

文章编号: 1001-8166(2008)04-0357-14

涡动相关仪观测数据的处理与质量评价研究*

徐自为¹, 刘绍民^{1*}, 官丽娟¹, 王介民², 李小文¹

(1. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 涡动相关仪能够较准确地直接测量地表—大气间的湍流交换, 在世界范围内得到了广泛的应用。但它的使用是有条件限制的, 如果不进行必要的修正, 得到的通量就可能有一定的误差。以密云观测站一年的涡动相关仪观测数据为例进行分析。结果表明: 野点值剔除、坐标旋转以及超声温度订正对地表感热、潜热等通量的测量结果影响均在 $\pm 1\%$ 之内, 但坐标旋转对动量通量影响较大, 必须对潜热和 CO_2 通量进行空气密度效应订正; 湍流谱在惯性副区基本满足 $-2/3$ 次方定律, 协谱基本满足 $-4/3$ 次方定律。经过对观测数据的筛选和处理后, 约 75% 的观测数据质量较好, 2% 的数据需要剔除。通量贡献源区分析表明, 全天和白天均有超过 70% 的通量源区落在感兴趣区域内, 超过 90% 的通量贡献最大点落在感兴趣区域内。

关键词: 涡动相关仪; 湍流通量; 质量控制; 质量评价

中图分类号: P414 **文献标志码:** A

1 引言

地表与大气间 CO_2 、水汽以及能量的输送与转化过程受到人们的日益关注。20 世纪 90 年代中期开始建立全球通量观测站网络 (FLUXNET), 至 2007 年 3 月底, FLUXNET 在全球已有 467 个站点^[1], 其数目还在不断增加。在通量观测网内, 目前测量 CO_2 、感热和潜热通量的主要方法为涡动相关方法。此方法能够较准确地直接测量到地表—大气间的湍流交换量, 并且在长时间连续观测中最小限度地减少环境及生态系统的干扰^[2]。涡动相关仪最初应用在较理想的条件下, 如水平均匀地表, 气象条件适宜等, 其所获得的湍流通量数据是比较值得信赖的^[3]。然而现实中的地表常由各种斑块地物组成, 地形也有起伏, 经常不能满足涡动相关仪测量的理论要求。针对这种复杂条件下涡动相关仪观

测数据的质量与代表性问题, 几个著名杂志 (如 *Boundary-Layer Meteorology*、*Agricultural and Forest Meteorology* 和 *Global Change Biology* 等) 一直有重要研究成果发表。总之, 应用涡动相关仪数据时, 有必要做一些校正^[4-6], 并对数据进行质量评价^[7]。

国外有关涡动相关仪观测数据的处理方法研究较为深入, FLUXNET 中 2 个主要的通量观测网, 如美国通量网 (AmeriFlux) 和欧洲通量网 (EuroFlux) 都已经形成一些指导性文件。同时, FLUXNET 强调各通量站建立数据质量保证计划, 并多次举行有关数据质量保证与质量控制的专题研讨会, 在一些实验的基础上发表了多篇针对湍流数据质量控制与评价的文章^[8-11]。此外, 根据 FLUXNET 的相关建议, 目前已经有一些较为适用的涡动相关仪数据的处理软件, 如英国爱丁堡大学发展的 EdiRe (Eddy Re-processing)、德国拜罗伊特大学发展的 TK2 (Turbu-

* 收稿日期: 2008-02-25; 修回日期: 2008-04-01。

* 基金项目: 国家高技术研究发展计划课题“非均匀下垫面条件下区域蒸散量遥感监测与验证的关键技术研究”(编号: 2007AA12Z175); 公益性行业(气象)科研专项“大尺度水热通量观测系统的研制与应用研究”(编号: GYHY200706046); 国家自然科学基金项目“非均匀下垫面上卫星像元尺度地表通量的研究”(编号: 40671128)资助。

作者简介: 徐自为(1981-), 男, 吉林梨树人, 博士生, 主要从事地表通量观测数据的处理方法研究。E-mail: x_ziwei@yahoo.com

* 通讯作者: 刘绍民(1967-), 男, 浙江绍兴人, 教授, 主要从事地表通量的遥感监测与地面验证研究。E-mail: smliu@bnu.edu.cn

lence Knight2)、荷兰瓦赫宁根大学发展的 ECPACK 等。这些处理涡动相关仪数据的软件包可以免费下载,但都存在各自的优势与不足:TK2 和 ECPACK 包含了涡动相关仪数据修正的一般步骤,但均是简单的可执行软件,不能由使用者添加或定义一些处理步骤。Edire 的功能相对较强,可选性较多,使用者还可以自定义一些功能,但操作较复杂。这些处理软件在一些大型的试验以及通量观测站均得到了较好的应用^[10~12]。

国内对涡动相关方法的研究从 20 世纪 80 年代开始^[13]。近年来应用涡动相关仪开展通量观测的站点越来越多,迄今已有 200 多套在使用^[1]。2002 年 ChinaFlux 通量网络的建立极大地推动了我国在这一领域的研究工作,包括大批论文的发表^[14~17]和大量资料的积累。但是在应用涡动相关仪的不少台站中,并没有对原始湍流数据进行再分析,而是直接使用仪器生产商(Campbell 公司)提供的处理软件输出结果做通量分析,这在一些简单条件下也许无妨碍,但在下垫面和气象条件较复杂的情况下,就可能会出问题^[1]。

涡动相关仪采集的原始数据是高频湍流数据,需经过一系列处理后得到所需通量或统计量值。表 1 简单地列出了几个主要通量观测网的涡动相关仪观测数据主要校正方法(也包括 Campbell 公司提供的程序)。

表 1 涡动相关仪观测数据的主要校正方法

Table 1 The main corrected methods of eddy covariance system observed data

校正方法	Campbell	美国	欧洲	中国
	公司的程序	通量网	通量网	通量网
野点值的剔除		✓	✓	✓
延迟时间校正	✓	✓	✓	(✓)
超声温度的侧向风校正				
趋势线去除	✓	✓	✓	✓
坐标旋转修正		✓	✓	✓
频率响应校正		✓	✓	(✓)
超声虚温转换为空气温度		✓		
WPL 修正	✓	✓	✓	✓

注:美国与欧洲通量网均包括开路与闭路涡动相关仪,并未分开说明。表中括号为中国通量网针对闭路涡动相关仪的订正。Campbell 公司的 CSAT3 在仪器的结构上已经对侧向风效应进行了修正。

本文以北京密云观测站为例,应用一系列校正方法对涡动相关仪采集的原始湍流数据进行处理,讨论处理过程中几个主要步骤对计算结果的影响,最后对观测站积累的一年数据进行了较全面的质量

评价。

2 观测仪器和方法

2.1 观测站概况

密云观测站位于北京市密云县新城子镇一个宽度约 500 ~ 1 000 m,长度约 2 420 m,西南—东北走向的山谷中。盛行风向为西南风(白天)与北风(夜间),年平均温度 10.93℃,年降水量 615 mm,观测站示意图见图 1。观测站于 2006 年 6 月初建成,8 月开始正式投入运行。观测仪器包括涡动相关仪、自动气象站以及大孔径闪烁仪(LAS)。自动气象站安装在高为 31.5 m 的铁塔上,包括两层风、温、湿(架高分别为 30.56 m 和 10.66 m)以及四分量辐射仪(向上、向下短波辐射,向上、向下长波辐射)(30.76 m)、地表辐射温度(30.76 m)、土壤热通量(埋深 2 ~ 3 cm)、多层土壤温度(0.05,0.1,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 m)、多层土壤湿度(0.05,0.1,0.2,0.4,0.6,1.0 m)、降雨量(31.46 m)以及气压(10.16 m)等观测。

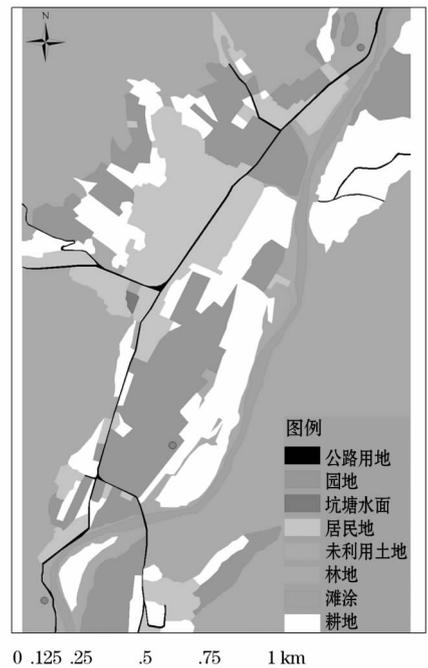


图 1 观测站示意图

Fig. 1 Map of observed station

(A 点为 LAS 接收端, B 点为 LAS 发射端, C 点为涡动相关仪与自动气象站)

