明显上升趋势(图 3b),对比发现 1999~2004 时段年平均径流量(16.11 m³/s)比 1994~1998 时段(10.46 m³/s)高 5.65 m³/s,后一时段年均流量比前一时段增加 54%。

降水、冰雪融水和地下水是海螺沟冰川河的主要补给源,水文学理论认为,地下水作为河流补给表现出极大的稳定性,年际变化极小,在水文研究中常看作常量,因此冰川河径流量的增加就有两种

可能,究竟是冰雪融水对径流量增加的贡献大还是大气降水贡献大呢? ①以 1998 年为界,对比发现 1999~2004 时段(1 989 mm)年降水量比 1994~1998 时段(1 936 mm)的降水量增加仅 53 mm,而后一时段径流深(6 311 mm)却比前一时段(4 097 mm)高 2 234 mm,显然扣除增加降水量后的 2 161 mm 径流深只能由冰雪融水补给。该冰川区位于低纬度季风区,冰舌段年均气温 2.8℃左右,全年冰舌都处于消融状态中。升温背景下,消融区面积不断扩大且消融速率不断加快; ②通过相关性检验发现,11 年内夏季径流量与 3 000 m 站夏季气温的相关系数为 0.90($p < 0.0001$),而与同期年降水量的相关系数为 0.87($p < 0.0001$),由此表明,气温升高导致夏季冰雪融水增加对径流量的贡献较大; ③该区受季风气候控制,冬季降水极少(年均冬季降水仅 87.7 mm,占全年降水量 4%),对比发现,1999~2004(6.68 m³/s)时段冬季径流量比 1994~1998(3.94 m³/s)时段增加 2.74 m³/s,相当于 264.6 mm 水当量,而降水量后一时段(29.3 mm)却比前一时段(31.3 mm)降低 2 mm,显然增加的 109.3 mm 只能由冰雪融水补给,因为全球变暖背景下冬季升温更明显^[1],分析发现,1999~2004 时段冬季气温比 1994~1998 时段升高了 0.69℃,

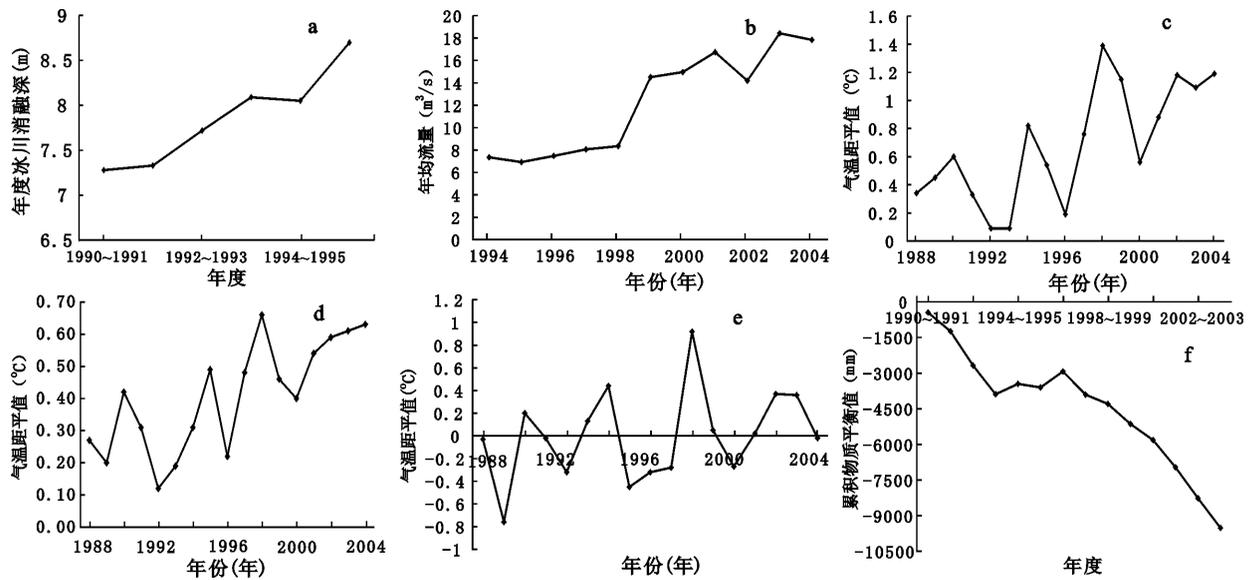


图 3 海螺沟冰川冰舌段实测消融量变化 (a); 年均径流量变化 (b); 1988 年以来中国气温变化 (c); 北半球气温变化 (d); 海螺沟 3 000 m 站气温变化 (e); 1990~1991 年度海螺沟冰川物质平衡变化 (f)

Fig 3 The variation of ablation amount in Hailuoguo glacier tongue (a); the variation of mean annual runoff in Bingchuan River (b); the variation of annual mean temperature in China since 1988 (c); the variation of annual mean temperature in the Northern Hemisphere since 1988 (d); the variation of annual mean temperature in the 3000m Meteorological Station since 1988 (e); mass balance variation of Hailuoguo Glacier in 1990-1991 (f)

