

珠穆朗玛峰北坡绒布河谷地面风特征的初步分析

马舒坡^{1,2} 周立波^{1,3} 王 维¹

1 中国科学院大气物理研究所低层大气探测研究部, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 2006年5~6月,“2006珠峰野外观测实验”在青藏高原珠穆朗玛峰(简称珠峰)北坡绒布河谷中进行,沿河谷设立了3个站点,对河谷中的大气环流状况、热力和辐射状况等进行了观测。利用绒布河谷中平均地面风场资料,研究了该河谷中地面风场的日变化结构特征。结果表明,珠峰北坡绒布河谷中地面风场存在明显的日变化,自上午12:00(北京时间)左右至午夜该河谷地区为来自珠峰方向的偏南风控制,该风场日变化与普通山区的山谷风环流日变化存在很大差别。从3个站点风场日变化来看,偏南风首先在河谷南部开始,然后沿河谷向北发展。沿河谷轴线方向不同地点风场日变化有较大差异:偏南风出现时间随距珠峰的距离依次滞后,距珠峰最近的站点观测到的偏南风最大且持续时间最长,而距离珠峰最远的站点偏南风最弱且持续时间最短,甚至出现长时间的偏北风。研究表明,由于珠峰北坡地区地形复杂,地形高度落差大,地表状况分布不均,因此绒布河谷中的主导风是山谷风、坡风以及冰川风等多种局地风系统耦合的结果。

关键词 绒布河谷 局地风系统 冰川风 山谷风

文章编号 1006-9585 (2008) 02-0189-10 **中图分类号** P425 **文献标识码** A

Preliminary Analysis of the Surface Wind in the Rongbuk Valley on the Northern Slope of Mt. Qomolangma

MA Shu-Po^{1,2}, ZHOU Li-Bo^{1,3}, and WANG Wei¹

1 *Department of Lower Atmospheric Observation Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract The Mt. Qomolangma Observation 2006 was carried out in the Rongbuk valley on the northern slope of Mt. Qomolangma from May to June 2006. The surface winds, thermal conditions and solar radiations were obtained at 3 observational sites established in the Rongbuk valley. Using the above data, the authors analyzed the variation of the averaged surface wind in the Rongbuk valley. Result shows that there is clearly diurnal variation of the surface wind in the valley, i. e., the surface wind shows strong northward down-valley wind until midnight. The above diurnal wind variation in the valley has great difference with that in the usual valley. The northward wind firstly develops in the south of the valley, and then propagates northward. The strongest northward wind occurs at the site near

收稿日期 2007-03-15 收到, 2007-12-01 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40533018、中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-231 和中国科学院知识创新工程领域前沿项目 8-070203

作者简介 马舒坡, 男, 1979 年出生, 博士研究生, 主要从事山地气象学研究。E-mail: snowma@gmail.com

通讯作者 周立波, E-mail: zhoulibo@mail.iap.ac.cn

rest to Mt. Qomolangma and persists for the longest period. Preliminary analyses showed that the topography over regions of Mt. Qomolangma is complex, with steep terrains and inhomogeneous surface conditions, which causes complicated wind systems including mountain-valley wind system, slope wind system and glacier wind system and so on, and the dominating wind in this region is the composite of these local wind systems.

Key words Rongbuk valley, local wind system, glacier wind, mountain-valley wind

1 引言

青藏高原是全球最大的高原,其动力和热力作用形成了自身的特殊环流系统,同时影响着东亚和全球的天气、气候与环境过程^[1~3]。20 世纪 70 年代,以叶笃正先生为代表的我国大气科学家首先开始对青藏高原特殊天气气候过程进行研究,指出青藏高原夏季是一个强大的热源,这一加热过程对东亚地区和全球的天气、气候系统有重要贡献^[1,4,5]。而地面大气与对流层大气间的物质能量交换过程正是青藏高原与东亚和全球天气、气候系统相关联的纽带。因此,20 世纪 90 年代,陶诗言先生领导了第二次青藏高原大气科学实验 TI-PEX (国家攀登项目 B),对高原的地面大气与对流层大气间的交换过程进行了观测,并完成了大量理论和模拟研究,进一步认识了青藏高原热力、动力作用在亚洲天气、气候系统中的作用^[2,6,7]。

作为青藏高原重要的组成部分,喜马拉雅山区长 2 400 km,平均海拔 6 km,总面积达 $4 \times 10^5 \text{ km}^2$,占青藏高原总面积的 1/6,是高原隆升和大型山地的典型代表,同时也是青藏高原特殊大气过程集中表现的典型区域。该区域地形复杂陡峭,拥有 7 km 以上高峰 50 座。在这些山地区域存在着坡风、山谷风和冰川风等局地环流系统,这些局地山地环流系统沿着倾斜的山体表面运动,其垂直分量对地面大气—对流层大气间的物质、能量交换有着重要影响。

珠穆朗玛峰(以下简称“珠峰”)地区拥有 5 座 8 km 以上高峰,地表分布包括裸土、高寒草甸、岩石和冰雪等^[8],是喜马拉雅山区的典型代表区域,因此以珠峰地区为代表,研究喜马拉雅山区地面大气—对流层大气间的物质、能量交换有着重要意义,而对珠峰地区局地环流的研究是研究这一交换过程的必要前提。本文根据观测资料,对珠峰北坡绒布河谷中的地面风场特征进行

