

文章编号: 1008-2786-(2006)6-641-06

塔里木河源区冰川系统变化趋势预测

王欣^{1,2}, 谢自楚³, 刘时银¹, 上官冬辉¹, 陶建军², 阳岳龙²

(1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2 湖南科技大学地球空间信息科学研究所, 湖南 湘潭 411201
3. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410008)

摘要: 塔里木河源区是我国冰川分布最集中的地区之一, 总面积达 17 745.51 km², 占全国冰川总面积的 30%; 同时本区又属于我国升温幅度最大的地区之一。应用冰川系统变化的功能模型, 对塔里木河源区冰川系统在本世纪对气候变化的趋势进行预测。结果表明: 到 2050 年, 如气温比 1961~1990 年高出 1.9~2.3℃, 本区冰川面积将减少 4%~6%, 冰川径流将增加 22%~34%, 零平衡线将上升 62~94 m; 如此升温率持续到本世纪末, 则本区冰川面积将减少 10%~16%, 冰川径流将会回落, 但仍比本世纪初多 1%~13%, 零平衡线将上升 156~233 m。

关键词: 塔里木河源区; 冰川系统; 功能模型; 变化预测

中图分类号: P931

文献标识码: A

具有共同的分布地域、受相似的气候环境影响、其内部规律有一定联系的冰川总体称为冰川系统^[1]。塔里木河源区冰川系统大致位于 34°50′~43°10′N, 73°27′~87°4′E。本区属于大陆型冰川区, 共发育冰川 10 297 条, 总面积为 17 745.51 km², 冰储量为 2 139 444 km³, 分别占全国冰川总数的 22%、30% 和 38%^[2], 主要分布在喀喇昆仑山-昆仑山、东帕米尔和西南天山等。

近 40 a 来塔里木河(以下简称塔河)流域山区气温呈波动上升趋势, 在 40 a 中升高了 0.6℃, 其中以秋季升温幅度最大, 为 1.1℃, 夏、冬为 0.7℃^[3]。另一方面, 新疆降水量总体上呈增加趋势, 全疆平均增幅为 0.67 mm/a, 天山山区增幅最大, 达 1.1~2.8 mm/a^[4]; 于淑秋等的研究表明^[5], 我国西北降水在 1986 年左右发生跃变, 以 1987~2000 年降水量平均值与 1961~1986 年降水与平均值相比, 南疆地区偏多 33.1%, 天山山区偏多了 12.1%。此外, 袁玉江等^[9]也指出新疆近 40 a 来夏季降水最多的年代是 1990 年代, 天山山区偏多 12%, 南疆偏多 23%。

研究表明^[6,7], 现代冰川对气候变化非常敏感, 表现为冰川面积和储量减少, 冰川平衡线上升, 冰川径流增加, 其中气温升高起主要作用, 但降水变化的影响也不容忽视。因此, 本文基于近 40 a 来塔河源区气候变化的事实, 探讨在未来气温升高的同时, 降水也同步增加的情景下, 该区冰川在本世纪的变化趋势。

目前有关冰川对气候变化的响应模型应用较多的主要有两类: 基于统计学的度日模型以及基于物理过程的动力模型和能量模型^[8-10]。度日模型主要应用正积温来计算冰川的消融; 动力模型应用较多主要有 Oerlemans 等^[10]和我国学者叶柏生等^[11]提出的冰川对气候变化的响应模型; 能量模型由于对参数要求较为严格, 这在一定程度上影响它的推广。最近, 也有学者建立基于统计学和物理过程的综合模型^[12], 本文应用的功能模型就属于此列。

收稿日期 (Received date): 2006-04-11; 改回日期 (Accepted): 2006-08-01。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金资助项目 (40371027, 40571034)。[National Natural Science Foundation of China (40371027 and 40571034).]

作者简介 (Biography): 王欣 (1973-), 男, 博士生, 主要从事环境变化与自然灾害方向研究。E-mail: Xinwang_hn@163.com。[Wang Xin (1973-), male, doctor candidate, research interests including environmental variation and natural hazard.]