(A is the receiver part of LAS, B is the transmitter part of LAS, C is the location of eddy covariance system and automatic meteorological station)

安装在铁塔上的涡动相关仪(117°19'24"E, 40°37'51"N)高度为 26.66 m,包括超声风速仪

(CSAT3, Campbell), H_2O/CO_2 红外分析仪 (LI-7500, LI-COR) 等。数据采集器为 CR5000 (Campbell), 采集频率为 10 Hz。

2.2 涡动相关仪的测量原理

涡动相关技术是通过测定有关物理量的脉动值与垂直风速脉动值的协方差来求算湍流通量, 可以表示为:

$$F = \rho \overline{w' C'} \quad (1)$$

ρ 为空气密度, w' 为三维风速的垂直分量脉动, C' 为某标量 C 的脉动。上撇号为实际值与某段时间内的平均值之差, 即物理量的瞬时脉动值, 上划线表示时间平均。

上述计算公式是建立在一系列假设基础上的, 包括^[1]

- (1) 准平稳(定常)湍流。
- (2) 水平均匀(忽略平流的影响)。
- (3) 近地层存在常通量层。
- (4) 影响通量的各种尺度的涡旋都被测量到。
- (5) 测量到的通量代表仪器所在的下垫面。

在理想条件下, 涡动相关仪所获得的湍流通量数据比较值得信赖的, 然而现实中常常不能满足上述假设条件, 因此如果不进行必要的修正, 获取的通量就会带有较大的偏差。

2.3 观测数据的筛选、处理与质量评价方法

密云观测站建成以来已经积累了一年多的数据。本文选用 2006 年 8 月至 2007 年 7 月一年的涡动相关仪观测数据, 从原始数据出发进行通量观测数据的质量控制与评价分析。计算过程中剔除了降水时次及降水前后一小时数据, 剔除了原始 30 min 记录不完整(缺测大于 3%)的时次。

2.3.1 数据的处理方法

采用英国爱丁堡大学发展的 EdiRe 软件对涡动相关仪的数据进行后处理, 包括野点值的剔除、延迟时间的校正、超声虚温转化为空气温度^[18]、坐标旋转处理^[7]、空气密度效应的修正(即 WPL 修正^[6]), 最后计算得到感热与潜热通量。本文所用仪器为开路涡动相关仪, 采样频率 10 Hz。由功率谱和协谱的分析表明, 系统的频率响应能力能够满足湍流通量测定需求, 故没有进行频率响应校正。

2.3.2 数据的质量评价方法

涡动相关仪观测数据的质量评价方法包括: 近地层湍流谱特征分析、湍流平稳性检验、湍流发展的充分性检验以及通量观测的空间代表性分析等。

湍流谱特征的分析即风速、温度、湿度与二氧化

碳的功率谱及协谱分析, 可以确定涡动相关仪对高频湍流信号的响应能力, 并作为湍流数据质量评价的一个标准。功率谱及协谱可以表示如下^[19]。

$$nS(n)/u_*^2 = \alpha \phi_\varepsilon^{2/3} (\zeta) f^{-2/3} \quad (2)$$

$$\frac{nCo_{wc}(n)}{w'c'} = \alpha_{wc} G_{wc}(\zeta) f^{-4/3} \quad (3)$$

式中, n 为自然频率, $S(n)$ 为谱密度, $Co_{wc}(n)$ 为协谱密度, u_* 为摩擦速度, f 为无因次频率, ϕ_ε 为湍流动能无因次耗散率, G_{wc} 为稳定度的函数, ζ 为稳定度因子, α 为常数, α_{wc} 为常数。

湍流的平稳性检验是要求一个观测时次内湍流主要统计量保持稳定, 即满足一个观测时次内全时段方差(协方差)的均值与每个分时段方差(协方差)和的均值大致相等。如将 30 分钟平均协方差与同一时段 6 个 5 分钟协方差和的平均值比较, 可用平稳系数(Δst)来表示:

$$\Delta st = \left| \frac{(w'c')_5 - (w'c')_{30}}{(w'c')_{30}} \right| \times 100\% \quad (4)$$

如果 Δst 比值小于 30%, 可认为大气湍流处于平稳性状态^[20]。

湍流发展的充分性检验是测量的垂直风速方差和摩擦风速的比值与根据莫宁—奥布霍夫相似理论模拟值的符合程度检验, 可用总体湍流特征系数(ITC)来表示:

$$ITC = \left| \frac{(\sigma_w/u_*)_{model} - (\sigma_w/u_*)_{measurement}}{(\sigma_w/u_*)_{model}} \right| \quad (5)$$

式中, σ_w 是垂直风速的方差。

如果 ITC 小于 30%, 可认为大气湍流发展充分^[20]。

本文选用 Kaimal 等^[21]建立的关于垂直风速方差和摩擦速度比值的经验关系式:

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = \begin{cases} 1.25(1 + 3|\zeta|)^{1/3} & -2 \leq \zeta < 0 \\ 1.25(1 + 0.2|\zeta|) & 0 \leq \zeta < 1 \end{cases} \quad (6)$$

Foken 等^[7,20]对湍流的平稳性检验及湍流发展的充分性检验有详细的说明, 并根据不同的处理结果对数据质量进行了等级划分。

通量观测的空间代表性指空间某一点的测量值能在多大程度上反映下垫面的平均或累计状况, 而对观测点的通量产生影响的区域称为通量贡献的源区(source area), 可用足迹(footprint)函数来定量地分析。足迹函数可表示为^[22, 23]:

$$F = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \frac{\xi^\mu}{X^{1+\mu}} e^{-\xi/X} \quad (7)$$

式中, F 是侧向积分的通量足迹函数, Γ 为 Gamma 方程, μ 为常数, X 是空间坐标, ξ 为通量长度尺度。

通量贡献源区的分析可用于对观测数据进行质量评价, 确定观测到的通量是否来源于所感兴趣的研究区域。

3 结果分析

3.1 风场分析

将观测站风向分为 16 个方位(数据为 2006 年 8 月至 2007 年 7 月, 如图 2a)。从图 2a 中看到: 风

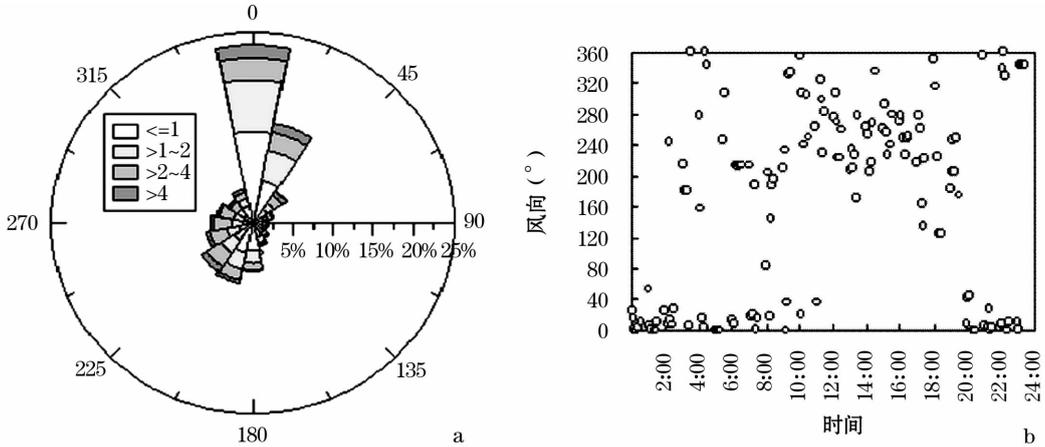


图 2 风速、风向分布

Fig. 2 Distribution of wind direction and wind speed

(a 为风速、风向分布, b 为风向的日变化)

(a is distribution of wind direction and wind speed, b is daily change of wind direction)

量值进行比较, 并采用均方差 (RMSD) 和平均绝对百分比误差 (MAPD) 两种指标对处理效果进行评价, 具体公式如下:

$$RMSD = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2 \right]^{0.5},$$

$$MAPD = 100/n \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{O}$$

(P 为计算值, O 为真实值)

