

姜明, 郭建侠, 景元书. 稳态与湍流特征测试对通量数据质量的评价[J]. 气象, 2012, 38(11): 1436-1442.

# 稳态与湍流特征测试对通量数据质量的评价<sup>\*</sup>

姜 明<sup>1</sup> 郭建侠<sup>2</sup> 景元书<sup>3</sup>

1 天津市气象局气象技术装备中心, 天津 300074

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

3 南京信息工程大学, 南京 210044

**提 要:** 应用 CO<sub>2</sub> 通量、感热和潜热通量稳态测试及垂直速度积分测试相结合的湍流数据质量评价方法对锡林浩特国家气候观象台 2009 年全年的湍流通量观测数据进行了质量评价。结果表明, 锡林浩特通量观测数据质量总体较好; 80% 以上数据通过质量评价为较好数据; 质量评价较好的数据分布呈白天大于夜间、夏季大于冬季的特点。经过对比分析, 前期数据处理能剔除大部分质量不好的数据, 但应用稳态测试与湍流积分测试筛选后, 数据质量仍有明显提高, 能量闭合率较前期数据分析前提高 2% 以上。

**关键词:** 涡动相关系统, 稳态测试, 湍流积分测试

## Using Quality Assessment Method to Test the Data of Eddy Covariance

JIANG Ming<sup>1</sup> GUO Jianxia<sup>2</sup> JING Yuanshu<sup>3</sup>

1 Tianjin Meteorological Service, Tianjin 300074

2 Meteorological Observation Centre of CMA, Beijing 100081

3 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** The quality assessment (QA) method which includes the steady state test of the CO<sub>2</sub> flux, sensible/latent heat flux and integral turbulence characteristic test of the vertical velocity was used to analyze the turbulence flux data observed by eddy covariance at Xilinhot, 2009. The main results are as follows. The data are good on the whole and there are 80% data well assessed by the QA method. The good data size in daytime is more than in nighttime and in summer is more than in winter. From the comparative analysis, the pre-processing work can eliminate most bad data. Furthermore, the quality of the data assessed by the QA method will be obviously improved. Using these good data to analyze the energy balance, the closure of the local energy balance has increased by more than 2%.

**Key words:** eddy covariance system, steady state test, integral turbulence characteristic test

## 引 言

涡动相关技术经过近 50 年的发展, 随着传感器的革新及采样频率的提高, 以其响应时间短、采样精度高、理论假设少等突出特点被认为是现今惟一能直接测量生物圈与大气间能量及物质交换通量的标准方法。

湍流测量与通常的气象观测不同, 并非所有数据都可以得到有效的统计结果, 这是由湍流本身的规律和特点决定的。因此, 通过数据评价找出有效的湍流统计量具有实际意义。利用涡动相关法进行观测的理想条件是使观测在一开阔的水平均匀下垫面上进行, 且要求观测源区内下垫面具有足够代表性。但在实际的观测中往往不能满足所有条件, 因此有必要利用相应质量控制方法人为校正外界条件

\* 中国气象局气候变化专项项目“国家气候观象台 CO<sub>2</sub> 浓度及通量监测与分析”(CCSF-09-07)资助  
2011 年 12 月 2 日收稿; 2012 年 8 月 15 日收修定稿  
第一作者: 姜明, 主要从事边界层气象研究. Email: jiangming025@163.com

对数据的影响;同时由于湍流数据的用途不同,对数据的质量要求不同,有必要对湍流数据质量进行标识以满足不同数据用户需求。

在众多湍流数据质量控制方案提出并应用的基础上,Foken 等<sup>[1]</sup>以莫宁-奥布霍夫相似理论为出发点,提出了利用反映观测状况的湍流稳态测试和反映湍流发展状况的湍流积分测试结合的方法来对湍流数据质量进行评价,根据不同的评价结果对湍流数据进行更为合理的应用。该方法得到了通量界的认可,并在国内外得到了广泛的应用和发展,Rebmann 等<sup>[2]</sup>把该方法作为前期质量评价的基本方法;Hammerle 等<sup>[3]</sup>应用该方法对其湍流数据进行了筛选;宋涛<sup>[4]</sup>应用三江平原湍流数据对质量评价的效果进行了基本描述,并把该方法纳入到数据检验中。徐自为等<sup>[5]</sup>利用该方法对密云湍流观测数据进行了定性和定量的评价。但是对该质量评价方法的数据检验效果未见探讨。

