

文章编号:1000-0240(2005)03-0337-07

天山南坡科其卡尔巴契冰川度日因子 变化特征研究

张 勇¹, 刘时银^{1,2}, 上官冬辉¹, 谢昌卫¹, 韩海东¹, 王 建¹

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冰芯与寒区环境重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100085)

摘 要: 度日模型是估算冰川消融的一种简单而有效的方法. 根据科其卡尔巴契冰川 2003 年的观测资料, 分析了该冰川度日因子的空间变化规律及其影响因素. 研究表明: 各高度上的度日因子, 介于 $2.0 \sim 9.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间变化, 平均值为 $5.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 与青藏高原各冰川及其它地区冰川相比较小; 随着海拔的增高, 度日因子随之递增; 随平均气温的升高而随之递减. 由于冰面状况复杂, 度日因子变化幅度较大, 裸冰区的度日因子明显大于表碛覆盖区. 人为测量误差、反照率、地形等对度日因子的影响也不容忽视.

关键词: 科其卡尔巴契冰川; 冰川消融; 度日因子; 正积温

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

1 前言

冰川物质平衡是联结冰川波动和气候变化的关键因子, 因此, 冰川物质平衡的估算和恢复备受各国冰川学家关注^[1~5]. 冰川消融和积累是冰川物质平衡的重要组成部分, 是冰川全球水循环的关键过程. 冰川消融特征更能反映气候变化的特点, 对于冰川消融来说, 冰面能量的收支状况决定了冰面消融状况, 而气温是衡量能量状况的理想指标, 在一定的时段内, 正积温对冰面消融的影响不容忽视^[6~8]. 度日模型正是基于冰面消融和正积温之间的线性关系建立的^[1,3,6~13], 度日因子是该模型的关键参数, 它把冰川消融与正积温紧密的联系在一起, 是冰川表面及其近冰面层能量转化过程的简化描述.

Finsterwalder 和 Schunk (1887) 首次在阿尔卑斯山冰川变化研究中引入了度日的概念. Braithwaite *et al.*^[6~8] 将度日应用于格陵兰冰盖消融过程的分析, 表明冰川冰的度日因子要大于雪的度日因

子, 冰川冰和雪的度日因子之间的差别取决于其所处的气候条件. Johannesson *et al.*^[9] 运用度日因子模型对冰岛、挪威和格陵兰 3 个地区的不同冰川进行消融速率的估算; 刘时银等^[3,4] 将度日因子模型应用于抗物热冰川和乌鲁木齐河源 1 号冰川的物质平衡研究中, 并对乌鲁木齐河源 1 号冰川平衡线高度对气候变化的敏感性进行了估算. Braithwaite *et al.*^[11] 运用修正的度日模型评估了瑞士 5 条冰川物质平衡对于气候变化的敏感性^[11]; Singh *et al.*^[11] 讨论了喜马拉雅山 Dokriani 冰川上雪和冰川冰度日因子的年际变化; Kayastha *et al.*^[12] 分析尼泊尔喜马拉雅山、青藏高原等典型冰川消融度日因子的空间变化特征. 此外, Shin *et al.*^[13] 应用度日因子研究了表碛厚度变化对于夏季冰川消融的影响.

目前, 西天山南坡的阿克苏河是向塔里木河输水量最大的一条源流河, 该河也是一条冰川覆盖率较高的河流, 冰川融水对河川径流的补给作用非常显著. 近 50 a 来, 发源于西天山南坡的阿克苏河、台兰河、木扎提河等河流的径流量均表现出增加的

收稿日期: 2004-10-05; 修订日期: 2004-12-25

基金项目: 国家自然科学基金重大科学计划项目(90202013); 国家自然科学基金项目(40371026); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX3-SW-339-03)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, 现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所读硕士研究生, 主要从事现代冰川与全球气候变化研究. E-mail: zhangy @lzb. ac. cn

趋势^[14], 而研究表明, 20 世纪 80 年代中后期本地区气候也表现出向暖湿方向转变的趋势^[15], 这是否意味着本地区的冰川处于加速消融和退缩之中. 因此, 选择典型冰川进行定位观测, 发展相关冰川变化模型, 分析冰川近数十年来的变化规律及其对河川径流的影响成为本研究的直接目标.

