刘郁珏,胡非,程雪玲,等. 2016. 北京 325 米气象塔上 CO₂ 梯度观测数据质量控制与评价 [J]. 大气科学, 40 (2): 390-400. Liu Yujue, Hu Fei, Cheng Xueling, et al. 2016. Data processing and quality assessment of the eddy covariance system of the 325-meter meteorology tower in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (2): 390-400, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.14325.

北京 325 米气象塔上 CO₂梯度观测数据 质量控制与评价

刘郁珏^{1,2} 胡非¹ 程雪玲¹ 冯永芳²

1 中国科学院大气物理研究所,北京 100029 2 北京市房山区气象局,北京 102488

摘 要 近些年涡度相关系统在城市通量研究中得到了广泛应用,因城市下垫面的特殊性和复杂性,以及系统观测原理和仪器精度存在着局限性,使得结果存在10%以上偏差,故必须对原始观测数据进行质量控制和评价。本 文对北京 325 m 气象塔七层高度上的 CO₂ (二氧化碳)、能量等通量进行了长期观测,研究了涡度相关技术在城 市环境通量观测中的适用性,设计出了一套适合于复杂城市下垫面上的涡度相关系统资料前处理和质量控制方案,并对比了不同修正方案效果。分析结果表明,城市下垫面环境中计算 CO₂通量的最优周期为 30 min;二次坐 标旋转法优于平面拟合法;频率响应修正后的感热通量提高 5.21%,潜热通量和 CO₂通量均提高 9.42%。空气密 度脉动修正 Liu 法 (Liu, 2005) 优于 WPL 法 (Webb et al., 1980);湍流谱在惯性副区满足-2/3 次方定律,协 方差谱满足-4/3 次方定律。经过这套前处理和质量控制方案,原始数据中有 79%能够用于基础研究,该质量控制与评价体系可为复杂城市下垫面通量研究提供参考。

关键词 涡度相关 质量控制 质量评价 湍流通量 文章编号 1006-9895(2016)02-0390-11 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.14325

中图分类号 P442 文献标识码 A

Data Processing and Quality Assessment of the Eddy Covariance System of the 325-m Meteorology Tower in Beijing

LIU Yujue^{1, 2}, HU Fei¹, CHENG Xueling¹, and FENG Yongfang²

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 2 Fangshan Meteorological Bureau, Beijing 102488

Abstract Advances in instrumentation, notably the eddy covariance (EC) technique, offer a tool for the direct measurement of representative flux data in urban areas. The complexity of the urban underlying surface and limitations of the EC system cause the obtained surface fluxes to not be true values. If no correction is applied, the error will be greater than 10%. The applicability of the EC technique, quality assessment of the EC system, and processing of its data, in urban Beijing, were analyzed using the CO₂ flux data and energy measured at seven levels of the 325-m meteorology tower in the city. Analysis of the data from the tower showed that the best time period to calculate the CO₂ flux for the urban underlying surface is 30 minutes. The secondary coordinate rotation method is superior to plane fitting. After frequency response correction, the sensible heat flux increased by 5.21%, and the latent heat flux and CO₂ flux were

收稿日期 2014-11-22; 网络预出版日期 2015-04-27

作者简介 刘郁珏, 女, 1988 年出生, 博士, 主要从事大气边界层物理研究。E-mail: lyjsa@163.com

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项——应对气候变化的碳收支认证及相关问题 XDA05040301

Founded by Strategic Priority Research Program—Climate Change: Carbon Budget and Related Issues of the Chinese Academy of Sciences (Grant XDA05040301)

increased by 9.42%. Liu's method (Liu, 2005) was found to be better than the Webb E K, Pearman G I, and Leuning R's (WPL) method (Webb et al., 1980) in the air density pulse correction step. The turbulent spectral checks of the data quality evaluation were satisfactory. After rigorous data screening, the final result showed that approximately 79% of the flux data were good.

Keywords Eddy covariance system, Quality control, Quality assessment, Turbulent flux

1 引言

国际环境发展研究所相关研究表明,城市化和 气候变化是全球面临的最重要的两个问题 (Hoornweg et al., 2011), 认识城市碳通量的排放 情况对评估未来温室气体浓度变化和帮助减轻气 候效应具有重要意义。涡度相关法(EC法)作为 可以直接测量湍流通量的方法,已广泛应用于生态 系统 CO₂ (二氧化碳)、能量通量观测中,但在城 市通量观测中的应用还为数不多。不同于森林、草 地、农田等均一生态系统下垫面,城市下垫面具有 其特殊的复杂性,导致通量源、汇分布不均,使得 直接测量和定量描述变得非常困难。近些年,众多 学者在城市密集区展开了通量观测实验(Grimmond et al., 2002; Vogt et al., 2005; Coutts et al., 2007; Matese et al., 2009; Crawford et al., 2011)。这些 实验主要集中在发达国家,而在发展中国家开展的 城市通量观测实验非常稀少(Burri et al., 2009; Song and Wang, 2012; Liu et al., 2012; 刘郁珏等, 2014)。

城市湍流通量研究起步虽然较晚,但发展却非 常迅速。2012年,为满足中国科学院战略先导科技 专项"应对气候变化的碳收支认证及相关问题" 课题,于北京325m气象塔上新架设了七层涡度通 量观测系统,并开展了观测时长达5年的观测实验, 该实验是目前国际上少有的位于发展中国家超大 城市群内的全天候、多梯度观测实验。北京 325 m 气象塔观测设备架设在七层不同高度上,其观测值 不仅受到城市观测的环境及气象条件的影响, 也受 观测点周围的"足迹"即源区分布情况的影响(刘 郁珏, 2014), 所以必须对涡度相关系统的观测结 果进行质量控制。这不仅要考虑仪器、传感器的测 量误差,还需要考虑涡度相关方法建立的理论假设 的满足程度(Grimmond et al., 2002), 故不同的处 理方法会带来分析结果 10%或更大的差异(王介 民, 2007; 王咏薇等, 2013)。Velasco et al. (2005) 建议城市 CO2 观测系统传感器位于惯性副层, 以避 免其结构对流场的改变带来的附加通量贡献。 Kotthaus and Grimmond(2012)利用微尺度技术将