本文利用这一方法对锡林浩特国家气候气象台 2009 年全年涡动相关观测资料进行了定性和定量的质量评价,并对该质量评价后的数据分布、与前期数据处理效果的对比及对能量平衡闭合的影响逐一进行了分析。

## 1 数据处理与湍流质量评价测试方法

### 1.1 站点及仪器

锡林浩特国家气候气象台(图 1)位于内蒙古锡林浩特东北 25 km 处,为一 2.4 km×1.68 km 的矩形区域,通量观测点置于矩形西南,以通量观测塔为中心,在西南偏南方有一条 50 m 长的土路,连接到设备终端简易屋。在其余方向上没有建筑物或其他物体分布。最近的公路距观测点东南方向 2 km 远。观测场下垫面覆盖着均一的以针茅草为主的草原,属于典型草原生态系统。观测点地形大致呈西北高、东西低的走势但坡度较小。

通量观测采用 CSAT-3 型三维超声风速仪(Campbell Scientific Inc, USA)与 Li-7500 型 H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> 红外气体分析仪(Li-Cor, USA),对风速、气体等进行 10 Hz 高频采样观测,因下垫面为牧草冠层高度较低,设置观测高度为 4 m。同时配合土壤热通量观测、辐射观测以及风能塔上的 5 层(2、4、10、20 和 30 m)梯度观测。土壤热通量板埋在土壤下 5

cm 处;采用辐射四分量仪 CNR4 对辐射进行观测,架设高度为 2 m;采样频率均为每分钟一次。



图 1 锡林浩特国家气候气象台  
通量观测站

Fig. 1 The flux observation station in  
Xilinhot National Climate Observatory

### 1.2 基本方法

#### 1.2.1 资料前期处理

在进行湍流数据质量评价之前,针对原始湍流观测(10 Hz)数据进行了前期质量控制,包括:数据标准差检验和降水资料剔除及红外光路检验。

数据标准差检验。根据方差检验原则,采用文献[6,7]提出的 4 倍标准差阈值剔除数据个别峰值和奇异值记录,剔除判据为  $|x_i - \bar{x}| > 4\sigma$ ,其中  $x_i$  为测量值(如:风速、温度、水汽、密度和 CO<sub>2</sub> 密度), $\bar{x}$  是半小时均值, $\sigma$  是标准差。

降水资料剔除及红外光路检验。对降水前后 1 小时及降水期间的数据进行剔除;由于锡林浩特观测点通量观测中会出现沙尘暴、暴雪等极端天气状况,且冬季仪器结冰影响基本观测,利用反映气体分析仪红外光路状态的 AGC 值对数据进行剔除。判据为  $AGC > 90$ <sup>[8]</sup>。

因锡林浩特在各方向上地形有一定变化,考虑到平面拟合修正方法受某一时段的平均风影响,在本次研究中针对原始坐标系受地形及仪器安装不水平对数据带来的影响,选用二次旋转方法作为最终数据修正方法<sup>[9]</sup>,即对原始坐标系先后进行两次旋转以使将原坐标系统调整到自然坐标系下,对数据进行修正;同时,为了避免观测过程中由于水汽等原因对通量带来的影响,采用 Webb 等<sup>[10]</sup>提出的通量修正方法(WPL 方法)对 CO<sub>2</sub> 通量及潜热通量进行校正,排除这部分体积带来的影响。

#### 1.2.2 湍流观测数据质量评价

涡动相关技术要求常通量层内的湍流是保持定常的,即大气湍流统计特征不随时间发生变化。在

此基础上,最早由俄国科学家<sup>[1]</sup>提出了利用平均时间内更小时间尺度的通量平均来判断湍流在时间上的变化程度,即稳态测试。以 30 min 平均时间段为例,常用 5 min 和 30 min 进行比较,如 CO<sub>2</sub> 通量稳态测试的检验公式为<sup>[9]</sup>:

$$\Delta ST = \left| \frac{(\overline{w'c'})_{5 \text{ min}} - (\overline{w'c'})_{30 \text{ min}}}{(\overline{w'c'})_{30 \text{ min}}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

