

张琅, 李跃清, 李英, 等. 2010. 青藏高原东部草甸下垫面涡旋相关观测数据的质量控制及评价研究 [J]. 大气科学, 34 (4): 703–714.  
Zhang Lang, Li Yueqing, Li Ying, et al. 2010. A study of quality control and assessment of the eddy covariance system above grassy land of the eastern Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 703–714.

# 青藏高原东部草甸下垫面涡旋相关观测数据的质量控制及评价研究

张琅 李跃清 李英 赵兴炳

中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610071

**摘 要** 目前利用涡旋相关仪观测地表通量的方法已被广泛采用, 但由于涡旋相关法是建立在方程假设简化的基础上, 这对观测数据的质量提出了一定的要求, 所以对观测数据的处理及通量结果的质量状况分析就显得尤为重要。本文以理塘站 2006 年 7 月中到 8 月中的数据为例, 对其进行质量控制, 并将质量控制后的通量计算结果与原始值进行比较。质量控制后感热通量和潜热通量总和有所增长, 动量通量值则受质量控制影响较大。质量评价的结果为: 动量通量、感热通量、潜热通量中高质量数据所占比例为 68.2%、60.6%、63.3%。

**关键词** 涡旋相关法 质量控制 质量评价 地表通量

**文章编号** 1006-9895 (2010) 04-0703-12

**中图分类号** P404

**文献标识码** A

## A Study of Quality Control and Assessment of the Eddy Covariance System above Grassy Land of the Eastern Tibetan Plateau

ZHANG Lang, LI Yueqing, LI Ying, and ZHAO Xingbing

*Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072*

**Abstract** Presently, the eddy covariance measurement has been widely adopted. As the eddy covariance method is built on certain assumptions, some corrections of turbulent flux calculation and quality assessment of the flux results are necessary. This article analyzes the difference of turbulent flux results before and after quality control, with the data at Litang station from mid-July to mid-August in year 2006 as an example. The results at Litang station show that the de-spiking and sonic temperature corrections have a little effect on the sensible and latent heat fluxes, the coordinate rotation correction significantly influences the momentum flux, and because of the larger latent heat flux, the WPL correction have an inconspicuous influence on the latent heat flux. The conclusion of quality assessment shows that 68.2% of the momentum flux data, 60.6% of the sensible heat flux data, and 63.3% of the latent heat flux data are good.

**Key words** eddy covariance method, quality control, quality assessment, surface fluxes

**收稿日期** 2009-08-16, 2010-01-22 收修定稿

**资助项目** 中日 JICA 计划“中日气象灾害合作研究中心”, 中国气象局成都高原气象研究所基本科研业务费专项经费项目 BROP200803、BROP200706

**作者简介** 张琅, 女, 1983 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气边界层物理研究。E-mail: zhanglang13@gmail.com

**通讯作者** 李跃清, E-mail: yueqingli@163.com

## 1 引言

陆气间动量和热量交换对于全球的气候变化和大气环流起着不容忽视的作用,同时也是农业生态研究、森林生态研究、城市绿地生态效应研究中的重要指标(孙菽芬和卢志泊,1989;王介民,1999)。近年来,全球气候变化逐渐成为各国科学家关注的焦点,人们也越来越多地认识到大气和气候模式预报不准确的原因之一就是人们对地面与大气相互作用过程的认识还很缺乏,要进一步加深对气候和大气环流的认识、改进气候和大气环流模式,必须深入了解地表与大气的相互作用(黄妙芬,2003)。所以,在地气相互作用过程中扮演重要角色的动量和热量的交换具有很大的研究价值。

目前,关于地表通量的计算国内外已进行了广泛的研究,并取得了大量的成果。地表通量的计算方法主要有 Bowen 比能量平衡法 (Spittlehouse and Black, 1979; Halliwell and Rouse, 1989; 刘树华等, 1995; 黄妙芬, 1996; 吴洪颜等, 2000; 马伟强等, 2007)、空气动力学法 (Thom et al, 1975; 胡隐樵和奇跃进, 1991; Xu and Qiu, 1997; 张述文等, 2004) 和涡旋相关法 (Large and Pond, 1982)。由于涡旋相关法计算简单,结果精度较高,其日趋成为观测湍流通量的首选方法。然而,随着涡旋相关通量观测系统的逐渐普及,涡旋相关法计算湍流通量的问题也开始呈现出来。涡旋相关的计算公式是理想条件下方程简化的结果,简化的过程可能会给最终结果造成较大影响。因此,湍流资料的质量控制 (QC)、质量保证 (QA) 及质量评价 (QE) 逐渐受到各国学者的关注。

国外大批学者针对涡旋相关观测系统所得到的观测数据进行研究,得出了一系列有效的质量控制方法和质量评价标准 (Moore, 1986; Foken and Wichura, 1996; Vickers and Mahrt, 1997; Mahrt, 1998; Liu et al., 2001; Wilczak et al., 2001; Mauder et al., 2006)。国内对涡旋相关方法的研究从 20 世纪 80 年代开始 (王介民等, 1990)。随着中国通量网的建立,国内在这一领域的研究得到了很大的发展 (卞林根等, 2001, 2006; 高志球等, 2002; 刘辉志等, 2003, 2004, 2007; 胡非等, 2006; 李跃清等, 2009)。Onley et al. (2007) 利用经过严格质量控制后的数据分析了具有较大地表蒸发量的植

被覆盖下垫面的能量平衡问题,分析结果显示仍存在 10% 无法解释的不闭合率,推测可能是由植被顶部与仪器传感器间存在的水平平流引起,而增加通量计算的时间尺度对能量闭合影响甚微。Mauder et al. (2007) 对由于数据处理过程及涡旋相关观测系统的差异而引起的通量结果间的差异进行比较分析,认为数据处理方法的差异可引起感热通量及潜热通量结果间的差异分别达到 10% 和 15%,而对于计算过程中如汽化潜热等物理参数的选择则影响很小。Mauder et al. (2007) 同时认为,涡旋相关观测系统及数据处理中的误差修正均很小,并不能完全解决能量不闭合问题。

目前,国际上已经有一些针对质量控制和保证的通量处理软件,例如 Edire、TK2 等。但是这些软件本身使用不是很方便,普遍适用性还没有经过验证,还有待进一步研究 (Mauder et al., 2006; 徐自为等, 2008)。本文以青藏高原东坡理塘草甸下垫面 7 月到 8 月的数据为例,对湍流原始数据进行处理,并分析各处理过程对于计算结果的影响,同时给出质量评价分类结果。

## 2 观测仪器及计算方法

### 2.1 观测站概况、仪器及资料介绍

本文所用资料为 2006 年 7 月 15 日~8 月 14 日青藏高原东坡理塘站大气边界层观测资料。该站位于青藏高原东部的理塘县城北面 (30°00'N, 100°16'E), 海拔 3932 m, 占地 100 m×130 m, 下垫面属于均匀平坦的草甸下垫面 (李英等, 2008)。本文所选数据的时间段内,该站下垫面以 10 cm 左右的短草覆盖为主,风向以东南风为主。采用的主要仪器种类及仪器传感器性能、误差范围由表 1 给出。涡旋相关观测系统的观测高度为 3 m。