初步研究。

由于交通不便和工作环境恶劣,在喜马拉雅山区进行的大气观测研究为数不多。20 世纪 50 年代以来,我国气象工作者在珠峰地区进行过几次科学考察,叶笃正等^[1]和高登义等^[9,10]对珠峰北坡绒布河谷中的下山风作了描述,把河谷中距地面 1 km 以下,几乎昼夜恒吹的下山风称作珠峰北坡的冰川风。但其观测手段一般以释放探空为主,观测站点比较零散,观测资料精度有限。此后,我国科学家在喜马拉雅山区也曾进行过一般大气条件的观测研究,如 2000~2004 年间,中国科学院大气物理研究所实施了“珠穆朗玛峰及喜马拉雅山区环境监测研究”,该项目已经在珠峰北坡绒布河谷地区先后进行了 4 次观测实验,进一步认识了绒布河谷中下午盛行的来自珠峰方向的偏南风^[11~13],但这些观测站点大都在绒布河谷中下游,观测持续时间也比较短(每次均不超过一周)^[13]。2005 年 8 月中国科学院青藏高原研究所在珠峰以北约 30 km 的河谷中成立了“珠穆朗玛峰综合观测研究站”,Sun 等^[14]对该站 LAP-3000 低层大气风温廓线仪观测资料进行了分析,发现来自珠峰方向的冰川风在下午可以影响到珠峰站,其厚度达 700 m 左右。90 年代,意大利科学家在珠峰南坡启动了“金字塔计划”,在珠峰西南的昆布谷(Khumbu Valley)设置了气象站,对珠峰南坡的大气和环境过程进行监测研究,研究认为在非季风控制时期,山谷中以谷风为主,而山风比较弱^[15]。关于喜马拉雅山区山谷风日变化不对称现象,80 年代,Ohata 等^[16]曾做过描述,Egger 等^[17]对尼泊尔境内的 Kali Gandaki 山谷进行了研究,观测发现大部分情况下,风总是从南部向北吹,只有在凌晨会出现短暂的山风,并且山风明显弱于谷风。Hindman 等^[18]曾研究了喜马拉雅山南坡的大气物质输送特征,认为太阳辐射强烈时山谷风环流可以将污染物从南部山脚送向北部高海拔地区,并推测喜马拉雅山北坡存在同样的

物质输送机制。但是在喜马拉雅山南坡的观测点都距离喜马拉雅山主山脊比较远，可能没有受到冰川风的影响，而且其地形与珠峰地区也不尽相同。

鉴于以上讨论，为了对珠峰地区地面大气和对流层大气间的物质、能量交换进行研究，2006 年 5~6 月，中国科学院大气物理研究所在珠峰北坡绒布河谷地区进行了为期一个多月的观测实验，使用了包括自动气象站、三维超声风速仪、LAP-3000 低层大气风温廓线仪、辐射计等仪器，获得了大量的观测资料。实验期间沿河谷轴线方向按照与珠峰的距离远近依次布设了 3 个站点，对大气风场、温度场和辐射场等进行观测。本文通过对上述站点地面风场的分析，指出该河谷中存在着坡风、山谷风和冰川风等多种环流系统，这些环流系统的共同作用在绒布河谷地区形成了不同于一般山谷风系统的复杂局地环流系统。

2 观测实验

“珠峰 2006 野外观测实验”于 2006 年 5 月 29 日~6 月 29 日在喜马拉雅山珠峰北坡绒布河谷中进行。图 1 为绒布河谷地区地形图。绒布河谷大致为西北—东南走向，其东、南、西 3 个方向均环山，谷底南高北低，底部宽约 1 km，东西两侧的山峰相对谷底高度约 1 km，山高谷深。河谷南端有 3 个冰川：东绒布、中绒布和西绒布冰川；河谷西侧有久达冰川和格仲康冰川两个略小的冰川。

实验期间在河谷轴线上由南向北设置了 A、B 和 C 3 个站点，各站点的详细地理位置见表 1。A 站点距珠峰约 17 km，位于珠峰北坡绒布冰川的冰碛表面上，地表面为碎石覆盖，海拔 5 171 m，其东南方是东绒布冰川，该处所架设的仪器为自动气象站（Vaisala Maws Automatic Weather Station，以下简称“MAWS”）。B 站点为此次观测实验营地所在，位于 A 站点以北约 4 km 处，海拔 5 050 m，在此处架设了一个 8 m 的气象塔，分别在塔的 2 m 和 8 m 高度安装了三维超声风速仪（Campbell CSAT3，带有水汽和 CO₂ 探头）。在距离气象塔西边约 50 m 处有一条冰川溶水形成的绒布河。另外在该站点还安装了一套 LAP-3000 低层大气风温廓线仪和 Kipp-Zonen 辐射计。该处下

表 1 各观测站点位置

Table 1 Location of each observation site

站点	纬度	经度	海拔高度/m
A	28.13°N	86.86°E	5 171
B	28.17°N	86.84°E	5 050
C	28.25°N	86.82°E	4 765

垫面为碎石和沙石，并且可见有稀疏的高原植被。C 站点在 B 站点以北约 9 km 处狭窄的绒布河沟里，海拔 4 765 m，此处河谷即将由南北走向转变为东西走向，下垫面为沙石和高原植被，其植被覆盖率高于 B 站点，所放置的仪器为 MAWS。

MAWS 可观测到的气象要素包括气温、气压、相对湿度、风向、风速、地表温度、净辐射和太阳总辐射。MAWS 风杯距地面高度约 2.5 m；温、湿和辐射探头离地面高约 1.5 m；气压传感器在 MAWS 中心的圆筒内，距地面约 1 m；地温为大地表面的温度，观测时温度探头水平放置于地面，一半用沙土覆盖，一半裸露于地表。两台 MAWS 的探测仪器均由芬兰 Vaisala 公司研制，采样记录频率除地温为 1 min 外，其他要素均设置为 10 min。三维超声风速仪观测频率为 10 Hz，所观测的气象要素包括风向、风速、气压、气温、水汽密度和 CO₂ 浓度。

本次野外观测历时 32 天，11 天有降水记录，降水类型包括雨、雪和冰粒，但以毛毛雨和小雨为主；除 6 月 25 日全天为零星阵雨外，降水持续时间短，半数不超过 1 h，最短持续约 10 min，最长约为 4 h，其他时间均为晴天和有云天气。

