

李跃清, 刘辉志, 冯健武, 等. 2009. 高山草甸下垫面夏季近地层能量输送及微气象特征 [J]. 大气科学, 33 (5): 1003–1014. Li Yueqing, Liu Huizhi, Feng Jianwu, et al. 2009. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in the surface layer of the atmosphere in summer over the alpine meadow of the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 1003–1014.

# 高山草甸下垫面夏季近地层能量输送及微气象特征

李跃清<sup>1</sup> 刘辉志<sup>2</sup> 冯健武<sup>2, 3</sup> 赵兴炳<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610071

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘 要** 利用青藏高原东坡理塘站 2007 年 6~8 月的观测资料, 分析了高原东坡草甸下垫面夏季近地层气象要素和湍流通量日变化特征, 并用涡动相关法估算地面的曳力系数。结果表明: 水平风速、动量通量、摩擦速度等均在下午最大, 早晨最小。二氧化碳浓度表现为早晚高、中午低的日变化特征, 比湿的最大值出现在早晨。地表辐射、热量平衡各分量最高值出现在中午, 最低值出现在早晨。地表反照率表现出早晚高中午低的“U”型分布, 日平均值为 0.164。夏季地面热源强度在白天午后表现为强的热源, 在夜里表现为弱的冷、热源交替出现。夏季近地层地气热量交换中, 感热输送作用小, 潜热输送占主要地位。

**关键词** 高山草甸下垫面 微气象 湍流通量

**文章编号** 1006-9895 (2009) 05-1003-12

**中图分类号** P404

**文献标识码** A

## Characteristics of Energy Transfer and Micrometeorology in the Surface Layer of the Atmosphere in Summer over the Alpine Meadow of the Tibetan Plateau

LI Yueqing<sup>1</sup>, Liu Huizhi<sup>2</sup>, Feng Jianwu<sup>2, 3</sup>, and ZHAO Xingbing<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610071

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

<sup>3</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** Based on the observational data of the alpine meadow surface at Litang on eastern slope of the Tibetan Plateau from June to August in 2007, the characteristics of micrometeorology elements and energy fluxes are analyzed in the paper. The drag coefficient is calculated by eddy covariance method. Results show that: the diurnal cycles of micrometeorology elements and turbulence fluxes, such as wind, temperature, sensible heat flux, latent heat flux etc., are evident. The maximum and minimum values of diurnal averaged variations of horizontal wind speed, momentum flux, friction velocity etc., were observed in the afternoon and at sunrise respectively. The average CO<sub>2</sub> concentration is high from night to morning and the peak value of specific humidity emerges before sunrise. The maximum and minimum values of diurnal averaged variations of radiation and the components of heat energy balance

**收稿日期** 2008-06-30, 2009-02-17 收修定稿

**资助项目** 中国气象局数值模式创新基地项目“青藏高原东部及下游关键区大气边界层科学试验研究”, 国家国际科技合作项目 2007DFB20210, 四川省应用技术与开发项目 2008NG0009, 中日 JICA 计划“中日气象灾害合作研究中心”

**作者简介** 李跃清, 男, 1960 年出生, 博士, 研究员, 主要从事高原气象、灾害性气候预测研究。E-mail: yueqingli@163.com

were observed at noon and sunrise. The surface albedo shows the variations of the “U” type in a day, with a daily mean value of 0.164. Intensity of surface heat is analyzed to be a heat source in the daytime, while it is not obvious at night. The latent heat transfer plays a dominant role in the heat transfer between the atmosphere and the land surface in summer, while the sensible heat transfer is secondary.

**Key words** the alpine meadow surface, micrometeorology, turbulence fluxes.

## 1 引言

被称为“世界屋脊”的青藏高原占我国领土四分之一,平均高度 4000 余米,是世界上最高、范围最大的高原大地形。大范围异常的高原热力、动力作用及其地-气物理过程对我国东部和南部、亚洲地区乃至全球的气候变化和灾害性天气的形成均有重大的影响(周明煜等,2000)。青藏高原对大气的各种热力及动力效应都是通过高原近地层与边界层逐渐影响到自由大气的(马耀明等,2000)。近地层的物质和能量交换特征随着微气象条件的不同而有所差异,这不仅与地形有关,而且受下垫面性质的影响。因此,对高原不同性质下垫面的微气象特征的分析研究显得尤为重要。自 20 世纪 70 年代初以来,研究者对不同植被类型微气候特征进行了较多的研究,并且取得了许多有意义的进展(叶笃正等,1979;章基嘉等,1988;陶诗言等,1999;马耀明等,2000,2006;钱泽雨等,2005;徐祥德等,2006)。但高原上多荒野大漠,人烟稀少,测站稀疏,观测条件较平原地区艰苦得多,已有的许多研究基本围绕高原北部和中部进行,西部和东部虽有一些研究,但高原东坡的研究目前基本上是空白。理塘地区处于青藏高原的东坡,是青藏高原与平原的过渡区,地形复杂,其边界层热力和动力变化具有其自身的特色。因此,中国气象局成都高原气象研究所(简称高原所)在高原东坡理塘附近建立了一个大气边界层观测站,以期能够得到该地区地-气相互作用的一些新认识。

理塘县地处青藏高原横断山系东南边缘,沙鲁里山脉由西向南延伸,地势西北高、东南低,平均海拔 4133 m。理塘气候属高原气候区,基本特征为:气温低、冬季长、日照多、辐射强、风力大、蒸发量大、干湿季节分明。平均气温  $3.0^{\circ}\text{C}$ ,极端最高气温  $25.6^{\circ}\text{C}$ ,最低气温  $-30.6^{\circ}\text{C}$ ,年平均地面温度  $5.9^{\circ}\text{C}$ ,年降雨量为 722.2 mm,无霜期仅 50 天,年平均日照时数 2637.7 小时,日照多,辐射强,冬

季干冷漫长,暖季温凉短暂。理塘站位于理塘县高城镇毛垭草原上,具体位置 ( $30^{\circ}00'\text{N}$ ,  $100^{\circ}16'\text{E}$ ),海拔 3932 m,占地面积约  $100\text{ m}\times 130\text{ m}$ 。试验场地面平坦,四周开阔,下垫面为典型的高山草甸,夏季草高大约 5 cm 左右,图 1(见文后彩图)为理塘站的概貌。本文利用理塘站 2007 年 6 月至 8 月的观测资料,对理塘地区近地层基本气象要素和湍流通量特征进行分析研究,试图获得对青藏高原东坡草甸下垫面能量输送和微气象特征的初步认识。

## 2 试验场地和观测仪器

2005 年 11 月高原所理塘综合大气观测站投入运行。该站地处青藏高原东部,第一期工程任务主要是进行大气边界层观测,重点是地面的动量、感热和潜热通量、水汽和碳通量、地表辐射收支、大气边界层结构和过程的观测,以及土壤热力和水分状况监测。主要包括温、湿、风梯度观测,气压,雨量、多层地温、多层土壤湿度,直射辐射、反射辐射、净辐射、散射辐射、总辐射,土壤热通量,以及涡动相关动量、感热、水汽和二氧化碳通量观测系统等。2006 年 4 月二期工程建设方案通过专家论证,在一期建设的基础上,补充观测层次,增加地球辐射、紫外辐射观测,光合有效辐射观测,土壤水分观测,安全保障设备,并完善观测站的基础设施建设,确保观测站长期、稳定地进行观测。

