

珠穆朗玛峰绒布河谷近地层大气湍流及 能量输送特征分析

仲雷^{1, 2} 马耀明^{1, 3} 李茂善³

1 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

摘 要 利用中国科学院 2005 年珠穆朗玛峰地区科学考察期间 (4 月 2 日至 6 月 7 日) 收集的大气观测资料, 分析了珠峰绒布河谷近地层水平风速、温度、湍流强度、湍流量日变化及地表能量平衡特征。通过分析得出近地层三维风速方差与稳定度的关系基本满足 $1/3$ 次方规律; 珠峰绒布河谷近地层大气水平风速、温度、动量通量、感热通量和潜热通量均存在明显的日变化; 地表获得的能量很大一部分以感热形式散失掉了, 潜热所占比重很小。另外, 还发现绒布河谷地区地表能量通量各分量并不满足能量平衡方程 $R_n = H_s + L_e + G$ 。通过对地面加热场的分析发现珠峰地表白天是强热源, 晚上转变为弱冷源。

关键词 近地层 湍流强度 能量通量 热量平衡 绒布河谷

文章编号 1006-9895 (2007) 01-0048-09

中图分类号 P425

文献标识码 A

An Analysis of Atmosphere Turbulence and Energy Transfer Characteristics of Surface Layer over Rongbu Valley in Mt. Qomolangma Area

ZHONG Lei^{1, 2}, MA Yao-Ming^{1, 3}, and LI Mao-Shan³

1 *Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085*

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

3 *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*

Abstract Mt. Qomolangma is much closer to the free troposphere than other regions on the Tibetan Plateau due to its high elevation. It is also a typical area with a special interaction process between land surface and atmosphere, and the high elevation makes itself become an optimal area to study energy transfer and mass exchange over there. With little influence by human being, Mt. Qomolangma is also an ideal place for atmospheric environment observation of the Northern Hemisphere. The process of energy transfer and mass exchange between land surface and atmosphere on the Tibetan Plateau can be better understood by observing the interaction itself and determining the variation characteristics of turbulent parameters such as turbulent intensity, momentum flux and heat flux, etc. The parameterization scheme of global and local climate model can also be improved at the same time. Based on the turbulent data collected at Mt. Qomolangma Base Camp ($28^{\circ}08'15''N$, $86^{\circ}51'13''E$) from May 21 to 27, turbulent intensity and turbulent fluxes are acquired by using the eddy correlation method. Diurnal variation characteristics of

收稿日期 2005-09-26, 2005-12-19 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-231、KZCX3-SW-339, 科技部社会公益研究专项 2005DIA3J106, 国家自然科学基金资助项目 40520140126

作者简介 仲雷, 男, 1979 年出生, 在读博士, 研究方向: 主要从事大气边界层观测实验和卫星遥感应用研究。

E-mail: zhongl@itpcas.ac.cn

wind speed, air temperature, turbulent fluxes and energy balance in the surface layer are also analyzed in this paper. Some preliminary results are acquired as follows: (1) Diurnal variation curve of air temperature is a single-peak pattern and the general variation trend of horizontal wind speed is similar to air temperature variation trend. Under the influence of glacial wind and opposite direction of valley wind, the dominant wind direction at Mt. Qomolangma Base Camp is North-South. (2) The relations between three-dimensional wind speed variances and z/L follow the "law of 1/3 power", and $\sigma_u/u_* = 3.33$, $\sigma_v/u_* = 3.66$, $\sigma_w/u_* = 1.17$ under neutral atmospheric condition. (3) The land surface of Rongbu valley is very dry in May. The momentum flux, sensible heat flux and latent heat flux in the surface layer show obvious diurnal variations. The most energy obtained in the surface layer disperse in form of sensible heat while the latent heat is proportionally small at that time. (4) The observational land surface heat flux is "not balance" to follow the equation $R_n = H_s + L_e + G$. (5) The analyses of surface heating field characteristics show that the land surface of Rongbu valley is a strong heat source in the daytime and it changes into a weak cold source in the evening.

Key words surface layer, turbulent intensity, energy flux, energy balance, Rongbu valley

1 引言

青藏高原地处我国西部, 约占我国国土面积的四分之一, 平均海拔在 4000 m 以上, 是世界上面积最大、平均高度最高的高原。青藏高原热力、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均有重大影响。因此, 对青藏高原的研究愈来愈受到中外学者的关注。青藏高原对大气的动力和热力作用主要是通过下垫面与大气的相互作用, 并以湍流方式进行物质和能量交换而实现的。开展青藏高原上地气系统物理过程的观测, 分析确定动量、热量和水汽等湍流参数的变化特征, 将有助于改进全球气候模式和区域天气、气候模式在该地区的参数化方案。20 世纪 50 年代以来, 中国科学家进行了多次关于青藏高原的气象科学试验, 积累了大量的宝贵资料, 并且取得了丰硕的科研成果^[1~7]。但是, 由于青藏高原特殊的地理条件和恶劣的气候环境给野外观测试验造成极大困难, 使得很多试验只能在现有的城市附近和交通相对便利的地区展开, 并且观测站点海拔高度一般也都较低, 不足以了解像珠穆朗玛峰(以下简称珠峰)这样的大地形对大气环流的影响。珠峰地区人烟稀少, 交通十分不便, 是良好的大气环境观测的本底区域^[8]。