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1 预测参数的获取

据资料, 本区到 2050 年气温将比 1961~1990 年高出 $1.9 \sim 2.3^{\circ}\text{C}$ ^[13], 即升温率大致为 $0.2 \sim 0.3 \text{ K}/10\text{a}$ Oerlemans 等^[10] 模拟冰川对气候变化的响应过程时采用气温每升高 1K 降水增加 10% 的方法。因此本文基于未来上述升温情景, 并参照 Oerlemans 等考虑降水因子的方法对塔河源区冰川的变化进行预估。

本文依据中国冰川编目资料和高原气象资料 (中国科学院兰州高原大气物理研究所, 内部资料) 获取预测参数 (表 1)。本区冰川编目资料来自于 1960 年代和 1970 年代影像资料^[2], 高原气象资料反映的是 1970 年代高空气温状况。考虑到我国西部气候转暖一般始于 1980 年代末^[14], 此外, 本区玉龙喀什河源区冰川自 1989 年来退缩明显^[15]。因此, 本文按照康西瓦站和塔什库尔干站 1970 年到 1990 年 $0.2 \text{ K}/10\text{a}$ 的升温率, 将本区 1970 年代高空气温状况类推到 1990 年; 同时, 根据最近玉龙喀什河源区冰川变化的速率^[15] 及乌鲁木齐河源 1 号冰川零平衡线对气候变化的敏感性^[16], 将 20 世纪 60 年代和 70 年代影像数据提取的冰川系统参数修订到 1990 年的状况, 并把 1990 年作为预测的起始年。

2 预测模型简介

采用的预测模型是在冰川系统变化功能模型^[12] 的基础上进行修订而成, 主要包括:

2.1 冰川物资平衡的计算

冰川零平衡线处 (ELA_0) 的物资平衡状态能代表整个冰川平均物资平衡状态^[17], 在稳定状态冰川零平衡线高度与平衡线高度重合, 此时零平衡处的

净平衡 $bn(ELA_0) = Q$ 在不稳定状态, 冰川 ELA_{0i} 处的净平衡仍等于整个冰川的比净平衡^[18], 即有

$$bn(ELA_{0i}) = \overline{bn_i} \quad (1)$$

因此, 在气候变化的条件下, 第 i 年冰川的比净平衡, 便可由第 i 年零平衡线处的净平衡量 (即消融增量与积累增量的差) 估算出

$$\overline{bn_i} = 1.33 \left[(9.66 + t_s)^{2.85} - (9.66 + t_s + \Delta t_{si})^{2.85} \right] + \Delta p_i \quad (2)$$

式中 t_s 为起始年 ELA_0 处夏季平均温度, Δt_{si} 为 ELA_{0i} 处较起始年 ELA_0 处的夏季平均升温值, Δp_i 为 ELA_{0i} 处较起始年 ELA_0 处的平均固态降水增加量 (即积累增量)。

第 i 年冰川的比净平衡 $\overline{bn_i}$ 的绝对值初始平均消融量 a_0 的比率 a_i

$$a_i = \frac{\overline{bn_i}}{a_0} \quad (3)$$

2.2 冰川径流的变化规律及冰川面积变化的计算

当气温上升时, 冰川消融增加, 出现负平衡, 冰川的径流增加。但冰川面积却因冰量的消耗而减少, 在第 i 年冰川的径流总量 W_i 可表示为

$$w_i = (r_{i-1} + r_d) (S_{i-1} - S_d) \quad (4)$$

式中 r_{i-1} 及 S_{i-1} 分别为第 $i-1$ 年冰川的径流深度和面积, r_d 和 S_d 为从第 i 年因气温升高而增加的冰川径流深度和减少冰川面积。冰川径流先增大, 在达到峰值后, 又因冰川的面积减少而回落, 当回落到起点水平时, 如蒸发忽略不计, 有 $r_{i-1} = a_{i-1}$, $r_d = 1 - \overline{bn_{i-1}}$ 则冰川退缩的面积 S_d 为

