

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0073

XIN Huijuan, HE Yuanqing, NIU Hewen, et al. Near-surface meteorological characteristics on the Baishui Glacier No. 1, Mt. Yulong[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 676-684. [辛惠娟, 何元庆, 牛贺文, 等. 玉龙雪山白水1号冰川近地层气象要素变化特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 676-684.]

玉龙雪山白水1号冰川近地层气象要素变化特征

辛惠娟¹, 何元庆², 牛贺文², 毛焕兰³

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 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, 甘肃 兰州 730000; 3. 云南省丽江市气象局, 云南 丽江 674100)

摘要: 利用2011年10月1日至2012年9月30日玉龙雪山白水1号冰川海拔4500 m气象观测资料, 对位于我国最南、亚欧大陆距赤道最近的海洋型冰川区近地层气象要素基本特征进行了分析, 并与同海拔大陆型冰川——祁连山老虎沟12号冰川区近地层气象要素进行了对比。研究表明: 海洋型与大陆型冰川区气温逐时变化呈单峰单谷型分布, 均表现出升温快降温慢的特点, 观测点5 m层气温高于2 m层气温, 二者差值日变化呈单峰型, 峰值出现在北京时间12:00; 受季风气候影响, 研究区干季相对湿度小, 湿季相对湿度大, 年均相对湿度为73.3%, 与相对湿度相比, 研究区水汽压变化更受控于气温; 两冰川区冬半年气压低, 夏半年气压高, 均表现为典型的“高山型”气压; 受冰川“冷效应”影响研究区干季风速大, 湿季风速小, 因冰川规模较小, 研究区冰川风不发达, 谷风发育强劲; 受季风期云雨影响, 白水1号冰川区总辐射在季风前期达到最大值, 季风期达到极小值, 年均总辐射量低于老虎沟12号冰川同海拔地区。

关键词: 白水1号冰川; 近地层; 气象要素特征

中图分类号: P404 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)04-0676-09

0 引言

有“水塔”之称的山地冰川, 酝酿于层峦叠嶂的山区, 被誉为“大陆温度计”, 因其对气候变化记录和反应的灵敏性被众多学者所关注。近年来在全球气候变暖背景下, 山区变暖趋势更加显著^[1-4], 部分表现出变暖信号提前, 变暖强度加大的态势。与此同时, 全球山地冰川也出现不同程度的缩减^[5-6]。但因高海拔山区自然环境恶劣, 长期而连续的气象观测资料极其匮乏, 致使从微观尺度研究冰川对气候变化的响应机理遇到瓶颈。近年来随着科学观测与遥感信息等技术手段的创新与应用, 使高海拔山区, 乃至极高海拔冰川区的连续气象观测成为现实。2000年以来, 依托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的高寒网络监测系统, 在我国西部各高海拔山地冰川

区, 陆续开展了连续的山地冰川气象观测, 填补了我国高海拔冰川区气象观测的空白, 并取得了一系列研究成果。在天山地区, 张勇等^[7]、韩海东^[8]分别对天山南坡科其卡尔巴契冰川消融期近地层气象的基本特征进行了分析, 金爽等^[9]探讨了托木尔峰青冰滩72号冰川水文气象特征, 王敏仲等^[10]、张东启等^[11]则分别对乌鲁木齐1号冰川近雪面气象要素特征及冰川制冷的小气候效应进行了研究。对珠峰地区的山地气候研究开展得更早, 研究结果也较多, 杨兴国等^[12-13]对珠峰北坡冰川表面及该区立体气象要素变化进行了一系列研究, 邹悍等^[14]对珠峰北坡的局地环流进行了深入分析, 何立富等^[15]则利用奥运火炬传递珠峰气象保障队的第一手气象观测资料, 对珠峰气象要素的空间变化特征进行了系统分析。另外对祁连山老虎沟12号冰川^[16]、念青唐古拉山拉弄冰川^[17]、西夏邦马峰抗

收稿日期: 2017-11-05; 修订日期: 2018-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41690143; 41401083); 兰州交通大学青年科学基金项目(2018005)资助

作者简介: 辛惠娟(1985-), 女, 吉林磐石人, 讲师, 2016年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位, 从事气候与冰川变化研究。E-mail: xinhj642@163.com.

物热冰川^[18]等其它冰川区近地层气象特征也进行了研究。在玉龙雪山地区, 燕兴国等^[19]对白水河1号冰川消融期表面流速特征进行了分析。这些对近冰川区气象要素的研究主要集中于亚大陆型和极大陆型冰川区, 对海洋型冰川区研究较少, 所以海洋型冰川区系统的、长尺度的、高精度的气象观测数据显得更为珍贵。而海洋型冰川变化对气候变化的响应较大陆型冰川更加敏感, 因此在海洋型冰川区开展系统的气象观测研究, 对深入探究海洋型冰川与大陆型冰川对气候变化的响应机理的差异性具有重要意义。基于此本文选取位于我国最南、亚欧大陆纬度最低的现代海洋型冰川区——玉龙雪山为研究对象, 依托玉龙雪山冰川与环境观测研究站(玉龙站)在白水1号冰川近地层架设的自动气象站, 获取稀有的海洋型冰川区原始气象观测资料, 对海洋型冰川区近地层气象要素的基本特征进行系统研究, 并与同海拔地区大陆型冰川进行了对比, 用以丰富我国不同类型高海拔冰川区气象观测研究, 为深入探讨海洋型冰川波动对气候变化的响应机理奠定基础。

