

文章编号: 1000-0240(2006)04-0477-09

天山南坡科契卡尔巴西冰川物质平衡初步研究

张勇¹, 刘时银^{1,2}, 丁永建¹, 李晶¹, 上官冬辉¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈与环境联合重点实验室, 甘肃兰州 730000;

2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100029)

摘要: 基于 2003—2005 年考察期间观测的气温与降水资料, 运用度日物质平衡模型模拟了天山南坡科契卡尔巴西冰川近期的物质平衡变化状况。结果表明: 度日物质平衡模型模拟的冰川物质平衡值与实测值的变化趋势基本一致, 模型模拟结果较为理想; 2003/2004 年度和 2004/2005 年度两个物质平衡年的平均物质平衡值分别为 -494 和 -384 mm, 平衡线高度 (ELA) 比 20 世纪 70 年升高了 300 m 左右。由此可见, 在由暖干向暖湿转型的气候背景下, 尽管降水增加显著, 但强烈的升温导致科契卡尔巴西冰川处于强烈的物质亏损状态。

关键词: 科契卡尔巴西冰川; 度日物质平衡模型; 物质平衡; 暖湿

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

1 引言

冰川是冰冻圈系统三大组分之一, 作为气候系统一个特殊而重要的组成部分, 在全球气候变化中扮演了重要角色。冰川变化不仅深刻地影响到局地气候、生态与环境、水资源变化以及海平面升降^[1-4], 同时也是引起冰湖溃决洪水、冰川洪水泥石流等灾害的诱因^[5-6]。冰川随气候的变化而改变其物质及形态(长度、厚度、面积等)^[7], 其中, 冰川物质平衡的变化是反映气候变化最敏感的指标之一^[8-9], 是冰川作用区能量-物质-水交换的纽带, 是引起冰川规模和径流变化的物质基础, 已成为全球气候系统中一个重要的监测和研究对象^[10]。因此, 正确认识冰川物质平衡及其变化对研究全球及区域气候变化、冰川水资源、冰川灾害等具有十分重要的科学意义。

塔里木河流域是中国最大的内陆河流域, 在该流域集中了中国冰川面积的 33.5%、冰川储量的 41.3%, 内流区冰川面积的 56% 和储量的 65%, 同时, 中国面积 > 100 km² 的 33 条冰川有 22 条位于该流域^[11]。20 世纪 80 年代中后期以来, 中国西

北地区气候出现了由暖干向暖湿转变的现象^[12], 1987—2000 年与 1961—1986 年相比, 西北地区 128 个气象站的平均气温升高了 0.7 °C^[13]。同期塔里木河流域所属的南疆地区 1986—2000 年的平均年降水量较 1956—1986 年的平均年降水量偏多 32%, 且有逐年递增的趋势^[14]。在降水增加和持续升温的背景下, 塔里木河流域冰川的物质平衡变化及其对水资源的影响鲜有文章涉及, 其原因在于塔里木河流域有长期物质平衡监测的冰川较少, 尤其是面积较大的冰川。因此, 无法正确评价塔里木河流域冰川在暖湿气候背景下的物质变化状况及对流域水资源的影响。

针对这一事实, 本文选择塔里木河流域的天山南坡科契卡尔巴西冰川作为典型研究区(图 1)。该地区曾在 1977—1978 年间进行过短期考察, 从 2003 年 6 月开始, 在国家自然科学基金的资助下中国科学院寒区旱区环境与工程研究所对该冰川进行定位监测, 获得了冰川、气象、水文等方面的观测资料。本研究基于科契卡尔巴西冰川 2003—2005 年野外监测数据, 运用度日物质平衡模型模拟了该冰川近期的物质平衡变化状况, 旨在寻求一个相对简

收稿日期: 2006-05-23; 修订日期: 2006-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(40371026, 40501007, 90202013), 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX3-SW-345, KZCX3-SW-339); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰川学冻土学人才培养基金项目(J0130084)资助

作者简介: 张勇(1979—), 男, 山东滕州人, 2002 年毕业于烟台师范学院, 现为在读博士研究生, 主要从事冰川变化与水资源研究。

E-mail: zhangy@lzb.ac.cn

单且易推广的冰川物质平衡模型, 弥补塔里木河流域冰川物质平衡监测资料较少的缺陷, 为正确评价暖湿气候背景下塔里木河流域冰川物质变化状况及对流域水资源的影响奠定基础。