中国科学院珠峰地区科学考察于 2005 年 4 月至 6 月全面展开, 期间大气物理组架设两套大气湍流观测系统, 对珠峰绒布河谷地区大气状况进行了连续一个半月的观测, 取得了宝贵的大气物理资料。基于此, 我们对绒布河谷和近地层大气之间的

湍流和能量交换特征进行分析。

2 实验场地、观测仪器和资料处理

由于珠峰地区地形条件复杂, 而山地地形通量观测的主要问题是地形对湍流观测的影响, 即如果在观测的步程之内地形是平坦而均匀的, 则观测到的各大气湍流量不受影响, 反之观测结果将不具有代表性。基于此, 我们选取了大本营附近一个实验点(28°08'15"N, 86°51'13"E), 海拔 5149 m, 实验点三面环山, 南面是珠峰, 东西两侧是两条近乎南北走向的山脉, 观测点距东山 500 m, 距西山约 2 km, 南山 5 km。距观测点 1 km 处是宽约 10 m 的绒布河, 绒布河流向近北稍偏西, 长约 18 km, 流域面积为 379 km²(图 1)。观测场地位于高寒山区, 植被稀少, 下垫面为典型的富含沙砾的荒



图 1 绒布河谷

Fig. 1 Rongbu valley

漠土,这一测点基本代表了珠峰地区的典型环境。

观测仪器由一套开路涡动协方差测量系统组成,该系统由 CR5000 数据采集器、CSAT3 超声风速仪和 LI7500 CO₂、水汽分析仪组成。CR5000 控制测量、运算及数据存储;CSAT3 测量三维风速和超声虚温;LI7500 测量 CO₂ 和水汽通量。除了 LI7500 功耗较大外(12VDC, 1A),其他仪器的功耗均较小。CSAT3、LI7500 以 SDM 方式输出。CR5000 数据采集器有 2M 内存。系统工作时计算在线通量,并存贮通量数据和时间系列数据。其他传感器还有:1 个 HMP45C 温度/相对湿度探头,一个 HFP01 热通量板(也称为热通量传感器)和一套由 Kipp & Zonen 制造的测量净辐射的理想仪器 CNR-1,它由两个短波和两个长波辐射组成,包括两个日辐射计和两个地面辐射计。LI7500 CO₂、水汽分析仪、超声 CSAT3 和 HMP45C 温度/相对湿度探头均安装在距离地面约 3 m 高度处;CNR-1 距离地面约 1.5 m;热通量板水平置于距地表 10 cm 处土壤中。

湍流观测系统的数据采集为同步采集,采样频率为 10 Hz,不间断连续采集,一周取一次数据。本次研究采用 5 月 21 日至 27 日的数据进行分析,全部数据都进行“野点”剔除,然后取 30 分钟数据段进行平均量、方差、通量等一系列湍流统计运算。为了保证数据质量,均去除湍流资料^[9]:(1)风向与水平面夹角 $>\pm 3^\circ$;(2)平均风速 <1.5 m/s;(3)摩擦速度 $u_* < 0.05$ m/s;(4)感热通量 $H_s < 5$ W/m²,以及非定常、明显存在错误的的数据,以保证湍流的均一性条件。

湍流数据的处理采用涡旋相关法,本文分析所用的主要计算公式如下:

三维风速脉动量:

$$u' = u - \bar{u}, \quad v' = v - \bar{v}, \quad w' = w - \bar{w};$$

特征尺度摩擦风速:

$$u_* = (\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2})^{1/4};$$

Monin-Obukhov 长度:

$$L = -\frac{u_*^3}{\kappa \frac{g}{\theta} \overline{\theta'w'}};$$

风脉动标准差:

$$\sigma_u = \sqrt{\overline{u'u'}}, \quad \sigma_v = \sqrt{\overline{v'v'}}, \quad \sigma_w = \sqrt{\overline{w'w'}};$$

