

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.1004

ZHANG Jiajia, SUN Weijun, DU Wentao, et al. Characteristics of energy budget under different weather conditions in the ablation area of the Lao-hugou Glacier No. 12, Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):332-343. [张佳佳, 孙维君, 杜文涛, 等. 祁连山老虎沟12号冰川消融区不同天气条件下的能量收支特征[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):332-343.]

## 祁连山老虎沟12号冰川消融区不同天气条件下的能量收支特征

张佳佳<sup>1</sup>, 孙维君<sup>1</sup>, 杜文涛<sup>2</sup>, 陈记祖<sup>2</sup>, 秦翔<sup>2</sup>

(1. 山东师范大学地理与环境学院, 山东 济南 250014; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室/祁连山冰川与生态环境综合观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 冰川表面能量平衡模型建立了冰川与大气之间的联系。为探讨不同天气条件对冰川能量收支的影响, 利用祁连山老虎沟12号冰川海拔4 550 m处的气象资料(2011年8月24日-9月6日), 结合能量平衡模型, 分析了不同天气条件下的能量收支变化特征。结果表明: 受云量影响, 晴天条件下向下短波辐射( $318.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ )是多云条件下的1.5倍, 是阴天条件下的3倍。三种天气条件下的向下长波辐射, 晴天( $215.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) < 多云( $267.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) < 阴天( $291.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ )。受固态降水的影响, 阴天条件下冰川反照率(0.50)是晴天时的2倍多。而三种天气下的最大消融耗热, 晴天( $739.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 多云( $582.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 阴天( $324.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ )。在能量收入项中, 净短波辐射是主要来源(98%), 但是受天气条件影响, 能量支出各项所占比例有明显差异; 在三种天气条件下, 净长波辐射所占比例分别为35%、31%和23%, 消融耗热所占比例分别为62%、64%和75%, 潜热通量所占比例相差不大。

**关键词:** 老虎沟12号冰川; 消融区; 不同天气条件; 能量收支

**中图分类号:** P343.6    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0332-12

### 0 引言

地-气相互作用是气候形成的重要物理过程, 是气候系统与各个圈层联系的纽带<sup>[1]</sup>, 其主要内容是地表能量交换, 具体表现为辐射收支与热量传递<sup>[2-7]</sup>。冰冻圈是一个特殊的圈层, 其对气候变化具有高度敏感性<sup>[8-10]</sup>。冰川作为冰冻圈的重要组成部分<sup>[11-15]</sup>, 表面通过辐射收支以及感热、潜热湍流的变化对气候系统产生影响。在不同的天气条件下, 大气层中云、气溶胶、水汽等因素会呈现出不同的状态, 对太阳辐射产生相应的影响, 进而对冰川表面温度、蒸发过程等产生影响, 使冰川表面的辐射收支、感热、潜热通量发生变化<sup>[16-19]</sup>。

国内外学者对不同天气条件下的能量收支特

征进行了大量研究。如2006-2007年夏季, Konya等<sup>[20]</sup>对智利Patagonia冰川进行了气象观测, 分析了气候变化对冰川表面消融的影响, 结果表明: 在多云/下雨的天气状态时, 冰川消融耗热为 $18.8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 湍流通量的贡献占到35%; 而在晴朗天气下, 消融耗热为 $16.9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 湍流通量的贡献占到13%。Sicart等<sup>[21]</sup>对玻利维亚Zongo冰川研究时发现, 云量的影响使得长波辐射在湿季和干季有明显差异, 由此导致冰川表面能量收支出现了季节差异。我国对不同天气条件下冰川表面能量收支状况研究相对较少, 但对其他下垫面条件下的能量收支特征研究颇丰<sup>[22]</sup>。如陈世强等<sup>[23]</sup>利用2005年11月8-24日的气象站观测资料, 对青

收稿日期: 2019-01-10; 修订日期: 2019-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971073; 41701059; 41401040); 中国科学院前沿科学重点研究项目(Y77R0400YD); 中国博士后科学基金项目(40411594); 山东师范大学人才引进科研基金资助

作者简介: 张佳佳(1995-), 女, 山东济南人, 2017年在枣庄学院获学士学位, 现为山东师范大学在读硕士研究生, 从事冰川消融研究. E-mail: zhangjiajia0722@foxmail.com

通信作者: 孙维君, 副教授, 从事寒旱区气象与冰川变化数值模拟研究. E-mail: sun1982wj@163.com.

藏高原东部地区冬季降雪前后不同天气状态下的辐射特征进行了分析,发现积雪期晴天和降雪过程条件下向上短波辐射的峰值分别约为降雪前晴天的 3 倍和 2 倍。唐恬等<sup>[24]</sup>利用 2010 年 6–7 月的鄂陵湖数据,分析了在不同天气条件下黄河源鄂陵湖地区辐射分量、地表能量分量、土壤温度和反照率的变化特征,结果表明在不同天气条件下,辐射和地表能量各分量的日变化差异较大。李帅等<sup>[1]</sup>利用塔克拉玛干沙漠的辐射数据,分析了流动沙漠区近地层辐射收支特征以及云和沙尘的影响,发现总辐射在夏季某些特定的天气条件下接近太阳常数,总辐射受云和沙尘的影响最为明显。陈世强等<sup>[5]</sup>利用 2005 年野外观测试验资料,分析了夏季不同天气背景下金塔绿洲的小气候特征、辐射和能量平衡特征的日变化规律,得出不同天气和土壤湿度背景下的辐射和能量平衡特征有较大差异,观测中发现有较大的能量不平衡差额,晴天时的能量亏损大于阴天。

祁连山老虎沟 12 号冰川是老虎沟流域最具代表性的大陆型冰川,自 1958 年起,我国老一辈的科学家们就对此地进行了科学考察<sup>[25–28]</sup>,随后一代又一代的科研工作者对老虎沟 12 号冰川地区的气象、水文和冰川能量物质平衡进行了研究<sup>[29–32]</sup>。本研究选取老虎沟 12 号冰川海拔 4 550 m 处消融期内连续 14 天的气象资料,通过计算,对该地的辐射、反照率、感热和潜热通量、能量收支进行对比分析,以揭示该地区不同天气条件下的能量收支特征。从微观角度详细分析天气状态变化对冰川表面能量收支的影响,为今后冰川地区物质能量平衡的研究提供数据支持。

## 1 研究区概况

老虎沟 12 号冰川(冰川编号为 5Y448D0012,见图 1)位于祁连山西段,疏勒河的上游,分成东支和西支,并在海拔 4 550 m 处汇合,最高海拔 5 483 m,末端海拔 4 250 m,总长 10.8 km,面积为 21.9 km<sup>2</sup>,是祁连山最大的山谷冰川<sup>[25]</sup>。该冰川常年受西风的影响,气温低,年较差大,降水集中在 5–9 月,是典型的大陆型冰川,其冰雪融水是疏勒河上游重要的河流补给来源<sup>[29]</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据获取与处理