其中角标 5 min 和 30 min 表示根据相应时间段的湍流原始数据进行计算得到的 CO<sub>2</sub> 通量。

湍流积分测试是通过湍流方差相似性关系来作为检验数据质量的标准<sup>[1]</sup>,即发展较好的湍流应当符合相似性关系。通过观测数据与拟合的方差相似性函数模拟数据对比来检验湍流数据质量。

垂直速度的湍流积分测试利用下式进行计

算<sup>[12-13]</sup>:

$$ITC = \left| \frac{(\sigma_w/u_*)_{\text{model}} - (\sigma_w/u_*)_{\text{measurement}}}{(\sigma_w/u_*)_{\text{model}}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

其中  $(\sigma_w/u_*)_{\text{model}}$  为根据通量方差相似性拟合的相似函数(稳定度参数  $z/L$  的函数)计算得到的模型值; $(\sigma_w/u_*)_{\text{measurement}}$  为根据观测资料直接计算得到的垂直速度与摩擦速度的比值。

把计算得到的  $\Delta ST$  和  $ITC$  两者进行综合筛选可以得到最终的数据等级分布,较常用的有 Foken 等提出的 9 级分布、Rebmann 等提出的 5 级分布和 Carbon Europe 使用的 3 级分布<sup>[12]</sup>。本文采用 Foken 提出的判别标准(表 1),并规定其 1~3 等级数据质量最好,4~6 级质量中等,7~9 级质量最差。

表 1 湍流数据测试数据质量分级标准

Table 1 The quality grade standard to classify the turbulent testing data

	好			中			差		
$\Delta ST$ 比值/%	0~15	16~30	0~30	31~75	0~75	76~100	0~250	0~1000	>1000
$ITC$ 比值/%	0~30	0~30	31~75	0~30	31~100	0~100	0~250	0~1000	>1000
综合等级( $\Delta ST \cap ITC$ )	1	2	3	4	5	6	7	8	9

注:综合等级为  $\Delta ST$  和  $ITC$  的百分比交集后结果;等级从小到大反映数据质量从好到差。

Notes: The comprehensive level is the intersection of the  $\Delta ST$  and  $ITC$ ; the level from small to large reflected from good to poor data quality.

### 1.3 湍流相似系数确定

在进行湍流积分测试的过程中,需要首先拟合出垂直速度的方差相似函数  $\sigma_w/u_*$ 。利用相似性参数  $z/L$  的相似性函数来表示,关键在于普适函数  $\phi_x(z/L)$  的确定。为了获得相似性函数的具体表达式,国内外学者进行了大量的研究探索<sup>[14-17]</sup>,普遍以无因次风速满足稳定度  $z/L$  的 1/3 次方的表达式,即  $C_1[1-C_2(z/L)]^{1/3}$  来表示相似性函数。尽管无因次方程的形式相同,但是由于下垫面、地形等观测环境的影响使得局地拟合系数不尽相同<sup>[18]</sup>。因此,本文有必要先对  $C_1$  和  $C_2$  进行拟合(表 2)后再进行数据质量评价处理。

图 2 给出了拟合相似性函数随稳定度变化图。从图中来看,无因次垂直速度能很好地满足稳定度

$z/L$  的“1/3”规律;拟合的曲线能够代表无因次风速随稳定度变化趋势,拟合效果较好。本文选用拟合的相似性函数作为湍流积分测试中的模型函数。

## 2 质量评价测试结果分析

### 2.1 测试结果的等级分布

对经过基本质量控制后的锡林浩特国家气候观测台通量观测 2009 年全年每半小时平均的湍流数据进行数据质量评价。图 3a 给出了计算后各等级数据数量分布,1~3 等级数据占全部检验数据的 79.24%,其他两类数据(中、差)分别占全部数据 13.65%和 7.11%。表明近 80%数据质量较好地符合湍流发展的观测特点并趋于理想的稳态条件,仅有少量数据必须剔除并进行插补计算。

图 3b 及图 3c 给出了评价后三类湍流数据的日变化特征及月变化特征。白天(06:30—18:00)数据中 1~3 等级所占比例最大,平均可以超过 85%;最大比例出现在白天 12 时,占整个小时内全部数据的 94.1%。而夜间情况不同,虽然仍以 1~3 等级数据

表 2 拟合相似性函数表达式

Table 2 Fitted dimensionless turbulence parameters for  $z/L < 0$  and  $z/L > 0$