1 研究区概况

玉龙雪山(5 596 m, 26° 59′ ~ 27° 17′ N, 100° 4′ ~ 100° 15′ E), 位于云南省丽江市北部25 km处, 地处青藏高原东南缘, 横断山系南端, 是青藏高原最南端也是欧亚大陆距离赤道最近的海洋型冰川区。据资料记载^[20], 该区分布有19条现代冰川(图1), 总面积11.61 km², 该区最大的冰川是位于雪山东坡的白水1号冰川, 长2.7 km, 面积1.52

km², 积累区广阔平坦, 面积约为1 km², 雪线高度介于4 800 ~ 5 000 m。玉龙雪山近南北走向, 地貌格局主要受南北向断裂控制, 西侧为相对高差达3 000 m的大峡谷——虎跳峡, 东麓从北向南为大具盆地、甘海子洼地和丽江盆地。该区大部分冰川集中发育在东坡(15条, 总面积10.86 km²), 最大的白水1号冰川为山谷冰川, 基本呈西南-东北走向, 西高东低, 南北两侧有高低不等的山石环绕。冬季西风环流控制该区域, 气温干燥少雨; 夏季来自印度洋的西南季风与来自太平洋的东南季风交错控制本区, 带来丰沛的降水(雨季降水量站年降水量85% ~ 99%)。据统计丽江市年均气温为12.7 °C, 年均降水总量为966.7 mm。

2 资料来源和处理

自2008年10月起陆续在玉龙雪山白水1号冰川末端4 300 m, 冰川消融区(冰塔林区)4 500 m和冰川物质平衡线附近4 800 m架设了3台自动气象站, 位置如图1所示, 各自动气象站下垫面特征及观测时间如表1所示。气象站均采用美国Campbell Scientific, Inc.公司生产的传感器(表1), 数据采集器为CR1000, 每10 s采集一次数据, 30 min输出一次平均值。由于冰川末端站和冰川区4 800 m处气象站冬半年因风吹雪等原因气象站被雪掩埋, 数据缺测量大, 仅4 500 m处冰塔林气象站观测数据连续完整, 因此本文主要选取冰塔林站观测要素为研究对象, 以冰川末端站及冰川区4 800 m站作辅助说明。本文选取2011年10月1日-2012年9月30日白水1号冰川4 500 m处自动气象站

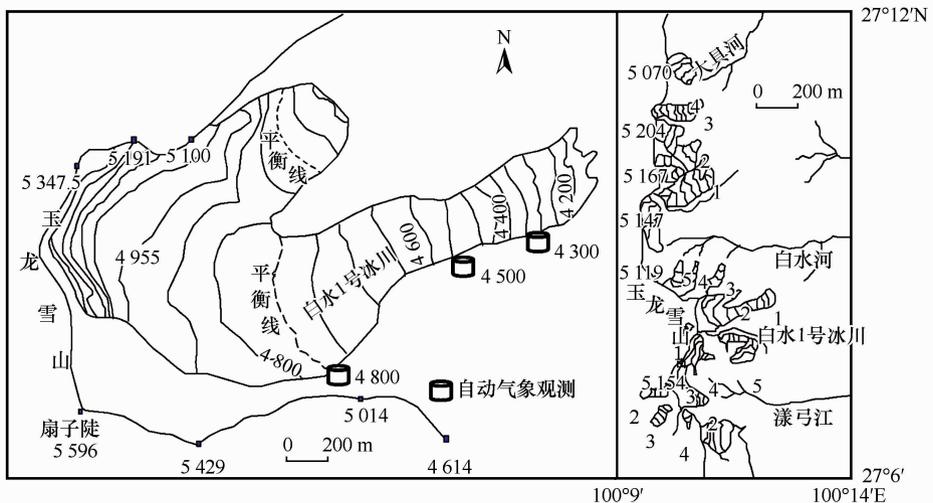


图1 玉龙雪山现代冰川及气象观测站点分布

Fig. 1 The distribution of glaciers and automatic weather stations in Baishui Glacier No. 1 in Mt. Yulong

表1 自动气象站下垫面特征

Table 1 Elevation and surface exposure of the Automatic Weather Station

气象站	观测时间	观测要素及传感器	下垫面特征
末端站 4 300 m	2008-10/2012-09	2 m/气温-相对湿度 HMP45C、气压 CS106、风速-风向 034B、4 分量辐射 NROI	5-10 月高寒草甸 11 月-翌年 4 月积雪掩埋/部分数据缺失
冰塔林站 4 500 m	2011-09/2012-09	2 m/5 m 两层气温-相对湿度 HMP45C、气压 CS106、风速-风向 034B、4 分量辐射 NROI	5-10 月裸岩 11 月-翌年 4 月积雪
冰川区站 4 800 m	2008-10/2012-09	2 m/气温、气压、相对湿度、风速、风向、4 分量辐射	6-9 月裸岩 10 月-翌年 5 月积雪掩埋/部分数据缺失

观测记录的两层气温、相对湿度、风向、风速、一层大气压、总辐射等参数为研究对象,对近海洋型冰川区近地层气象要素的日循环与年内循环特征进行分析;并与祁连山老虎沟 12 号冰川(大陆型冰川)近地层微气象特征进行了对比,祁连山老虎沟观测点位于 39°26' N, 96°32' E, 海拔 4 550 m,数据来源见文献[16],通过本研究希望了解海洋型冰川与大陆型冰川区近地层气象要素的异同,为探讨不同类型冰川对气候变化的响应机理奠定基础。