图 1 科契卡尔巴西冰川位置

Fig. 1 The Keqicar Baxi Glacier in the southwestern Tianshan Mountains

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

科契卡尔巴西冰川(5Y674A5; $41^{\circ}48.77' N$, $80^{\circ}10.20' E$), 位于天山托木尔峰山汇南坡, 是典型的土耳其斯坦型冰川^[15](图 1), 隶属于阿克苏河流域. 阿克苏河是目前向塔里木河输水量最大的一条源流河, 也是一条冰川覆盖率较高的河流, 冰川融水对该河径流的补给作用非常显著^[16]. 该冰川全长 26.0 km, 平均宽度 3.3 km, 总面积约 83.6 km², 呈 S 状流出山谷, 末端海拔 3 020 m^[17]. 冰川消融区面积为 30.6 km², 长度约为 19.0 km^[17]. 科契卡尔巴西冰川突出的特征之一是冰川消融区表面覆盖了一层厚度不一的灰色表碛, 厚度介于 0~250 cm 之间, 其表碛面积约占消融区总面积的 60% 左右(图 2).

冰川区降水主要来自大西洋和北冰洋的潮湿气流补给, 降水主要集中在春季和夏季, 秋冬两季降水量相对较少^[15]. 由于局地水循环作用, 冰川区对流型降水时有发生, 且降水多出现在白天的午后^[18]. 根据 2003—2005 年间的气象观测, 冰川末端

年平均温度为 $0.7^{\circ}C$, 年降水量为 652.2 mm.

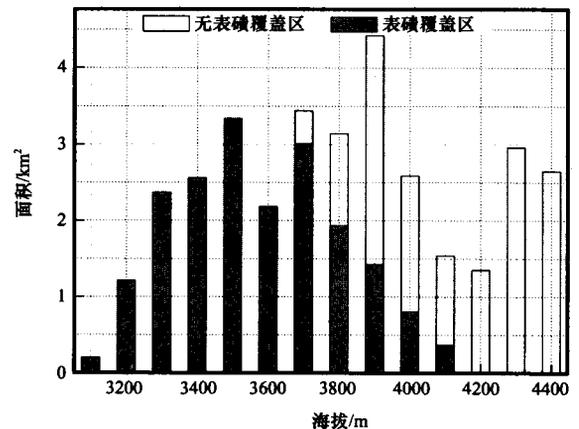


图 2 科其卡尔巴契冰川表碛覆盖与裸冰面积分布

Fig. 2 Hypsometric diagram of the Keqicar Baxi glacier for debris-covered and debris-free surfaces

2.2 数据来源

本研究使用的主要数据包括: 2003—2005 年考察期间观测的气温、降水和物质平衡数据以及 90 m 分辨率的数字高程模型(DEM). 冰川区气温是通过自动气象站(Automatic Weather Station, AWS)进行自动观测(图 1). 自动气象站(AWS)的温度测量传感器(MP101A TP)分别架设在地表以上 0.5 m、1.0 m 和 2.0 m 的高度, 并与数据采集器(HL20)连接进行同步采集, 数据采集器每隔 10 s 采样一次, 每 1 h 记录一次采样均值. 本研究采用的是距冰面 2.0 m 处的气温值.

冰川区降水是通过布设在不同海拔高度的总雨量筒测量获取的, 在冰川区共布设了 5 个降水观测点(图 1), 从 2003 年 7 月至 2005 年 9 月每隔 25~30 d 观测一次, 取得冰川区不同海拔的降水数据. 同时, 在冰川上布设了一个纵向物质平衡观测剖面(图 1), 从 2003 年 7 月至 2005 年 9 月每隔 20~25 d 对物质平衡观测点进行观测, 获取冰川不同高度的物质平衡数据. 此外, 为了便于计算, 按 100 m 高度间隔把科契卡尔巴西冰川划分为不同高度带, 不同高度带的面积由 90 m 分辨率的数字高程模型(DEM)生成的.

3 研究方法

冰川表面的物质平衡变化是十分复杂的过程, 这一过程的模拟需要大量的模型参数, 如长、短波辐射、风速和风向、气温、湿度、降水等, 这些参数必须通过综合的、长期的冰川监测才能获取. 然而,

在塔里木河流域有长期监测的冰川数量较少, 导致基于冰面能量平衡模型模拟塔里木河流域冰川物质平衡时往往会遇到输入参数的多变性以及输入变量外推困难等问题, 难以广泛应用. 此外, 现在的气候情景多以气温和降水的形式表达, 用气温和降水来描述物质平衡的形式可以很方便的模拟物质平衡对气候变化的响应. 因此, 本研究选择了广泛应用于北欧、格陵兰冰盖、阿尔卑斯山、青藏高原等地区冰川物质平衡研究的度日物质平衡模型模拟科契卡尔巴西冰川物质平衡变化状况^[19-22].