本文使用了上述 3 个站点的地面风场资料和 B 站点的辐射场和温度场资料，对河谷中地面风场特征进行初步分析。

3 风场特征分析

为了与 A 和 C 站点的 MAWS 观测资料进行比较分析，文中使用 B 站点气象塔 2 m 高处的数据。为获得珠峰北坡绒布河谷风场的结构特征，我们对观测期间的全部有效资料进行了平均。虽然观测期间背景天气不全为晴天，甚至还有降水过程出现，但是以 B 站点三维超声资料为例，从所有 32 天的风日变化序列看（图略），只有 3 天

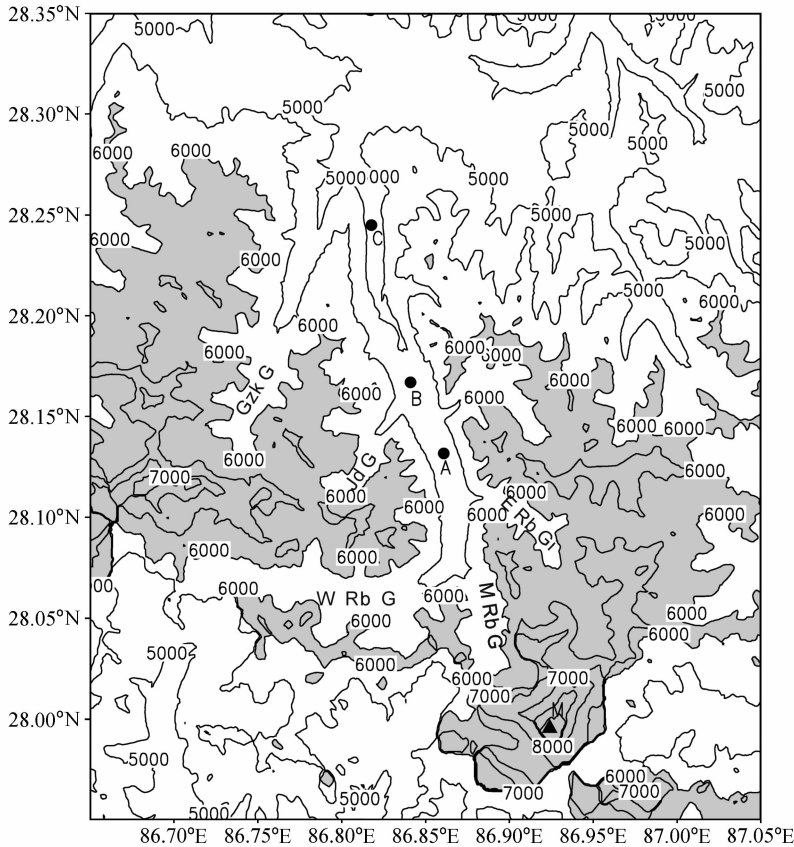


图1 绒布河谷地区地形。等值线间隔 500 m，阴影为地形海拔超过 6 km 的区域。A 和 C 两点分别为 MAWS 所在位置，B 点是 2006 年观测实验期间的营地所在；▲ 表示珠峰位置。河谷南端由西向东分别是西绒布（W Rb G）、中绒布（M Rb G）和东绒布（E Rb G）冰川；河谷西侧有久达冰川（Jd G）和格仲康冰川（Gzk G）

Fig. 1 Topography of the Rongbuk valley and its surrounding regions. Contour interval is 500 m. Terrain above 6 km above sea level is shaded. Symbols A and C are the locations with MAWS equipment, and B is the base of the observational campaign 2006. ▲ marks the location of Mt. Qomolangma. To the south end of the Rongbuk valley, there are three glaciers named West Rongbuk Glacier (W Rb G), Middle Rongbuk Glacier (M Rb G) and East Rongbuk Glacier (E Rb G), respectively. In addition, on the west slope of the valley, there are two smaller glaciers, Jiuda Glacier (Jd G) and Gezhongkang Glacier (Gzk G)

（6月7日、23日和24日）地面风场较为异常，其余29天的风日变化具有相似的变化规律，但南北向风转变时间和风量级存在差异。因此本研究使用3个站全部32天的平均风场，既能代表观测期间多数天气背景下的风场又能最真实地反映当地长时间风场特征。

3.1 平均气温和太阳辐射

太阳辐射是大气运动最根本的能量来源，山谷地形在太阳辐射作用下引起的热力差异是局地环流系统形成和发展的驱动力，因此有必要首先对河谷中的热力状况进行分析。图2是B站点的平均太阳总辐射和气温的日变化，图中时间为北京时间（下同）。从图可知，从早上07:10开始，

河谷中心开始接收到太阳辐射，之后缓慢增大；在09:50~10:10的20 min内，太阳总辐射从79 $W \cdot m^{-2}$ 迅速增加到617 $W \cdot m^{-2}$ 。这是因为日出后，河谷东侧山体将太阳辐射遮蔽，使之不能到达位于河谷中心的观测站点，但当河谷内西侧山坡首先接受到太阳辐射后，其反射的太阳辐射可照射到山谷中，使得09:50之前河谷中能观测到较弱的太阳辐射；此后，太阳直射到河谷中心，使得太阳总辐射在短时间内迅速增加。至14:00左右，太阳总辐射达到极大值1086 $W \cdot m^{-2}$ ，之后开始缓慢减弱，至21:00河谷中接收不到太阳辐射。从图2还可看出，平均太阳辐射日变化比较平滑，而且量级也比较大，表明观测期间多为