3.2.1 野点值剔除检验

涡动相关仪的结构比较复杂, 容易受到内部电路、电源的不稳定与外部空气中的水滴、尘粒等以及人为操作不当等原因的影响, 引发异常超大信号(即野点)的出现。野点是以间断的单个数据点或连续多个数据点形式存在的, 单个野点在检测及处理中较容易。目前野点值的剔除并没有统一标准, 一般采取方差检验的方法^[24], 其中窗口大小的选择不同作者略有不同。方差的倍数取值在 3~6 之间, 如 Vickers^[24] 和郭建侠^[25] 分别采用 3.5 及 4 倍方差

向分布呈现南(西南)—北(东北)方向分布, 即沿着山谷方向。风向以北风向为主(24%), 风速一般都在 4 m/s 以下, 平均风速约 1.8 m/s。

图 2b 为典型天的风向日变化(2006 年 8 月 3 日)。从图 2b 中可知, 白天风向以西南风为主, 夜间风向以北风向为主, 风向转换时刻一般出现在早 8 点及晚 18 点。

3.2 通量观测数据的处理

以 2007 年 4 月份观测数据为例, 分析涡动相关仪观测数据的几个主要处理方法, 对处理前后的通

作为检验标准, 本文选取 4 倍方差作为检验标准。下面以 2007 年 4 月观测数据为例, 对剔除野点值前后的通量值的进行分析, 以探讨涡动相关仪原始数据中野点值对通量观测结果的影响。

从图 3 中看到: 野点值剔除前后的通量值(感热、潜热)并没有明显的变化。其中潜热通量订正前后有 2 个时次明显偏离 1:1 线, 这两点分别为 4 月 6 日 16:30, 4 月 20 日 11:30。检查这两个时次的原始数据, 发现水汽密度及 CO_2 密度均有明显异常值, 而其它数据并无明显异常。同时发现当水汽密度出现明显偏小值时, CO_2 密度则相反出现明显偏大值。

总之, 密云观测站原始数据中并无明显极值点存在, 野点值对通量观测结果的影响非常小。其中感热与潜热通量变化均在 $\pm 0.3\%$ 之内, 感热通量野订正前后 RMSD 和 MAPD 分别为 0.7 W/m^2 和 0.72% , 潜热通量订正前后 RMSD 和 MAPD 分别为 1.82 W/m^2 和 1.90% 。

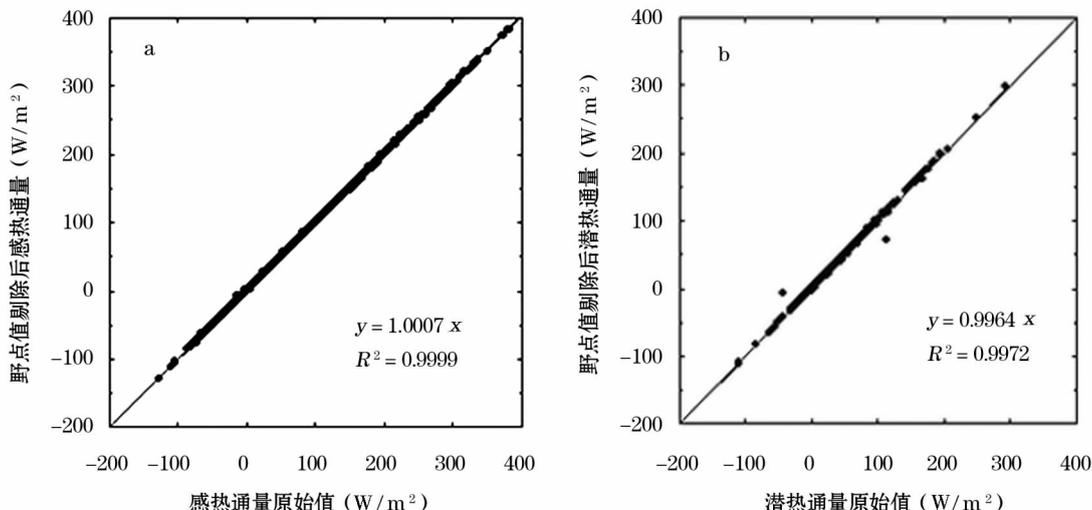


图3 野点值剔除前后的通量值比较

Fig. 3 Fluxes comparison between despiking and undespiking

3.2.2 坐标旋转处理

应用涡动相关仪测量地表通量一个重要假设是在某一段时间内平均垂直风速为零。早期的观测一般是在理想的条件下进行,这个假设是可以满足的。目前许多观测站,如密云站,条件较为复杂,有必要对原始风速数据进行坐标转换处理。

通量测量最常用的坐标系是直角坐标系,也叫做自然坐标系或流线坐标系。在这个坐标系下,x轴平行于局地平均水平风向,z轴与x轴垂直,因此平均侧向风与平均垂直风速为0。目前坐标旋转的

方法包括二次坐标旋转法(DR),三次坐标旋转法(TR)与平面拟合法(PF)等。Wilczak等^[6]指出:二次坐标旋转方法或三次坐标旋转方法存在明显的缺点,而平面拟合法有较明显的优点。本文以平面拟合法作为标准,比较3种不同坐标旋转法带来的通量值差异,并对坐标旋转前后所引起的通量值及湍流平均统计量的变化进行分析。

从图4可以看出:不同坐标旋转方法之间存在一定的差异,其中二次坐标轴旋转法与平面拟合法的结果比较一致($R^2 = 0.97$),三次坐标轴旋转法则

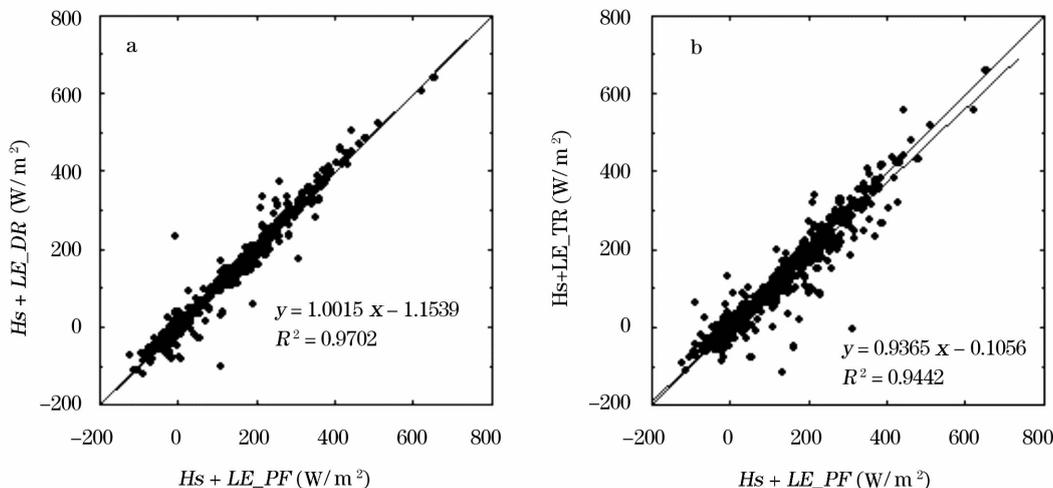


图4 不同坐标旋转方法间的差异

Fig. 4 The difference between different coordinate rotation methods

(H_s 为感热通量, LE 为潜热通量)

(H_s is the sensible heat flux, LE is the latent heat flux)

差异较大 ($R^2 = 0.94$)。Turnipseed 等^[26]指出二次坐标旋转法和三次坐标旋转法存在明显缺点,尤其在低风速下存在很大的不确定性(图 5),而平面拟合法不存在垂直风速取样周期的问题,旋转之后垂直风速不依赖于水平风速变化。所以建议在进行坐标旋转处理时优先考虑采用平面拟合方法,其次为二次坐标旋转法。

表 2 为平面拟合法处理前后感热 (H_s)、潜热 (LE) 通量、摩擦速度 (u_*) 以及湍流平均统计量 (风速标准差 $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$) 的比较。结果表明:在密云观

测站这种地形起伏较小的下垫面,坐标旋转处理前后通量值的差别很小,感热通量的 RMSD 和 MAPD 分别为 3.15 W/m^2 和 3.37% ,潜热通量的 RMSD 和 MAPD 分别为 2.71 W/m^2 和 5.46% ,处理后的感热通量大于处理前的值,而潜热通量则小于处理前的值。坐标旋转对湍流统计量 $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ 的影响较大,对 u_* 以及无量纲量 $\sigma_u/u_*, \sigma_v/u_*, \sigma_w/u_*$ 等影响最大,MAPD 都在 40% 以上,因此坐标旋转处理对这些量来说是必要的。