稳定度	$z/L < 0$	$z/L > 0$
相似性函数	$C_1(1-C_2 \frac{z}{L})^{1/3}$	$C_1(1+C_2 \frac{z}{L})^{1/3}$
拟合系数	$C_1=1.08, C_2=2.23$	$C_1=1.17, C_2=1.01$

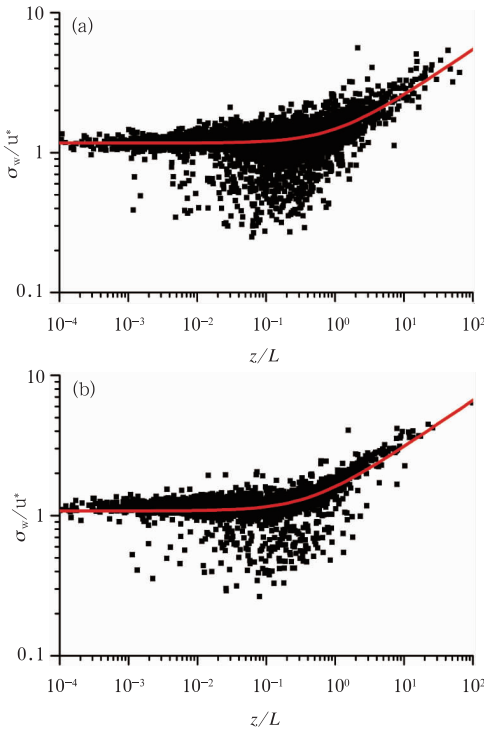


图 2 垂直速度积分特性与  
稳定度参数关系

(a) 稳定条件, (b) 不稳定条件

Fig. 2 The changes of normalized standard deviation of  $w(\sigma_w/u_*)$  with  $z/L$  under stable (a) and unstable (b) conditions

所占比例为主,但所占比例平均下降了 13%。在夜间,较差数据(7~9 级)数据明显增多,从白天平均 4%的比例增加到近 10%,最大可达 12.8%。由此表明白天的数据质量优于夜间。由于夜间多处于大气稳定层结条件下,这样的稳定条件不利于湍流的发生和发展,使得涡动相关测量方法在根本的技术层面受到限制导致夜间通量数据质量较差<sup>[11,19]</sup>,通过质量检验可确定受到影响的数据。

从各等级湍流数据量月份分布来看,5 月 1~3 等级数据所占比例最高,而 1、11、12 月所占比例偏小,12 月其所占比例仅为 65%;较差数据的比例分布相反。综合比较,2009 年全年 5 月数据质量最高,12 月数据质量最差,4—9 月数据质量好于其他 5 个月数据质量,即夏半年数据质量较为理想,冬半年较差。出现这一现象,与锡林浩特局地气候条件有关,锡林浩特冬半年过于寒冷的天气以及伴随大量固态降水,甚至在最为寒冷的月份出现仪器结霜使得仪器光路受损,影响了观测效果。因此湍流资料质量月份分布情况可以间接反映实际观测环境对数据质量的影响。

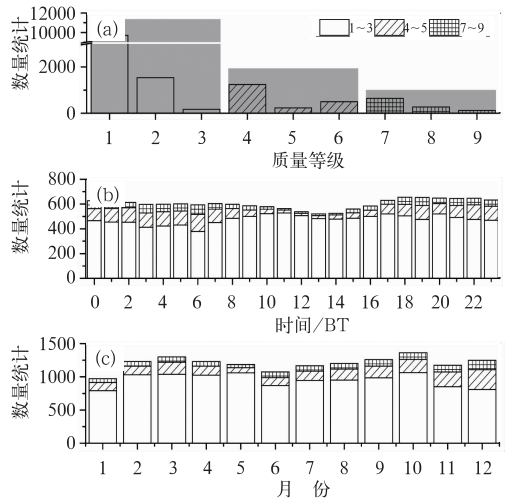


图 3 湍流数据等级分布情况统计

(a) 各等级湍流数据数量分布,  
(b) 不同等级湍流数据量日变化,  
(c) 不同等级湍流数据量月变化  
(图中阴影柱状代表好、中、差三类数据)