本文所研究的科其卡尔巴契冰川(图 1)观测十分有限, 1977—1978 年中国科学院登山考察队曾对该冰川进行过考察, 但没有开展现代冰川过程的观测. 2003 年开始对该冰川进行定位观测, 获得了夏季有关冰川、气象、水文等方面的观测资料. 由于度日模型有一定的物理基础, 对于观测资料相对匮乏的冰川区有较好的应用前景^[3]. 本文从科其卡尔巴契冰川短期观测资料入手, 分析该冰川度日因子的空间变化规律及其影响因素, 为进一步开展该冰川物质平衡计算、冰川变化对气候变化响应及其未来趋势的研究奠定基础.

2 研究区概况

科其卡尔巴契冰川(冰川编目: 5 Y674A5; $41^{\circ}48.77'N$, $80^{\circ}10.20'E$), 位于天山托木尔峰山汇南坡, 新疆阿克苏地区温宿县境内(图 1). 冰川呈 S 状流出山谷, 上限为科其喀尔峰, 海拔 6 342 m, 末端海拔 3 020 m, 全长 26.0 km, 平均宽度 3.3 km,

总面积 83.56 km², 消融区面积为 30.6 km², 冰储量 15.79 km³^[16]. 冰川在海拔 3 900 m 以下区域分布有大量厚层表碛, 表碛厚度介于 0~250 cm 之间, 从而把冰川区分为表碛覆盖冰川区和裸露冰川区(图 1).

与科其卡尔巴契冰川临近的琼台兰冰川曾于 1977—1978 年进行过冰川、气象、水文观测和研究. 根据该项研究成果, 本区处于副热带急流控制范围之内, 影响本区的气流有: 西风急流、西北和北方气流、蒙古-西伯利亚高压、西南气流以及塔里木盆地的局地环流^[17]. 2003 年 7 月 1 日至 9 月 12 日的考察期间, 冰川末端日平均气温均在 0 以上, 日内气温变化幅度很小; 同一时期冰川末端降水总量为 196.2 mm, 日最大降水量为 29.3 mm, 微降水(观测降水量不足 0.1 mm)经常发生; 冰川消融区局地环流发育^[18].

3 数据来源

2003 年考察期间, 分别在科其卡尔巴契冰川海拔 4 250 m 及末端海拔 3 100 m 处各架设了一套自动气象站(Automatic Weather Station, AWS), 在离冰面 0.5 m、1.0 m 和 2.0 m 高度上安装有温度传感器, 并进行气温观测的自动记录. 从 2003 年 7 月 1 日至今, 以 1 h 为间隔进行气温观测, 本文