湍流强度:

$$I_u = \sigma_u/u_*, \quad I_v = \sigma_v/u_*, \quad I_w = \sigma_w/u_*;$$

超声感热通量:

$$H_s = \rho c_p \overline{\theta'w'};$$

潜热通量:

$$L_e = L_v \rho \overline{w'q'};$$

动量通量:

$$\tau = -\rho \overline{u'w'}.$$

式中, u 、 v 和 w 分别为超声风速仪所测得的三维风速瞬时值, \bar{u} 、 \bar{v} 和 \bar{w} 为三维风速平均值; θ 和 ρ 分别为位温和空气密度,由同步实测气压和温度求得; κ 为 Karman 常数($\kappa=0.4$), g 为重力加速度, c_p 为定压比热, L_v 为水汽的汽化热系数。

3 结果分析

3.1 近地层气温和风速日变化特征

从珠峰绒布河谷地区近地层气温和水平风速平均日变化曲线(图 2)可以看出,绒布河谷气温日

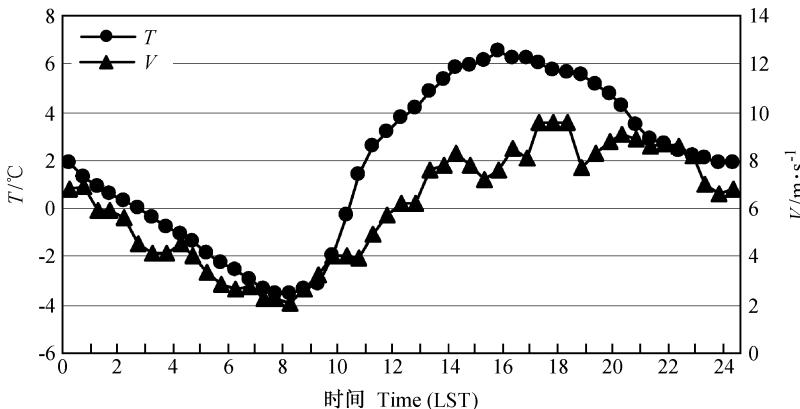


图 2 气温(T)和水平风速(V)平均日变化

Fig. 2 The average diurnal variations of air temperature (T) and horizontal wind speed (V)

变化呈单峰型分布特点,一天之中有一气温最高值 6.49°C,出现在 15:30(北京时,下同)。还有一气温最低值-3.58°C,出现在 08:00。水平风速日变化曲线和气温日变化曲线趋势较为一致,但不如气温变化平缓。一天中最高、最低水平风速分别为 9.58 m/s 和 2.03 m/s,出现在 17:00 和 08:00。另外,由于观测点距离珠峰绒布冰川较近,受到典型的冰川沉降风和反方向谷风的影响,观测点主导风向为南北方向。

3.2 近地层湍流强度特征

近地层三维风速脉动方差 σ_u 、 σ_v 、 σ_w 经过摩擦风速归一化处理后应为稳定度参数 z/L 的函数,即:

$$\frac{\sigma_u}{u_*} = \Phi_u \frac{z}{L}, \quad \frac{\sigma_v}{u_*} = \Phi_v \frac{z}{L}, \quad \frac{\sigma_w}{u_*} = \Phi_w \frac{z}{L}.$$

根据近地层相似理论,在中性层结下 (z/L 接近零值) 近地层湍流主要由机械运动产生,各相似函数分别变为常数,即在中性情况下有: $\sigma_u/u_* = A$, $\sigma_v/u_* = B$, $\sigma_w/u_* = C$, 其中 A 、 B 、 C 为常数。图 3 给出了绒布河谷地区近地层风速随稳定度的变化情况,从图中可以看出无因次风速分量方差和 z/L 的关系基本上满足 $1/3$ 次方规律,其最佳相似函数分别为

$$\frac{\sigma_u}{u_*} = \Phi_u \frac{z}{L} = \begin{cases} 3.33 (1 + 0.01 \frac{z}{L})^{1/3}, & 0.001 < \frac{z}{L} < 10000, \\ 3.33 (1 - 0.04 \frac{z}{L})^{1/3}, & 0.001 < -\frac{z}{L} < 10000, \end{cases}$$

$$\frac{\sigma_v}{u_*} = \Phi_v \frac{z}{L} = \begin{cases} 3.66 (1 + 0.01 \frac{z}{L})^{1/3}, & 0.001 < \frac{z}{L} < 10000, \\ 3.66 (1 - 0.02 \frac{z}{L})^{1/3}, & 0.001 < -\frac{z}{L} < 10000, \end{cases}$$

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = \Phi_w \frac{z}{L} = \begin{cases} 1.17 (1 + 0.0022 \frac{z}{L})^{1/3}, & 0.001 < \frac{z}{L} < 10000, \\ 1.17 (1 - 0.003 \frac{z}{L})^{1/3}, & 0.001 < -\frac{z}{L} < 10000. \end{cases}$$