### 2.2 涡旋相关法的计算方法

涡旋相关法是通过计算风速脉动与某标量脉动的协方差,直接计算得到一定时段的通量的方法,其计算公式 (Large and Pond, 1982) 为:

动量通量:

$$\tau = \rho u_*^2, \quad (1)$$

$$u_*^2 = (-\overline{u'w'})^2 + (-\overline{w'v'})^2, \quad (2)$$

感热通量:

$$H = \rho c_p \overline{w'T'}, \quad (3)$$

潜热通量:

$$L_E = \rho L_v \overline{w'q'}, \quad (4)$$

表 1 主要观测仪器型号、传感器性能及误差范围  
Table 1 The types, sensor performance, and error ranges of the main observation instruments

| 系统名称   | 观测要素  | 传感器      | 传感器性能指标                                                                | 生产厂家     |
|--------|-------|----------|------------------------------------------------------------------------|----------|
| 涡动相关系统 | 气体分析  | LI7500   | 取决于标定工作                                                                | LiCor    |
|        | 三维超声风 | CSAT3    | 测量速度: 1~60 Hz (瞬时测量),<br>分辨率: $U_x$ 、 $U_y$ : 1 mm/s, $U_z$ : 0.5 mm/s | Campbell |
| 地面常规   | 雨量    | RG13H-01 | 分辨率: 0.1 mm (加热型)<br>口径: 400 cm <sup>2</sup>                           | Vaisala  |
|        | 气压    | PTB220   | 范围: 500~1100 hPa<br>分辨率: 0.1 hPa, 误差: $\pm 0.15$ hPa                   | Vaisala  |

注:  $U_x$ 、 $U_y$ 、 $U_z$  分别为风速在  $x$  方向、 $y$  方向及垂直方向的分量。

其中,  $\rho$  为空气密度,  $L_v$  是水的汽化潜热,  $c_p$  为干空气的定压比热,  $T'$ 、 $q'$  分别为温度和比湿脉动量,  $u'$ 、 $v'$ 、 $w'$  分别为风速水平垂直分量的脉动量,  $u_*$  为摩擦速度。本文计算过程中采取目前国际上普遍采用的半小时为周期。涡旋相关法的优点就是通过测量各种要素的湍流脉动值来直接计算通量结果, 而不是建立在经验关系的基础上, 因此其计算精度较高。

2.3 湍流原始数据的处理方法

2.3.1 野点、振幅分辨率及粘滞数据检验

本文去野点、振幅分辨率问题及粘滞数据 (Dropouts) 检验采用 Vicker and Mahrt (1997) 所使用的方法。窗口取 5 分钟, 检验标准为数据偏离均值大于窗口内数据标准差的 3.5 倍则为野点, 处理方法为利用线性内插替换。重复检查, 每重复一次标准差前的系数增加 0.1。如果野点数量超过数据总量的 1%, 则该记录记为异常, 本文采取 30 分钟数据中多于 180 个野点则该时段记为异常。

本文选用 Vickers and Mahrt (1997) 的方法分析仪器的分辨率问题。计算包含 1000 个数据的标准差  $S_d$ , 以平均值为中间位置, 向正负方向各延伸出 3.5 倍标准差的范围, 形成一个箱体, 将该箱体分成 100 个箱柜 (bins)。检验窗口中每个数据所分布的箱柜, 如果某个箱柜中分布的数据点为零, 则这个箱柜为空箱。本文选取当空箱比例大于 70% 时, 该记录记为异常, 采取舍弃处理 (Vickers and Mahrt, 1997)。

粘滞数据是指在时间序列上的一些“粘滞” (sticks) 数据, 可能是由于传感器暂时无反应或是记录问题导致 (Vickers and Mahrt, 1997)。采用 Vickers and Mahrt (1997) 使用的方法, 即利用振

幅分辨率问题中所使用的箱体每次移动半个窗口来检验。如果分布在同一个箱柜中的连续数据的数量超过一定阈值, 则将这部分数据看成是粘滞数据。本文选定的阈值是: 当粘滞数据分布在平均值附近时为 10%, 而分布在箱体的两极时阈值定为 6%。

2.3.2 去倾修正

湍流通量的研究中要求尽量使超声风温仪坐标与自然坐标的“倾斜角”小于  $0.1^\circ$ ,  $1^\circ$  倾斜角可能会对动量通量造成至少 10% 的误差 (Kaimal and Haugen, 1969)。本文数据所在站点为均匀平坦下垫面, 并且由于三次坐标旋转方法要进行第三次旋转以使  $\overline{w'v'}$  为零, 这可能会给应力计算带来较大误差, 具有一定的不确定性 (Wilczak et al., 2001), 所以采取 Kaimal and Finnigan (1994) 的二次旋转方法。

2.3.3 温度及密度效应修正

超声风温仪观测温度与湿度的关系为 (Schotanus et al., 1983):

$$T_s = T(1 + 0.3192e/p) = T(1 + 0.514q), \quad (5)$$

所以, 有

$$\overline{w'T'} = \overline{w'T_s'} - 0.51 \overline{T_s' w'q'}, \quad (6)$$

其中,  $T_s$  为超声风温仪的观测值,  $T$  为所观测点的气温实际值,  $e$  表示水汽压,  $p$  为大气压强,  $q$  为比湿。

空气的密度效应订正, 采用的是 Webb 等 (Webb et al., 1980) 提出的一个修正方法, 即 WPL 订正:

水汽通量为

$$F_v = (1 + \mu\sigma) \cdot \left( \overline{w'\rho_v'} + \overline{\rho_v' \frac{w'T'}{T}} \right), \quad (7)$$

其中,  $\rho_v$  为水汽密度,  $\rho_a$  为干空气密度,  $\mu=1.6$  为空气和水汽的摩尔质量之比,  $\sigma$  为水汽密度和干空

气密度之比。

### 3 结果分析

#### 3.1 风场分析

图 1 为理塘站 2006 年 7 月 15 日~8 月 14 日风速及风向分布图,从图中可以看出风向以东南风和偏东风为主, $u$  分量风速大于 5 m/s 的所占比例较小,但在东风向风中风速超过 5 m/s 的比例稍有增加。风速主要分布在 0~3 m/s 之间。

#### 3.2 湍流原始数据质量控制

##### 3.2.1 野点、振幅分辨率问题及粘滞数据检验结果

水平风速各分量半小时数据记录中野点数最大为 167 个,低于检验标准;CO<sub>2</sub> 含量观测数据中有 5 个数据记录中野点数超过检验标准,但对于整体数据而言影响不大,在分析时应将该部分数据剔除。

水汽的观测数据,野点数大大增加,存在 106 个数据记录的野点比例超过了 1%,这对于潜热通量的计算将存在一定的影响,对这些时段数据进行手动图像化分析发现:该部分野点中有很大部分数据为连续异常大值。由于 7、8 月是理塘地区降水较为丰富的时期,因此考虑出现这些连续异常大值的原因可能是由于降水产生水滴附着在传感器上造成。计算过程中将这些异常值剔除(表 2)。

振幅分辨率问题只出现在气压的观测数据中,但由于气压本身变化很小,这种分辨率问题对计算结果的影响不大,所以未考虑对其进行处理。风速记录数据中未检验出粘滞数据,但在 CO<sub>2</sub> 和水汽