3 结果与分析

3.1 气温

对丽江(海拔 2 393 m)地区有观测资料以来的气温和降水数据(1951-2011 年)分析发现,与高

纬度地区不同,丽江四季不明,但存在显著的干湿季之分(湿季降水百分率可达 85%~99%)。如图 2(a)所示丽江 5-10 月降水量较大,11 月-翌年 4 月几乎无降水,基于此本文以 5-10 月为湿季,11 月-翌年 4 月为干季讨论研究区气象要素的季节变化。白水 1 号冰川 4 500 m 处年均气温为 -0.16 °C,全年冷季长 6 个月[11 月-翌年 4 月,图 2(b)],1 年中 1 月气温最低为 -8.35 °C,7 月气温最高为 6.06 °C。与丽江相比,冰川 4 500 m 处气温月循环升温幅度和降温幅度更剧烈,主要表现在 5 月与 10 月[图 2(b)],其中 5 月为季风降水前期,10 月为季风撤退期。产生这种变化的主要原因是下垫面性质的转变。5 月冰川上的积雪强烈消融,至 5 月底已消融殆尽,进入高温雨季(气温 > 0 °C,

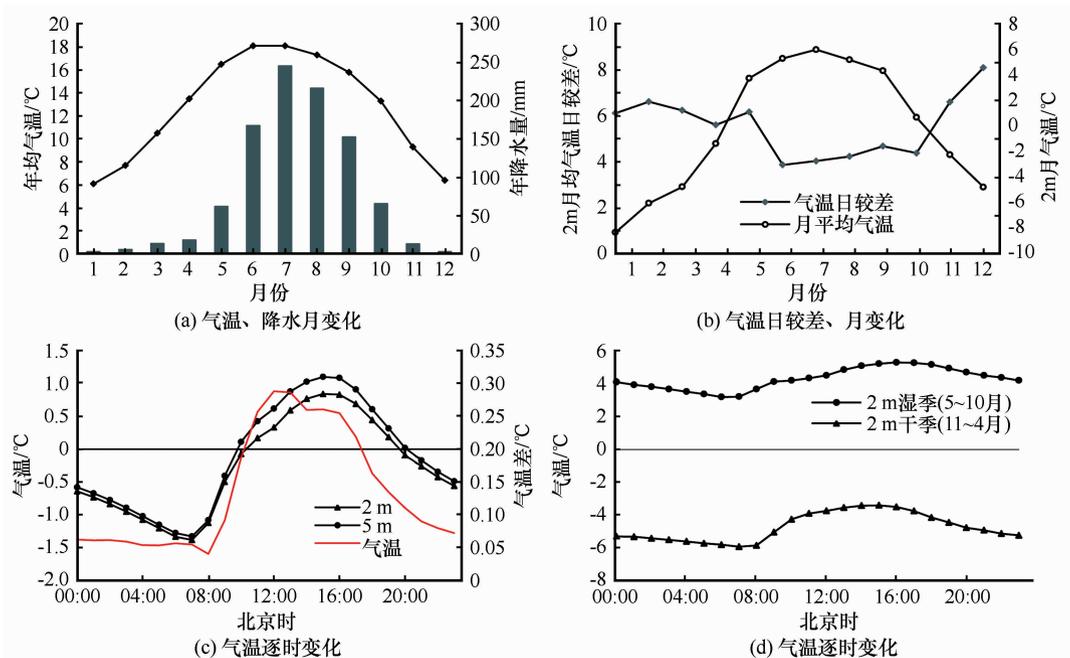


图2 丽江气温和降水月变化(a),冰川区 4 500 m 处观测期间气温、气温日较差月变化(b),冰川区 4 500 m 处气温逐时变化(c)、(d)

Fig. 2 Monthly mean temperature and rainfall in Lijiang (a); Monthly mean temperature and diurnal range of temperature at 4 500m above sea level (b); Hourly variation of temperature at 4 500m above sea level (c) - (d)

几乎为液态降水), 5月气象站下垫面由白雪转为裸岩反照率大大降低, 所以升温更剧烈; 10月开始南亚季风系统逐渐撤退, 降水量减少, 气温降低, 气温 $<0^{\circ}\text{C}$ 的天气陆续出现, 冰川区有降雪事件发生, 气象站下垫面由9月的纯裸岩转为新雪面, 反照率升高, 与丽江相比降温加剧。月均气温日较差与月均气温基本呈反向变化, 如图2(b)所示, 湿季气温月较差小于干季, 最小值为 3.87°C (6月), 最大值为 8.13°C (12月)。气温日较差的变化主要受下垫面性质、局地气候和降水辐射等影响^[8,16,18]。观测点湿季下垫面为裸岩, 反照率降低, 昼夜温差小, 且湿季多云雾, 空气湿润, 降水频繁, 所以湿季气温日较差较小。干季(冷季), 观测点下垫面为积雪反照率大, 昼夜温差大, 空气干燥, 晴朗少云, 所以干季气温日较差较大。

两层(2 m和5 m)近地层观测气温日变化显示[图2(c)], 二者存在相同的变化趋势, 均呈单峰单谷型周期变化, 日循环最低气温值出现在07:00(北京时, 下同), 最高气温值出现在下午15:00, 与已有研究的其它类型冰川相比均表现出升温快降温慢的特点^[8,15,17], 且这种趋势在干季较显著[图2(d)], 日最高气温出现时间滞后于一般规律的14:00, 但与珠峰^[15]及天山乌鲁木齐1号冰川区^[10]相似, 反映了近冰雪下垫面对气温日变化的影响。5 m层观测气温均较2 m层观测气温值高, 二者差值日循环呈成单峰分布[图2(c)], 12:00差异最大为 0.29°C , 08:00差异最小 0.04°C , 其分布形态与太阳辐射日变化相一致[图7(b)], 表明其产生原因与近地层净辐射、太阳辐射和长波辐射的日变化密切相关, 越接近地表, 受反照率影响越强烈, 净辐射值越低, 故5 m层气温高于2 m层气温。季节气温日变化如图2(d), 与气温日较差相应, 湿季气温日变化幅度小于干季。