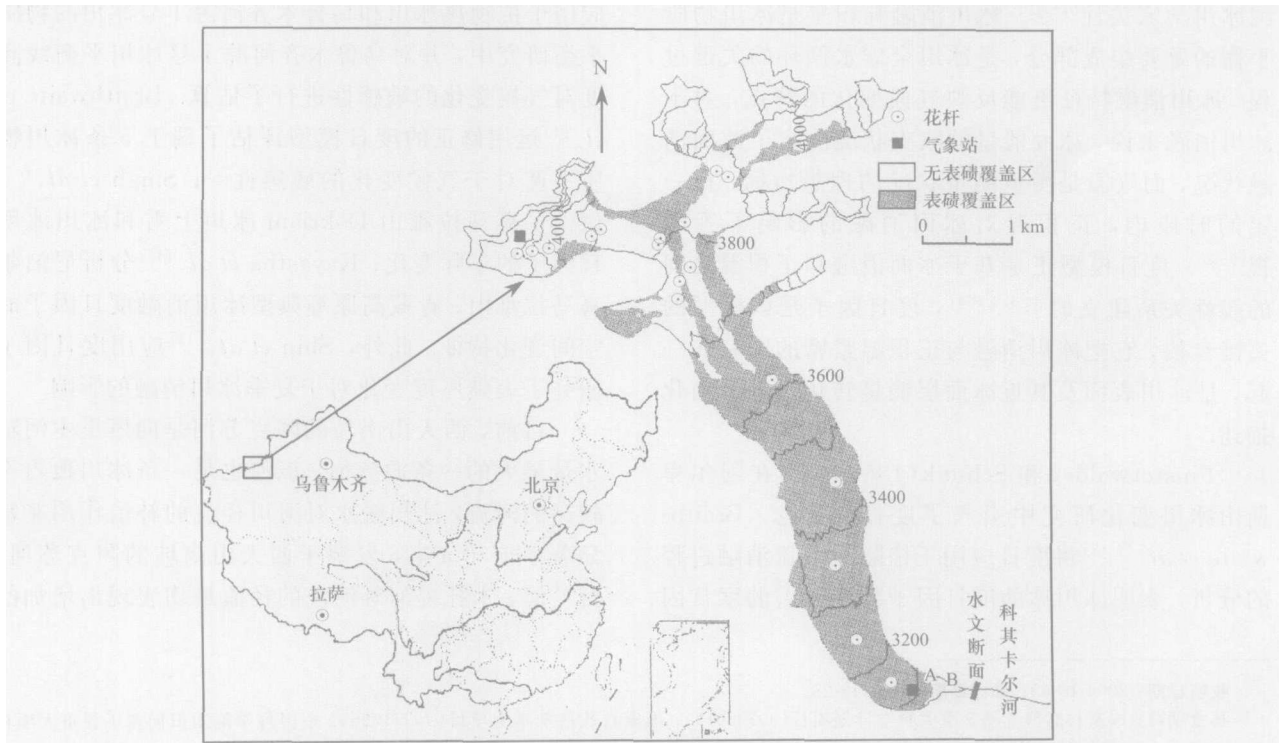


图 1 科其卡尔巴契冰川区位置及花杆分布图

Fig. 1 The location of the Koxkar Baqi Glacier and the allocation of stakes for ablation measurement

采用的气温值是距冰面 2.0 m 高处的气温值。冰川上其它海拔处的温度, 是根据冰川上的气温递减率 ($0.61 \cdot (100\text{m})^{-1}$) 推算获取得。正积温是按照刘时银等^[3]以及 Braithwaite *et al.*^[6]所采用的方法, 即可把气温近似的看作正态分布进行计算的。

从海拔 3 100 m 到海拔 4 300 m 的冰川消融区, 利用蒸汽钻打孔插花杆, 布设了冰面消融观测网, 共 18 根花杆(图 1)。从 2003 年 7 月 1 日至今, 每隔 20~25 d 对花杆进行观测, 取得了冰面纯消融的资料。根据各花杆观测点的消融厚度计算出冰川上各花杆观测点的消融水当量, 冰的密度取 $0.91 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

需要说明的是, 在开展冰面花杆观测时不是严格按自然月进行的; 在观测期间, 表碛覆盖区各观测花杆观测点处没有积雪覆盖, 并且裸露冰川区也几乎没有积雪覆盖。

4 度日因子及其影响因素

4.1 度日因子

度日因子一般根据其定义来进行计算的, 即度日因子是一定时期内的冰川消融量与同一时期内正积温的比值^[6~13, 19~21], 公式如下:

$$A = k \cdot PDD \quad (1)$$

式中: A 为一定时期内的冰川消融量; k 为度日因子; PDD 为一定时期内的正积温。

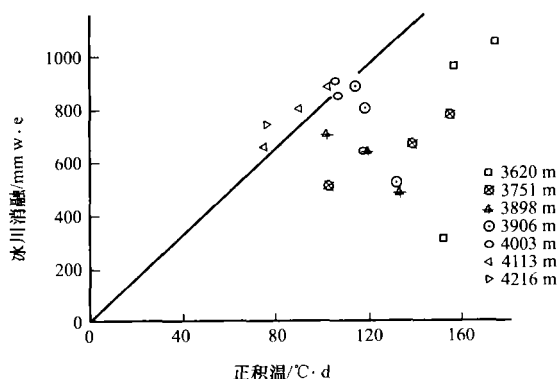


图 2 科其卡尔巴契冰川消融与正积温的关系(图中直线代表度日因子的值为 $8.0 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)^[20]