表 2 野点检测结果

Table 2 The results of spike test

| 观测项目                | 野点数超标的比例 |
|---------------------|----------|
| 风速                  | 0.00%    |
| CO <sub>2</sub> 含量  | 0.04%    |
| H <sub>2</sub> O 含量 | 7.00%    |
| T <sub>s</sub>      | 0.00%    |

含量的观测数据中存在部分粘滞数据,检测出的粘滞数据出现时间段与野点检验中持续异常大值出现时段一致,可以判断为仪器原因导致的数据异常而非与边界层大气活动有关的物理现象,在通量的计算过程中这些时段数据被剔除。

##### 3.2.2 各处理过程对湍流通量计算结果的影响

图 2 为对数据进行去野点及超声虚温修正处理前后动量通量、感热通量和潜热通量计算结果的比较。从图 2a 中可以看到,去野点和超声虚温修正对于感热通量计算结果的影响不显著(相关系数  $R^2$  为 0.999),但从回归方程可以看出在这两项修正后感热通量有所减小(约减小 2%)。图 2b、c 显示潜热通量和动量通量均在去野点前后结果变化不明显(相关系数 0.999)。但从处理前后通量值的相关关系中可以看到,去野点修正使潜热通量有约 2% 的增加,而动量通量则在野点修正后约减小 2%。

为了突出 WPL 修正对潜热通量计算的影响,将仅进行了 WPL 修正的潜热通量计算结果与潜热通量原始值进行比较分析,结果显示于图 3 中。由图 3 可以看出,WPL 修正对于潜热通量计算结果的影响不很显著,但从回归方程上亦能看出对潜热通量值具备一些微调的作用,WPL 修正后的潜热通量比修正前增加了约 6%。这个结果比 Zuo et al. (2009) 和徐自为等 (2008) 得到的结果 (10%) 小,但考虑到 Zuo et al. (2009) 和徐自为等 (2008) 所选站点数据的潜热通量均比感热通量小,而 Oncley et al. (2007) 认为 WPL 修正仅在感热通量大于潜热通量或较大比湿的情况下比较重要,而本文所用的理塘资料在夏季 7、8 月间潜热通量很大,感热通量较小,这可能是造成本文 WPL 修正项比 Zuo et al. (2009) 和徐自为等 (2008) 的结果偏小的原因。为了更详细地分析 WPL 修正对潜热通量计算结果的影响,本文选择其中几天的数据单独分析(如图 4)。图 4 显示 WPL 修正后,白天潜热通

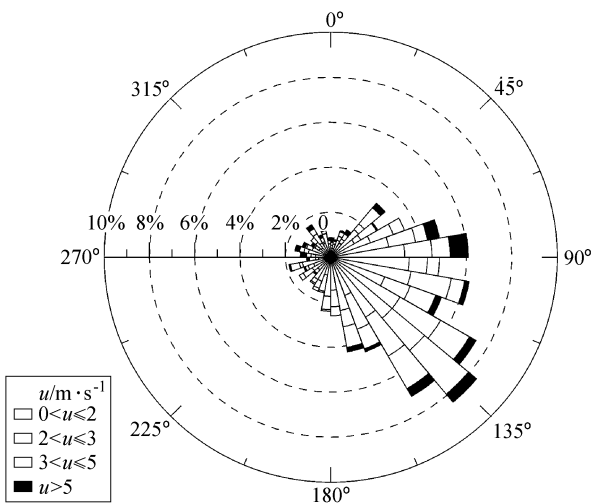


图 1 风速风向分布

Fig. 1 Distribution of wind directions and wind speed

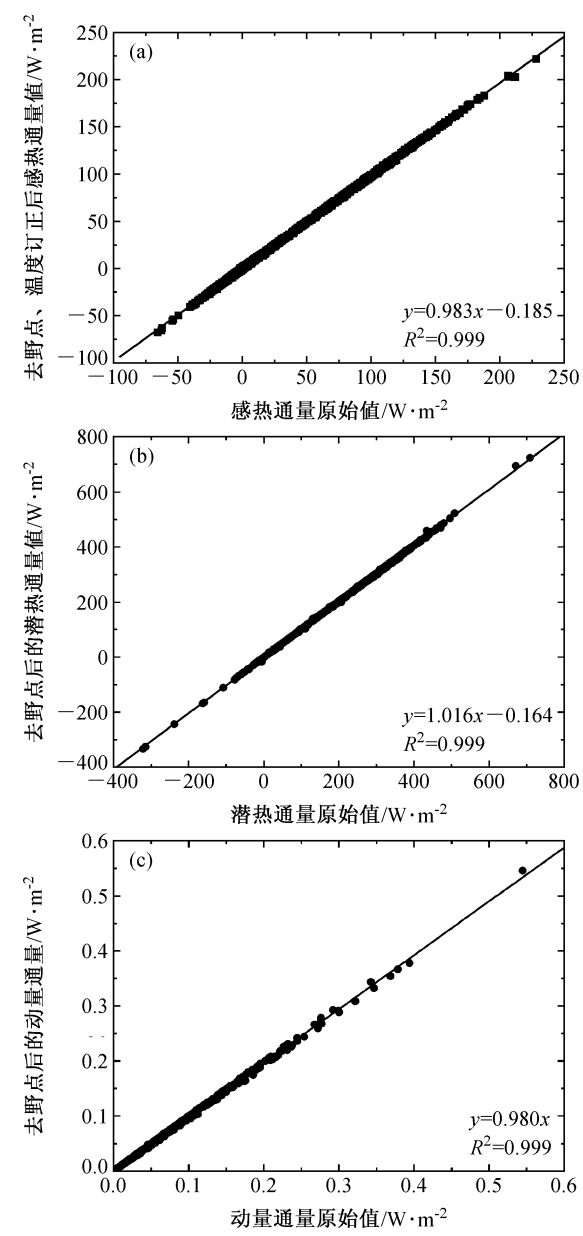


图 2 野点及超声虚温修正前后通量值的比较  
Fig. 2 Fluxes comparison before and after spikes and sonic temperature correction

量有一定的增加，但增幅不大，夜间的通量值则变化不明显。

图 5 为感热通量、潜热通量、动量通量在计算过程中采取了去倾修正与未采取去倾修正的结果间的比较。从图 5 中可以看出，去倾修正对各通量计算结果的影响比其它质量控制过程要明显，其中影响最大的是对动量通量的计算（相关系数为 0.836）。同时，去倾修正后的动量通量比动量通量原始值减小了约 30%，因此，如果利用未经修正的

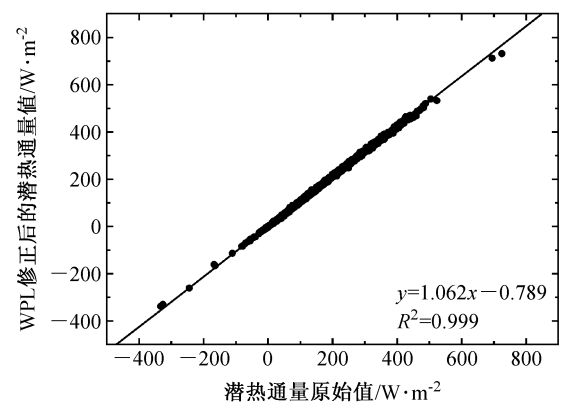


图 3 WPL 修正前后潜热通量的比较  
Fig. 3 Latent heat fluxes comparison before and after WPL correction