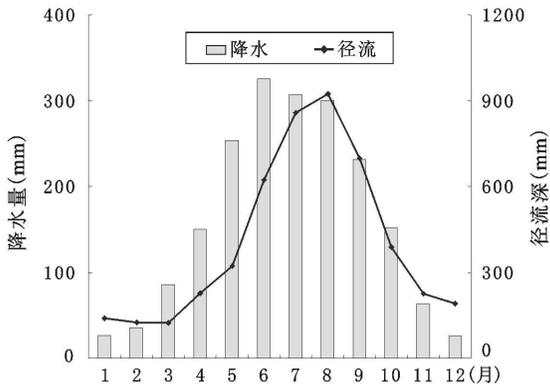


图4 海螺沟 3 000 m 处降水量和冰川河径流深季节变化

Fig 4 The seasonal variation of precipitation and runoff in Bingchuanhe River

是造成冬季径流量增加的主要原因; ④该区年均降水 1 960 mm, 而年均消融量是降水量的 3.67 倍, 依水循环原理, 二者同作为冰川河补给最终要以径流形式流出流域, 从长期水平衡角度来看, 冰雪融水对该区贡献大于降水; ⑤将 11 年河流径流深与同期冰川累积物质平衡值对比发现(图 3), 二者表现出明显的反向变化趋势, 相关系数为 -0.82 ($p < 0.0001$), 这也表明冰川不断消融亏损是冰川河径流量持续增加的主要原因。

图 4 看出, 降水量峰值出现在 6 月, 径流深峰值出现在 8 月, 滞后降水量峰值 2 个月; 3 000 m 处 10 和 4 月降水量相当, 但冰川河 10 月径流深比 5 月高出 162 mm。该区流域面积较小, 且流域范围内多为基岩山地, 且水文站位于海螺沟冰川末端不远处, 这些条件决定流域内地表径流对降水的滞后时间不可能长达 2 个月, 这主要是由于高山冰川区冰雪融水径流对下游地表径流的补给在时间上具有一定的滞后性, 冰川河径流深变化滞后降水 2 个月左右只能是冰雪融水影响的结果, 因此, 就冰川河流量季节变化而言, 冰川融水量变化很大程度上决定整个流域流量变化。另外, 冰川河 10 月流量 ($12.07 \text{ m}^3/\text{s}$) 显著大于 4 月 ($7.04 \text{ m}^3/\text{s}$), 且各月均径流深明显大于各月均降水量, 也表明冰川河流域冰雪融水对河流补给是主要的。

3 结 论

1) 海螺沟冰川河流域主要冰川的变化, 近百年来表现出以明显退缩为总趋势的阶段变化, 在考虑冰川末端变化对气温变化存在滞后期情况, 发现该区冰川末端变化明显响应中国和北半球近百

年来气温以升温为总趋势的阶段变化。

2) 海螺沟冰川 45 年来的物质平衡变化也表现出以负平衡为总趋势的阶段变化, 在北半球与中国近百年气温以升温为总趋势的阶段变化基础上, 将冰川物质平衡变化分为三个阶段, 结果发现, 物质平衡变化与同阶段气温变化表现出很好的对应性和显著的负相关性, 这表明了冰川物质平衡变化对全球变化的敏感性。

3) 自 1988 年以来, 海螺沟冰川河流域气温变化与北半球和中国同期气温变化均表现出明显的升温趋势, 在强烈升温背景下, 海螺沟冰川消融强烈, 冰川河径流量年际增加明显, 而增加的冰川河径流量主要是冰雪融水贡献, 冰川河径流深季节变化也表明, 冰雪融水量的变化在很大程度上决定着整个流域流量的季节变化, 证明海螺沟冰川区冰川河径流量的变化对全球变化具有高度的敏感性。

4) 全球变暖是冰川后退、剧烈消融以及径流量增加的主要原因, 因此海螺沟冰川区“冰川-径流”系统对全球变化具有高度的敏感性, 这就为在季风海洋性冰川区进行“冰川-径流”系统与全球变化响应研究提供了新思路。

参考文献:

- [1] IPCC (2001). Climate change 2001: impacts adaptation and vulnerability. Summary for policymakers Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge University Press, 2001
- [2] 熊尚发, 刘东生, 丁仲礼. 两个冰期-间冰期旋回的黄土记录及其古气候意义 [J]. 地理科学, 2002, 22 (1): 18~23
- [3] 康世昌, 秦大河, 任贾文, 等. 珠穆朗玛峰北坡东绒布冰川成冰作用的新认识 [J]. 地理科学, 2005, 25 (3): 415~419
- [4] 王翠花, 李雄, 缪启龙. 中国近 50 年来日最低气温变化特征研究 [J]. 地理科学, 2003, 23 (4): 442~448
- [5] 赵昕奕, 张惠远, 万军. 青藏高原气候变化对气候带的影响 [J]. 地理科学, 2002, 22 (2): 190~195
- [6] 杨梅学, 姚檀栋, 田立德, 等. 藏北高原夏季降水的水汽来源分析 [J]. 地理科学, 2004, 24 (4): 426~431
- [7] Oerlmans J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers [J]. Science, 1994, 264: 243~245
- [8] 靳立亚, 符娇兰, 陈发虎. 近 44 年来中国西北降水量变化的区域差异以及对全球变暖的响应 [J]. 地理科学, 2005, 25 (5): 567~572
- [9] Shiyafeng Liu shiyong. Estimation on the response of glaciers in China to the global warming in the 21st century [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45 (4): 668~672
- [10] Chiew F H S, M M ahon T A. Application of daily rainfall-runoff model to 28 Australian catchments [J]. Journal

