

文章编号: 1008-2786-(2009)4-394-08

天山南坡科其喀尔巴西冰川消融估算

卿文武^{1,2}, 陈仁升^{1,2,3}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所黑河上游生态-水文试验研究站, 甘肃 兰州 730000

2. 中国科学院黑河生态水文与流域集成管理研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000

3. 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 能量平衡模型是目前估算冰川表面消融最准确的方法之一。利用科其喀尔巴西冰川野外气象和消融观测数据, 结合 1:5万地形图, 对不同坡向和坡度格点上总辐射和净辐射进行了地形校正模拟, 并采用空气动力学法对冰面感热和潜热进行了计算, 最后对冰川表面消融进行了模拟。结果表明, 模拟小时总辐射和实测值存在较好的一致性, 二者相关系数为 0.85, 而净辐射模拟效果较差。消融模拟值大体反映了实际的消融值, 平均误差为 2.9 mm w. e./day, 均方根误差为 4.2 mm w. e./day, 且模拟值一般略大于观测值, 距离自动气象站较近的花杆模拟相对误差较小, 随着花杆距离冰面自动气象站距离的增大, 模拟相对误差呈增加的趋势。

关键词: 科其喀尔巴西冰川; 能量平衡模型; 地形校正; 消融估算

中图分类号: P931.4

文献标识码: A

近 100 多年来, 全球波动性变暖, 近几十年尤为强烈。在此趋势下, 我国西部 82.2% 的冰川都处于退缩状态, 祁连山、天山、青藏高原、东帕米尔高原、喀喇昆仑山等主要山系的冰川都存在不同程度的萎缩现象, 不同山区冰川的面积缩小比例在 2% ~ 18% 左右^[1]。伴随着冰川消融的加剧, 大部分冰川作用流域河川径流量都呈现出明显增加趋势, 如在新疆 26 条主要河流中有 18 条河流平均年径流明显增加, 其中最大增加幅度达 40%^[2], 然而一旦冰川退缩和面积突破某一临界值, 必定会导致冰川径流补给突然减少, 进而对我国西北干旱区水资源变化带来显著影响^[3]。因此, 探讨全球变暖背景下冰川水资源的可能变化已经成为当今水科学的热点领域之一, 其核心问题之一就是冰川表面消融估算模拟。

目前国际上关于冰川消融发展较为成熟的模型主要分为统计类模型和能量平衡模型两类。统计类

模型如度日因子模型虽然能给出类似能量平衡模型的理想结果, 但由于受时间分辨率和地形条件等限制, 尚不能准确模拟冰雪消融速率的空间特征^[4], 导致其外延预报结果缺乏可信度, 不易空间推广。能量平衡模型从冰川消融物理机制方面探究了冰川消融和气候变化之间的关系, 特别是近 10 多年来分布式冰川能量平衡模型的发展, 为不同高度、坡度和坡向冰川消融的实际过程提供了很好解释, 目前在国内外被广泛应用到冰川消融理论研究中。Munnio 首次在冰川消融中考虑了地形对太阳辐射的影响^[5]。Amold 等结合 1:2.5 万地形图 (DEM 20 m × 20 m), 系统介绍了地形遮蔽效应、反射率的时空特征对山地冰川消融的影响^[6]。随后 Brock 等在 Amold 等研究基础上, 对云量、空气动力学粗糙度时空特征作了进一步介绍, 为净辐射、感热和潜热的计算提供了更详细的方法^[7,8]。我国冰川能量平衡研究始于 20

收稿日期 (Received date): 2008-11-29; 改回日期 (Accepted): 2009-03-15.

基金项目 (Foundation item): 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 KZCX2-YW-301-3; 国家自然科学基金项目 (40771045, 90702001-2); 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB411506) 资助。[Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences No. KZCX2-YW-301-3; National Natural Science Foundation of China No. 40771045; No. 90702001-2; National Basic Research Program of China No. 2007CB411506.]

作者简介 (Biography): 卿文武 (1982-), 男 (汉族), 湖南新化人, 2008 年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获硕士学位, 主要从事冰川水文过程研究。[Qing Wenwu (1982-), male, born in Xinhua, Hunan, doctor candidate, works mainly on Glacial Hydrology Process]

E-mail: qingwu@ib.ac.cn

世纪 60 年代, 目前已对我国不同类型 (大陆性、极大陆性和海洋性) 冰川能量平衡总体特征有了初步认识^[9-14], 然而对于分布式能量平衡模型的应用在中国冰川消融中鲜有学者涉及。本文选择塔里木河流域的科其喀尔巴西冰川作为典型研究冰川, 以 1: 5 万地形图生成的 DEM (空间分辨率为 60 m × 60 m) 为基础, 以小时气象资料为模型输入数据, 对不同海拔、坡度和坡向格点上辐射进行了地形校正, 并对不同海拔冰川消融进行了模拟, 初步探究了分布式冰川能量平衡模型在我国西部冰川消融理论中的应用。