本文所用数据为祁连山老虎沟 12 号冰川海拔

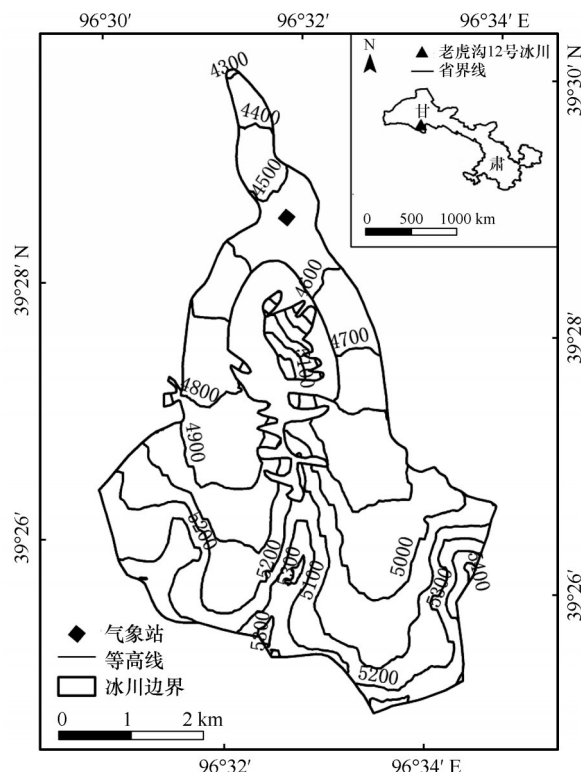


图 1 祁连山老虎沟 12 号冰川

Fig. 1 Map showing the Laohugou Glacier No. 12 in the Qilian Mountains

4 550 m 处自动气象站(AWS)的实测气象数据。时段为 2011 年 8 月 24 日–9 月 6 日,共计 14 天,数据是通过计算 2011–2013 年的云量因子,经过筛选后选择的天气状态最具有代表性的连续 14 天,数据的时间分辨率为 30 min。AWS 架设在老虎沟 12 号冰川消融区(见图 1, 39°28' N、96°32.1' E,海拔 4 550 m),气象仪器经中国气象局的标定和测试后,严格按照《地面气象观测规范》<sup>[33]</sup>进行架设。气象站气象传感器型号和架设高度见表 1,观测项目包括气温、相对湿度、风速风向、气压、降水和辐射等气象要素。仪器所测的各辐射分量均为到达地表和地表反射的辐射量。传感器与数据采集仪 CR1000(美国 Campbell)连接,每 10 s 采集一次数据,30 min 输出一次平均值。

首先对气象要素进行异常值的剔除、插补和修正。辐射传感器表层结霜或者积雪会影响辐射的观测结果,辐射传感器球面结霜或有积雪时,会造成对向下短波辐射的低估。太阳高度角也是影响辐射观测的主要因素,当太阳高度角小于 0°时,将向下和向上短波辐射数值修正为 0。在日出、日落时,太阳高度角较低,出现向下短波辐射小于向上短波辐射的现象,导致反照率  $\alpha$  高于 0.9,当  $\alpha > 0.9$

表1 海拔4 550 m处自动气象站传感器的技术参数及架设高度

Table 1 The automatic weather station at the elevation of 4 550 m: technical parameters and installation height of sensors

观测项目及单位	传感器型号	生产国及厂商	测量范围	精度	架设高度
气温/℃	Vaisala41382	芬兰 Vaisala	-40 ~ +60 ℃	0.2 ℃	1.5 m, 3.5 m
相对湿度/%	Vaisala41382	芬兰 Vaisala	0.8% ~ 100%	2%	1.5 m, 3.5 m
气压/hPa	PTB210	芬兰 Vaisala	50 ~ 1 300 hPa	0.5 hPa	1.5 m
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	Young05103	美国 RM Young	0 ~ 60 m·s <sup>-1</sup>	1%	1.5 m, 3.5 m
降水/mm	T200B	挪威 Geonor	0 ~ 600 mm	0.1 mm	1.7 m
短波辐射/(W·m <sup>-2</sup> )	Kipp&Zonen CM3	荷兰 Kipp&Zonen	波长0.305 ~ 2.8 μm	10% 日总量	1.5 m
长波辐射/(W·m <sup>-2</sup> )	Kipp&Zonen CG3	荷兰 Kipp&Zonen	波长5 ~ 50 μm	10% 日总量	1.5 m

时,  $S_{\downarrow} = S_{\uparrow} / 0.9^{[34]}$ 。为了减小反照率误差, 选用11:00—17:00(北京时间)的辐射数据进行反照率的计算。经过处理、修正后的数据质量整体较好。

## 2.2 研究方法

天气条件的判定采用Favier等<sup>[35]</sup>的方法计算云量因子 $n$ , 具体公式为

$$n = 1.3 - 1.4 \times \left( \frac{S_{\downarrow}}{S_{\text{TOA}}} \right) \quad (1)$$

式中:  $S_{\downarrow}$ 为向下短波辐射;  $S_{\text{TOA}}$ 为大气顶层辐射。当求得的云量因子小于0.3时, 天气判定为晴天; 0.3~0.8之间判定为多云; 大于0.8时判定为阴天<sup>[36]</sup>。

能量收支状况通过能量平衡方程来获得, 冰川表面能量平衡方程可表示为

$$Q_M = R_n + H + LE + Q_G + Q_P \quad (2)$$

式中:  $Q_M$ 为冰雪融化所消耗的能量;  $R_n$ 为净辐射;  $H$ 为感热通量;  $LE$ 为潜热通量;  $Q_G$ 为冰雪层中热量交换通量, 接近于0, 一般忽略不计;  $Q_P$ 为降水释放的热通量, 根据气温临界值判定降水以固态为主, 一般也忽略不计。式中的所有能量项, 正值表示冰川表面获得能量, 负值表示失去能量, 单位均为  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2[30]}$ 。

利用实测的各辐射分量数据, 计算净辐射 $R_n$ 与反照率 $\alpha$ 。

$$R_n = S + L \\ = S_{\downarrow} - S_{\uparrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} \quad (3)$$

式中:  $S$ 为净短波辐射;  $L$ 为净长波辐射;  $S_{\downarrow}$ 为向下短波辐射(太阳总辐射);  $S_{\uparrow}$ 为向上短波辐射(反射辐射);  $L_{\downarrow}$ 为向下长波辐射(大气长波辐射);  $L_{\uparrow}$ 为向上长波辐射(地面反射的长波辐射)。

反照率 $\alpha$ 是 $S_{\uparrow}$ 与 $S_{\downarrow}$ 之比<sup>[31]</sup>, 影响反照率的因素主要包括地表因素(颜色、湿度、粗糙度、植被等)和气象因素(气温、降雪后天数、天空状况等)。

$$\alpha = \frac{S_{\uparrow}}{S_{\downarrow}} \quad (4)$$

感热 $H$ 和潜热 $LE$ 的计算采用整体空气动力学法<sup>[30]</sup>, 其大小取决于冰川表面与大气之间的温度差、湿度差和风速等因素, 因此其误差来源于观测数据的误差。计算公式为

$$H = C_p \rho_0 \frac{P}{P_0} \frac{K^2 v (T_a - T_s)}{\ln \left( \frac{Z}{Z_{om}} \right) \ln \left( \frac{Z}{Z_{oh}} \right)} (\varphi_m \varphi_h)^{-1} \quad (5)$$

$$LE = 0.622 L_v \rho_0 \frac{1}{P_0} \frac{K^2 v (E_a - E_s)}{\ln \left( \frac{Z}{Z_{om}} \right) \ln \left( \frac{Z}{Z_{ov}} \right)} (\varphi_m \varphi_h)^{-1} \quad (6)$$

式中:  $C_p$ 为空气定压比热( $1\,005.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $\rho_0$ 为标准大气压 $P_0$ ( $1\,013.25 \text{ hPa}$ )下的空气密度( $1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $P$ 为当地大气压;  $K$ 为卡曼常数(0.4);  $T_a$ 、 $E_a$ 、 $v$ 分别为 $Z=1.5 \text{ m}$ 高度处的气温、空气水汽压和风速;  $T_s$ 和 $E_s$ 分别为冰川表面温度和该温度下冰川表面的水汽压;  $L_v$ 为蒸发或升华潜热(当 $T_s=273.15 \text{ K}$ 时, 冰川表面蒸发或凝结, 为 $2.501 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 当 $T_s < 273.15 \text{ K}$ 时, 冰川表面升华或凝华, 为 $2.834 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