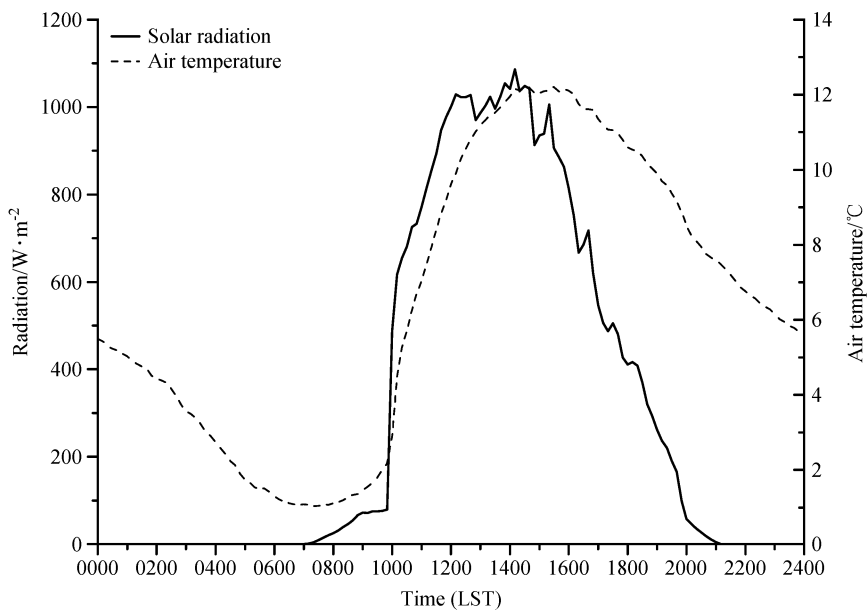


图2 B站平均气温和太阳辐射日变化
Fig. 2 Diurnal variations of the average air temperature and solar radiation at site B

少云天气；但太阳总辐射在中午和下午有小的波动，这可能是因为中午前后太阳辐射强烈，而珠峰地区地形复杂，大气对流活动旺盛，易产生对流云，进而影响太阳总辐射。

B 站点平均气温日变化明显，从图 2 看，在 07:20，即日出前后，平均气温达最低值约 1℃，然后随着太阳辐射的增加气温逐渐上升，在早上太阳辐射迅速增加阶段，气温也急剧上升，气温极大值（12.2℃）出现在 15:30，比太阳总辐射极大值出现时间晚 1.5 h，之后随着太阳辐射的减弱，气温开始缓慢下降。

3.2 平均风向

图 3 是 3 个站点的平均风向玫瑰图，图中径向所指方向为风的来向，径向的大小表示来自该方向的风所出现的频率，径向方向上不同的阴影部分表示不同风速所对应的风向频率。其中 A、B 和 C 3 个站点平均风速不足 1 m·s⁻¹ 的频率分别占全天风速总记录的 28%、32% 和 23%。从图上可见，A 站基本全天为东南风控制，其中风向介于 130~140° 的频率为 64%，所对应的风速主要在 5 m·s⁻¹ 以上。B 站基本为南风，风向介于 170~180° 间的频率为 41%，介于 180~190° 的风出现频率约为 17%，两者之和为 58%，所对应风速也主要在 5 m·s⁻¹ 以上；而偏北风所对应的风

速都在 2 m·s⁻¹ 以下。C 站点风向介于 150~160° 间的频率为 27%，风向介于 340~350° 的频率为 19%，另外有约 10% 的风向介于 350~360° 之间；一日内偏北风出现频率略高于偏南风频率，但偏北风风速都不足 5 m·s⁻¹，弱于偏南风。

总的来看，在绒布河谷中偏南风要强于偏北风，且偏南风为主导风向；3 个站点偏南风持续时间和风速维持在 5 m·s⁻¹ 以上的时间在沿河谷轴线方向上由南向北递减。

3.3 平均风速日变化

结合图 3 和 4 以及风向日变化（图略）来看，3 个站点风日变化有如下特征：

- (1) 3 个站点风速日变化共同特征为：在凌晨至上午风速都比较小，之后风速在短时间内迅速增大，在 18:00 左右达到风速极大值后迅速减小；风速较大的时期都对应着偏南风向。
- (2) A、B 两站平均风速日变化基本一致，即从凌晨 05:00 至中午 12:00 左右风速小于 1 m·s⁻¹，之后风速在 2 h 内迅速增大到 5 m·s⁻¹ 以上；14:00 后风速缓慢增加，至 18:00 出现极大值约 7.5 m·s⁻¹，之后风速缓慢减弱；凌晨 02:00 左右开始 B 站风速迅速减弱，1 h 内风速减弱至不足 1 m·s⁻¹ 的静风，A 站在凌晨 03:30 左右风速也开始迅速减弱，同样在短时间内风速减弱至静风。

