

南京市及郊区近地层通量观测比较

王琛¹,袁仁民¹,罗涛¹,孙鉴泞²,蒋维楣²,吴晓庆³

(1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院,安徽合肥 230026;

2. 南京大学大气科学学院,江苏南京 210093;

3. 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室,安徽合肥 230031)

摘要:2005年夏季、2006年春季在南京市及南京郊区进行了两次近地层通量观测实验,运用涡动相关(eddy-covariance, EC)技术得到感热通量、潜热通量、二氧化碳通量和摩擦速度. 为了消除地形对这些测量值的影响,运用平面拟合方法(PF)对其进行倾斜校正. 进一步研究发现,平面拟合因子与风向角度密切相关,因而在采用平面拟合方法处理数据时,必须考虑风向的影响,分别做出不同风向扇区的拟合平面,我们命名这种改进后的新方法为分角度平面拟合法(sector planar fit, SPF);相应的,称不区分风向扇区的平面内拟合法为总体平面拟合(general planar fit, GPF). 着重比较了不同季节、不同地点两种方法修正后的通量结果的差异. 春夏两季,市区各通量分布总体趋势一致;地域上,市区 SPF 法、GPF 法修正后通量值之间有明显的差异,郊区二者差异较小. 接着,运用 SPF 法、GPF 法修正垂直速度,两方法修正后垂直速度差异显著;最终,得出两种方法修正后垂直速度的概率分布,SPF 方法得到的垂直速度更接近于正态分布.

关键词:城市边界层;涡动相关;通量;分角度平面拟合;总体平面拟合

中图分类号:P404 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.0253-2778.2013.02.001

引用格式: Wang Chen, Yuan Renmin, Luo Tao, et al. Flux observation research on urban and suburban atmospheric boundary layers in Nanjing[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(2): 87-96.

王琛,袁仁民,罗涛,等. 南京市及郊区近地层通量观测比较[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(2): 87-96.

Flux observation research on urban and suburban atmospheric boundary layers in Nanjing

WANG Chen¹, YUAN Renmin¹, LUO Tao¹, SUN Jianning², JIANG Weimei², WU Xiaoqing³

(1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. LACOR, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In the summer of 2005 and the spring of 2006, flux measurements were twice taken in Nanjing Municipal Party School and Pukou area. Heat flux, latent heat flux, carbon dioxide flux as well as friction velocity were obtained applying the eddy-covariance (EC) technique. In order to eliminate the impact of

收稿日期:2012-12-12;修回日期:2013-01-26

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-QN502),国家自然科学基金(40975004,40975006,43333027)资助.

作者简介:王琛,女,1989年生,硕士生.研究方向:大气边界层物理. E-mail: longshui@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:袁仁民,副教授. E-mail: rmyuan@ustc.edu.cn

complex terrain, a planar-fit (PF) method for tilt correction was adopted. A thorough analysis of the PF method indicated that PF coefficients are closely related to wind direction. Thus, wind directions must be taken into consideration when processing data. To be specific, winds from all directions were divided into several sectors and PF method was applied to each of them in order to generate a fitted plane for each sector. This method was named sector planar fit (SPF) as distinguished from the general planar fit (GPF) which doesn't consider wind sectors. The differences of corrected fluxes by the two methods (GPF/SPF) for the two seasons and two locations were mainly considered. It was clearly revealed that both urban and suburban flux results share a consistent trend in spring and summer; geographically, in urban areas, the corrected fluxes using SPF and GPF show obvious differences, differences are much smaller in suburban areas. Moreover, the vertical velocity w was corrected using the two methods and it was found that w also exhibits significant differences. Finally, according to the probability distribution of corrected vertical wind velocity by the two methods, it was concluded that the distribution of corrected vertical velocities by SPF is closer to normal than GPF.

Key words: urban boundary layer; eddy-covariance; flux; general planar fit (GPF); sector planar fit (SPF)

0 引言

大气和地表之间存在着多种形式的热量交换和物质循环. 各种热量交换和碳水循环, 显著地影响着大气运动, 是大尺度天气气候形成的重要原因之一, 尤其是二氧化碳浓度的增减对地球温度变化起着至关重要的作用, 因而研究它在大气边界层的交换过程已经成为国际上的焦点问题. 近年来, 世界范围内建立了一系列地气通量监测网点, 其中多个通量观测站建在中国^[1], 以通过涡度相关和多层廓线系统 (multi-level profile system) 等, 监测各种地形上的热量交换、碳水循环^[2]. 但是研究表明, 种种观测结果都面临一个严重问题, 即这些通量测量结果通常不满足一个基本物理学定律——在非均匀下垫面条件下, 不满足能量平衡方程^[3].

不能满足能量平衡方程主要与三个因素有关: 能量平衡方程中各项直接测量的尺度选择不同、仪器测量误差、数据处理方式^[3]. 对于通量测量, 涡度相关技术是目前公认最好的测量近地层通量的微气象方法, 经过不断的技术改进, 现今已经可以用来长期连续观测 CO_2 、水汽和热通量. 但是, 涡度相关技术的后续数据处理的原理和技术仍在不断改进, 如进行坐标系转换^[4]、增加统计时间长度等^[5-6]. 本文中, 我们主要探讨了数值处理方式的改进.

由于实际的测量地点, 例如城市边界层观测, 下垫面非均匀, 经常会出现建筑物的绕流和局地的环流, 因此, 在研究地气交换过程中, 选择合适的坐标系以及计算方法, 必须考虑到真实垂直风速的存在

以及气流受地形强迫影响这些因素. 最普遍的坐标旋转方法是利用一定时段内的 (30 min) 三维平均风速数据, 定义一个正交坐标基; 以双重旋转 (double rotation method, 简称 DR 方法) 和三重旋转 (triple rotation method, 简称 TR 方法) 为例^[7-9], 在 DR 方法中, 第一次旋转使得 x 轴与平均流向一致, 第二次旋转使垂直速度为 0 ($\overline{v}=0, \overline{w}=0$); TR 方法在 DR 的基础上, 追加规定水平风速和垂直风速的协方差为零, 即第三次旋转使 $\overline{vw}=0$. DR 和 TR 方法易于理解和易于使用, 它们只允许一维的流动, 不存在水平的对流或者气流扩散, 不存在风向切变引起的横风动量通量. 然而, 二维和三维的风流, 例如热循环、自然对流等均能产生非零平均垂直风速^[10-11], 在这种情况下, 过度的旋转可能导致表面通量计算的系统性偏差. 此外, 在弱风情况下做 DR 和 TR 旋转产生的随机取样误差较大, 随机取样误差会影响旋转因子, 进一步地影响通量结果^[4].