$T_s$ 和 $E_s$ 由以下公式<sup>[37-38]</sup>获得。

$$L_{\uparrow} = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (7)$$

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{L_{\uparrow}}{\sigma}} \quad (8)$$

$$E_s = 6.112 \exp \left( \frac{17.67 T_s}{T_s + 243.5} \right) \quad (9)$$

式中:  $\varepsilon$ 为冰雪面的比辐射率, 可以把冰雪面作为黑体源表面(约为1);  $\sigma$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ )。

$\varphi_m$ 、 $\varphi_h$ 、 $\varphi_v$ 分别为动量、热量、水汽通量的无量纲函数, 可用理查逊数表示<sup>[30]</sup>。

当 $Ri_b > 0$ 时,

$$(\varphi_m \varphi_h)^{-1} = (\varphi_m \varphi_v)^{-1} = (1 - 5 Ri_b)^2 \quad (10)$$

当 $Ri_b < 0$ 时,

$$(\varphi_m \varphi_h)^{-1} = (\varphi_m \varphi_v)^{-1} = (1 - 16 Ri_b)^{0.75} \quad (11)$$

理查逊数 $Ri_b$ 表征大气层结稳定性, 可由以下



公式获得。

$$Ri_b = \frac{g(T_a - T_s)(Z - Z_{om})}{T_a v^2} \quad (12)$$

式中:  $g$  为重力加速度 ( $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )。在计算时,  $Z_{om}$  数值非常小, 可以近似为 0。在计算感热、潜热过程中, 动量粗糙长度  $Z_{om}$ 、热量粗糙长度  $Z_{oh}$ 、水汽通量粗糙长度  $Z_{ov}$  可认为是相等的, 计算公式为

$$Z_{om} = \exp\left(\frac{v_2 \ln z_1 - v_1 \ln z_2}{v_2 - v_1}\right) \quad (13)$$

式中:  $Z_1=1.5 \text{ m}$ ;  $Z_2=3.5 \text{ m}$ ;  $v_1$  和  $v_2$  分别为相应高度处的风速。公式使用时, 要满足<sup>[39]</sup>: ①大气处于近中性层结, 理查逊数  $Ri_b$  介于  $-0.02 \sim 0.02$ ; ②  $v_2 > v_1$ , 且  $v_1 \geq 3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

8 月 24 日至 9 月 3 日期间, 冰川下垫面为裸冰, 经计算,  $Z_{om}$  的数值设定为  $1.8 \text{ mm}$ ; 9 月 4 日以后出现固态降水, 下垫面为积雪, 经计算,  $Z_{om}$  数值设定为  $0.8 \text{ mm}$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 天气条件判定

本研究的观测期为 2011 年 8 月 24 日 - 9 月 6 日, 共 14 天, 根据云量因子判定天气条件得到图 2 结果。图中显示 8 月 24 - 28 日, 共计 5 天, 为晴朗少云日; 8 月 29 - 31 日、9 月 1 日、3 日、6 日, 共计 6 天, 为多云日; 9 月 2 日、4 日、5 日, 共计 3 天, 为阴天。根据 AWS 的实测降水资料, 在 9 月 4 - 6 日还发生了少许降水。本文利用临界气温法判定降水的状态<sup>[40]</sup>。根据 AWS 实测的气温资料, 降水时的

气温低于临界气温 ( $0^\circ\text{C}$ ) 时, 降水为固态降水; 气温高于  $2^\circ\text{C}$  时, 降水为降雨; 气温介于两者之间时, 降水为固液混合态。观测期内降水发生时气温低于  $0^\circ\text{C}$ , 因此判定为固态降水。

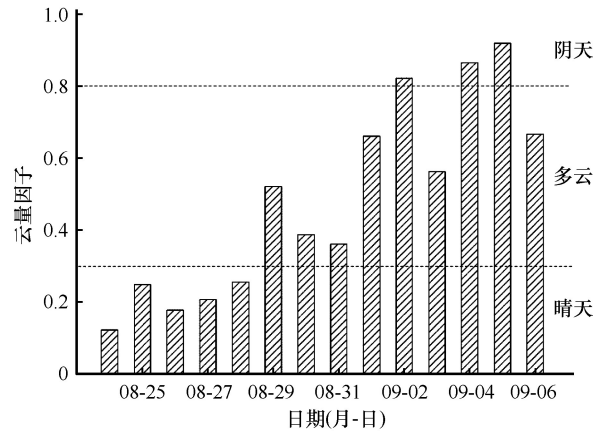


图2 老虎沟 12 号冰川海拔 4 550 m 处云量因子日均值 (2011 年 8 月 24 日 - 9 月 6 日)

Fig. 2 Daily mean cloud factor at the elevation of 4 550 m in the Laohugou Glacier No. 12 (Aug. 24 - Sept. 6, 2011)

#### 3.2 辐射收支特征

由图 3(a)可以看出晴天时辐射四分量平均日变化曲线较为平滑, 向下短波辐射在日出前后最小, 于 14:00 达到最大值  $988.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。祁连山七一冰川晴天向下短波辐射最大值出现时间为北京时间 13:20 左右<sup>[41]</sup>。向上短波辐射与向下短波辐射的变化趋势一致, 但是变化幅度比向下短波的变化幅度小。向下和向上短波辐射的日均值分别为

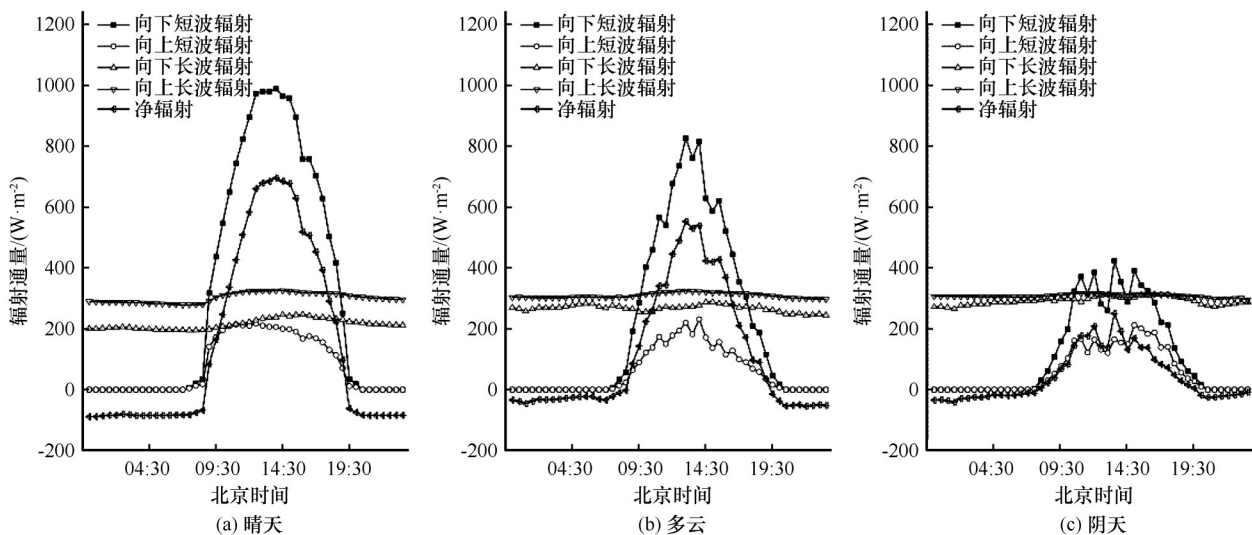


图3 老虎沟 12 号冰川海拔 4 550 m 处不同天气条件下各辐射分量的日内变化

Fig. 3 Hourly variations of the radiation components under fine day (a), cloudy day (b) and overcast day (c) at the elevation of 4 550 m in the Laohugou Glacier No. 12