试验观测主要在近地面层进行,观测项目包括微气象和通量观测两部分,主要观测近地层基本气象要素、土壤温度、土壤湿度以及近地层的物质和能量通量。平均场的观测仪器如表 1 所示。湍流观测仪器由超声风速温度仪(CSAT3)和  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  气体分析仪(LI-COR, CS7500)组成,测量动量、热量、水汽和二氧化碳湍流通量,安装于距离地面 3 m 高度上,采用 CR5000 数据采集器采样,用 1G SanDisc 卡储存,用作后期资料处理分析。所有仪器由 12VDC、80Ahr 的电池供电,采用 160 W 太阳能板对电池充电。

表 1 青藏高原东坡理塘观测站观测仪器

Table 1 The measurement instruments at Litang station on the eastern slope of the Tibetan Plateau

| 观测项目                     | 仪器型号                    | 架设高度/深度                                                     |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 空气温度/℃                   | Vaisala, HMP45C_L       | 1.25 m、2.85 m、4.70 m、8.95 m、16.70 m、31.40 m、46.95 m、58.45 m |
| 空气湿度/%                   | Vaisala, HMP45D         | 1.25 m、2.85 m、4.70 m、8.95 m、16.70 m、31.40 m、46.95 m、58.45 m |
| 风速/m                     | Vaisala, WAA151         | 1.25 m、2.85 m、4.70 m、8.95 m、16.70 m、31.40 m、46.95 m、58.45 m |
| 风向/(°)                   | Vaisala, WAA151         | 4.70 m、16.70 m、31.40 m、58.45 m                              |
| 降水/mm                    | Vaisala, RG13H-01       | 1 m                                                         |
| 气压/hPa                   | Vaisala, PTB220         | 3 m                                                         |
| 短波辐射/W·m <sup>-2</sup>   | KIPP&ZONEN, CM21        | 3 m                                                         |
| 长波辐射/W·m <sup>-2</sup>   | KIPP&ZONEN, CG4         | 3 m                                                         |
| 紫外辐射/W·m <sup>-2</sup>   | KIPP&ZONEN, UVS-AB-T    | 3 m                                                         |
| 光合有效辐射/W·m <sup>-2</sup> | KIPP&ZONEN, PAR Lite    | 3 m                                                         |
| 土壤温度/℃                   | Vaisala, QMT110         | 0 cm、5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、40 cm、80 cm、110 cm        |
| 土壤体积含水量/%                | Dynamax, ML2X           | 0 cm、5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、40 cm、80 cm、110 cm        |
| 土壤热流量/W·m <sup>-2</sup>  | Hukseflux Self, HFP01SC | 5 cm、10 cm、20 cm                                            |

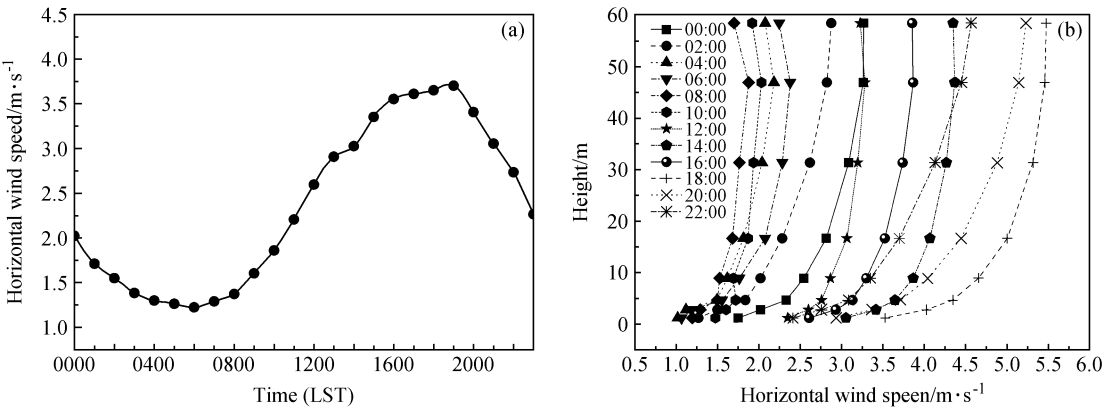


图 2 理塘地区夏季 (a) 2.85 m 高度处水平风速和 (b) 近地层风速廓线的日变化

Fig. 2 The average diurnal variations of (a) horizontal wind speed at 2.85 m level and (b) wind profile in the surface layer in summer at Litang area

湍流资料每个样本取 30 分钟。首先剔除远超出合理值、明显存在错误的野点, 然后进行去趋处理和坐标旋转, 最后进行平均量、脉动量、方差、协方差、通量等一系列湍流统计运算。动量通量  $\tau = -\rho \overline{u'w'}$ , 感热通量  $H_s = \rho c_p \overline{\theta'w'}$ , 潜热通量  $L_E = L_v \rho \overline{q'w'}$ , 其中,  $\rho$  和  $\theta_v$  分别为空气密度和位温,  $g$  为重力加速度,  $c_p$  为定压比热,  $L_v$  为水汽的汽化热系数, 对水汽和  $\text{CO}_2$  通量进行 WPL (Webb et al. 1980) 订正。

3 风向风速和温度日平均特征

理塘地区除受到青藏高原大地形的影响外, 还明显地受横断山系局地地形的影响, 大小地形叠加

使理塘地区风场变得十分复杂。图 2a 给出了理塘地区夏季 (6~8 月, 下同) 水平风速平均日变化曲线, 水平风速表现出“一低一高”型的日变化特征。由图 2 中可以看出, 夏季风速日变化一般在清晨日出前风速小, 日出后逐渐增大, 到 18:00~19:00 (北京时, 下同) 达到最大, 日平均最大风速为 3.7 m/s, 日平均风速为 2.4 m/s。以 8 月份为例, 图 2b 给出了理塘地区近地层风廓线的平均日变化情况, 从整体上看, 近地层风廓线基本上满足对数规律, 风速值随着高度增加而增加, 风速梯度随高度增加而减少; 18:00~19:00 风速值达到最大, 与图 2a 中 6~8 月的平均情况类似。