3.2 水汽压/相对湿度

水汽压是大气压力中水汽的分压力, 和气压一样用百帕来度量。水汽压的大小与蒸发的快慢密切相关, 而蒸发的快慢在水分供应一定的条件下, 主要受控于气温。日间气温高, 蒸发快, 进入大气的水汽多, 水汽压就大; 夜间气温低蒸发小, 进入大气的水汽减少, 水汽压值降低。观测期间内冰川区4 500 m水汽压日变化满足一般规律[图3(a)], 与气温日循环分布相似呈单峰型, 最低值出现在08:00, 落后最低气温出现时间1 h, 最高值出现在14:00, 早于最高气温出现时间1 h, 夜间水汽压变

化幅度缓于气温变化幅度, 二者之间差异表明水汽压变化既主要受控于气温也与对流、降水、风等其它要素有关。观测点5 m层水汽压高于2 m层水汽压, 与两层气温差值相对应, 在日间二者差值达到极大值。

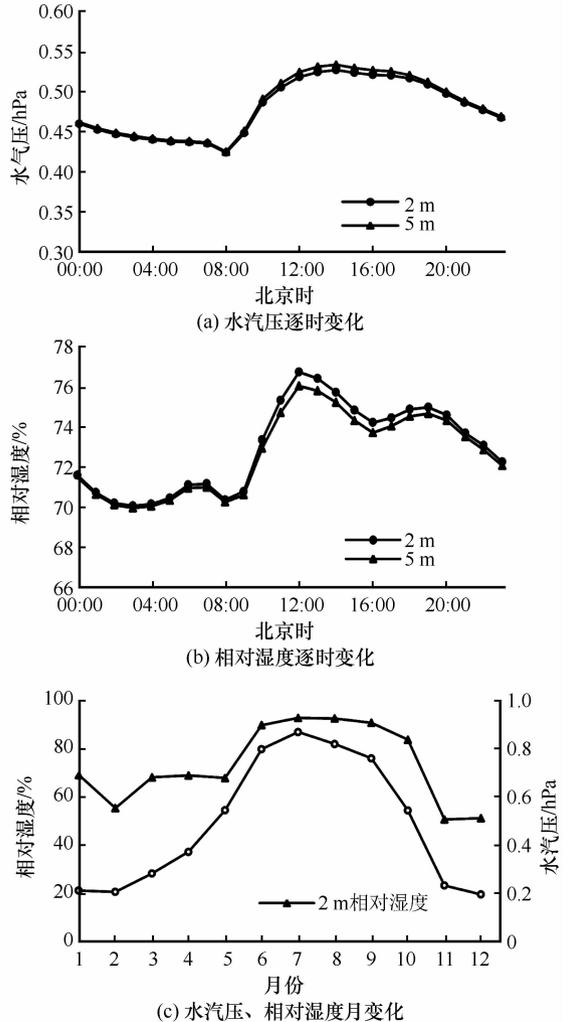


图3 观测期间水汽压、相对湿度逐时变化 (a)~(b)及月变化(c)

Fig. 3 Variations of hourly (a-b) and monthly mean (c) of vapor pressure and relative humidity during the observation period

相对湿度指空气中水汽压与饱和水汽压之比, 因其与水汽压及气温均有关系, 日循环特征复杂。如图3(b)所示, 冰川4 500 m处日间相对湿度高于夜间, 相对湿度极大值分别出现在12:00及18:00-19:00, 相对湿度极小值出现在凌晨03:00及08:00左右。2 m层相对湿度值高于5 m层相对湿度值, 日间二者差值大于夜间。该区相对湿度日变化规律与拉弄冰川区^[17]及珠峰地区^[15]差异较大, 甚至呈反向变化, 这种差异的可能与地区局地气候环

流的异同及降水日夜分配差异有关,有待于进一步研究。

观测点水汽压及相对湿度的月变化规律如图3(c)所示。观测期间内白水1号冰川区4500 m处年均相对湿度为73.3%,干季与湿季相对湿度均值分别为60.6%和86.13%,6-10月相对湿度极大值与雨季相对应[图3(c)、图2(a)],一年之中11月相对湿度值最小50.7%,7月相对湿度值最大92.6%。相对湿度月变化规律满足季风气候区的基本特征,夏季风来自海洋,高温而潮湿,冬季风来自大陆,寒冷而干燥,所以本区相对湿度值冬季低夏季高。冰川区4500 m处水汽压月变化与气温月变化相似[图3(a)~(b)],呈单峰分布,雨季水汽压受气温影响更显著。相对湿度和水汽压与气温之间的皮尔逊相关系数分别为0.78和0.95,水汽压的变化更受控于气温。

3.3 气压

白水1号冰川4500 m处气压呈单峰型周期变化(图4),冬季地面气压低,夏季气压高,属于典型的“高山型”气压^[20],9月气压最高为593.3 hPa,1月气压最低为582.6 hPa,年均值为588.6 hPa。与祁连山老虎沟12号冰川近地层气压(4560 m)相较,二者均呈单峰型变化,表现为冬半年气压低,夏半年气压高,但“高山型”气压在祁连山区表现更显著。除局地气候环流差异引起两近冰川区高山型气压差异外,这与青藏高原的热力和动力作用使控制两个地区的大气环流背景冬夏异同有关。冬季,青藏高原为冷源,加强了南侧向北的温度梯度,使南支急流强而稳定。夏季,青藏高原对于周围大气而言是个热源,使高原上空大气水平温度梯度在北部增大,南侧西风消失而转为东风所取代,南亚和东亚季风系统登录控制青藏高原以南地区。