3.1 冰川与积雪消融

对于冰川与积雪消融来说, 其计算方法如下式所示:

$$m = DDF \cdot PDD \quad (1)$$

式中: m 是某时段内冰川与积雪的消融水当量(mm w. e.); DDF 是冰川冰/雪的度日因子($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$); PDD 是某时段内的正积温, 一般由下式获取^[23]:

$$PDD = \sum_{i=1}^n H_i \cdot T_i \quad (2)$$

式中: T_i 为某天(t)的日平均气温($^{\circ}\text{C}$); H_i 是逻辑变量, 当 $T_i \geq 0$ $^{\circ}\text{C}$ 时, $H_i = 1.0$; 当 $T_i < 0$ $^{\circ}\text{C}$ 时, $H_i = 0.0$.

模型中不同高度带的气温是采用气温递减率(r_t)从冰川末端的自动气象站(A)推求获取的(图1). 科契卡尔巴西冰川区的冰面状况较为复杂, 主要存在表碛覆盖冰川冰、裸露冰川冰和积雪3种类型, 由于这3种地表类型的物理特征不同, 尤其是表碛覆盖区, 导致裸露冰川冰、表碛覆盖冰川冰和积雪的度日因子不同. 张勇等^[24]研究表明, 科契卡尔巴西冰川区雪的度日因子比裸露冰川冰和表碛覆盖冰川冰的小, 且度日因子的季节变化不明显. 因此, 假定每一高度带的度日因子不随空间和时间的变化.

3.2 降水

科契卡尔巴西冰川区布设了5个降水观测点(图1), 然而, 对于整个冰川区来说, 降水观测分布相对较少, 并且不同观测点的监测时段不同, 仅冰川末端大本营(海拔2 950 m)和自动气象站(B)处的降水观测时段较长. 因此, 冰川区不同高度带的降水采用海拔梯度法求取^[25-26].

对于格陵兰、两极地区的冰川来说, 通常冰川表面积以降水代替, 且假定所有降水均以固态形

式降落在冰川上, 但对科契卡尔巴西冰川来说, 这一假设并不适合. 鉴于冰川区降水观测点分布较少, 无法在每个高度带上观测降水的液态和固态情况, 因此, 一般采用临界气温法^[25], 公式如下:

$$P_s = \begin{cases} P & T \leq T_s \\ \frac{T_L - T}{T_L - T_s} P & T_s < T < T_L \\ 0 & T \geq T_L \end{cases} \quad (3)$$

$$P_l = P - P_s \quad (4)$$

式中: P_s 和 P_l 分别为月固态和月液态降水量(mm); P 为月降水量(mm); T 为月平均气温($^{\circ}\text{C}$); T_s 和 T_L 分别为固态和液态降水的临界气温($^{\circ}\text{C}$).

此外, 受动力损失、蒸发损失和湿润损失的影响^[27], 冰川区总雨量筒降水观测比实际降水量少, 必须分别对液态降水和固态降水进行校正. 根据在乌鲁木齐河源和黑河流域的研究工作^[25,27], 液态降水校正系数(Cf_l)大约为1.1, 固态降水校正系数(Cf_s)为1.3.

3.3 物质平衡

按100 m高度间隔把科契卡尔巴西冰川划分为不同高度带(i), 每一高度带中值高度上的物质平衡值为该高度带的平均物质平衡(\bar{b}_i):

$$\bar{b}_i = \int_{\text{year}} \{(1-f) \cdot m_i + P_i\} dt \quad (5)$$

式中: f 为融水渗浸冻结率; P 为冰川表面积累量, 即固态降水量(mm). 那么, 科契卡尔巴西冰川的平均物质平衡(\bar{b}_0):

$$\bar{b}_0 = \frac{1}{S_T} \sum_{i=1}^{i=n} \bar{b}_i \cdot s_i \quad (6)$$

式中: S_T 为冰川区总面积(km^2); s_i 为不同高度带的冰川面积(km^2).

4 模型参数

4.1 经验参数

在模型计算过程中, 气温递减率(r_t)和降水梯度(r_p)是根据实测结果获取的; 固、液态降水临界温度(T)及固、液态降水校正系数(Cf)是根据在乌鲁木齐河源和祁连山的观测结果及相关研究确定的^[25, 27]; 融水渗浸冻结率(f)是根据天山乌鲁木齐河源1号冰川的研究确定的^[26]; 冰川区总面积(S_T)则由冰川编目数据获取^[17](表1).

