

# 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\*

朱治林<sup>①\*\*</sup> 孙晓敏<sup>①</sup> 袁国富<sup>①</sup> 周艳莲<sup>①②</sup> 许金萍<sup>①②</sup> 张仁华<sup>①</sup>

(①中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ②中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 涡度相关技术是目前最好的测量地-气交换的微气象方法, 但它的使用是有条件的, 如仪器应该安装在空旷、平坦和均匀的下垫面进行观测. 否则, 得到的通量如果不进行必要的校正就可能产生较大的测定误差. 在本研究中, 将主要讨论在非平坦、非均匀, 或由于仪器非垂直安装情况下, 用涡度相关方法计算通量时可能产生的误差及其校正方法(坐标旋转法). 并利用中国通量网 4 种不同类型的野外台站(禹城农田站, 内蒙古草原站, 长白山和千烟洲森林站)的实际观测数据, 分析 3 种坐标转换方法(2 次旋转法, 3 次旋转法和平面拟合法)的适用条件, 对通量的校正效果进行比较. 研究表明: (i) 校正后的通量可能大于、小于或等于未校正的通量, 其校正量的大小主要取决于地面的坡度、坡向、风速和风向. (ii) 坐标倾斜角随风向的变化呈现出一个正弦曲线关系, 尤其在坡地地带表现得最为明显. (iii) 平面拟合方法在一定程度上可以认为是坐标旋转法的简化形式, 在各向均匀或有规律变化的下垫面使用效果比较好, 但是该方法对下垫面起伏不规则的森林站点而言并不适合.

**关键词** 涡度相关 通量校正 非平坦地面 坐标变换 ChinaFLUX

自 19 世纪中期以来, 大气中的 CO<sub>2</sub> 的浓度就一直呈现增加的趋势, 而它被视为是全球变暖(温度升高)的主要因素之一<sup>[1]</sup>. 目前关于 CO<sub>2</sub> 的源和汇的评价已经成为国际上的焦点问题<sup>[2-4]</sup>. 特别是随着《京都议定书》的签定, CO<sub>2</sub> 减排增汇与经济补偿等问题已经联系起来, 使得地气间 CO<sub>2</sub> 的交换过程与通量

研究也越来越被重视<sup>[5, 6]</sup>.

为了更准确地估计各种生态系统 CO<sub>2</sub> 的吸收和排放, 同时也包括研究其他的物质能量交换, 在一些西方国家和部分亚洲国家都已建立了许多用于长期和连续观测的通量观测站<sup>[7-11]</sup>. 现在, 技术的发展已经使得涡度相关技术可以用来长期连续观测 CO<sub>2</sub>、水

2004-07-14 收稿, 2004-10-20 收修修改稿

\* 中国科学院知识创新工程重大项目(编号: KZCX1-SW-01-01A)、国家重点基础研究发展规划项目(编号: G2002CB412501)和中国科学院知识创新工程重大项目(CXI0G-E01-04)共同资助

\*\* E-mail: zhuzl@igsnrr.ac.cn

汽和热通量<sup>[4,6]</sup>,而且它被公认为是测量地气间通量交换的最好方法.前几年,中国也已经开始利用涡度相关方法进行通量的观测研究工作,但都限于比较短期和临时的观测<sup>[12-14]</sup>.近几年,中国也开始了用涡度相关方法进行通量的长期和连续观测研究工作,并且在中国建立了 8 个通量观察站<sup>[15]</sup>(4 个森林站点,3 个草地站点和 1 个农田站点).