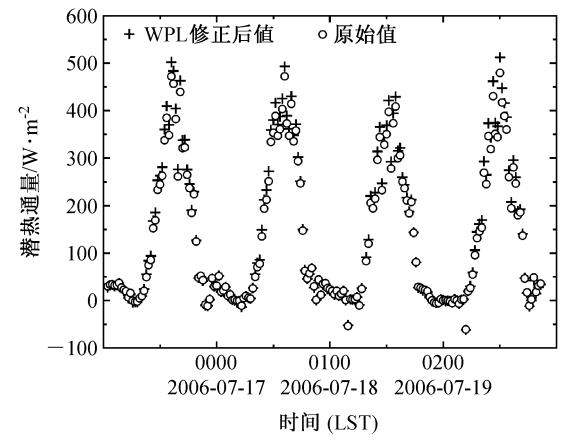


图 4 2006 年 7 月 16~20 日 WPL 修正前后潜热通量的比较  
Fig. 4 Latent heat fluxes comparison before and after WPL correction from 16 Jul 2006 to 20 Jul 2006

直接输出通量结果来计算拖曳系数会存在较大误差。倾斜在不同的稳定度条件下会对动量通量造成不同程度的误差 (Kaimal and Haugen, 1969)，这可能是导致去倾修正前后的动量通量相关性较小的一个原因。对于感热通量和潜热通量，虽然在去倾修正前后存在比野点订正、超声虚温修正及 WPL 修正前后更明显的差别，但整体特征与处理前比较一致，相关性较好（相关系数平方分别为 0.980 和 0.947），并且去倾修正后感热及潜热通量均有所减小，减小幅度约为 3% 和 4%。

为分析各质量控制过程对通量计算结果的综合影响，将质量控制后的通量值与仪器直接输出的通量原始值进行比较分析（如图 6 所示）。从图 6 中可看出，质量控制后感热通量和潜热通量的计算结

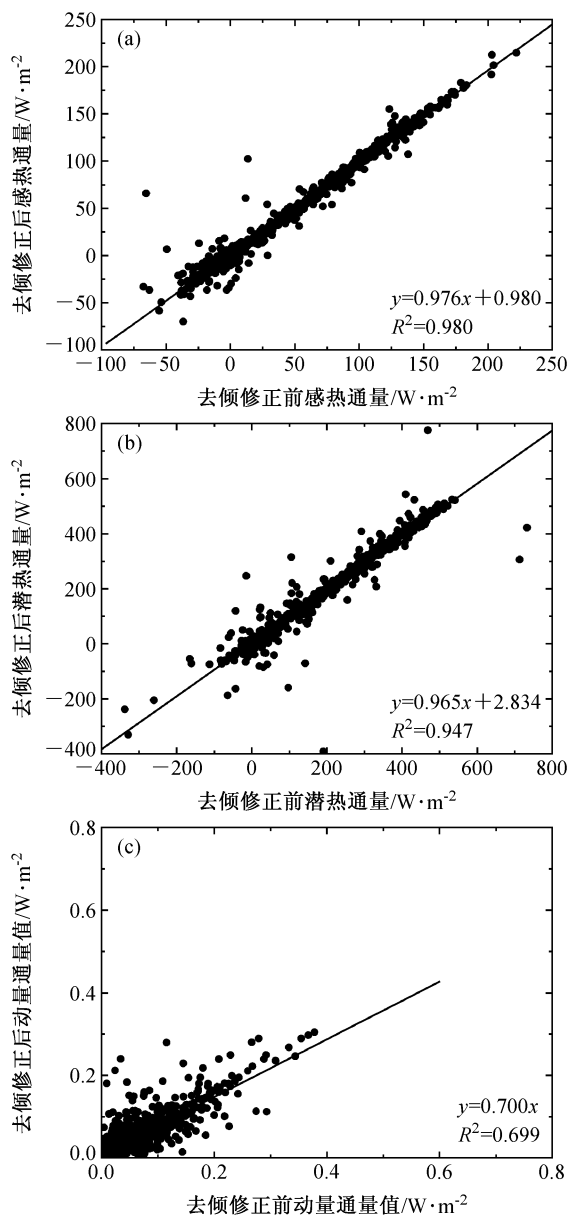


图5 去倾修正前后通量值的比较

Fig. 5 Fluxes comparison before and after tilt correction

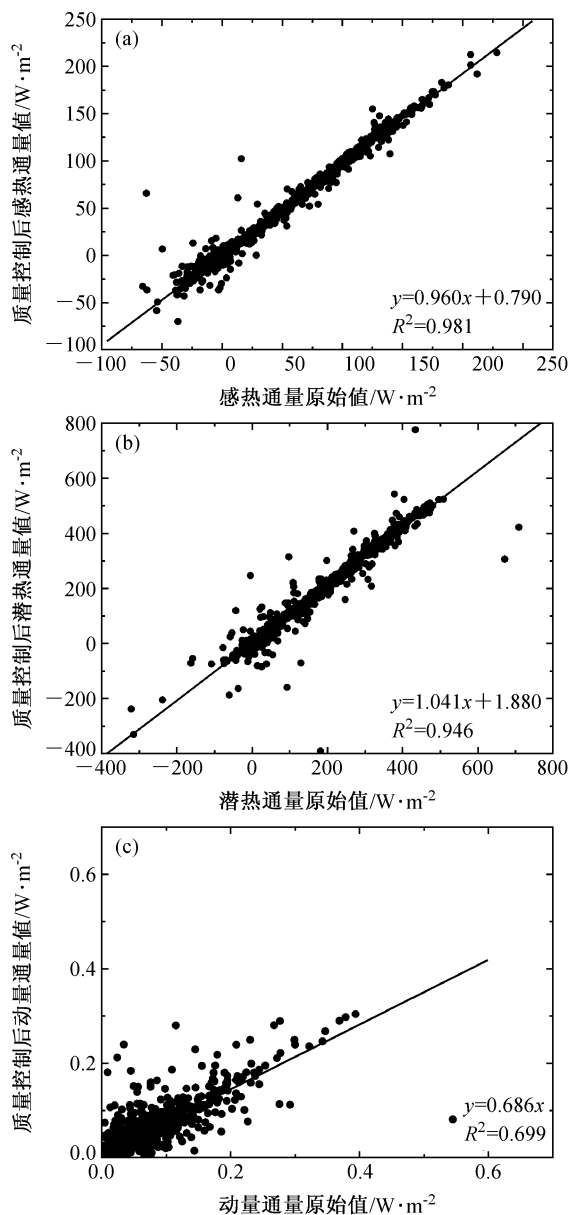


图6 质量控制前后通量值的比较

Fig. 6 Fluxes comparison before and after quality control

果存在一定程度的变化,但差距不如动量通量的明显,动量通量的变化主要来源于去倾修正的贡献。质量控制后的潜热通量值比原始值有所增加,约增加4%左右。野点及WPL修正对潜热通量结果有增大的作用,而去倾修正则会使潜热通量修正值比原始值小。感热通量在质量控制后比原始值有所减小。