$318.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $79.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，向下和向上长波辐射的日均值分别为  $215.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $301.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。向上长波辐射的最大值出现在 14:30，相比向下短波辐射的最大值出现时间滞后了 0.5 h。其原因可能是向上长波辐射的大小受冰川表面温度的控制，向下短波辐射给冰川表面带来热量达到峰值后，才使得向上长波辐射达到峰值，因此在时间上有滞后。夜间净辐射为负，白天随着太阳短波辐射的增大，净辐射为正，日均值为  $152.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

受云量等因素的影响，多云时辐射各分量的变化曲线不像晴朗少云时平滑。从图 3(b)中可以看出，辐射各分量的变化曲线波动变大，振幅变小。由于云的吸收和反射作用，向下短波辐射日均值为  $216.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，与晴天相比降低了  $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  左右，而向上短波辐射日均值为  $59.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，与晴天相差不大。水汽的凝结能力增强导致了云量的增加，因此向下长波辐射相比晴天增大约  $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。向上长波辐射日均值为  $308.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，与晴天时相近。

阴天时，天空中的云量超过了 80%，随着云量的增加，太阳辐射能的各个分量在白天及夜间均出

现不规则的波动现象，与冯健武等<sup>[42]</sup>对珠峰绒布河谷地区阴天下的辐射分量曲线分析相一致。图 3(c)中向下短波辐射减少，日均值为  $118.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，与晴天相比降低了  $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。向下长波辐射相比晴天和多云时增大，日均值达到  $291.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。而向上短波辐射、向上长波辐射相比多云天气时变化不大。

根据图 4，在观测期内，晴天、多云、阴天时的向下短波辐射平均峰值分别为  $1\,043.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $831.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $534.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，向上短波辐射的平均峰值分别为  $228.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $225.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $259.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。由 14 d 的辐射变化可知，随云量的增加，向下短波辐射值在下降，但是由于 9 月 4 日、5 日、6 日固态降水事件导致冰川表面的反照率有所增大，从而使阴天时的向上短波辐射平均峰值比较高。晴天时向上、向下长波辐射具有明显的日变化规律，但是在多云和阴天状态下规律变得不明显。由于天空中的云量增加，水汽的凝结能力加强，反射保温作用加强，导致在多云、阴天时向下长波辐射有所增加，净辐射的值在逐渐降低。

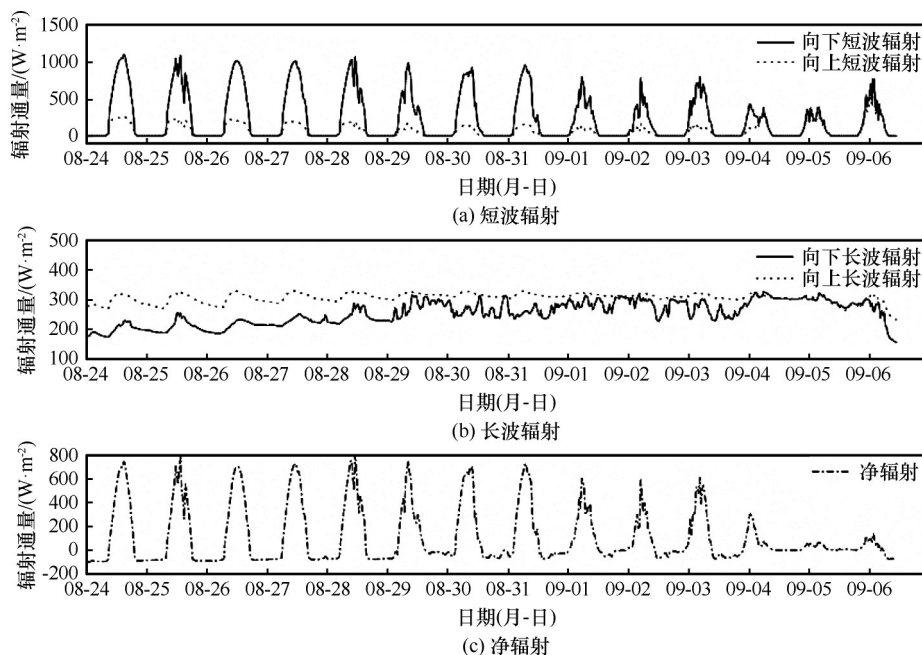


图 4 老虎沟 12 号冰川海拔 4 550 m 处辐射各分量以及净辐射的时间序列

Fig. 4 Time series of radiation components and net radiation at the elevation of 4 550 m in the Laohugou Glacier No. 12

### 3.3 反照率变化

图 5 分析了不同天气条件下的反照率变化(观测时段为北京时间 11:00 – 17:00)，整个观测期内的平均反照率为 0.33，与孙维君<sup>[39]</sup>对老虎沟 12 号

冰川消融区 8 月反照率计算数值(0.35)基本一致，与王杰<sup>[43]</sup>在七一冰川 8 月反照率实测数值(0.20)相差不大。老虎沟 12 号冰川晴天条件下的反照率平均为 0.23，反照率曲线比较光滑，是因为地表为

稳定的冰雪表面。晴朗少云的天气条件下, 云量少、气温稳定。随着云量的增加, 天空状态为多云时反照率有所增加, 平均反照率为 0.27。阴天时的反照率比晴天和多云时的反照率高很多, 平均为 0.50, 是晴天状态下的 2 倍。这是因为水汽凝结潜热的释放, 云量的增加, 云对近红外波段的太阳辐射吸收作用增强, 使得入射辐射的分光辐射比例中可见光的比例增高, 而冰雪表面在可见光波段的反照率较高, 因此使得反照率在云量增加时相对变高<sup>[44]</sup>。

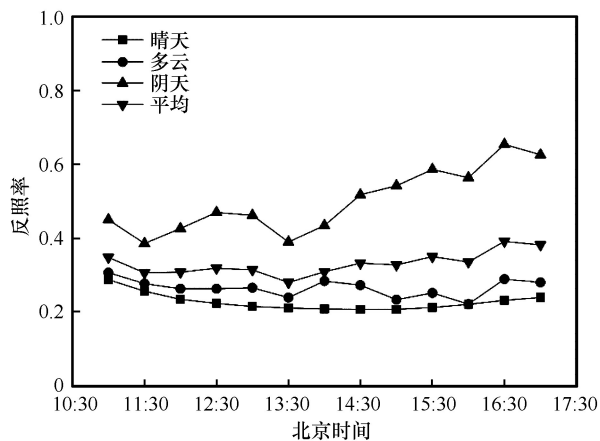
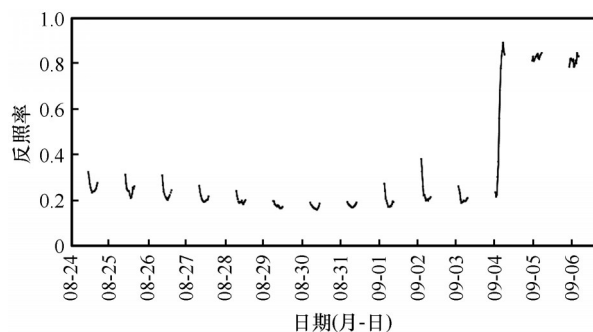


图5 老虎沟 12 号冰川海拔 4 550 m 处不同天气条件下反照率的日内变化

Fig. 5 Hourly variations of albedo under different weather conditions at 4 550 m in the Laohugou Glacier No. 12

从图 6 可以看出, 在整个观测期, 晴天地表反



注: 观测时段为北京时间 11: 00 – 17: 00

图6 老虎沟 12 号冰川海拔 4 550 m 处反照率的时间序列  
Fig. 6 Time series of albedo at the elevation of 4 550 m in the Laohugou Glacier No. 12

照率有明显的日变化, 呈“U”形分布, 在午后 13:00 – 14:00 最小, 此时气温与冰川表面温度在一天内达到最高, 冰川表面发生少许消融, 导致反照率下降。晴天时反照率数值在 0.18~0.32 之间; 在

