文章编号:1000-0240(2007)03-0366-08

天山南坡科契卡尔巴西冰川消融期 雪面能量平衡研究

李 晶, 刘时银, 张 勇

(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)

摘 要:根据 2005 年 6~9 月的野外观测资料,计算了天山南坡科契卡尔巴西冰川积雪表面的能量平 衡各分量,其中感热和潜热采用空气动力学-梯度方法计算得到,净辐射由观测获得.结果表明,消融 期净辐射是雪面最主要的能量来源,占能量收入的 81.4%,平均值为 63.3 W·m⁻²;其次为感热供 热,占 18.6%,为 14.4 W·m⁻².吸收的热量主要通过融化和蒸发两种方式消耗,融化和蒸发耗热分 别为 54.0 W·m⁻²和 23.0 W·m⁻²,占能量总支出的 69.5%和 29.7%,剩下的 0.8%由感热消耗.在 积雪表面的能量组成中,感热值在 6 月和 9 月较大而 8 月较小;对于潜热来说,6 月潜热交换绝对值最 大,蒸发最强烈,这与 6 月风速大且天气晴好有关.另一方面,净辐射值较大的 6 月和 9 月融化热较 多,说明此时段冰川消融较为强烈.

关键词:科契卡尔巴西冰川;积雪;能量平衡 中图分类号: P343.6 文献标识码:A

0 引言

冰川能量平衡揭示了冰雪消融与气候驱动的物 理联系,该研究有助于深入认识冰雪消融与气候变 化之间的关系.冰川能量平衡研究是在 1950 年代 能量平衡理论和大气近地层湍流相似理论提出后开 始的, Hoinkes^[1]首先开展了山地冰川能量平衡的 研究,此后众多学者进行了大量的冰雪表面能量平 衡观测与研究^[2-7].近 10 a 来,随着遥感、地理信 息系统等技术的发展以及高空间分辨率消融模拟的 需求,分布式冰川能量平衡研究已有较大的发 展^[8-12]. 我国的冰川能量平衡研究始于 20 世纪 60 年代,以短期观测为主,对我国西部不同类型代表 性冰川能量平衡总体特征有了初步的认识. 研究表 明^[13-19],我国西部冰川表面的能量平衡组成特征 与冰川发育的气候环境有关,从能量的收支状况来 看, 气候越干, 辐射过程的供热比降低, 而感热交 换供热比增加;同时,潜热交换的耗热比上升,冰 雪融化过程耗热比降低.

塔里木河流域是中国最大的内陆河流域,也是 我国冰川分布及其影响最显著的流域.该流域集中 了中国冰川面积的 33.5%、冰川储量的 41.3%和 内流区冰川面积的 56%和储量的 65%^[20],中国面 积 > 100 km²的 33条冰川中有 22条位于该流 域^[20].20世纪 80年代中后期以来,中国西北地区 气候 由暖 干向暖湿转变^[21],1987—2000年与 1961—1986年相比,西北地区年平均气温升高了 0.7^[22].同期塔里木河流域 1986—2000年的平 均年降水量较 1956—1986年的平均年降水量多 32%,且有逐年递增的趋势^[23].在降水增加和持续 升温的背景下,塔里木河流域冰川表面能量平衡组 合状况如何变化,这种变化对冰川消融有何影响, 已成为认识未来塔河流域水资源变化的首要问题.

本文以塔里木河流域的科契卡尔巴西冰川为研 究区,开展冰雪表面能量平衡研究.从2003年6月 开始,开始对该冰川进行定位监测,开展了冰川、

收稿日期: 2006-12-04;修订日期: 2007-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(40571034;40601022);中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX2-YW-301);科技部科技支撑项目 (2006FY110200)资助

作者简介: 李晶(1980—), 男, 湖南岳阳人, 2003 年毕业于衡阳师范学院, 现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所在读博士研究 生, 主要从事冰川变化与水资源研究. E-mail: jingli @lzb.ac.cn

气象、水文等方面的观测,获得了相关的数据.本 文基于野外观测数据,利用空气动力学-梯度方法 计算了消融期积雪表面的感热和潜热通量,分析了 雪面能量交换过程和组成特征,为进一步认识气候 暖湿背景下冰雪表面能量平衡特征及其对与消融的 影响进行方法探讨.