涡旋相关法计算湍流通量一直存在一个未能解决的问题——能量闭合问题。由于缺少净辐射资料,本文未进行地表能量平衡分析,只比较质量控

制前后感热通量和潜热通量总和的变化情况,分析结果如图7所示。图7中显示质量控制后感热通量与潜热通量的总和有所增加,约增加4%左右,这对于能量闭合会产生一定的改善作用,但对其贡献仍不够显著(通常能量比在0.5~0.9之间)(陈家宜等,2006)。

### 3.3 湍流通量计算结果的质量评价

#### 3.3.1 湍流平稳性检验

检验方法为:将观测时段(30 min),分为6个子段,每个5 min。对30 min时段数据计算总体方

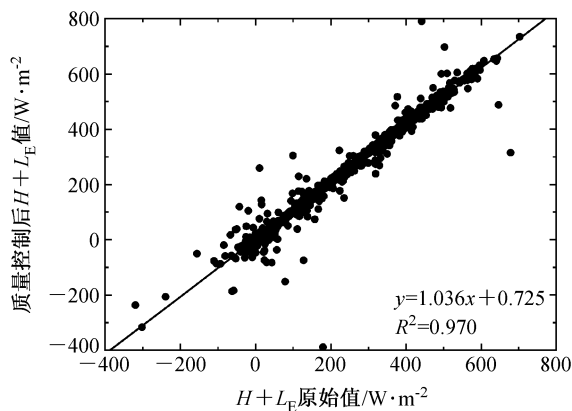


图7 感热通量与潜热通量之和在质量控制前后的变化

Fig. 7 Comparison of  $H + L_E$  before and after quality control

表3  $I_{ST}$ 分类标准

Table 3 Classification scheme for  $I_{ST}$

| 分类 | 范围        |
|----|-----------|
| 1  | 0%~15%    |
| 2  | 16%~30%   |
| 3  | 31%~50%   |
| 4  | 51%~75%   |
| 5  | 76%~100%  |
| 6  | 101%~250% |
| 7  | 251%~500% |
| 8  | >500%     |

注: 引自 Foken et al. (2004)。

差  $V_{30}$ , 并分别计算各子段的方差  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$ 、 $V_5$ 、 $V_6$ , 然后计算其平均值  $V_m$ 。可通过以下公式计算非平稳性指数 (Foken et al., 2004):

$$I_{ST} = |(V_m - V_{30})/V_{30}|. \quad (8)$$

$I_{ST}$ 分类标准如表3所示。

图8为各通量值进行湍流平稳性检验后在每个标准内的分布情况, 图中显示理塘站数据计算的动量通量、感热通量及潜热通量的湍流平稳性良好, 没有数据分布在平稳性较差的第7、8两类范围内, 大部分数据分布在1、2类标准范围内。但同时也能看出分布在第一类的较高质量数据未超过50%, 这可能会给最后的通量结果带来一定的误差。图9为在平稳性检验中分布在1~3类的数据在各风向上的分布情况, 从图中可以看出1~3类平稳性较好的湍流通量主要发生在SE风中, 其次是在NW中。与图1中风场分析结果相联系, 理塘站风向主要是SE风, 因此各湍流通量在主要风场上较能满足湍流平稳性要求。

表4  $I_{TC}$ 分类标准

Table 4 Classification scheme for  $I_{TC}$

| 分类 | 范围        |
|----|-----------|
| 1  | 0%~15%    |
| 2  | 16%~30%   |
| 3  | 31%~50%   |
| 4  | 51%~75%   |
| 5  | 76%~100%  |
| 6  | 101%~250% |
| 7  | 251%~500% |
| 8  | >500%     |

注: 引自 Foken et al. (2004)。

### 3.3.2 湍流发展的充分性检验

在湍流充分发展的情况下, Monin-Obukhov 相似理论得以成立 (徐自为等, 2008)。因此, 湍流发展的充分性检验即为检验脉动量方差与摩擦风速或温度尺度的比值与 Monin-Obukhov 相似理论模拟值的符合程度, 可用总体湍流特征系数 ( $I_{TC}$ ) 来表示 (Foken et al., 2004):

$$I_{TC} = \left| \frac{(\sigma_x/x_*)_{\text{model}} - (\sigma_x/x_*)_{\text{measurement}}}{(\sigma_x/x_*)_{\text{model}}} \right|, \quad (9)$$

其中,  $\sigma_x$  为各变量的方差,  $x_*$  表示摩擦速度或特征温度尺度 (表4)。

本文分别对垂直风速、水平风速及温度进行湍流发展的充分性检验并对其进行分类。垂直风速选用 Kaimal and Finnigan (1994) 建立的经验关系:

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = \begin{cases} 1.25(1 - 3z/L)^{1/3}, & -2 \leq z/L < 0, \\ 1.25(1 + 0.2), & 0 \leq z/L < 1, \end{cases} \quad (10)$$

水平风速选用 Foken and Wichura (1996) 的经验关系:

$$\frac{\sigma_u}{u_*} = \begin{cases} 4.15(-z/L)^{1/8}, & z/L < -0.032, \\ 1.3, & -0.032 < z/L < 0, \end{cases} \quad (11)$$

温度选用的经验关系是 (Foken and Wichura, 1996):

$$\frac{\sigma_T}{T_*} = \begin{cases} 0.98(-z/L)^{-1/3}, & z/L < -1, \\ (-z/L)^{-1/4}, & -1 < z/L < -0.062, \\ 0.5 |z/L|^{-1/2}, & -0.062 < z/L < 0.02, \\ 1.4(z/L)^{-1/4}, & 0.02 < z/L < 1, \end{cases} \quad (12)$$

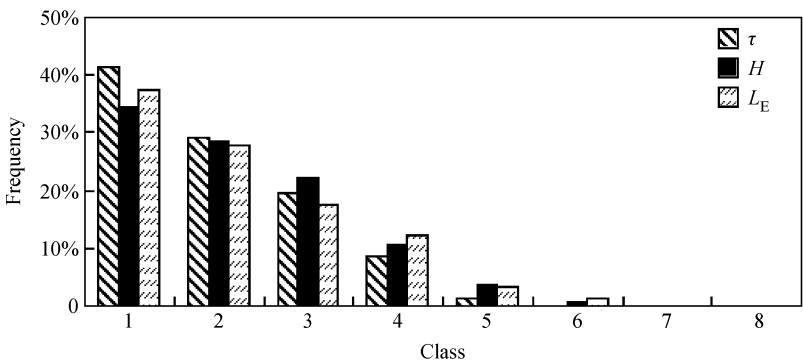


图 8 动量通量、感热通量及潜热通量湍流平稳性检验结果  
Fig. 8 Frequency distributions of quality levels of momentum flux and sensible and latent heat fluxes for the stationarity test