随着大气不稳定度的加强,水平方向和垂直方向的湍流强度变大。在大气处于中性层结时, σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 、 σ_w/u_* 分别趋近于常数 $A=3.33$ 、 $B=3.66$ 、 $C=1.17$; 而伴随大气稳定度的增加,三者又同时变大。通过与其他不同地区近中性条件下无因次风速分量方差值的对比(表 1)可以发现,珠峰、五道梁、昌都和罗克斯普林斯 [Rock Springs, PA (46° 50' N, 106° 13' W)] 四个地区三维风速方差值略有差异,但均为 σ_w/u_* 比 σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 两者值小。而四个地区的 σ_w/u_* 值又以五道梁地区最大(1.35)。另外,四个地区的 σ_u/u_* 和 σ_v/u_* 差异要比 σ_w/u_* 小。但与其他三个地区相比,大气处于近中性层结时,只有珠峰地区 $\sigma_u/u_* < \sigma_v/u_*$, 这可能与珠峰大本营观测点周围复杂的地形条件有关,观测点三面环山,尤其是距离东山较近(500 m),这会对不同方向上的风速差异造成一定的影响。总体上来说,近中性条件下珠峰大本营的风速分量方差与美国罗克斯普林斯山区观测值相对比较接近。

从图 3 中还可以反映出 σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 的离散度均比较大,说明珠峰地区受到大范围水平流场的影响强烈。这与卞林根等^[6]和马耀明等^[7]分别对那曲和昌都大气状况分析后得出的结论相同,他们得出两地水平方向大气湍流均受到大范围水平流场的影响。另外,由于观测场地周围崎岖的地形条件和珠峰地区典型山谷风的影响,使得大气湍流垂直方向上的湍流强度离散度相应增大^[12, 13]。

表 1 不同地区近中性条件下无因次风速分量方差值

Table 1 Non-dimensional covariance values of wind speed under neutral stratification condition in different areas

观测站 Observation station	σ_u/u_* (A)	σ_v/u_* (B)	σ_w/u_* (C)	观测者 Observer
珠峰大本营 Mt. Qomolangma Base Camp	3.33	3.66	1.17	本文 This study
五道梁 Wudaoliang	2.98	2.91	1.35	祁永强等 ^[10] Qi Yongqiang, et al ^[10]
昌都 Qamdo	3.45	3.15	1.30	卞林根等 ^[6] Bian Lin'gen, et al ^[6]
罗克斯普林斯 Rock Springs, PA	4.50	3.80	1.24	Panofsky et al ^[11]