微尺度(10~100 m)排放源从局地尺度(100~10000 m)中辨别出来,但目前并没有一套完备通用的资料处理控制方案。刘树华等(2005a,2005b,2005c)利用 EBEX-2000(International Energy Balance Experiment,2000)的湍流观测资料,计算了不同稳定度条件下的湍流宏观量特征、湍流能量和热量耗散率以及湍流结构参数特征,并与其他湍流实验得到的结果进行了比较。宋涛等(2014)设计了不同城市环境的热通量数据处理方案,对城市适用性进行了初步探讨。以上研究为本文进行七层涡度相关系统CO2通量观测资料的前处理和质量控制方案设计奠定了基础。

2 研究区域简介及观测实验概况

2.1 区域简介

中国科学院大气物理研究所气象塔建成于 1979 年 8 月,气象塔位于(39°58′N,116°22′E), 海拔高度 49 m,塔高 325 m,塔上设有 15 层观测 平台,并装有风速仪、风向仪和温度仪。为减小塔 体阻挡气流对测风仪造成的影响,分别在西北和东 南两个盛行风向各装一台测风仪。其主要功能为首 都空气污染以及大气边界层、大气湍流扩散等提供 研究服务。目前气象塔半径 2 km 内地势平坦,地 表覆盖以建筑为主,塔的北面和南面为密集居民 区,覆盖率为0.65;其次为植被和道路。距离气象 塔西部约0.3 km处为小型公园,由树木、草坪和河 流组成。塔的东面为京藏高速,塔的北面为北辰路, 每天有大量车辆行驶,覆盖率分别为0.21、0.14 (Miao et al., 2012),图略。

2.2 实验概况

为满足中国科学院战略先导科技专项"应对 气候变化的碳收支认证及相关问题"课题(简称碳 专项)中"碳卫星验证系统与综合观测"的第一子 课题"高塔验证系统和综合观测"(简称高塔验 证)的需要,2012年于气象塔上新架设了七层涡动 通量观测系统(分别位于8、16、47、80、140、220 和280 m处),如图1所示。系统主要由开路快速 响应红外水汽一二氧化碳分析仪(Infrared Gas



图 1 七层涡度通量观测系统示意图

Fig. 1 The EC (Eddy Covariance) system of the 325-m meteorology tower in Beijing

Analyzer, IRGA; Model Li-7500, Li-Cor Inc, USA)、 三维超声风速仪 (Wind Master, Gill, USA)和数 据采集器 (Model CR5000, Campbell, USA)组成。 仪器设定的基本参数如表 1 所示,表 1 中u、v、w为三维方向的风速, T_s 为气温, p 为气压, ρ_v 为水 汽密度, ρ_c 为二氧化碳密度。2011 年 8 月底,碳专 项高塔验证课题确定了观测方案,完成了观测仪器 申请及招标工作。2012 年 7 月 1 日,七层数据已经 正式完备。本文中所使用的数据均来自该观测系统 2012 年 12 月 1 日至 2014 年 2 月 14 日间各高度层 的观测数据。

表1 仪器参数表

 Table 1
 Parameter table of instruments

| | | 三维超 | 声风速仪 | 红外水汽一二氧化碳分析仪 | | | |
|-----|--------------------|--------------------|-------------------|--------------|-------|--------------------|--------------------|
| | и | v | w | T_s | р | $ ho_v$ | $ ho_c$ |
| 单位 | ${\rm m~s}^{-1}$ | ${\rm m~s}^{-1}$ | m s ⁻¹ | °C | hPa | mg m ⁻³ | mg m ⁻³ |
| 频率 | 10 Hz | 10 Hz | 10 Hz | 10 Hz | 10 Hz | 10 Hz | 10 Hz |
| 精确度 | 1 | 1 | 0.5 | 0.025°C | | 0.0047 | 0.027 |
| | $\rm mm \; s^{-1}$ | $\rm mm \; s^{-1}$ | $mm \; s^{-1}$ | | | mg m^{-3} | mg m^{-3} |

3 数据质量控制与评价方案设计

3.1 方案设计

对观测点的通量数据进行质量控制与评价是获得可信的地一气交换 CO2 通量的必要步骤,也是后续分析过程的前提。然而对近地层通量数据进行评价存在困难,目前还没有通用的处理方案,且不

同数据处理软件采用的修正方法也略有不同,需研 究者根据自身需求、实验数据的特点进行反复的校 正和评价分析,从而得到最适合的校正方案。本方 案的处理步骤如图2所示。

3.2 辅助软件选择

目前国际上已有一些较为实用的涡度相关仪 器数据的质量控制软件(徐自为,2008),如爱丁 堡大学的 EdiRe (Eddy Reprocessing)软件、德国 拜罗伊特 TK2/TK3 (Turbulence Knight 2/3)、荷兰 瓦赫宁根大学的 ECPACK 软件、Campbell 的自带 处理软件等。其中 EdiRe 功能相对更加丰富,适 合科研人员灵活组合运用,本文推荐使用这款免 费处理软件来处理地表微气象通量数据,其相关 教程及帮助文件参见(http://www.geos.ed.ac.uk/abs/ research/micromet/ EdiRe [2014-11-10])。

4 数据质量控制

4.1 确定平均周期

城市碳通量的计算方法与自然生态系统相似, CO₂通量(F_c)均通过计算垂直风速脉动 w'(单位: m s⁻¹)和 CO₂浓度脉动 c'(单位: μ mol m⁻³)乘积 在平均周期内的平均值得到,如式(1)所示:

$$F_{c} = \frac{1}{T} \rho_{c} \int_{0}^{T} w'(t) c'(t) dt .$$
 (1)