- of Hydrology, 1994, **153**: 386–416.
- [11] C A Blain P C D. Milly. Development and application of a hillslope hydrologic model [J]. Advances in Water Resources 1991, **14**(4): 168–174
- [12] P C D Milly. Climate interpersonal storage of soilwater and the annual water balance [J]. Advances in Water Resources 1994 **17**(1– 2): 19– 24.
- [13] 李国平, 肖 杰. 青藏高原西部地面反射率的日变化以及若干气象因子的关系 [J]. 地理科学, 2007, **27**(1): 63– 67.
- [14] 施雅风, 黄茂垣, 姚檀栋, 等. 中国冰川与环境——过去、现在和未来 [M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [15] ShiYafeng. Estimation of the water resources affected by climatic warming and glacier shrinkage before 2050 in west China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23**(4): 333 – 341
- [16] HeYuanqing, hang honglin, PangHongxi et al. Changing features of the climate and glaciers in China's monsoonal temperate glaciers region [J]. Journal of geophysical research 2002, **108**(17): 1– 7.
- [17] 苏 珍, 刘时银, 王宁练, 等. 横断山冰川变化及其对气候波动的回应 [M]. / 钟浩祥. 青藏高原东缘环境与生态. 成都: 四川大学出版社, 2001: 102– 109
- [18] 李吉均, 苏 珍. 横断山冰川 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [19] Hein. The glaciation and solifluction of M inyaGongkar [J]. Geographical Journal 1936 **87**: 444– 454.
- [20] 朱西德, 王振宇, 李 林, 等. 树木年轮指示的柴达木东边缘近千年夏季气温变化 [J]. 地理科学, 2007, **27**(2): 256– 260.
- [21] 张国胜, 李 林, 汪青春, 等. 青海高原冻土退化驱动因素的定量辨识 [J]. 地理科学, 2007, **27**(3): 337– 341
- [22] 何云玲, 张一平, 杨小波. 中国内陆热带地区近 40 年气候变化特征 [J]. 地理科学, 2007, **27**(4): 499– 505
- [23] 李明霞, 汪永进, 邱庆伦. 中全新世 7– 6 ka 东亚季风气候的高分辨率石笋记录 [J]. 地理科学, 2007, **27**(4): 519– 524.
- [24] 房巧敏, 龚道溢, 毛 睿. 中国近 46 年来冬半年日降水变化特征分析 [J]. 地理科学, 2007, **27**(5): 711– 717
- [25] 徐彦伟, 康世昌, 周石桥, 等. 青藏高原纳木错流域夏、秋季大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽来源及温度的关系 [J]. 地理科学, 2007, **27**(5): 718– 723.
- [26] 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
- [27] 王绍武, 叶瑾琳, 龚道涵, 等. 近百年中国气温序列的建立 [J]. 应用气象学报, 1998, **9**(4): 392– 400

Response of “Glaciers-Runoff” System in a Typical Temperate-Glacier, Hailuoguo Glacier in Gongga Mountain of China to Global Change

LI ong-X ing¹, HE Yuan-Q ing¹, JIA Wen-X ing¹, PANG Hong-X i¹, YUAN Ling-L ing¹,
NING Bao-Y ing¹, LIU Q iao², HE X ian- hong¹, SONG Bo¹, HANG Ning-N ing¹

(1. Cold and Arid Region Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000;
2. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041)

Abstract The monsoonal temperate glaciers in China are located in the region of the southeastern Qinghai-Tibet Plateau, and these monsoonal temperate glaciers have obvious response to global change. This study takes “glacier-runoff” system of the Bingchuan River Basin of Hailuoguo in Gongga Mountain region as research object because this area has abundant information and data about glacier change. The research have found two important results: (1) The glaciers in Gongga Mountain have sensitive response to global warming since the early of the 20th century, based on glacier-variation data and mass balance data over the past 100 years; (2) glacial runoff has also sensitively corresponded to global warming since the 1980s, as indicated by observed hydrological and climatic data. In conclusion, there is a “glacier-runoff-global change” organism in monsoonal temperate glacier region of China, therefore, “glacier-runoff” system is very sensitive to global change. And what's more, the result indicated that global changing is the main cause of glaciers retreat, glaciers ablation and runoff rise.

Key words monsoonal temperate glaciers; Hailuoguo; “Glacier-Runoff” system; global change