1 资料和方法

科其喀尔巴西冰川位于天山西端的托木尔峰地区 (图 1), 新疆阿克苏地区温宿县境内, 属于典型的土耳其斯坦型 (托木尔型) 山谷冰川。冰川上限 6 342 m, 下限冰舌末端海拔为 3 020 m, 冰川全长 25.1 km, 面积 83.6 km², 冰储量约为 15.8 km³, 其中消融区面积为 30.6 km²。自海拔 3 750 m 以下基本为表碛层覆盖, 表碛厚度 0~2.5 m。冰川区受大西洋和北冰洋潮湿气流的影响, 降水较为丰富, 冰川末端年降水量约为 650 mm, 其中消融期降水量约占全年总降水量的 70% 以上^[13]。

1.1 资料

从 2003-06 开始, 在雪线附近 4 250 m 处和 3 700 m 冰舌表面分别架设了两套自动气象站, 对温度、湿度、辐射、风速、风向等进行较长时间系统观测。此外在大本营 (海拔 3 007 m, 下垫面为草地) 布设了 1 座简易气象场, 对天气状况、降水量、蒸发量及地表温度等进行观测。

在裸冰、表碛等不同下垫面, 沿冰川海拔梯度利用蒸汽钻打孔插花杆布设了一个纵向的消融观测剖面, 利用高精度 GPS 对冰川表面运动和消融状况进行了不定期人工观测, 观测周期一般为 20~25 d。由于冰川运动以及冰川强烈的消融, 以及人工观测



图 1 科其喀尔巴西冰川气象站和冰面花杆分布示意图
Fig. 1 Meteorological stations and ablation stakes on the Keqicabaxi Glacier

的困难性, 部分花杆观测数据缺少连续性。本文选取资料序列较为完整的、2004-08-03~2004-08-29 期间的、3 700~4 250 m 之间的 7 根裸冰面花杆消融数据作为验证数据, 花杆具体信息见表 1。因故障高山气象站 7 月 27 日~8 月 25 日的数据记录缺失, 为此辐射校正数据选取 2004-07-09~2004-09-27 高山气象站和冰面气象站小时数据。流域 DEM、坡度、坡向等均来源于 1: 5 万地形图, 下垫面分类来源于 15 m × 15 m 融合 TM 影像 (2003 年)。

1.2 估算方法

从能量平衡的观点出发, 冰川单点热量平衡方程式可简化为以下形式^[6,7]

$$MLT = SWR + LWR + SHF + IHF \quad (1)$$

式中 MLT 为融化潜热 (W/m^2), SWR 为净短波辐射 (W/m^2), LWR 为净长波辐射 (W/m^2), SHF 为感热 (W/m^2), IHF 为潜热 (W/m^2)。上述各式中以表面热量收入为正, 支出为负。

1.2.1 净短波辐射

对于自动气象站附近单元格的短波辐射值可直

表 1 科其喀尔巴西冰川花杆及自动气象站基本信息
Table 1 Position information of the stakes on the Keqicabaxi Glacier

	花杆 A	花杆 B	花杆 C	花杆 D	花杆 E	花杆 F	花杆 G	高山气象站	冰面气象站
坡度 (°)	14	22	16	4	2	5	3	6	3
坡向 (°)	90	85	95	40	250	109	170	109	171
海拔 (m)	4 216	4 113	4 003	3 906	3 870	3 804	3 738	4 239	3 737

接采用自动气象站观测资料,而对于距离自动气象站较远单元格采用如下方法计算净短波辐射,先通过自动气象站实测总辐射与总辐射理论最大值得出一个云量的经验计算公式^[7],假设同一冰川区域范围内的云量、云状和类型相同,然后根据格点坡度和坡向分别对直接辐射和散射辐射进行校正,最后得出格点的净短波辐射。

天文辐射(K)用如下经验公式计算^[7]

$$K = I_0 \Phi^{(p/\phi)} \cos \theta \quad (2)$$

式中 I_0 为太阳常数 ($1\,368\text{ W/m}^2$), Φ 为晴天大气透明度,一般取值为 0.75 , θ 为太阳天顶角, P 为地表大气压 (Pa), P_0 为标准大气压 ($1.013 \times 10^5\text{ Pa}$)。太阳天顶角以及下面所涉及的太阳高度角和方位角均由天文日历计算所得,由于篇幅所限,不作详细介绍,具体计算过程见文献^[15]。