2001 年, Wilczak^[4] 提出了使用平面拟合 (planar fit, PF) 的方法来进行倾斜校正, 它克服了 DR 和 TR 方法的局限. 这个方法使用一个右手正交系, 采用每 30 min 记录的三维风速数据集合, 运用多重线性回归, 得到一个拟合平面. 在该平面上, 平均垂直风速 w 是水平风速的函数, 长期均值为 0, 但是短期的每个 w 是非零值.

PF 方法被广泛运用在涡度相关法通量测量的修正中^[9], 适用于规则、均匀的坡地和平地. 但是, 在进行城市边界层观测的时候, 这种典型的复杂地形上很难只做出一个拟合平面. 因而, 地形的复杂程度必须

考虑,以得出能分别代表不同坡度的多个拟合平面.研究表明,涡度相关通量和垂直速度计算结果与风向密切相关,因而基于 PF 方法,我们建立一个地形跟随坐标系.在该坐标系内,平均垂直速度不但与水平速度有关,而且还是风向角度 φ 的函数($\overline{w_T} = b_1(\varphi) \overline{u_m} + b_2(\varphi) \overline{v_m}$),我们称区分角度的方法为分角度平面拟合(SPF),不区分角度的方法为整体平面拟合(GPF)^[12].

本文中,我们主要探讨了数值处理方式的改进.我们于 2005 年夏季、2006 年春季在南京市委党校及南京浦口进行实验,利用涡动相关系统获得的数据,进行 GPF,SPF 平面拟合,修正潜热、感热、二氧化碳通量和摩擦速度以及垂直速度.本文的主要目的是:其一,比较不同季节(春/夏)两方法修正得到的通量结果;其二,比较不同地域(市/郊)之间差异;其三,比较 GPF,SPF 两方法修正后的垂直速度 w ;其四,试从概率分布角度评估两方法.

1 实验和方法

1.1 理论

平面拟合法适用于下垫面和仪器倾角相对稳定的情况,可用于对涡动相关技术(eddy covariance, EC)测量通量进行修正.区别于 Wilczak 方法^[4],在此我们简略推导并扩展用平面拟合法进行坐标旋转的过程^[12].在较长时间段内(如一星期或更长)真实垂直风速平均值可以看作 0.因此可以推断,测量得到的垂直风速由两部分组成:一部分是真实垂直风速,由对流、天气尺度上的沉降(synoptic-scale subsidence)和局地环流产生,另一部分是由于超声风速计和地形斜坡造成的倾斜垂直速度^[10].可以由下式来表示:

$$\overline{w_m} - b_0 = \overline{w_R} + \overline{w_T} \quad (1)$$

式中, $\overline{w_m}$ 是超声风速计测得、进行每 30 min 平均后的垂直风速; b_0 是平均零点偏移,可能由电子设备问题或者扰动流等造成; $\overline{w_R}$ 是对流引起的真实平均垂直风速,我们假设 $\overline{w_R}$ 是随机的,并且它在长时间段内的平均值为零,即 $\sum_n \overline{w_R} \rightarrow 0$; $\overline{w_T}$ 是超声风速计安装和斜坡造成的倾斜垂直风速,它不是一个随机的量,而是由平行于地形表面的风速组成,与地形和超声风速计指向均有关,因而可以得到:

$$\overline{w_T} = b_1(\varphi) \overline{u_m} + b_2(\varphi) \overline{v_m} \quad (2)$$

式中, $b_1(\varphi)$ 和 $b_2(\varphi)$ 是与风向角度 φ 有关的回归系数, $\overline{u_m}$ 和 $\overline{v_m}$ 是测量得到的 x 方向与 y 方向速度.如

果取特定的角度 φ ,在长时间段内, $b_1(\varphi)$ 和 $b_2(\varphi)$ 趋向于一个恒定的值,把式(2)变成:

$$\sum_n \overline{w_R} = \sum_n [\overline{w_m} - b_0(\varphi) - b_1(\varphi) \overline{u_m} - b_2(\varphi) \overline{v_m}] \quad (3)$$

等式左边为零,由最小二乘法可以计算出 $b_0(\varphi)$, $b_1(\varphi)$ 和 $b_2(\varphi)$,此处我们把不区分扇区、按全角度 360°得到拟合平面称为总体平面拟合(GPF),即该方法只得到一组与风向角度 φ 有关的回归系数 b_0 , b_1 和 b_2 .

根据地形特点,我们可以把风向角度划分为不同风向扇区,每个扇区都可得到一个最佳拟合平面.例如,把风向角度 φ 按每 30°划分,可得到 12 组 $b_0(\varphi)$, $b_1(\varphi)$ 和 $b_2(\varphi)$,即 12 个拟合平面,这种方法称为分角度平面拟合(SPF).

基于之前的分析,得到与风向角度 φ 有关的回归系数 $b_0(\varphi)$, $b_1(\varphi)$ 和 $b_2(\varphi)$ 之后,30 min 内的真实垂直速度可由下式得到:

$$\overline{w_R} = \overline{w_m} - b_0(\varphi) - b_1(\varphi) \overline{u_m} - b_2(\varphi) \overline{v_m} \quad (4)$$

在式(4)基础上,我们继续推导出一个新表达式,使真实垂直风速的意义更加明确.对于某一角度区域,把 $\overline{w_{\text{PFR}}}$ 记为坐标系变换后的平面拟合风速:

$$\overline{w_{\text{PFR}}} = p_1 \overline{u_m} - p_2 \overline{v_m} + p_3 (\overline{w_m} - b_0) \quad (5)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= \frac{-b_1}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}}, \\ p_2 &= \frac{-b_2}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}}, \\ p_3 &= \frac{1}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

整理得:

$$\overline{w_{\text{PFR}}} = \frac{\overline{w_R}}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}} \quad (7)$$

经过 PF 旋转后,新坐标系中的 z 轴并非垂直于水平方向,真实垂直风速却应该垂直于水平面.因此, $\overline{w_{\text{PFR}}}$ 的方向并不是真实垂直风速的方向,而是 $\overline{w_R}$ 在 z 轴方向上的分量,PF 旋转后的 z 轴与真实垂直方向之间的夹角余弦应为 $\frac{1}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}}$.即

$$\overline{w_R} = \overline{w_{\text{PFR}}} * \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1} \quad (8)$$