基于涡度相关技术观测地气间的 CO₂、H₂O 通 量,需要考虑通量变化特征和微气象相关原则来确 定适宜的数据平均周期,其原则是尽可能包含各种 频率的湍流成分(脉动量),数据越长所包含的采 样周期内的长周期脉动量越多,但数据平均长度太 长则会削弱通量明显的小时变化及日变化等时间 尺度上的特征,因此平均周期的选取需考虑城市下 垫面特征、人为活动、植被光合作用等对 CO₂通量 影响的时空特征。

在计算通量值之前,首先需分析低频成分对北 京城市观测结果的影响,这里用到 Ogive 函数 (Foken and Wichura, 1996),它是一个协谱从高频 至低频的累积积分函数,标量协谱定义为: *F_A、F_B*, 分别为同时观测的标量 *A* 和 *B* 的离散傅里叶变化, 其中 *F_A*= *F_A*r+*F_A*i, *F_B*= *F_B*r+*F_B*i, 下标 r、i 代表离 散傅氏变化实部、虚部。协谱表示为 *Co*=*F_A*r*F_B*r+ *F_A*i*F_B*i。Ogive 函数表示如下:

$$Og(f) = \int_{f_{\rm high}}^{f_{\rm low}} Co_{wc}(t) \mathrm{d}f , \qquad (2)$$

式中 w 为垂直风速, c 为某一标量, f_{low} 为可分辨 的最低频率 ($2T^{-1}$, T 为所选时间序列长度), f_{high} 为尼奎斯特 (Nyquist) 频率,大小为采样频率一半, $Co_{wc}(t)$ 为垂直风速 w 和标量 c 密度的协谱。Ogive 函数的曲线由高频向低频方向呈现渐进的形式,在 某一低频频率时则逐渐收敛为一定值,该频率即为 计算通量时所需要的平均时间。

图 3a 为 2013 年 7 月 1 日 06:00~18:00 (协调 世界时,下同),47 m 高度处每 2 h 平均周期后的 CO₂通量的 Ogive 函数曲线图,图 3b 为 2013 年 7 月 1 日 10:00~12:00,七层高度处 2 h 平均周期的 Ogive 函数曲线图。纵向实线从左至右,分别对应 于 15 min、30 min、60 min、120 min。从图中不难 发现,无论是同一层不同时段还是不同高度同一时 段,CO2通量每 120 min 连续采样的 Ogive 区间在 15 min 处,部分时间段通量的函数已经收敛,余部 分仍有上升趋势;而在 30 min 的平均周期则基本己 经全部收 敛,变化幅度很小。15 min 到 120 min 的平均周期都是可以接受的,基本能获取全部的低 频信息,没有明显的低频信号缺失,这也证明了理 论条件下计算的经验平均时间 30 min 对于城市下 垫面也是适用的。







Fig. 3 Ogive function of CO₂ flux based on a 2-h average cycle: (a) 0600–1800 UTC 1 July 2013, at 47 m; (b) 1000–1200 UTC I July 2013, at 7 levels. The black lines from left to right represent periods 15 min, 30 min, 60 min and 120 min, respectively



图 4 两种坐标旋转修正后 (a) 摩擦速度、(b) CO₂ 通量、(c) 感热通量和 (d) 潜热通量比较图 Fig. 4 Comparison of (a) friction velocity, (b) CO₂ flux, (c) sensible heat flux, and (d) latent heat flux after DR (Double coordinate Rotation) and PF (Plane Fitting) coordinate rotation corrections

4.2 资料前处理

4.2.1 野点剔除

原始的 10 Hz 采样数据为观测得到的直接数据,其中涡动相关观测系统除了观测到有效信息 外,也包含了噪声信号,因此必须对原始数据进行 整理,对噪声信号进行剔除。使用的方法如下:(1) 利用方差分析原理采用4倍标准差为闭值(徐自为, 2008),对湍流数据进行检验并剔除噪声;(2)利 用观测站点平均场资料,对降水前后一小时及降水 期间的数据进行剔除,剔除由雪、尘粒等环境因子 对传感器声光程的干扰、瞬间断电等因素造成的尖 点假峰值,并利用超声风速仪 Gill 和二氧化碳水汽 分析仪 Licor7500 的状态异常标志 diag≠0, 剔除电 子电路、电缆电源不稳定原因造成的连续假峰值;

(3)由于冬季寒冷容易造成仪器结冰,仪器结冰 后会直接影响观测效果。Li-7500 仪器观测光路被 若被冰晶所阻挡,仪器探测值失真,使得光路分析 数据值 AGC (Automatic Gain Control)明显偏大。 故可用 AGC 值来检验仪器是否存在结冰,当AGC 值大于 90 时可认为仪器结冰严重。

4.2.2 坐标旋转

在湍流观测过程中,实际观测条件绝不是理想的。地形倾斜或起伏、仪器不是绝对水平固定等问题 会直接对垂直风速观测产生影响。尤其在城市这种极 为复杂的下垫面上,绝对水平很难保证,目前常用的 方法有二次坐标旋转法 DR (Double coordinate Rotation)和平面拟合法 PF (Plane Fitting) (Finnigan, 2004),具体的操作可以使用 EdiRe 程序进行编辑计 算。为了比较这两种方法在城市下垫面的适用性,取 七层高度上,每个月的1日与15日2天的半小时平 均值(摩擦风速、CO2通量、感热通量与潜热通量) 进行两种方法的修正,修正结果如图4所示。

通过二次旋转修正的数据相对于平面拟合修 正后略小,两种修正方法对感热通量的修正最为接 近,差异不足 2%;而潜热通量差异最大,平面拟 合后比二次旋转后减小 4%;摩擦速度和 CO₂ 通量 的修正差异介于二者之间。