1 研究区和数据

1.1 研究区概况

科契卡尔巴西冰川(41 48 N,80 90 E),位于 天山托木尔峰南坡(图 1).冰川上限为海拔6 342 m 的科奇喀尔峰,下限海拔3 060 m,是典型的亚大 陆型冰川^[24].冰川全长 26.0 km,平均宽度 3.3 km,总面积 83.6 km²,冰储量 15.8 km³,其中消 融区面积为 30.6 km²,长度约 19.0 km,海拔 3 900 m以下为表碛区,表碛区面积约占消融区总 面积的 63.7%.冰舌地段冰面湖、冰洞、冰下河道 相当发育^[25].

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^[24].受局地环流作用,冰川区对流型 降水时有发生,且降水多出现在白天的午后^[26].根 据张勇等研究^[27],2003—2005年间冰川末端年平 均气温为0.7 ,年降水量为652.2 mm,在目前 的气候背景下,科契卡尔巴西冰川处于强烈的物质 亏损状态,2003/2004年和2004/2005年两个物质 平衡年度物质平衡值分别为-493.7和-383.7 mm,



图 1 科契卡尔巴西冰川位置示意图 Fig. 1 Map of the Keqicar Baxi Glacier in the southwestern

Tianshan Mountains of China

以消融区上部(海拔3 700 — 4 000 m)的物质亏损最为强烈.

1.2 数据来源

本文所用数据主要来源于冰川海拔4 200 m处 自动气象站(Automatic Weather Station, AWS) 2005 年 6 月 16 日到 9 月 7 日的数据记录.期间, 因电源故障数据采集器(HL20)7月2日到8月6 日的数据记录缺失,实际数据记录共 48 d. 自动气 象站的数据记录项包括净辐射、短波辐射、反射辐 射、气压、风速、风向、温度和湿度,风速风向传感 器(05103 Wind Monitor) 和温度湿度传感器 (MP101A TP & RH PROBE) 分别架设在地表以上 1.0 m 和 2.0 m 的不同高度上, 短波辐射和反射辐 射传感器(CM3)安装高度为 1.5 m, 净辐射传感器 (NR-LITE)和气压传感器(090D)安装高度为 1.8 m. 所有的传感器都与数据采集器(HL20)连接进 行同步采集.数据采集器每10 s采样1次,每1h 记录1次采样均值.除自动观测项目外,同时对部 分时段日出日落时间、云量(人工目测)进行了观 测. 本文所用时间为北京时间.

2 观测期气象条件

科契卡尔巴西冰川观测期间,积雪表面的风 速、气温、相对湿度的变化较显著,比湿的变化相 对平缓(图 2).风速变化较为剧烈,日平均风速最 高达 3.8 m · s⁻¹,最低为 0.6 m · s⁻¹,其日变化过 程表现为夜间风速大于白天,且一天中有两个峰 值,一般出现在凌晨和 16:00 点左右.然而,不同 月份的风速变化不大,6月、8 月、9 月和整个观测 期的平均风速分别为 2.6、1.7、2.4 和 2.2 m · s⁻¹ (表 1).

观测期间,气温基本高于 0 ,只有 8 月下旬 数天在 0 以下.日均气温受天气现过程的影响波 动剧烈,最低值为 - 2.9 ,最高值达 5.9 .分 析表明,气温的昼夜变化十分明显,最高值一般出 现在午后 14:00 时左右,最低值出现在 8:00 时左 右,观测期间最高气温和最低气温分别为 12.8 和 - 6.3 .从表 1 可以看出,8 月份平均气温较 低,仅为 1.1 ,低于 6 月的 3.1 和 9 月的 3.2 ,这与该冰川 2003 年消融期 8 月份的平均气温 也是低值是一致的^[26].

相对湿度日均值基本在 60 %上下波动,只6月 份有少数几天在 40 %上下波动.从时段上看,整个 观测期的平均相对湿度为 62.7%,8月是相对湿度 的高值期,达71.0%,这与8月气温较低有关(表 1). 比湿的变化不大,整个观测期都在0.2~0.4g ·kg⁻¹之间波动,整个观测期平均值为0.3g·kg⁻¹.