1.2 实验介绍

南京市市区及郊区边界层综合观测实验分别于夏季和春季在市委党校和郊外浦口这两个地点进行.具体数据采集时间和地点分别为:2005-07-17 ~

2005-07-31 南京党校、2006-02-16~2006-03-06 南京党校、2006-02-11~2006-03-10 浦口 2.2 m 高度、2006-02-19~2006-03-10 浦口 40 m 高度。

市区观测场地位于南京市委党校教学楼楼顶(32.04°N,118.79°E),楼高 22 m,观测场地位于楼顶,为 20 m×10 m 的水泥柏油楼板. 涡动相关系统架设的高度离楼顶约为 2.5 m. 为了减小楼顶对测量系统的影响,仪器紧靠建筑物东侧边缘,实验期间盛行东风. 实验地点周边 1 km 范围内集中着民宅和商业区,建筑物密集,南面约 100 m 远处有两幢 20 层高楼,东面约 300 m 远处有两幢 15 层的高楼. 混凝土结构建筑物占地面积约占总面积的 70% 以上,具有城市水泥下垫面的基本特征.

市区观测场地设置了辐射、超声风温、平均风温等观测项目. 其中常规气象传感器分布安置在楼顶

的铁塔上,楼顶距地面高度约为 20 m,铁塔高为 36 m,使用 Compbell 公司的 CR10X 数据采集器进行采集,采样频率 0.05 Hz. 涡动相关系统包括超声风速仪(Compbell 公司制造的 CSAT3)和气体分析仪(LiCOR 公司制造的 L17500),安装于距楼顶 2.2 m 高处,由 Compbell 公司的 CR5000 数据采集器进行采集,数据采样频率为 10 Hz.

浦口测量点位于市郊(32.18°N,118.67°E),地形平坦,四周开阔,向东的方向为缓缓抬升的坡地. 同样进行了平均风温、地温、辐射等常规平均量的测量,以及温、压、风、密度各脉动量测量,涡动相关系统布置在两层高度上(2.2 m 和 40 m),仪器组成、设备型号均与市委党校相同^[13-14].

我们列出了实验期间南京市的基本天气状况(表1),2005年夏季以多云天气为主,常伴有雷雨、

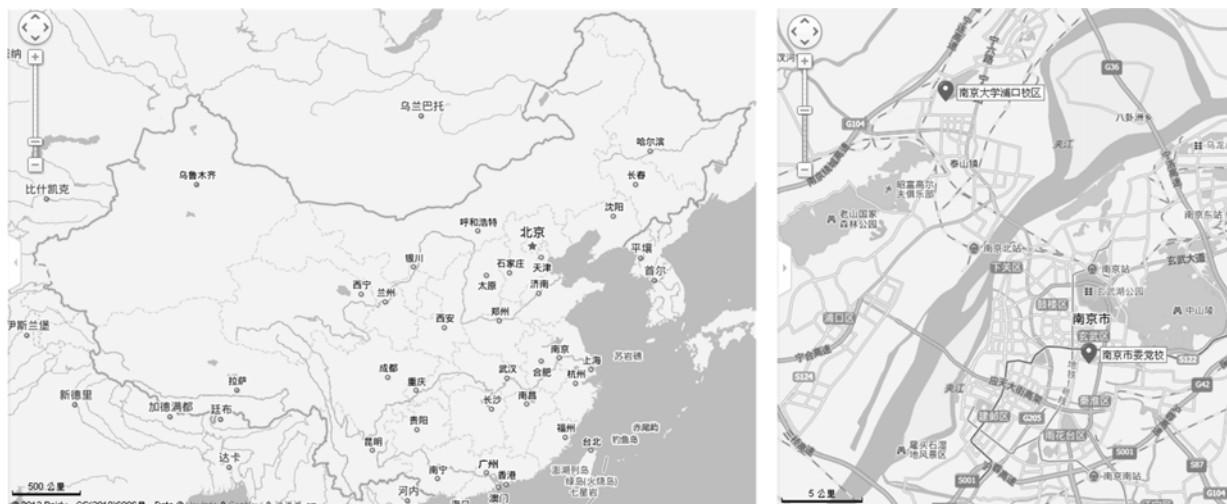


图 1 南京市委党校、浦口观测点一览图

Fig. 1 Observing spot at Nanjing Municipal Party School and Pukou area

表 1 南京市 2005 年夏、2006 年春实验期天气情况

Tab. 1 Weather conditions of Nanjing during summer (2005) and spring (2006)

2005 年夏季				2006 年春季			
时间	天气状况	时间	天气状况	时间	天气状况	时间	天气状况
7 月 17 日	晴转多云	7 月 25 日	多云、雷雨	2 月 16 日	小雨转阴	2 月 26 日	阴转小雪
7 月 18 日	晴转多云	7 月 26 日	多云	2 月 17 日	多云转晴	2 月 27 日	阴转中雪
7 月 19 日	多云	7 月 27 日	多云、雷雨	2 月 18 日	阴	2 月 28 日	中雪转阴
7 月 20 日	多云转阴	7 月 28 日	阴转阵雨	2 月 19 日	阴	3 月 1 日	晴
7 月 21 日	阴转多云	7 月 29 日	阴转多云	2 月 20 日	晴	3 月 2 日	晴
7 月 22 日	多云	7 月 30 日	多云、雷雨	2 月 21 日	晴转多云	3 月 3 日	晴
7 月 23 日	多云	7 月 31 日	晴转多云	2 月 22 日	阴转多云	3 月 4 日	晴转多云
7 月 24 日	多云、雷雨			2 月 23 日	晴转多云	3 月 5 日	晴转多云
				2 月 24 日	晴转阴	3 月 6 日	晴转多云
				2 月 25 日	小雨转阴		

阵雨;2006 年春季降雨较少,天气晴好干燥。

2 结果

在本节中,我们分别用 GPF 方法、SPF 方法修正涡动相关法得到的潜热、感热、二氧化碳通量、摩擦速度以及垂直速度,比较不同季节、不同地形两种方法之间有何差异,下面给出实验结果。