图 5 给出了不同风向上,两种方法修正后的湍 流统计量相关性随风向变化规律。其相关系数随风 向变化趋势较为一致,相关系数达到 0.97。在 0~ 120°和 210°~360°的风向范围内相关系数最高,主 要由于该风向上,风向与地形变换较为一致;另一 方面该风向上的数据较多,能够保证平面拟合顺利 进行。在 120°~180°风向范围里两种方法的修正结 果差异较大,相关性降低到 0.96,对能量通量修正 差异可达 1.4 W m⁻²。究其原因认为差异主要来自于 平面拟合修正对平均风向选择的理论基础。气象塔 北面由于受到高层楼房的影响,很少有西南气流, 故该风向内的数据较少,导致平面拟合方法出现偏 差。在城市下垫面对通量值进行修正,若数据较少 应避免进行平面拟合修正。如需精确分析数据,需 将两种方法结合使用。

4.2.3 频率响应修正

即便排除人为和环境造成的损失, 超声风速仪

和 CO₂/H₂O 分析仪本身之间有一个间距 d, 使仪器 只能测到涡旋尺度大于 2d 的湍涡, 在低风速下高 频出现严重衰减。进行频率损失修正常常可使不同 通量分别增加 5%到 30%左右, 夜间修正会更加明 显。修正公式参照姜明等 (2011)。

表 2 给出不同大气稳定度下通量修正损失率, 其中 Uw 为风速 u 分量和 w 分量的协方差,Wt 为 风速 w 分量和温度 t 的协方差、Wc 为风速 w 分量 和二氧化碳浓度的协方差。整体数据感热通量的损 失率大约为 5.21%,潜热通量和 CO₂通量的损失率 为 9.42%。该通量损失百分比与王介民等(2007) 关于黑河地区的研究结果类似。白天的通量损失要 明显小于夜间,即大气不稳定条件下的损失率要小 于大气稳定条件下。这是由于白天湍流发展旺盛, 响应尺度较大,对于涡动相关观测系统则更容易获 取湍流信号;夜间则多属于大气稳定层结,稳定条 件下湍流发展缓慢且物质垂直扩散缓慢,不易捕捉 湍流高频信号。

表 2 不同大气稳定度条件下通量损失率和修正系数表 Table 2 Comparison of flux loss and correction coefficient under different atmospheric stabilities

| | 感热通 | CO ₂ 通量、潜 | Uw 修正 | Wt 修正 | Wc 修正 |
|-------|--|---|---|---|---|
| | 量损失 | 热通量损失 | 系数 | 系数 | 系数 |
| 8 m | 5.21% | 9.32% | 1.06% | 1.04% | 1.09% |
| 16 m | 5.17% | 9.27% | 1.05% | 1.04% | 1.08% |
| 47 m | 5.06% | 9.11% | 1.03% | 1.02% | 1.05% |
| 80 m | 5.06% | 9.06% | 1.03% | 1.02% | 1.05% |
| 140 m | 5.01% | 9.10% | 1.02% | 1.02% | 1.05% |
| 200 m | 4.97% | 8.99% | 1.02% | 1.02% | 1.05% |
| 280 m | 5.04% | 9.02% | 1.03% | 1.02% | 1.06% |
| 8 m | 9.42% | 16.16% | 9.20% | 1.07% | 1.16% |
| 16 m | 9.37% | 16.09% | 1.12% | 1.07% | 1.15% |
| 47 m | 9.20% | 15.22% | 1.11% | 1.06% | 1.12% |
| 80 m | 9.17% | 15.17% | 1.07% | 1.07% | 1.13% |
| 140 m | 9.14% | 15.11% | 1.07% | 1.06% | 1.11% |
| 200 m | 9.07% | 15.07% | 1.05% | 1.05% | 1.10% |
| 280 m | 9.10% | 15.08% | 1.05% | 1.04% | 1.09% |
| 8 m | 3.14% | 5.95% | 1.03% | 1.03% | 1.06% |
| 16 m | 3.10% | 5.91% | 1.02% | 1.03% | 1.05% |
| 47 m | 3.02% | 6.10% | 1.01% | 1.00% | 1.02% |
| 80 m | 3.04% | 6.05% | 1.01% | 1.00% | 1.01% |
| 140 m | 2.98% | 6.14% | 1.00% | 1.00% | 1.02% |
| 200 m | 2.95% | 6.00% | 1.01% | 1.01% | 1.03% |
| 280 m | 3.04% | 6.04% | 1.02% | 1.01% | 1.05% |
| | 8 m 16 m 47 m 80 m 140 m 200 m 8 m 16 m 47 m 80 m 140 m 200 m 280 m 16 m 47 m 80 m 140 m 200 m 280 m | 感熱通 量损失 8 m 5.21% 16 m 5.17% 47 m 5.06% 80 m 5.01% 200 m 4.97% 280 m 5.04% 8 m 9.42% 16 m 9.37% 47 m 9.20% 80 m 9.14% 200 m 9.17% 140 m 9.14% 200 m 9.07% 280 m 3.14% 16 m 3.10% 8 m 3.14% 16 m 3.02% 80 m 3.04% 140 m 2.98% 200 m 2.95% 280 m 3.04% | 感熱通 CO2通量、潜 量损失 熱通量损失 8 m 5.21% 9.32% 16 m 5.17% 9.27% 47 m 5.06% 9.11% 80 m 5.06% 9.06% 140 m 5.01% 9.10% 200 m 4.97% 8.99% 280 m 5.04% 9.02% 8 m 9.42% 16.16% 16 m 9.37% 16.09% 47 m 9.20% 15.22% 80 m 9.17% 15.17% 140 m 9.14% 15.11% 200 m 9.07% 15.07% 280 m 9.10% 15.08% 8 m 3.14% 5.95% 16 m 3.10% 5.91% 47 m 3.02% 6.10% 80 m 3.04% 6.05% 140 m 2.98% 6.14% 200 m 2.95% 6.00% 280 m 3.04% 6.04% | 感热通 CO2通量、潜 Uw 修正 量损失 量损失 熱通量损失 系数 8 m 5.21% 9.32% 1.06% 16 m 5.17% 9.27% 1.05% 47 m 5.06% 9.11% 1.03% 80 m 5.06% 9.06% 1.03% 140 m 5.01% 9.10% 1.02% 200 m 4.97% 8.99% 1.02% 280 m 5.04% 9.02% 1.03% 8 m 9.42% 16.16% 9.20% 16 m 9.37% 16.09% 1.12% 47 m 9.20% 15.22% 1.11% 80 m 9.17% 15.17% 1.07% 140 m 9.14% 15.11% 1.07% 200 m 9.07% 15.07% 1.05% 280 m 9.10% 15.08% 1.05% 8 m 3.14% 5.95% 1.03% 16 m 3.02% 6.10% 1.01% 47 m 3.02% 6.10% 1.01% <th>感热通 CO_2通量、潜 Uw 修正 Wt 修正 量损失 熱通量损失 系数 系数 8 m 5.21% 9.32% 1.06% 1.04% 16 m 5.17% 9.27% 1.05% 1.04% 47 m 5.06% 9.11% 1.03% 1.02% 80 m 5.06% 9.06% 1.03% 1.02% 140 m 5.01% 9.10% 1.02% 1.02% 200 m 4.97% 8.99% 1.02% 1.02% 200 m 5.04% 9.02% 1.03% 1.02% 280 m 5.04% 9.02% 1.03% 1.02% 8 m 9.42% 16.16% 9.20% 1.07% 16 m 9.37% 16.09% 1.12% 1.07% 47 m 9.20% 15.22% 1.11% 1.06% 200 m 9.17% 15.07% 1.05% 1.05% 280 m 9.10% 15.08% 1.05% 1.04%</th> | 感热通 CO_2 通量、潜 Uw 修正 Wt 修正 量损失 熱通量损失 系数 系数 8 m 5.21% 9.32% 1.06% 1.04% 16 m 5.17% 9.27% 1.05% 1.04% 47 m 5.06% 9.11% 1.03% 1.02% 80 m 5.06% 9.06% 1.03% 1.02% 140 m 5.01% 9.10% 1.02% 1.02% 200 m 4.97% 8.99% 1.02% 1.02% 200 m 5.04% 9.02% 1.03% 1.02% 280 m 5.04% 9.02% 1.03% 1.02% 8 m 9.42% 16.16% 9.20% 1.07% 16 m 9.37% 16.09% 1.12% 1.07% 47 m 9.20% 15.22% 1.11% 1.06% 200 m 9.17% 15.07% 1.05% 1.05% 280 m 9.10% 15.08% 1.05% 1.04% |