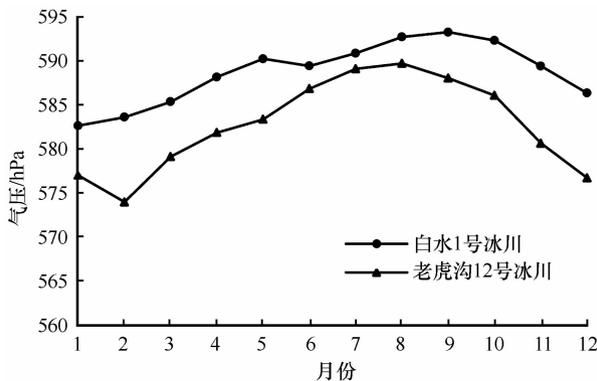


图4 观测期间气压月变化

Fig. 4 Variation of monthly mean pressure during the observation period

3.4 风向风速

在山区,因特殊而复杂的地形使山区风系的产生和发展机制较其它区域复杂。由于山谷日夜间热力性质的差异产生了山区特有的山谷风,而冰川的存在使冰川区因冷热差异形成了由冰川区吹响冰川边缘的冰川风。观测期间冰川区风速月变化如图5(a)所示,干季风速大(11月-翌年4月),湿季风速小(5-10月),呈典型“高山型”风速分布特征,月平均最大风速出现在4月为 $5.87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最小风速出现在8月为 $1.99 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,年平均风速为 $3.52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与祁连山老虎沟12号冰川相比,大陆型冰川区风速变化更平缓,这与不同类型冰川冰面反照率的季节变化有关。白水1号冰川区冬季气温低,冰川表面积雪覆盖,反照率变大,冰川制冷效应加强,与周围空气温差增大,水平气压梯度力变大,风速加强;夏季海洋型冰川区气温较高,冰川表面积雪融化,反照率大大降低,冰川制冷效应减弱,与周围空气温差变小,水平气压梯度力减少,风速减弱。而在大陆型冰川区(老虎沟12号冰川)冬夏气温均较低,冰川制冷效应冬夏差异较小,所以风速季节波动较海洋型冰川区幅度减弱。

季节风速逐时变化如图5(b)所示,干季风速明显大于湿季。干季风速平缓,夜间风速略大于白天,风速极小值出现在17:00,风速极大值出现在23:00;湿季午后风速大,上午风速小,15:00-19:00出现第一风速极大值,02:00出现第二风速

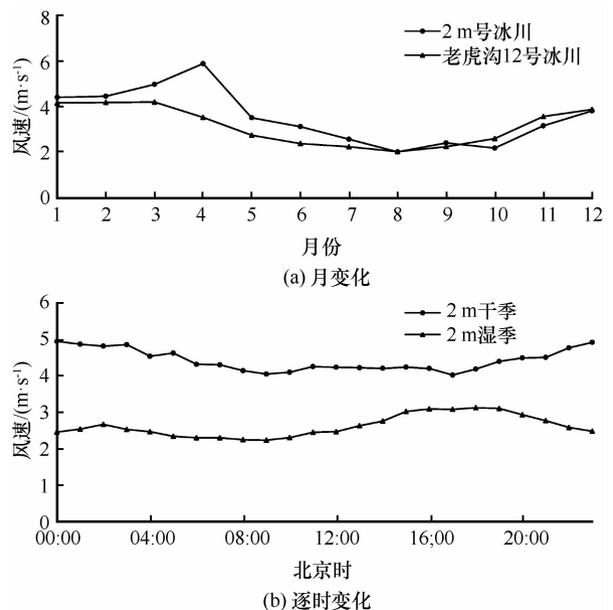


图5 观测期间风速月变化(a)、逐时变化(b)

Fig. 5 Variations of monthly (a) and hourly mean (b) wind speed during the observation period

极大值。干湿季风速逐时变化的差异与冰川风和山谷风的季节变化有关。山谷风的成因与日出、日落引起山坡与山谷的局地热力环流变化有关^[15]: 晴朗的白天, 山坡及其附近的空气比山谷中自由大气增温快, 而夜间相反, 山坡上的空气降温快, 这种温度差异产生了日间沿山坡上升的谷风, 夜间沿山坡下降的山风。而冰川区因冰川的制冷效应使冰川区空气冷却下沉, 在近冰川层形成由冰川区吹响冰缘的下沉风。在山谷冰川区, 山风、谷风和冰川风相互作用, 因下垫面和辐射等因素的季节变化, 使山谷冰川区风向风速均存在显著的季节差异。

观测期间内白水1号冰川区昼夜风向频率分布

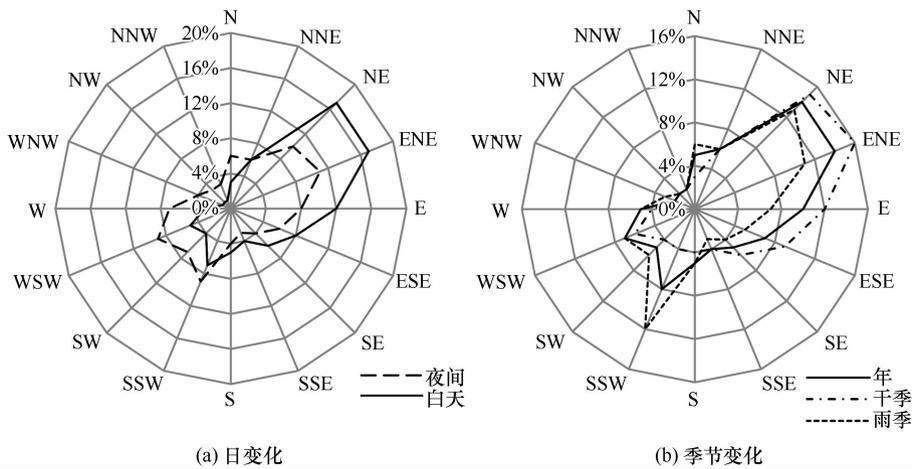


图6 观测期间风向日变化(a)和季节变化(b)