将理塘地区夏季近地层 4.7 m 高度处风向风

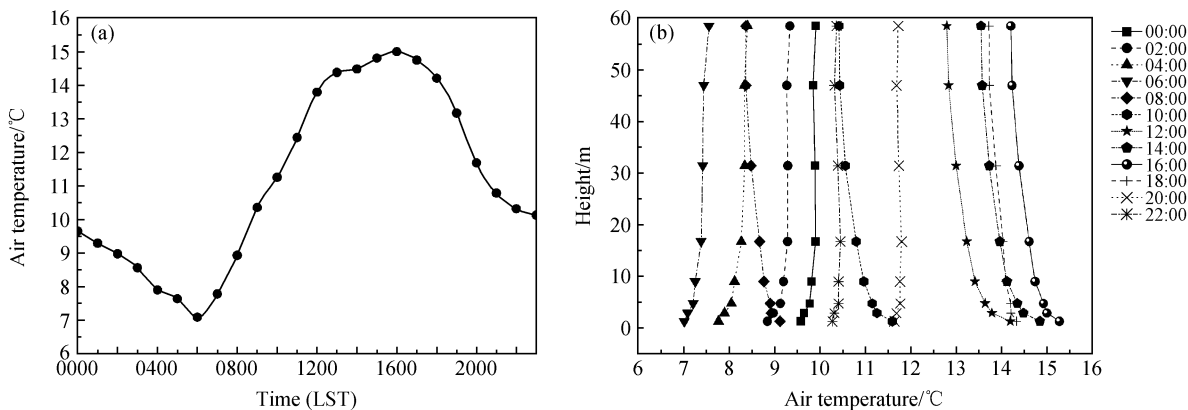


图4 理塘地区夏季 (a) 2.85 m 高度处空气温度和 (b) 近地层温度廓线的日变化

Fig. 4 The average diurnal variations of (a) air temperature at 2.85 m level and (b) air temperature profile in the surface layer in summer at Litang area

速进行统计,图3(见文后彩图)给出了理塘地区夏季风速风向玫瑰图。由图3中可以看出,理塘地区夏季以东南风为主导风向,东南风主导频率达18%,这是受西北高、东南低的地势影响的结果;风速小于2 m/s的小风和静风情况小于4%,风速分布以2~8 m/s居多;大于8 m/s的大风情况出现不多。

图4a给出了理塘站夏季近地面层空气温度平均日变化曲线,空气温度有明显的日变化特征。在清晨06:00日出前,空气温度达到最低,最低温度值为7.1°C;日出后空气温度逐渐升高,到下午16:00空气温度达到最高,最高温度值为15.0°C,空气温度日较差达7.9°C,日平均温度为11.1°C。

图4b给出了理塘站夏季近地层平均温度廓线日变化分布,近地层温度廓线有明显的日变化。在白天空气温度随高度增加而减少,低层的温度梯度较大,随高度增加温度梯度减少,大气层结不稳定,这是日出后地面受太阳辐射加热,热量通过湍流作用使近地层下部空气增温的结果;在夜间,低层空气存在明显的逆温现象,空气温度随高度增加而增加,温度梯度也是低层大高层小,大气层结稳定,这是在夜间,由于地面辐射冷却作用使低层下部空气热量损失较多的结果;在日出日落前后,上、下层温度梯度差变少,大气层结接近中性。

#### 4 二氧化碳浓度和比湿日平均变化特征

政府间气候变化委员会(IPCC)第四次报告(AR4)(IPCC, 2007)指出:过去100年来,由于人类活动(如工农业生产、化石燃料的使用)等因素影响,CO<sub>2</sub>全球平均浓度从工业革命前280 μmol/

mol上升到2005年379 μmol/mol,在这期间全球平均气温升高了0.57~0.95°C。CO<sub>2</sub>浓度日变化与植被生理活动、土壤呼吸、大气逆温层及湍流交换强度等有关。图5a给出了理塘地区夏季二氧化碳浓度和比湿的平均日变化曲线,从图中可以发现,CO<sub>2</sub>浓度呈现早晚高、中午低的“U”型日变化特征,峰值出现在早上07:00,日最高浓度值为398.8 μmol/mol;极小值出现在下午14:00,日最低浓度值为350.8 μmol/mol;日平均浓度为367.6 μmol/mol,稍低于全球平均浓度,但高于青海海北站(李英年等, 2007)。比湿的日变化规律与CO<sub>2</sub>浓度的日变化相类似,极大值出现于清晨07:00,最大比湿值为14.0 g/kg;极小值出现在下午17:00,最小比湿值为7.9 g/kg;日平均比湿为9.2 g/kg。图5b为理塘站夏季近地层相对湿度廓线日变化情况,从中得知,早上06:00近地层空气相对湿度最大,而下午14:00相对湿度最小;近地层下部空气湿度梯度较大,随高度的增加,湿度梯度减少;近地层空气基本上表现为随高度的增加相对湿度减少,但早上08:00和10:00在近地层下部观测到微弱的逆湿现象。

#### 5 辐射各分量和地表反照率日平均特征

图6给出了理塘地区夏季地表辐射能月平均的日变化曲线。夏季月平均的太阳总辐射(DR)大于0 W/m<sup>2</sup>出现于早晨06:00,至正午12:00达到最大值,午后太阳总辐射逐渐减少,到傍晚20:00左右恢复为零。太阳总辐射峰值为743.4 W/m<sup>2</sup>,日

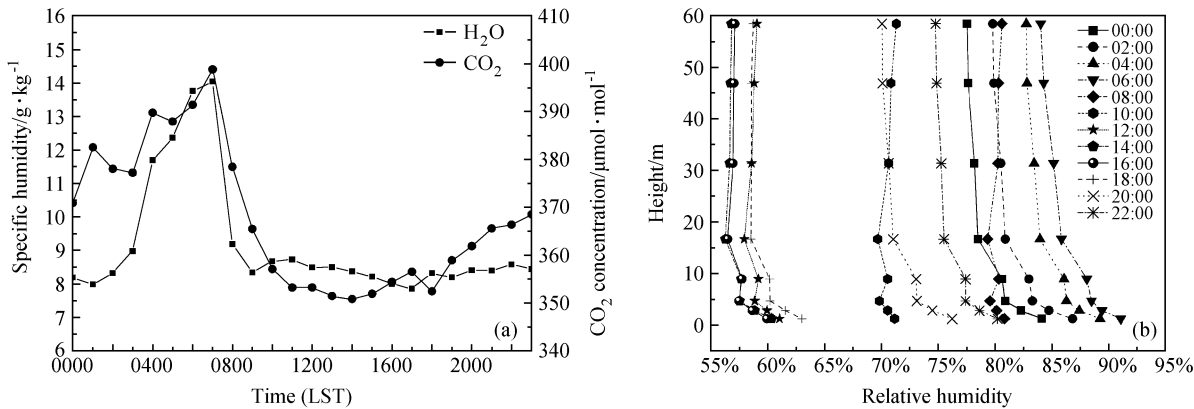


图5 理塘地区夏季 (a) 距地面 3 m 高度处二氧化碳浓度、比湿和 (b) 近地层相对湿度廓线日变化

Fig. 5 The average diurnal variations of (a) CO<sub>2</sub> concentration, specific humidity at 3 m above the ground and (b) relative humidity profile in the surface layer in summer at Litang area

平均值为 223.9 W/m<sup>2</sup>。地表反射辐射 (UR) 的日变化趋势与太阳辐射相一致，这是因为地表反射辐射与入射的太阳总辐射和地表反照率有关，而在短时期内地表反照率变化不大，地表反射辐射只与入射的太阳总辐射的变化保持一致。地表长波辐射 (ULR) 与地表温度有关，与太阳总辐射和反射辐射变化趋势相当，只是日变化幅度相对较小。大气逆辐射 (DLR) 的日变化很微弱，全天几乎保持在同一水平。净辐射 ( $R_n$ ) 在夜间为负值，早上 06 时至 07 时开始大气能量由亏转盈，正午 12 时净辐射达到极大值；午后逐渐减小，19 时至 20 时恢复为负值，并完成一天的循环。