表 1 模型计算过程中的经验参数
Table 1 Fixed parameters for the degree-day mass-balance model

模型参数	参数值
气温递减率(r_t)/ $^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{m})^{-1}$	0.6
降水梯度(r_p)/ $\text{mm} \cdot (100\text{m})^{-1}$	8.8
液态降水临界温度(T_l)/ $^{\circ}\text{C}$	2.0
固态降水临界温度(T_s)/ $^{\circ}\text{C}$	-0.5
液态校正系数(C_{f_l})	1.1
固态校正系数(C_{f_s})	1.3
融水渗透冻结率(f)	0.1
冰川区总面积(S_T)/ km^2	83.6

4.2 参数优化

基于 2003 年实测的冰川物质平衡数据,对模型中的裸露冰川冰、表碛覆盖冰川冰和雪的度日因子值进行优化,同时使用 2004—2005 年考察期间的实测数据对优化的度日因子值进行验证.在度日因子值优化与验证的过程中,使用效率系数(NSE)评价模型模拟的好坏,其形式如下^[28]:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (TC_{i\text{obs}} - TC_{i\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^N (TC_{i\text{obs}} - TC_{\text{obs}})^2} \quad (7)$$

式中: $TC_{i\text{obs}}$ 是 i 时刻实测数据序列; $TC_{i\text{sim}}$ 是 i 时刻模拟数据序列; $\overline{TC_{\text{obs}}}$ 为 i 时刻实测数据序列平均值; N 为时间序列长度.当效率系数(NSE)越接近 1,模型模拟效果越好.

在优化过程中,通过冰川物质平衡模拟值与实测值对比分析,选择效率系数(NSE)较大的度日因子值.表 3 是优化后的裸露冰川冰、表碛覆盖冰川冰和雪的度日因子值.

表 2 裸露冰川冰、表碛覆盖冰川冰和积雪的度日因子值 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Table 2 Optimized degree-day factors of the model for debris-covered ice, debris-free ice and snow ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

类别	度日因子
表碛覆盖冰川冰	2.0 (表碛厚度 ≥ 100 cm)
	4.8 (表碛厚度 100 cm)
裸露冰川冰	7.2
积雪	3.4

5 结果与讨论

基于 2003—2005 年考察期间冰川区气温和降水的观测数据,模拟了科契卡尔巴西冰川近期的物质平衡变化状况.图 3(a~e)分别是科契卡尔巴西

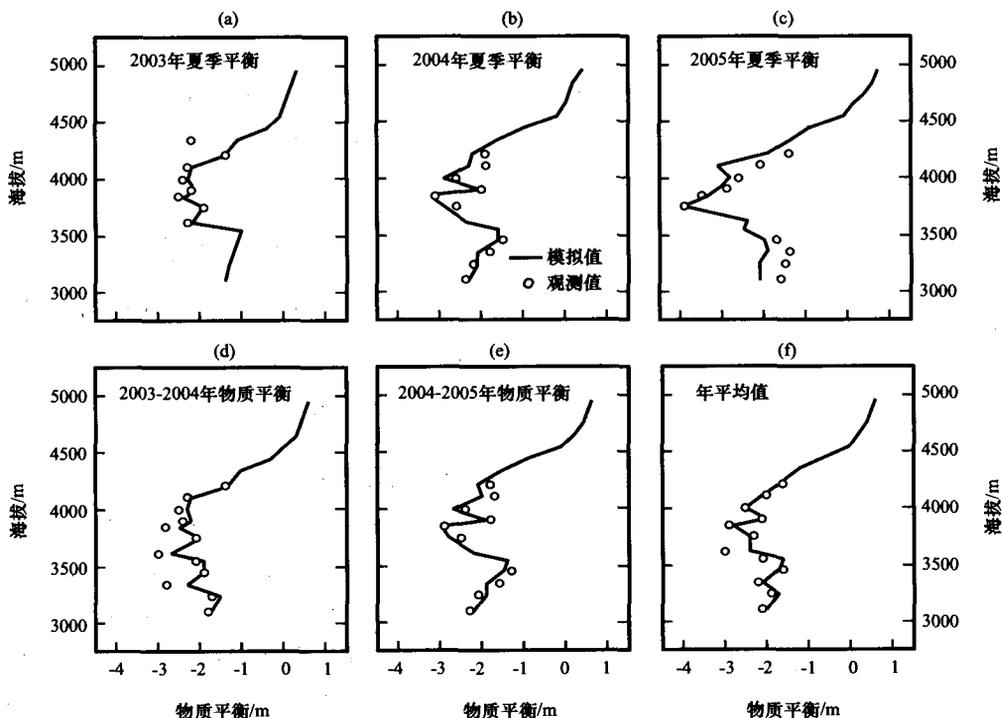


图 3 科契卡尔巴西冰川冰川物质平衡随海拔的变化

Fig. 3 Measured and modeled mass balance changing with the altitude on the Keqicar Baxi Glacier