Fig. 6 Diurnal and seasonal variations of wind direction during the observation period

3.5 总辐射

总辐射是山区热力局地环流系统形成和发展的驱动力, 是地球大气中一切物理过程的原动力, 对天气和气候系统的影响非常重要。影响太阳总辐射的主要因子是太阳高度角和大气透明度, 即太阳高度角及云雾分配的季节变化。白水1号冰川4300 m、4500 m及4800 m处总辐射的月变化特征如图7(a)所示, 3个海拔高度总辐射均在雨季前达到最大值(4-5月), 雨季总辐射值减小, 季风撤退后总辐射值达到第二极值(11月), 之后随太阳高度角减小, 获得太阳辐射值减少。祁连山地区年内总辐射呈单峰型变化, 5月太阳辐射达到最大值, 进入夏季总辐射呈阶梯状递减, 至12月达到最小值。两冰川区总辐射月变化相比[图7(a)], 海洋型冰川区总辐射较大陆型冰川区总辐射受雨季云雾影响更显著, 随着太阳高度角的季节变化, 夏季获得太阳辐射最多, 但因湿润的季风气候影响研究区雨热同季, 雨季云雾缭绕, 大大消减了到达地面

如图6(a)所示: 白天(08:00-20:00)谷风发育以N、ENE和E风向频率最高, 分别为17%、17%和12%; 夜间(20:00-08:00)山风与谷风相当, 谷风NE、ENE和山风(冰川风)WSW, SSW风向频率分别为10%、11%、9%和9%。季节风向频率如图6(b), 全年谷风发育显著, 以NE和ENE风向频率最大分别为14%、14%, 且在湿季表现更明显, 湿季NE和ENE风向频率分别为15%、16%; 干季发育一支SSW风向的冰川风, 频率为6%。因白水1号冰川为规模较小的海洋型冰川, 所以该区冰川风不如其它规模较大的大陆型冰川区发达, 如珠峰北坡绒布冰川^[14]、祁连山老虎沟12号冰川^[16]。

的太阳辐射, 致使冰川区在雨季太阳辐射出现极小值。研究区3个海拔高度总辐射随海拔尚未表现出明显的变化规律: 海拔4300 m处年均总辐射值为 $150.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 最大值出现在4月为 $217.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 最小值出现在9月为 $102.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; 海拔4500 m处年均总辐射值为 $126.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 最大值出现在5月为 $178.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 最小值出现在10月为 $95.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; 海拔4800 m处因3-4月数据缺测, 无法统计年均值, 最小值出现在12月为 $108.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在11月-翌年2月, 白水1号冰川区总辐射大于老虎沟12号冰川区; 而3-10月老虎沟12号冰川区获得辐射远大于白水1号冰川区; 老虎沟12号冰川区年均总辐射值为 $206.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 较白水1号冰川同海拔区(纬度相差近 12°)高 $79.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 这与两地大气环流背景及局地气候差异有直接关系。西南季风系统控制下的云雨天气, 使低纬度高海拔获得的太阳辐射较高纬度同海拔地区少得多。观测点总辐射季节逐时变化

[图 7(b)] 也表明了雨季云雨对总辐射的影响, 干湿季总辐射均呈单峰型变化, 干季峰值明显大于湿季, 湿季获得总辐射时间长于干季。

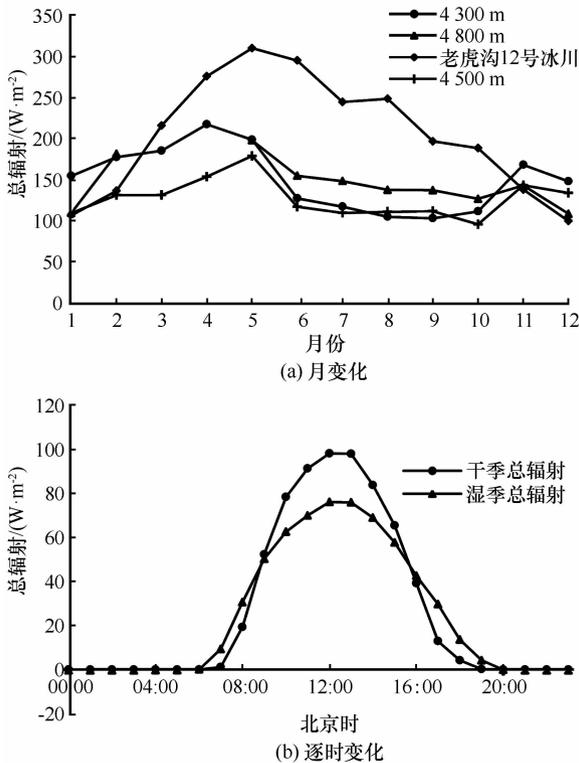


图7 观测期间总辐射月变化(a)、逐时变化(b)
Fig.7 Variations of monthly (a) and hourly mean (b) incoming solar radiation during the observation period