地表反照率定义为地表反射的太阳辐射与太阳总辐射之比，在研究陆面过程模式土壤热力学参数化方案中起着重要作用。影响地表反照率的因素是多样的，主要有下垫面的状况、太阳高度角、天气状况的影响。在太阳总辐射大于 100 W/m<sup>2</sup> 时，计算地表反照率。图 7a 给出了理塘地区夏季地表反照率的日变化曲线。日间地表反照率表现出“U”型分布，早晚大、中午小。这是因为地表反照率随太阳高度的增大而减小 (张强等, 2005)，而清晨和傍晚太阳高度角较小，地表反照率较大；反之，中午太阳高度角增大，地表反照率变小。地表反照率的日平均值为 0.164。与 CAMP/Tibet 试验、TI-PEX 试验中同期观测结果相比较 (李英等, 2006)，理塘地区地表反照率均小于改则地区 (0.31)、拉萨 (0.17)、当雄 (0.17) 和五道梁地区 (0.20)，但与那曲 (0.169) 和昌都 (0.16) 相差不大。

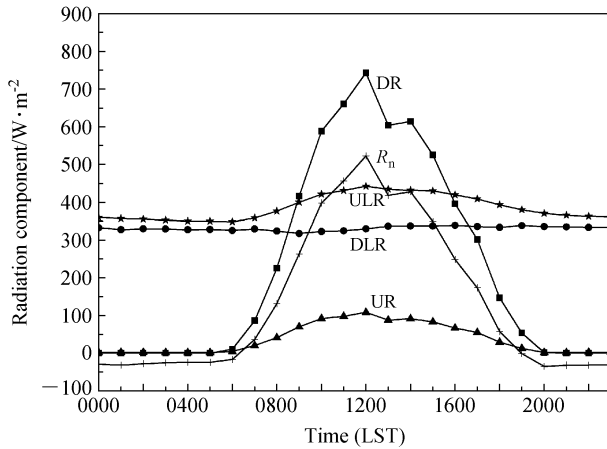


图6 理塘地区夏季地表辐射分量平均日变化。DR: 太阳总辐射;  $R_n$ : 净辐射; ULR: 地表长波辐射; DLR: 大气逆辐射; UR: 反射太阳辐射

Fig. 6 The average diurnal variations of total solar radiation (DR), net radiation ( $R_n$ ), long wave radiation by earth (ULR) and atmosphere (DLR), reflective solar radiation (UR) in summer at Litang area

光合有效辐射 (Photo-synthetically Active Radiation, PAR) 是指波长为 400~700 nm 的太阳辐射，是绿色植物进行光合作用形成生物量的能量来源，直接影响植物的生长、发育、产量和产品质量。图 7b 给出了理塘地区夏季月平均光合有效辐射的日变化曲线。月平均光合有效辐射 (APR) 的变化趋势与太阳总辐射 (DR) 的变化一致，在正午 12:00 达到最大值 1691.6  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，相当于 367.7 W/m<sup>2</sup>，占正午太阳总辐射的 49.5%，结果稍低于禹城站 (周允华等, 1996)，但高于海北站 (李英年等, 2002) 和五道梁站 (李韧等, 2007)。

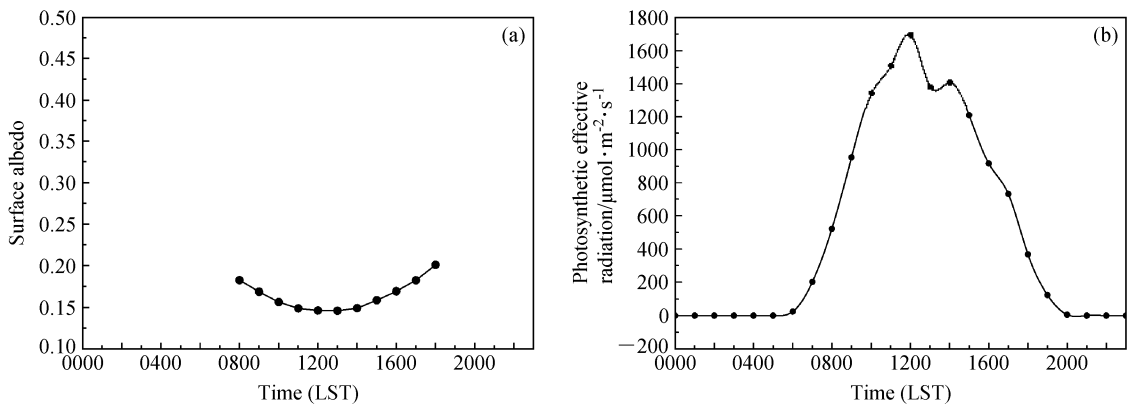


图 7 理塘地区夏季 (a) 地表反照率和 (b) 光合有效辐射的日变化  
Fig. 7 The average diurnal variations of (a) surface albedo and (b) photosynthetic effective radiation

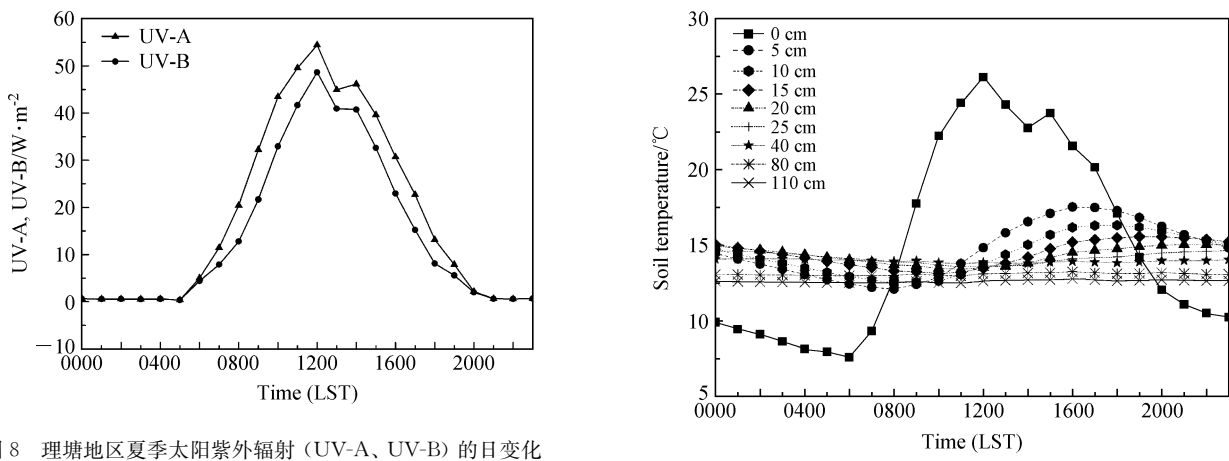


图 8 理塘地区夏季太阳紫外辐射 (UV-A、UV-B) 的日变化  
Fig. 8 The average diurnal variation of UV radiation (UV-A and UV-B) in summer at Litang area

图 9 理塘地区夏季地表以下 9 层土壤温度的日变化  
Fig. 9 The average diurnal variation of soil temperature at nine levels under surface in summer at Litang area