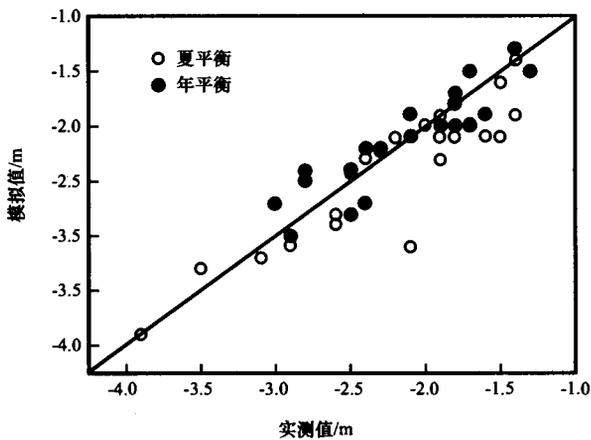


图 4 科契卡尔巴西冰川夏平衡与年平衡的实测值与模拟值对比

Fig. 4 Measured and modeled mass balance, annual and in summer, of the Keqicar Baxi Glacier

冰川 2003 年、2004 年、2005 年夏平衡与 2003—2004、2004—2005 两个物质平衡年的物质平衡随海拔高度的变化趋势，图 3(f) 是 2003—2004 和 2004—2005 两个物质平衡年的年平均物质平衡值。从图 3 不难看出，运用度日物质平衡模型模拟的物质平衡量随海拔高度的变化趋势与实测值基本一致，尽管有些点存在较大差异，其原因一方面在于冰川区降水在空间上差别较大，而以冰川末端的监测点为基准，向冰川区推求降水时所采用的海拔梯度法可能并不能真实地反映冰川区的降水空间分布状况；另一方面冰川消融区冰面覆盖了一层厚度不一的表碛，导致海拔 4000 m 以下区域的物质平衡空间差异较大。

图 4 是科契卡尔巴西冰川夏平衡与年平衡的实测值与模拟值对比，可以看出，冰川物质平衡模拟值与实测值比较接近，夏平衡与年平衡的模拟效率系数(NSE)分别达到了 0.9 和 0.8。总的来说，运用度日物质平衡模型模拟科契卡尔巴西冰川 2003—2005 年的物质平衡取得了较为理想的结果。

由模型计算可知，2003—2005 年科契卡尔巴

西冰川的夏平衡值分别为 -640、-847 和 -925 mm，2003—2004 和 2004—2005 两个物质平衡年的物质平衡分别为 -494 和 -384 mm，年平均物质平衡值为 -439 mm。研究表明^[29-30]，冰川年平衡线(ELA_t)与该年份的冰面净平衡(\bar{b}_n)之间存在着简单的线性关系，可用下式表示：

$$\bar{b}_n = \alpha(ELA_0 - ELA_t) \quad (8)$$

式中：ELA₀ 为平衡态的平衡线高度，其值为 4 350 m^[17]； α 为有效平衡梯度，是冰川不同高度及年份的物质平衡梯度的平均值。根据式(8)和度日物质平衡模型模拟的冰面物质平衡，可以计算出科契卡尔巴西冰川 2003—2004 年和 2004—2005 年两个物质平衡年的平衡线高度，其值分别为海拔 4 550 m 和海拔 4 713 m。

20 世纪 80 年代中后期以来，科契卡尔巴西冰川区气温持续上升^[18]，1987—2000 年与 1954—1986 年相比，冰川区平均气温升高了 1.0 °C。同时，天山山区 1987—2000 年与 1961—1986 年相比年平均降水量增加了近 40 mm，偏多 12%^[14]，而科契卡尔巴西冰川所在的托木尔峰南部地区平均年降水量增加了 29.3%^[31]。在降水增加与持续升温的气候背景下，与其它典型冰川近期物质平衡对比发现(表 3)，科契卡尔巴西冰川处于强烈的物质亏损状态，尤其是在夏半年，其平均物质平衡量达 -804 mm；同时，冰川平衡线高度逐年升高，2003—2005 年的平均平衡线高度(ELA)比 20 世纪 70 年代上升了 300 m 左右。这意味着，在科契卡尔巴西冰川区，尽管降水增加显著，但冰川区升温起主导作用，强烈的升温导致冰川物质亏损加快，平衡线高度升高。