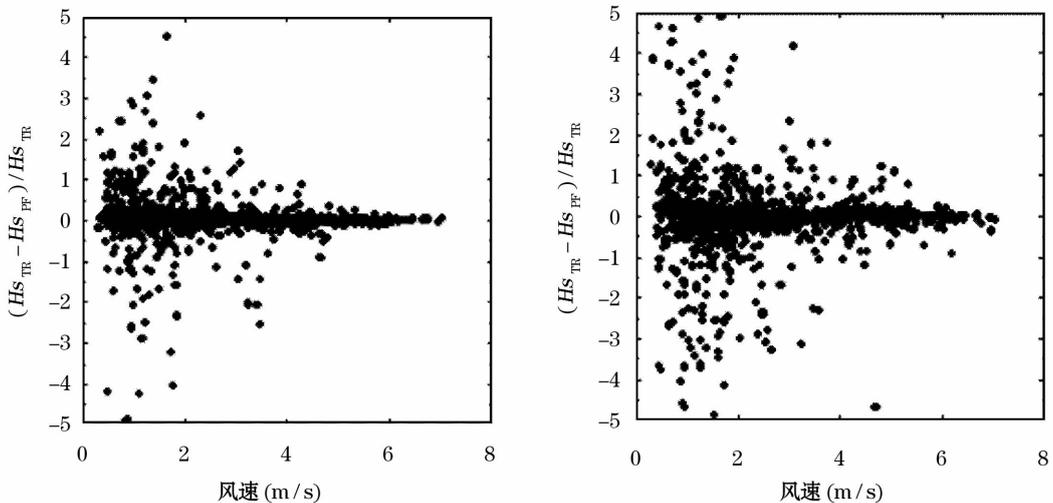


图 5 低风速下不同坐标旋转方法间差异

Fig. 5 The difference between different coordinate rotation methods under low wind speed

表 2 坐标旋转前后通量值及湍流平均统计量的比较

Table 2 Comparison of fluxes and statistic parameter before and after coordinate rotation

	H_s	LE	u_*	σ_u	σ_v	σ_w	σ_u/u_*	σ_v/u_*	σ_w/u_*
RMSD	3.15	2.71	0.13	0.25	0.26	0.004	10.22	10.44	4.90
MAPD (%)	3.37	5.46	42.97	16.18	16.61	0.53	62.97	62.94	59.67

注:RMSD 中各变量的单位: $H_s(\text{W/m}^2)$, $LE(\text{W/m}^2)$, $u_*(\text{m/s})$, $\sigma_u(\text{m/s})$, $\sigma_v(\text{m/s})$, $\sigma_w(\text{m/s})$, 而 σ_u/u_* , σ_v/u_* 及 σ_w/u_* 为无量纲量。

3.2.3 超声虚温转化为空气温度的修正

超声风速计测量温度时会受到湿度和侧向风的影响。Campbell 公司在超声风速计结构设计时已经对侧向风的影响进行了修正,这里只讨论湿度的影响。本文采用 Schotanus 等^[18]提出的公式对超声虚温进行修正:

$$\overline{w'T'} = \overline{w'T_s'} - 0.51 \overline{Tw'q'} \quad (8)$$

式中, q 为比湿, T 为空气温度, T_s 为超声虚温。

超声虚温修正前后,感热通量差异不大,RMSD 和 MAPD 分别为 0.64 W/m^2 和 0.77% (图 6),感热通量值略有增加,增幅在 0.6% 左右。总之,超声虚

温修正的影响很小。

3.2.4 空气密度效应的修正

热量或水汽通量的输送会引起微量气体的密度变化,这种变化并不代表真实的物质增加或减少,所以在测定 CO_2 和水汽密度时需要考虑这种影响。Webb 等^[5]从干空气质量守恒出发提出一种修正方法,即 WPL 修正,被广泛采用,已包含在 Campbell 公司的处理程序中(这里不做详细介绍)。Liu 等^[27]从湿空气质量守恒出发对 WPL 方法做了进一步修正(简称 Liu 修正),修正方程如下:

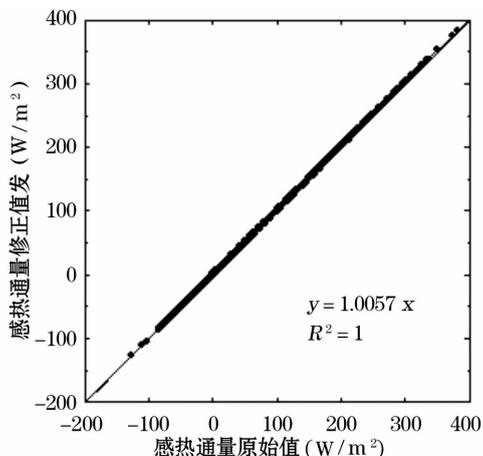


图6 超声虚温修正前后的通量值比较

Fig. 6 Fluxes comparison between before and after

$$CO_2_Liu = \overline{w'\rho_c'} + (\mu - 1) \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho}} \overline{w'\rho_v'} + (1 + \mu\sigma) \frac{\overline{\rho_a}}{\overline{\rho}} \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{T}} \overline{w'T'} \quad (9)$$

$$LE_Liu = \overline{w'\rho_v'} + (\mu - 1) \frac{\overline{\rho_v}}{\overline{\rho}} \overline{w'\rho_v'} + (1 + \mu\sigma) \frac{\overline{\rho_a}}{\overline{\rho}} \frac{\overline{\rho_v}}{\overline{T}} \overline{w'T'} \quad (10)$$

式中, CO_2_Liu , LE_Liu 分别为经过 Liu 修正后的 CO_2 通量及潜热通量, $\rho_v, \rho_a, \rho, \rho_c$ 分别为水汽、干空气、空气、 CO_2 的密度, σ 为水汽密度与干空气密度之比, μ 为空气与水汽分子的摩尔质量比。

从图 7 和 8 可以看到: WPL 修正与 Liu 修正后

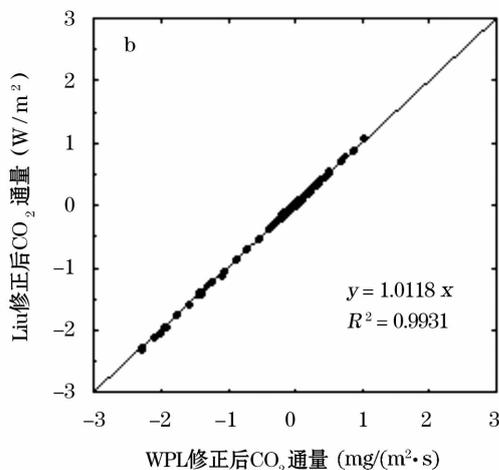
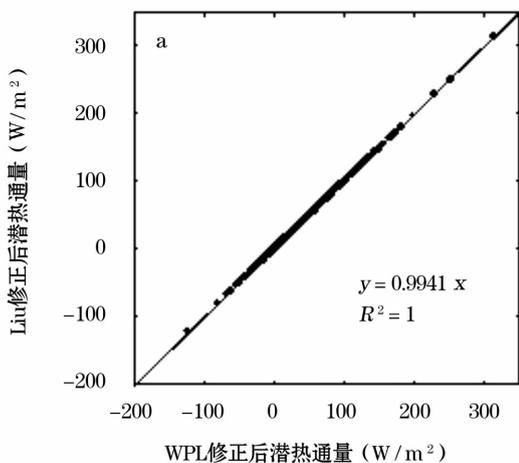


图7 WPL 修正与 Liu 修正比较

Fig. 7 Comparison between WPL correction and Liu correction

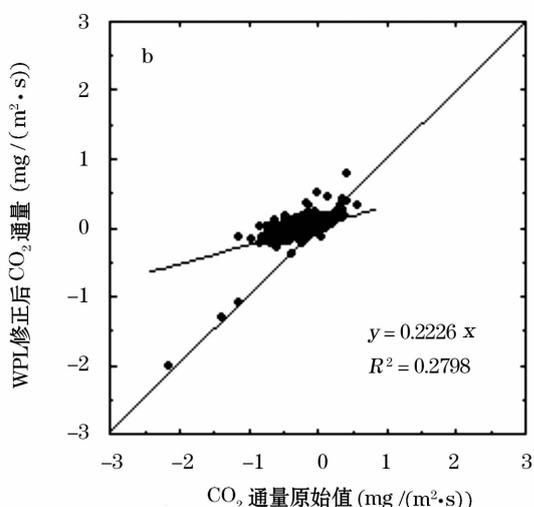
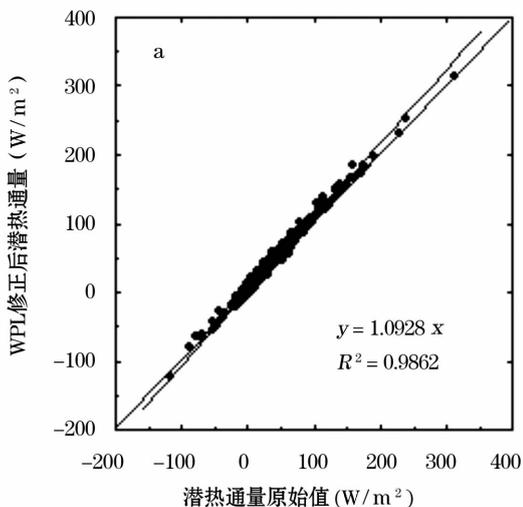