图 2 观测期间科契卡尔巴西冰川雪面风速、气温、 相对湿度和比湿的日平均值

Fig. 2 Variations of daily mean wind speed, air temperature, relative humidity and specific humidity on the snow surface of Keqicar Baxi Glacier from June 16 to September 7, 2005

表 1 观测期冰川雪面风速、气温、相对湿度和比湿平均值 Table 1 Mean values of wind speed, air temperature, relative

humidity and specific humidity on the snow surface of Keqicar Baxi Gacier from June 16 to September 7, 2005

气象要素	6月 ¹⁾	8月 ²⁾	9月 ³⁾	观测期		
风速/ (m ·s ⁻¹)	2.6	1.7	2.4	2.2		
气温/	3.1	1.1	3.2	2.5		
相对湿度/%	55.5	71.0	61.7	62.7		
比湿/ (g ·kg⁻¹)	0.3	0.3	0.3	0.3		

注:¹⁾计算时段为6月16~30日;²⁾计算时段为8月7~31日; ³⁾计算时段为9月1~7日.

3 雪面能量平衡计算

测点下垫面为积雪,故使用消融雪面的能量平 衡方程:

$$Q = R + H + LE \qquad (1)$$

式中: Q为雪面能量平衡; R为净辐射; H和LE 分别为雪面和大气间的感热和潜热交换.上述各项 均以表面收入热量为正,支出为负.对感热通量而 言,逆温层结时雪面吸收热量, H为正; 超绝热层 结时雪面放出热量, H为负.对潜热通量而言, 凝 结时雪面吸收热量, LE为正; 蒸发时雪面放出热量, LE为页;

3.1 净辐射

土

根据式(1),消融期雪面能量平衡计算时,需 要确定净辐射、感热和潜热通量.净辐射一般可由 下式得到:

$$R = S - S + L - L$$

= S (1 -) + L - L (2)

式中: *R* 为净辐射; *S* 为入射短波辐射; *S* 为反 射短波辐射; *L* 为入射长波辐射; *L* 为出射长波 辐射; 为反射率. 考虑到自动气象站观测项有净 辐射、入射短波辐射、反射短波辐射但无入射长波 辐射和出射长波辐射,计算中直接采用自动气象站 的净辐射观测值.

3.2 感热和潜热通量

在地表面热量平衡研究中,感热和潜热通量可 以用结构观测的方法直接测定.但这个方法相当复 杂,需要专门的设备和较好的实验条件,难于在冰 川上应用.目前计算多采用空气动力学-梯度方 法,该方法计算简单且结果较好,特别是在雪面能 量平衡计算中表现较好.雪面感热和潜热通量可表 示为^[28]:

$$H = \begin{pmatrix} c_{\rm p} k^2 u (T - T_{\rm s}) \\ \ln \frac{Z}{Z_{0\rm m}} & \ln \frac{Z}{Z_{0\rm t}} \end{pmatrix}$$
(3)

$$LE = \frac{Lk^2 u(q - q_s)}{\left[\ln \frac{Z}{Z_{0m}}\right] \left[\ln \frac{Z}{Z_{0q}}\right]} (\phi_m \phi_v)^{-1}$$
(4)

式中: 为空气密度; c_p 为空气定压比热(1004 J · K⁻¹ · kg⁻¹); *L* 为气化潜热; *K* 为 von Karman 常数(*K*=0.4); q_m 、 q_i 和 q_i 分别为无量纲动量、热量和水汽传输函数,实际计算中可假设热量和水汽的传输系数相等^[29-30]; *u*、*T*、*q*分别为高度 *z* 处的风速、气温和比湿; T_s 、 q_s 分别为雪面的温度和比湿; *z*om、*z*ot和 *z*oq分别为动量、热量和水汽的粗糙长度. 计算过程可认为 *z*om、*z*ot和 *z*oq相等^[31],都取 *z*o. 动量、热量和水汽的无量纲函数 q_m 、 q_i 和 q_i 可表示为理查逊数 *R*_i_B的函数^[32]:

当
$$Ri_{\rm B} > 0$$
 时:
 $(\phi_{\rm m} \phi_{\rm n})^{-1} = (\phi_{\rm m} \phi_{\rm v})^{-1} = (1 - 5Ri_{\rm B})^2$ (5)
当 $Ri_{\rm B} < 0$ 时:

 $(\phi_{\rm m} \phi_{\rm h})^{-1} = (\phi_{\rm m} \phi_{\rm v})^{-1} = (1 - 16 R i_{\rm B})^{0.75}$ (6)

式中:理查逊数 *Ria*是表征大气边界层稳定性参量, 当 *Ria*为较大负值时,表示大气处于不稳定状态; 当 *Ria*为较大正值时,表示其处于稳定状态;而当

368

*Ri*_B接近零时,表示大气处于中性层结.*Ri*_B可由下 式计算得到^[28,33]:

$$Ri_{\rm B} = \frac{g - T}{T \left[-\frac{u}{z} \right]} = \frac{g(T - T_{\rm s})(Z - Z_{\rm b})}{T u^2}$$
(7)

式中: g为重力加速度; T、u分别为 Z 高处的气温 和风速; T_s为表面温度; z₀为表面粗糙长度,可根 据不同高度处的风速计算得到^[29-30]:

z₀ = exp[(u₂lnz₁ - u₁lnz₂)/(u₂ - u₁)] (8)
 计算时, z₁和 z₂分别取 1.0 m 和 2.0 m, u₁和 u₂分别为其相应高度处的风速.

4 结果与分析

4.1 能量项逐日变化

观测期绝大部分日期净辐射都为正(图 3),其 中 6月份的净辐射较大,8月份有少数几天净辐射 为负,这可能与8月份天气状况有关.8月份气温 较低且天气多变,一般新雪的反射率在0.9以上, 因此新降雪大大减少雪面对短波辐射的吸收,而表 面气温下降使更多的能量以长波辐射返回大气,使 得净辐射为负值.观测期潜热基本为负,说明雪面 蒸发耗热.与潜热相反,感热基本为正,说明感热 也是雪面重要的能量来源.感热和潜热受风速的影 响较大,在风速较大的 6 月,感热和潜热的绝对值 都较大,而 8 月则相对较小.

4.2 **能量项日内过程**

4.2.1 短波辐射

据野外观测,观测期间日出时间为 8:00 左右, 日落时间为 22:00 左右. 受到周围山体的阻挡,测 点短波辐射记录值从日出后 9:00 到日落前21:00的 白天为正值,而日落后的 21:00 到次日日出前 9:00 左右的夜间基本为零.入射短波辐射主要受大气层



图 3 观测期冰川雪面净辐射、潜热和感热日均值

Fig. 3 Variations of daily mean net radiation, sensible heat and latent heat on the snow surface of Keqicar Baxi Glacier from June 16 to September 7, 2005





顶太阳辐射的控制,同时受海拔高度、地形和云量 的影响.图4表明入射短波辐射从9:00开始一直 上升,在13:00左右达到最高值,然后下降,一直 到21:00左右变为零.反射短波辐射与入射短波辐 射的变化趋势一致,同时还受反射率的影响.从图 4可以看出,9:00后反射率一直下降,到16:00达 最低值,随后迅速上升.其中12:00到16:00是反 射率的低值时段.这与太阳高度角变化有关.

4.2.2 净辐射

净辐射受短波和长波辐射平衡的共同影响,从 图 4 可以看出,净辐射值白天较大,晚上较小.白 天净辐射主要受短波辐射平衡的影响.虽然入射短 波辐射在 15:00 左右为最高值,但反射率对短波辐 射平衡的影响更大,辐射平衡最高值出现在反射率 为最低值的 16:00 而不是入射短波辐射为最高值时 的 15:00.夜间短波辐射为零,净辐射等于长波辐 射平衡,而夜间长波辐射平衡为负值,所以净辐射 值也为负.

4.2.3 感热和潜热

感热和潜热的日内变化趋势较为一致,但感热 和潜热的数值基本相反,感热基本为正而潜热为 负,这说明雪面通过感热交换获得热量而通过潜热 交换消耗热量.因此感热和潜热的高值和低值所代 表的意义也相反.感热的低值表示感热交换弱获得 的热量少,而潜热的低值则表示潜热交换剧烈消耗 的热量多,反之亦然.