选取的数据来自47m处,每月1日和15日的 全天半小时平均通量来分析通量损失与平均风速 和大气稳定度。在图6中,可以看到在不稳定层结 下,即*z/L*<0时,通量损失率随风速的增大而增大, 损失率与风速呈线性关系;稳定层结下,即 *z*/*L*≥0 时,通量损失率与 *z*/*L* 呈现出二阶关系。具体的拟合公式如下:

$$F_{\text{Loss}} = \begin{cases} 0.39u + 2.52 & z/L < 0\\ -0.79(z/L)^2 + 14.39 z/L + 2.76 & z/L \ge 0 \end{cases}$$
(3)

其中, F_{Loss} 为通量损失率, u 为水平风速, z 为观 测高度, L 为莫宁—奥布霍夫长度。拟合函数曲线 的相关系数 t 检验能够满足置信区间 90%, 证明该 曲线能够较好的表达环境变量与频率损失的关系, 可为用来简易估算北京城市下垫面上的通量频率 损失,为其他研究提供科学参考。

4.2.3 空气密度脉动修正

空气密度脉动修正是为了修正由于空气膨胀、压 缩等物理过程而导致测量的通量值增大的假象,最常 用的有 Liu 法 (Liu, 2005)和 WPL 法 (Webb et al., 1980)。为了比对这两种方法对城市下垫面上的适 用性,将七层高度上 2012 年 12 月至 2013 年 12 月 的 CO₂ 通量值分别用两种方法进行修正,图 7 为 7 月和 12 月的修正结果。

图 7 中可以看出, 经 WPL 法和 Liu 法修正后, CO2通量分别减小 27%和 20%, WPL 法的修正量更 大,通量减小得更多。通量修正较大主要集中在白 天,夜间修正量不大。其中峰值和谷值的部分修正 幅度更大,尤其在对应的交通早、晚高峰时段和白 天正午前后波谷时段。图7中,第一高峰峰值修正 前为 27.12 mg m⁻² s⁻¹, 经过 WPL 法和 Liu 法修正 后明显减小, WPL 法的修正幅度要大于 Liu 的修正 幅度,最大幅度为 4.29 mg m⁻² s⁻¹ 和 5.17 mg m⁻² s⁻¹。夜间经过修正后,碳通量的输出也有所减小, WPL 法的修正量仍然要比 Liu 方法大, 白天和夜间 修正前平均 CO2 通量值分别比修正后的大 1.2 倍及 1.05 倍。因 WPL 方法不考虑水汽的作用, 而北京 城市环境下的水汽含量不可忽略,故 WPL 修正方 法偏大,不完全适用。Liu 法从理论上对于水汽的 估计是比较准确的,故 Liu 的方法更适合用于北京 城市下垫面通量修正。

5 湍流数据分析与评价

5.1 功率谱和协方差谱检验

中等大小的涡度既没有粘滞效应,也没有湍流 动能的生成。这些涡由惯性从较大尺度的涡中获得 能量,又以同样的方式传递给较小的涡,能量向谱 下游传递的串级率通常是-2/3 (Stull, 1988; 胡非, 1995)。协谱作为频率的函数能够反映两个变量与 其各自的谱强的位相关系,因此协谱可以用来检测 涡度相关观测中与频率有关的一些可以导致系统 观测误差的变化 (Velasco et al., 2005)。确定不同观 测量的观测谱在惯性副区的斜率对于判断涡度相 关仪器的响应能力是非常重要的。图 8 为 47 m 处 $(z_m=z-d=6.88 \text{ m}; z=47 \text{ m}, d=40.12 \text{ m}) 2013 年$ 7 月 1 日 12:00~12:30 经过前处理的数据。其中,图 8a 中的纵坐标为水汽浓度与二氧化碳浓度的功率谱与二氧化碳浓度的比值,图 8b 中的纵坐标为垂直风速w与二氧化碳浓度的协方差谱与二氧化碳浓度的比值;两个图的横坐标同时采用归一化频率 $<math>f(z_m/u)$ 。