图8 WPL 修正前后的通量值比较

Fig. 8 Fluxes comparison before and after WPL correction

潜热通量值与 CO_2 通量值比较一致,其中 WPL 修正后潜热通量值要略高于 Liu 修正后的值,而 CO_2 通量值则相反,两者之间的相关系数均接近于 1。本文采用 WPL 方法对空气密度效应进行修正。修正后潜热通量值增加,增幅为 9%, CO_2 通量则明显降低,而且订正前后 CO_2 通量值的相关性较差,这是由于文中选取数据为 4 月份,正处于 CO_2 由呼出(正值)到吸收 CO_2 (负值)转换的时期, CO_2 量级较小 ($-1 \sim 1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),较小的偏差会对结果造成较大的影响。总之,空气密度效应对潜热通量和 CO_2 通量的影响均较大,尤其是 CO_2 通量。

3.3 通量观测数据的质量评价

本文以密云观测站一年的数据(2006 年 8 月至 2007 年 7 月)为例,进行通量观测数据的质量评价,包括近地层湍流谱特征分析、平稳性检验、湍流发展的充分性检验以及通量观测的空间代表性分析等。

3.3.1 近地层湍流谱特征分析

近地层大气湍流谱特征的分析能够帮助认识湍流运动的某些规律,同时湍流谱也是观测数据质量评价的一个标准。自 1941 年 Kolmogorov 提出局地

均匀各向同性湍流理论以来,对大气湍流谱结构已经有较为完善的理论,即在近地边界层内小尺度湍流是各项同性的,在惯性副区内,在对数-对数坐标条件下,功率谱遵循 $-2/3$ 定律,协谱符合 $-4/3$ 定律。本文利用快速傅立叶变换(FFT)并采用哈明窗(Hanning)滤波方法计算各脉动量湍流谱(协谱)^[28]。图中横坐标为自然频率(单位 Hz),纵坐标为功率谱密度(协谱密度)与频率的乘积。

从图 9 中看到:各变量功率谱分布特征基本相似,低频区有明显的峰值,高频区有较清楚的惯性副区,基本符合 $-2/3$ 规律。垂直速度谱峰值频率约为 0.01 Hz,主导涡旋垂直尺度约为 227 m(平均风速取 2.27 m/s)。湿度谱和温度谱峰值频率相当,湿度谱要略大于温度谱,符合 7 月份湍流输送特点。图 10 中垂直风速与各变量的协谱在惯性副区的斜率要小于 $-4/3$ 规律,更接近 -1 ,这与 Blanken 等^[29]及温学发等^[17]的结果一致。由于密云站地处山谷中,而且下垫面是非均匀的,因此各变量功率谱及协谱的分布并不完全等同于理想条件下的。

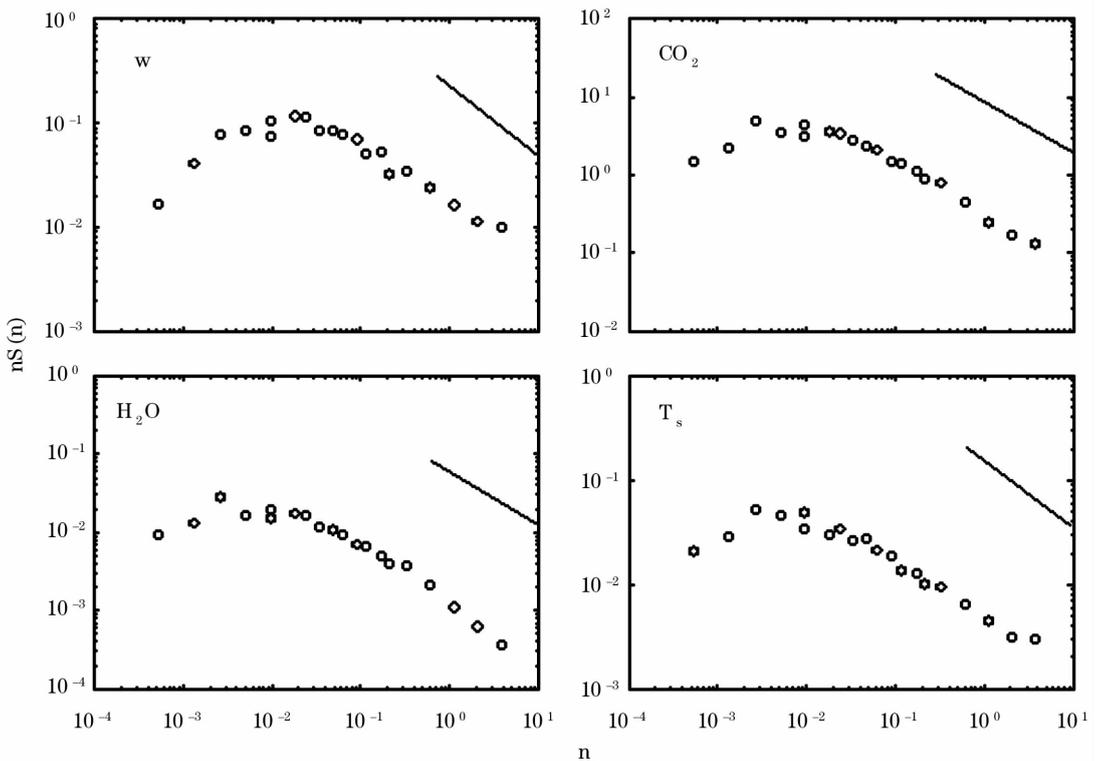


图 9 功率谱分析(垂直风速 w 、 CO_2 、 H_2O 、超声虚温 T_s)

Fig. 9 Mean power spectra analysis vertical wind velocity component w , CO_2 , H_2O and sonic temperature T_s

数据为 2007 年 7 月 29 日 10:00 ~ 14:00 共 8 个 30 分钟各变量功率谱的平均值,图中实线为 $-2/3$ 斜率

for 8 half-hour period from 10:00 - 14:00, July 29, 2007. The solid line is the $-2/3$ slope

expected in the surface layer inertial subrange

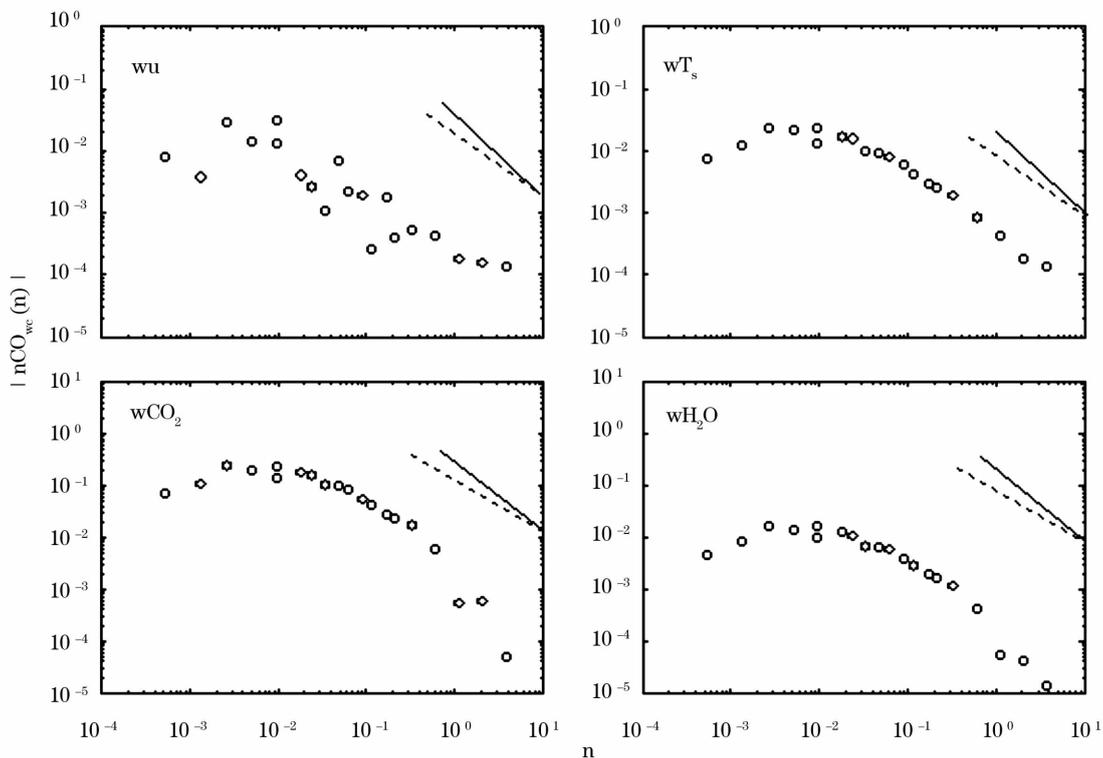


图 10 协谱分析(垂直风速 w 与变量水平风速 u 、超声虚温 T_s 、 CO_2 、水汽 H_2O 的协谱)