另一方面，与乌鲁木齐河源 1 号冰川、七一冰川相比，科契卡尔巴西冰川近期物质亏损相对较小，而与海螺沟冰川物质平衡值相差不大(表 3)，这可能是由于科契卡尔巴西冰川消融区覆盖的厚层表碛的保护作用所致。研究表明，表碛覆盖对冰面

表 3 科契卡尔巴西冰川与中国西部典型观测冰川年平均物质平衡(\bar{b}_n)比较(mm)
Table 3 \bar{b}_n on the Keqicar Baxi Glacier Compared with some representative glaciers in West China (mm)

冰川	山脉	监测时段	物质平衡(\bar{b}_n)	资料来源
科契卡尔巴西冰川	天山南坡	2003—2005	-439	本研究
乌鲁木齐河源 1 号冰川	天山北坡	1997—2002	-740	文献[32]
七一冰川	祁连山	2001—2003	-563	文献[33]
海螺沟冰川	贡嘎山	1990—1997	-470	文献[34]

融化有较大的影响,当表碛厚度小于某一临界厚度(约 3 cm)时,表碛的存在促进了冰面的消融;而当表碛厚度超过临界值时,随着厚度的增加,表碛则会抑制冰川消融^[35]。根据野外实地调查,在海拔 3 700 m 以下,表碛厚度 > 3 cm,尤其是在冰川末端表碛厚度超过 200 cm,这一厚层表碛对科契卡尔巴西冰川消融区下部消融起到了抑制作用。从图 3 可以看出,科契卡尔巴西冰川消融区上部(海拔 3 700~4 000 m)物质亏损最为强烈,而冰川消融区下部相对较小。

6 结论

基于 2003—2005 年的野外监测数据,运用度日物质平衡模型模拟了塔里木河流域科契卡尔巴西冰川近期的物质平衡变化状况,与实测值对比发现,模型模拟结果较为理想。然而,在模型的计算过程中存在以下误差:1) 在科契卡尔巴西冰川积累区风吹雪较为盛行,且冰川区降水的空间变化较大,而运用海拔梯度法计算的冰川区降水不能真实地反映冰川区降水的空间分布状况;2) 由于雪层内部的热状况无法知道,导致无法定量描述附加冰的形成、破坏过程以及融水在雪层内的冻结量,在计算冰川消融时,附加冰的影响还有待于进一步探讨。因此,度日物质平衡模型还需进一步的改进。

尽管塔里木河流域长期监测的冰川数量较少,然而,本研究为塔里木河流域冰川物质平衡的研究提供了一个相对简单的方法。若在塔里木河流域不同冰川上开展短期冰雪消融及相关气象要素的观测,则可应用本研究模型模拟流域内不同冰川的物质平衡变化状况,为全面了解塔里木河流域冰川的物质变化及其对水资源的影响奠定了方法基础。

致谢:2003—2005 年科契卡尔巴西冰川野外考察队的全体人员野外数据观测中付出了辛勤劳动,在此表示衷心感谢。

参考文献(References):