感热白天为较大正值,夜间为较小的负值.而 潜热全天都是负值,且都在-10 W·m⁻²以下变 化.这与观测场风速大,雪面水汽扩散迅速,蒸发 强烈有关.同时,白天感热和潜热交换方向相反而 数值相等,其代数和基本为零.感热和潜热日内变 化趋势表现为9:00 左右为低值而 16:00 左右达到 高值.其原因主要是9:00日出后,太阳辐射迅速加 热雪面,表面和观测高度上的气温趋向一致,所以 感热交换很弱,趋向零,为低值;对潜热通量而言, 表面饱和水汽压迅速增加而空气实际水汽压还很 小,水汽梯度达到最大,因此蒸发最为强烈,潜热 通量为最小负值.随后,雪面气温开始慢慢的上 升,直到达到熔点.同时,雪面气温加热上层空气, 到16:00 左右气温达到最高,近地面形成稳定的逆 温层,此时温度梯度最大,感热交换剧烈,为高值. 由于水汽压梯度相对较小且水汽已基本饱和,所以 潜热交换相对较弱,表现为低值.

4.3 能量平衡组成

从时段上看,各能量项所占的比例变化较小, 净辐射所占比例在 80%左右,感热供热在 20%左 右(表 2).但各能量项量值变化较大,6月中下旬净 辐射最大,达 100.9 W·m⁻²,9月上旬次之,为 77.0 W·m⁻²,8月最小为 38.8 W·m⁻².整个观 测期净辐射和感热是主要的能量来源,分别占能量 收入的 81.4 %和 18.6%.支出方面,以融化耗热为 主,占 69.5%,其次为蒸发,占 29.7%,剩余 0.8%的能量由感热消耗.

5 讨论

与同一冰川的表碛表面相比,从能量量值来 看,除感热通量外,雪面能量各项均较小.组成比 例上,受积雪-大气界面温度梯度较小湍流交换弱 于冰川区其他下垫面的影响^[16,34],雪面蒸发和感热 耗热比均小于表碛表面.雪面净辐射比例大于表碛 表面,一方面受雪面湍流交换较弱的影响,同时也 和积雪基本处于消融状态,反射率较低,获得辐射较 多有关(太阳辐射强烈的午前和午后反射率在 0.6 左右).

表 2 观测期冰川雪面能量平衡组成

Table 2 Variations of the energy balance compositions on the snow surface

of Keqicar Baxi Glacier from June 16 to September 7, 2005

时段	收入项			支出项			收入项			支出项			
	净辐射	感热收入	凝结放热	感热支出	蒸发耗热	融化耗热	净辐射	感热收入	凝结放热	感热支出	蒸发耗热	融化耗热	
6月1)	100.9	21.2	/	/	32.0	89.9	82.6	17.4	/	/	26.2	73.7	
8月2)	38.8	8.7	/	1.0	18.2	28.3	81.6	18.4	/	2.1	38.3	59.6	
9月3)	77.0	22.7	/	0.3	21.4	77.9	77.2	22.8	/	0.4	21.5	78.1	
观测期	63.3	14.4	/	0.65	23.0	54.0	81.4	18.6	/	0.8	29.7	69.5	

注:¹⁾计算时段为6月16~30日;²⁾计算时段为8月7~31日;³⁾计算时段为9月1~7日.

1	N	7	凎	Ę	Ľ	Π

Table 3 Energy balance compositions of some glaciers near the Keqicar Baxi Glaciers over ablation period													
	经度	纬度	海拔 / m	〕 观测 日期	下垫面 性质								
观测冰川						能量收入/(W ·m ^{-2/} %)			能量支出/(W ·m ^{-2/} %)				
						净辐射	感热收入	凝结放热	消融耗热	蒸发耗热	感热支出		
托木尔峰西琼台兰冰川[24]	80 E	42 N	4000	1978-07	冰	186.7/59	109.3/36	12.6/5	251.8/82	56.8/18	_		
天山1号冰川[13]	87 E	43 N	3840	1962-06-08	冰	142.4/84.4	17.3/10.3	8.9/5.3	148.6/88.1	20.0/11.9	—		
科契卡尔巴西冰川[34]	80 E	42 N	3300	2004-06	表碛	97.9/73.3	8.6/6.5	9.4/7.0 其中地热输 送 17.6/13.2	地热输送 28.1/21.0	53.4/39.9	52.2/39.1		
科契卡尔巴西冰川(本研究)	80 E	42 N	4200	2005-06-09	积雪	63.3/81.4	14.4/18.6	-	54.0/69.5	23.0/29.8	0.7/0.8		