4 结论

玉龙雪山白水1号冰川, 是亚欧大陆距离赤道最近的海洋型冰川区, 因其对气候变化反应的高敏感性, 被认为是研究气候变化与冰川波动的理想地点。在白水1号冰川区架设自动气象站获取的冰川近地层气象观测资料, 是非常稀少而珍贵的, 是研究海洋型冰川区局地气候特征的基本因子, 是探究海洋型冰川对气候变化响应过程与机理的关键变量。本文选取海洋型冰川区实地观测数据, 对白水1号冰川4500 m处近地层气象要素的基本特征进行了初步分析, 并与位于39°26' N, 96°32' E, 海拔4550 m地区的典型极大陆型冰川——祁连山老虎沟12号冰川进行了对比分析。通过研究主要得到以下几点结论:

(1) 受南亚、东亚季风和西风环流影响, 研究区四季不显, 干湿季分明, 湿季(5-10月)气温日较差明显小于干季(11月-翌年4月)。冰川区4500 m处, 5-10月冰川区气温 $>0^{\circ}\text{C}$, 冰川表面

无积雪, 强烈消融。受夏季高温影响, 冰川表面干季与湿季反照率差异较大, 致使冰川区在季节转换过程中升温 and 降温幅度均较丽江(2393 m)剧烈。与大陆型冰川一致, 海洋型冰川近地层气温日循环也表现为升温快, 降温慢的特点(干季较雨季显著), 呈单峰单谷型分布。

(2) 与气温日循环特征相似水汽压日循环也呈单峰单谷型分布。相对湿度月变化规律符合季风气候区的基本特征, 冬半年受西风环流影响, 空气干燥, 夏半年受南亚季风和东亚季风影响, 风来自海洋, 高温而潮湿, 所以研究区湿季相对湿度大, 干季相对湿度小。与相对湿度相比, 水汽压变化更受控于气温。

(3) 与老虎沟12号冰川一致, 白水1号冰川近地层气压呈单峰型月变化, 也表现为夏天高, 冬天低, 属于典型的“高山型”气压, 但在祁连山区这种特征表现更显著。这与二者冰川区分别位于青藏高原南北两侧, 冬夏受青藏高原热力和动力影响, 控制各自区域的大气环流背景的异同有直接关系。

(4) 研究区干季风速大, 湿季风速小, 与老虎沟12号冰川区一致, 呈“高山型”风速分布特征, 但由于冰川性质的差异大陆型冰川区风速变化较海洋型冰川区更平缓。白水1号冰川4500 m处年均风速为 $3.52\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。受冰川冷效应影响, 研究区干季风速明显大于湿季。因冰川规模较小, 研究区冰川风不发达, 谷风强盛。全年以谷像风NE和ENE风向频率最高, 占28%, 湿季谷风较干季发达, 干季发育一支SWS向冰川风。

(5) 与老虎沟12号冰川相比, 研究区总辐射受雨季云雾影响大, 总辐射在雨季前达到最大值(4-5月), 雨季总辐射值减小, 季风撤退后总辐射值达到第二极值(11月), 之后随太阳高度角减小, 获得太阳辐射值减少。与高纬度大陆型冰川相比, 低纬度的海洋型冰川获得的年均总辐射值小, 这与湿季海洋型冰川区丰沛的降水密不可分, 西南季风系统控制下的云雨天气, 使低纬度高海拔获得的太阳辐射比高纬度同海拔地区少得多。

参考文献 (References):

- [1] Beniston M, Diaz H, Bradley R. Climatic change at high elevation sites: an overview[J]. Climatic Change, 1997, 36(3/4): 233-251.
- [2] Beniston M. Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts[J]. Climatic Change, 2003, 59(1): 5-31.
- [3] Beniston M. Mountain weather and climate: a general overview and a focus on climatic change in the Alps[J]. Hydrobiologia,