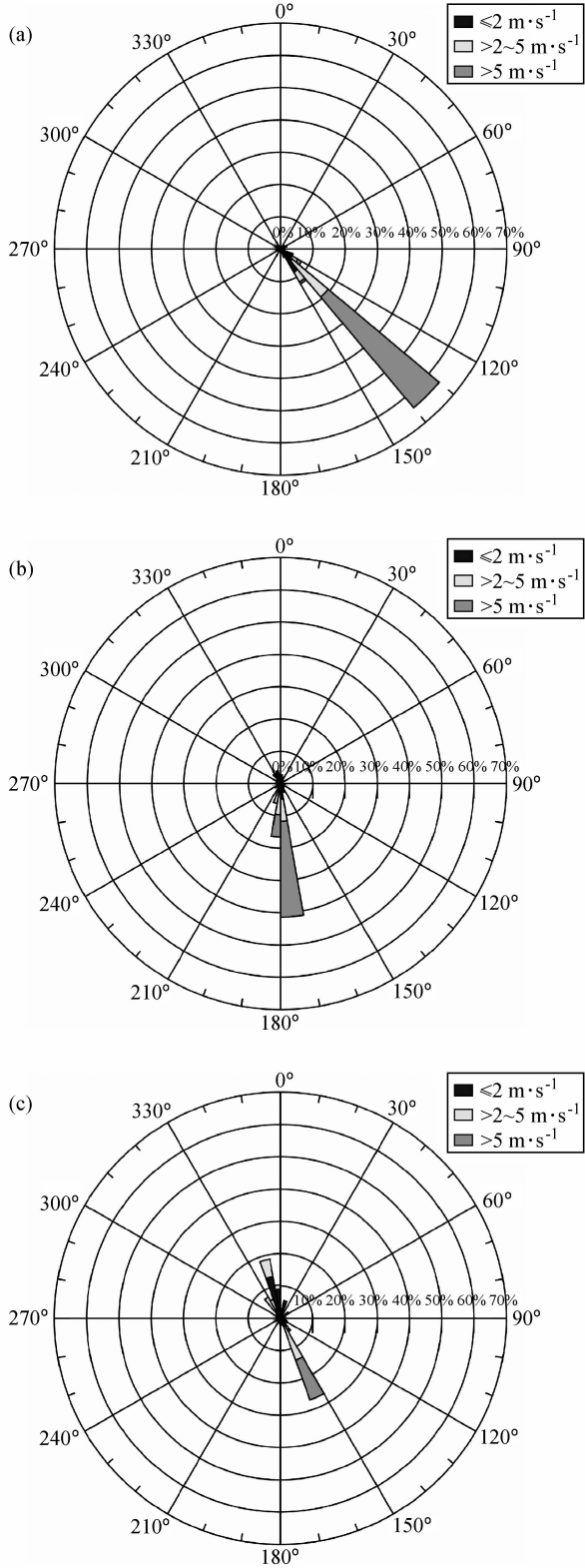


图3 平均风向玫瑰图: (a) A站; (b) B站; (c) C站
Fig. 3 Rose diagrams of the average wind direction: (a) site A;
(b) site B; (c) site C

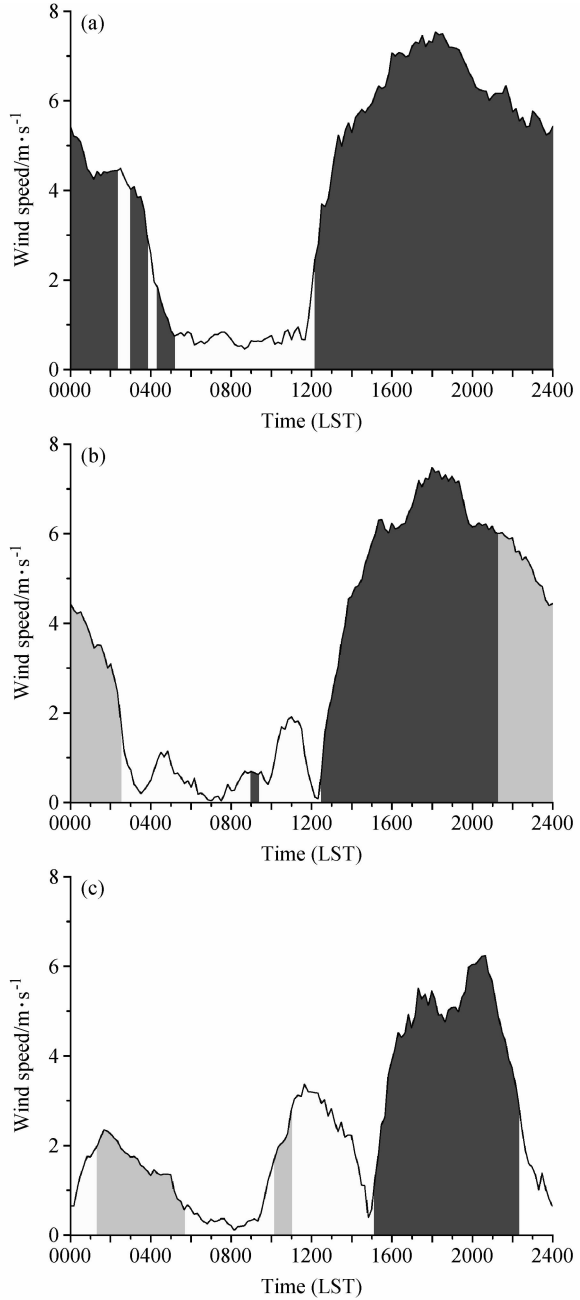


图4 平均风速日变化: (a) A站(黑色阴影区域对应的风向为130~140°); (b) B站(黑色阴影区域对应的风向为170~180°, 灰色阴影区域对应的风向为180~190°); (c) C站(黑色阴影区域对应的风向为150~160°, 灰色阴影区域对应的风向为340~350°)
Fig. 4 Diurnal variation of wind speed, averaged over periods of 29 May—30 Jun: (a) site A (the wind direction between 130—140° is black shaded); (b) site B (the wind direction between 170—180° and 180—190° are in black and gray shaded areas, respectively); (c) site C (the wind direction between 150—160° and 340—350° are in black and gray shaded areas, respectively)

而 C 站风速日变化与 A、B 两站明显不同: 小于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的静风自凌晨 05:00 持续至上午 10:00 左右, 然后风速增大并在 11:40 迅速增加到全天风速第二极大值 ($3.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 之后风速减弱, 至下午 15:00 左右又达到静风, 之后风速再次开始迅速增大(滞后 A、B 两站约 3 h), 其最大风速 $6.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 出现在 20:40; 之后在夜里 23:00 左右迅速减弱至 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的小风, 而在 02:00 左右, 风速又增大到一个极值。

(3) 3 个站风速开始增加的时刻对应于风向由偏北转偏南的时刻, 但是 C 站在凌晨 00:40 和上午 11:40 还有两个偏北风对应的较大风速时期。

(4) 自南向北(自 A 站至 C 站)风向在白天由偏北转为偏南的时间依次推迟: 距珠峰最近的 A 站点风向转变出现在 11:40 左右, 较远的 B 站风向转变滞后 A 站 30 min 左右, 而距珠峰最远的 C 站风向转变则推迟到下午 15:00 左右, 滞后 B 站 3 h。