表 3 邻近冰川消融期能量平衡组成

与邻近的西琼台兰冰川和天山1号冰川相比 (表 3),3条冰川的位置、海拔、观测时段都比较接 近,主要差异是下垫面性质的不同.西琼台兰冰川 和天山1号冰川观测的下垫面为冰,而科契卡尔巴 西冰川观测下垫面为积雪. 因此它们的能量平衡差 异可认为是冰、雪性质的差异造成. 从能量量值来 看,科契卡尔巴西冰川雪面各能量项均较小,但蒸 发潜热值较大,相当部分能量被用于蒸发.组成比 例上,科契卡尔巴西冰川雪面净辐射比例高于西琼 台兰冰川的冰面而略低于天山1号冰川的冰面. 雪 面由于蒸发耗热较多,其消融耗热比例降低,只占 到能量支出的 69.5%, 而西琼台兰冰川和天山 1号 冰川冰面融化热均占到总能量支出中的 80%以上 (表 3). 可见, 蒸发量在冰川积雪消融量中有一定 比重,不可忽略,

结论 6

利用能量平衡原理、通量传输理论对科契卡尔 巴西冰川雪面的能量平衡进行计算与分析. 计算的 结果主要是雪面的感热通量、潜热通量,净辐射由 直接观测得到. 通过讨论分析, 得出以下几点结 论:

(1) 净辐射和感热是消融期科契卡尔巴西冰川 雪面的全部能量来源. 其中净辐射是最主要的能量 来源,观测期平均值为 63.3 W m⁻²,占能量收入 的 81.4%. 感热为 14.4W m⁻²,占 18.6%. 吸收 的热量通过融化和蒸发消耗,其值分别为 54.0 W ·m⁻²和 23.0 W ·m⁻²,占能量支出的 69.5%和 29.7%,剩下的0.8%由感热消耗.

(2) 消融期净辐射为正值, 其中 6 月和 9 月净 辐射值较大而 8 月净辐射值较小. 净辐射值较大的 6月和9月融化热也较多,冰川消融强烈.

(3) 消融期感热交换基本为正, 雪面通过感热

交换获得热量. 感热值 6 月中下旬和 9 月上旬较大 而 8 月较小. 消融期潜热交换为负, 说明雪面蒸发 耗热,且6月潜热交换最为强烈,这与6月风速大 且天气晴好有关. 在风速小且气温较低的 8 月, 感 热通量很小日基本为负.

(4) 消融期内不同时段各能量项比值基本不变 但量值差别较大. 6月中下旬和9月上旬雪面能量 交换较剧烈,各能量项量值均较大. 8 月雪面能量 交换较弱,各能量项量值均较小.

对雪面能量平衡状况的研究分析应该建立在对 感热和潜热通量的精确计算上. 尽管本文采用的计 算方法在其它冰川上有较好的表现,但仍因为缺乏 相应的实测数据进行模拟精度的准确评估使得计算 结果具有不确定性。因此,对雪面能量平衡的深入 认识还需要开展相关的验证观测.

参考文献(References):

- [1] Hoinkes H C. Measurements of ablation and heat balance on alpine glaciers [J]. Journal of Glaciology, 1955, 2: 497 -501.
- Ambach W, Hoinkes H C. The heat balance of an Alpine [2] snowfield (Kesselwandferner 3240 m, Oetztal Alps, 1958) [J]. Wallingford: IAHS Publication, 1963, 61: 24 - 36.
- [3] La Chapelle E. Annual mass and energy exchange on the Blue Glacier [J]. Journal of Geophysical Research, 1959, 64:443 - 449.
- Röthlisberger H, Lang H. Glacial hydrology [M] // Gurnell, [4] A. M. and Clark, M.J. Glacio-fluvial Sediment Transfer. An Alpine perspective. New York: Wiley, 1987: 207 - 284.
- Hock R, Holmgren B. Some aspects of energy balance and [5] ablation of Storglaci ren, Sweden [J]. Geografiska Annaler, 1996, 78A: 121 - 131.
- [6] Oerlemans J, Grisogono, B. Glacier winds and parameterisation of the related surface heat fluxes[J]. Tellus, 2002, 54A: 440 - 452.
- [7] Konya K, Matsumoto T, Naruse R. Surface heat balance and spatially distributed ablation modelling at Koryto Glacier, Kamchatka peninsula, Russia [J]. Geografiska Annaler,

