

张志刚,秦翔,何立富,等. 2007 年 5—6 月珠峰北坡不同高度气象要素特征分析[J]. 气象,2011,37(8):977-983.

2007 年 5—6 月珠峰北坡不同高度气象要素 特征分析^{*1}

张志刚¹ 秦翔² 何立富¹ 王建凯³

1 国家气象中心,北京 100081

2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈与环境联合重点实验室,兰州 730000

3 中国气象局气象探测中心,北京 100081

提 要: 依据在珠峰北坡海拔 5200、5600、5800、6000 和 7028 m 等处设立的自动气象站资料,分析了 2007 年 5 月 5 日至 6 月 4 日的风向、风速、气温、绝对湿度和气压等气象要素的日间平均分布规律,探讨了不同海拔高度气象要素分布差异,指出下垫面性质、地形环境、水陆分布以及太阳辐射分布差异是造成珠峰北坡不同海拔高度气象要素日变化特殊分布的原因,同时将本次观测资料与历史同期资料对比分析并指出存在差异的原因。为全面认识珠峰地区地面气象要素特征,考察珠峰环境及今后珠峰地区的登山和科学研究活动提供重要依据。

关键词: 珠穆朗玛峰, 风, 气温, 绝对湿度, 气压, 特征分析

Observation Study on Different Elevation Meteorological Element Features on the Northern Slope of Mountain Qomolangma During May—June 2007

ZHANG Zhigang¹ QIN Xiang² HE Lifu¹ WANG Jiankai³

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Key Laboratory of Cryosphere and Environment, CAREERI, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

3 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

Abstract: With the observation data of the automatic weather stations at 5200 m asl, 5600 m asl, 5800 m asl, 6000 m asl and 7028 m asl during May 5—June 4 in 2007, the average diurnal changes of some meteorological elements were studied, such as air temperature, humidity, wind direction and speed, and atmospheric pressure, and the distributing differences in various altitude meteorological elements were discussed. The causes for the special distribution of each altitude meteorological element on the northern slope of Mountain Qomolangma can be attributed to the distributing differences in substrate characters, the environment of topography, land and water distribution and solar radiation. The observation data and historical corresponding data were contrastively analyzed, and the existing differences between historical data and present data were explored. It can provide some scientific bases for entirely understanding the characters of meteorological elements at the Mountain Qomolangma, for exploring the mountain environment, for mountaineering and scientific research of Mountain Qomolangma.

Key words: Mountain Qomolangma, wind, air temperature, absolute humidity, atmospheric pressure, characteristic analysis

* 公益性行业(气象)科研专项(编号:GYHY(QX)2007-6-5),中国气象局新技术推广项目(200501808001)共同资助
2010 年 4 月 19 日收稿; 2011 年 1 月 2 日收修定稿
第一作者: 张志刚,主要从事天气预报技术、高原气象的研究. Email: zhangzg@cma.gov.cn

引 言

青藏高原地处我国西部,约占国土面积的四分之一,平均海拔在 4000 m 以上,是世界最高、地形最复杂的高原。高原热力、动力作用以及地气间的物质交换过程对我国、亚洲乃至全球的气候变化和灾害性天气的形成均有重大影响^[1-2]。号称“世界第三极”的珠穆朗玛峰(27°54′N、86°54′E,海拔 8844.43 m)(以下简称珠峰),由于其特殊的地理位置和环境,在近十几年已有不少研究探讨珠峰及其周围地区的气候、大气环流及其冰川。我国分别于 1959—1960 年、1966—1968 年和 1975 年开展了 3 次珠峰综合科学考察,对珠峰地区的气象、冰川、水文、地质、地貌、古生物和动植物等进行了一系列考察,取得了丰硕成果^[3-8]。2000 年中国科学院大气物理研究所实施了“珠峰环境监测”科学考察,在 2005 年 4—5 月中国第四次珠穆朗玛峰地区综合科学考察对绒布河谷和海拔 6523 m 处进行了气象观测,积累了大量的宝贵资料,取得了重要研究成果^[9-16]。