2.1 南京市市区春夏两季比较

如图 2 所示,将 10 Hz 超声风速计记录下的脉动风速作每 30 min 平均,做出垂直速度的角度分布图、概率直方图。可见,垂直速度多小于 0。结合南京市委党校周围地形分析,实验地点所处的建筑物相对于周围较低,东面和东南方向有高楼阻挡,气流越过这些建筑物被迫爬坡然后下沉,是造成垂直风速小于零的原因。

2005 年夏季取风向集中角度 $90^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 为分角度平面拟合(SPF)的区间(图 2(c)),2006 年春季取 $120^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 为风向集中角度(图 2(d))进行分角度平面拟合。夏季与春季盛行风向均为东南风,速度分布

趋势一致。因为城市下垫面地形复杂,风受地形强迫影响较显著,因而图 2(a),2(b)并不是标准正弦形状^[1]。

然后,我们分别按 GPF 方法、SPF 方法,计算相关因子 b_0, b_1 和 b_2 以及各通量,将两组计算结果加以比较。

2005 年我们选择了角度为 $90^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 的盛行风向为 SPF 风向扇区,在这个风向扇区内有 772 组数据;2006 年选择 $120^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 为 SPF 风向扇区,共 575 组数据。由表 2、表 3 可以看出 SPF 和 GPF 方法的回归系数之间存在较明显的差异,其中 b_0 代表测量误差偏移量,SPF 方法的 b_0 均明显小于 GPF 方法,可以推断 SPF 方法的误差较小。

表 2 2005 年夏季党校 $90^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 扇区 GPF,SPF 回归系数
Tab. 2 Regression coefficients for GPF and SPF at Nanjing Municipal Party School during summer, 2005

Data	$b_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	b_1	b_2
GPF	-0.187 31	-0.126 05	0.009 800 9
SPF	-0.025 569	-0.232 04	0.020 016

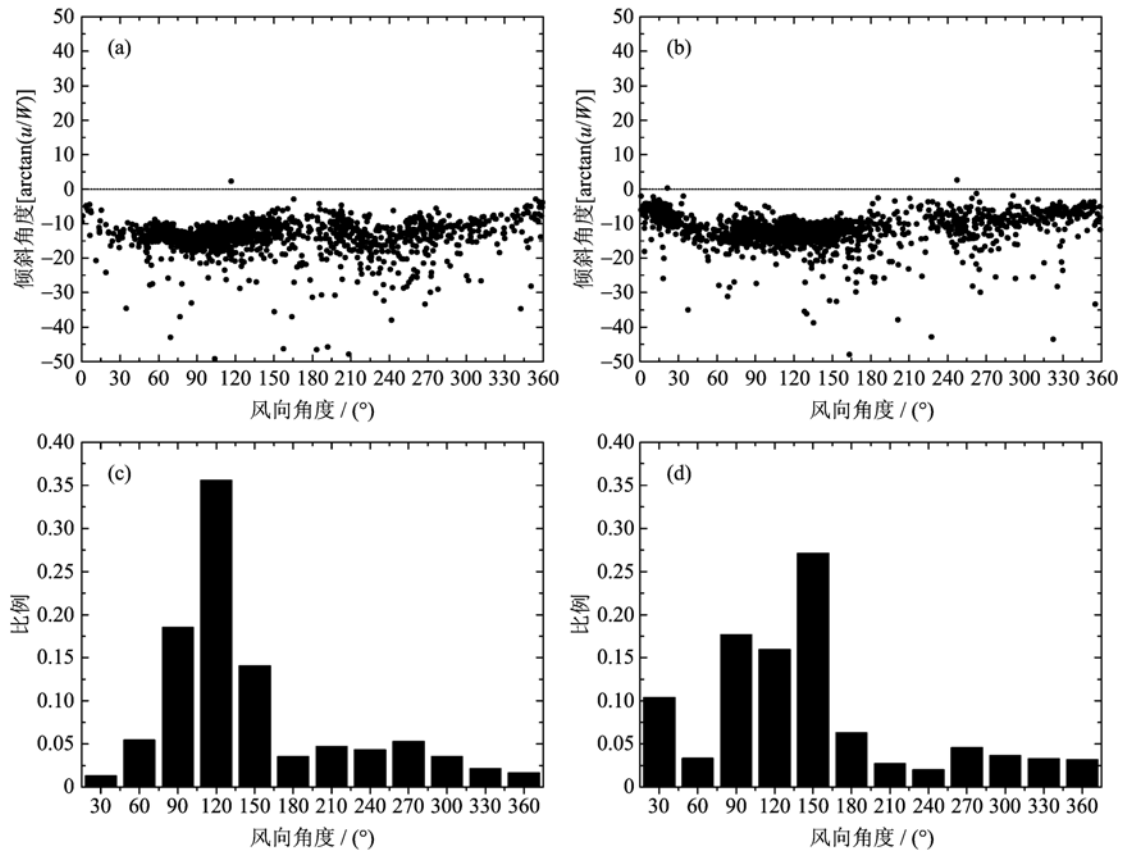


图 2 2005 年夏((a)(c)),2006 年春((b)(d))南京市市区风矢量倾斜角度随风向的变化趋势及风向的分布特征

Fig. 2 The ratio of vertical (w) to horizontal wind speed (u) for tilt angle in urban Nanjing during summer, 2005 (a,c) and spring, 2006 (b,d)

表 3 2006 年春季党校 120°~150°扇区 GPF,SPF 回归系数

Tab.3 Regression coefficients for GPF and SPF at Nanjing Municipal Party School during spring, 2006

Data	$b_0/(m \cdot s^{-1})$	b_1	b_2
GPF	-0.137 89	-0.119 27	0.015 474
SPF	-0.015 168	-0.168 30	0.133 48

我们运用涡动相关技术(eddy covariance 简称 EC),通过测定和计算温度、水汽密度、二氧化碳密度等物理量的脉动方差与垂直风速脉动的协方差,求得潜热通量(LE)、感热通量(Hs)、二氧化碳通量(Fc)和摩擦速度(u_*)^[15].在 EC 通量的基础上,图 3 比较了两季节 GPF 和 SPF 修正后的各通量.横坐标是 GPF 方法,纵坐标是 SPF 方法.同时用线性拟合做出了拟合线,方便比较.