从图 8 中左图可以看出,在高频区[f(z_m / u)>2] 处,CO₂浓度和 H₂O 浓度功率谱、T 的协谱均有相 同的模态。在相同的频率范围内,功率谱变化模态 符合惯性副区-2/3 斜率理论值。图 8 中右图可以 看出,在涡度测量系统中,无论是超声风速仪还是 CO₂分析仪,T 和 CO₂浓度都与垂直风速 w 的协谱 表现出一致性,这样的相似性说明涡度相关测量设 备没有系统性的相移和失真。

5.2 湍流稳定性检验

湍流稳态检验(Stationarity Test)是测试大气 湍流特征变化的重要方法,它是指湍流统计量不随 时间而发生变化,在观测过程中的非稳态情况会影 响湍流观测质量。通过对平均时段内数据进行分 割,比较整体时间段内的通量与分割段内通量单独 计算后的平均值的差异的方法(Foken and Wichura, 1996; Al-Jiboori et al., 2005)。

举例说明:对于一个垂直风速为 w 和某变量 x 的协方差时间序列(30 min),则数据长度为 N= 18000(10 Hz);将这 18000个数据分割成 4 到 8 个间断(通常取 5 min 为间隔,6个间断);在每个 小时间短时间段内,协方差表示为

$$\overline{x'y'} = \frac{1}{M-1} \left[\sum_{k=1}^{M} x_{ik} y_{ik} - \frac{1}{M} \left(\sum_{k=1}^{M} x_{ik} \right) \left(\sum_{k=1}^{M} y_{ik} \right) \right],$$
(4)

再对6个平均时段内的协方差进行算术平均计算, 计算公式为

$$\overline{x'y'}_{ave} = \frac{1}{N/M} \left[\sum_{i=1}^{N:M} \overline{x'_iy'_i} \right],$$
 (5)



图 6 (a) 不稳定层结下通量损失随风速变化; (b) 稳定层结下通量损失随大气稳定度变化

Fig. 6 (a) Flux loss rate vs wind speed under unstable stratification; (b) flux loss rate vs atmospheric stabilities under stable stratification



图 7 修正后 CO₂通量日变化曲线: (a) 12 月; (b) 7 月 Fig. 7 Revised CO₂ flux diurnal variation curves: (a) December, (b) July



图 8 (a) CO₂、H₂O 浓度功率谱图; (b) 垂直风速 w 和 CO₂浓度、温度 T 归一化协谱图。横坐标同时采用归一化频率 $f(z_m / u)$ Fig. 8 (a) Power spectrum of CO₂, H₂O concentrations; (b) normalized spectra association of vertical wind speed w, CO₂ concentration, and temperature T. x-axis: $f(z_m / u)$ denotes normalized frequency

表 3 稳态检验值(IST)分类表 Table 3 Classification of the value of stationarity test (IST)

| | | | | | | | • • • • | | |
|-----|-------|---------|---------|---------|----------|-----------|-----------|------------|--------|
| 质量级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| IST | 0~15% | 16%~30% | 31%~50% | 51%~75% | 76%~100% | 101%~250% | 251%~500% | 501%~1000% | >1000% |

$$\overline{x'y'}_{\text{full}} = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{j=1}^{M} x_j y_j - \frac{1}{N} \left(\sum_{j=1}^{M} x_j \right) \left(\sum_{j=1}^{M} y_j \right) \right],$$
(6)

稳态检验值(IST)计算式为

$$\Delta \text{IST} = \left| \frac{\overline{x'y'}_{\text{ave}} - \overline{x'y'}_{\text{full}}}{\overline{x'y'}_{\text{full}}} \right| \cdot 100\%, \quad (7)$$

其中,测试的变量通常为垂直速度 w 和 CO₂(或

H₂O)密度。当计算出来的稳态测试比值小于 30% 认为湍流通量处于稳态条件。Foken et al.(2004) 根据 IST 进行了分类,将湍流稳态测试划分为 9 级标准,并规定第 1 级数据质量最好,第 9 级数据质量 最差。在这里规定,1~3 级数据为较好数据;4~6 级为中等质量数据;7~9 级数据为质量较差数据,详见表 3。

利用上述方法对北京 2012 年至 2013 年的 CO2

浓度数据进行稳态检验,并按表3对数据进行质量 等级标志。图9给出1~9级各级数据量的分布情况, 其中1~3级数据占总量的86%,4~6级数据占数据 总量的16%,7~9级数据占数据总量的3%。可以 看出数据大部分质量较好,能满足稳态检验的要求。

5.3 湍流发展性检验

湍流的发展性检验(总体湍流特征指数 ITC, Integrated Turbulence Characteristics)又称为湍流积 分统计特性检验,其物理意义是探讨衡量湍流的发 展情况。该检验以近地层湍流方差相似性理论为基 础,通过计算湍流方差相似性来判断大气湍流是否 能够符合近地层 Monin-Obukhov 相似理论,从而判 断湍流发展情况。但由于缺少 CO₂ 方差相似性的函 数,因为在方差相似性检验中主要还是针对风速分 量 *u* 和 *w*,其普适函数表达为

$$\frac{\sigma_x}{X_*} = \varphi_x(\frac{z}{L}), \qquad (8)$$

式中, x 可以是三维风速分量 u、v、w 或温度 T 或 其他标量; σ_x 则为选取的 x 量的标准差(可以是 σ_u 、 σ_v 、 σ_w 和 σ_T 或其他标量的标准差) X_* 为标量的