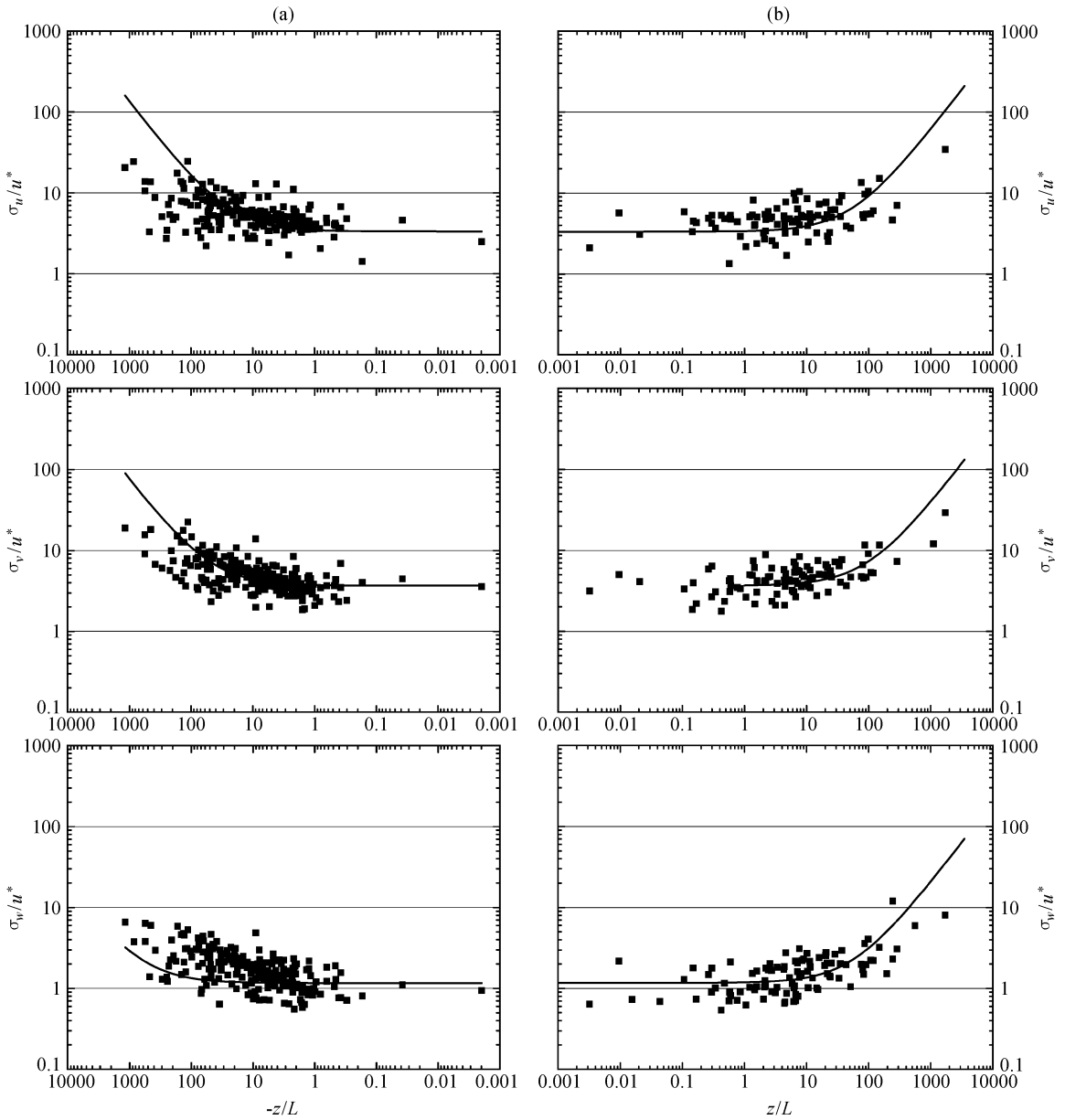


图3 珠峰绒布河谷无量纲化风速方差相对于稳定度参数 z/L 的变化: (a) $0.001 < -z/L < 10000$; (b) $0.001 < z/L < 10000$

Fig. 3 Variations of σ_u/u_* , σ_v/u_* , and σ_w/u_* versus stability (z/L) in Rongbu valley: (a) $0.001 < -z/L < 10000$; (b) $0.001 < z/L < 10000$

3.3 近地层湍流通量的时间变化

3.3.1 动量通量 τ 日变化

图4为湍流观测期动量按半小时平均后的日变化结果,从图中可以看出绒布河谷动量通量日变化明显,平均一日内存在一个最大值和一个最小值,分别出现在15:00和04:30。综观日变化曲线,从10:30开始,动量通量逐渐加大,到15:00达到一个顶峰,此后动量通量开始逐渐变小,到04:30达到最低值。

3.3.2 感热通量 H_s 日变化

利用涡旋相关法求得各日感热通量变化,然后进行逐日半小时平均,得到感热通量7天平均日变化特征(图4)。从图4中可以看出,珠峰绒布河谷感热通量的平均日变化情况与常见的情形一致,上午 H_s 逐渐增大,10:00左右,感热通量由负变正,14:00左右达到最大,之后开始减小。这是因为日出后随着太阳高度角的增大,地面得到的太阳辐射增加,加之午后湍流运动较强,地面温度也达到一

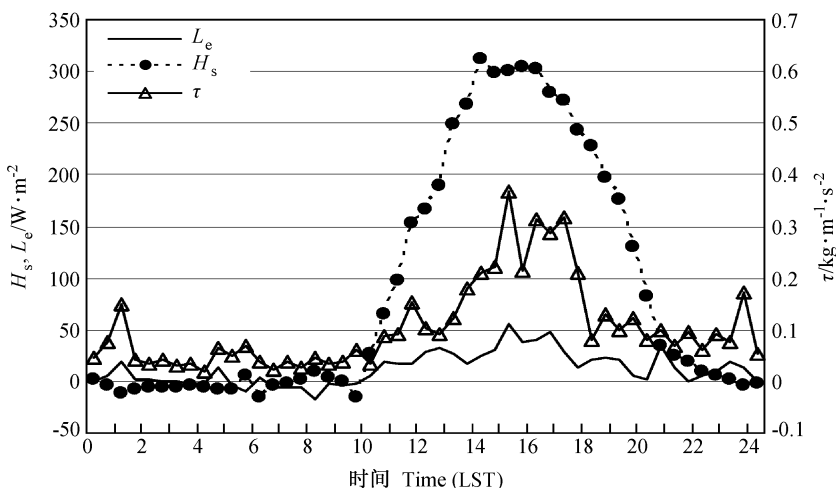


图 4 动量通量、感热通量和潜热通量平均日变化

Fig. 4 The average diurnal variations of momentum flux (τ), sensible heat flux (H_s) and latent heat flux (L_e)

天中的最高值，向近地层大气传送的热量随之达到最大。随后，由于太阳高度角的降低，地面获得的太阳辐射能量逐渐减少，地表温度随之下降，感热通量于 23:00 左右，由正转负。一日内感热通量正负时间基本等长，其最大值和最小值分别为 311.07 W/m^2 和 -15.31 W/m^2 。日平均值 88.6 W/m^2 ，这一数值与李栋梁等^[14]对青藏高原春季感热通量计算结果相符，其通过计算得出春季青藏高原两个感热最大区，其中一个就出现在喜马拉雅山北麓的定日站 ($28^\circ38'N$, $87^\circ05'E$)，数值超过 90 W/m^2 。