虽然涡度相关技术是测量地气交换的好方法,但仍然存在有一定的误差和不确定性<sup>[16,17]</sup>.根据现有的仪器和理论计算方法,在实际观测计算中,有一些误差和不确定性是随机的或不可避免的,有一些误差虽然被人们认识到但却难以完全校正,还有一些误差是可以避免或可以进行校正的.例如就目前的条件,平流的影响校正还很难进行.另外,用涡度相关方法测量下垫面地表通量的一个很重要的假设是在某一段时间内,平均垂直风速为零.为了尽量满足这个条件,人们在选择观测地点时,一般是选择地势平坦,下垫面状况均匀,四周开阔的地方进行观测,同时仪器(特别是超声风速仪)的安装也要尽量垂直.这主要是为了避免由于观测点的非均匀性产生的平流可能对测量结果的影响.事实上,完全符合上述条件的理想观测地点很难找到的,仪器也很难做到绝对垂直,特别是很难长期保持绝对垂直,因而在实际观测中,非常容易出现某一段时间内的平均垂直风速不等于零的状况.Kaimal 和 Haugen<sup>[18]</sup>建议风速仪的垂直偏差应该控制在 0.1 度之内,并且地面也必须非常水平,否则就可能带来测定误差,这种误差的大小取决于风速仪与地面的倾斜角、风向、风速和大气稳定度等条件.

由于我国对涡度相关方法的研究相对较晚,所以有必要借鉴一些国外的理论和方法.在本研究中,我们将重点讨论在非平坦地面或仪器倾斜条件下所导致的通量计算误差,以及采用坐标变换方法对通量结果进行校正的方法.本文的主要其目的是:(i)比较系统的介绍目前国际上比较常用的 3 种坐标旋转方法;(ii)比较用 3 种校正方法对通量校正的效果;(iii)利用 4 个台站的实际观测数据,分析各种方法的优缺点和适用范围,比较它们在 4 个台站中的校正效果.

## 1 理论和方法

为了迫使平均垂直风速为零,利用坐标系统变

换方法来校正原有的通量结果是日前被普遍采用的方法.Wilczak<sup>[19]</sup>等分析了多种坐标系统转换方法的优缺点,认为流线坐标系统(Streamline Coordinate)是一个比较好的选择.选择流线坐标系统的主要理由是:(i)在流线坐标中,数据很容易进行比较和分析,变量可以很容易地投影到新坐标系统中;(ii)得到的参数能最大限度的减少坡地对通量结果的影响,其结果很容易与水平面的结果相比较;(iii)得到的参数很容易地在数学模型中应用.当然,该坐标系统也有它的缺点,例如,它没有考虑在非绝热的条件下,坡地可能会改变低层大气的剖面结构,从而产生气压梯度力对通量的影响.在该坐标系统下, $X$ 轴平行于气流方向, $Y$ 轴按照右手法则垂直于 $X$ 轴, $Z$ 轴向上垂直于 $X-Y$ 平面(在坡地,该平面平行于下垫面).目前,利用该坐标系统进行坐标变换的方法主要有两类,一类叫分时段独立旋转法,就是仅仅利用某一较短时段(如 10~30 min)的平均三维风速资料,通过一系列公式直接进行变换,每个时段的旋转方向和角度是不一样的.另一类叫平面拟合法,它是根据多个短时段的三维风速资料拟合得到一个等效的虚拟平面,在这个平面上,总体的平均垂直风速为零,但不要求每个记录的平均风速都为零.

### 1.1 分时段独立旋转法

理论上,如果已经测定出地表坡度、坡向和仪器倾斜度的话,就可以用通用公式直接计算来校正.但实际上,我们很难测出地表坡度、坡向和仪器倾斜度.一种解决此问题的方法是利用一定时段内(一般为 10~30 min)以大地坐标下的三维平均风速为依据进行旋转.Wilczak 等<sup>[19]</sup>等用图解的方法介绍了这种旋转方法的理论和方法.

根据旋转的次数不同,该方法又分为两次旋转法(Double Rotation, DR)和 3 次旋转法(Triple Rotation, TR).第一次旋转的目的是使得 $X$ 轴平行于平均气流,第一次变换后的 3 个方向的风速 $u_1$ , $v_1$ 和 $w_1$ 分别为

$$u_1 = u_m \cos \theta + v_m \sin \theta, \quad (1)$$

$$v_1 = -u_m \sin \theta + v_m \cos \theta, \quad (2)$$

$$w_1 = w_m, \quad (3)$$

$$\theta = \arctan(v_m / u_m), \quad (4)$$

其中,  $u_m$ ,  $v_m$  和  $w_m$  分别是用三维超声风速仪测定的纬向、经向和垂直方向的三维风速的平均值. 第 2 次旋转的目的是使得垂直风速为零, 即:

$$u_2 = u_1 \cos \varphi + w_1 \sin \varphi, \quad (5)$$

$$v_2 = v_1, \quad (6)$$

$$w_3 = -u_1 \sin \varphi + w_1 \cos \varphi, \quad (7)$$

$$\varphi = \arctan(w_1 / u_1), \quad (8)$$

经过两次旋转后,  $\bar{v} = 0, \bar{w} = 0$ . 此时已经基本消除了平均垂直风速不为零对通量结果的影响, 其风速仪在新平面的方向与最初的方向有关. 虽然此时经向的平均风速和垂直平均风速等于零, 但他们的协方差不一定为零. 为了避免这种模糊现象可能对动量计算产生的影响, McMillen 建议再进行一次旋转, 即第 3 次旋转, 使得  $\overline{vw} = 0$ , 其计算公式如下:

$$u_3 = u_2, \quad (9)$$

$$v_3 = v_2 \cos \psi + w_2 \sin \psi, \quad (10)$$

$$w_3 = -v_2 \sin \psi + w_2 \cos \psi, \quad (11)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left[ \frac{2v_2 w_2}{v_2^2 - w_2^2} \right], \quad (12)$$

经过 3 次坐标转换后,  $\bar{v} = 0, \bar{w} = 0, \overline{vw} = 0$ . 此时, 在新坐标系统中, 物理量(标量) $s$  的协方差的普遍表达式为:

$$F_{DR} = \overline{w_2' s'} = -\sin \phi \cos \theta \overline{u' s'} + \sin \phi \sin \theta \overline{v' s'} + \cos \phi \overline{w' s'}, \quad (13)$$

$$F_{TR} = \overline{w_3' s'} = (\sin \theta \sin \psi - \sin \psi \sin \phi \cos \theta) \overline{u' s'} - (\sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \theta \sin \psi) \overline{v' s'} + \cos \phi \cos \psi \overline{w' s'}, \quad (14)$$

其中, 下标 DR(Double Rotation)表示是经过两次旋转后的结果, 下标 TR(Triple Rotation)表示是经过 3 次旋转后的结果, 方程式右边的平均协方差是由仪器直接得到的最初结果.

### 1.2 平面拟合(Planar Fit, PF)方法

上面介绍的方法目前比较通用, 由于旋转后的结果要求每个数据段的平均垂直风速都为零, 所以, 旋转后的  $x$ - $y$  平面是一个动态变化的平面. Steve Stage 在 1997 年提出了一种叫做平面拟合(Planar Fit, PF)的方法<sup>[19]</sup>, 该方法特别适合在下垫面和仪器倾角相对稳定的情况. 该方法的基本思路是: 根据一段时间的观测资料, 通过数学和统计方法找到(拟合)一个新平面, 在该平面上, 平均垂直风速可以表达为经向和纬向水平风速的函数, 并且新的垂直风速平均值为零. 最后真正的通量和 3 个方向上的协方差为一个固定的函数关系. 图 1 给出了一个在坡地上进行坐标旋转和拟合平面的示意图.  $OXY$  是水平面,  $OZ$  与  $XOY$  平面垂直, 箭头指示风向.  $X_1O_1Y_1$  平面是通过拟合得到的一个平面(一般情况下平行于坡地表面平均状