相似性参数,一般选取摩擦速度 u^{*}; z 为观测高度; L 为莫宁—奥布霍夫长度, ϕ_x 为拟合参数。利用涡 度相关观测值计算的与相似理论提供的模型值进 行对比,就可以计算湍流数据特性积分测试结果, 称为 ITC 值,计算公式为



同样参考 Foken 提出的划分标准(Foken et al., 2004), 1 表示最高质量数据, 9 表示需要剔除的数据, 如表 4 所示。

进行湍流发展特性检验后,各质量等级的统计 图如图 10,部分数据集中在前 3 等级,第 1 等级的 数据量占整体数据的 78%,质量差的数据较少,不





Fig. 9 The steady-state test

图 9 稳态检验统计图





Fig. 10 The turbulence integral test

| 表 4 湍流积分检验(ITC)分类表 | | | | | | | | | | | |
|--|-------|---------|---------|---------|----------|-----------|-----------|------------|--------|--|--|
| Table 4 Classification of the value of integrated turbulence characteristics (ITC) | | | | | | | | | | | |
| 质量级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | |
| ITC | 0~15% | 16%~30% | 31%~50% | 51%~75% | 76%~100% | 101%~250% | 251%~500% | 501%~1000% | >1000% | | |
| | | | | | | | | | | | |

| (| l'able 5 C | omprehe | ensive qua | lity grac | le of tur | bulence d | ata |
|---|------------|---------|------------|-----------|-----------|-----------|-----|
| | | | | | | | |

| | | | | | 质量等级 | | | | |
|---------|-----|------------|------------|------------|------|----|----|----|---|
| | | 好 | | | 中 | | | 差 | |
| 湍流平稳性等级 | 1 | 2 | $1 \sim 2$ | 3~4 | 1~4 | 5 | <6 | <8 | 9 |
| 湍流发展型等级 | 1~2 | $1 \sim 2$ | 3~4 | $1 \sim 2$ | 3~5 | <5 | <6 | <6 | 9 |
| 综合等级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |

Table 6 Quality evaluation results

| | 不同高度评价结果 | | | | | | | | | |
|-------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|--|
| | 8 m | 16 m | 47 m | 80 m | 140 m | 200 m | 280 m | 全部高度 | | |
| 1~3 级 | 78.235 | 77.023 | 77.253 | 77.352 | 75.526 | 82.049 | 83.105 | 78.631 | | |
| 4~6 级 | 16.436 | 17.947 | 16.935 | 16.343 | 18.945 | 13.983 | 13.732 | 16.302 | | |
| 7~9 级 | 5.329 | 5.03 | 5.812 | 6.305 | 5.529 | 3.968 | 3.163 | 5.067 | | |

超过 1%。这表明大部分数量能够符合湍流的方差 相似性规律,质量较为理想。值得注意的是 9 级的 高级标志位代表的质量数据极度不好,需要剔除的 数据也存在着不可忽略的一小部分,大多数异常数 据都集中在这级别中,异常数据能够利用分级标志 位来解释,但也并不代表这一级别的所有数据都是 异常数据。

5.4 综合等级评定

总体质量评价(QE)是结合湍流平稳性和发展 性检验对湍流通量资料做出的质量分级标志, Foken et al. (1996)建议的质量评价标准,如表 5。 本文研究数据的质量评价结果显示,可用于长期观 测资料处理研究的数据占总数据的 79%左右(表 6)。

6 结论

本文主要北京 325 m 气象塔 2012 年 12 月至 2013 年 12 月 7 层湍流数据进行前期处理,使用处 理后得数据进行通量计算,并对计算结果进行修 正。在此过程中比对了不同的处理方案和修正方 案。所得结论如下:

(1)利用累计次数 Ogive 函数对数据平均时间 进行了分析,结果表明采用 30 min 作为 10 Hz 高频 数据的平均周期,可以捕获绝大部分的低频信号;

(2)分别使用二次旋转和平面拟合的方法,对 观测点非常复杂的城市下垫面的地形状况进行了 校正。结果表明,二次旋转结果较好,而平面拟合 方法因对某段时间内的风向进行平均计算导致对 地形反应较差。对湍流数据进行频率响应修正,修 正后整体数据的感热通量提高 5.21%,潜热通量和 CO₂通量均提高 9.42%;应用 WPL 法及 Liu 法对通 量进行修正, Liu 法更适合北京城市地区;

(3)从数据质量的整体来看,呈现高层优于低层、白天好于夜间、夏季好于冬季的变化特点;通过数据评价方案的选取,选择了稳态性检验和发展性检验测试,分析结果表明总数据中有79%的数据为良好,前处理对数据质量的提高有帮助。

参考文献(References)

- Al-Jiboori M H, Fei H. 2005. Surface roughness around a 325-m meteorological tower and its effect on urban turbulence [J]. Adv. Atmos. Sci., 22 (4): 595–605, doi:10.1007/BF02918491.
- Burri S, Fre C, Parlow E, et al. 2009. CO₂ fluxes and concentrations over an urban surface in CAIRO/EGYPT [C]// The Seventh International Conference on Urban Climate. Yokohama.
- Coutts A M, Beringer J, Tapper N J. 2007. Characteristics influencing the variability of urban CO₂ fluxes in Melbourne, Australia [J]. Atmos. Environ., 41 (1): 51–62, doi:10.1016/j.atmosenv.2006.08.030.
- Crawford B, Grimmond C S B, Christen A. 2011. Five years of carbon dioxide fluxes measurements in a highly vegetated suburban area [J]. Atmos. Environ., 45 (4): 896–905, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.11.017.
- Grimmond C S B, King T S, Cropley F D, et al. 2002. Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: Methodological challenges and results from Chicago [J]. Environ. Pollut., 116 (S1): S243–S254, doi:10.1016/S0269-7491(01)00256-1.