春夏两季市区各通量分布趋势一致,有许多共同特征.感热通量 Hs 和摩擦速度 u_* 线性相关性均较好,误差较小;而 LE 和 Fc 图点分布较密集且无规则,线性相关性较差,可能原因是水汽、二氧化碳通量与源区分布相关,源区分布不均匀,且通常随时

间而变化.其次,以上 4 图斜率均远远小于 1,即 GPF 方法得到的通量的绝对值一般大于 SPF 方法,反映出 SPF 和 GPF 两种方法之间存在明显差异.差异如此之大的原因可能是拟合平面的选择上有差异,风向角度 φ 对回归系数 $b_0(\varphi)$, $b_1(\varphi)$ 和 $b_2(\varphi)$ 的影响明显,地形因素影响了拟合结果.

总体上,春季结果比夏季结果小,较夏季密集紧凑,变化范围小,集中在零值附近,原因是春天气温较低,且空气干燥,地气间热量、水汽等交换不显著.

2.2 南京郊区

图 4(a)空心点表示 40 m 高度,黑实点表示 2.2 m 高度.由图可见盛行东南风、南风,2.2 m 处垂直速度普遍小于 0,即向下吹的风占主导,由于 2.2 m 地势低,被周围建筑阻挡,风被迫爬升然后下沉,造成垂直风速 w 大部分小于 0.而 40 m 向上向下的风较平均,可以看出呈正弦曲线,由于 40 m 离地面较高,受地形强迫作用小,可以近似看成规则的坡面,不同方向的风在该坡面上产生形变,垂直方向的风速、风向与水平方向的风速有明确的函数关

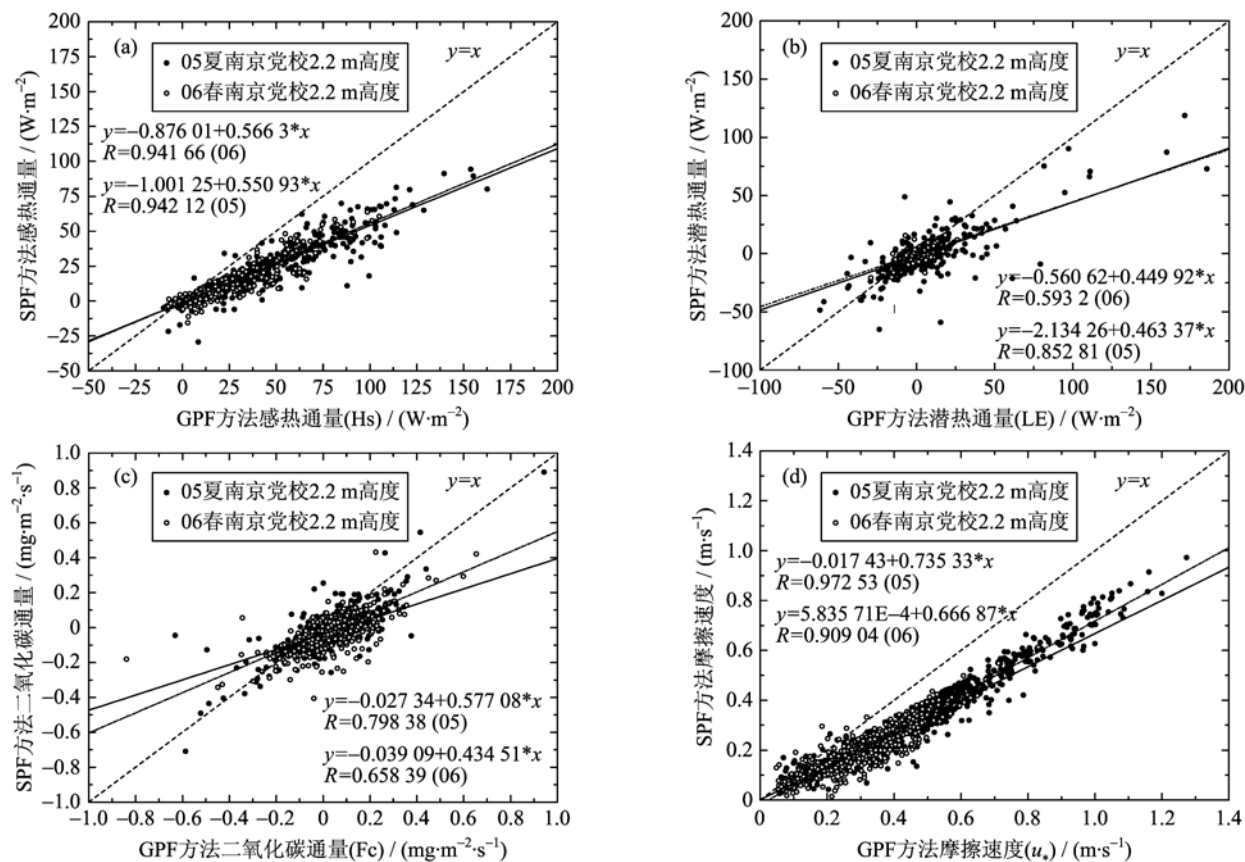


图 3 2005 年夏、2006 年春南京市 GPF 和 SPF 得感热通量、潜热通量、二氧化碳通量、摩擦速度比较

Fig.3 Comparison of Hs, LE, Fc and u_* by GPF and SPF in urban Nanjing during summer, 2005 and spring, 2006

系^[1]. 按图 4(b), 浦口 40 m 高度, 取风向集中角度 150°~180°为 SPF 方法的风向扇区. 由图 5 可见, 2.2 m 与 40 m 高度各通量分布趋势非常一致(其中 2.2 m 处二氧化碳数据缺省), 即观测高度对两种方

法影响小.