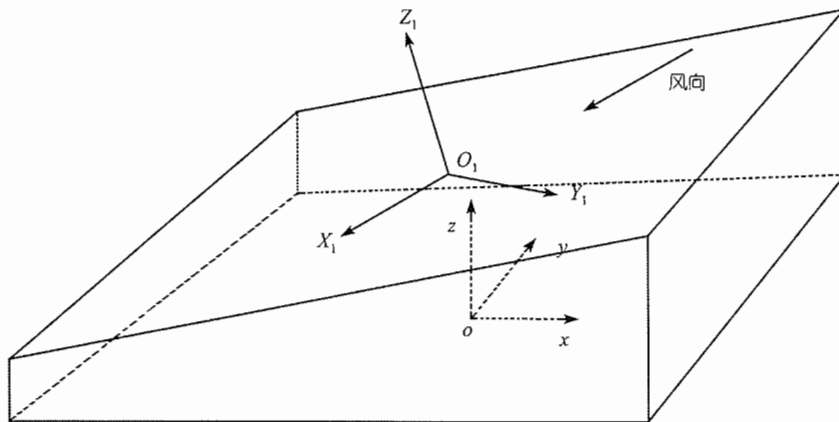


图 1 坐标旋转和平面拟合示意图

况,但对于复杂下垫面,这个平面就很难满足各种情况),  $O1Z1$  与  $X1O1Y1$  平面垂直,  $O1X1$  方向是在新坐标系统中的水平风向。

现假定超声风速仪严格垂直地安装在一个均匀的坡地上,由于气流在近地层受到地形的影响而沿着地表面运动而产生变形,这样仪器本身就可能观测到一个比较大的垂直气流。如果忽略仪器的零点偏差和随机误差,平均垂直风速  $\bar{w}$  可以表示为水平风速  $(\bar{u}, \bar{v})$  的线性关系函数。

$$\bar{w} = b_0 + b_1\bar{u} + b_2\bar{v}, \quad (15)$$

式中,  $b_0$ ,  $b_1$  和  $b_2$  是回归系数。现在简单的介绍如何根据部分风速资料求出这 3 个系数。为了求出公式(15)中的系数,必须使得下列函数  $S$  的值达到最小

$$S = \sum_{i=1}^n (\bar{w}_i - b_0 - b_1\bar{u}_i - b_2\bar{v}_i)^2, \quad (16)$$

这里,  $\bar{u}_i$ ,  $\bar{v}_i$  和  $\bar{w}_i$  是用三维超声风速仪测定的某个时间段(如 30 min)的 3 个方向的平均风速。现分别对 3 个系数( $b_0$ ,  $b_1$  和  $b_2$ )求微分,并且令其为零,那么:

$$\begin{aligned} nb_0 + \left(\sum \bar{u}_i\right)b_1 + \left(\sum \bar{v}_i\right)b_2 &= \sum \bar{w}_i, \\ \left(\sum \bar{u}_i\right)b_0 + \left(\sum \bar{u}_i^2\right)b_1 + \left(\sum \bar{u}_i\bar{v}_i\right)b_2 &= \sum \bar{u}_i\bar{w}_i, \\ \left(\sum \bar{v}_i\right)b_0 + \left(\sum \bar{u}_i\bar{v}_i\right)b_1 + \left(\sum \bar{v}_i^2\right)b_2 &= \sum \bar{v}_i\bar{w}_i, \end{aligned} \quad (17)$$

这里  $n$  是样本数。根据一定时间的资料(一般用 5~10 d 资料即可,基本要求是其中含有各种风向的风速),通过解线性方程组就可以求出 3 个回归系数 ( $b_0$ ,  $b_1$  和  $b_2$ )。一旦  $b_0$ ,  $b_1$  和  $b_2$  被确定,用 PF 校正后的通量值可以用下列公式计算:

$$F_{PF} = \bar{w}_p' s' = p_{31} \bar{u}_m' s' + p_{32} \bar{v}_m' s' + p_{33} \bar{w}_m' s', \quad (18)$$

这里,  $w_p$  是在新平面上的垂直速度,  $P_{31}$ ,  $P_{32}$  和  $P_{33}$  可以用下列各项公式计算:

$$\begin{aligned} P_{31} &= -b_1 / \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}, \\ P_{32} &= -b_2 / \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}, \\ P_{33} &= 1 / \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}. \end{aligned} \quad (19)$$