Fig. 2 Ablation amount changing with positive cumulative temperature for different altitudes on the Koxkar Baqi Glacier. The straight line denotes a positive degree-day factor of $8.0 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[20]

由式(1)求得科其卡尔巴契冰川各高度带上的度日因子, 量值介于 $2.0 \sim 9.7 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间, 平均值为 $5.7 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。众多研究发

现^[6~13, 19~21], 冰川消融与正积温之间具有较好的线性关系, Braithwaite *et al.* 曾发现冰川年消融量与正积温的相关系数达到了 0.96^[8]。从图 2 可以看出, 科其卡尔巴契冰川的裸冰区, 冰川消融和正积温之间表现出较好的线性关系; 但在表碛覆盖区, 其线性关系不是特别理想, 这可能是冰川表面表碛的影响所导致。总体看来, 科契喀尔冰川消融与正积温的关系还是理想的。

4.2 度日因子空间变化分析

科其卡尔巴契冰川度日因子随海拔升高而递增(图 3), 这与唐古拉山区的小冬克玛底冰川、祁连山“七一”冰川以及喜马拉雅山区的 Yala 冰川和 AX010 冰川的度日因子变化趋势一致^[12]; 但与天山中段的乌鲁木齐河源 1 号冰川及瑞士 Unteraargletscher 和 Lauteraargletscher 冰川变化趋势不同^[4, 13]。这一趋势表明: 在海拔较高的冰川区, 太阳辐射较强烈^[18], 而冰川消融的主要能量来源是太阳辐射, 从而导致冰川消融增大。海拔较高的冰川区日平均气温较低^[18], 从而导致正积温的量值较小, 因此, 这一区域的度日因子值较大。

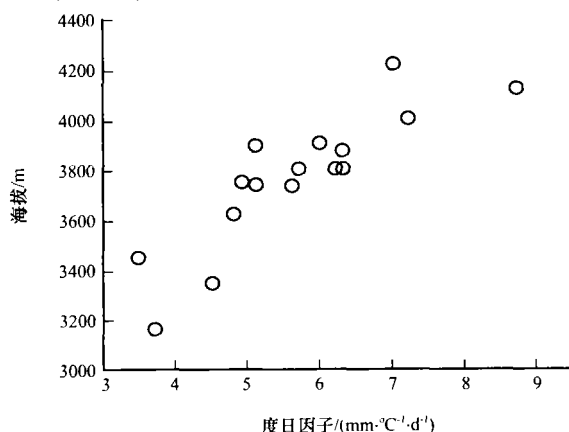


图 3 科其卡尔巴契冰川度日因子随海拔的变化

Fig. 3 The degree-day factors changing with altitudes on the Koxkar Baqi Glacier

科其卡尔巴契冰川度日因子与青藏高原及喜马拉雅山区冰川的度日因子相比偏小(表 1), 且变化幅度较大。从表 1 可以看出, 度日因子具明显的区域差异, 这主要归因于不同冰川在空间上的气候特征差异, 尤其是不同冰川的能量收支差异。

4.3 影响因素分析

度日因子反映了冰川消融对正积温变化的依赖程度, 由于冰川海拔、气温、冰面状况、反照率、人为测量误差以及遮挡、坡度等地形因素的影响^[25], 其存在着差异。另外, 不同冰川朝向上的度日因子

表 1 不同冰川的平均度日因子(k)对比Table 1 Average degree-day factors (k) on different glaciers

冰川名称	k (冰川冰)/ ($\text{mm} \cdot ^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	纬度 /N	观测 时间	资料 来源
乌鲁木齐 1 号冰川	8.5	43 05	—	文献[3]
科其卡尔巴契冰川	5.7	41 48	2003	本研究
“七一”冰川	7.2	39 15	2002	文献[12]
Rakhiot 冰川	6.6	35 22	1986	文献[21]
小冬克玛底冰川	13.8	33 00	1993	文献[12]
Dokriani 冰川	7.4	31 45	1995	文献[22]
抗物热冰川	15.8	28 27	1993	文献[10]
Yala 冰川	9.3	28 14	1996	文献[23]
孔布冰川	16.9	28 00	1999	文献[20]
AX010 冰川	8.1	27 45	1978	文献[24]