Fig. 3 The statistics of the turbulent data in different grades

(a) the number of the turbulent data in each grade;  
(b) the daily variation of the number of the turbulent data in different grades;  
(c) the monthly variation of the number of the turbulent data in different grades  
(The shadow columns in (a) are the numbers of the turbulent data in different 3 grades)

## 2.2 质量评价对数据前期处理效果分析

在湍流数据质量评价之前,针对锡林浩特的原始高频 10 Hz 采样数据进行了基本的数据处理。为分析通量数据前期处理对数据质量的影响,利用上述湍流质量评价方法对通量数据处理前后进行了质量评价。

图 4a 给出了数据处理前后好中差数据的比例变化。在数据处理前,好中差三类数据所占比例分别为 74.18%、16.38%和 9.44%;通过数据处理,使得处理后数据 1~3 等级数据比例增加了 5.09%,而中、差数据比例则分别减少了 2.73%和 2.32%。不难看出前期数据处理能够提高数据整体质量,优质数据所占比例增大。

而前期数据处理提高数据质量是以剔除半小时通量数据为代价的,在上述处理中剔除的数据占原始数据总量的 16%。为分析剔除数据的合理性,针对前期数据处理中的三个部分分别进行了质量评



价,给出了不同质量等级的样本比例(图 4b,斜线柱状图)。从整体来看,剔除数据中中差数据比例接近 62.22%,该比例远大于数据处理后中差数据比例,表明剔除的数据绝大多数较为合理。

但是在剔除数据中仍有 38% 的数据通过了数据质量评价,评价为好。一方面,这与前期数据处理的计算方法有关,因数据处理大多通过设定阈值来对数据进行计算筛选,阈值不可能绝对精确而导致部分数据因不满阈值条件而被严格剔除。另一方面,这与质量评价的全面性有关,因文中仅选取  $\text{CO}_2$  稳态测试和垂直速度积分测试作为质量评价标准,只能部分反映修正效果;当在质量评价中加入感热和潜热评价后(图 4b,空白柱状图),使得通过质量评价的数据明显减少,中差等级数据增多;整体上通过综合质量评价的数据不足 22%,其中标准差检验、降水资料剔除和 AGC 值检验中通过质量检验的数据量分别减少了 12.7%、12.3% 和 22.7%。这表明,通过合理的质量评价体系的构建,选取多重质量评价后,使得剔除数据中通过质量检验的数据变少,证明了前期数据处理的有效性。

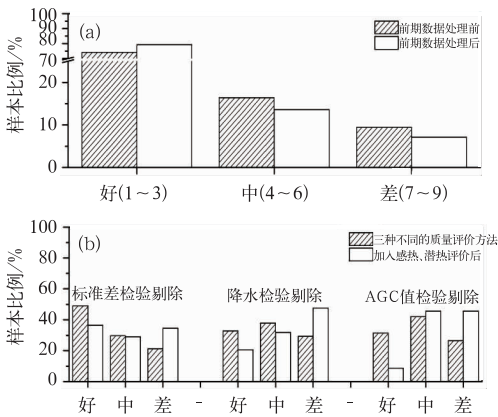


图 4 数据处理前后不同等级数据比例分布

(a) 数据处理前后数据等级比例分布, (b) 增加质量评价方法前后数据处理各部分等级比例分布

Fig. 4 The statistics of the turbulent data in different grades with or without initial data processing

(a) the turbulent data proportion in different grades with (blank) or without (shaded) initial data processing; (b) the change of the turbulent data proportion in different grades with (standard deviation test, rain data delete and AGC test) 3 different data processing methods (shaded)

(Blank is the data assessed adding to sensible and latent heats)

当采用更为全面的质量评价体系组合后,可以对通过质量评价而被前期剔除的数据进行重新定位,纠正被严格剔除掉的数据,以和前期数据处理中的严格数据剔除形成互补。

### 2.3 对能量平衡结果的影响

根据热力学第一定律,同一观测区域内生态系统其收入和释放的能量应该是保持一致的,即

$$R_n = H + LE + H_{G_{0\sim 5\text{ cm}}} \quad (3)$$

式中,  $R_n$  为净辐射通量,  $H$  为感热通量,  $LE$  为潜热通量,  $H_{G_{0\sim 5\text{ cm}}}$  为  $0\sim 5\text{ cm}$  土壤热通量(忽略了冠层内部的能量存储)。因土壤热通量板观测结果为土壤表面以下  $5\text{ cm}$  处土壤热通量,因此采用土壤温度随时间变化来计算  $0\sim 5\text{ cm}$  的土壤热通量,计算公式为:

$$H_{G_{0\sim 5\text{ cm}}} = H_{G_{5\text{ cm}}} + C_g \cdot z \cdot \frac{\Delta T_s}{\Delta t} \quad (4)$$