2007 年奥运圣火登顶珠峰演练期间,为了保障圣火成功登顶,中国气象局在珠峰大本营(海拔 5200 m)、海拔 5600、5800 和 6000 m 高度分别建立了自动气象站。同时中国科学院寒区旱区环境与工程研究所在北坳(海拔 7028 m)建立了目前珠峰北坡最高的自动气象站。本文采用上述自动气象站 2007 年 5—6 月观测的珠峰北坡近地层气象资料,统计分析了大气温度、地面风向风速等气象要素在不同海拔高度的日平均分布特征,有可能进一步加深对珠峰北坡天气规律的认识,填补珠峰海拔 7000 m 以上连续观测气象资料及研究的空白,为今后珠峰地区的登山和科学研究提供重要依据。

1 观测仪器、地点和时间

2007 年 5 月 3 日中国气象局中央气象台北京奥运圣火珠峰传递气象保障队在珠峰北坡安装气象立体观测站,珠峰气象立体观测 A 站(27°59′N、86°51′E,海拔 5200 m)位于珠峰大本营,下垫面为砂石,测量气温、湿度、气压、风向、风速和净辐射气象要素,以下简称 5200 自动站;B 站(28°06′N、86°53′E,海

拔 5555 m),位于东绒布冰川末端终碛上,下垫面为冰川上的薄薄一层砂石,由华云公司提供设备,以下简称 5600 自动站;C 站(28°05′N、86°55′E,海拔 5792 m)和 D 站(28°04′N、86°55′E,海拔 5955 m)位于东绒布冰川中部,B~D 号站测量气温、湿度、气压、风向和风速要素,C 站以下简称 5800 自动站,D 站以下简称 6000 自动站,两站的下垫面均为表碛下伏冰川。A~D 站均通过北斗卫星终端发送数据。2007 年 4 月 25 日中国科学院寒区旱区环境与工程研究所在珠峰北坡建立了目前世界上海拔最高的自动气象站(E 站),位于北坳(28°00′N、86°55′E,海拔 7028 m)下垫面常年为冰雪覆盖,观测雪温、空气温度、气压、风向、风速等气象要素,通过海事卫星传输数据,以下简称 7028 自动站。以上自动站风向、风速探头距地表高度为 2.5 m,温度、湿度探头距地表高度为 2.5 m,气压探头距地表高度为 1.5 m(图 1)。

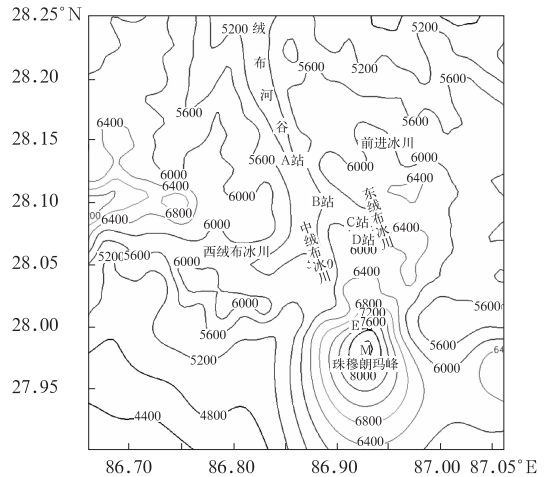


图 1 珠峰北坡地区地形及各自动站位置示意图
实线为地形等高线

Fig. 1 The sketch map of topography on the northern slope of Mountain Qomolangma and the locations of automatic weather stations

The solid contours indicate the isoheights, meters above the sea level

本文采用 2007 年 5 月 5 日 0:00 至 6 月 4 日 23:50 的气压、气温、相对湿度、风等各项气象要素每小时平均的数据及其相应的日最大、最小值,分析 2007 年 5—6 月珠峰北坡不同海拔高度的气象要素变化特征,探讨气象要素分布差异的原因。文中提及时间均为北京时,根据经度计算换算成珠峰地方时,约需减去 2 小时 12 分 10 秒。

表 1 自动站各种传感器的技术指标

Table 1 Technical indexes for the sensors of the automatic weather stations

测量项目	感应原件	生产厂商	测量范围	测量精度
气压	BAROCAP 硅电容绝对压力传感器	芬兰 Vaisala	50~1300 hPa	±0.01 hPa
温度	1000WPTR, IEC751 1/3 B 类	芬兰 Vaisala	-40℃~+60℃	<±0.5℃
湿度	HUMICAP180	芬兰 Vaisala	0~100%无凝结	±2% RH(0~90%相对湿度) ±3% RH(90%~100%相对湿度)
风向	风向标	美国 RM Young	0~360°	±3°
风速	旋转风杯风速计	美国 RM Young	0~100 m·s ⁻¹	±0.3 m·s ⁻¹