也有所不同;也就是说,度日因子反映了冰川海拔、冰面条件以及反照率等影响因素下各观测点的能量收支状况。

气温是衡量冰川表面能量状况的理想指标,而冰面能量平衡状况决定了冰面消融状况。研究度日因子随气温的变化,有助于评价不同气候条件下及不同气候模式下度日因子的精度。科其卡尔巴契冰川的度日因子随气温升高呈递减的趋势(图 4(a)),也就是说仅在低温条件下才可能出现较大的度日因子,而在高温条件下很少出现^[8]。在青藏高原的小冬克玛底冰川、祁连山的“七一”冰川以及喜马拉雅山区的 Yala 冰川和 AX010 冰川也出现了类似的规律^[12]。

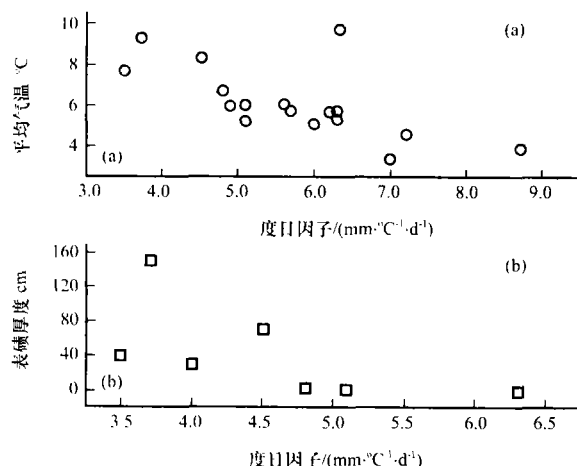


图 4 科其卡尔巴契冰川度日因子与平均气温(a)、表碛厚度(b)的关系

Fig. 4 The degree-day factors versus mean temperature (a) and debris depth(b) on the Koxkar Baqi Glacier

科其卡尔巴契冰川冰面最为突出的特征是消融区覆盖着厚度不一的灰色表碛(图 1),末端表碛平均厚度约为 1.5 m,局部超过 2 m^[26],且有巨大的石块堆积。相关研究表明^[13, 17, 21],表碛覆盖区与裸冰或雪相比,具有独特的热力过程和反照率较低等物理属性,导致太阳辐射热和乱流交换供热不能直接到达冰面,只能先加热增温表碛层表面,然后热量再由表碛层向冰面传导;另外,表碛层表面一部分热量还要向上传递给空气。这样,就减少了到达冰川表面的热量,从而影响冰川的消融。在天山西琼台兰冰川的研究表明^[17],和裸露冰面相比,10 cm 厚表碛要减少冰面消融量 10 %左右,20 cm 一般要减少 56 %左右;10 cm 以下的表碛会促进冰川消融,而表碛厚度超过 10 cm 则会抑制冰川消融^[17]。在孔布(Khumbu)冰川,表碛覆盖厚度在 0~5 cm 之间时会加速冰川的消融,而当表碛超过 5 cm 就会抑制冰川消融^[21]。科其卡尔巴契冰川如此厚的表碛覆盖,对冰川消融的影响是巨大的。随着表碛厚度的减薄,用于冰川消融的热量增加,从而加速了冰川的消融,度日因子也随之增大(图 4(b))。因此,裸露冰川区的度日因子的值($7.2 \text{ mm} \cdot ^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)明显大于表碛覆盖区的($5.3 \text{ mm} \cdot ^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$),二者的比值是 0.74,这一比值有效地反映了冰川表碛对冰川消融的影响(表 2)。从表 2 可以看出,由于表碛颗粒大小、颜色等物理属性的差异,表碛对冰川消融的影响在不同的冰川上表现不同。