太阳紫外辐射 (UV) 是在太阳辐射中能量占太阳总辐射 (DR) 比例很少的一段特殊波段, 但其独特的作用引起了人们的注意。太阳紫外辐射按生物效应不同可划分为三类: UV-A (320~400 nm, 对生物体影响不大)、UV-B (280~320 nm, 对生物体有强的杀伤作用) 和 UV-C (200~280 nm, 属灭生性辐射)。UV-C 量值小且易被大气平流层和对流层的臭氧及氧所吸收, 一般可以忽略不计。近年来, 由于地球大气平流层臭氧空洞和局部地区上空臭氧保护层的变薄, 使得到达地球表面的 UV 有增加的趋势 (郭松等, 1994), 严重影响动植物的生长和人类的健康 (郑有飞等, 1999)。图 8 给出了理塘地区夏季 UV-A 和 UV-B 的平均日变化曲线。UV-A 和 UV-B 与太阳总辐射 (DR) 的日变化趋势一致, 只是 UV-B 量值比 UV-A 稍小。两者从清晨 05:00 开始大于 0  $\text{W}/\text{m}^2$ , 并随着太阳总辐射的增

加逐渐增加。到中午 12:00, UV-A 和 UV-B 分别达到日最高值 54.5  $\text{W}/\text{m}^2$  和 48.7  $\text{W}/\text{m}^2$ , 两者的日平均值分别为 17.9  $\text{W}/\text{m}^2$  和 14.3  $\text{W}/\text{m}^2$ 。两者的日平均值均大于海北站 (UV-A: 16.6  $\text{W}/\text{m}^2$ , UV-B: 5.5  $\text{W}/\text{m}^2$ ) (李英年等, 2008), 这是因为在海拔较高的高原地区, 大气质量较小, 对紫外辐射的散射和吸收相对较少, 因而紫外辐射强度较大 (江灏等, 1998)。

## 6 土壤物理量、地面热源强度和湍流通量日平均特征

图 9 给出了理塘地区夏季地表以下 9 层土壤温度的日变化曲线。从各层土壤温度日变化曲线来看, 从浅层到深层土壤温度均有明显的日变化特

征,其变化规律与正弦曲线的变化规律一致。表层(0 cm)的土壤温度变化曲线与深层相比变化较为剧烈,深层土壤温度日变化曲线比较平滑。地表以下各层土壤温度日变化越往深处振幅变化越小,并且各层土壤最大、最小温度值的出现时间从上往下依次向后推迟。地表 50 cm 深度以下的土壤温度日变化十分微弱,整天几乎保持在同一温度值。这是因为浅层土壤受外界条件影响较大,如太阳辐射、气温、天气状况等,并且外界因子对深层土壤的产生影响是通过能量的逐层传递来起作用的,因此有一定的滞后性。由浅入深对表层(5 层)土壤温度作统计,土壤最高温度及出现时间分别是 26.1℃(12:00)、17.5℃(16:00)、16.3℃(18:00)、15.5℃(19:00)、15.0℃(21:00);土壤最低温度及出现时间分别是 7.6℃(06:00)、12.1℃(08:00)、12.5℃(09:00)、13.1℃(10:00)、13.3℃(11:00);土壤温度的日较差分别为 18.5℃、5.4℃、3.8℃、2.4℃、1.7℃。

图 10a 给出了理塘地区夏季地表以下 5 cm、10 cm、20 cm 深度处土壤热流量的平均日变化曲线。为了说明土壤温度垂直分布的情况,这里定义一个土壤垂直温度梯度,由表层向下温度递减称作正垂直温度梯度,反之为负。从土壤热流量来看,5 cm 深度处土壤热流量在 09:00~10:00 之间由负转正,说明在此之前热量由下往上传播,对应的土壤温度下层暖上层冷,出现负垂直温度梯度;此后土壤热流量随着太阳辐射的增加而逐渐增大,热量由上往下传播,对应的土壤温度上层暖下层冷,出现正垂直温度梯度,至中午 13:00 达到最大值 44.6 W/m<sup>2</sup>;午后土壤热流量逐渐减少,到 19:00~20:00

之间,土壤热流量恢复为负值,并完成一天的循环。10 cm 和 20 cm 深度处的变化趋势与 5 cm 深度处的变化一致,只是浅层土壤热流量的日变化较深层土壤剧烈,深层土壤热流量最大、最小值的出现时间具有滞后性。

高原地面对大气的加热作用是由辐射过程和湍流输送过程的平衡决定的。前者指地表吸收的短波辐射能和放出的长波辐射能,后者指地表层吸收太阳辐射能后以湍流的方式向大气输送的热量和水汽能量(李国平等,2003)。地面热源强度一般可用  $R_n - G$  或  $H_s + L_E$  来表示, $R_n$  为净辐射, $G$  为土壤热存储, $H_s$  为感热通量, $L_E$  为潜热通量。本文采用  $H_s + L_E$  来初步估算地表热源强度。图 10b 给出了理塘地区夏季地表热源强度的平均日变化曲线,可以发现在白天 08:00~19:00 热源,午后 12:00~15:00 为强热源,热源强度在 300 W/m<sup>2</sup> 以上。夜间 20:00 至次日 06:00,地面热源强度出现正负交替的现象,即地面为弱的热源和冷源交替出现。

感热交换是指近地层中因湍流运动引起的地面和空气之间的热量交换,而潜热交换是大气中水发生相变时引起的热量交换。图 11 给出了理塘地区夏季感热通量、潜热通量及净辐射的月平均日变化曲线,从图中可以发现,理塘地区夏季近地层地气热量交换中,感热输送作用小,潜热输送占主要地位,这是理塘地区夏季水热同期的气候特点造成的,地表湿润引起潜热交换强度较感热交换强度大。白天,潜热通量从 06:00 开始随着太阳总辐射的增加而迅速增加,这是因为地表受太阳辐射加热,水分蒸发或蒸腾作用旺盛引起潜热交换的增大。到下午 14:00 达到最大值 286.1 W/m<sup>2</sup>,午后潜

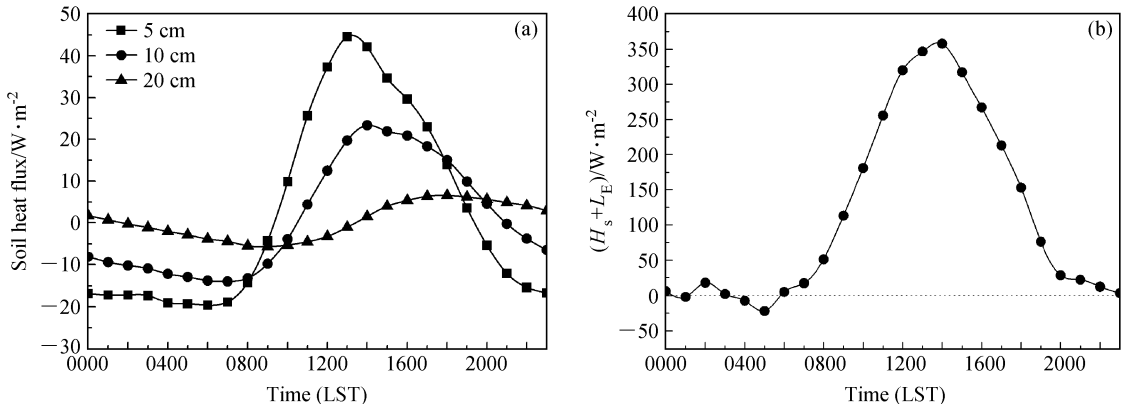


图 10 理塘地区夏季 (a) 表层土壤热流量和 (b) 地面热源强度的日变化

Fig. 10 The average diurnal variations of (a) soil heat flux and (b) intensity of surface heat source in summer at Litang area