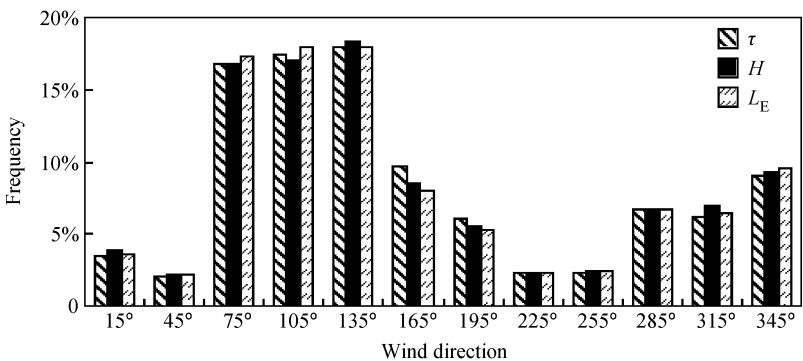


图 9 平稳性检验中分布在 1~3 类的通量值在各风向上的频次分布  
Fig. 9 Frequency distributions of fluxes data (classes 1–3 in the stationarity test) as a function of wind directions

其中,  $L$  为 Monin-Obukhov 长度,  $z$  为高度, 其它各项与前文代表意义相同。

图 10 为理塘站数据经质量控制后的计算结果与各经验关系间的对比情况, 从图中可以看出水平风速的结果 (图 10a、b) 与经验关系差距较大, 而垂直风速 (图 10c、d) 和温度 (图 10e、f) 的结果与经验关系间差距较小, 这说明对于  $u_*$  的计算满足湍流充分发展条件的数据可能较少, 而对于感热和潜热通量大部分数据能满足湍流充分发展的条件。同时, 从图 10 中也能看出不稳定情况下, 满足湍流充分发展的数据较多, 而稳定情况下则不甚理想。

Foken and Wichura (1996) 认为当  $I_{TC}$  小于 30% 时大气湍流是发展充分的。从图 11 中可以看出对于垂直风速的情况,  $I_{TC}$  值小于 30% 即分布在第 1、2 类的数据约占 70% 左右, 这部分数据可以看成是湍流充分发展的。而对水平风速的分析结果显示仅有 40% 左右的数据满足湍流发展充分的条件。

表 5 总体质量分类标准  
Table 5 Overall classification scheme for turbulence data

| 总体 | $I_{ST}$ | $I_{TC}$ |
|----|----------|----------|
| 1  | 1        | 1~2      |
| 2  | 2        | 1~2      |
| 3  | 1~2      | 3~4      |
| 4  | 3~4      | 1~2      |
| 5  | 3~4 *    | 3~5      |
| 6  | 5        | ≤5       |
| 7  | ≤6       | ≤6       |
| 8  | ≤8       | ≤8       |

注: 引自 Foken et al. (2004)。\*: Foken et al. (2004) 采用的范围为 1~4, 但由于这样划分会导致第 5 类数据中包含第 3 类数据, 故本文改为 3~4。

3.3.3 总体质量评价

根据 Foken et al. (2004) 提出的总体质量划分标准, 如表 5 中所示。在总体质量的分类标准基础上又可以将数据质量分为三大类。本文将 1~3 类数据划分为好数据, 可用于基础研究; 4~6 为中等质量数据, 可用于长期观测处理; 7、8 类为低质量

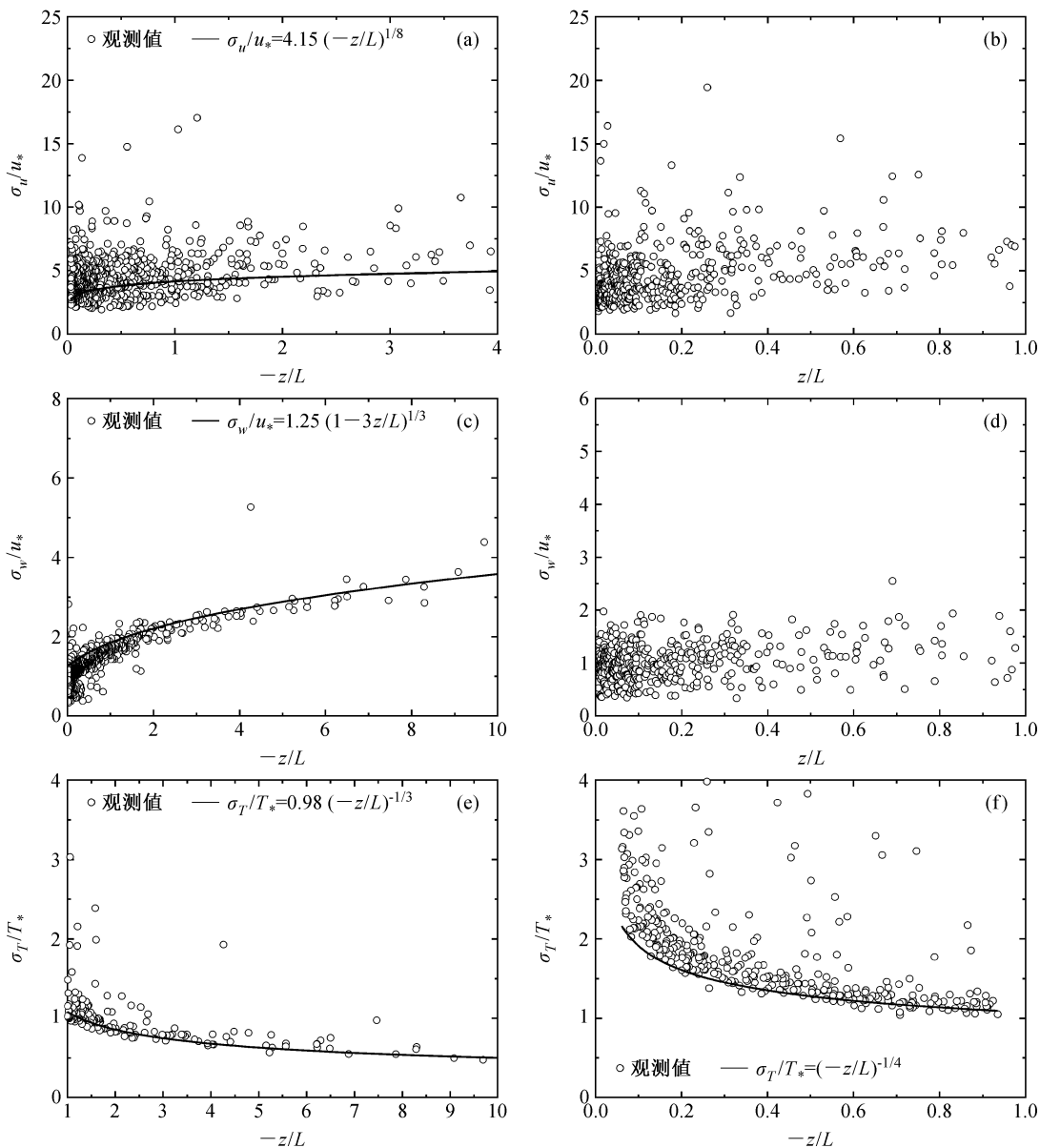


图 10 水平 (a、b)、垂直 (c、d) 风速及 (e、f) 温度标准差分别与摩擦速度和温度尺度的比值随稳定度的变化：(a、c、e) 不稳定层结；(b、d、f) 稳定层结。图中曲线为由数值实验得到的经验关系