此外,反照率的变化、人为测量误差以及遮挡、坡度等地形因素对度日因子的影响也是不容忽视的,但是由于缺乏相关的野外观测数据,这里不能作进一步的探讨。

5 讨论与结论

20 世纪 80 年代中后期,中国西北地区气候向暖湿转变^[15, 27, 28],在这样的气候背景下,科其卡尔巴契冰川消融、物质平衡及其对气候变化敏感性的响应过程鲜有研究涉及。由于大部分冰川区观测资料缺乏,运用能量平衡模式来研究冰川的物质平衡比较困难。而度日因子模型所需数据要素较少,气温是其需要的主要数据,相比之下,气温资料比较容易获取;尤为重要是在研究冰川消融、冰川物质平衡及其对气候变化的响应中,度日因子模型可以给出类似于依赖能量平衡的物质平衡模式所给出结果^[3, 25],因此分析科其卡尔巴契冰川度日因子的

表 2 不同冰川的表碛区度日因子 k_d 与裸露冰川区度日因子 k_c 比率比较

Table 2 Positive degree-day factors in debris covered zone, k_d , and in debris free zone, k_c , for some glaciers

冰川	表碛厚度/ m	$k_d/(\text{mm} \cdot ^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	$k_c/(\text{mm} \cdot ^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	k_d/ k_c	资料来源
科其卡尔巴契冰川	0.08	3.50	8.70	0.40	本研究
Lirung 冰川	0.10	5.50	6.60	0.83	文献[29]
孔布冰川	0.10	11.10	16.90	0.66	文献[21]
Rakhiot 冰川	0.10	3.50	6.60	0.53	文献[30]

空间变化规律及其影响因素,可为估算冰川物质平衡、冰川变化对气候变化敏感性响应及其冰川融水径流对塔里木河水资源影响奠定基础.此外,在科其卡尔巴契冰川考察期间,由于条件所限,在布设了冰面消融观测网时,同一高度布设的花杆较少,这可能对某一高度消融的计算带来不确定性,并且反照率的变化、人为测量误差以及遮挡、坡度等地形因素对度日因子的影响也是由于缺乏相应的观测,无法对此详尽的讨论.因此,文章中的部分问题还有待于进一步的讨论与研究.

综上所述,科其卡尔巴契冰川各海拔高度带上的度日因子介于 $2.0 \sim 9.7 \text{ mm} \cdot ^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间,平均值为 $5.7 \text{ mm} \cdot ^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.由于冰川海拔、气温、冰面状况、反照率、人为测量误差以及遮挡、坡度等地形因素的影响,度日因子的大小存在着差异;与青藏高原及其它地区冰川的度日因子相比偏小.度日因子随海拔高度的增加而递增,随气温的升高而递减;表碛覆盖对冰川消融的影响较大,裸冰区的度日因子大于表碛覆盖区.

致谢:王强和井哲凡等老师在野外数据观测中付出了辛勤劳动;科其卡尔巴契冰川考察队的所有队员给予了大力协助,在此表示衷心感谢.

参考文献(References):

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

[2] Laumann T, Reeh N. Sensitivity to climate change of the mass balance of glaciers in southern Norway [J]. J. Glaciology, 1993, **39**(133): 635 - 665.

[3] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Wang Ninglian, *et al.* Mass balance sensitivity to climate change of the Glacier No. 1 at the Ū ūmqi 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.]

[4] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Ye Baisheng, *et al.* Study on the

mass balance of the Glacier No. 1 at the headwaters of the Ū ūmqi River using degree-day method [A]. Proceedings of the Fifth Chinese Conference on Glaciology and Geocryology (Volume 1) [C]. 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[A]. 第五届全国冰川冻土学大会论文集(上册) [C]. 兰州:甘肃文化出版社, 1996. 197 - 204.]

[5] Liu Shiyin, Xie Zichu, Liu Chaohai. Mass balance and fluctuations of glaciers [A]. Shi Yafeng. Glaciers and Their Environments in China—the Present, Past and Future [C]. Beijing: Science Press, 2000. 101 - 123. [刘时银, 谢自楚, 刘潮海. 冰川物质平衡与冰川波动[A]. 施雅风. 中国冰川与环境——现在,过去和未来[C]. 北京:科学出版社, 2000. 101 - 123.]

[6] Braithwaite R J, Olesen O B. Ice ablation in West Greenland in relation to air temperature and global radiation [J]. Z. Gletscherkd. Glaziogeol., 1985, **20**: 155 - 168.