两层高度得到的结果均线性相关性很高, SPF 与 GPF 得到的结果接近 $y=x$ 线, 其中 H_s 和 u_* 图最为接近, 各图斜率略小于 1, 即 SPF, GPF 得到的

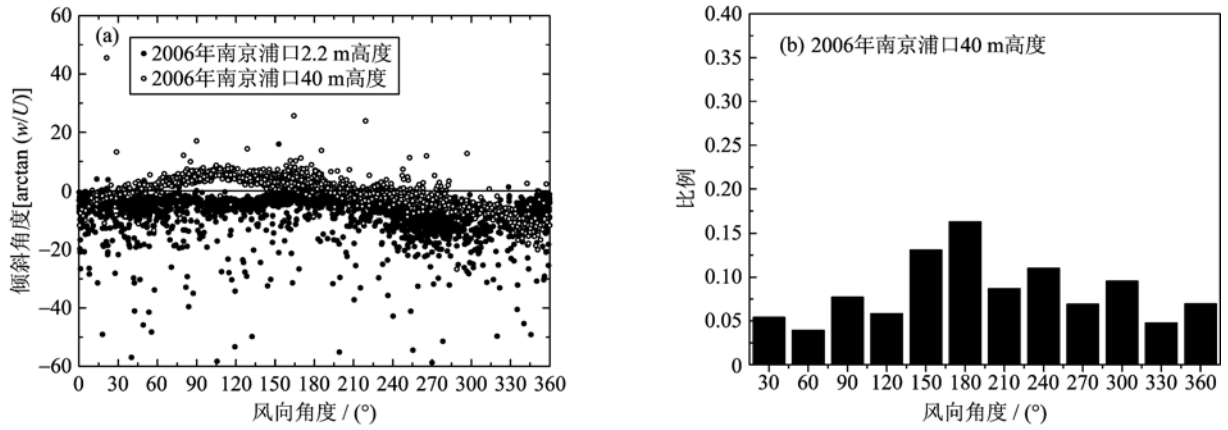


图 4 2006 年春浦口风矢量倾斜角度随风向的变化趋势及风向的分布特征

Fig. 4 The ratio of vertical (w) to horizontal wind speed (u) for tilt angle in Nanjing Pukou (suburban Nanjing) during spring, 2006

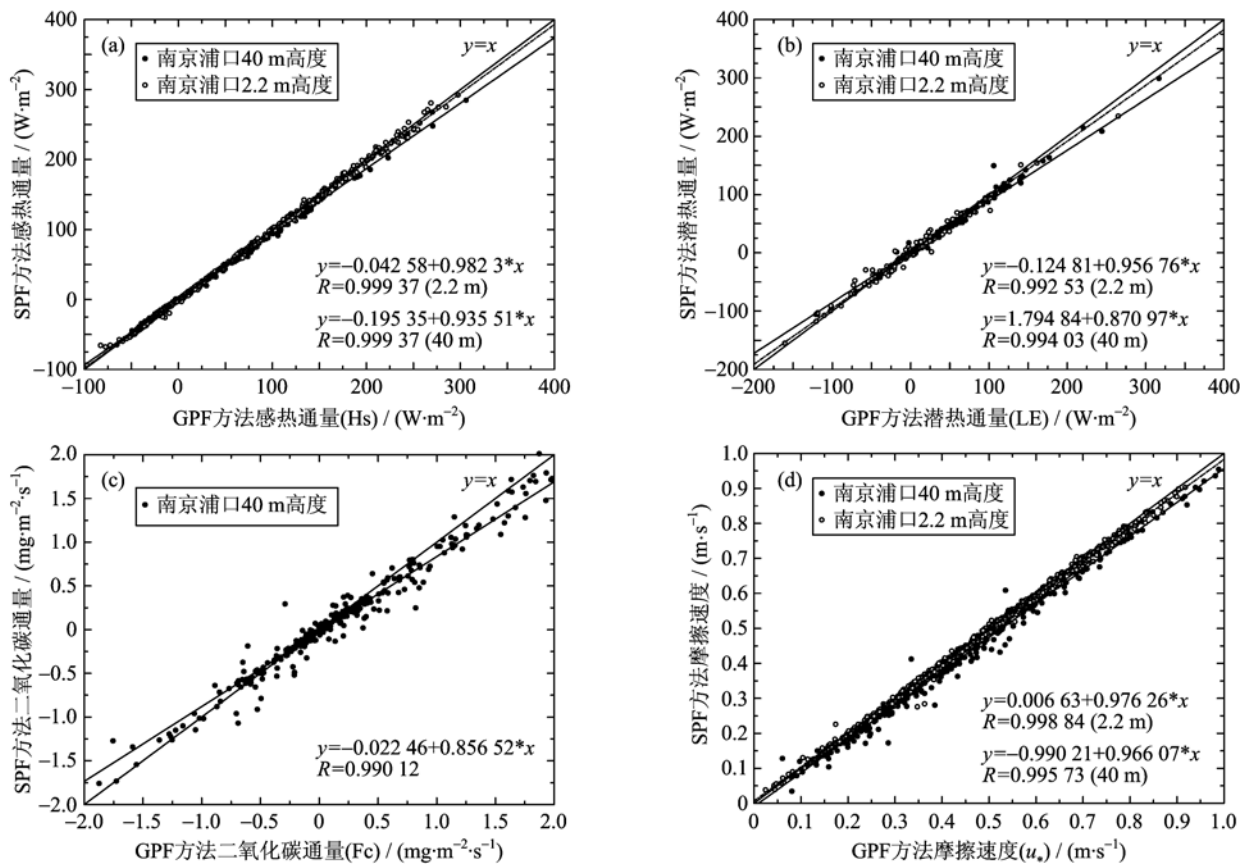


图 5 2006 年浦口 2.2 m 和 40 m 高度 GPF 和 SPF 方法得感热通量、潜热通量、二氧化碳通量和摩擦速度比较

Fig. 5 Comparison of H_s , LE , F_c and u_* by GPF and SPF at the height 2.2 m and 40 m in Nanjing Pukou, 2006

通量差别很小。

将图 5 浦口通量与图 3 党校通量相比,各通量线性相关性有显著提高。浦口地区与党校地区结果不同,此差异并不是由观测高度引起的,而是由于下垫面地形不同。党校地处市中心,高楼林立,地形复杂,若不区分角度,很难将复杂地形拟合成一个平面。反观浦口,处于市郊,地势平坦,地形简单,因而两种方法差异不大。

2.3 GPF,SPF 法修正垂直速度

选取 2005 年夏季南京市实验结果为例,将 GPF 和 SPF 法得到的垂直速度进行比较(图 6(a)),可以看出聚集在 0 附近的点非常多,即垂直速度很小,这是和现有推论相符合的:剔除地形因素,真正垂直速度 $\overline{w_R}$ 接近 0。但在下垫面复杂的城市,GPF 不区分角度拟合成一个平面,效果不佳,并未剔除受到地形强迫而产生的垂直速度 w ,这可能是图 6(a)斜率极小(即 GPF 法修正得到垂直速度远大于 SPF 法)的原因。