2 结 果

2.1 风向和风速分布差异及其与地形的关系

本文统计了各个观测站每小时平均的风向出现频率,为了便于比较它们在各个方位的大小和相应的变化,我们把各站风向的频率都换算成可比的百分数^[17](图 2),从图中可以看出,位于珠峰大本营的 5200 自动站的主导风向为东南风和南南东,分别占到 57.25%和 14.25%。究其原因,是由于该测站处于东南—西北走向的较为平坦的山谷中,左右两边高山对称并且相对高度较低,两边的山风相互抵消,只被控制在来自东南方向珠峰北坡绒布冰川的冰川风及西北方向的谷风之中,与刘宇等^[9]在绒布寺西南山谷的观测结果基本一致。根据 Zou 等^[11]的研究,珠峰北坡绒布河谷冰川风和山风持续时间明显比谷风持续时间长,因此 5200 自动站主导风为冰川风。5600 自动站的主导风向与 5200 自动站的风向相反,即主导风向为西北风和西北西(图 2b),分别占到 28.33%和 19.19%,基本上以偏西风为主。其主要原因是该测站位于东绒布冰川西部入口处,所在地是西北—东南走向并且开口向西北方向散开喇叭口状的山谷中。由于珠峰位于该测站的正南方,距离测站不足 1 km 的南南东方向也有一山峰,因而阻挡了来自珠峰方向的冰川风,珠峰冰川风只能沿着东绒布冰川的西侧进入谷地影响 5600 自动站,同时由于测站偏西方向有海拔超过 6800 m 的山峰,山风沿着向西北方向散开的喇叭口状山谷影响 5600 自动站,因此该站主导风向为西北风和西北西。由于 5600 自动站所处的地形相对于 5200 自动站更加复杂,因此冰川风和山风分量为 54.06%,比 5200 自动站的 84.1%少很多,也就是说 5600 自动站的冰川风比 5200 自动站明显偏弱。5800 自动站和 5600 自动站处于同一西北—东南走向的山谷中并且两站相距较近,左右两边高山对称并且相对高

度较低,因此主导风向为西北风和东南风(图 2c),分别占到 26.03%和 14.38%。6000 自动站处于近似南—北走向的山谷中,左右两边的山峰较矮且相互对称,因此 6000 自动站的主导风向为来自正南方珠峰的冰川风南风和南南东风,分别占到 15.75%和 10.81%。由于该测站相对于其他三测站更靠近珠峰,来自珠峰方向的冰川风出现频率高于来自北面的谷风。位于北坳的 7028 自动站的主导风向已经不再是来自珠峰方向的冰川风东南风,而是北风和东风,占到 64.34%。这主要是因为 7028 自动站海拔高度已经到了对流层中层,主要受到大尺度西风带的影响,但在测站偏西方向有高度比较高的冰墙(冰坎),阻挡了系统性的偏西风,而在其东北方向不到 500 m 处有海拔 7500 m 的北峰,因此主导风向为北风和东风。总而言之,珠峰北坡地区地面风向的分布受地形的影响非常明显。

图 3 给出了不同高度测站每小时平均风速的日变化。从风速日变化分布可以看出,5 个站的风速日变化呈单峰型分布。5200 自动站风速极大值出现在 18 时,5600 自动站风速极大值出现在 22 时,5800 自动站和 6000 自动站风速极大值均出现在 17 时,7028 自动站风速极大值出现在 12 时。5 个站风速极小值出现时间完全不同,5200 自动站风速极小值出现在 08 时,5600 自动站风速极小值出现在 11 时,5800 自动站风速极小值出现在 05 时,6000 自动站风速极小值出现在 06 时,7028 自动站风速极小值出现在 20 时。总的来讲 5200 自动站、5600 自动站、5800 自动站和 6000 自动站的风速都有明显的日变化,共同特点为午后至前半夜风速较大,后半夜至黎明风速较小。5600 自动站风速的日变化与 5200、5800 和 6000 自动站风速的日变化相比具有滞后性,即风速极大极小值出现的时间均比较晚,究其原因主要因为 5600 自动站的下垫面为冰川上的薄薄一层砂石,比下垫面完全是砂石的自动站受太阳辐射加热作用的影响较慢,测站周围空气对流活动较慢,因而风速极大极小值出现的时间比较晚。