(5) 偏南风维持时间自南向北(自 A 站至 C 站)逐步缩短: A、B 两站偏南风维持的时间明显大于 C 站, 偏南风自中午 12:00 左右开始一直持续至第二天凌晨 03:00 以后; C 站偏南风则推迟至从下午 15:00 起至午夜 00:00 左右结束。

可见, 珠峰北坡绒布河谷中平均风的日变化规律与经典的山谷风理论截然不同, 按照经典的山谷风理论, 白天, 绒布河谷中应该产生自山谷向山上吹的偏北谷风; 夜晚, 产生吹向山谷的偏南山风^[19]。下面将对这一观测事实进行探讨。

3.4 珠峰北坡绒布河谷的局地风系统

以上研究结果表明, 珠峰北坡绒布河谷中自中午开始盛行来自珠峰方向的偏南风, 该偏南风一直持续到午夜甚至第二天凌晨, 与典型的山谷风特征不同。该偏南风可能是来自河谷南端的珠峰等高大山脉和绒布冰川的冰川风、山谷风和坡风综合作用的结果。

冰川风的形成机制简单表述如下: 冰雪面较高的反照率减少了可被吸收的入射太阳辐射, 使得用于加热地面及其上空大气的能量减少; 另外一旦冰雪表面温度达到 0°C , 冰雪开始融化吸收热量, 使得其表面的温度维持在 0°C 左右。冰雪的这两个效应使得冰雪表面温度比同环境下无冰雪覆盖表面的温度要低很多, 由此形成一种类似

于夜晚下泻流的冰川风^[10,20~22]。

另外, 在珠峰北坡地区同时存在上坡风和下坡风: 白天太阳辐射加热使山谷两侧山坡上的空气变暖, 产生上坡风, 夜晚辐射冷却产生下坡风。同样, 由于山谷谷底倾斜, 白天风沿着谷底从低海拔地区吹向海拔高地区, 晚上相反, 风沿山谷轴线方向从高海拔地区吹向低海拔地区^[19,23]。

绒布河谷的南端存在 3 个大型冰川, 分别是东绒布、中绒布和西绒布冰川(图 1), 珠峰北坡夏季雪线在 $6\,000 \sim 6\,200 \text{ m}$ ^[24,25], 绒布冰川和珠峰等高大山体雪线以上常年为冰雪覆盖, 白天日出后, 具有高反照率的冰雪表面大气温度低于附近同高度上岩石和裸土上空的气温, 冷空气沿着冰雪斜面从高海拔地区吹向谷底(偏南风), 形成冰川风下泻流。随着太阳辐射的增强, 冰川风加强, 与此同时, 山谷被太阳辐射加热, 有沿着山谷两侧的上坡风和沿着谷底吹向珠峰方向的偏北谷风形成。冰川风由南向北吹, 途中一方面因为山谷两侧坡风的抽吸作用而得到加强, 另一方面, 又遭到来自北部的谷风的阻挡。所以, 距冰川最近的 A 站受偏南冰川风的影响最大, 几乎昼夜持续吹偏南风, 距离稍远的 B 站只有在中午有短暂而微弱的偏北谷风出现, 而 C 站点因为距离冰川最远, 从上午至下午 15:00 以前谷风强于冰川风, 迭加的结果为偏北风; 15:00 以后, 冰川风强于谷风, 该站点也开始吹偏南风, 但南风的极大值和出现时间都小于和晚于南部的 A 和 B 站。日落后, 大气温度降低, 冰雪表面温度和气温差减小, 冰川风的驱动力减弱, 因而冰川风变弱, 这个时候谷风也开始转变为偏南的山风。C 站位于河谷走向东转处, 从地形上看, 其周围山体夜晚的下坡风气流可能会堆积在河谷里, 导致夜里 C 站有较弱的北风出现。A、B 两站为弱的冰川风和山风的迭加, 仍然为南风。

冰川风下泻流的存在, 是 3 个站点的主导风向与其所处河谷轴线方向不一致的原因。从地形图(图 1)上看, 河谷大致走向为西北—东南, 而在高精度的地形图上可以看出, 3 个站点所在河谷轴线方向并不完全一致, A 站所在的河谷轴线约北偏西 19° , B 站处河谷轴线北偏西约 25° , C 站河谷轴线北偏西约 20° 。但是从图 3 看, A、B 和 C 3 个站点主导风向分别在北偏西 45° 、 5° 和 15°

~35°的方向上,这是因为在 A 站东南处有东绒布冰川,其冰川风下泻流沿该冰川吹下来,使得 A 站的风向更为偏东;B 站西南侧存在一个比绒布冰川略小的久达冰川,来自该冰川的冰川风偏西分量迭加到来自绒布冰川的东南风上,使得 B 站风向基本为南风;而 C 站所处位置在河谷东转处狭窄的河沟中,其附近地形比较复杂,因此风向比较杂乱,该处主导风向比河谷轴线方向略微偏东可能与 B 站点附近的局地地形有关。

为研究大尺度背景场与珠峰北坡绒布河谷地区地面风场的可能联系,我们对观测期间南亚地区的风场结构进行了分析。图 5 给出了观测期间 20:00 (1200 UTC) 500 hPa 等压面上南亚地区风场的分布状况,风场资料来自于 NCEP/NCAR 再分析资料。从图 5 上可以看出,500 hPa 等压面上南亚地区为强烈的西风控制,喜马拉雅山地区为较弱的西南风。实际上,从青藏高原表面 (600 hPa 左右) 至高空 150 hPa 以下高度内,珠峰地区都为西南风所控制 (图略),且风速随高度逐渐增大,在 600 hPa 为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,在 200 hPa 达最大值 $9.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此时绒布河谷中 3 个站的平均风速都在 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,并且风向均为东南风 (见图 4)。因此我们认为河谷中的局地环流系统主要