8 月 29 日 – 9 月 1 日、3 日期间的多云天气下, 反照率在 0.16~0.27 之间波动; 9 月 4 日, 反照率由 0.21 急剧上升至 0.89, 这是因为当天发生了少许的固态降水, 改变了下垫面的状态, 反照率明显上升。而在 9 月 6 日多云天气时, 积雪还未完全消融, 反照率最高瞬时值达到 0.84。这些分析进一步表明, 反照率明显受天气状况、下垫面的影响。

### 3.4 感热和潜热通量

晴天时[图 7(a)], 感热通量日均值为  $5.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 且始终为正值, 表明气温日平均值要高于冰川表面温度, 大气向冰川表面以感热的方式输送热量。潜热通量日均值为  $-7.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 且始终为负值, 表明空气比湿小于冰川表面比湿, 冰川表面以潜热方式向大气输送热量。在白天受到太阳辐射的影响, 冰川和大气升温, 两者温差越来越小, 感热的强度要明显弱于潜热, 此时两者之和受潜热通量控制; 而夜晚冰川与大气的温差增大, 感热通量增强, 明显强于潜热, 此时两者之和受控于感热通量。

多云时[图 7(b)], 感热通量日均值为  $3.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 比晴天时的日均值减少了  $1.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。潜热通量日均值为  $-3.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 比晴天时的潜热通量  $-7.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  减弱了  $4.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。感热和潜热之和只在 10:00 – 14:00 时间段内为负值, 也就是说只在此时段内湍流通量以潜热主导, 其他时段都是以感热通量为主导。

阴天时[图 7(c)], 感热和潜热的日变化曲线规律性不明显, 曲线波动大。感热日均值为  $0.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。比晴天时的日均值小  $4.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 比多云时的日均值小  $2.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。潜热日均值为  $-1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 比晴天时减弱  $6.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 比多云时减弱  $2.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在白天感热与潜热通量之和基本为负值, 表明潜热通量占主导地位; 夜晚感热与潜热通量之和为正值, 表明夜晚感热通量占主导地位。

图 8 中显示晴天时的感热和潜热通量呈现出明显的日变化, 感热通量呈单峰的日循环, 潜热通量以及感热和潜热两者之和呈单谷的日循环。天气转变为多云时, 感热和潜热通量都有一定程度的减弱, 晴天时感热通量平均峰值为  $14.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 潜热通量平均谷值为  $-26.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 而多云时感热通量峰值为  $13.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 潜热通量谷值为  $-19.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。阴天时的感热和潜热通量以及两者之和的日循环规律基本消失, 数值在  $0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  上下波动。9



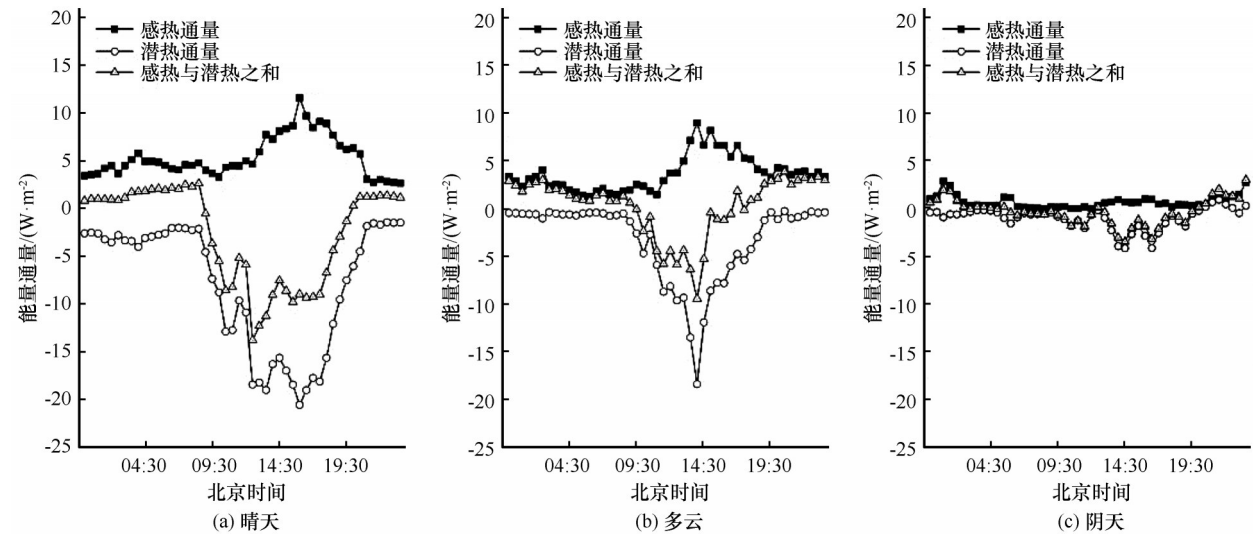


图7 老虎沟12号冰川海拔4 550 m处不同天气条件下湍流通量的日内变化

Fig. 7 Hourly variations of sensible and latent heat fluxes at the elevation of 4 550 m in the Laohugou Glacier No. 12 under fine day (a) , cloudy day (b) and overcast day (c)

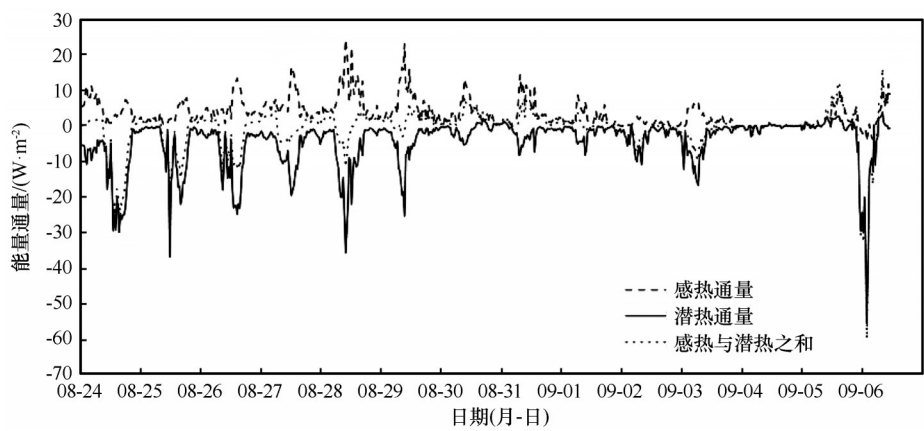


图8 老虎沟12号冰川海拔4 550 m处湍流通量的时间序列

Fig. 8 Time series of sensible and latent heat fluxes at the elevation of 4 550 m in the the Laohugou Glacier No. 12

月6日,受冰川表面和大气之间水汽压差增大的影响,潜热通量的绝对值出现较大值。

3.5 能量收支特征

图9显示的是不同天气条件下冰川消融耗热的平均日变化。晴天时,在09:00冰川表面开始消融,随后消融不断增强,在14:00–14:30期间出现了一天中最大的消融量,冰川消融耗热达到 $668.2\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,19:00基本停止消融。多云天气下也是在09:00冰川开始消融,随后消融不断增强,在13:00时达到最大消融耗热 $549.8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,19:00基本停止消融,最大消融耗热量比晴天降低了118.4  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。阴天消融开始时间是08:00,12:00达到最大消融耗热量 $207.9\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,19:30基本停止消融。阴天开始消融的时间要比晴天和多云时提前1 h,