## 2 观测站点和仪器状况

为了比较不同的坐标旋转方法对通量计算结果的影响,我们选择了 4 种不同的下垫面类型进行研究。

第 1 个点(记作“A”)是在中国科学院内蒙古草地生态系统研究站(IMGERS,CERN, ), 该站位于锡林郭勒草原( $43^\circ 30'N$ ,  $117^\circ 27'E$ , 1189 m), 仪器安装在一个典型的坡地地形上。平均坡度大约为  $10\sim 15^\circ$ 。观测点周围非常开阔,附近没有任何建筑。第 2 个点(“B”)是在中国科学院禹城综合试验站农田上,该站位于华北平原( $36^\circ 57'N$ ,  $116^\circ 36'E$ , 28 m)。所选用数据是在小麦生长旺季观测的(2003 年 3~5 月)。第 3 个点(“C”)位于中国科学院长白山森林生态系统试验站,观测塔位于  $42^\circ 24'9''N$ ,  $128^\circ 05'45''E$ , 海拔 761 m, 塔高 61.8 m。长白山观测塔附近的植被是以红松为主的红松阔叶混交林,平均树高 26 m。该观测点相对平坦,涡度相关系统安装在 50 m 高度。第 4 个点(“D”)位于中科院千烟洲红壤丘陵试验站( $26^\circ 44'N$ ,  $115^\circ 04'E$ , 100 m)。该站植被属于中亚热带常绿阔叶林带,主要为人工林和灌丛次生植被。站区相对的高差为 20~50 m,地形属于平缓的丘陵地带。在这 4 个观测点中,该观测点的下垫面是最不规则的,起伏比较大。

4 个点使用的主要仪器是相同的,包括开路涡度相关系统(OPEC),由三维超声风速/温度仪(CSAT3, Campbell Sci. Co., 美国)和  $H_2O/CO_2$  分析仪(Li-7500, Li-Cor Co., 美国)共同组成。除此之外,我们还进行了一些辅助观测,如空气温湿度(HMP45C, VAISALA Co., 芬兰),风速(A100R, Vector Ins, 英国),地表温度(TCAV, CS 107, Campbell Co., 美国)和土壤湿度(TDR, CS615L, Campbell Co., 美国)。净辐射是用 4 分量法测量和计算的(CNR1, KIPP 和 ZONEN, 荷兰),两个土壤热通量板(HFP01SC, Hukseflux, 荷兰)被埋在 3 cm 深度之下。用于记录涡度相关系统原始观测数据的采集器是 CR5000(Campbell Sci. Co., 美国),采样频率是 10 Hz,平均时间是 30 min。 $CO_2$  通量和潜热通量都利用采集器实时进行了 WPL 校正<sup>[20]</sup>。

## 3 结果和讨论

### 3.1 3 次坐标旋转法在不同下垫面对通量结果的影响

目前,3 次坐标旋转法(TR)被认为是最好的方法之一,并且得到了广泛地应用<sup>[19]</sup>。在本研究中,所有用其他方法得到的结果将会与它相比较。图 2 比较了

用TR方法校正的感热和潜热之和 $(H+LE)_{TR}$ 与没有进行任何坐标旋转(NR)的 $(H+LE)_{NR}$ 的结果。很显然, TR方法对通量的修正效果在4种不同的下垫面上的表现是不同的。在草原坡地上(图2(a)), 用TR方法修正的通量与没有进行坐标旋转的通量之间有很大区别。其修正量大约介于未修正通量的 $\pm 20\%$ 。 $(H+LE)_{TR}$ 整体上是比 $(H+LE)_{NR}$ 偏大。对于禹城相对平坦的农田表面(图2(b)), 经过3次旋转修正的通量 $(H+LE)_{TR}$ 和没有进行坐标旋转修正的通量 $(H+LE)_{NR}$ 的差别是很小的, 以致于它们之间的差别可以忽略。所有的数据几乎都分布在1:1线附近。长白山站(图2(c))和千烟洲站(图2(d))的下垫面都属于森林, 其中前者比后者的地形要平坦的多, 表现在对通量的修正结果上两者也是有区别的。和禹城有点类似, TR方法对通量的校正正在长白山站表现的不明显。而千烟洲站由于地

形比较复杂, 不同风向来的风对垂直风速的贡献大小就很不一样, 所以 $(H+LE)_{TR}$ 和 $(H+LE)_{NR}$ 有很大的差别, 虽然总体上数据是分布在1:1线附近, 但数据点比较离散。根据以上给出的订正公式可以看出, 修正量可以是正值, 也可能是负值, 这主要与下垫面地形的坡度、坡向、风速和风向等因素有关。