2004, **86**A:337-348.

- [8] Kirnbauer R, Bloeschl G, Gutknecht D. Entering the era of distributed snow models [J]. Nordic Hydrology, 1994, 25:1
 - 24.
- [9] Arnol N S, Willis I C, Sharp M J, et al. A distributed surface energy - balance model for a small valley glacier. I: Development and testing for Haut Glacier d'Arolla, Valais, Switzerland [J]. Journal of Glaciology 1996, 42: 77 - 89.
- [10] Regine H, Christian N. Areal melt and discharge modelling of Storglaci ren, Sweden [J]. Annals of Glaciology, 1997, 24: 211 - 216.
- [11] Escher-Vetter H. Modelling meltwater production with a distributed energy balance method and runoff using a linear reservoir approach -results from Vernagtferner, Oetztal Alps, for the ablation seasons 1992 to 1995 [J]. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 2000, 36: 119 - 150.
- [12] Klok EJ, Oerlemans J. Model study of the spatial distribution of the energy and mass balance of Morteratschgletscher, Switzerland[J].Journal of Glaciology, 2002, 48(163): 505 -518.
- [13] Bai Congyuan, Xie Weirong. Energy balance of ice surface during ablation period on the Glacier No. 1 at the head of the Ür ünqi River, Tianshan Mountains[C]// Study of Glaciers and Hydrology of the Ür ünqi River, Tainting Mountains. Beijing: Science Press, 1965. [白重瑗,谢维荣.天山乌鲁术齐河源1号冰川消融期开阔冰面上的热量平衡[C]//天山乌鲁木齐河冰川与水文研究.北京:科学出版社,1965.]
- [14] Zeng Qunzhu, Kou Youguan. Heat balance in ablation period on Rongbuk Glacier [C]//Scientific Report of the Investigation on Mt Qomolangma (1966—1968), Glacier and Glacial Morphology[C].Beijing: Science Press, 1975:70-74.[曾群 柱,寇有观.绒布冰川消融期的热量平衡[C]//珠穆朗玛地区 科学考察报告(1966-1968),现代冰川与地貌.北京:科学出 版社,1975:70-74.]
- [15] Bai Chongyuan, Zhang Jinhua. Some features of radiation and heat balance of the Batura Glacier [C]// Professional Papers on the Batura Glacier, Karakorum Mountains. Beijing: Science Press, 1980:57 - 81. [白重瑗,张金华.巴托拉冰辐射和 热量平衡的某些特征[C]//喀喇昆仑山巴托拉冰考察与研究 [.北京:科学出版社,1980:57 - 81.]
- [16] Kou Youguan, Xiao Shu, Zhang Yongliang, et al. Radiation balance and vapor transport in the Mt. Tuomuer District [C]// Glacial and Weather in Mt. Tuomuer District, Tianshan. Ür ünqi: Xinjiang People 's Publishing House, 1985:120 142. [寇有观,肖沫,张永亮,等. 托木尔峰地区的辐射平衡及水汽输送[C]//天山托木尔峰地区的冰川与气象. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,1985:120 142.]
- [17] Xie Yingqin. Autumn heat balance in the ablation area of Hailuogou Glacier[C]// Xie Zichu, Kotlykov VM. Glaciers and Environment in the Tibet Plateau (1), the Gongga Mountain. Beijing: Science Press, 1994:94 - 109.
- [18] Zhang Yinsheng, Yao Tandong, Pu Jianchen, *et al.* Energy budget at ELA on Dongkemadi Glacier in the Tonggula Mts. Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(1):10-19. [张寅生,姚檀栋,蒲健辰,等. 唐古拉山冬克玛底冰川平衡线高度附近的能量平衡[J]. 冰川冻土, 1996, 18(1):10-19]
- [19] Kang Ersi , Ohmura A. A parameterized energy balance model

of glacier melting on the Tianshan Mountain [J]. Acta Geographica Sinica,1994,49(5):467 - 476. [康尔泗, Ohmura A. 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.]