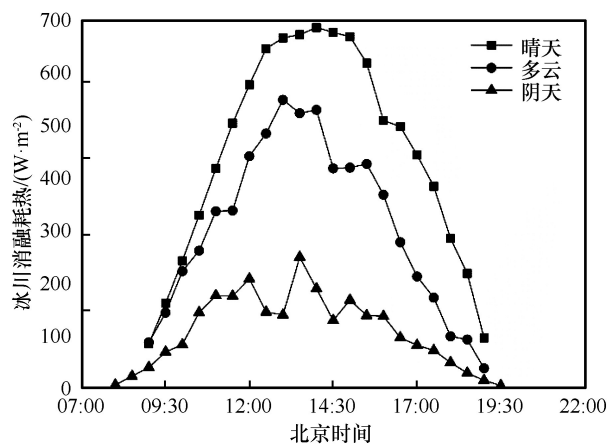


图9 老虎沟12号冰川海拔4 550 m处不同天气条件下消融耗热( $Q_M$ )的日内变化

Fig. 9 Hourly variations of ablation heat consumption ( $Q_M$ ) under different weather conditions at the elevation of 4 550 m in the Laohugou Glacier No. 12

停止消融的时间比晴天和多云时滞后 0.5 h。其原因可能是阴天时天空中的云量增加, 导致向下长波辐射增加, 即大气逆辐射增强, 对冰川表面的升温 and 保温作用加强, 使得阴天时的消融要比晴天和多云天气提前开始, 推迟结束。

由图 10 可以看出, 冰川表面消融耗热有明显的日变化规律。晴天一般在午后出现消融峰值, 平均峰值为  $739.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。多云时消融峰值有所降低, 平均峰值为  $582.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。阴天时冰川消融峰值进一步降低, 平均峰值为  $324.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。到 9 月 5 日、6 日消融耗热非常低, 原因是云量的增加使得向下短波辐射降低, 冰川表面受固态降水影响, 反照率上升, 消融过程减弱, 消融耗热降低。

不同天气条件下的冰川表面能量收支如表 2 所示, 由各能量收支项的平均值可以看出, 晴天条件下的能量收支过程最强, 其次是多云, 而阴天时的能量收支过程最弱。在三种天气条件下, 冰川表面能量的主要来源是净短波辐射, 消融耗热是能量支出项的主要内容, 这与孙维君等<sup>[30]</sup>在老虎沟 12 号冰川积累区能量收支研究结果、陈亮等<sup>[41]</sup>在七一冰川消融期能量收支研究结果一致。

冰川表面能量收入项中, 晴天、多云、阴天时

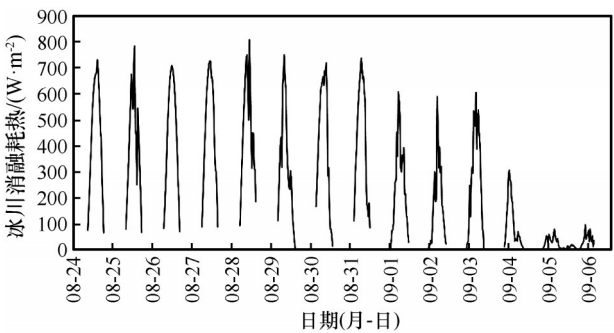


图 10 老虎沟 12 号冰川海拔 4 550 m 处消融耗热 ( $Q_M$ ) 的时间序列

Fig. 10 Time series of ablation heat consumption ( $Q_M$ ) at the elevation of 4 550 m in the Laohugou Glacier No. 12

平均净短波辐射分别占有收入项比重的 98%、97%、98%, 占绝对主导, 感热通量分别占有比重的 2%、3%、2%。在能量支出项中, 晴天时净长波辐射占能量支出项的比重为 35%, 潜热通量占 3%, 冰川消融耗热所占的比重最大, 为 62%; 多云天气下净长波辐射占能量支出项的 31%, 潜热通量占 5%, 冰川消融耗热占有所有能量支出项的 64%; 阴天时的能量支出项中, 冰川消融耗热所占比重最大, 为 75%, 其次是净长波辐射 (23%), 最后是潜热通量 (2%)。这表明在能量支出项中, 天气状态以晴

表 2 老虎沟 12 号冰川海拔 4 550 m 处不同天气条件下的能量收支											
Table 2 Energy budget at the elevation of 4 550 m in the Laohugou Glacier No. 12 under different weather conditions											
天气	日期	收入/( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )		支出/( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )			收入/%		支出/%		
		$S$	$H$	$L$	$LE$	$Q_M$	$S$	$H$	$L$	$LE$	$Q_M$
晴天	08-24	248.4	4.9	-97.8	-11.4	-144.2	98	2	39	4	57
	08-25	223.3	2.7	-88.8	-6.4	-130.8	99	1	39	3	58
	08-26	242.9	5.1	-92.4	-7.8	-147.8	98	2	37	3	60
	08-27	243.3	6.0	-82.4	-6.1	-160.9	98	2	33	2	65
	08-28	235.6	8.0	-70.3	-8.0	-165.2	97	3	29	3	68
	平均	238.7	5.3	-86.3	-7.9	-149.8	98	2	35	3	62
多云	08-29	179.9	6.3	-49.9	-4.7	-131.6	97	3	27	3	70
	08-30	213.0	3.9	-47.2	-1.3	-168.5	98	2	22	1	77
	08-31	215.6	4.0	-57.0	-1.6	-161.1	98	2	26	1	73
	09-01	141.3	2.6	-32.0	-1.7	-110.1	98	2	22	1	77
	09-03	159.3	2.0	-38.4	-4.6	-118.3	99	1	24	3	73
	09-06	32.2	3.1	-23.2	-6.4	-5.6	91	9	66	18	16
阴天	平均	156.9	3.7	-41.3	-3.4	-115.9	97	3	31	5	64
	09-02	100.5	1.1	-25.9	-2.7	-73.2	99	1	25	3	72
	09-04	57.1	0.4	-20.8	-0.6	-36.2	99	1	36	1	63
	09-05	17.7	0.5	-1.4	-0.2	-16.9	97	3	8	1	91
	平均	58.4	0.7	-16.0	-1.2	-42.1	98	2	23	2	75

注:  $S$  为净短波辐射;  $H$  为感热通量;  $L$  为净长波辐射;  $LE$  为潜热通量;  $Q_M$  为消融耗热。



天-多云-阴天变化时,净长波辐射所占比例呈递减的状态,消融耗热所占比例呈递增的状态,潜热通量所占的比例变化不大。

#### 4 结论

利用2011年8月24日-9月6日老虎沟12号冰川海拔4 550 m处的观测资料,分析了不同天气条件下的能量收支特征。得出以下结论:

(1) 云量是影响冰川表面辐射收支的重要因素之一。受云量的影响,晴天时向下短波辐射日均值为 $318.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,大概是多云时( $216.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )的1.5倍,是阴天时( $118.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )的3倍。水汽凝结潜热的释放以及云体对向下短波辐射的吸收会使大气、云体增温,从而加强向下长波辐射,故向下长波辐射大小排序为:晴天( $215.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )<多云( $267.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )<阴天( $291.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )。

(2) 观测期14 d反照率的平均值为0.33,与在该地区2011年8月反照率计算结果(0.35)<sup>[39]</sup>相近。晴天时平均反照率为0.23,且反照率曲线呈平滑的抛物线状;多云天气时,反照率略有上升,平均为0.27;阴天时发生固态降水事件,反照率平均达到0.50,是晴天条件下的2倍多。

(3) 观测期内,晴天时感热和潜热通量具有明显的单峰和单谷变化趋势,晴天时感热平均值为 $5.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,潜热的平均值为 $-7.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。天气为多云时,感热和潜热通量的值出现了一定程度的减弱,日变化的幅度有所减小;阴天时感热和潜热通量在 $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 上下波动,日变化规律基本消失。

(4) 晴天、多云和阴天这三种天气条件下冰川表面能量的主要来源都是净短波辐射,消融耗热是最主要的能量支出项,这与大部分冰川地区表面能量收支特征研究结果一致<sup>[30,41,45]</sup>。晴天时的能量支出项中,净长波辐射、潜热通量、消融耗热所占的比例分别为35%、3%、62%;多云时的能量支出中,净长波辐射(31%)所占比例降低,潜热通量(5%)所占比例基本不变,消融耗热(64%)所占比例增大;阴天时的能量支出中,消融耗热(75%)占主导地位,其次是净长波辐射(23%),最后是潜热通量(2%)。

#### 参考文献(References):

[1] Li Shuai, Hu Liequn, He Qing, et al. Surface radiation budget in hinterland of the Taklamakan Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(4): 1035-1044. [李帅, 胡列群, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地地表辐射收支特征研究[J]. *中国沙*

漠, 2012, 32(4): 1035-1044.]