$$S_d = \frac{S_{i-1} r_d}{r_{i-1} r_d} \quad (5)$$

冰川径流达到复原状态时的面积为

$$S_e = \frac{S_{i-1}}{a_{i-1} + 1} \quad (6)$$

式中 S_e 称为第 i 年冰川径流复原状态条件。应用

表 1 预估的基本参数

Table 1 Parameters for prediction

山脉	$S_0 (\text{km}^2)$	$V_0 (\text{km}^3)$	$S_{\text{med}} (\text{km}^2)$	$t_s (^{\circ}\text{C})$	$ELA_0 (\text{m})$	AAR	$P_0 (\text{mm})$
喀喇昆仑山-昆仑山	10 652.29	1 190 817.2	5.90	-1.56	5 369	0.76	363
东帕米尔	2 422.82	230 620.2	5.57	-0.70	4 698	0.78	482
西南天山	4 670.40	718 507.0	15.00	0.45	4 200	0.70	680
塔里木河源区	17 745.51	2 139 444.0	7.00	-0.85	4 989	0.71	460

注: S_0 和 V_0 分别表示冰川编目时间的面积和体积; S_{med} 为冰川中值面积; t_s 为零平衡线处夏季平均温度; ELA_0 为零平衡线高度; AAR 为积累区比率; P_0 为冰川初始降水量

中国冰川编目中普遍使用的面积与平均厚度的关系^[19]

$$\bar{h} = 53 \ 21 s_i^{0.3} - 11.32 \quad (7)$$

把 s_i 和 s_e 代入 (7) 式并考虑 (6) 式, 则达到复原状态时冰川体积的减少量 v_d 为

$$v_d = 53 \ 21 s_{i-1}^{1.3} \left[1 - \left(\frac{1}{a_{i-1} + 1} \right)^{1.3} - \frac{11.32 s_{i-1} a_{i-1}}{a_i + 1} \right] \quad (8)$$

因冰川面积自第 i 年到复原状态时的平均面积

为 $\bar{s} = \frac{s_i + s_e}{2}$, 则冰川厚度的减少量 h_d 为

$$h_d = \frac{2(a_{i-1} + 1)}{a_{i-1} + 2} \left\{ 53 \ 21 s_{i-1}^{0.3} \left[1 - \left(\frac{1}{a_{i-1} + 1} \right)^{1.3} - \frac{11.32 a_{i-1}}{a_{i-1} + 1} \right] \right\} \quad (9)$$

把冰川厚度转化为物资平衡当量, 计算自第 i 年达到复原状态的时间 T_{ei} 为

$$T_{ei} = \frac{1}{|bn_{i-1}|} \frac{8(a_{i-1} + 1)}{(a_{i-1} + 1)^{1.3}} \left\{ 53 \ 21 s_{i-1}^{0.3} \left[1 - \frac{11.32 a_{i-1}}{a_{i-1} + 1} \right] \right\} \quad (10)$$

第 i 年的冰川面积 s_i 为

$$s_i = s_{i-1} \left[1 - \frac{a_{i-1}}{(a_{i-1} + 1) T_{ei}} \right] \quad (11)$$

2.3 冰川系统径流变化的计算

以上讨论的是单个冰川径流变化的规律, 为计算冰川系统的径流变化, 则需用冰川系统的中值面积 S_{med} ^[12] 取代文中的 s_e 。因为在第 i 年, S_{med} 在达到 T_a 时, 全系统 50% 小于 S_{med} 的冰川均先后达到及超过 T_{ei} , 即其总径流量将小于起始径流量, 而 50% 大于 S_{med} 的冰川还未达到 T_{ei} 即其总径流量将大于起始径流量, 因此全系统平均总径流量应该在 T_{ei} 时恢复到全系统的起始径流量。这样就可以用 S_{med} 代表全系统的冰川总面积 S_e 。上文所述单个冰川径流及面积的变化规律适用于全系统。如蒸发忽略不计, 则冰川系统在第 i 年的总径流量 W_i 为