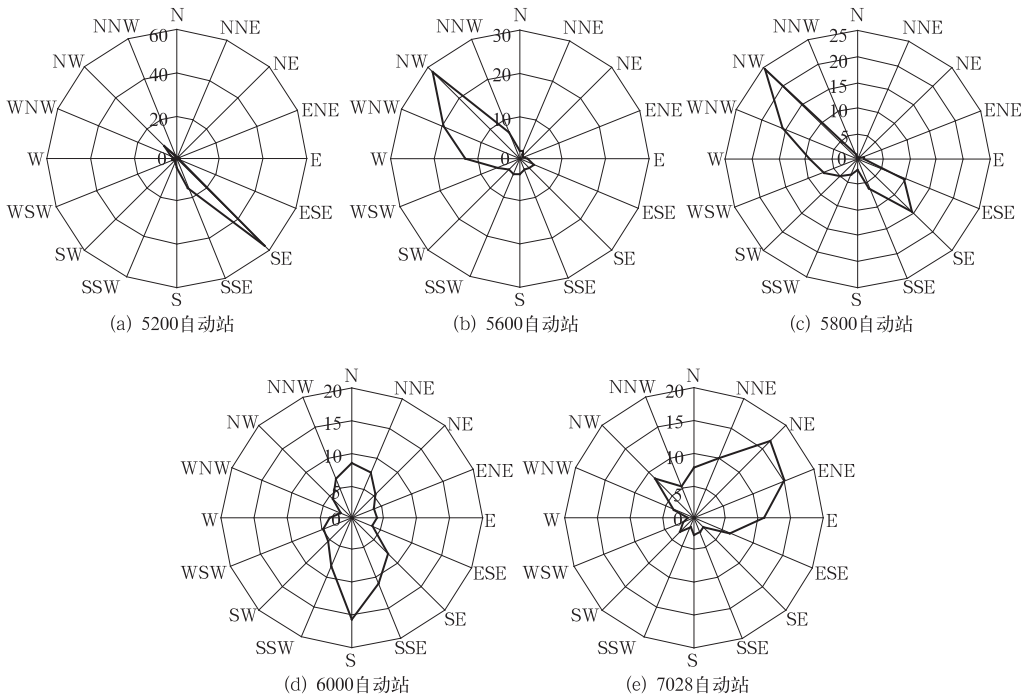


图 2 珠峰北坡不同高度风向分布特征

Fig. 2 Distributing characteristics of wind direction on the northern slope of Mountain Qomolangma at different elevations

(a) 5200 m asl, (b) 5600 m asl, (c) 5800 m asl, (d) 6000 m asl, and (e) 7028 m asl

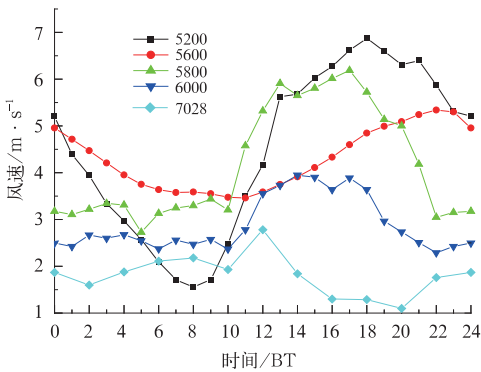


图 3 珠峰北坡不同高度风速的日变化特征

Fig. 3 Diurnal changes of wind speeds on the northern slope of Mountain Qomolangma at different elevations

7028 自动站风速特点是午后至前半夜的风速较小, 与其他 4 个观测站完全不同, 主要因为观测站安装在冰雪的环境中, 并且观测站西面有巨大的冰墙, 阻挡了午后的阳光辐射。从 5 个站日平均风速来看 (图略), 5200、5600、5800、6000 和 7028 自动站的平均风速分别为 4.46、4.27、4.21、2.96 和 1.81 $m \cdot s^{-1}$, 也就是说海拔最高的 7028 自动站平均风速最小而海拔最低的 5200 自动站平均风速最大, 究