其中,  $H_{G_{5\text{ cm}}}$  为土壤热通量板观测值,  $C_g$  为土壤体积比热,取  $2.42 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $z$  为计算土壤上层厚度 ( $0.05\text{ m}$ );  $\frac{\Delta T_s}{\Delta t}$  为土壤温度随时间变化。

在实际中,利用涡动相关法进行观测普遍出现能量不能平衡的现象<sup>[20]</sup>。因此,利用能量平衡闭合率来检验湍流数据质量被微气象学界广泛接受,成为衡量数据质量的一条重要准则。

本文采用最小二乘法(OLS)方法对每半小时的有效能量( $R_n - H_{G_{0\sim 5\text{ cm}}}$ )和湍流能量( $H + LE$ )进行回归分析,以拟合直线斜率作为能量闭合率。计算好中差三个等级样本数据能量闭合率后显示,1~3等级其能量闭合率可以达到 89.10%,而其他两个等级的能量闭合率分别为 37.36% 和 32.16%。且 1~3 等级数据的离散型明显小于其他两个等级数据。由此证明利用稳态测试及湍流积分测试进行质量评价的效果较为明显,质量等级高的数据能量闭合率明显大于质量等级低的数据。

利用质量评价结果对锡林浩特通量数据进行严格的质量筛选,仅选择 1~3 等级数据作为通过质量检验的湍流数据,以对比其与未筛选数据(1~9 级)之间差异。

为准确界定白天和夜间,对 2009 年全年锡林浩特通量观测点的日出及日落时刻进行了计算,以日出时刻到日落时刻作为白天,日落后到日出前作为

夜间。表 3 给出了 1~3 等级数据和 1~9 全部等级数据整体、白天和夜间不同时段的能量平衡闭合情况统计。可以看出无论从闭合率结果还是从拟合效果 ( $R^2$ ) 来看,进行质量等级筛选后效果都要好于筛选前。在整体闭合率的比较中,筛选后数据(1~3 级)能量闭合率较整体数据能量闭合率提高了 2.02%,在白天能量闭合比较中,两者能量闭合率的差别较小,二者相差 0.03%。而在夜间,1~3 等级数据能量闭合率提高了 3.12%。可见通过质量检验后的质量筛选,主要影响夜间的能量闭合率。由于夜间大气处于稳定条件影响涡动相关观测效果,通过质量检验识别出的夜间较多的较差数据,使得夜间能量闭合率相对得到提高进而增大整体的能量闭合率效果。

从图 5 每小时的能量闭合率的对比关系来看,也清楚地反映出昼夜筛选数据前后能量闭合率变化特点。在夜间数据筛选前后差异要明显大于白天,在夜间能量闭合率平均增加 1.6%,最大可以提高 8.7%;而白天平均仅增加 0.07%,两者能量闭合率之间更为接近,亦证明质量评价修正部分主要集中于夜间数据。

表 3 不同数据分时段能量闭合率

Table 3 The computed energy closure rates using the whole data, the day/night data with and without QA method

	质量等级筛选前数据		质量等级筛选后数据	
	能量闭合率/%	$R^2$ 结果/%	能量闭合率/%	$R^2$ 结果/%
全天	87.08	85.96	89.10	88.00
白天	90.12	87.64	90.15	87.50
夜间	12.23	27.63	15.35	28.15

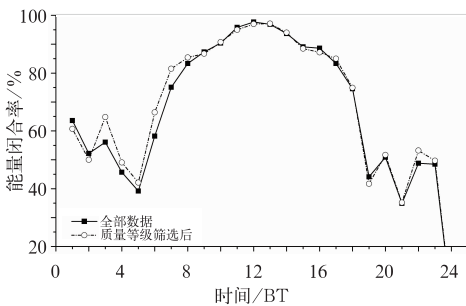


图 5 数据筛选前后不同时间段 OLS 能量闭合率

Fig. 5 The energy closure rates computed by ordinary least squares method in different time with and without QA method