$$W_i = \frac{a_i S_i}{1000000} \quad (12)$$

式中 S_i 为冰川系统的面积, 常数 1 000 000 为将单

位由 mm 换算为 km 的系数。

2.4 冰川储量的变化

如前文所述, 在负平衡时等于消耗冰川的储量, 冰川系统在第 i 年冰川储量的减少值为

$$V_{di} = \frac{1 b_{ni} 1 S_i}{900000} \quad (13)$$

2.5 零平衡线的上升及冰川的适应功能

冰川系统也像其他自然系统一样, 对外界环境的变化有着积极的适应功能及独特的生存策略, 其中 ELA_0 的波动是其主要的适应功能。如持续升温, ELA_0 将随着冰川面积的减少及形态的改变而逐渐上升。 ELA_0 的上升又会使该处温度下降, 从而减少自然升温对冰川的影响, 这是冰川对气候变化响应的反馈功能。

为计算持续升温时 ELA_0 的上升值 ΔELA_0 可利用冰川系统的高度结构^[20]。因冰川系统的积累区比率 AAR_0 是地区地形和气候的综合产物, 受气候波动的影响很少, 同时冰川的退缩一般是从冰舌部分开始的, 冰川上部积累区的面积则相对稳定。统计表明, ΔELA_0 与冰川面积减少率 S_d/S_0 之间存在着多项式的关系

$$\Delta ELA_0 = C_1 (S_d/S_0)^3 + C_2 (S_d/S_0)^2 + C_3 (S_d/S_0) \quad (14)$$

式中 C_1 、 C_2 、 C_3 为经验系数。 ELA_0 的上升而引起的该处温度下降值 Δt 与不同地区的温度垂直递减率 γ 有关, 即

$$\Delta t = \gamma \Delta ELA_0 \quad (15)$$

式中 γ 在大陆型冰川区一般变化于 $-0.0075 \sim -0.0065 \text{ K/m}$ 间。

3 冰川系统变化预测

把上述参数代入功能模型中, 上一年作为下一年的起始状态, 逐年计算, 便可模拟出塔河源区冰川在本世纪对气候变化的响应过程 (图 1)。如 2050 年气温将比 1961~1990 年高出 $1.9 \sim 2.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[13], 即升温率为 $0.2 \sim 0.3 \text{ K/10a}$ 固态降水增率为 10% /K 情景下, 特定年塔河源区冰川变化的预估值如表 2。以同样气候变化情景预测到本世纪末, 结果如图 1。