- Finnigan J J. 2004. A re-evaluation of long term-flux measurement techniques part II : Coordinate systems [J]. Boundary-Layer Meteorology, 113 (1): 1–41, doi:10.1023/B:BOUN.0000037348.64252.45.
- Foken T, Wichura B.1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements [J]. Agric. Forest Meteor., 78 (1–2): 83–105.
- Foken T, Leclerc M Y. 2004. Methods and limitations in validation of footprint models [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 127 (3): 223–234.
- Hoornweg D, Sugar L, Gómez C L T. 2011. Cities and greenhouse gas emissions: Moving forward [J]. Environment and Urbanization, 23 (1): 207–227, doi:10.1177/0956247810392270.
- 胡非. 1995. 湍流、间歇性与大气边界层 [M]. 北京: 科学出版社, 288 pp. Hu Fei. 1995. The Intermittent Turbulence and Atmospheric Boundary Layer (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 288pp.
- 姜明,景元书,郭建侠,等. 2011. 三维超声风速仪观测中风向角计算方法 [J]. 气象科技, 39 (5): 615–619. Jiang Ming, Jing Yuanshu, Guo Jianxia, et al. 2011. Method for calculating wind direction in measurement using 3D sonic anemometer [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 39 (5): 615–619, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2011.05.014.
- Kotthaus A, Grimmond C S B. 2012. Identification of micro-scale anthropogenic CO₂, heat and moisture sources-processing eddy covariance fluxes for a dense urban environment [J]. Atmos. Environ., 57: 301–316, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.04.024.
- Liu H P. 2005. An alternative approach for CO₂ flux correction caused by heat and water vapor transfer [J]. Boundary-Layer Meteorology, 115: 151–168.
- Liu H Z, Feng J W, Järvi J, et al. 2012. Four-year (2006–2009) eddy covariance measurements of CO₂ flux over an urban area in Beijing [J]. Atmos. Chem. Phys., 12 (17): 7881–7892, doi:10.5194/acp-12-7881-2012.
- 刘树华, 李洁, 刘和平, 等. 2005a. 在 EBEX-2000 实验资料中的湍流宏 观量特征 [J]. 大气科学, 29 (4): 503-509. Liu Shuhua, Li Jie, Liu Heping, et al. 2005a. Characteristics of macroturbulence variables in EBEX-2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (4): 503-509, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.04.01.
- 刘树华, 刘和平, 李洁, 等. 2005b. 在 EBEX-2000 实验资料中湍流耗散 率、长度尺度和结构参数特征 [J]. 大气科学, 29 (3): 475-481. Liu Shuhua, Liu Heping, Li Jie, et al. 2005b. Characteristics of turbulence dissipation rates, characteristic length scales, and structure parameters in EBEX-2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (3): 475-481, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.03.15.
- 刘树华, 李洁, 刘和平, 等. 2005c. 在 EBEX-2000 实验资料中湍流谱和 局地各向同性特征 [J]. 大气科学, 29 (2): 213–224. Liu Shuhua, Liu Heping, Li Jie, et al. 2005c. Characteristics of turbulence spectra and local isotropy in EBEX-2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (2): 213–224, doi:10.3878/j.issn.1006-9895. 2005.02.06.

- 刘郁珏, 胡非, 程雪玲, 等. 2014. 北京城市通量足迹及源区分布特征分析 [J]. 大气科学, 38 (6): 1044–1054. Liu Yujue, Hu Fei, Cheng Xueling, et al. Distribution of the source area and footprint of Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (6): 1044–1054, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13237.
- Matese A, Gioli B, Vaccari F P, et al. 2009. Carbon dioxide emissions of the city center of Firenze, Italy: Measurement, evaluation, and source partitioning [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 48 (9): 1940–1947, doi:10.1175/2009JAMC1945.1.
- Miao S G, Dou J X, Chen F, et al. 2012. Analysis of observations on the urban surface energy balance in Beijing [J]. Science China Earth Sciences, 55 (11): 1881–1890, doi:10.1007/s11430-012-4411-6.
- Song T, Wang Y S. 2012. Carbon dioxide fluxes from an urban area in Beijing [J]. Atmos. Res., 106: 139–149, doi:10.1016/j.atmosres.2011. 12.001.
- 宋涛,修天阳,孙杨,等. 2014. 城市复杂环境下涡度相关通量观测的适 用性分析 [J]. 环境科学学报, 35 (5): 1089–1098. Song Tao, Xiu Tianyang, Sun Yang, et al. 2014. Applicability of eddy covariance technique to the measurement of turbulent fluxes in complex urban context [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 34 (5): 1089–1098, doi:10.13671/j.hjkxxb.2014.0173.
- Stull R B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Netherlands: Springer, 401–405.
- Velasco E, Pressley S, Allwine E, et al. 2005. Measurements of CO₂ fluxes from the Mexico city urban landscape [J]. Atmos. Environ., 39 (38): 7433–7446, doi:10.1016/j.atmosenv.2005.08.038.
- Vogt R, Christen A, Rotach M W, et al. 2006. Temporal dynamics of CO₂ fluxes and profiles over a central European city [J]. Theoret. Appl. Climatol., 84 (1–3): 117–126, doi:10.1007/s00704-005-0149-9.
- 王介民, 王维真, 奥银焕, 等. 2007. 复杂条件下湍流通量的观测与分析 [J]. 地球科学进展, 22 (8): 791–797. Wang Jiemin, Wang Weizhen, Ao Yinhuan, et al. 2007. Turbulence flux measurements under complicated conditions [J]. Adv. Earth Sci. (in Chinese), 22 (8): 791–797, doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2007.08.004.
- 王咏薇, 王雪倩, 胡楠, 等. 2013. 城市地表湍流观测数据的后处理及质 量控制 [J]. 气象科学, 33 (2): 153–159. Wang Yongwei, Wang Xueqian, Hu Nan, et al. 2013. The post-processing and quality control of the urban boundary layer turbulence observation [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 33 (2): 153–159, doi:10.3969/2012jms.0116.
- 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. Roy. Meteor. Soc., 106 (447): 85–100, doi:10.1002/qj.49710644707.
- 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]. Adv. Earth Sci. (in Chinese), 23 (4): 357–370, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2008.04.0357.