Fig. 10 The standard deviations of (a, b) horizontal and (c, d) vertical wind speed normalized by  $u_*$  and (e, f) temperature normalized by  $T_*$  as a function of stability ( $z/L$ ) under (a, c, e) unstable and (b, d, f) stable stratifications. The fitting curves are obtained from the numerical experiment

数据应舍弃。本文所用数据计算的通量结果的分类情况显示在表 6 中。从表 6 中的分类结果可看出，理塘站 7 月中到 8 月中的动量通量计算结果的质量有接近 70% 的是高质量数据，而感热通量和潜热通量均只有 60% 左右的数据是高质量数据。同时也可注意到低质量数据在各通量中所占比例均不高，这说明整体上看理塘站数据针对长期观测研究的研究结果是可采纳的，同时也具备一大部分高质量数

据可供基本研究使用。

## 4 结论与讨论

本文以青藏高原东坡草甸下垫面理塘站 2006 年 7 月中到 8 月中的涡旋相关观测数据为例，对涡旋相关观测原始数据的处理进行了较为系统的描述和分析。对湍流原始数据进行质量控制，并用质量控制后的数据计算各通量值，通过计算结果与仪器

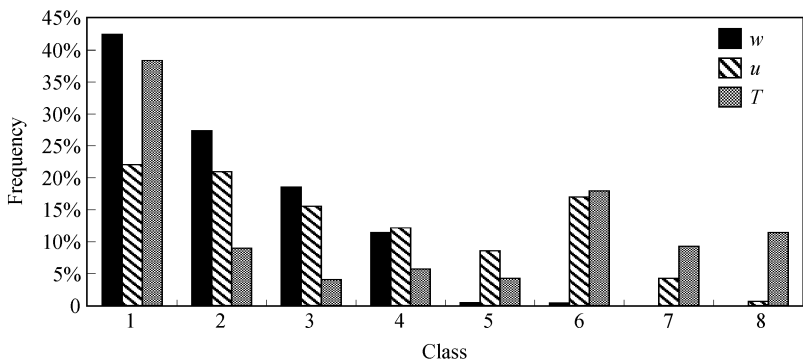


图 11 水平、垂直风速分量及温度的湍流发展充分性检验分类结果

Fig. 11 Frequency distributions of integral turbulent characteristics test for horizontal wind speed, vertical wind speed, and temperature

表 6 所用数据质量分布情况

Table 6 The distribution of data quality

| 质量分类 | $\tau$ | $H$   | $L_E$ |
|------|--------|-------|-------|
| 0    | 68.2%  | 60.6% | 63.3% |
| 1    | 28.7%  | 32.5% | 32.6% |
| 2    | 1.9%   | 2.4%  | 3.1%  |

直接输出结果的比较,分析各质量控制过程对通量最终结果的影响。最后对各通量结果进行了质量评价,并将数据分为高质量、中等质量及差质量三类数据。通过对理塘站数据的处理和分析,本文得到如下结论:

(1) 野点及超声虚温修正对于动量通量、感热通量和潜热通量的计算结果影响不明显,野点修正后动量和感热通量有所减小,而潜热通量则在去野点后有所增加。

(2) WPL 修正对于潜热通量计算结果的影响主要表现在白天。白天经过 WPL 修正的潜热通量大约增加 6%左右,而夜间影响不明显。

(3) 质量控制后感热通量和潜热通量的总和有所增加,但增幅不大,这说明质量控制过程并不能在很大程度上改善涡旋相关法计算地表通量时存在的能量不闭合问题。动量通量在质量控制后的值与原始值间差距较大,说明动量通量对于“倾斜角”的敏感性。

(4) 对通量结果进行质量评价,质量评价结果显示动量通量中高质量数据占 68.2%,感热通量中高质量数据所占比例略小为 60.6%,而潜热通量的高质量数据有 63.3%。同时也注意到低质量数据所占比例很小,这说明理塘站数据基本可以作为长期观测研究的工具,并且大部分数据为可做基本研

究的高质量数据。

### 参考文献 (References)

- 卞林根, 陆龙骅, 程彦杰, 等. 2001. 青藏高原东南部昌都地区近地层湍流输送的观测研究 [J]. 应用气象学报, 12 (1): 1-13. Bian Lin'gen, Lu Longhua, Cheng Yanjie, et al. 2001. Turbulent measurement over the southeastern Tibetan Plateau [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (1): 1-13.
- 卞林根, 陆龙骅, 张占海, 等. 2006. 北冰洋浮冰站大气边界层结构的观测研究 [J]. 极地研究, 18 (2): 87-97. Bian Lin'gen, Lu Longhua, Zhang Zhanhai, et al. 2006. Analysis of structure of atmospheric layer in ice camp over Arctic Ocean [J]. Chinese Journal of Polar Research (in Chinese), 18 (2): 87-97.
- 陈家宜, 范邵华, 赵传峰, 等. 2006. 涡旋相关法测定湍流通量偏低的研究 [J]. 大气科学, 30 (5): 423-432. Chen Jiayi, Fan Shaohua, Zhao Chuanfeng, et al. 2006. The underestimation of the turbulent fluxes in eddy correlation techniques [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 423-432.
- Foken T, Wichura B. 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 78: 83-105.
- Foken T, Göckede M, Mauder M, et al. 2004. Post-field data quality control [M]// Lee X, Massman W J, Law B E. Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurements. America: Springer, 181-208.
- 高志球, 卞林根, 程彦杰, 等. 2002. 利用生物圈模型 (SiB2) 模拟青藏高原那曲草原近地面层能量收支 [J]. 应用气象学报, 13 (2): 129-141. Gao Zhiqiu, Bian Lin'gen, Cheng Yanjie, et al. 2002. Modeling of energy budget using simple biosphere model version 2 (SiB2) over Tibetan Naqu Prairie [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 13 (2): 129-141.
- Hallliwell D H, Rouse W R. 1989. A comparison of sensible and latent heat flux calculations using the Bowen ratio and aerodynamic methods [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 8 (6): 563-574.
- 胡非, 洪钟祥, 陈家宜, 等. 2006. 白洋淀地区非均匀大气边界层的