### 3 结论和讨论

本文讨论了国际上较为常用的稳态测试及湍流积分测试组合的湍流数据质量评价方法,并对锡林浩特国家气候观象台的通量观测数据进行了质量评价,经过分析得出以下几点结论:

(1) 采用  $\text{CO}_2$  通量的稳态测试以及垂直速度  $w$  的湍流积分测试结合的质量检验结果表明锡林浩特湍流数据较为理想,80%的数据为优质数据,仅有 7.11%的数据必须予以剔除并采用数据插补进行后续分析。白天数据质量大于夜间,夏季大于冬季,这与大气层结在夜间较多处于稳定层结从而限制了涡动相关技术的应用是分不开的。

(2) 通过对比数据处理前后数据的等级分布,发现数据处理后质量得到提高。但由于数据处理中数据的严格剔除及质量评价方案的选取使得剔除数据与质量评价存在部分差异。在质量评价增加感热、潜热相应的质量评价后,使得其差异减小。结论表明,完善的质量评价体系对前期数据处理提供了客观依据,可以有效地提高数据样本使用率。

(3) 利用能量平衡对不同质量等级数据进行了能量闭合率检测,发现 1~3 级数据能量闭合率高于全部数据(提高 2.02%),说明其数据质量最优;且通过不同时段的能量闭合率比较,两者差异主要集中于夜间,说明质量检验能有效剔除夜间稳定条件下的数据,使得闭合率得到提高。

(4) 本文重点应用  $\text{CO}_2$  通量的湍流稳态测试进行了质量评价,结果对其他通量适用有一定局限性。

### 参考文献

[1] Foken T and Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 78: 83-105.

[2] Rebmann C, Göckede M, Foken T, et al. Quality analysis applied on eddy covariance measurements at complex forest sites using footprint modelling [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2005, 80: 121-141.

[3] Hammerle A, Haslwanter A, Schmitt M, et al. Eddy covariance measurements of carbon dioxide, latent and sensible energy fluxes above a meadow on a mountain slope [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2007, 122: 397-416.

[4] 宋涛. 三江平原生态系统  $\text{CO}_2$  通量的长期观测研究 [D]. 南京信息工程大学, 博士学位论文, 2007: 1-175.

- [5] 徐自为, 刘绍民, 宫丽娟, 等. 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, 2008, 23: 357-370.
- [6] 郭建侠. 华北玉米下垫面湍流输送特征及参数化方案比较研究[J]. 中国气象科学研究院与南京信息工程大学联合培养, 博士学位论文, 2006.
- [7] 谢五三, 田红, 童应祥, 等. 基于淮河流域农田生态系统观测资料的通量研究[J]. 气象科技, 2009, 37(5): 601-606.
- [8] Crawford B, Christen A, Kettle R. Processing and quality control procedures of turbulent flux measurements during the Vancouver EPICC experiment[J]. Environmental Prediction in Canadian Cities (EPICC) Technical Report 1 2009:1-11.
- [9] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 99: 127-150.
- [10] 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(447): 85-100.
- [11] 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 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.
- [12] Mauder M, Foken T. Documentation and instruction manual of the eddy covariance software package TK2[J]. 2004:1-45.
- [13] Lee X, Massman W, Law B. Handbook of Micrometeorology, Chapter 9: Post-field Data Quality Control[M]. Kluwer Academic Publishers, 2006.
- [14] Panofsky H A, Tennekes H, Lenschow D H, et al. The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1977, 11: 355-361.
- [15] Aubinet M, Chemanne B, Vandenhaute M, et al. Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108: 293-315.
- [16] 马耀明, 马伟强, 胡泽勇, 等. 青藏高原草甸下垫面湍流强度相似性关系分析[J]. 高原气象, 2002, 21(5): 514-517.
- [17] 杨智, 刘劲松, 朱以维, 等. 云南大理干湿季近地层湍流特征对比分析[J]. 气象科技, 2009, 37(4): 429-433.
- [18] Lee X, Massman W, Law B. Handbook of Micrometeorology [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2005.
- [19] Baldocchi D, Falge E, Gu L, et al. Fluxnet: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82: 2415-2434.
- [20] Wilson K. Energy balance closure at FLUXNET sites[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113.