云量(n)是辐射平衡计算中一个重要参数,且高山区云量具有随机连续可变的特性,目前准确模拟其分布和变化尚有困难。但就小区域来说,可以假设其区域范围内的云量、云状和类型相同。Brock等^[7]简化直接辐射中瑞利散射、气溶胶和水汽吸收、臭氧和其他混合气体的吸收过程,认为冰川区云量数据可由自动气象站实测总辐射 Q' 与总辐射理论最大值 K 相比得出,当 $Q'/K = 1$ 时,云量 n 为 0 ; 当 $Q'/K \leq 0.2$ 时,云量 n 为 1 ; 云量 n 随着 Q'/K 比值的减小而线性增加。散射率(D_F)为散射辐射与总辐射的比值,一般假设其大小随云量 n 的而呈线性关系^[16]。晴天情况下($n = 0$),散射率为 0.15 ; 当云量 n 为 1 时,散射率为 0.8 。其公式如下^[16]

$$D_F = 0.65n + 0.15 \quad (3)$$

得到散射率之后,格点直接辐射和散射辐射采用如下公式进行地形校正^[5-7]

$$Q_{dir} = (1 - D_F) Q_n [\sin Z \cos Z' + \cos Z \sin Z' \cos(A - A')] \quad (4)$$

$$Q_{diff} = D_F Q' \cos^2(Z'/2) + \alpha_M Q' \sin^2(Z'/2) \quad (5)$$

式中 Q_{dir} 为直接辐射, Q_{diff} 为散射辐射, Z 为太阳高度角, Z' 为坡度, A 为太阳方位角, A' 为坡向, α_M 为冰雪面平均反射率, Q'_n 为太阳射线方向上的总辐射, $Q'_n = Q' / \sin z_0$ 。

从式(5)可以看出,只有当坡面(坡度 Z' 很大)较陡时,反射辐射的数值才较大,在地势比较平坦的地方,其贡献率十分微小,科其喀尔巴西冰川大部分地区地势平坦,因而在实际应用中用格点反射率 α 近似代替 α_M 。对于距离自动气象站较近的格点,其

反射率可直接采用自动气象站资料,较远格点的反射率,可以通过下垫面类型近似确定。据韩海东等对本冰川研究,消融期冰面平均反射率为 0.36 , 表碛平均反射率为 0.24 ^[17]。净短波辐射计算公式如下^[5-7]

$$SWR = (1 - \alpha) Q_{dir} + (1 - \alpha) Q_{diff} \quad (6)$$

式中 α 为反射率。

1.2.2 净长波辐射

在假设冰面为黑体的情况下,净长波辐射为入射长波辐射和射出长波辐射之和,其计算公式如下^[6,7]

$$LWR = I\downarrow - I\uparrow \quad (7)$$

式中 $I\downarrow$ 为射向冰面的长波辐射 (W/m^2), $I\uparrow$ 为射出冰面的长波辐射 (W/m^2), 消融期假设冰面温度为 0°C , $I\uparrow$ 为常数 $316(\text{W/m}^2)$ ^[16,7]。 $I\downarrow$ 计算公式如下^[18]

$$I\downarrow = \varepsilon^* \sigma T_a^4 \quad (8)$$

式中 ε^* 为天空有效发射率, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数 ($\text{W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$), T_a 为自动气象站绝对气温 ($^\circ\text{C}$), 其他单元格的气温由递减率 ($0.6^\circ\text{C}/100\text{ m}$) 推算所得。天空有效发射率 ε^* 采用如下公式计算^[18]

$$\varepsilon^* = (1 + kn) \varepsilon_0 \quad (9)$$

式中 k 为常数,一般取值为 0.26 , ε_0 为晴天发射率, $\varepsilon_0 = 8.733 \times 10^{-3} T_a^0.788$ 。

1.2.3 感热 (SHF) 和潜热 (THF)

在不考虑地热通量的情况下,冰川表面感热和潜热计算一般采用空气动力学方法进行迭代计算^[7,19]

$$SHF = \frac{\rho C_p \kappa^2 \mu_z T_z}{[\ln(z/z_0) + \alpha_M z/L] [\ln(z/z_e) + \alpha_H z/L]} \quad (10)$$

$$THF = \frac{\rho \lambda \kappa^2 \mu_z (e_s - e) P}{[\ln(z/z_0) + \alpha_M z/L] [\ln(z/z_e) + \alpha_E z/L]} \quad (11)$$