- [2] Zhang Haihong, Xiao Hongbin, Qi Donglin, et al. Features of land surface process over wetland at Tibetan Plateau during soil freezing and thawing periods[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2017, 75(3): 481-491. [张海宏, 肖宏斌, 祁栋林, 等. 青藏高原湿地土壤冻结、融化期间的陆面过程特征[J]. *气象学报*, 2017, 75(3): 481-491.]
- [3] Huai Baojuan, Li Zhongqin, Sun Meiping, et al. Glaciers change in the Tailan River watershed in the last 40 years[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(2): 229-236. [怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. 近40 a来天山台兰河流域冰川资源变化分析[J]. *地理科学*, 2014, 34(2): 229-236.]
- [4] Han Binghong, Zhou Bingrong, Sun Ying, et al. The characteristics of soil temperature variations and heat exchange in freeze-thaw period over southern alpine grasslands in Qinghai Province[J]. *Climate Change Research*, 2018, 14(5): 456-464. [韩炳宏, 周秉荣, 孙瑛, 等. 青海南部冻融区高寒草地土壤温度变化及热量传输特征[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(5): 456-464.]
- [5] Chen Shiqiang, Lü Shihua, Ao Yinhuai, et al. Characteristics of radiation and energy balance over an oasis under different synoptic and irrigation conditions in summer[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(3): 532-538. [陈世强, 吕世华, 奥银焕, 等. 夏季不同天气背景和灌溉条件下绿洲地表辐射和能量平衡特征[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(3): 532-538.]
- [6] Huai Baojuan, Li Zhongqin, Wang Feiteng, et al. Variation of glaciers in the Sawuer Mountain within Chinese territory during 1959-2013[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(5): 1141-1149. [怀保娟, 李忠勤, 王飞腾, 等. 1959-2013年中国境内萨吾尔山冰川变化特征[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(5): 1141-1149.]
- [7] Tang Xinying, Han Lin, Wang Ge, et al. Analysis of the characteristics of radiation budget upon the complicated underlying surfaces in southeastern Tibet[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(4): 924-930. [唐信英, 韩琳, 王鸽, 等. 藏东南地区复杂下垫面辐射收支特征分析[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(4): 924-930.]
- [8] Gao Xin, Ye Baisheng, Zhang Shiqiang, et al. Glacier runoff variation and its influence on river runoff during 1961-2006 in the Tarim River basin, China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2010, 40(5): 654-665. [高鑫, 叶柏生, 张世强, 等. 1961-2006年塔里木河流域冰川融水变化及其对径流的影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(5): 654-665.]
- [9] Qing Wenwu, Liu Junfeng, Yang Yuquan, et al. Uncertainty analysis of the parameters of the temperature-index method: a case study of Shiyi Glacier in Qilian Mountains[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(9): 937-945. [卿文武, 刘俊峰, 杨钰泉, 等. 基于气温的物质平衡模型的参数不确定性分析: 以祁连山十一冰川为例[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(9): 937-945.]
- [10] Qing Wenwu, Chen Rensheng, Liu Shiyin, et al. Research and application of two kinds of temperature-index model on the Koxkar Glacier[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(4): 409-416. [卿文武, 陈仁升, 刘时银, 等. 两类度日模型在天山科其喀尔巴西冰川消融估算中的应用[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(4): 409-416.]
- [11] Wang Ninglian, He Jianqiao, Pu Jianchen, et al. Variations in equilibrium line altitude of the Qiyi Glacier, Qilian Mountains, over the past 50 years[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(33): 3810-3817. [王宁练, 贺建桥, 蒲健辰, 等. 近50年

- 来祁连山七一冰川平衡线高度变化研究[J]. 科学通报, 2010, 55(32): 3107–3115.]
- [12] Wang Ninglian, Zhang Xiangsong. Mountain glacier fluctuations and climate 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.]
- [13] Yang Wei, Yao Tandong, Guo Xiaofang, et al. Mass balance of a maritime glacier on the southeast Tibetan Plateau and its climatic sensitivity[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(17): 9579–9594.
- [14] Yang Wei, Yao Tandong, Xu Baiqing, et al. Characteristics of recent temperate glacier fluctuations in the Parlung Zangbo River basin, southeast Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(20): 2097–2102. [杨威, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 近期藏东南帕隆藏布流域冰川的变化特征[J]. 科学通报, 2010, 55(18): 1775–1780.]
- [15] Sun Weijun, Qin Xiang, Wang Yetang, et al. The response of surface mass and energy balance of a continental glacier to climate variability, western Qilian Mountains, China[J]. *Climate Dynamics*, 2017, 50: 3557–3570.
- [16] Wang Shaoying, Zhang Yu, Lü Shihua, et al. Seasonal variation characteristics of radiation and energy budgets in alpine meadow ecosystem in Maqu grassland[J]. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(3): 605–614. [王少影, 张宇, 吕世华, 等. 玛曲高寒草甸地表辐射与能量收支的季节变化[J]. 高原气象, 2012, 31(3): 605–614.]
- [17] Gao Xin, Zhang Shiqiang, Ye Baisheng, et al. Glacier runoff change in the upper stream of Yarkant River and its impact on river runoff during 1961–2006[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(3): 445–453. [高鑫, 张世强, 叶柏生, 等. 1961–2006年叶尔羌河上游流域冰川融水变化及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2010, 32(3): 445–453.]
- [18] Qing Wenwu, Han Chuntan, Liu Junfeng. Surface energy balance of Bayi Ice Cap in the middle of Qilian Mountains, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(6): 1229–1240.
- [19] Sun Weijun, Qin Xiang, Du Wentao, et al. Ablation modeling and surface energy budget in the ablation zone of Laohugou Glacier No. 12, western Qilian Mountains, China[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(66): 111–120.
- [20] Konya K, Matsumoto T. Influence of weather conditions and spatial variability on glacier surface melt in Chilean Patagonia[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 102(1/2): 139–149.
- [21] Sicart J E, Wagnon P, Ribstein P. Atmospheric controls of the heat balance of Zongo Glacier (16 °S, Bolivia)[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D12) [2019-05-20]. [http://www.seao2.info/\\_TMP/SicartJGR-Zg2005.pdf](http://www.seao2.info/_TMP/SicartJGR-Zg2005.pdf).
- [22] Wang Weizhen, Xu Ziwei, Liu Shaomin, et al. The characteristics of heat and water vapor fluxes over different surfaces in the Heihe River basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 714–723. [王维真, 徐自为, 刘绍民, 等. 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 714–723.]
- [23] Chen Shiqiang, Lü Shihua, Ao Yinhuang, et al. Characteristics of the radiation on snow cover at the margin of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(5): 866–870. [陈世强, 吕世华, 奥银焕, 等. 青藏高原边缘积雪辐射特征[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 866–870.]
- [24] Tang Tian, Wang Lei, Wen Xiaohang. A study of the radiation and surface energy balance around the Ngoring Lake in source regions of the Yellow River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1462–1473. [唐恬, 王磊, 文小航. 黄河源鄂陵湖地区辐射收支和地表能量平衡特征研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1462–1473.]
- [25] Chinese Academy of Sciences. Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology. *Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology*, Chinese Academy of Sciences, No. 5: glacier variations and utilizations in the Qilian Mountains[M]. Beijing: Science Press, 1985. [中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊第5号: 祁连山冰川变化及利用[M]. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [26] Research Team of Mountain Ice and Snow Utilizations of the Chinese Academy of Sciences. *Investigation report of present glaciers in the Qilian Mountains*[M]. Beijing: Science Press, 1959. [中国科学院高山冰雪利用研究队. 祁连山现代冰川考察报告[M]. 北京: 科学出版社, 1959.]
- [27] Zhang Qibing, Kang Shichang, Wang Jing. Elevation change of the Laohugou Glacier No. 12 in the western Qilian Mountains from 2000 to 2014[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(4): 733–740. [张其兵, 康世昌, 王晶. 2000–2014年祁连山西段老虎沟 12 号冰川高程变化[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 733–740.]
- [28] Zhang Xiaopeng, Qin Xiang, Wu Jinkui, et al. Response of glacier runoff to climate change in the Laohugou basin, Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(1): 148–155. [张晓鹏, 秦翔, 吴锦奎, 等. 祁连山老虎沟流域强消融期径流对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 148–155.]
- [29] Chen Jizu, Qin Xiang, Wu Jinkui, et al. Simulating the energy and mass balances on the Laohugou Glacier No. 12 in the Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 38–47. [陈记祖, 秦翔, 吴锦奎, 等. 祁连山老虎沟 12 号冰川表面能量和物质平衡模拟[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 38–47.]
- [30] Sun Weijun, Qin Xiang, Ren Jiawen, et al. Surface energy balance in the accumulation zone of the Laohugou Glacier No. 12 in the Qilian Mountain during ablation period[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 38–46. [孙维君, 秦翔, 任贾文, 等. 祁连山老虎沟 12 号冰川积累区消融期能量平衡特征[J]. 冰川冻土, 2011, 33(1): 38–46.]
- [31] Sun Weijun, Qin Xiang, Xu Yuetong, et al. Annual variations of the components of radiation on the Laohugou No. 12 Glacier in the Qilian Mountains[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(3): 347–354. [孙维君, 秦翔, 徐跃通, 等. 祁连山老虎沟 12 号冰川辐射各分量年变化特征[J]. 地球科学进展, 2011, 26(3): 347–354.]
- [32] Sun Weijun, Li Yan, Qin Xiang, et al. Characteristics of micrometeorological elements in accumulation zone of Laohugou Glacier No. 12 in Qilian Mountains[J]. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(6): 1673–1681. [孙维君, 李艳, 秦翔, 等. 祁连山老虎沟 12 号冰川积累区微气象特征[J]. 高原气象, 2013, 32(6): 1673–1681.]
- [33] China Meteorological Administration. *Specifications for surface meteorological observation*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005. [中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2005.]
- [34] Wagnon P, Sicart J E, Berthier E, et al. Wintertime high-altitude surface energy balance of a Bolivian Glacier, Illimani, 6340 m asl[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108 (D6) [2019-05-20]. <https://www.cosis.>