### 3.2 倾斜角和风向之间的关系比较

如果垂直方向上的超声风速仪与地平线垂直, 而地面并非水平, 那么水平气流将会在地面附近被扭曲, 并且它将会生产一个与地平线相垂直的分量。该分量方向(向上的或向下的)和大小取决于水平风向和风速。图3是根据4个站的资料计算的倾斜角(即旋转后新的平面与地平线的夹角)与风向的变化情况。在坡地表面(图3(a))之上, 两者之间的变化式样呈现

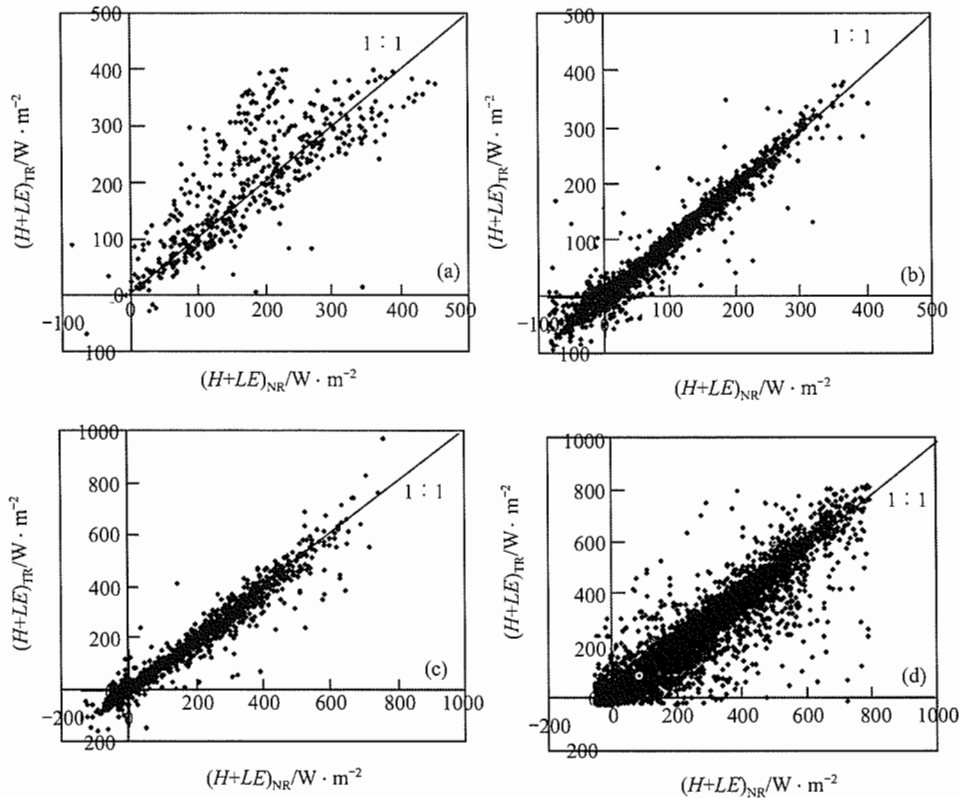


图2 用3次坐标旋转法修正的感热和潜热通量之和 $(H+LE)_{TR}$ 与没有进行坐标旋转法修正的 $(H+LE)_{NR}$ 在4个不同的观测点的作用之比较