- [1] Oerlemans J. Extracting a climate signal from 169 glacier records [J]. *Science*, 2005, **308**: 675—677.
- [2] Yao Tandong, Wang Youqing, Liu Shiyin, *et al.* Recent glacial retreat in High Asia in China and its impact on water resources in Northwest China [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, **47**(12): 1065—1075.
- [3] Meier M F. Contribution of small glaciers to global sea level [J]. *Science*, 1984, **226**: 1418—1421.
- [4] Raper S C B, Braithwaite R J. Low sea level rise projections from mountain glaciers and icecaps under global warming [J]. *Nature*, 2006, **439**: 311—313.
- [5] Ding Y, Liu J. Glacier lake outburst flood disasters in China [J]. *Annals of Glaciology*, 1992, **16**: 180—184.
- [6] Richardson S D, Reynolds J M. An overview of glacier hazards in the Himalayas [J]. *Quaternary International*, 2000, **65/66**: 31—37.
- [7] Wang Sumin, Liu Shiyin. Variations in cryosphere and terrestrial water environment [M]// Qin Dahe, Chen Yiyu, Li Xueyong. *Climate and Environment Changes in China (Volume I)*. Beijing: Science Press, 2005: 104—110. [王苏民, 刘时银. 冰冻圈与陆地水环境的变化[M]// 秦大河, 陈宜瑜, 李学勇. 中国气候与环境演变(上卷). 北京: 科学出版社, 2005: 104—110.]
- [8] Young G J. The seasonal and diurnal of Glacier-fed stream, Peyton Glacier, Alberta [C]// *Proceedings of Alberta Watershed Research Program Symposium*. Edmonton Alberta, 1977: 1—16.
- [9] Wang Ninglian, Zhang Xiangsong. Mountain glacier fluctuations and climatic change during the last 100 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, **14**(3): 242—250. [王宁练, 张祥松. 近百年来山地冰川波动与气候变化[J]. 冰川冻土, 1992, **14**(3): 242—250.]
- [10] GLIMS. Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS): using the World's Glaciers to Monitor Climate Change [R]. US Geological Survey, Flagstaff, Arizona, 2000. <http://www.flog.wr.usgs.gov/GLIMS/glimshome.html>.
- [11] Shi Yafeng, Liu Chaohai, Wang Zongtai, *et al.* A Concise China Glacier Inventory [M]. Shanghai: Shanghai Science Popularization Press, 2005: 61—74. [施雅风, 刘潮海, 王宗太, 等. 简明中国冰川编目 [M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005: 61—74.]
- [12] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, *et al.* Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, **23**(2), 152—164. [施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势[J]. 第四纪研究, 2003, **23**(2): 152—164.]
- [13] Wang Shaowu, Dong Guangrong. Environmental characteristic of west China and its evolution [M]// Qin Dahe. *Assessment on Environmental Evolution of West China (Volume 1)*. Beijing: Science Press, 2002: 49—61. [王绍武, 童光荣. 中国西部环境特征及其演变[M]// 秦大河. 中国西部环境演变评估(第 1 卷). 北京: 科学出版社, 2002: 49—61.]
- [14] Han Ping, Xue Yan, Su Hongchao. Precipitation signal of the climatic shift in Xinjiang Region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(2), 172—175. [韩萍, 薛艳, 苏宏超. 新疆降水在气候转型中的信号反映 [J]. 冰川冻土, 2003, **25**(2): 172—175.]
- [15] Mountaineering and Expedition Term of Chinese Academy of Science. *Glacial and Wether in Mt. Tuomuer District, Tianshan* [M]. Ürümqi: Xinjiang People's Publishing House, 1985: 32—119. [中国科学院登山考察队. 天山托木尔峰地区的冰川与气象[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985: 32—119.]
- [16] Yang Zhenliang. *Glacier Water Resources in China* [M]. Lanzhou: Gansu Science Technology Press, 1991: 140—141. [杨镇良. 中国冰川水资源[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1990: 140—141.]