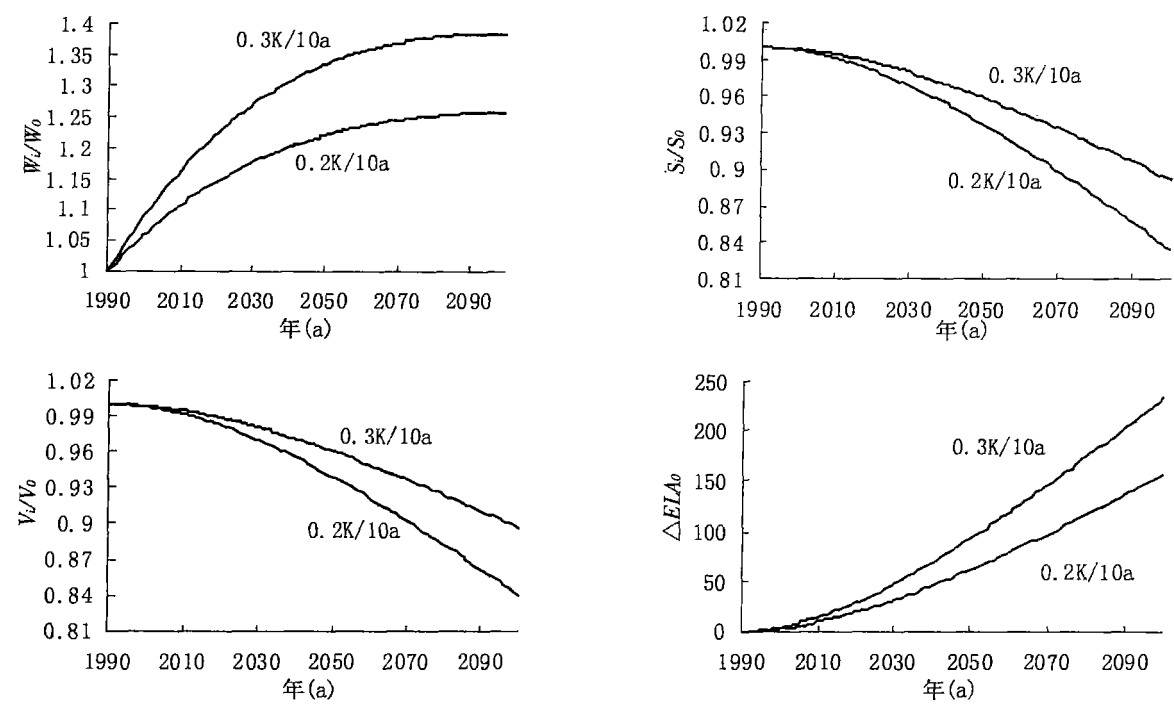


图 1 塔河源区冰川系统对气候变化的响应趋势预测 (降水增率: 10% /K)
Fig 1 Responses of glacier system to climate change in the Source Region of Tarim River
(Precipitation rising rate 10% /K)

表 2 本世纪特定年塔河源区冰川系统变化
趋势预测 (降水增率: 10% /K)

Table 2 Responses of glacier system to climate change
in the special years in the Source Region of Tarim River
(Precipitation rising rate 10% /K)

冰川变化指标	0.2K /10a			0.3K /10a		
	2010年	2030年	2050年	2010年	2030年	2050年
面积减少率 (S_d/S_0)(%)	-0.6	-2.1	-4.2	-0.9	-3.2	-6.4
冰川储量减少率 (V_d/V_0)(%)	-0.6	-2	-4	-0.9	-3.1	-6.2
径流增率 ($\Delta W/W_0$)(%)	10.8	17.8	22	16.4	27.1	33.5
零平衡线上升值 (ΔELA_0)(m)	9.2	31.6	62.2	13.9	47.7	93.7

4 讨论与结论

把冰川系统变化功能的改进模型应用到长江源区,得到了较好的结果^[21],近年有关中国冰川系统面积近期变化的测量结果增多,加上有关高山区温度变化的研究使我们有可能利用这些资料,对冰川系统模型进行检验。应该说明的是,本模型预测的

是冰川系统变化长期的变化趋势,反映的是数十年到上百年的变化趋势。对于数年尺度的冰川变化,由于影响冰川变化的因子较多,其对气候变化响应的过程复杂,甚至出现同一山区绝大多数冰川退缩的情况下,出现个别冰川前进的现象;所以单从个别冰川的变化很难看出某一地区冰川的变化总体趋势,只有通过冰川系统的平均状态,才能较为全面地了解某一地区冰川变化的总趋势。本模型正是通过预测冰川系统的平均变化趋势,忽略个别冰川的特殊响应,这样不但不会使预测结果产生较大偏差,反而更有利于我们认识某一地区冰川对气候变化响应的总趋势。

值得指出的是冰川规模变化对气候的响应有滞后性,特别是对规模大、表碛区面积广的冰川来说,在时间尺度不够大(数十年)时,其准确性较差,但对冰川系统来说,多数为对气候变化响应较快、且无表碛覆盖的中小冰川;另一方面从长期趋势来看,气温升高最终会战胜表碛的保护作用,使冰川退缩率增大,也就是说,那些表碛厚、规模大的冰川对气候变化的响应,会趋向于相应气候情景下该冰川系统平均趋势值。