- [20] 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.]
- [21] 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.]
- [22] Wang Shaowu, Dong Guang rong. Environmental Characteristic of West China and Its Evolution [M]. 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].北京:科学出版社, 2002:49 - 61.]
- [23] 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.]
- [24] Mountaineering and Expedition Term of Chinese Academy of Science. Glacial and Weather in Mt. Tuomuer District, Tianshan [M]. Ür ünqi: Xinjiang Peoples Publishing House, 1985:130-136. [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,1985:130 - 136.]
- [25] Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese A-cademy 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()(天山山区(西南部塔里木内流区))[M].北京:科学出版社,1987:15 69.]
- [26] 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.]
- [27] Zhang Yong, Ding Yongjian, Liu Shiyin, et al. Preliminary study of mass balance on Keqicar Baxi Glacier, southwestern Tianshan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(4):477-484. [张勇,丁永建,刘时银,等. 天山南坡科契卡尔巴西冰川物质平衡初步研究[J]. 冰川冻土, 2006,28 (4):477-484.]
- [28] Oke T R. Boundary Layer Climates (Second Edition) [M]. London: Routledge, 1987.
- [29] Louis J F. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere[J]. Boundary Layer Meteorology, 1979, 17:187 202.
- [30] Beljaars A C M. Flux parameterization over land surface for atmospheric models [J]. American Meteorological Society, 1991, 30:327 - 341.
- [31] Wagnon P, Ribstein P, Francou B, et al. Annual cycle of energy balance of Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104 (D4): 3907 -

3923.

- [32] Favier V, Wagnon P, Chazarin J-P, et al. One-year measurements of surface heat budget on the ablation zone of Antizana Glacier 15, Ecuadorian Andes [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109, D18105, doi: 10.1029/2003JD004359.
- [33] Moore R. On the use of bulk aerodynamic formulae over melting snow [J]. Nord Hydrol, 1983, 14: 193 - 206.
- [34] Han Haidong, Ding Yonjian, Liu Shiyin. Estimation and analysis of heat balance parameters in the ablation season of debris-covered Keqikaer 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.]

Snow Surface Energy Balance over the Ablation Period on the Keqicar Baxi Glacier in the Tianshan Mountains

LIJing, LIU Shi-yin, ZHANG Yong

(State Key Laboratory of Cryosphere Science, CAREERI, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Meteorlological data were recorded (from June 16 to September 7, 2005) at 4 200 m a. s. l. on the Keqicar Baxi Glacier in the Tarim River basin of Northwest China. The net radiation was directly measured, and the turbulent fluxes were calculated from the bulk aerodynamic approach. During the period under consideration the net radiation and the sensible turbulent heat fluxes were energy sources to the glacier surface, and net radiation is the primary energy source, accounting for 81. 4 % with its value of 63. $3W \cdot m^{-2}$. The rest energy source is provided by the sensible turbulent heat flux, accounting for 22%. Energy is consumed mainly by snow melting and the evaporation. The energy for snow melting and the evaporation accounted for 69.5 % and 29.7 % for the total energy with their values 54. 0 W \cdot m⁻² and 23. 0

 $W \cdot m^{-2}$, respectively, and the rest is consumed by sensible turbulent flux. The sensible turbulent flux is always positive, which means that the surface gain energy through sensible heat exchange. The value of sensible turbulent flux is larger on the middle and last ten days of June, but smaller in August. The latent turbulent flux is negative and its value reaches its maximum on the middle and last ten days of June, because of the strongest evaporation during this period, in relation to the high values of wind velocity and clear weather on the middle and last ten days of June. It is also found that the melting heat values were high on the middle and last ten days of June and the first ten days of September, showing that there was an intensive ablation period of glacier.

Key words: Keqicar Baxi Glacier; snow cover; energy balance