- 2006, 562(1): 3-16.
- [4] Li Zongxing, He Yuanqing, Wang Chunfeng, et al. Spatial and temporal trends of temperature and precipitation during 1960-2008 at the Hengduan Mountains, China[J]. *Quaternary International*, 2011, 236: 127-142.
- [5] Yao Tandong, Liu Shiyin, Pu Jianchen, et al. Recent glaciers retreating in High Asia and their impact on the water resources of Northwest China[J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2004, 34(6): 535-543. [姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响[J]. *中国科学: D 辑 地球科学*, 2004, 34(6): 535-543.]
- [6] Li Xin, Cheng Guodong, Jin Huijun, et al. Cryospheric change in China[J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 62: 210-218.
- [7] Zhang Yong, Liu Shiyin, Han Haidong, et al. Characteristics of climate on the Keqicar 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.]
- [8] Han Haidong, Liu shiyin, Ding Yongjian, et al. Near-surface meteorological characteristics on the Koxkar Baxi Glacier, Tianshan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6): 967-975. [韩海东, 刘时银, 丁永健, 等. 科其喀尔巴西冰川的近地层基本气象特征[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(6): 967-975.]
- [9] Jin Shuang, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. Preliminary analysis of hydrologic and meteorological characteristics at the Glacier of No. 72, Qingbingtan, Tuomuer Peak[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(18): 8587-8589. [金爽, 张明军, 李忠勤, 等. 托木尔峰青冰滩 72 号冰川水文气象特征初步分析[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(18): 8587-8589.]
- [10] Wang Minzhong, Wei Wenshou, Chen Rongyi, et al. Observations and analyses of near surface meteorological elements on Glacier No. 1 at Headwaters in Ürümqi River, Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1): 12-20. [王敏仲, 魏文寿, 陈荣毅, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川近雪面气象要素观测分析[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(1): 12-20.]
- [11] Zhang Dongqi, Ming Jing, Wei Wenshou. Microclimate measurements related to glacier cooling effect at No. 1 Glacier, Headwaters of Ürümqi River, Tianshan Mountains[J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(3): 449-457. [张东启, 明镜, 魏文寿. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川制冷效应的小气候观测[J]. *干旱区地理*, 2011, 34(3): 449-457.]
- [12] Yang Xingguo, Qun Jue, Liu Hongyi, et al. Meteorological characteristics of the East Rongbuk Glacier, Mt. Qomolangma[J]. *Arid Meteorology*, 2008, 26(4): 16-21. [杨兴国, 群觉, 刘宏谊, 等. 珠穆朗玛峰北坡冰川表面不同季节气象特征分析[J]. *干旱气象*, 2008, 26(4): 16-21.]
- [13] Yang Xingguo, Qin Dahe, Zhang Tingjun, et al. Characteristic of air temperature and humidity on the north slope of Mt. Qomolangma[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70(4): 855-866. [杨兴国, 秦大河, 张廷军, 等. 珠穆朗玛峰北坡地区气温和湿度变化特征[J]. *气象学报*, 2012, 70(4): 855-866.]
- [14] Zou Han, Zhou Libo, Ma Shupo, et al. Observation of diurnal circulation on the northern slope of Mt. Qomolangma[J]. *Plateau Meteorology*, 2007, 26(6): 1123-1140. [邹悍, 周立波, 马舒坡, 等. 珠穆朗玛峰北坡局地环流日变化的观测研究[J]. *高原气象*, 2007, 26(6): 1123-1140.]
- [15] He Lifu, Wang Suichan, Zhang Zhigang. Observational study on characteristics of meteorological elements in Mountain Qomolangma Region[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2010, 21(6): 641-648. [何立富, 王遂缠, 张志刚. 珠穆朗玛峰地区气象要素特征观测研究[J]. *应用气象学报*, 2010, 21(6): 641-648.]
- [16] Li Jian, Qin Xiang, Sun Weijun, et al. Analysis on micrometeorological characteristic in the surface layer of Laohugou Glacier No. 12 in Qilian Mountains[J]. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(2): 370-379. [李健, 秦翔, 孙维君, 等. 祁连山老虎沟 12 号冰川近地层微气象特征分析[J]. *高原气象*, 2012, 31(2): 370-379.]
- [17] Sun Weijun, Qin Xiang, Hua Xiping, et al. Variations of the meteorological elements at the Lanong Glacier in the Nyainqêntangha Range[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1): 62-69. [孙维君, 秦翔, 化希平, 等. 念青唐古拉山拉弄冰川气象要素变化特征[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(1): 62-69.]
- [18] Liu Shiyin, Xie Zichu, Ma Li. Characteristics of summer climate in the area of Kangwure Glacier, Xixiabangma Mt. [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(3): 244-251. [刘时银, 谢自楚, 马力. 希夏邦马峰抗物热冰川区消融期气候特征[J]. *冰川冻土*, 1996, 18(3): 244-251.]
- [19] Yan Xingguo, He Yuanqing, Wang Shijin, et al. Analysis of surface flow velocity on the Baishui Glacier No. 1 during ablation period in the Yulong Snow Mountain[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(5): 1212-1220. [燕兴国, 何元庆, 王世金, 等. 玉龙雪山白水河 1 号冰川消融期表面流速特征分析[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(5): 1212-1220.]
- [20] Li Jijun, Su Zhen. *Glaciers in the Hengduan Mountains*[M]. Beijing: Science Press, 1996. [李吉均, 苏珍. *横断山冰川*[M]. 北京: 科学出版社, 1996.]

Near-surface meteorological characteristics on the Baishui Glacier No. 1, Mt. Yulong

XIN Huijuan¹, HE Yuanqing², NIU Hewen², Mao Huanlan³

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Research, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Lijiang Meteorological Administration in Yunnan, Lijiang 674100, Yunnan, China)

Abstract: The near-surface micrometeorological characteristics at elevation of 4 500 m of the Baishui Glacier No. 1, Mt. Yulong, which is the southernmost temperate glacier in China and Eurasian continent, were analyzed using the observed meteorological data from October 1st, 2011 through September 30, 2012. Additionally, in this paper, the similarities and differences of surface micrometeorological features between temperature type glacier and continental type glacier were discussed by contrasting the meteorological data from the Baishui Glacier No. 1, and the Laohugou Glacier No. 12 in Qilian Mountains. The daily change of air temperature showed a single peak-valley pattern and rising rapidly while descending slowly both in temperature type glacier and continental type glacier. Air temperature at 5 m height was higher than that at 2 m height, and the difference between them presented a single peak with a maximum at 12:00. Controlled by monsoon, relative humidity during monsoonal season was higher than that other than monsoonal season, the mean annual relative humidity was 73.7%. Vapor pressure in the Baishui Glacier No. 1 was more sensitive to air temperature as compared with relative humidity. Monthly mean pressure on the two glaciers presented a alpine-pressure style, higher in the warm half year and lower in the cold half year. Influenced by glacier cooling effect, wind speed during dry season was higher than that during wet season. In the study areas, glacier wind was weaker because of the smaller glacier scale, but valley breeze was prevail. The maximum global radiation occurred in the earlier stage of the monsoon and the minimum one appeared during monsoon season, which was associated with cloudy and rainy air condition in wet season, and thus the annual mean global radiation on the Baishui Glacier No. 1 was smaller than that at the same elevation in the Laohugou Glacier No. 12.

Key words: Baishui Glacier No. 1; surface layer; meteorological characteristics

(本文编辑: 庞瑜, 周成林)