- [17] Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Glacier Inventory of China(Ⅲ)[M]. Beijing: Science Press, 1987: 15-69. [中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录(Ⅲ)[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 15-69.]
- [18] Zhang Yong, Liu Shiyin, Han Haidong, *et al.* Characteristics of Climate on Keqicar Baqi Glacier on the South Slopes of the Tianshan Mountains during Ablation Period[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, **26**(5), 545-550. [张勇, 刘时银, 韩海东, 等. 天山南坡科其卡尔巴契冰川消融期气候特征分析[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(5), 545-550.]
- [19] Jóhannesson T, Sigurdsson O, Laumann T, *et al.* Degree-day glacier mass-balance modeling with applications to glaciers in Iceland, Norway and Greenland [J]. Journal of Glaciology, 1995, **41**(151): 345-358.
- [20] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Wang Ninglian, *et al.* Mass balance sensitivity to climate change of the Glacier No. 1 at the Ürümqi River Head, Tianshan Mts. [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, **20**(1): 9-13. [刘时银, 丁永建, 王宁练, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡对气候变化的敏感性研究[J]. 冰川冻土, 1998, **20**(1): 9-13.]
- [21] 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.
- [22] Reeh N. Parameterization of melt rate and surface temperature on the Greenland ice sheet [J]. Polarforschung, 1991, **59**(3): 113-128.
- [23] Braithwaite R J, Olesen O B. Seasonal variation of ice ablation at the margin of the Greenland ice sheet and its sensitivity to climate change, Qamanarssúp sermia, West Greenland [J]. Journal of Glaciology, 1993, **39**(132): 267-274.
- [24] Zhang Yong, Liu Shiyin, Ding Yongjian. Spatial variation of degree-day factors on the observed glaciers in western China [J]. Acta Geographica Sinica SINICA, 2006, **61**(1): 89-98. [张勇, 刘时银, 丁永建. 中国西部冰川度日因子的空间变化特征[J]. 地理学报, 2006, **61**(1): 89-98.]
- [25] Kang Ersi, Cheng Guodong, Lan Yongchao, *et al.* A model for simulating the response of runoff from the mountainous watersheds of inland river basins in the arid area of northwest China to climatic change [J]. Science in China (Series D), 1999, **29**(Suppl. 1): 52-63.
- [26] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Ye Baisheng, *et al.* Study on the mass balance of the Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürümqi River using degree-day method [C]// Proceeding of the fifth Chinese Conference on Glaciology and Geocryology (Vol. 1). Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996: 197-204. [刘时银, 丁永建, 叶佰生, 等. 度日因子用于乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡计算的研究[C]// 第五届全国冰川冻土学大会论文集(上册). 兰州: 甘肃文化出版社, 1996: 197-204.]
- [27] Yang Daqing, Shi Yafeng, Kang Ersi, *et al.* Research on analysis and correction of systematic errors in precipitation measurement in ürümqi River basin, Tianshan [C]// Proc. Int. Workshop on Precipitation Measurement, St. Moritz, Switzerland, WMO/IAHS/ ETH, 1989: 173-179.
- [28] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models. Part1. A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, **10**(3): 282-290.
- [29] Braithwaite R J. Can the mass balance of a glacier be estimated from its equilibrium line altitude [J]. Journal of Glaciology, 1984, **30**(106): 363-368.
- [30] Xie Zichu, Ding Liangfu, Liu Chaohai, *et al.* Mass Balance at the Steady State Equilibrium Line Altitude and its Application [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, **18**(1): 1-9. [谢自楚, 丁良福, 刘潮海, 等. 冰川零平衡线处的物质平衡及其应用[J]. 冰川冻土, 1996, **18**(1): 1-9.]
- [31] Wang Jian, Ding Yongjian, Liu Shiyin, *et al.* Characteristics of climatic and hydrological variation in southern Tuomuer, Tianshan, Xinjiang during the Past 40 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, **20**(2): 118-124. [王建, 丁永建, 刘时银, 等. 近40年来托木尔峰南部地区气候及水文环境变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2006, **20**(2): 118-124.]
- [32] Han Tianding, Liu Shiyin, Ding Yongjian, *et al.* A characteristics mass balance of Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürümqi River, Tianshan Mountains [J]. Advance in Earth Science, 2005, **20**(3): 298-306. [韩添丁, 刘时银, 丁永建, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡特征[J]. 地球科学进展, 2005, **20**(3): 298-306.]
- [33] Pu Jianchen, Yao Tandong, Duan Keqin, *et al.* Mass balance of the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains: a new observation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, **27**(2): 199-206. [蒲健辰, 姚檀栋, 段克勤, 等. 祁连山七一冰川物质平衡的最新观测结果[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(2): 199-206.]
- [34] Xie Zichu, Su Zhen, Shen Yongping, *et al.* Mass balance and water exchange of Hailuogou Glacier in Mount Gongga and their influence on glacier melt runoff [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23**(1): 7-9. [谢自楚, 苏珍, 沈永平, 等. 贡嘎山海螺沟冰川物质平衡、水交换特征及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2001, **23**(1): 7-9.]
- [35] Østrem G. Ice melting under a thin layer of moraine, and the existence of ice cores in moraine ridges [J]. Geografiska Annaler, 1959, **41**(4): 228-230.

Preliminary Study of Mass Balance on the Keqicar Baxi Glacier on the South Slopes of Tianshan Mountains

ZHANG Yong¹, LIU Shi-yin^{1, 2}, DING Yong-jian¹, LI Jing¹, SHANGGUAN Donghui¹

(1. Key Laboratory of Cryosphere and Environment, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. Institute for Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029, China)

Abstract: Since the late 1980s, there is a strong signal of climate shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. The mean air temperature of West China from 1987 to 2000 had increased by 0.7 °C as compared with the that from 1961 to 1986. With the rapid rising of air temperature, the annual mean precipitation during the period from 1987 to 2000 increased by 11% in northern Xinjiang and 32% in southern Xinjiang relative to that from 1960 to 1986 within the Tarim basin. In this paper, mass balance of the Keqicar Baxi Glacier in the Tarim River basin, Northwest China, is simulated under the condition of climate change, using a degree-day glacier mass-balance model. The glacier has detailed mass-balance measurement over the period 2003—2005. The

modeling results are in good agreement with the measured variations in the mass balance changing with elevation during 2003—2005. The mean mass balance was -494 and -384 mm in the mass balance year of 2003—2004 and 2004—2005, respectively; compared to that in the 1970s, the equilibrium line altitude shifted up about 300 m. It can be seen that, though precipitation increases significantly, there is in the state of strong mass loss on the Keqicar Baxi Glacier due to the air temperature rising significantly. This study aims at providing a method for modelling the mass balance in the glacierised areas of the Tarim River basin, especially, in the non-monitored glacierised areas of Northwest China, as well as to assess the change in the cryosphere due to climate change.

Key words: Keqicar Baxi Glacier; degree-day mass-balance model; mass balance; wet and warm