是由于冰川风下泻流和河谷地形形成的山谷风共同作用的结果,而受背景天气的影响比较小,这也说明了在山地等复杂地形条件下,其局地环流往往与高空风相关性比较差^[26],而且特别是在我国西部青藏高原这样的大地形下,NCEP 资料可信度比东部地区差^[27],更说明了进行实地观测的重要性。根据高登义等^[9]的研究,只有当珠峰上空有深厚的大尺度天气系统移过或者有中小尺度天气系统发生时,河谷中的冰川风才会受其影响而增强或减弱。

4 结论

通过对珠峰北坡绒布河谷地区 3 个观测站点为期一个多月的平均地面风场变化特征的初步分析,可以得到如下结论:

- (1) 与通常山区的山谷风系统不同,珠峰北坡绒布河谷中从中午至午夜盛行来自珠峰方向的偏南风。
- (2) 绒布河谷中偏南风风速存在显著的日变化,且不同站点间存在明显的差异;该偏南风首先在河谷南端发展,然后向北传播,在距离珠峰较近的两个站点 (A 和 B 站) 偏南风持续时间明

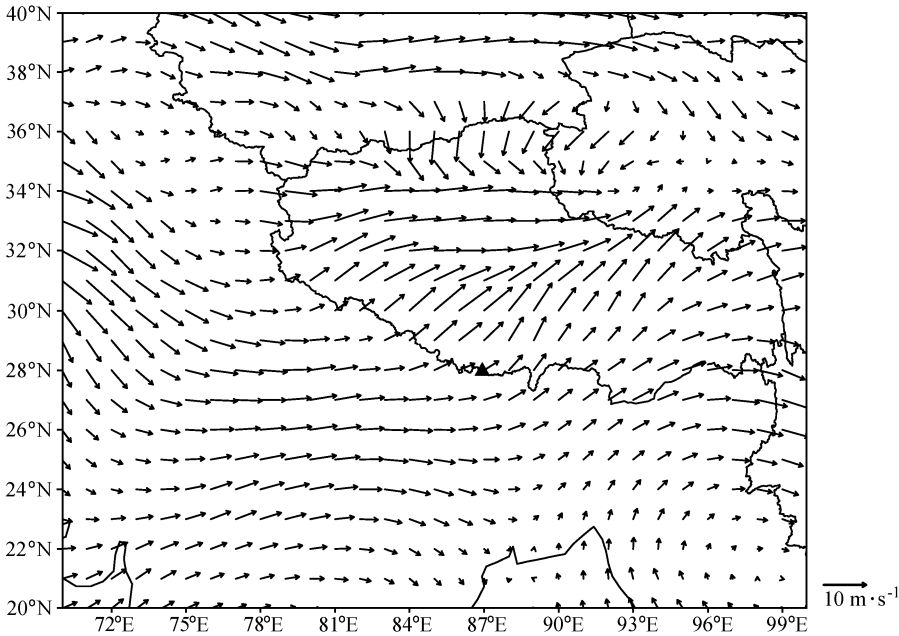


图 5 南亚地区 20:00 (1200 UTC) 500 hPa 等压面上平均风场。▲表示珠峰地区
Fig. 5 The averaged wind field of 500 hPa at 20:00 (1200 UTC) over the Southern Asia. ▲ denotes Mt. Qomolangma

显比最北的站点 (C 站) 长, 并且河谷南部风速也比北部大。

(3) 绒布河谷中的风场日变化可能受绒布河谷中的山谷风、坡风以及冰川风等多种环流系统所控制, 是其综合作用的结果, 并且冰川风可能起主要作用。

(4) 珠峰北坡绒布河谷地区地面平均风场受大尺度背景场影响较小, 表明该河谷地区局地特征明显。

本文对珠峰北坡绒布河谷地区的地面风场进行了初步的分析, 指出该地区存在着冰川风、山谷风和坡风等主要的环流系统。实际上, 由于该地区地形复杂, 存在的局地风系统也比较复杂, 例如该河谷还存在越山风系统。因此, 该地区的局地环流系统有待于进一步的加密站点强化观测和数值模拟研究。

致 谢 感谢中国科学院大气物理研究所李爱国、白建辉、贾晶晶、李鹏和霍翠萍的野外观测实验以及中国科学技术大学朱金焕在部分数据处理方面的工作。

参考文献 (References)

[1] 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1979. 220~266
Ye Duzheng, Gao Youxi. *Meteorology of the Qinghai-Xizang Plateau* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979. 220~266

[2] 陶诗言, 陈联寿, 徐祥德, 等. 第二次青藏高原大气科学试验理论研究成果 (一). 北京: 气象出版社, 1999. 348pp
Tao Shiyan, Chen Lianshou, Xu Xiangde, et al. *Progresses of Theoretical Study in the Second Tibetan Plateau Atmosphere Scientific Experiment* (Part I) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 348pp

[3] 吴国雄, 张永生. 青藏高原的热力和机械强迫作用以及亚洲季风的爆发 I. 爆发地点. 大气科学, 1998, **22** (6): 825~838
Wu Guoxiong, Zhang Yongsheng. Thermal and mechanical forcing of the Tibetan Plateau and the Asia monsoon onset. Part I: Situating of the onset. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, **22** (6): 825~838

[4] Wu Guoxiong, Zhu Baozhen, Gao Dengyi. The impact of Tibetan plateau on local and regional climate, from atmospheric circulation to global change. *Celebration of the 80th Birthday of Professor, Ye Duzheng*, Ed. Beijing: China