为检验修订后冰川系统变化的功能模型预测结

果的可靠性, 本文选用了我国有近期变化实测资料的冰川区进行验证(表 3)。研究表明近几十年中国西部冰川区平均升温率大致为 $0.2 \sim 0.3 \text{ K} / 10\text{a}^{[13, 14]}$ 。由表 3 可见, 近数十年来中国西部冰川规模变化的实测数据与模型的预测结果相比较, 除阿尼马卿山冰川规模变化速率 (-17%) 超过模型预测情景 $0.5 \text{ K} / 10\text{a}$ 的值 (-16.5%) 外, 其他 7 个地区的冰川系统规模变化的实测结果基本上与模型预测情景 $0.2 \sim 0.3 \text{ K} / 10\text{a}$ 的计算结果相吻合, 这表明模型的预测结果是可信的。因此, 本文的预测结果能反映塔河源区冰川的变化趋势。

表 3 近数十年来中国西部冰川变化验证

Table 3 Verification of model results with data of the glacier changes in western China in recent decades

冰川系统 位置	时间段 (年)	实测资料		模型计算值	
		退缩率	资料来源	升温率	退缩率
玉龙喀什河	1989~2001	-0.3%	上官冬辉等[15]	$0.3 \text{ K} / 10\text{a}$	-0.3%
乌鲁木齐河流域	1964~1992	-13.8%	陈建明等[22]	$0.3 \text{ K} / 10\text{a}$	-13.7%
四果树河流域	1962~1990	-2.6%	刘潮海等[23]	$0.3 \text{ K} / 10\text{a}$	-2.8%
祁连山西段	1956~1990	-10.3%	刘时银等[24]	$0.3 \text{ K} / 10\text{a}$	-10.1%
喀什河流域	1962~1989	-3.5%	刘时银等[25]	$0.2 \text{ K} / 10\text{a}$	-3.3%
昆仑山中段 布喀塔格	1973~1994	-1.6%	李震等[26]	$0.2 \text{ K} / 10\text{a}$	-1.7%
格拉丹冬	1969~2000	-1.7%	鲁安新等[27]	$0.2 \text{ K} / 10\text{a}$	-1.7%
阿尼马卿山	1966~2000	-17.0%	刘时银等[28]	$0.5 \text{ K} / 10\text{a}$	-16.5%

参考文献 (References):

[1] V. M. Kotlyakov. Glaciological Dictionary (in Russian) [M]. М.: Ленинград. гидрометеороиздат, 1988 526c

[2] Wu Lizong, Li Xin. China Glacier Information System [M]. Beijing: Haiyang Press, 2004 8~17 [吴立宗, 李新. 中国冰川信息系统 [M]. 北京: 海洋出版社, 2004 8~17]

[3] Wang Shunde, Wang Yanguo, Wang Jing, et al. Change of climate and hydrology in the Tarim River Basin during past 40 years and their impact [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25 (3): 315~320 [王顺德, 王彦国, 王进, 等. 塔里木河流域近 40 年来气候、水文变化及其影响 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 315~320]

[4] Han Ping, Xue Yan, Su Hongchao. Precipitation signal of the climatic shift in Xinjiang region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25(2): 179~182 [韩萍, 薛燕, 苏宏超. 新疆降水在气候转型中的信号反应 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 179~182]

[5] Yu Shuqiu, Lin Xuechun, Xu Xiangde. The climatic change in Northwest China in recent 50 years [J]. *Climatic and Environment Research*, 2003, 8(1): 9~18 [于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 我国西北地区近 50 年降水和温度的变化 [J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 9~18]

[6] Ren Jiwen, Qin Dahe, Kang Shichang, et al. Glacier variations and climate warming and drying in the central Himalayas [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(1): 65~69

[7] Liu Shiyin, Xie Zhichu, Wang Ninglian, et al. Mass balance sensitivity to the climate change—a case study of the Glacier No. 1 at Urumqi riverhead, Tianshan Mountains, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 1999, 9(2): 134~140

[8] Braithwaite R. J., Zhang Y. Sensitivity of mass balance of five glaciers to temperature changes assessed by tuning a degree-day model [J]. *Journal of Glaciology*, 2000, 46(152): 7~14