(a) 内蒙古草原站; (b) 禹城农田站; (c) 长白山森林站; (d) 千烟洲森林站

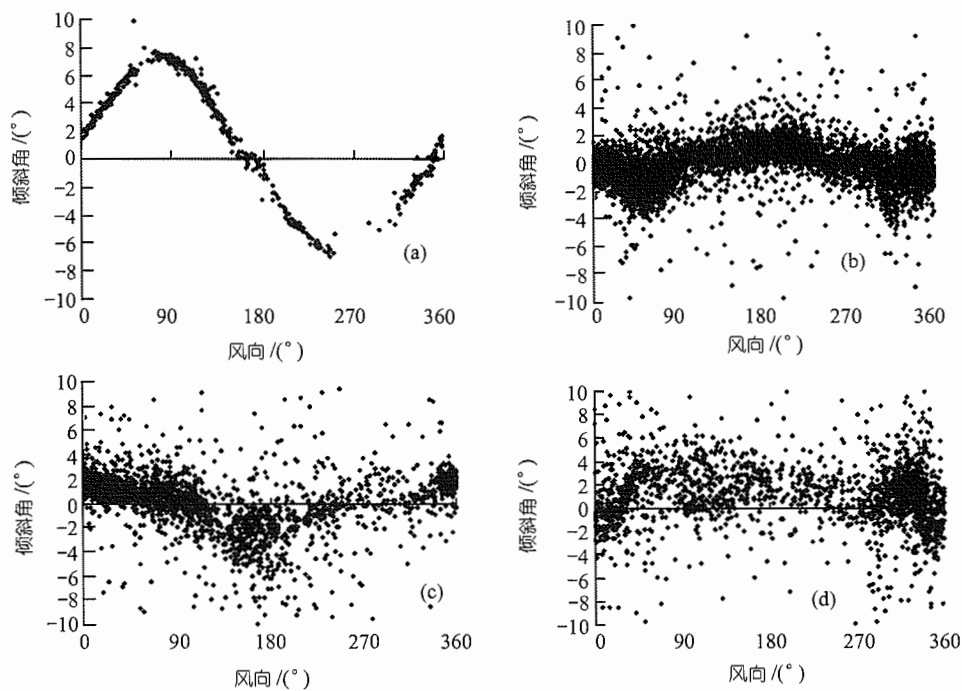


图 3 4 个观测点的倾斜角和风向之间的关系  
(a) 内蒙古草原站; (b) 禹城农田站; (c) 长白山森林站; (d) 千烟洲森林站

出一个完全的正弦曲线关系,如图 3(a)所示,其最大的倾斜角大约有 $\pm 8^\circ$ 左右.出现这种现象的主要原因是该坡地比较规则,而且坡度也比较大,不同方向的来风在地面的作用下,产生明显的变形,从而产生一个明显的垂直气流,其垂直风速和风向与水平风速和风向有明确的关系.对于平坦的禹城农田(图 3(b))来说,两者的正弦关系不是很明显,但仍然可以看出他们之间有一定的关系,最大倾斜角也只有 $\pm 2^\circ$ 左右.倾斜角与风向的关系在两个森林站点中也不是很清晰.主要的原因可能是:(i)由于森林树冠形成的下垫面变化不规则,并且树冠本身有一定的柔性,所以不同方向的来风受树冠影响而产生的变形也不规则;(ii)超声风速仪的安装高度普遍比较高,水平气流受树冠的影响而产生的垂直速度分量也会随着高度的增加而削弱.

### 3.3 PF 方法对垂直速度的校正效果

根据分时段独立旋转的理论假设,用 2 次或 3 次坐标旋转后的垂直风速在某一时间段内(例如, 30

min)总是等于零.然而,用 PF 拟合方法得到的是一个平均的平面,在这个平面上,更长时段的平均垂直风速应等于零(其时段长短与选择参与回归计算的数据情况有一定的关系),但具体到某一个时间段(例如, 30 min),校正过的垂直风速一般要小于没有经过校正的数值,但并不一定完全等于零.图 4 是两个站的垂直风速在经过 PF 校正前后的比较.在草原站(4(a)),未做校正的垂直风速变化幅度相对较大,这是因为坡度比较大,水平风速被强行扭曲变形的程度也比较大,从而形成较大的垂直分量.在经过 PF 订正后,校正后的垂直风速非常接近于零.这是因为该观测点地形比较规则,拟合平面与实际坡面很吻合,所以校正的效果比较明显.然而,在千烟洲站,用 PF 方法对垂直风速的校正效果就不是很明显,修正后的垂直风速变化仍然比较大(图 4(b)).出现这种结果的主要原因可能是:由于观测点附近的地形变化比较复杂,很难找到一个平面,使得在该平面上不同风向的风都能很好的校正.即使通过数据拟合出了一个平面,其使用效果也不好.