其原因与两站所处的地形有关。5200 自动站处于较为平坦且周围比较开阔的东南—西北走向山谷中, 而 7028 自动站位于南面是珠峰, 北面是海拔 7500 m 的北峰, 西面有巨大冰墙的山坳中, 系统性的大风几乎影响不到。

2.2 珠峰北坡冰川风的日变化规律

如前所述, 珠峰北坡测站附近的地面主导风向是来自珠峰方向的冰川风及与其反方向的谷风。为了进一步分析其日变化规律, 将风速进行分解, 从东西风分量 u 和南北风分量 v 的日变化来研究冰川的日间分布特征。 u, v 按下式求得^[18],

$$\begin{cases} u = |\mathbf{V}| \sin(\alpha - 180^\circ) \\ v = |\mathbf{V}| \cos(\alpha - 180^\circ) \end{cases}$$

式中 \mathbf{V} 为风速, α 为风向, 北风定义为 0° , 东风定义为 90° , 所得结果如图 4 所示。

5200 自动站全天都是来自东南方向的冰川风, 冰川风比较强的时刻出现在 13—00 时, 比较弱的时刻出现在 04—09 时; 5600 自动站全天是来自西北方向的冰川风, 冰川风比较强的时刻出现在 13—03 时; 5800 自动站主要是来自偏南方向的冰川风和来自西北方向的谷风, 偏南风集中在 23—09 时, 西北

风集中在 10—21 时;6000 自动站主要是来自偏南方向的冰川风和来自偏北方向的谷风,偏南风集中在 23—09 时和 14—20 时,偏北风集中在 10—13 时和 21—22 时。7028 自动站如前所述,由于位于山坳中,全天都是东北风,不受珠峰冰川风的影响。总体来讲,位于绒布冰川末端至大本营的 5200 和 5600 自动站的冰川风在当地时间正午至午夜最强,午夜后至正午前较弱,与高登义^[6]结论基本一致。5800 自动站 23—09 时为冰川风,其他时间为谷风;而 6000 自动站除 23—09 时为冰川风外,午后至傍晚仍为冰川风,其他时间为谷风。可见同位于东绒布冰川 5800 和 6000 自动站的冰川风和谷风的日变

化有较大的差异,具体原因以及珠峰北坡冰川风形成的机理将另文进行深入探讨。

从持续时间上来看,5200 和 5600 自动站全天 24 小时为冰川风,5800 自动站冰川风持续时间为 11 个小时,而 6000 自动站冰川风持续时间为 16 个小时;从风速来看如图 4 所示,随着海拔高度的升高,风速逐渐减小。因此,与高登义^[6]“在北坡狭长的山谷中,冰川风在大本营附近最盛,在冰川末端较弱”的研究相一致。总之由于受复杂地形影响,珠峰北坡各测站的珠峰冰川风和谷风不仅不完全符合山区山谷风的日变化规律^[19],而且在不同海拔高度上也有很大的差异。

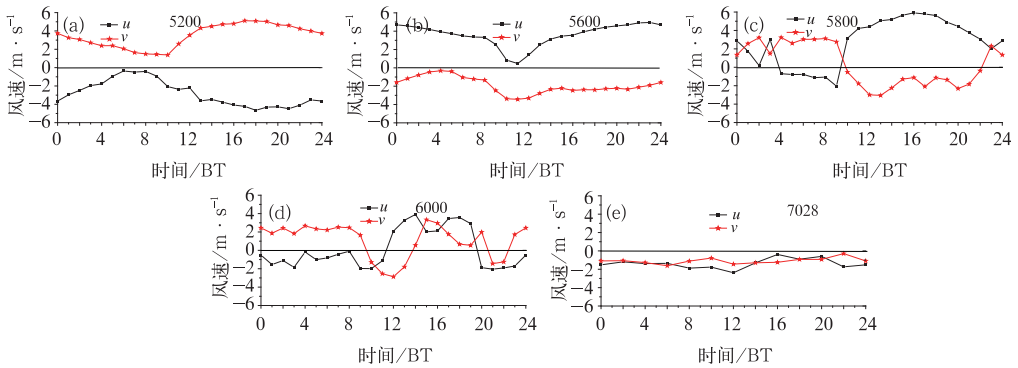


图 4 珠峰北坡不同海拔高度风速各分量的分布特征

Fig. 4 Diurnal changes of u and v components of wind speed on the northern slope of Mountain Qomolangma at different elevations