图 6(b)是随机抽取一日(2005-07-22 0:00~2005-07-23 0:00)PF 变换垂直速度的变化趋势,虚线是 GPF 修正,实线是 SPF 修正。7 月 22 日是一个多云天气,天气变化较小。可以看出,运用两种方法得到的速度变化趋势大体上是相对应的,SPF 方法得到的垂直速度波动略小。同时,日夜垂直速度不同,日间负值居多,夜间正值居多,可能是由于测量点处有局地对流。

为了进一步比较 SPF 和 GPF 方法,我们分别做出原始测量垂直风速、SPF 修正、GPF 修正垂直

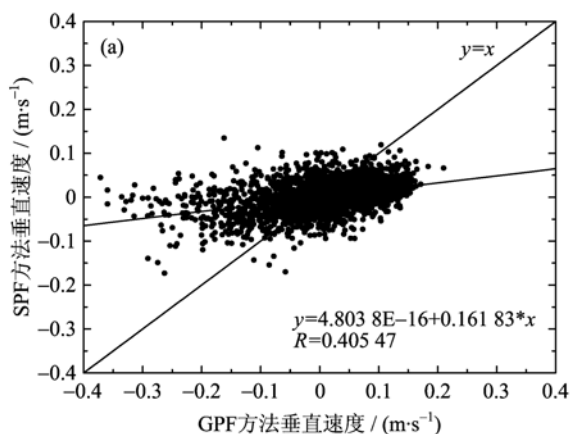
速度的概率密度分布。

图 7(a)~(d)空心点线是原始风速,“+”线是 GPF 方法结果,实心点线是 SPF 方法结果。市区图中(图 7(a),(b)),SPF 法与 GPF 法修正后的垂直速度分布较不同,SPF 法得到的 $\overline{w_R}$ 平均值非常接近零,有一个较好的正态分布,可理解为市区下垫面较复杂,因而造成两方法之间存在明显差异,SPF 方法更符合实际地形。郊区图中(图 7(c),(d)),两种方法修正后的速度分布均比较符合正态分布,郊区可以看作平坦开阔的下垫面,因此划分角度扇区意义不大,两种方法很相似。并且由以上 4 图可见,SPF 法 $\overline{w_R}$ 值域较 GPF 法窄,说明 SPF 垂直速度变化幅度不大,比较稳定。

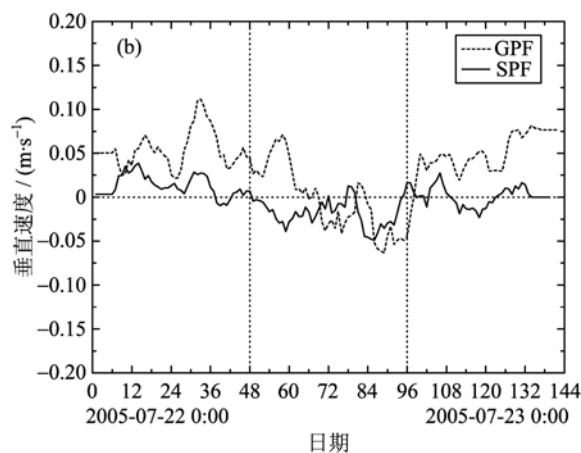
3 结论

本文运用平面拟合(PF)方法,对南京市区和郊区测量得到的涡动相关通量(包括潜热、感热通量、二氧化碳通量和摩擦速度)及垂直风速数据进行坐标旋转处理。在研究过程中,我们发现 PF 方法不考虑风向的方位,对某一地形只能拟合成单一平面,我们称之为总体平面拟合法(GPF),当地形复杂、各方向坡度不同时,这种拟合方法显得不合理。进一步,我们按风向的方位划分,每 30° 为一个区域,每个区域内均做 PF 变化,共拟合出 12 个平面,我们称其为分角度平面拟合法(SPF)。

本文采用两坐标系转换的方法,即 GPF 和 SPF 方法,分析了南京市区和郊区测量得到的通量数据,获得如下的结论:



(a) 2005年党校GPF和SPF方法得垂直速度比较图



(b) 随机抽取一日(2005-07-22 0:00~2005-07-23 0:00) PF变换垂直速度的变化趋势

图 6 2005 年党校两种方法修正垂直速度 w 比较

Fig. 6 Comparison of vertical velocity between the two method at Nanjing Municipal Party School in 2005