式中 ρ 为空气密度 (1.26 kg/m^3), C_p 为空气定压比热 ($\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$), κ 为 von Kármán's 常数 (0.4), w 为水与空气的分子比重 (0.622), λ 为水的气化潜热 ($2.5 \times 10^6\text{ J/kg}$), U_z , T_z , e_z 为高度 z 处的风速 (m/s)、气温 ($^\circ\text{C}$)、水汽压 (Pa), e_s 为冰面水汽压 (Pa), 假设冰面水汽压近似等于 0°C 时饱和水汽压 611 Pa , z_0 为空气动力学粗糙度长度 (m), 本冰川 z_0 的具体计算参见文献^[13], z_n , z_e 分别为温度、湿度粗糙度长度 (m), α_M , α_H , α_E 分别为动量通量、热通量和水汽通量稳定度校正系数,一般假设 $\alpha_M = \alpha_H =$

$\alpha_E = 5$ L 为 Monin - Obukhov 长度, 计算公式如下^[7 19]

$$L = \frac{\rho C_p u^*{}^3 T_k}{kg \cdot SHF} \quad (12)$$

式中 u^* 为摩擦速度 (m/s), T_k 为绝对温度 ($^{\circ}\text{C}$), g 为重力加速度 (m/s^2)。摩擦速度 u^* 计算公式如下^[7 19]

$$u^* = \frac{ku_z}{\ln(z/z_0) + \alpha_x z/L} \quad (13)$$

式中 α_x 为校正系数 (一般假设 $\alpha_x = 5$)。

上述式 (10) ~ (13) 可知, Monin - Obukhov 长度 L 、感热 SHF 和摩擦速度 u^* 的求解是一个循环迭代的过程, 这一过程一般可以在假设地面为近中性 ($z/L = 0$) 的初始条件下迭代求解, 直到 L 值稳

定^[7 19]。

2 结果与讨论

2.1 辐射校正

选取冰面气象站观测资料作为输入数据, 对高山气象站的辐射资料进行验证, 图 2 为高山气象站总辐射和净辐射地形校正结果。从图中可以看出, 总辐射模拟和实测值存在较好的一致性, R^2 为 0.85 (图 2a), 而净辐射模拟效果较差, R^2 为 0.68 (图 2b)。从散点分布形态可知, 模型对低值区的模拟要高于高值区。分析其原因可能表现在以下几个方面:

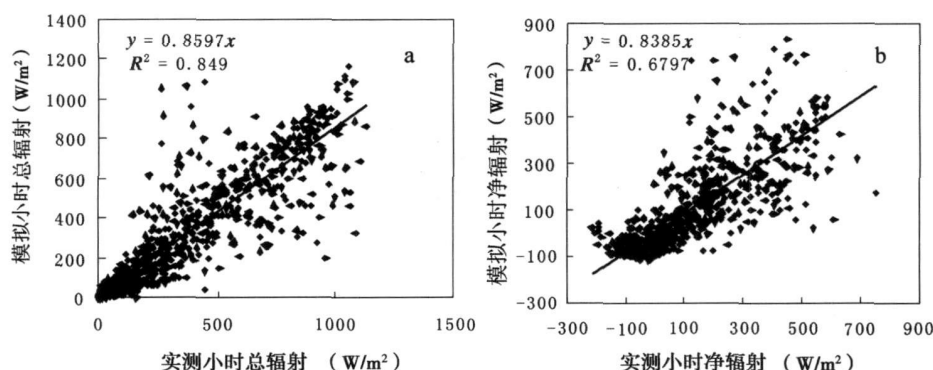


图 2 高山气象站总辐射和净辐射模拟值和实测值对比图

Fig. 2 Calculated and measured hourly solar radiation at A high meteorological station

Fig. 2a is global radiation, while Fig. 2b is net radiation

1. 消融期山区天气变化多端, 而冰面气象站和高山气象站海拔梯度相差 500 m 左右, 用冰面气象站云量计算值不能完全代替高山气象站附近云量值, 中午当冰面气象站云量较少、而高山气象站多云时, 模拟值大于实测值, 反之, 模拟值小于实测值, 而当清晨或傍晚时候, 由于总辐射值较小, 由云量不一致性所引起的差异性相对不明显。

2. 除总辐射计算误差外, 反射率是影响净辐射估算的因素之一, 高山气象站地处山坡上, 易受风吹雪的影响; 而冰面气象站则处在裸冰边缘, 地势平坦, 风吹雪作用较弱。此外, 缺少实际冰面温度数据也是造成净辐射误差较大的原因。