热通量逐渐减少。夜间,从 20:00 至次日的 06:00,潜热交换强度较白天要小得多,潜热通量几乎保持一个较小的正值,其大小在  $50 \text{ W/m}^2$  以下,并有正负交替的现象,说明在夜里大气中水的相态变化复杂,既有蒸发耗热也有凝结释热。全天,潜热通量日平均值为  $94.6 \text{ W/m}^2$ 。感热交换的强度在白天较潜热交换要小的多。白天 06:00 开始,感热通量随太阳总辐射的增加而逐渐增加,这是因为白天太阳辐射加热地面,在近地层由于大气湍流的作用使地面与大气的感热交换增加的结果,地面向大气传输热量。感热通量在正午 12:00 达到峰值  $76.0 \text{ W/m}^2$ ,午后逐渐减少。在夜间,感热通量保持在一个较少的负值,说明地表由于辐射冷却作用损失热量较多,同样由于大气湍流作用使大气向地面传输热量。全天,感热通量日平均值为  $19.5 \text{ W/m}^2$ 。

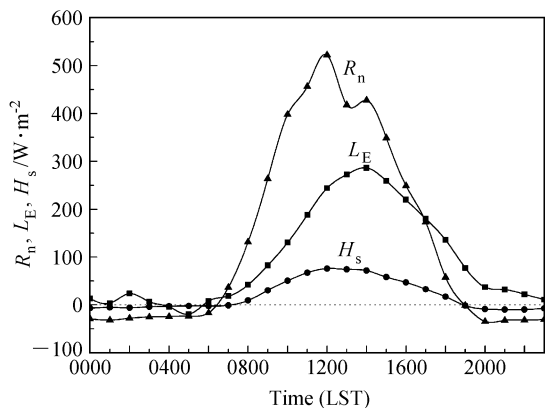


图 11 理塘地区夏季感热通量 ( $H_s$ )、潜热通量 ( $L_E$ ) 及净辐射 ( $R_n$ ) 的月平均日变化

Fig. 11 The average diurnal variations of net radiation ( $R_n$ ), sensible heat flux ( $H_s$ ) and latent heat flux ( $L_E$ ) in summer at Litang area

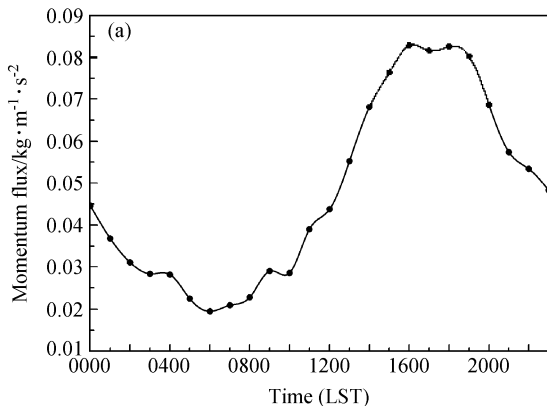


图 12a 给出了理塘地区夏季动量通量平均日变化曲线,动量通量在风速较大的下午大、风速小的早晨小。动量通量峰值出现在下午 16:00,最大值为  $0.082 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ;最小值为  $0.019 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ,出现在早晨 06:00。摩擦速度表征了近地层风速切应力的大小,具有速度的量纲。图 12b 给出了理塘地区夏季摩擦速度平均日变化曲线,摩擦速度同样在下午最大早晨最小,与水平平均风速(图 2a)的变化趋势一致。最大值为  $0.306 \text{ m/s}$ ,出现在下午 16:00;最小值为  $0.127 \text{ m/s}$ ,出现在早晨 06:00。

## 7 地面曳力系数的确定

地面总体输送系数不仅是表示湍流输送强度的重要参数,而且对处理某些理论和实际问题也十分重要(李国平等,2002),如热源和热量平衡计算。本文试用涡动相关法估算地面曳力系数  $C_d$ ,计算公式(Stull, 1988)如下:

$$C_d = \frac{-\overline{u'w'}}{U^2},$$

其中,  $U$  为水平平均风速。

将  $-\overline{u'w'}$  与  $U^2$  进行拟合,发现两者基本上成一线性关系。图 13 给出了方差  $\overline{u'w'}$  与水平平均风速的关系,6、7、8 月的  $C_d$  值,在稳定情况下为  $3.23 \times 10^{-3}$ 、 $2.81 \times 10^{-3}$ 、 $3.00 \times 10^{-3}$ ,不稳定情况下为  $3.04 \times 10^{-3}$ 、 $2.95 \times 10^{-3}$ 、 $3.44 \times 10^{-3}$ 。结果表明,  $C_d$  值在不同稳定度条件下具有不同的值。另外,与马耀明等(2000)计算的藏北那曲站(6、7、8 月的  $C_d$  值,稳定情况下为  $2.34 \times 10^{-3}$ 、 $2.23 \times 10^{-3}$ 、 $2.75 \times 10^{-3}$ ,不稳定情况下为  $2.84 \times 10^{-3}$ 、 $2.36 \times 10^{-3}$ 、 $2.97 \times 10^{-3}$ 。)以及安多站(6、7、8

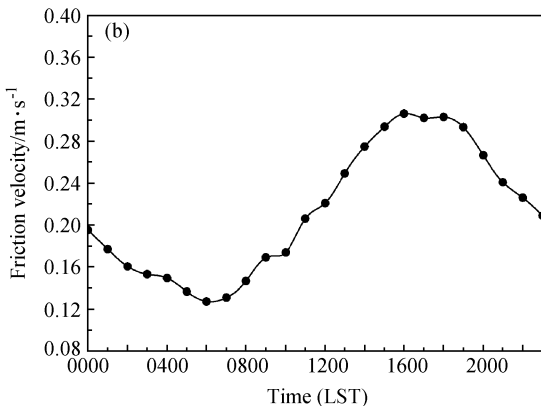


图 12 理塘地区夏季 (a) 动量通量和 (b) 摩擦速度的日变化

Fig. 12 The average diurnal variations of (a) momentum flux and (b) friction velocity in summer at Litang area