Fig. 10 Mean cospectral between the vertical wind speed (w) and variable (horizontal wind speed u , sonic air temperature T_s and CO_2 , H_2O)

数据为 2007 年 7 月 29 日 10:00 - 14:00 共 8 个 30 分钟各变量协谱的平均值,图中实线为 $-4/3$ 斜率,虚线为 -1 斜率 for 8 half-hour from 10:00 - 14:00, July 29, 2007. The solid line and dot line is the $-4/3$ slope expected in the surface layer inertial subrange and -1 slope, respectively

3.3.2 平稳性检验

不同时间、气象条件都会影响到大气湍流的平稳性,因此,对涡动相关仪的观测数据进行平稳性检验是一项基本需求^[2]。

图 11 为不同风向湍流发展的平稳性检验分布图,取 Δst 小于等于 500%, 100% 为一个间隔。感热通量总计有 40.8% 的数据通过平稳性检验,潜热通量总计有 37.8% 的数据通过平稳性检验。不同风向上数据质量有所不同, $0 \sim 30^\circ$ 表现出很明显的非平稳性。主要是因为该风向主要在夜间出现(图 2b),而此时夜间大气层结稳定,来自气象及仪器本身的限制都会影响到湍流的平稳性。

3.3.3 湍流发展的充分性检验

图 12 为不同稳定度条件下各风向湍流发展充分性检验的分布情况。湍流发展的充分性检验要明显好于湍流的平稳性检验,几乎所有数据的 ITC 均小于 100%, 其中 55.8% 数据通过充分性检验。在不同稳定度条件下湍流发展的充分性有所不同,在不

稳定与近中性条件下湍流发展的充分性要明显好于稳定条件。由于密云观测站地处非均匀地表,因此湍流发展的充分性在不同风向上存在一定的差异。

根据 Foken^[20] 提出的分级标准(表 3),对密云站 2006 年 8 月至 2007 年 7 月期间的观测数据进行检验。

QC = 1 ~ 3 表示质量好的数据, 4 ~ 6 代表质量较好的数据, 7 ~ 8 代表质量差的数据, 9 表示需要剔除的数据。

表 4 和表 5 为不同月份数据质量的评价结果。其中感热通量一年中有 37.7% 为质量好的数据, 37.8% 为较好数据, 1.8% 为需要剔除的数据。潜热通量有 35.0% 为质量好的数据, 39.1% 为较好数据, 2.3% 为需要剔除的数据。总体上,感热、潜热通量约有 75% 数据为较好数据。

综上所述,密云站可用于一般通量数据分析约 75% (QC = 1 ~ 6), 质量较差数据(较插补值好)约 23% (QC = 7 ~ 8), 质量差数据(QC = 9)约 2%。

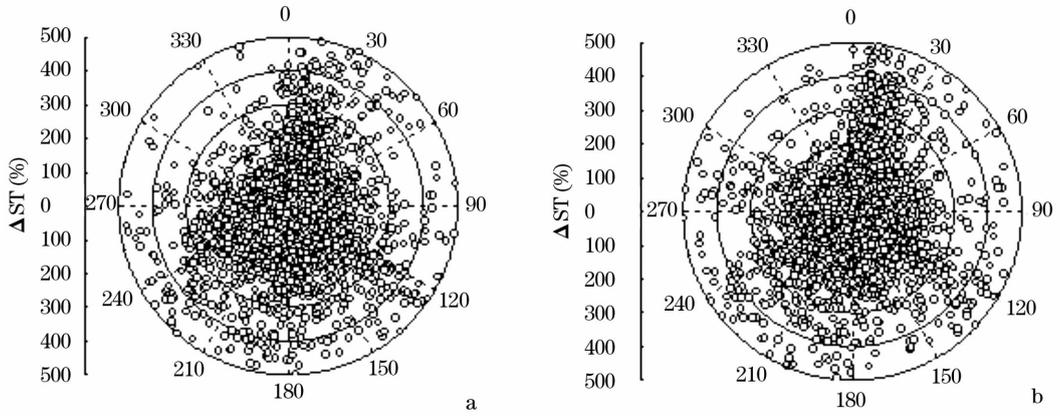


图 11 湍流发展的平稳性检验

Fig. 11 The steady state test of turbulence development

(a 为感热通量, b 为潜热通量)

(a is sensible heat flux, b is latent heat flux)

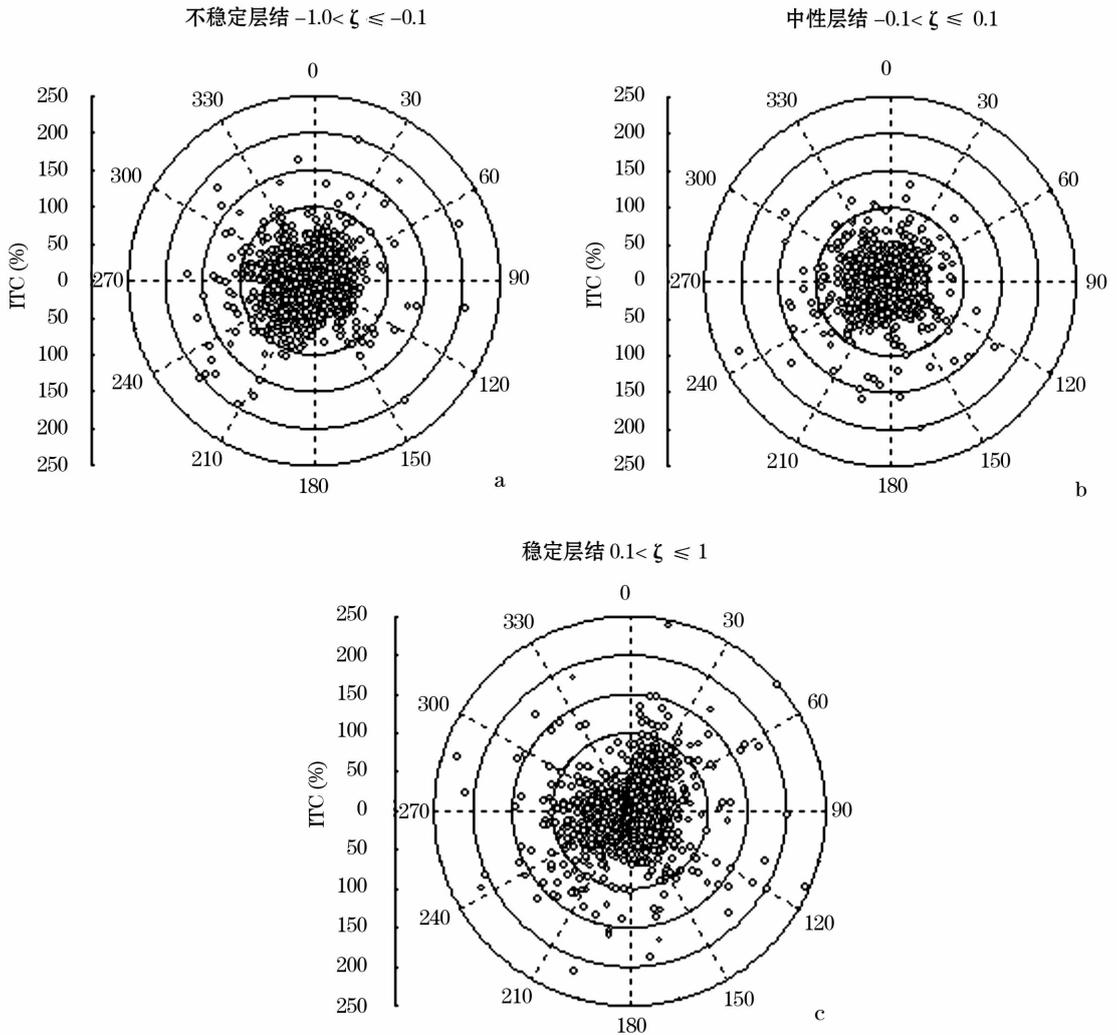


图 12 不同稳定度条件下湍流发展的充分性检验

Fig. 12 Integral turbulence characteristics test in different stability

表 3 湍流数据质量的分级指标^[20]