总体而言, 辐射模拟效果还是可以接受的, 模拟值大体上反映了实测值的变化趋势, 对于缺少资料的冰川地区而言, 方法具有一定适用性。

2.2 不同海拔消融模拟

由上述介绍的单点能量平衡公式, 利用冰面自动气象站 2004 - 08 - 03 ~ 2004 - 08 - 29 气温、风速、相对湿度、辐射和消融数据, 对 3 700 ~ 4 250 m 之间裸冰表面消融进行了模拟, 鉴于本冰川山谷风较为发育, 风向基本由冰川走向所决定^[20], 且受目前计算方法和仪器所限, 不考虑风速和相对湿度的空间变化^[21], 近似认为其他海拔处的风速和相对湿度等于冰面自动气象站。模拟期间, 由于湿度较大, 能量支出中融化耗热要远大于蒸发耗热^[13], 加之冰的汽化潜热远大于融化潜热, 因而由升华而导致的冰川物质亏损不予考虑, 如对模拟期间冰面自动气象站进行计算, 发现由蒸发和凝结造成的物质亏损仅为 12 mm, 远小于同期冰川消融量。

表 2 为科其喀尔巴西冰川, 2004 - 08 - 03 ~

2004- 08- 29期间,海拔 3 700~ 4 250 m冰面消融观测与模拟值。由表可知,科其喀尔巴西冰川消融十分强烈,在短短 26 d时间内,冰面纯消融达 549~ 990 mm w. e水层,日均消融在 21~ 38 mm w. e之间,消融速率具有很大的海拔梯度差异。实测总消融量和计算总消融量值存在较好的一致性, R^2 为 0. 81(图 3a), 模拟值大体反映了实际的消融值(平均误差为 2. 9 mm w. e /day, 均方根(RMS)误差为 4. 2 mm w. e /day), 与 Brock等研究相比^[7], 平均误差接近, 均方根误差偏大(表 2), 模拟值一般略大于观测值, 距离自动气象站较近的花杆相对误差较小, 随着花杆距离冰面自动气象站距离的增大, 相对误

差呈增加的趋势(图 3b)。其原因可能是随着距冰面气象站距离的加大, 风速、相对湿度、辐射、云量等资料缺乏代表性。此外, 由于海拔、坡度、坡向和周围山体高度的不同, 冰面气象站和其他花杆消融点的遮蔽效应是不同步的(图 4), 冰面气象站由于海拔相对较低且地势较为平坦, 日照时间相对较长, 而其他海拔处日照时间相对较短, 用冰面气象站辐射资料作为模型输入数据, 易造成清晨或傍晚时候模拟误差减少或增大, 如 Arnold对瑞士的 Haut冰川研究表明: 受遮蔽作用的格点接收到的短波辐射比水平地面格点少 5. 2%^[6]。

表 2 科其喀尔巴西冰川 2004- 08- 03~ 2004- 08- 29花杆消融观测与模拟值比较
Table 2 Comparison of model calculations with measured melt rates on Keqiarbaxi Glacier from August 3 to 29, 2004

花杆			A	B	C	D	E	F	G	误差	
										平均	方根
总消融量	实测		549	648	612	729	702	846	990	—	—
	mm w. e	降雪校正	588	687	648	766	739	881	1 016	—	—
		模拟	695	746	770	762	830	896	899	—	—
日均消融量	实测		21	25	24	28	27	33	38	—	—
	mm w. e /day	降雪校正	23	26	25	29	28	34	39	—	—
		模拟	27	29	30	29	32	34	35	—	—
绝对误差	未校正		6	4	6	1	5	1	- 3	2. 9	4. 2
mmw. e /day	降雪校正		4	3	5	0	4	0	- 4	1. 7	3. 4
相对误差	未校正		28. 6	16	25	3. 6	18. 5	3	- 7. 9	—	—
%	降雪校正		19. 4	9. 7	20. 3	1. 5	12. 6	0. 2	- 10. 5	—	—
Haut冰川 ^[7]	未校正		—	—	—	—	—	—	—	2. 8	3. 2
	校正		—	—	—	—	—	—	—	1. 2	2

注: 降雪校正为考虑降雪作用之后的消融量。

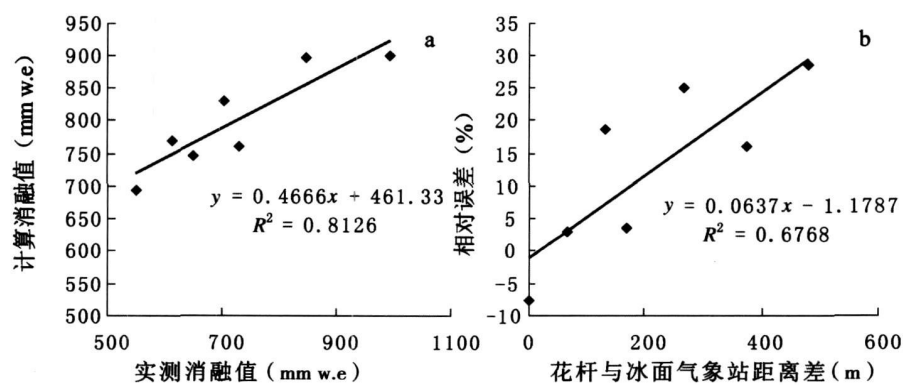


图 3 科其喀尔巴西冰川花杆消融观测与模拟值及模拟相对误差随距离变化的关系

Fig. 3 The relationship between simulated and measured ablations and the relationship between relative error and space distance of Keqiarbaxi Glacier