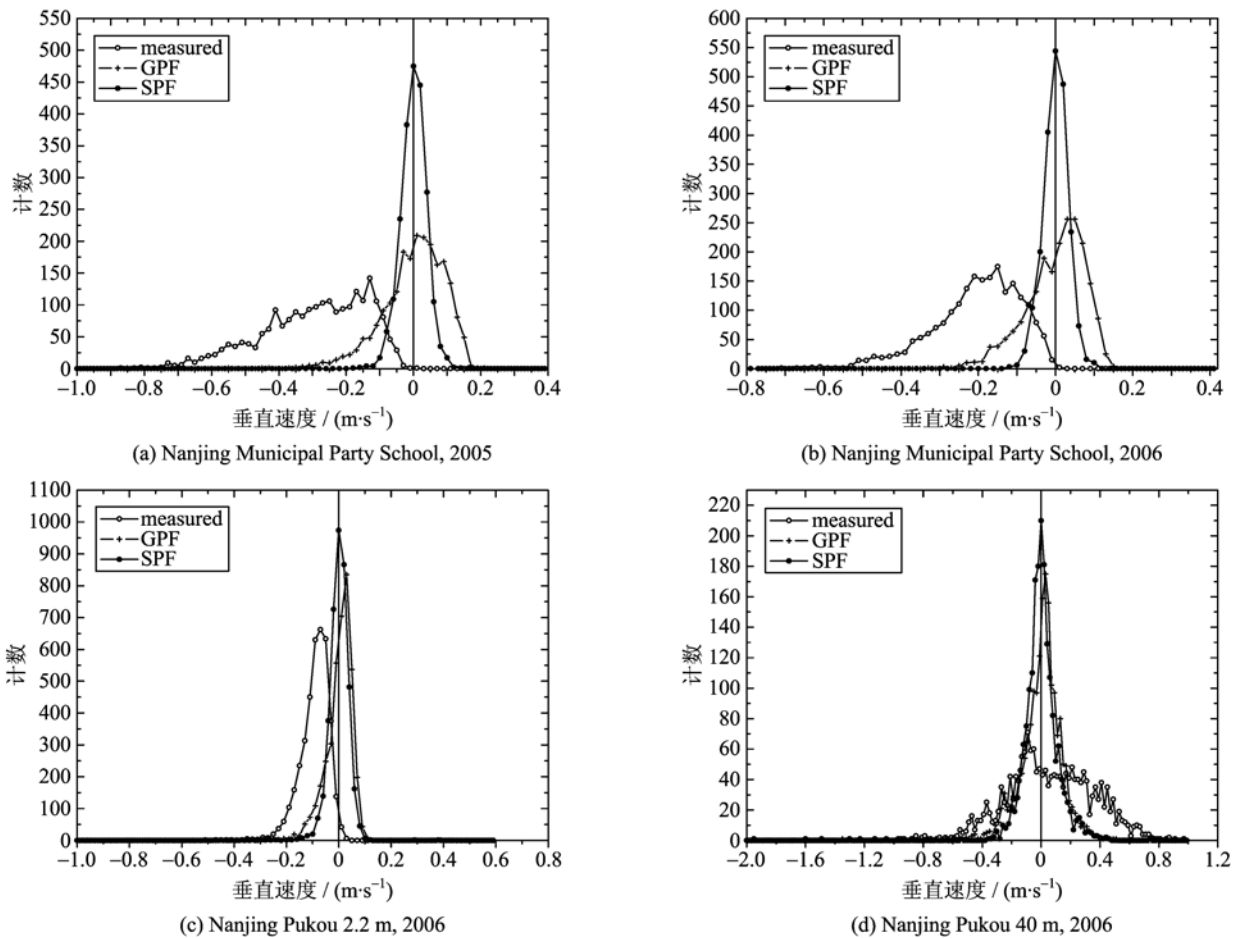


图 7 南京党校和浦口垂直速度概率密度分布图

Fig. 7 Probability distribution of vertical velocity in Nanjing Municipal Party School and Nanjing Pukou

(I) 对于市区测量的数据,两种方法计算的结果差异明显,且这种差异不随季节变化,而对于郊区数据,两种方法计算的结果一致性好。

(II) 运用 GPF,SPF 修正垂直速度 w ,两者差异十分明显,GPF 修正后的 w 大于 SPF 修正值.相比于 GPF 方法,运用 SPF 方法处理后,垂直速度更接近于正态分布。

由以上的实验结果可以看到,郊区测量的通量数据采用两种方法计算得到的结果一致性很好,说明了郊区下垫面坡度均匀,尤其对于 40 m 高度观测点能够将下垫面看作一个均匀的坡面.由此可以认为处理郊区的数据划分角度拟合意义不大.而市区高楼林立,地势复杂,是典型非均匀下垫面,GPF 与 SPF 法得到的拟合平面也有较大区别.利用 SPF 方法处理得到的垂直速度接近于正态分布,也说明了该方法更合理.由此可以认为 SPF 优于 GPF 方法.利用该两种方法计算得到通量差别大,说明城市观测的通量数据需要利用 SPF 方法进行

处理.

致谢 感谢中国科学院安徽光学与精密机械研究所吴晓庆研究员对实验数据采集、论文成文的大力支持和帮助。

参考文献 (References)

[1] Zhu Zhilin, Sun Xiaomin, Yuan Guofu, et al. Correction method for eddy-covariance flux over non-flat underlying surface and its application in ChinaFLUX[J]. Science in China, Ser D, 2004, 34(II):37-45.
朱治林,孙晓敏,袁国富,等.非平坦下垫面涡度相关通量的校正方法及其在 ChinaFLUX 中的应用[J].中国科学 D 辑,2004,34(增 II):37-45.

[2] Yu G R, Wen X F, Tanner B D. Overview of China Flux and evaluation of its eddy covariance measurement [J]. Agric For Meteorol, 2006, 137:125-137.

[3] Oncley S P, Foken T, Vogt R, et al. The energy

- balance experiment EBEX-2000: Part I: Overview and energy balance[J]. *Bound Layer Meteorol*, 2007, 123(1):1-28.
- [4] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S. Sonic anemometer tilt correction algorithms[J]. *Bound Layer Meteorol*, 2001, 99:127-150.
- [5] Leuning R, Gorsela E V, Massman W J, et al. Reflections on the surface energy imbalance problem [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 156: 65-74.
- [6] Finnigan J J, Clement R, Malhi Y, et al. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques: Part I: Averaging and coordinate rotation [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 107: 1-48.
- [7] Tanner C B, Thurtell G W. Anemometer measurements of Reynolds stress and heat transport in the atmospheric surface layer [R]. University of Wisconsin, Madison, 1969: ECOM 66-G22-F.
- [8] Kaimal J C, Finnigan J J. *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*[M]. Oxford University Press, 1994: 289.
- [9] Lee X, Massman W, Law B. *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis* [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004: 250.
- [10] Lee X. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation [J]. *Agric For Meteorol*, 1998, 91:39-49.
- [11] Finnigan J J. A comment on the paper by Lee (1998): On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation[J]. *Agric For Meteorol*, 1999, 97:55-64.
- [12] Yuan R M, Kang M, Park S B, et al. Expansion of the planar-fit method to estimate flux over complex terrain [J]. *Meteorol Atmos Phys*, 2010, 110: 123-133.
- [13] Liu Gang, Sun Jianning, Jiang Weimei, et al. Comprehensive observation research on urban atmospheric boundary layer: Description of field experiment and analysis of micrometeorological properties in the surfacelayer[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2009, 39(1):23-32.
刘罡,孙鉴泞,蒋维楣,等.城市大气边界层的综合观测研究:实验介绍与近地层微气象特征分析[J]. *中国科学技术大学学报*,2009,39(1):23-32.
- [14] Guo Yunqian, Yuan Renmin, Luo Tao, et al. Research on relationships between high-speed coherent structure and turbulence flux[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2012, 36 (4): 733-743.
郭云谦,袁仁民,罗涛,等.高风速相干结构对通量输送影响的实验研究[J]. *大气科学*,2012,36(4): 733-743.
- [15] Yu Guirui, Sun Xiaomin. *Principles of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystems*[M]. Beijing: High Education Press, 2006.
于贵瑞,孙晓敏. *陆地生态系统通量观测的原理与方法* [M].北京:高等教育出版社,2006.