Table 3 Overall flag of turbulence data^[20]

质量标志 (QC)	平稳性检验 (%)	湍流发展的充分性检验 (%)
1	0 ~ 15	0 ~ 30
2	16 ~ 30	0 ~ 30
3	0 ~ 30	31 ~ 75
4	31 ~ 75	0 ~ 30
5	0 ~ 75	31 ~ 100
6	76 ~ 100	0 ~ 100
7	0 ~ 250	0 ~ 250
8	0 ~ 1 000	0 ~ 1 000
9	> 1 000	> 1 000

3.3.5 通量观测的空间代表性分析

密云站地处山谷中, 东西两侧为山体, 有必要对涡动相关仪测量值所代表的空间范围进行分析。本文采用足迹模型对涡动相关仪观测到的通量空间代表性做出粗略估计, 分析有多少通量观测值的源区落在感兴趣的区域内 (本文取非山体的下垫面为感兴趣区域)。本文以夏季 (2006 年 8 月) 和冬季 (2007 年 1 月) 为例, 选取通量贡献为 50% 源区远端点距观测点的距离 (图 13a、b) 以及足迹最大值离观测点距离 (图 13c、d) 进行分析。

表 4 不同月份感热通量数据的等级比例 (%)

Table 4 Quality flag percentage of sensible heat flux in different month (%)

月份 QC	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7
1-3	36.7	42.4	34.3	32.6	31.7	36.0	32.8	33.9	46.4	48.0	40.2	37.5
4-6	40.7	34.1	41.3	40.2	41.2	38.1	39.1	39.8	32.4	31.9	36.6	38.6
7-8	21	22	22.6	25.2	24.7	23.4	26.1	25.4	19.4	17.9	21.9	22.4
9	1.6	1.5	1.8	2	2.4	2.5	2	0.9	1.8	2.2	1.3	1.5

表 5 不同月份潜热通量数据的等级比例 (%)

Table 5 Quality flag percentage of latent heat flux in different month (%)

月份 QC	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7
1-3	41.3	40.8	35.1	30.2	27.6	27.0	22.2	29.1	34.2	44.2	44.6	43.2
4-6	35.9	36.5	37.8	42.4	42.5	43.4	45.8	39.6	38.8	33.8	35.4	37.0
7-8	21.3	21.2	22.4	24.9	27.0	26.9	29.8	29.4	24.7	19.8	18.4	18.0
9	1.5	1.5	4.7	2.5	2.9	2.7	2.2	1.9	2.3	2.2	1.6	1.8

图 13 给出了不同时次 50% 通量贡献源区的远端点及足迹最大值离观测点距离的散点分布图。从图中可知: 全天远端点分布较离散, 离观测点距离可超过 1 500 m。白天相对较集中, 基本在观测点 600 m 范围内, 这主要由大气稳定状态决定。8 月全天和白天分别有 70.1% 和 68.0% 数据的源区落在感兴趣范围内。1 月全天和白天分别 77.2% 和 80.8% 数据的源区落在感兴趣范围内。足迹最大值一般都集中在观测点 0 ~ 60°, 210 ~ 270° 范围内, 这与观测站风向分布一致 (图 2a)。8 月全天和白天分别有 92.1% 和 97.1% 数据的足迹最大值落在感兴趣范围内, 1 月全天和白天分别有 90.9% 和 91.3% 数据的足迹最大值落在感兴趣范围内。

4 结论与讨论

本文以密云观测站为例, 较全面地总结了关于涡动相关仪数据处理的基本流程, 并对几个主要处理步骤前后的通量值做了比较分析, 最后对涡动相

关仪的通量数据做了详细的质量评价。根据密云观测站一年的数据分析表明:

(1) 涡动相关法测量通量是建立在一系列假设基础上的, 在应用其观测数据的同时, 常需保留原始湍流数据, 并进行数据的质量控制与评价分析。

(2) 对于地形起伏不大的密云观测站, 野点值剔除、坐标旋转以及超声虚温修正对感热、潜热通量的观测结果影响很小, 变化均在 ±1% 之内。但坐标旋转对动量通量影响较大, 坐标旋转前后 MAPD 超过 40%。坐标旋转方法应优先选用平面拟合方法, 其次为二次坐标旋转。空气密度脉动引起的误差对潜热通量及 CO₂ 通量的观测结果影响较大, 仅以 4 月为例, 订正后潜热通量有 9% 的增加, 对 CO₂ 通量的影响更大一些。

(3) 功率谱和协谱的分析表明, 系统的频率响应能力能够满足湍流通量测定需求。三维风速、CO₂、H₂O 和空气温度的功率谱在惯性副区内基本满足 -2/3 次方定律, 协谱基本满足 -4/3 次方定

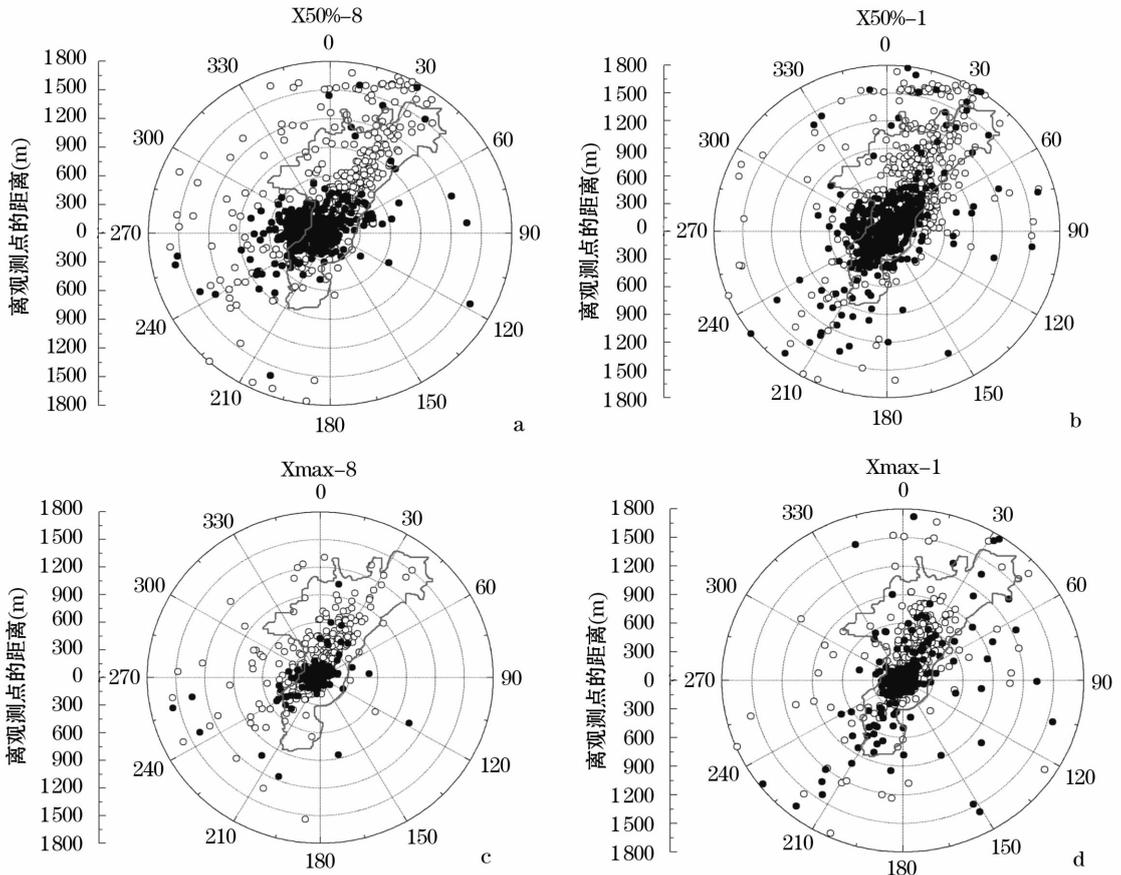


图 13 通量贡献为 50% 源区的远端点以及足迹最大值离观测点的距离

Fig. 13 Upwind distance for the measured flux to represent 50% of the surface flux and the upwind distance to the peak location of the footprint