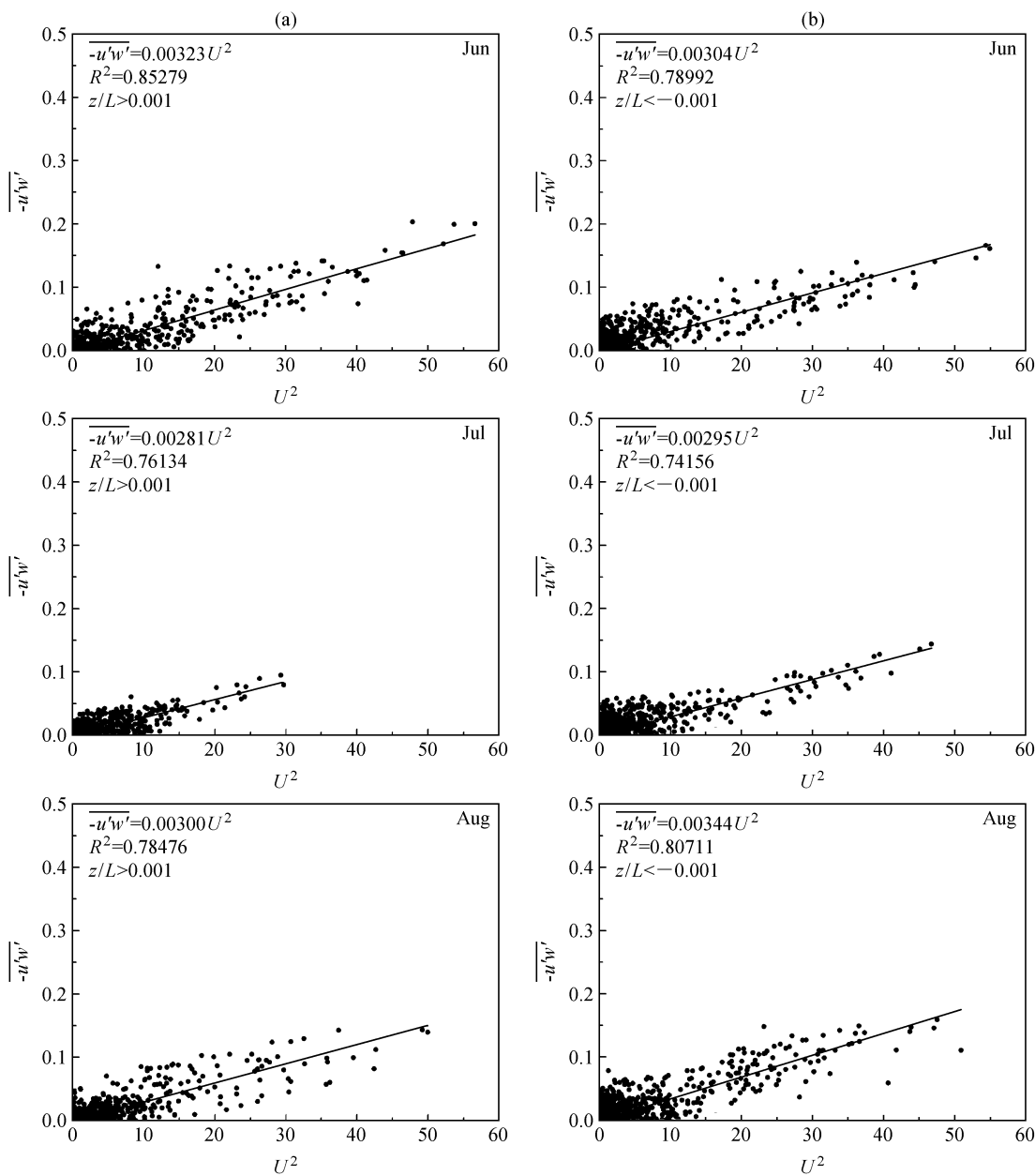


图 13 理塘地区夏季方差 $\overline{u'w'}$ 与水平平均风速平方在不同稳定度条件下的关系：(a) 稳定；(b) 不稳定

Fig. 13 Relationship between covariance  $\overline{u'w'}$  and square of average horizontal wind speed in different stability conditions in summer at Litang area; (a) Stable; (b) unstable

月的  $C_d$  值，稳定情况下为  $2.88 \times 10^{-3}$ 、 $2.80 \times 10^{-3}$ 、 $2.99 \times 10^{-3}$ ，不稳定情况下为  $3.18 \times 10^{-3}$ 、 $3.09 \times 10^{-3}$ 、 $3.60 \times 10^{-3}$ ）相对比，理塘站的  $C_d$  值有一定的差异性，表明  $C_d$  值还与下垫面的物理属性，如草甸的覆盖度、草高等，有直接的关系。

## 8 结论

通过分析理塘站 2007 年 6~8 月近地层观测资

料，得到以下关于青藏高原东坡草甸下垫面夏季近地层能量输送和微气象特征的初步认识：

(1) 高原东坡理塘草甸下垫面夏季近地层的各类气象要素有明显的日变化特征。风速日变化一般清晨小、下午大，近地层风廓线基本上满足对数规律。理塘地区夏季以东南风为主导风向。空气温度清晨低、下午高。在夜间，低层空气存在明显的逆温现象。

(2) 夏季  $\text{CO}_2$  浓度呈现早晚高、中午低的“U”型日变化特征,日平均浓度为  $367.6 \mu\text{mol/mol}$ , 稍低于全球平均浓度。比湿极大值出现于清晨,极小值出现在下午。早晨 08 时和 10 时在近地层下部观测到微弱的逆湿现象。

(3) 地表辐射、热量平衡各分量最高值出现在中午,最低值出现在早晨。地表反照率日变化表现出“U”型分布,日平均值为 0.164。光合有效辐射正午最大值占太阳总辐射的 49.5%,结果稍低禹城站,但高于海北站和五道梁站。太阳紫外辐射 UV-A、UV-B 日平均值分别为  $17.9 \text{ W/m}^2$  和  $14.3 \text{ W/m}^2$ 。

(4) 各层土壤温度日变化从浅到深均有明显的日变化特征,其变化规律与正弦曲线的变化规律一致。地面热源强度在白天为热源,在夜间表现为弱的冷、热源交替出现。

(5) 夏季近地层地气热量交换中,感热输送作用小,潜热输送占主要地位。动量通量和摩擦速度均在风速较大的下午大、风速小的早晨小。

(6) 用涡动相关法估算地面曳力系数  $C_d$ , 得到 6、7、8 月的  $C_d$  值在稳定情况下  $3.23 \times 10^{-3}$ 、 $2.81 \times 10^{-3}$ 、 $3.00 \times 10^{-3}$ , 不稳定情况下为  $3.04 \times 10^{-3}$ 、 $2.95 \times 10^{-3}$ 、 $3.44 \times 10^{-3}$ 。 $C_d$  值在不同稳定度条件和不同稳定度具有不同的值,还与下垫面的物理属性,如草甸的覆盖度、草高等,有直接的联系。

## 参考文献 (References)

郭松,周秀骥,张晓春. 1994. 青海高原大气  $\text{O}_3$  及紫外辐射 UV-B 观测结果的初步分析 [J]. 科学通报, 39 (1): 50–53. Guo Song, Zhou Xiuj, Zhang Xiaochun. 1994. Preliminary analysis of the measurement results of  $\text{O}_3$  and UV-B radiation in the Qinghai Plateau [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 39 (1): 50–53.

IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.

江灏,季国良,师生波,等. 1998. 藏北高原紫外辐射的变化特征 [J]. 太阳能学报, 19 (1): 7–12. Jiang Hao, Ji Guoliang, Shi Shengbo, et al. 1998. The characteristics of ultraviolet radiation variation over the northern Tibetan Plateau [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica (in Chinese), 19 (1): 7–12.

李国平,赵邦杰,卢敬华. 2002. 青藏高原总体输送系数的特征 [J]. 气象学报, 60 (1): 60–67. Li Guoping, Zhao Bangjie, Lu Jinghua. 2002. Characteristics of bulk transfer coefficients over The Tibetan Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (1): 60–67.