- net/members/meetings/abstracts/file.php/8/14881/jpdf/EAE03-J-02098.pdf.
- [35] 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/OL]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109 (D18) [2019-05-20]. <https://core.ac.uk/download/pdf/39843679.pdf>.
- [36] Zhang Yiping, Li Yourong, Wang Jinxin, et al. The characteristics of indoor air temperature and humidity of south and north side of city buildings in winter on low-latitude plateau[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2001, 17(3): 265 – 272. [张一平, 李佑荣, 王进欣, 等. 低纬高原城市冬季南北朝向室内温湿特征的初步分析[J]. 热带气象学报, 2001, 17(3): 265 – 272.]
- [37] Oerlemans J, Klok E J. Energy balance of a glacier surface: analysis of automatic weather station data from the Morteratschgletscher, Switzerland[J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2002, 34(4): 477 – 485.
- [38] Sheng Peixuan. Atmospherics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003. [盛裴轩. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.]
- [39] Sun Weijun. Modelling of surface energy-mass balance on the Laohugou Glacier No. 12 in the Qilian Mountains, China[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2012. [孙维君. 祁连山老虎沟 12 号冰川能量-物质平衡模拟研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2012.]
- [40] Wang Sheng, Pu Jianchen, Wang Ninglian. Study of mass balance and sensibility to climate change of Qiyi Glacier in Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1214 – 1221. [王盛, 蒲健辰, 王宁练. 祁连山七一冰川物质平衡及其对气候变化的敏感性研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1214 – 1221.]
- [41] Chen Liang, Duan Keqin, Wang Ninglian, 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.]
- [42] Feng Jianwu, Liu Huizhi, Zou Han, et al. Characteristics of micrometeorological elements and turbulent fluxes in the surface layer in Rongbuk Valley on northern slope of Mount Qomolangma[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(6): 1244 – 1253. [冯健武, 刘辉志, 邹捍, 等. 珠峰绒布河谷近地面层气象要素及湍流通量变化[J]. 高原气象, 2007, 26(6): 1244 – 1253.]
- [43] Wang Jie. The spatiotemporal variations and parameterizations of albedo on nine representative glaciers in western China[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2012. [王杰. 中国西部典型冰川反照率变化特征与参数化模拟[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2012.]
- [44] Jiang Xi, Wang Ninglian, He Jianqiao, et al. A study of parameterization of albedo on the Qiyi Glacier in Qilian Mountains, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(1): 30 – 37. [蒋熹, 王宁练, 贺建桥, 等. 祁连山七一冰川反照率的参数化研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(1): 30 – 37.]
- [45] Jiang Xi, Wang Ninglian, Yang Shengpeng, et al. The surface energy balance on the Qiyi Glacier in Qilian Mountains during the ablation period[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(4): 686 – 695. [蒋熹, 王宁练, 杨胜朋, 等. 祁连山七一冰川暖季能量平衡及小气候特征分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 686 – 695.]



## Characteristics of energy budget under different weather conditions in the ablation area of the Laohugou Glacier No. 12, Qilian Mountains

ZHANG Jiajia<sup>1</sup>, SUN Weijun<sup>1</sup>, DU Wentao<sup>2</sup>, CHEN Jizu<sup>2</sup>, QIN Xiang<sup>2</sup>

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China; 2. State Key Laboratory of

Cryospheric Science / Qilian Shan Station of Glaciology and Ecologic Environment, Northwest Institute of

Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The connection between the glacier and the atmosphere was established by the energy balance model. Based on the meteorological data from August 24 to September 6, 2011, at the elevation of 4 550 m of the Laohugou Glacier No. 12 in the Qilian Mountains, the characteristics of energy budget under different weather conditions were analyzed by the energy balance model. It is found that, the downward short wave radiation on fine days ( $318.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) is about 1.5 times as much as that on cloudy days and three times as much as that on overcast days. With the variation of weather conditions from fine to cloudy, the downward long wave radiation shows an increasing trend. Downward long wave radiation in fine days ( $215.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) < downward long wave radiation in cloudy days ( $267.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) < downward long wave radiation in overcast days ( $291.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Due to the influence of solid precipitation, the glacier albedo in overcast days (0.50) is more than twice as large as in fine days. Maximum ablation heat consumption in fine days ( $739.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > maximum ablation heat consumption in cloudy days ( $582.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > maximum ablation heat consumption in overcast days ( $324.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Net short wave radiation (98%) is the main source of energy income. However, there is significant differences in the proportion of energy output due to weather conditions. Under the three weather conditions, the proportion of net long wave radiation is 35%, 31% and 23%, respectively. The proportion of ablation heat consumption reached 62%, 64% and 75%, respectively. The proportion of latent heat flux varied little.

**Key words:** Laohugou Glacier No. 12; ablation area; different weather conditions; energy budget

(责任编辑: 李忠勤; 编辑: 武俊杰)