3.3.3 潜热通量 L_e 日变化

从潜热通量 7 天平均日变化曲线 (图 4) 可以看出珠峰绒布河谷潜热通量变化复杂，但分别有一个最大值和最小值，出现在 15:00 和 08:00。一天总体上表现出以地表向大气输送潜热为主，这跟地表温度高于近地层大气温度有关。但潜热通量一天最大值仅为 54.47 W/m^2 ，日平均值为 11.93 W/m^2 。

这与绒布河谷地区 5 月份地表干燥、空气中含水量少是分不开的。

通过与 1991 年黑河实验区三种不同下垫面上的感热通量和潜热通量日均值的比较 (表 2)^[15] 可以看出，珠峰绒布河谷地区感热通量日均值比黑河地区戈壁、沙漠和绿洲都要大，而潜热通量比三者都要小，此地区 Bowen (H_s/L_e) 比为 7.43，反映出珠峰绒布河谷地表获得的能量很大一部分以感热形式散失掉了，以潜热散失的能量相对要小得多，说明绒布河谷 5 月地表状况异常干燥。这是因为 5 月份属于高原季风来临前期，几乎没有降水。而作为绒布河主要补给源的冰川融水此时不是很充足，导致河水水面较窄，水位也不高。观测点虽然处于绒布河谷中，但距绒布河约有 1 km 左右距离，而且观测点和绒布河水面有一定的高差。同时观测点周围又少有植被，土壤为荒漠土，含水量极少。在这些因素的综合作用下，绒布河谷地表呈十分干燥状态。

表 2 珠峰地区与黑河实验区三种不同下垫面上的感热通量和潜热通量对比

Table 2 Comparison of sensible heat fluxes and latent heat fluxes between Qomolangma area and three other different underlying surfaces in the HEIFE (Heihe River Field Experiment)

地名 Place name	时间 Time	日平均 H_s Daily average $H_s/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	日平均 L_e Daily average $L_e/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
黑河实验区 HEIFE area			
戈壁 Gobi ($39^\circ08'55"N$, $100^\circ05'54"E$)	17 Aug 1991	66.2	30.5
沙漠 Desert ($39^\circ22'50"N$, $100^\circ09'62"E$)	17 Aug 1991	62.2	30.2
绿洲 Oasis ($39^\circ08'50"N$, $100^\circ09'34"E$)	8 Jul 1991	22.4	145
珠峰 Mt. Qomolangma ($28^\circ08'15"N$, $86^\circ51'13"E$)	21-27 May 2005	88.6	11.93

3.4 地表能量平衡特征

图5给出了珠峰绒布河谷地区能量平衡各分量平均日变化曲线,可以看出,绒布河谷地区净辐射通量、感热通量、潜热通量和土壤热通量均存在明显的日变化,一天内有一个最高值和一个最低值。净辐射通量最大值 633.99 W/m^2 , 最小值 -116.69 W/m^2 , 分别出现在 14:00 和 05:00, 代表着地表获得和亏损能量最大的时刻。需要指出的是净辐射通量在 14:30 有一个微弱的波动,这是由于个别午后观测点上空有大片的云,云的存在反射了相当一部分入射太阳辐射,使到达地面的太阳辐射减少,而当云从观测点上方天空消失后,地表所获得的净辐射又会有一定程度的增加。土壤热通量最大值 163.03 W/m^2 , 出现在 15:30, 最小值 -71.7 W/m^2 , 出现在 09:00。感热通量最大值和最小值分别为 311.07 W/m^2 和 -15.31 W/m^2 , 出现在 14:00 和 06:00。潜热通量最大值 54.47 W/m^2 , 出现于 15:00, 最小值 -17.83 W/m^2 , 出现在凌晨 01:30。从图5中可以看出,净辐射通量、感热通量、潜热通量和土壤热通量一日之内均两次通过零点,但后三者相对于净辐射通量有明显的滞后效应,如净辐射由负变正的时间为 09:00~09:30,而感热通量、潜热通量和土壤热通量由亏损变盈余的时间分别为 09:30~10:00、09:30~10:00 和 10:30~11:00。相反,净辐射由正变负的时间为 20:00~20:30,后三者分别为 23:00~23:30、02:00~02:30 和 21:00~21:30。这反映了感热通量、潜热通量和土壤热