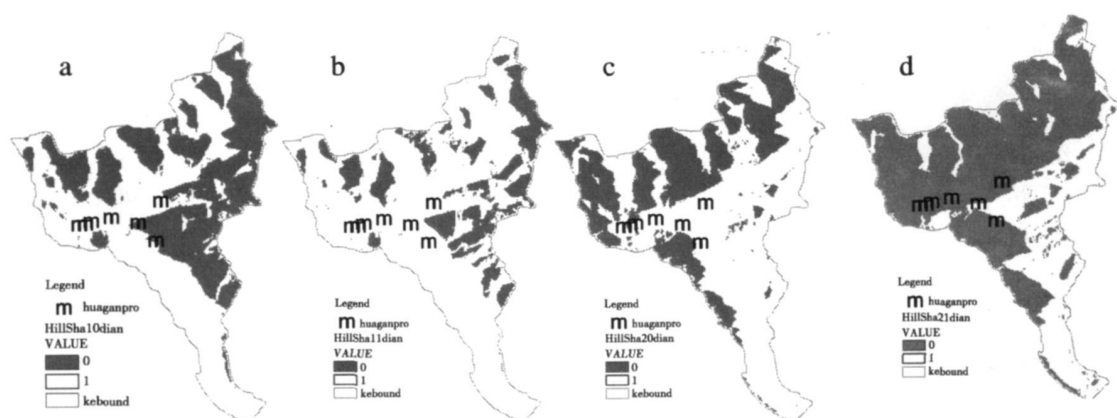


图 4 科其喀尔巴西冰川 8 月 15 日表面阴影二值图, 灰色表示阴影区, 亮色为非阴影区

a 为北京时间 9:30 b 为北京时间 10:30 c 为北京时间 19:30 d 为北京时间 20:30

Fig 4 The shading patterns on of Keqicarbaxi Glacier for 15 August the gray denotes shadows and the white denotes bright areas
(a) 9:30 (b) 10:30 (c) 19:30 (d) 20:30 (beijing time)

降水和水平热交换也会导致模拟估算的不准确, 降雪会导致实际观测值的偏小, 而高温降水则加速冰面表面的消融。由于研究区位于中纬度高海拔地区, 消融期降水由固液态两相组成, 其形态主要受制于气温。本文根据天山乌鲁木齐河源大西沟气象站观测资料, 假定固液态降水分离的临界气温为 2.8°C ^[22], 即当气温大于 2.8°C 为降水, 否则为降雪。模拟时段内, 据大本营人工降水观测记载, 降水量约为 52 mm, 从表 2 可以看出, 考虑降水作用后模型的模拟误差呈明显的减少趋势。科其喀尔巴西冰川从海拔 3 750 m 附近开始, 冰川表面开始出现大量表碛, 冰面气象站恰好处在裸冰边缘, 受表碛加热或由下垫面不均一性引起的水平热交换应该是造成海拔 3 738 处观测值大于估算值的主要原因。

3 结论

通过对不同坡向和坡度格点上的总辐射和净辐射进行地形校正模拟, 利用分布式能量平衡原理对科其喀尔巴西冰川 2004-08 不同海拔冰川消融进行了模拟和分析, 结果表明: 模拟小时总辐射和实测值存在较好的一致性, 二者相关系数为 0.85, 而净辐射由于受云量、冰面温度、周围山体遮蔽效应和风吹雪等限制模拟效果较差; 2004-08-03~2004-08-29 期间, 科其喀尔巴西冰川冰面纯消融达 549~990 mm w.e 水层, 日均消融在 21~38 mm w.e 之间, 冰面消融模拟值大体反映了实际的消融值 (平

均误差为 2.9 mm w.e/day 均方根误差为 4.2 mm w.e/day), 由于未考虑周围山体的遮蔽作用, 模拟值一般略大于观测值, 距离自动气象站较近的花杆模拟相对误差较小, 随着花杆距离冰面自动气象站距离的增大, 模拟相对误差呈增加的趋势。