[7] Braithwaite R J, Olesen O B. Calculation of glacier ablation from air temperature, West Greenland [A]. Oerleamns, J. Glacier Fluctuations and Climatic Change [M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 1989. 219 - 233.

[8] Braithwaite R J. Positive degree-day factor for ablation on the Greenland ice sheet studied by energy-balance modeling [J]. J. Glaciology, 1995, **41**(137): 153 - 160.

[9] Johannesson T, Sigurdsson O, Laumann T, *et al.* Degree-day glacier mass-balance modeling with applications to glaciers in Iceland, Norway and Greenland [J]. J. Glaciology, 1995, **41**(151): 559 - 567.

[10] Liu Shiyin, Xie Zichu, Song Guoping, *et al.* Mass balance of Kangwure (flat-top) Glacier on the north side of Mt. Xixi-bangma, China [J]. Bulletin of Glacier Research, 1996, **14**: 37 - 43.

[11] Singh P, Kumar N, Arora M. Degree-day factors for snow and ice for Dokriani Glacier, Garhwal Himalayas [J]. Journal of Hydrology, 2000, **235**: 1 - 11.

[12] Kayastha R B, Ageta Y, Nakawo M, *et al.* Positive degree-day factors for ice ablation on four glaciers in the Nepalese Himalayas and Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Bulletin of Glaciological Research, 2003, **20**: 7 - 14.

[13] Shin Sugiyama. Influence of surface debris on Summer ablation in Unteraar- and Lauteraargletscher Switzerland [J]. Bulletin of Glacier Research, 2003, **20**: 41 - 47.

[14] Zhang Guowei, Wu Sufen, Wang Zhijie. The signal of climatic shift in Northwest China deduced from river runoff change

- in Xinjiang Region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, **25**(2): 183 - 187. [张国威, 吴素芬, 王志杰. 西北气候环境转型信号在新疆河川径流变化中的反映[J]. 冰川冻土, 2003, **25**(2): 183 - 187.]
- [15] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm dry to warm humid in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(3): 219 - 226. [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(3): 219 - 226.]
- [16] Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Glacier Inventory of China () [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.]
- [17] Mountaineering and Expedition Term of Chinese Academy of Science. Glacial and Weather in Mt. Tuomuer District, Tianshan [M]. Ür ümqi: Xinjiang People's Publishing House, 1985. 32 - 88. [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 - 88.]
- [18] Zhang Yong, Liu Shiyin, Han Haidong, *et al.* Characteristics of summer climate on Keqicar Glacier, South of Tianshan Mountains [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] Ageta Y, Kadota T. Predictions of changes of glacier mass balance in the Nepal Himalaya and Tibetan Plateau: a case study of air temperature increase for three glaciers [J]. Ann. Glaciol., 1992, **16**: 89 - 94.
- [20] Huybrechts P, Letreguilly A, Reeh N. The Greenland ice sheet and greenhouse warming [J]. Palaeogeogr., Palaeoclimatol., 1991, **89**(4): 399 - 412.
- [21] Kayastha R B, Takeuchi Y, Nakawo M, *et al.* Practical prediction of ice melting beneath various thickness of debris cover on Khumbu Glacier, Nepal, using a positive degree-day factor [J]. IAHS Publication, 2000, **264**: 71 - 81.
- [22] Singh P, Kumar N. Determination of snowmelt factor in the Himalayan region [J]. Hydrol. Sci. J., 1996, **41**(3): 301 - 310.
- [23] Kayastha R B. Study of glacier ablation in the Nepalese Himalayas by the energy balance model and positive degree - day method [D]. Nagoya: Graduate School of Science, Nagoya University, 2001. 95.
- [24] Kayastha R B, Ageta Y, Nakawo M. Positive degree-day factors for ablation on glaciers in the Nepalese Himalayas: case study on glacier AX010 in Shoron Himal, Nepal [J]. Bulletin of Glacier Research, 2000, **17**: 1 - 10.
- [25] Hock R. Temperature index melt modeling in mountain areas [J]. Journal of Hydrology, 2003, **282**: 104 - 115.
- [26] Han Haidong, Ding Yongjian, Liu Shiyin. Estimation and analysis of heat balance parameters in the ablation season of debris-covered Kergikaer Glacier, Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, **27**(1): 88 - 94. [韩海东, 丁永建, 刘时银. 科其卡尔巴契冰川夏季表碛区热量平衡参数的估算分析[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(1): 88 - 94.]
- [27] Shen Yongping, Liu Shiyin, Ding Yongjian, *et al.* Glacier mass balance change in Tailanhe River watershed on the south slope of the Tianshan Mountains and its impact on water resources [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, **25**(2): 124 - 129. [沈永平, 刘时银, 丁永建, 等. 天山南坡台兰河流域冰川物质平衡变化及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2003, **25**(2): 124 - 129.]
- [28] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, *et al.* An Assessment of the Issues of Climatic Shift from Warm - dry to Warm - wet in Northwest China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003. 4 - 97. [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. 4 - 97.]
- [29] Rana B, Nakawo M, Ageta Y, *et al.* Glacier ablation under debris cover: field observations on Lirung Glacier, Nepal Himalayas [A]. Ecohydrology of High Mountain Areas (Proceedings of the International Conference on Ecohydrology of High Mountain Areas, Kathmandu, 1996) [C]. Kathmandu: International Central for Integrated Mountain Development, 1998. 393 - 403.
- [30] Mattson L E, Gardner J S. Energy exchange and ablation rates on the debris-covered Rakhiot Glacier, Pakistan [J]. Z. Gletscherk. Glaziogeology, 1989, **25**(1): 17 - 32.