通量的变化均以净辐射通量变化为基础,净辐射的变化决定了能量平衡其他各分量的变化。一日之内感热通量、潜热通量和土壤热通量所占净辐射通量的比例分别为 75%、10.1% 和 13.4%,说明绒布河谷获得的太阳辐射能量大部分以感热的形式散失掉了,其余一部分以地热流的形式向地下传输,仅 10.1% 的能量以潜热的方式释放掉。需要指出的是,珠峰绒布河谷地区地表能量各分量并不满足能量平衡方程 $R_n = H_s + L_e + G$ 。这是因为净辐射能量扣除感热通量、潜热通量和地热流后,剩余 1.5% 的能量可能通过水平热平流散失掉了^[16],当然也不排除仪器测量和计算误差的影响。

3.5 地面加热场

青藏高原地面对大气的加热作用,对我国东部地区的天气气候有重要影响。因此对这个问题的研究引起气象工作者的关注^[5]。高原地面对大气的加热作用是由湍流过程和辐射过程来决定的。定义 $R_n - G$ 为地面加热强度 (R_n 为净辐射通量、 G 为土壤热通量),即当 $R_n - G > 0$ 时,地面向大气输送热能,地面对大气而言为热源;反之,当 $R_n - G < 0$ 时,地面对大气而言则为冷源。图6是绒布河谷地区地面加热场强度日变化规律,从图中可以看出,绒布河谷地表白天是强热源,白天地面对大气的加热作用明显。早上日出后,地面加热场逐渐加强,尤其是在 14:00 前后,其热源强度达到最大,可达 477.8 W/m^2 以上。而后地面加热场逐渐减弱,傍晚日落 (19:30~20:00) 以后,地面就转变成弱冷源。

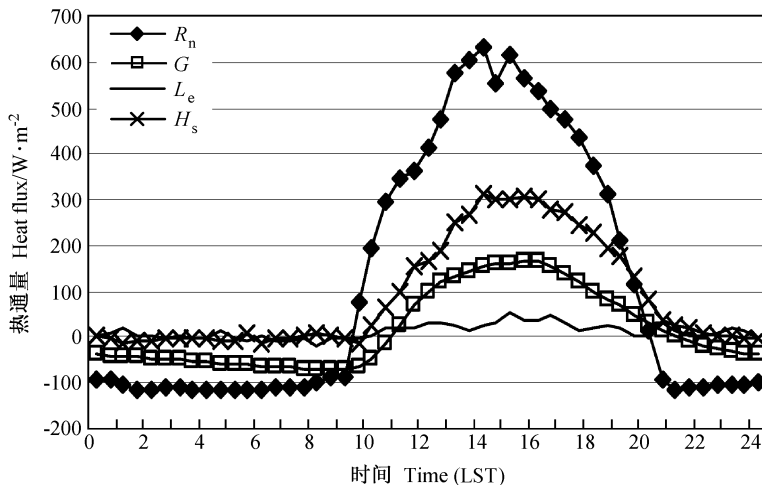


图5 绒布河谷能量平衡各分量平均日变化曲线

Fig. 5 The average diurnal variations of R_n (net radiation flux), G (heat flux of soil), L_e and H_s in Rongbu valley

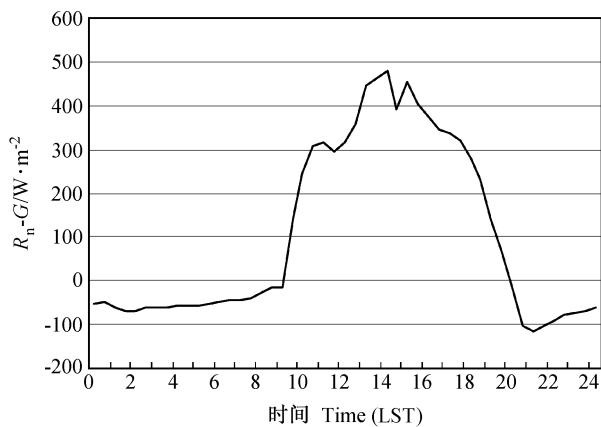


图 6 绒布河谷地面加热场强度日变化规律

Fig. 6 The average diurnal variations of surface heating intensity (R_n-G) in Rongbu valley

4 结论

通过对珠峰绒布河谷地区大气湍流等重要气象要素的实际观测和分析计算,可以得到以下几点初步结论:

(1) 绒布河谷地区气温呈单峰型分布特点,水平风速日变化和气温日变化基本趋势一致,受到冰川沉降风和反方向谷风的影响,观测点主导风向为南北方向。

(2) 绒布河谷地区近地层无因次风速分量方差和静力学稳定度的关系满足 $1/3$ 次方规律,且在近地层大气处于中性稳定状态时, $\sigma_u/u_* = 3.33$, $\sigma_v/u_* = 3.66$, $\sigma_w/u_* = 1.17$ 。

(3) 近地层大气湍流量、感热通量和潜热通量均存在明显的日变化,每天有一个最大值和最小值。绒布河谷地区 5 月地表异常干燥,感热通量要远大于潜热通量。

(4) 绒布河谷地区地表能量各分量不满足能量平衡方程,感热通量、潜热通量和土壤热通量所占净辐射通量的比例差异悬殊,且它们相对净辐射通量有一种滞后效应。

(5) 绒布河谷地区地面对大气的加热作用显著,白天地面为强热源,晚上转变为弱冷源。

致谢 在珠峰科学考察过程中得到了康世昌研究员、刘新副研究员和井哲帆副研究员的帮助,在此深表谢意!