冰川变化是气候波动变化的必然结果, 尽管我们对不同海拔高度冰川消融进行了较好的模拟, 但由于观测资料的局限和消融过程的复杂性, 仍缺乏相应的实测数据对模拟结果进行模拟精度的准确评估, 从而导致模拟结果具有不确定性, 在今后的工作中应加强和完善科其喀尔巴西冰川的监测网络, 并进一步发展和完善模型本身。

参考文献 (References)

- [1] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Lijing, *et al* Glaciers in response to recent climate warming in western China [J]. *Quaternary Sciences* 2006, 26(5): 762~771 [刘时银, 丁永建, 李晶, 等. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应 [J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 762~771]
- [2] Zhang Gouwei, 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*, 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的反映 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 183~187]
- [3] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Zhang Yong, *et al* Impact of the glacial change on water resources in the Tarim River Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(5): 482~490 [刘时银, 丁永建, 张勇, 等. 塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响 [J]. 地理学报, 2006, 61(5): 482~490]
- [4] Zhang Yong, Liu Shiyin. Progress of the Application of Degree-Day

- Model to Study Glaciers and Snow Cover [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(1): 101~106 [张勇, 刘时银. 度日模型在冰川与积雪研究中的应用进展 [J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 482~490]
- [5] Munro D. S., Young G. J. An operational net shortwave radiation model for Glacier basins [J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(2): 220~230
- [6] Ammann N. S., Willis I. C., Sharp M. J., et al. A distributed surface energy-balance model for a small valley glacier: Development and testing for Haut Glacier d'Arolla, Valais, Switzerland [J]. *Journal of Glaciology*, 1996, 42(140): 77~89
- [7] Brock B. W., Ammann N. S. A spreadsheet-based (Microsoft excel) point surface energy balance model for glacier and snow melt studies [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25: 649~658
- [8] Measurement and parameterization of aerodynamic roughness length variations at Haut Glacier d'Arolla, Switzerland [J]. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(177): 281~297
- [9] Bai Congyuan, Xie Weirong. Energy balance of ice surface during ablation period on the Glacier No. 1 at the head of the Ürümqi River, Tianshan Mountain [A]. In: Study of Glaciers and Hydrology of the Ürümqi River, Tianshan Mountains [C]. Beijing: Science Press, 1965. [白重瑗, 谢维荣. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川消融期开阔冰面上的热量平衡 [A]. 见: 天山乌鲁木齐河冰川与水文研究 [C]. 北京: 科学出版社, 1965]
- [10] Kou Youguan, Xiao Shu, Zhang Yongliang, et al. Radiation balance and vapor transport in the Mt. Tumuluer District [A]. Glacial and Weather in Mt. Tumuluer District [C]. Tianshan Ürümqi Xinjiang People's Publishing House, 1985: 120~142 [寇有观, 肖沐, 张永亮, 等. 托木尔峰地区的辐射平衡及水汽输送 [A]. 见: 天山托木尔峰地区的冰川与气象 [C]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985: 120~142]
- [11] Kang Ersi. A parameterized energy balance model of glacier melting on the Tianshan mountain [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(5): 467~476 [康尔泗. 天山冰川消融参数化能量平衡模型 [J]. 地理学报, 1994, 49(5): 467~476]
- [12] Zhang Yasheng, Yao Tandong, Pu Jianchen. The characteristics of ablation on continental-type glaciers in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(2): 147~154 [张寅生, 姚檀栋, 蒲健辰. 我国大陆型冰川消融特征分析 [J]. 冰川冻土, 1996, 18(2): 147~154]
- [13] Li Jing, Liu Shiyin, Zhang Yong. Snow surface energy balance over the ablation period on the Keqiar Baxi Glacier in the Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3): 366~373 [李晶, 刘时银, 张勇. 天山南坡科契卡尔巴西冰川消融期雪面能量平衡研究 [J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 366~373]
- [14] Chen Liang, Duan Keqin, Wang Nianlian, et al. Characteristics of the surface energy balance of the Qiyi Glacier in Qilian Mountains in melting season [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(6): 882~888 [陈亮, 段克勤, 王宁练, 等. 祁连山七一冰川消融期间的能量平衡特征 [J]. 冰川冻土, 2007, 29(6): 882~888]
- [15] Wang Bingzhong. Lectures of computing the solar radiation: 1st the computing method of astronomical parameters in computing the solar energy [J]. *Solar Energy*, 1999, 2: 8~10 [王炳忠. 太阳辐射计算讲座: 第一讲太阳能天文参数的计算 [J]. 太阳能学报, 1999, 2: 8~10]
- [16] Oerlemans J. Climate sensitivity of glaciers in southern Norway: application of an energy-balance model to Nigardsbreen, Hellstugubreen and Aflotbreen [J]. *Journal of Glaciology*, 1992, 38(129): 223~232
- [17] Han Hailong, Ding Yongjian, Liu Shiyin. Estimation and analysis of heat balance parameters in the ablation season of debris-covered Keqiar Glacier, Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(1): 88~94 [韩海东, 丁永建, 刘时银. 科奇喀尔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]
- [18] Braithwaite R. J., Olesen O. B. A simple energy-balance model to calculate ice ablation at the margin of the Greenland ice sheet [J]. *Journal of Glaciology*, 1990, 36(123): 222~228
- [19] Munro D. S. Surface roughness and bulk heat transfer on a glacier: comparison with eddy correlation [J]. *Journal of Glaciology*, 1989, 35(121): 343~348
- [20] Zhang Yong, Liu Shiyin, Han Hailong, et al. Characteristics of Climate on the Keqiar 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. 天山南坡科契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]
- [21] Konya K., Matsumoto T., Naruse R. Surface heat balance and spatially distributed ablation modeling at Koryto Glacier, Kamchatka Peninsula, Russia [J]. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 2004, 86(4): 337~348
- [22] Kang Ersi, Ohmura A. A energy, water and mass balance and runoff modeling in a glacierized basin of Tianshan mountain [J]. *Science in China (B)*, 1994, 24(9): 983~991 [康尔泗, Ohmura A. 天山冰川作用流域能量、水量和物质平衡及径流模型 [J]. 中国科学 (B 辑), 1994, 24(9): 983~991]