李国平,段廷扬,吴贵芬. 2003. 青藏高原西部的地面热源强度及地面热量平衡 [J]. 地理科学, 23 (1): 13–18. Li Guoping, Duan Tingyang, Wu Guifen. 2003. The intensity of surface heat source and surface heat balance on the western Qinghai-Xizang Plateau [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 23 (1): 13–18.

李初,季国良,杨文,等. 2007. 青藏高原北部光合有效辐射的观测研究 [J]. 太阳能学报, 28 (3): 241–247. Li Ren, Ji Guoliang, Yang Wen, et al. 2007. The observation study on par coefficient over northern part of Tibetan Plateau [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica (in Chinese), 28 (3): 241–247.

李英,胡泽勇. 2006. 藏北高原地表反照率的初步研究 [J]. 高原气象, 25 (6): 1034–1041. Li Ying, Hu Zeyong. 2006. A preliminary study on land-surface albedo in northern Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (6): 1034–1041.

李英年,周华坤. 2002. 祁连山海拔高寒草甸地区植物生长期的光合有效辐射特征 [J]. 高原气象, 21 (1): 90–95. Li Yingnian, Zhou Huakun. 2002. Features of photosynthetic active radiation (PAR) in Haibei alpine meadow area of Qilian Mountain during plant growing period [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (1): 90–95.

李英年,徐世晓,赵亮,等. 2007. 青海海北高寒湿地近地层大气  $\text{CO}_2$  浓度的变化特征 [J]. 干旱区资源与环境, 21 (6): 108–113. Li Yingnian, Xu Shixiao, Zhao Liang, et al. 2007. Changes of surface atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration in alpine swamp of Northern Qinghai [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 21 (6): 108–113.

李英年,赵亮,徐世晓,等. 2008. 祁连山海拔高寒草甸紫外辐射与气象要素的关系 [J]. 干旱区研究, 25 (2): 266–272. Li Yingnian, Zhao Liang, Xu Shixiao, et al. 2008. Study on the UV-A and UV-B changes and their correlations with meteorological factors in the Haibei alpine meadow in the Qilian Mountains [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 25 (2): 266–272.

马耀明,塚本修,吴晓鸣,等. 2000. 藏北高原草甸下垫面近地层能量输送及微气象特征 [J]. 大气科学, 24 (5): 715–722. Ma Yaoming, Osamu Tsukamoto, Wu Xiaoming, et al. 2000. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in the surface layer of the atmosphere above grassy marshland of the Tibetan Plateau area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (5): 715–722.

马耀明,姚檀栋,王介民. 2006. 青藏高原能量和水循环试验研究——GAME/Tibet 与 CAMP/Tibet 研究进展 [J]. 高原气象, 25 (2): 344–351. Ma Yaoming, Yao Tandong, Wang Jiemin. 2006. Experimental study of energy and water cycle in Tibetan Plateau—The progress introduction on the study of GAME/Tibet and CAMP/Tibet [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (2): 344–351.

钱泽雨,胡泽勇,杜萍,等. 2005. 青藏高原北麓河地区近地层能量输送与微气象特征 [J]. 高原气象, 24 (1): 43–48. Qian Zeyu, Hu Zeyong, Du Ping, et al. 2005. Energy transfer of near surface

- layer and micrometeorology characteristics in Bailuhe Area of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (1): 43–48.
- Stull R B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- 陶诗言, 陈联寿, 徐祥德, 等. 1999. 第二次青藏高原大气科学试验理论研究进展 (一、二、三) [M]. 北京: 气象出版社. Tao Shiy-an, Chen Lianshou, Xu Xiangde, et al. 1999. The Second Tibetan Plateau Experiment of Atmospheric Sciences TIPEX-GAME/TIBET (Volumes 1, 2, 3) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- Webb E K, Pearman G I, Leuning R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. Quart. J. R. Meteor. Soc., 106: 85–100.
- 徐祥德, 陈联寿. 2006. 青藏高原大气科学试验研究进展 [J]. 应用气象学报, 17 (6): 756–772. Xu Xiangde, Chen Lianshou. 2006. Advances of the study on Tibetan Plateau experiment of atmospheric sciences [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (6): 756–772.
- 叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 278pp. Ye Duzheng, Gao Youxi. 1979. Tibetan Plateau Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 278pp.
- 章基嘉, 朱抱真, 朱福康, 等. 1988. 青藏高原气象学进展 [M]. 北京: 科学出版社, 268pp. Zhang Jijia, Zhu Baozhen, Zhu Fukang, et al. 1988. The Progress Introduction on the Study of Tibetan Plateau Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 268pp.
- 张强, 黄荣辉, 王胜, 等. 2005. 西北干旱区陆-气相互作用试验 (Nwc-Aliex) 及其研究进展 [J]. 地球科学进展, 20 (4): 427–441. Zhang Qiang, Huang Ronghui, Wang Sheng, et al. 2005. Nwc-Aliex and its research advances [J]. Advance in Earth Sciences (in Chinese), 20 (4): 427–441.
- 郑有飞, 钱晶. 1999. 紫外辐射增加对人类疾病影响的研究 [J]. 气象科技, 27 (2): 10–13. Zheng Youfei, Qian Jing. 1999. Influence of enhanced ultraviolet radiation on human health [J]. Meteorological Science and Technology, 27 (2): 10–13.
- 周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 2000. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究 [M]. 北京: 气象出版社. Zhou Mingyu, Xu Xiangde, Bian Lin'gen, et al. 2000. Observational analysis and dynamic study of atmospheric boundary layer on Tibetan Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 周允华, 项月琴, 栾禄凯. 1996. 光合有效量子通量密度的气候学计算 [J]. 气象学报, 54 (4): 447–454. Zhou Yunhua, Xiang Yueqin, Luan Lukai. 1996. Climatological estimation of quantum flux densities [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54 (4): 447–454.



图 1 青藏高原东坡理塘观测站  
Fig. 1 Litang observation station on the eastern slope of the Tibetan Plateau

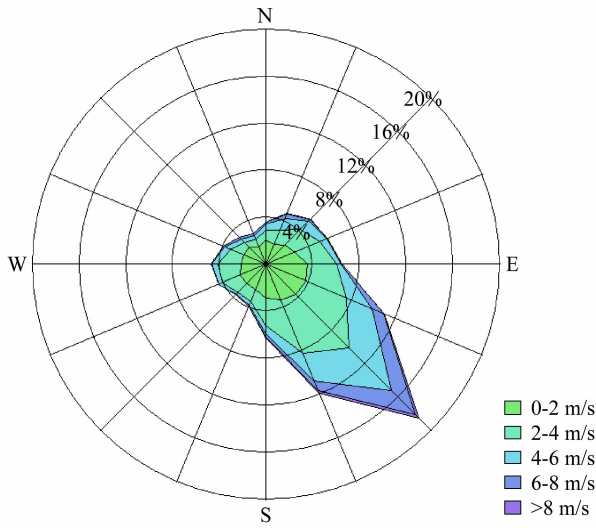


图 3 理塘地区夏季风向、风速玫瑰图  
Fig. 3 Wind Rose in summer at Litang area