(a) 5200 m asl, (b) 5600 m asl, (c) 5800 m asl, (d) 6000 m asl, and (e) 7028 m asl

2.3 气温的日变化

图 5 给出了不同高度测站每小时平均气温的日变化。从气温日变化分布可以看出,5 个观测站均呈单峰分布,5200、5600、5800 和 6000 自动站日最低气温均出现在 08 时,与 1975 年 5 月相同高度探空气温观测结果^[5]相同,7028 m 观测站日最低气温出现在 06 时,而 1975 年 5 月相同高度探空最低气温出现在 12 时。气温极大值除了 6000 自动站出现在 15 时外,其他 4 个站均出现在 16 时。最高温度值出现时刻滞后于一般规律^[19]的午后 14 时,却与珠峰绒布河谷地区^[9]和北坡 6523 m 气温^[10]日变化规律相似。7000 m 以上高度自由大气气温^[5]和地面气温的日变化有所不同,可能和这一带地形及其加热有关,其原因有待深入讨论。5 站气温在夜间(20—08 时)的变化符合气温随高度增加下降的规律。5 站气温变化的不同点:在气温上升阶段,6000

自动站的气温高于 5800 自动站,在气温下降阶段,6000 自动站气温低于 5800 自动站,即:6000 自动站的气温变化比 5800 自动站变化快,相对于 5800 自

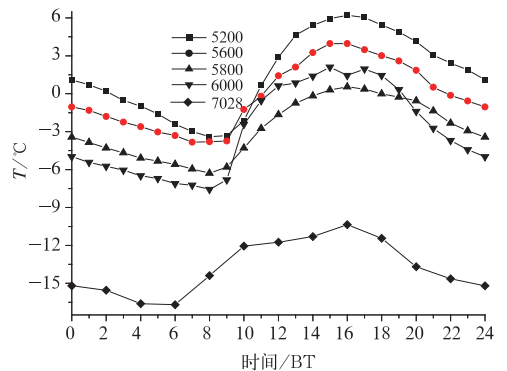


图 5 珠峰北坡不同高度气温的日变化特征

Fig. 5 Diurnal changes of air temperatures on the northern slope of Mountain Qomolangma at different elevations

动站而言 6000 自动站气温呈现升温快降温也快的特点。分析造成这种差异主要是由于两个站的下垫面结构不同所致,尽管两个站的下垫面都为表碛下伏冰川,但 5800 自动站表碛比较薄,所以融化、蒸发吸热能力较强,向大气长波辐射的部分相对于 6000 自动站少,由于山谷中大气温度的变化主要受下垫面辐射状况的影响^[5],所以白天 5800 自动站的气温低于 6000 自动站。相反,夜里的温度 6000 自动站低于 5800 自动站。

2.4 绝对湿度的日变化

图 6 描述了珠峰地区 4 个观测站的相对湿度日变化特征。显而易见,除了忽略个别较小的扰动外,5600、5800 和 6000 自动站大气绝对湿度均呈单峰分布,5200 自动站呈双峰分布。5200 自动站与其他 3 个观测站绝对湿度的日变化有所不同的原因是 5200 自动站海拔较低,气温变化相对较大,下垫面为沙砾而非冰雪,测站周围空气对流活动相对活跃。5200 自动站的两个极大值分别出现在 08 时和 20 时,极小值出现在 13 时。其他 3 个观测站最大值出现在 17—20 时,最小值出现在 11—13 时。4 个观测站中 5200 自动站绝对湿度峰值最大,主要原因是 5200 自动站南面存在由冰川融化所形成的湖泊,夜间 5200 自动站地面主导风向是来自珠峰向绒布河谷偏南方向的冰川风,冰川风经过冰川湖泊携带水