Ablation Estimation on the Keqicarbaxi Glacier on the South Slopes of the Tianshan Mountains

QING Wenwu^{1, 2}, CHEN Rensheng^{1, 2, 3}

(1. Heihe River Basin Alpine Hydrology-Ecology Experimental Research Station, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, China;

2. Heihe Key Laboratory of Ecohydrology and Integrated River Basin Management, CAS, Lanzhou 730000, China;

3. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract Energy balance model is one of the most accurate methods which are used to estimate the glacier surface ablation. Using field meteorological data measured by automatic stations on Keqicarbaxi Glacier and relating 1:50 000 topographic map, global radiation and net radiation are accommodated by Topography-Adjusted on the small scale based on slope and aspect. Meanwhile, the turbulent fluxes are calculated from the bulk aerodynamic approach, and the computed ablations are compared with measurements taken from the stakes. The results demonstrate a relatively high consistency between the calculated and measured global radiation, and the correlation coefficient is 0.85, while the calculated net radiation has rather big difference with the measured. The ablation estimation reflects basically the observed ablation value, with the mean error is 2.9 mm w. e./day and the root mean square (RMS) is 4.2 mm w. e./day. The simulated ablation is general greater than the measured. The simulation error of single point ablation was increased gradually along with the increasing of altitude distance between the lattice and automatic weather station.

Key words Glacier; Keqicarbaxi; energy balance model; topography-adjusted; ablation estimation; the south slopes of the Tianshan Mountains

封面照片说明: 茂县土地岭

土地岭位于四川省茂县县城东约 7 km² 地带, 处于龙门山中段, 是岷江水系与涪江水系的分水岭, 最高峰老君山海拔 3 468 m, 最低处县城边静州村一带, 海拔仅约 1 600 m, 地形起伏巨大, 属深切切割的高中山地貌; 气候温暖湿润, 年均温 9℃左右, 年降雨量 > 800 mm, 属暖温带气候, 十分利于植被生长。因此, 土地岭植物资源丰富, 森林覆盖率高, 以人工林和次生灌丛为主, 主要树种有华山松、油松、冷杉、桦、红豆杉、冬青、水青冈、槭树等; 灌木林主要由悬钩子、水杨梅、胡枝子、小叶杜鹃等构成; 草本植物有艾蒿、蕨类、禾草等。林中栖息着红腹雉、锦鸡等珍禽鸟类, 还有苏门羚、大熊猫、岩羊等保护动物出入。这里森林茂密, 绿荫无际, 小溪流水潺潺, 清澈见底。站在山顶, 举目眺望, 近处青翠欲滴, 远处群山绵绵, 满山生机勃勃。尤其值得一提的是, 云和雾是土地岭的一道令人赏心悦目、心旷神怡的景致。清晨, 山岭往往被乳白色的云雾所萦绕, 身处其间, 神秘的感受油然而生, 偶尔的鸟鸣声, 不禁使人想起“空山不见人, 但闻人语响”的诗句, 并深切感受那种幽静绵绵的诗情画意。

(山水)