(灰色线内为感兴趣区域(非山体),空心圆代表全天数据,实心圆代表白天数据)

(Area in the grey line is interest area (non mountainous region), the empty spot is all-day data, and the solid spot is daytime data)

律。对密云站一年观测数据的筛选和处理后,约有 75% 的通量数据为质量较好的数据,2% 的数据需要剔除。

(4) 全天通量贡献源区分布较离散,基本在观测点 900 m 范围之内;白天分布相对较集中,基本在观测点 600 m 范围之内。若将非山体作为感兴趣区域,全天和白天均有超过 70% 通量源区全部落在感兴趣区域内,超过 90% 的足迹最大值落在感兴趣区域内。涡动相关仪毕竟是“单点”上的观测,其观测数据的空间代表性有限,只能用于分辨率较高的卫星影像(如 TM, ASTER)估算的水热通量的验证。如果要获取具有 MODIS 热红外波段像元尺度范围的水热通量实测数据,则需要使用观测范围更大的大孔径闪烁仪。

参考文献 (References):

[1] Wang Jiemin, Wang Weizhen, Ao Yinhan, et al. Turbulence

flux measurements under complicated conditions[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(8): 791-797. [王介民, 王维真, 奥银焕, 等. 复杂条件下湍流通量的观测与分析[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(8): 791-797.]

[2] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 479-492.

[3] Massman W J, Lee X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long term studies of carbon and energy exchanges [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 121-144.

[4] 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.

[5] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106: 85-100.

[6] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99:

- 127-150.
- [7] Foken T, Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78:83-105.
- [8] Rebmann C, Göckede M, Foken T. Quality analysis applied on eddy covariance measurements at complex forest sites using footprint modeling[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, DOI:10.1007/s00704-00400095-y.
- [9] Göckede M, Rebmann C, Foken T. A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modeling for the characterisation of complex sites[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 127: 175-188.
- [10] Mauder M, Liebethal C, Göckede M, et al. Processing and quality control of flux data during LITFASS-2003[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 121:67-88.
- [11] Hammerle A, Haslwanter A, Schmitt M, et al. Eddy covariance measurements of carbon dioxide, latent and sensible energy fluxes above a meadow and a mountain slope[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 122:397-416.
- [12] Van Dijk A, Moene A F, De Bruin H A R. The principles of surface flux physics: Theory, practice and description of the ECPACK library[R]. Meteorology and Air Quality Group, Wageningen University, 2004:1-97.
- [13] Wang Jiemin, Liu Xiaohu, Qi Yongqiang. A preliminary study of turbulence transfer characteristics in Gobi area with an eddy correlation technique[J]. *Plateau meteorology*, 1990, 9(2): 120-129. [王介民, 刘晓虎, 祁勇强. 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, 1990, 9(2):120-129.]
- [14] Sun Xiaomin, Zhu Zhilin, Xu Jinping, et al. Determination of averaging period parameter and its effects analysis for eddy covariance measurements[J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48 (suppl. 1):33-41.
- [15] Zhu Zhilin, Sun Xiaomin, Yuan Guofu, et al. Correcting method of eddy covariance fluxes over non-flat surfaces and its application in ChinaFlux[J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48 (suppl. 1): 42-50.
- [16] Li Zhengquan, Yu Guirui, Wen Xuefa, et al. Energy balance closure at ChinaFlux sites[J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48 (suppl. 1): 51-62.
- [17] Wen Xuefa, Yu Guirui, Sun Xiaomin, et al. Turbulence Flux Measurement above the overstory of a subtropical Pinus plantation over the hilly region in southeastern China[J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48 (suppl. 1):63-73.
- [18] Schotanus P, Nieuwstadt F T M, De Bruin H A R. Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1983, 26: 81-93.
- [19] Su Hongbing, Schmid H P, Grimmond C S B, et al. Spectral characteristics and correction of long-term eddy-covariance measurements over two mixed hardwood forests in non-flat terrain[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, 110:213-253.
- [20] Foken T, Göckede M, Mauder M, et al. Post-field data quality control[C] // Lee X, Massman M, Law B, eds. Handbook of Micrometeorology. A Guide for Surface flux Measurement and Analysis. Boston: Kluwer Academic, 2004: 181-208.
- [21] Kaimal J C, Finnigan J J. Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement[M]. New York: Oxford University Press, 1994:255-261.
- [22] Kormann R, Meixner F X. An analytical footprint model for non-neutral stratification[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99: 207-224.
- [23] Guo X, Cai X. Footprint characteristics of scalar concentration in the convective boundary layer[J]. *Advances in Atmosphere Sciences*, 2005, 22(6):821-830.
- [24] Vickers D, Mahrt L. Quality control and Flux sampling Problems for Tower and Aircraft Data[J]. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 1997, 14:512-526.
- [25] Guo Jianxia, Bian Lingen, Dai Yongjiu. Measured CO₂ Concentration and Flux at 16m Height during Corn growing period on the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(4):695-707. [郭建侠, 卞林根, 戴永久. 在华北玉米生育期观测的16m高度CO₂浓度及通量特征[J]. 大气科学, 2007, 31(4):695-707.]
- [26] Turnipseed A A, Anderson D E, Blanken P D, et al. Airflows and turbulent flux measurements in mountainous terrain Part 1. Canopy and local effects[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 119:1-21.
- [27] Liu Heping, Perters G, Foken T. New equations for sonic temperature variance and buoyancy heat flux with an omnidirectional sonic anemometer[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 100: 459-468.
- [28] Bian Lingen, Lu Longhua, Cheng Yanjie, et al. Turbulent measurement over the southeastern Tibet plateau[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2001, 12(1):1-13. [卞林根, 陆龙骅, 程彦杰, 等. 青藏高原东南部昌都地区近地层湍流输送的观测研究[J]. 应用气象学报, 2001, 12(1):1-13.]
- [29] Blanken P D, Black T A, Neumann H H, et al. Turbulence flux measurements above and below the overstory of a boreal aspen forest[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1998, 89: 109-140.

A Study on the Data Processing and Quality Assessment of the Eddy Covariance System

XU Ziwei¹, LIU Shaomin¹, GONG Lijuan¹, WANG Jiemin², LI Xiaowen¹

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The eddy covariance (EC) technique can measure turbulent exchanges between surface and atmosphere directly, and is now used widely in all of the flux stations. Since this method is based on certain assumptions, the obtained surface fluxes are not true values if there are no necessary corrections. Recent development and some focal points of the eddy-covariance method are reviewed, and used in the processing of the data collected in Miyun station, which is one of the flux stations near Beijing. The analysis of EC data at Miyun station shows; Depiking and the sonic temperature and coordinate rotation corrections have a rather little effects on the surface sensible and latent fluxes (about 1%), however, coordinate rotation has large effect on the momentum flux. The air density correction (WPL correction) is important for water vapor and CO₂ fluxes, and should be applied. The turbulent spectral checks in the data quality evaluation are satisfactory. Turbulence stationarity and integral characteristics are used in the flux data quality analysis. After rigorously data screening, the final result shows that about 75% flux data is good, and 2% flux data need to be discarded. Footprint analysis shows for all day and daytime periods, over 70% source area of the fluxes is located in the interested area (non mountainous region) with over 90% of the biggest contribution points in the area.

Key words: Eddy covariance system; Turbulent flux; Quality control; Quality assessment.

《地球科学进展》杂志广告参考价目表

黑白(文字、照片)		彩色(文字、照片)	
封二、封三	价格(元)	封二、封三	价格(元)
纯文字	1500 ~ 2000	纯文字	3500 ~ 4000
文字加照片	2500 ~ 3000	文字加照片	4500 ~ 5000
封四(含文字、照片)	2000 ~ 2500	封四(含文字、照片)	5000 ~ 6000
1/2 版面	价格减半	1/2 版面	2500 ~ 3000
1/3 版面	价格的 1/3	1/3 版面	1500 ~ 2000
1/4 版面	价格的 1/4	1/4 版面	1000 ~ 1500
插页(正反两版)	3000 ~ 4000	插页(正反两版)	6000 ~ 8000

注:(1)客户如果长期合作,可以给予 15% ~ 20% 的优惠(需签定合作意向)。

(2)本刊与客户之间可根据广告的难易程度协商确定价格。

(3)其他相关事项可协商确定。

(4)1/2、1/3、1/4 版面的纯文字宣传,只做插页广告。

联系电话:0931 - 4968256 E-mail: adearth@lzb. ac. cn