Meteorological Press, 1996. 425~440

[5] 吴国雄, 刘新, 张琼, 等. 青藏高原抬升加热气候效应研究的新进展. 气候与环境研究, 2002, **7** (2): 184~201
Wu Guoxiong, Liu Xin, Zhang Qiong, et al. Progresses in the study of the climate impacts of the elevated heating over the Tibetan Plateau. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (2): 184~201

[6] 周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究 (青藏高原大气科学试验, 1998). 北京: 气象出版社, 2000. 17
Zhou Mingyu, Xu Xiangde, Bian Linggen, et al. *Observational Analysis and Dynamic Study of Atmospheric Boundary Layer on Tibetan Plateau* (Tibetan Plateau Experiment of Atmospheric Sciences, TIPEX, 1998) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2000. 17

[7] Liu Huizhi, Zhang Hongsheng, Bian Linggen, et al. Characteristics of micrometeorology in the surface layer in the Tibetan Plateau. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, **19** (1): 73~88

[8] 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: 自然地理. 北京: 科学出版社, 1975. 202pp
Team of Scientific Expedition to Tibet, CAS. *Dissertation of Scientific expedition to Mt. Qomolangma Region: Physical Geography* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1975. 202pp

[9] 高登义, 冯雪华, 张江援. 珠穆朗玛峰北坡的冰川风. 珠穆朗玛峰地区科学考察报告 (1975), 气象与环境. 北京: 科学出版社, 1979. 34~51
Gao Dengyi, Feng Xuehua, Zhang Jiangyuan. The glacier wind on the northern slope of Mt. Qomolangma. In: *The Scientific Report on the Expedition of the Qomolangma Region* (1975), *Meteorology and Environment* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979. 34~51

[10] 高登义. 珠穆朗玛峰绒布河谷的冰川风. 冰川冻土, 1985, **7** (3): 249~256
Gao Dengyi. Glacier wind in the Rongbu Valley of Mt. Qomolangma. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 1985, **7** (3): 249~256

[11] 刘宇, 邹捍, 胡非. 青藏高原珠峰绒布河谷地区大气近地层观测研究. 高原气象, 2004, **23** (4): 512~518
Liu Yu, Zou Han, Hu Fei. Observation study on atmospheric surface layer in Rongbu Valley in Zumolama Peak Area of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (4): 512~518

[12] Zhu T, Lin W, Song Y, et al. Downward transport of ozone-rich air near Mt. Everest. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**, L23809, doi:10.1029/2006GL027726

[13] 刘宇. 珠峰和北极地区大气边界层观测研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2003
Liu Yu. Observation Study on Atmospheric Boundary Lay-

- er on Mt. Everest Area and the Arctic Area. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric physics, Chinese Academy of Sciences, 2003
- [14] Sun F, Ma Y, Li M, et al. Boundary layer effects above a Himalayan valley near Mount Everest. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L08808, doi:10.1029/2007GL029484
- [15] Tartari G, Verza G P, Bertolani L. Meteorological data at the pyramid observatory laboratory, Khumbu Valley, Sagarmantha National Park, Nepal. In: *Limnology of High Altitude Lakes in the Mt. Everest Region (Nepal)*, Lami A, Giussani G, Eds. Mem. Ist. Ital. Idrobiol., 1998, 57: 23~40
- [16] Ohata T, Higuchi K, Ikegami K. Mountain-valley wind system in the Khumbu Himal, East Nepal. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1981, **59**: 753~762
- [17] Egger J, Bajrachaya S, Egger U, et al. Diurnal winds in the Himalayan Kali Gandaki Valley. Part I: Observations. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128** (4): 1106~1122
- [18] Hindman E E, Upadhyay B P. Air pollution transport in the Himalayas of Nepal and Tibet during the 1995—1996 dry season. *Atmos. Environ.*, 2002, **36** (4): 727~739
- [19] Stull R B 著. 边界层气象学导论. 杨长新译. 北京: 气象出版社, 1991. 653~658
Stull R B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology* (in Chinese, translated by Yang Changxin). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 653~658
- [20] 康兴成. 高山冰川作用区局地环流和气温分析. 冰川冻土, 1992, **14** (2): 141~152
Kang Xingcheng. A study on local circulation and temperature in alpine glaciated area. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 1992, **14** (2): 141~152
- [21] Van den Broeke M R. Momentum, heat and moisture budgets of the katabatic wind layer over a midlatitude glacier in summer. *J. Appl. Meteor.*, 1997, **36**: 763~774
- [22] Oerlemans J, Grisogono B. Glacier winds and parameterization of the related surface heat fluxes. *Tellus A*, 2002, **54**: 440~452
- [23] Whiteman C D. *Mountain Meteorology, Fundamentals and Applications*. New York: Oxford University Press, 2000. 171~202
- [24] 中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所冰川研究室. 我国西藏南部珠穆朗玛峰地区冰川的基本特征. 中国科学, 1974, **4**: 383~400
The Glacier Research Department of Lanzhou Institute of Glaciology, Geocryology and Desert, CAS. The basic features of glacier in Mt. Everest region southern Tibet China. *Chinese Sciences* (in Chinese), 1974, **4**: 383~400
- [25] 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. 西藏冰川. 北京: 科学出版社, 1986. 328
Team of Scientific Expedition to Tibet, CAS. Dissertation of scientific expedition to Mt. Qomolangma. *Glaciers of Xizang (Tibet)* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1986. 328
- [26] Desiato F, Finardi S, Brusasca G, et al. Transalp 1989 experimental campaign I. Simulation of 3D flow with diagnostic wind field models. *Atmos. Environ.*, 1998, **32**: 1141~1156
- [27] 赵天保, 符淙斌. 中国区域 ERA-40、NCEP-2 再分析资料与观测资料的初步比较与分析. 气候与环境研究, 2006, **11** (1): 14~32
Zhao Tianbao, Fu Congbin. Preliminary comparison and analysis between ERA-40, NCEP-2 reanalysis and observation over China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (1): 14~32