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. 278pp

Ye Duzheng, Gao Youxi. *Tibetan Plateau Meteorology* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979. 278pp

[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进展(一). 北京: 气象出版社, 1998. 348pp

Tao Shiyang, Chen Lianshou, Xu Xiangde, et al. *Progresses of the Theoretical Study in the Second Tibetan Plateau Experiment of Atmospheric Sciences (Part I)* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1998. 348pp

[3] 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. 北京: 气象出版社, 2000. 1~14

Zhou Mingyu, Xu Xiangde, Bian Lin'gen, et al. *Observational Analysis and Dynamic Study of Atmospheric Boundary Layer on Tibetan Plateau* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2000. 1~14

[4] 刘辉志, 洪钟祥. 青藏高原改则地区近地层湍流特征. 大气科学, 2000, **24** (3): 289~300

Liu Huizhi, Hong Zhongxiang. Turbulent characteristics in the surface layer over Gerze area in the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24** (3): 289~300

[5] 马耀明, 塚本修, 吴晓鸣, 等. 藏北高原草甸下垫面近地层能量输送及微气象特征. 大气科学, 2000, **24** (5): 715~722

Ma Yaoming, Osamu Tsukamoto, Wu Xiaoming, et al. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in the surface layer of the atmosphere above grassy marshland of the Tibetan Plateau area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24** (5): 715~722

[6] 卞林根, 陆龙骅, 程彦杰, 等. 青藏高原东南部昌都地区近地层湍流输送的观测研究. 应用气象学报, 2001, **12** (1): 1~13

Bian Lin'gen, Lu Longhua, Cheng Yanjie, et al. Turbulent measurement over the southeastern Tibetan Plateau. *Journal of Applied Meteorology Science* (in Chinese), 2001, **12** (1): 1~13

[7] 马耀明, 马伟强, 胡泽勇, 等. 青藏高原草甸下垫面湍流强度相似性关系分析. 高原气象, 2002, **21** (5): 514~517

Ma Yaoming, Ma Weiqiang, Hu Zeyong, et al. Similarity analysis of atmospheric turbulent intensity over grassland surface of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2002, **21** (5): 514~517

[8] 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

[9] 张宏升, 李富余, 陈家宜, 等. 不同下垫面湍流统计特征研究. 高原气象, 2004, **23** (5): 598~604

Zhang Hongsheng, Li Fuyu, Chen Jiayi, et al. Statistical characteristics of atmospheric turbulence in different underly-

- ing surface conditions. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (5): 598~604
- [10] 祁永强, 王介民, 贾立, 等. 青藏高原五道梁地区湍流输送特征的研究. *高原气象*, 1996, **15** (2): 172~177
Qi Yongqiang, Wang Jiemin, Jia Li, et al. A study of turbulent transfer characteristics in Wudaoliang area of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1996, **15** (2): 172~177
- [11] Panofsky H A, Tenekes H, Lenschow D H, et al. The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions. *Boundary-Layer Meteorology*, 1977, **11**: 355~361
- [12] Founda D, Tombrou M, Lalas D P, et al. Some measurements of turbulence characteristics over complex terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 1997, **83**: 221~245
- [13] Moraes O L L, Acevedo O C, Degrazia G A, et al. Surface layer turbulence parameters over a complex terrain. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**: 3103~3112
- [14] 李栋梁, 李维京, 魏丽, 等. 青藏高原地面感热及其异常的诊断分析. *气候与环境研究*, 2003, **8** (1): 71~83
Li Dongliang, Li Weijing, Wei Li, et al. A diagnostic study of surface sensible heat flux anomaly over the Qinghai-Xizang Plateau. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (1): 71~83
- [15] 马耀明, 王介民, 张庆荣, 等. 南沙海域大气湍流通量输送特征分析. *高原气象*, 1997, **16** (1): 45~51
Ma Yaoming, Wang Jiemin, Zhang Qingrong, et al. The analysis of turbulent fluxes transfer characteristics over Nansha Sea region. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1997, **16** (1): 45~51
- [16] Tanaka K, Tamagawa I, Ishikawa H, et al. Surface energy budget and closure of the eastern Tibetan Plateau during the GAME-Tibet IOP 1998. *Journal of Hydrology*, 2003, **283**: 169~183