Study of the Positive Degree-day Factors on the Koxkar Baqi Glacier on the South Slope of Tianshan Mountains

ZHANG Yong¹, LIU Shi-yin^{1,2}, SHANGGUAN Dong-hui¹,
HAN Hai-dong¹, XIE Chang-wei¹, WANG Jian¹

(1. Key Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, CAREERI, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China;

2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The degree-day method is one of the simplest but sufficiently accurate schemes to estimate ablation on a glacier. It bases on linear correlation between ablation and sum of daily mean temperatures above melting point, which is called the positive degree-day sum (PDD) during a period. The factor linking the ablation to PDD is called the positive degree-day factor. Based on ablation and PDD, the degree-day factors are calculated. The degree-day factors range from 2.0 to 9.7 mm \cdot $^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, and its average value is 5.7 mm \cdot $^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. There are some factors influencing the degree-day factors on the Koxkar Baqi Glacier, including altitude, surface condition of the glacier, albedo and terrain. The study shows that: 1) The degree-day factor depends on altitude on the Koxkar Baqi Glacier; in general, the degree-day factor increases as altitude increases, then, the factor at higher altitude is larger than that at lower altitude, which is mainly due to the ablation caused by absorbed global radiation at the high altitude, where the PDD is low due to low summer air temperature. 2) The degree-day factor of the Koxkar Baqi Glacier decreases as the mean temperature in-

creases, as what observed in Dongkemadi Glacier, July 1st Glacier, Yala glacier and AX010 Glacier 3) The surface condition of a glacier, including coverage of debris and snow, surface slope, and so on, is an important factor to the degree-day factor on the Koxkar Baqi Glacier. In the ablation area of the Koxkar Baqi Glacier, the zone below 3 900 m a. s. l. is covered with debris, and the zone above 3 900 m a. s. l. is debris-free; the depth of the debris varies from 0 to 250 cm in general. Debris has a strong influence on the surface energy balance and melting of the underlying ice. The surface debris layer works as a good insulator on the Koxkar Baqi Glacier. The factor in the debris-free area is larger than that in the debris-covered area, because of the main physical characteristics of the debris, such as the thermal resistance and albedo, which control the heat conduction to the ice-debris interface. It would be useful to understand the dependence of ablation on degree-day factor in the Koxkar Baqi Glacier, so that one can estimate the contribution of the Koxkar Baqi Glacier melting, using the degree-day method while calculating total discharge from the glacier basin.

Key words: Koxkar Baqi Glacier; glacier ablation; degree-day factor; PDD