- 综合观测研究——实验介绍及近地层微气象特征分析 [J]. 大气科学, 30 (5): 883–893. Hu Fei, Hong Zhongxiang, Chen Jiayi, et al. 2006. The field experiment of atmospheric boundary layer over heterogeneous surface in Baiyangdian area—Introduction and preliminary data analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 883–893.
- 胡隐樵, 奇跃进. 1991. 组合法确定近地面层湍流通量和通用函数 [J]. 气象学报, 49 (1): 46–53. Hu Yinqiao, Qi Yuejin. 1991. The combinatory method to determine the turbulent fluxes and the universal functions in the surface layer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 49 (1): 46–53.
- 黄妙芬. 1996. 绿洲农田作物的显热和潜热输送 [J]. 干旱区地理, 19 (4): 68–74. Huang Miaofen. 1996. Sensible heat and latent heat transportation in oasis cropland [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 19 (4): 68–74.
- 黄妙芬. 2003. 地表通量研究进展 [J]. 干旱区地理, 26 (2): 159–165. Huang Miaofen. 2003. Advance of research on surface flux [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 26 (2): 159–165.
- Kaimal J C, Haugen D A. 1969. Some errors in the measurement of reynolds stress [J]. Journal of Applied Meteorology, 8 (3): 460–462.
- Kaimal J C, Finnigan J J. 1994. Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement [M]. Oxford University Press, 256–261.
- Large W G, Pond S. 1982. Sensible and latent heat flux measurements over the ocean [J]. Journal of Physical Oceanography, 2 (12): 464–482.
- 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. Characteristic 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.
- 李英, 李跃清, 赵兴炳. 2008. 青藏高原东部与成都平原大气边界层对比分析 I——近地层微气象学特征 [J]. 高原山地气象, 28 (1): 30–35. Li Ying, Li Yueqing, Zhao Xingbing. 2008. The comparison and analysis of ABL observational data between the east of Tibetan Plateau and Chengdu Plain (I) [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 28 (1): 30–35.
- Liu H, Peters G, Foken T. 2001. New equations for sonic temperature variance and buoyancy heat flux with an omnidirectional sonic anemometer [J]. Boundary-Layer Meteorology, 100: 459–468.
- 刘辉志, 洪钟祥, 张宏升, 等. 2003. 内蒙古奈曼流动沙丘下垫面湍流输送特征初步研究 [J]. 大气科学, 27 (3): 389–398. Liu Huizhi, Hong Zhongxiang, Zhang Hongsheng, et al. 2003. The turbulent characteristics in the surface layer over dune at Naiman in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (3): 389–398.
- 刘辉志, 董文杰, 符淙斌, 等. 2004. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验 [J]. 气候与环境研究, 9 (2): 378–389. Liu Huizhi, Dong Wenjie, Fu Congbin, et al. 2004. The long-term field experiment on aridification and the ordered human activity in semi-arid area at Tongyu Northeast China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (2): 378–389.
- 刘辉志, 冯健武, 邹捍, 等. 2007. 青藏高原原珠峰绒布河谷地区近地层湍流输送特征 [J]. 高原气象, 26 (6): 1151–1161. Liu Huizhi, Feng Jianwu, Zou Han, et al. 2007. Turbulent characteristics of the surface layer in Rongbuk valley on the Northern Slope of Mt. Qomolangma [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (6): 1151–1161.
- 刘树华, 黄子琛, 刘立超, 等. 1995. 空气动力学方法在湍流通量计算中的误差分析 [J]. 气象, 23 (3): 3–29. Liu Shuhua, Huang Zichen, Liu Lichao, et al. 1995. Errors analysis of aerodynamic method in turbulent flux calculation [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 26 (3): 159–165.
- Mahrt L. 1998. Flux sampling errors for aircraft and towers [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 15: 416–429.
- Mauder M, Liebetthal C, Göckede M, et al. 2006. Processing and quality control of flux data during LITFASS-2003 [J]. Bound.-Layer Meteor., 121: 67–88.
- Mauder M, Oncley S P, Vogt R, et al. 2007. The energy balance experiment EBEX-2000. Part II: Intercomparison of eddy-covariance sensors and post-field data processing methods [J]. Bound.-Layer Meteor., 123: 29–54.
- 马伟强, 马耀明, 李茂善, 等. 2007. 藏北高原地区和西北干旱区地表能量季节变化特征对比分析 [J]. 太阳能学报, 28 (8): 922–928. Ma Weiqiang, Ma Yaoming, Li Maoshan, et al. 2007. Analyses on seasonal variation characteristics of surface energy in the Northern Tibetan Plateau and arid region of Northwest China [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica (in Chinese), 28 (8): 922–928.
- Moore C J. 1986. Frequency response corrections for eddy correlation systems [J]. Bound.-Layer Meteor., 37: 17–35.
- Oncley S P, Foken T, Vogt R, et al. 2007. The energy balance experiment EBEX-2000. Part I: Overview and energy balance [J]. Bound.-Layer Meteor., 123: 1–28.
- Schotanus P, Nieuwstadt F T M, de Bruin H A R. 1983. Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes [J]. Bound.-Layer Meteor., 26: 81–93.
- Spittlehouse D L, Black T A. 1979. Determination of forest evapotranspiration using Bowen ratio and eddy correlation measurements [J]. J. Appl. Meteor., 5 (18): 647–653.
- 孙菽芬, 卢志泊. 1989. 一个可与大气环流模式相耦合的陆地水热交换模式 [J]. 中国科学 (B 辑), 19 (2): 216–224. Sun Shufen, Lu Zhibo. 1989. A land hydrothermal exchange model which can couple with general circulation model [J]. Science in China (Ser. B) (in Chinese), 19 (2): 216–224.
- Thom A S, Stewart J B, Oliver H R, et al. 1975. Comparison of aerodynamic and energy budget estimates of fluxes over a pine forest [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 101: 93–105.

- Vickers D, Mahrt L. 1997. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 14: 512–526.
- 王介民. 1999. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从 HEFEI 到 IMAGASS 和 GAME—Tibet/TIPEX [J]. *高原气象*, 18 (3): 280–294. Wang Jiemin. 1999. Land surface process experiments and interaction study in China—From HEIFE to IMGRASS and GAME-Tibet/TIPEX [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 18 (3): 280–294.
- 王介民, 刘晓虎, 祁勇强. 1990. 应用涡旋相关方法对戈壁地区湍流输送特征的初步研究 [J]. *高原气象*, 9 (2): 120–129. Wang Jiemin, Liu Xiaohu, Qi Yongqiang. 1990. A preliminary study of turbulence transfer characteristics in Gobi area with an eddy correlation technique [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 9 (2): 120–129.
- Webb E K, Pearman G I, Leuning R. 1980. Correction of flux measurement for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106: 85–100.
- Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. 2001. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J] *Bound.-Layer Meteor.*, 99: 127–150.
- 吴洪颜, 申双和, 徐为根, 等. 2000. 关于棉田感热通量和潜热通量的几种计算方法 [J]. *气象科学*, 20 (4): 537–542. Wu Hongyan, Shen Shuanghe, Xu Weigen, et al. 2000. The analysis on methods of the calculation of sensible and latent heat flux [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 20 (4): 537–542.
- Xu Q, Qiu C J. 1997. A variational method for computing surface heat fluxes from ARM surface energy and radiation balance systems [J]. *J. Appl. Meteor.*, 36: 3–11.
- 徐自为, 刘绍民, 宫丽娟, 等. 2008. 涡动相关仪观测数据的处理与质量评价研究 [J]. *地球科学进展*, 23 (4): 357–370. Xu Ziwei, Liu Shaomin, Gong Lijuan, et al. 2008. A study on the data processing and quality assessment of the eddy covariance system [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 23 (4): 357–370.
- 张述文, 邱崇践, 张卫东. 2004. 用变分方法估算淮河流域总体输送系数 [J]. *高原气象*, 23 (4): 506–511. Zhang Shuwen, Qiu Chongjian, Zhang Weidong. 2004. Estimating the bulk transfer coefficients in Huaihe River basin by using a variational method [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 23 (4): 506–511.
- Zuo J Q, Huang J P, Wang J M, et al. 2009. Surface turbulent flux measurements over the Loess Plateau for a semi-arid climate change study [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (4): 679–691.