[9] Regine Hock, Björn Holmgren. A distributed surface energy-balance model for complex topography and its application to Svalbard, Sweden [J]. *Journal of Glaciology*, 2005, 51(172): 25~36

[10] Oerlemans J., Anderson B., Hubbard A., et al. Modeling the response of glaciers to climate warming [J]. *Climate Dynamics*, 1998, 14: 267~274

[11] Ye Baisheng, Ding Yongjian, Liu Fengjing, et al. Responses of various-sized alpine glaciers and runoff to climate change [J]. *Journal of Glaciology*, 2003, 49(164): 1~7

[12] Xie Zhichu, Feng Qinghua, Liu Chaohai. Modeling the Variation of Glacier System—Taking the Southern Tibet Region as Example [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(1): 16~27 [谢自楚, 冯清华, 刘朝海. 冰川系统变化的模型研究——以西藏南部外流水系为例 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(1): 16~27]

[13] Zhao Congci, Gao Xuejie, Tang Maocang, et al. Prediction of Climatic Change [A]. In: Qin Dahe. Assessment on Environment of Western China, vol. 2, Prediction of Environmental Change in Western China [C]. Beijing: Science Press, 2002, 16~46 [赵宗慈, 高学杰, 汤懋苍, 等. 气候变化预测. 见: 丁一汇主编. 中国西部环境变化的预测 [C]. 中国西部环境演变评估 (秦大河总主编), 第二卷 [C]. 北京: 科学出版社, 2002, 16~46]

[14] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. An Assessment of the Issues of Climatic Shift from Warm-dry to Warm-humid in Northwest China [M]. Beijing: Meteorology Press, 2003, 1~98 [施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估 [M]. 北京: 气象出版社, 2003, 1~98]

[15] Shangguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Glacier Change at the Head of Yungkax River in the West Kunlun Mountains in the Past 32 Years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59 (6): 853~862 [上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 玉龙喀什河源区 32 年来冰川变化遥感监测 [J]. 地理学报, 2004, 59(6): 853~862]

[16] Liu Shiyin, Xie Zhichu, Wang Ninglian, et al. Mass balance sensitivity to the climate change—a case study of Glacier No. 1 at Urumqi riverhead, Tianshan Mountains, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 1999, 9(2): 134~140

[17] Xie Zhichu, Han Jiankang, Liu Chaohai, et al. Measurement and estimative models of glacier mass balance in China [J]. *Geografiska Annals*, 1999, 81A(4): 91~796

[18] Xie Z., Ding L., Liu Ch., et al. Mass balance at the steady state equilibrium line altitude and its application [J]. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 1996, 32: 129~135