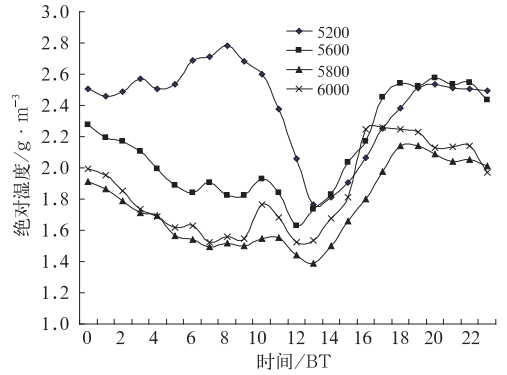


图 6 珠峰北坡不同高度绝对湿度
的日变化特征

Fig. 6 Diurnal changes of absolute humidity
on the northern slope of Mountain
Qomolangma at different elevation

汽所致。

2.5 气压的日变化

珠峰北坡不同高度的气压日变化如图 7 所示,气压日变化呈现明显的双峰双谷型,两个高峰值分别出现在 00:00—01:00 和 12:00—13:00 两个时段,两个谷值分别出现在 06:00 和 18:00—19:00。这与叶笃正等^[20]、谢爱红等^[10]的研究结果(2005 年 5—7 月珠峰北坡海拔 6523 m 气压日变化)相一致。凌晨日出前后和中午时分的低谷高峰区与气温有

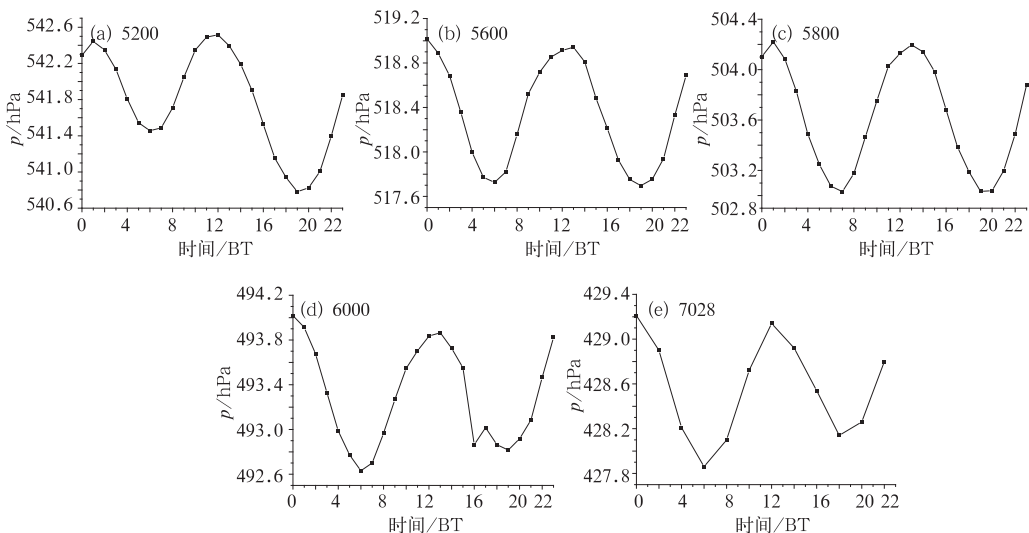


图 7 珠峰北坡不同高度气压的日变化特征

Fig. 7 Diurnal changes of air pressure on the northern slope
of Mountain Qomolangma at different elevations

(a) 5200 m asl, (b) 5600 m asl, (c) 5800 m asl, (d) 6000 m asl, and (e) 7028 m asl

关^[10],气压日变化的另一个高峰低谷区的形成,是由于青藏高原周围有一条正变高的最大带存在(20:00气压比08:00高,即大型山谷风在气压场上的反映),并且此正变高的强度随高度而增加,此正变高的最大带导致气压在日落后形成低谷区,子夜时分形成高峰区^[20]。

海拔5200、5600、5800、6000和7028m的气压日较差为:1.735、1.321、1.388、1.387和1.350hPa。根据高登义^[6]的研究,不同高度气压差相差比较大是由于珠峰及附近山地对大气的扰动作用,形成中尺度低压和高压,造成北坡气压波动在不同高度上的差异,2007年5—6月不同高度气压差相比较小,表明此时间段内珠峰地区天气系统比较稳定,气压波动在不同高度差异较小。

3 结 论

本文通过对2007年5月5日至6月4日珠峰北坡不同海拔高度的气象要素平均值的分析,得到如下结论:

(1) 5200、5600、5800和6000自动站的主导风向为来自珠峰方向的冰川风及与其反方向的谷风,7028自动站的主导风向受东北面和西面的山峰影响,珠峰北坡地区地面风向的分布受地形的影响非常明显。

(2) 珠峰北坡不同海拔高度气温日变化呈单峰分布,并受下垫面性质、水陆分布以及地形加热等因素影响。

(3) 珠峰北坡不同海拔高度风速日变化呈单峰分布,5200、5600、5800和6000自动站的共同特点为午后至前半夜风速较大,后半夜至黎明风速较小,7028自动站风速特点是午后至前半夜的风速较小。风速的差异主要受下垫面、地形分布等影响。

(4) 位于绒布冰川末端至大本营的5200和5600自动站的冰川风在当地时间正午至午夜最强,午夜后至正午前较弱;同位于东绒布冰川5800和6000自动站的冰川风和谷风的日变化有较大的差异;在北坡狭长的山谷中,冰川风在大本营附近最盛,在冰川末端较弱。

(5) 5200自动站与其他3个观测站绝对湿度的日变化有所不同。

(6) 珠峰北坡不同海拔高度的气压日变化呈现明显的双峰双谷型。

参考文献

- [1] Kuo H L, Qian Y F. Influence of the Tibetan Plateau on cumulative and diurnal changes of weather and climate in summer[J]. *Mon Wea Rea*, 1981, 109: 2337-2356.
- [2] 季国良, 时兴和, 高务祥, 等. 藏北高原地面加热场的变化及其对气候的影响[J]. *高原气象*, 2001, 20(3): 239-244.
- [3] 中国科学院西藏科学考察队. 珠穆朗玛峰地区科学报告: 1966—1968, 自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 1975.
- [4] 中国科学院西藏科学考察队. 珠穆朗玛峰地区科学考察报告: 1966—1968, 气象与太阳辐射[M]. 北京: 科学出版社, 1975.
- [5] 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 珠穆朗玛峰科学考察分队. 珠穆朗玛峰地区科学考察报告: 1975, 气象与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [6] 高登义. 越是艰险越向前——珠峰地区气象科考取得新成果[J]. *气象*, 1975, 1(9): 2-3.
- [7] 朱福康, 黄福均, 刘富明. 青藏高原气象科学实验十年[J]. *气象*, 1990, 16(3): 29-30.
- [8] 孙国武, 李春普, 胥洪波. 盛夏青藏高原上空高压形成和维持的动力机制[J]. *气象*, 1989, 15(12): 17-20.
- [9] 刘宇, 邹捍, 胡非, 等. 青藏高原珠峰绒布河谷地区大气近地层观测研究[J]. *高原气象*, 2004, 23(4): 512-517.
- [10] 谢爱红, 任贾文, 秦翔, 等. 2005年5—7月珠穆朗玛峰北坡海拔6523m气象要素特征[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(6): 909-917.
- [11] Zou H, Zhou L B, Ma S P, et al. Local wind system in the Rongbuk Valley on the northern slope of Mt. Everest[J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35(13), L13813.
- [12] 孙方林, 马耀明, 马伟强, 等. 珠峰地区大气边界层结构的一次观测研究[J]. *高原气象*, 2006, 25(6): 1014-1019.
- [13] 李茂善, 戴有学, 马耀明, 等. 珠峰地区大气边界层结构及近地层能量交换分析[J]. *高原气象*, 2006, 25(5): 807-812.
- [14] 邹捍, 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] 孙方林, 马耀明. 珠穆朗玛峰北坡地区河谷局地环流特征观测分析[J]. *高原气象*, 2007, 26(6): 1187-1190.
- [16] 周立波, 邹捍, 马舒坡, 等. 珠峰北坡绒布河谷地面风场变化的比较研究[J]. *高原气象*, 2007, 26(6): 1191-1198.
- [17] 张景哲, 刘继韩. 风的污染指数和不同风向的污染几率——城市总体规划中风和大气污染问题新探[J]. *环境科学*. 1986, 3(6): 15-19.
- [18] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. *天气学原理和方法*[M]. 北京: 气象出版社, 1992.
- [19] 特维尔斯基戈伊, 等. *气象学教程*[M]. 北京: 商务印书馆, 1955: 第二册, 665-670.
- [20] 叶笃正, 高由禧. *青藏高原气象学*[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 10-201.