[19] Liu Chaohai, Ding Liangfu. Some comments on the glacier inventory

- ry of Ili River Drainage Basin in Tianshan Mountains [A]. In: Ding Liangfu, Xie Weirong, Liu Chaohai *et al*. Glacier inventory in China, Tianshan Mountains (Ili River Drainage Basin) [C]. Beijing: Science Press, 1986. 1~6 [刘潮海, 丁良福. 天山伊犁河流域冰川目录编纂说明 [A]. 见: 中国冰川目录, 天山地区 (伊犁河流域) [C]. 北京, 科学出版社, 1986. 1~6]
- [20] Wang X in, Xie Zichu, Lin Jian. Research on the Calculation of Altitude Structure of a Glacier System—Taking the Tarim Basin as an Example [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26 (5): 16~27 [王欣, 谢自楚, 林剑, 等. 冰川系统高度结构计算研究—以塔里木盆地水系冰川为例 [J]. 冰川冻土, 2004, 26 (5): 16~27]
- [21] Wang X in, Xie Zichu, Feng Qinghua *et al*. Response of glaciers to climate change in the source region of the Yangtze River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27 (4): 498~502 [王欣, 谢自楚, 冯清华, 等. 长江源区冰川对气候变化的响应 [J]. 冰川冻土, 2005, 27 (4): 498~502]
- [22] Chen Jianming, Liu Chaohai, Jin Mingxie. Application of the repeated aerial photogrammetry to monitoring glacier variation in the drainage area of the Urumqi River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18 (4): 331~336 [陈建明, 刘潮海, 金明燮. 重复航空摄影测量方法在乌鲁木齐河流域冰川变化监测中的应用 [J]. 冰川冻土, 1996, 18 (4): 331~336]
- [23] Liu Chaohai, Kang Ersi, Liu Shiyin *et al*. Study on the glaciers variation and its runoff response in the arid region of Northwest China [J]. *Science in China (Series)*, 1999, 29 (Suppl 1): 55~62
- [24] Liu Shiyin, Shen Yongping, Sun Wenxin. Glacier variation since the Maximum of the Little Ice Age in the Western Qilian Mountains Northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24 (3): 227~233 [刘时银, 沈永平, 孙文新. 祁连山西段小冰期以来的冰川变化研究 [J]. 冰川冻土, 2002, 24 (3): 227~233]
- [25] Liu Shiyin, Xie Zichu, Liu Chaohai. Mass balance and fluctuation of glacier [A]. In: Shi Yaofeng. Glaciers and Their Environments in China: The Present, Past and Future [C]. Beijing: Science Press, 2000. 385~319
- [26] Li Zhen, Sun Wenxin, Zeng Qunzhu *et al*. Deriving Glacier change information on Xizang (Tibet) Plateau by integrating RS and GIS techniques [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54 (3): 263~268 [李震, 孙文新, 曾群柱. 综合 RS 与 GIS 方法提取青藏高原冰川变化信息 [J]. 地理学报, 1999, 54 (3): 263~268]
- [27] [21] Lu Anxin, Yao Tandong, Liu Shiyin *et al*. Glacier change in the Geladandong Area of the Tibetan Plateau Monitored by Remote Sensing [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24 (5): 559~562 [鲁安新, 姚檀栋, 刘时银, 等. 青藏高原各拉丹东地区冰川变化的遥感监测 [J]. 冰川冻土, 2002, 24 (5): 559~562]
- [28] Liu Shiyin, Lu Anxin, Ding Yongjian *et al*. Glacier fluctuations and the inferred climatic changes in the A'Nyemagen Mountains in the source area of the Yellow River, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24 (6): 701~707 [刘时银, 鲁安新, 丁永建等. 黄河上游阿尼玛卿山区冰川波动与气候变化 [J]. 冰川冻土, 2002, 24 (6): 701~707]

Prediction on the Variation Trend of Glacier System in the Source Region of Tarim River Responding to Climate Change

WANG X in^{1,2}, XIE Zichu³, LIU Shiyin¹, SHANG Guandonghui¹, TAO Jianjun², YANG Yue-long²

(1. Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 73000, China;

2. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan, 411201, China;

3. Hunan Normal University, Changsha, Hunan, 410081, China)

Abstract The source Region of Tarim River is one of the areas in China where the glaciers are concentrated, and the glacier area totaled as $17\,745\,51\text{ km}^2$, accounting for 30% of the total glacier area in China. On the basis of the structure of glacier system and the nature of the equilibrium line altitudes at the steady state (ELA_0), functional model of the variation of glacier system are established. Under the climatic scenarios with temperature rising rate of $0.2\sim 0.3\text{ K}/10\text{ a}$ and precipitation rising rate of $10\%/K$, the model results indicate that by the year of 2050, glacier area will reduce to 4%~6%, glacier discharge-runoff increasing rate will be 22%~34%, ELA_0 will rise by 62~94m respectively in the source Region of Tarim River. If the climatic scenarios with temperature rising rate of $0.2\sim 0.3\text{ K}/10\text{ a}$ and precipitation rising rate of $10\%/K$ continues to the end of this century, the glacier area will reduce by 10%~16%, the glacier runoff will fall back, but still be 11%~13% than the beginning of this century, and the ELA_0 will rise to 156~233m.

Key words the source Region of Tarim River; glacier system; functional models; variation predictions