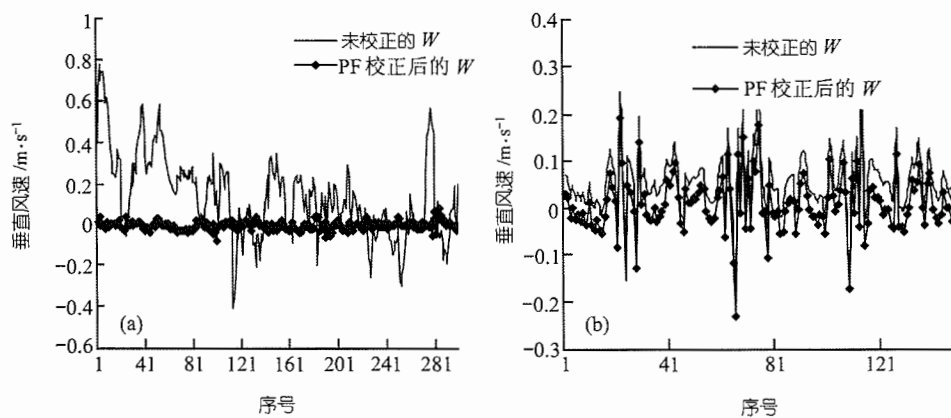


图4 垂直速度在用 PF 方法校正前后的对比

(a) 草原站; (b) 千烟洲站

### 3.4 3种方法校正后的通量比较

图5显示的是4个站 $\text{CO}_2$ 通量在经过2次旋转和3次旋转后的比较。虽然DR和TR方法很相似,其差别在所有的点中都存在。总体上看,经过DR方法修正的通量比TR更小,尤其在坡地表面(5(a))表现的更明显,其两者之间的斜率在草原站明显要比其他站点的值小(0.922),数据也很离散( $R^2=0.6236$ ),表明一致性不好。在相对平坦的农田(5(b)),两种方法校正的结果之间没有大的差别,其斜率接近于1,其相关系数也很高( $R^2=0.9492$ )。与草地和农田相比,在两个森林观测点(5(c), 5(d))中,两种方法的差别是介于中间的,不过总体上看,两者之间没有明显的差别(斜率接近于1),但每组数据之间的差异在千烟洲表现的更明显,离散度比较大。

图6显示的是 $(H+LE)$ 在经过TR方法和PF方法校正后的结果比较。与上面的结果相比,经过TR方法和PF方法校正后的通量在坡地草地上表现的也非常一致6(a),相关系数 $R^2$ 非常接近于1,斜率也几乎等于1,它表明PF方法应用于该观测点是适合的。对于比较平坦的禹城农田来说,用PF方法校正后的通量与用TR方法校正后的通量之间的关系也很好6(b),斜率和相关系数的值都非常接近于1。由于该观测点下垫面很平坦,结合前面的比较我们发现,其任何方法的校正量都非常小,PF方法也不例外,所以,任何

方法(包括不进行校正)得到的结果都很一致。在长白山点6(c),用PF方法校正后的通量和用TR方法校正后的通量之间没有总体上的差别(斜率接近于1),但两者之间的离散度比草原和农田的离散度略大(相关系数 $R^2=0.965$ ),总的来说是可以应用的。在千烟洲站点6(d)中,用两个方法订正的通量结果存在较大的差别。主要原因就是该站点的下垫面条件复杂,通过水平风速和垂直风速资料很难找到一个满意的平面。我们认为,在特别复杂的地形条件(例如,千烟洲)下,PF方法是不合适的,应该选择DR或TR方法。

## 4 结论

下垫面的非均匀性,超声风速仪的倾斜和其他因素都可能导致在观测的某一给定时间内(如,30 min)的平均垂直风速不等于零,而这种情况的出现会使得通量的计算结果出现误差。为了消除这方面的误差,以获得更加精确的通量数据,可以用坐标变换方法来消除这方面的影响,尤其是在坡地或不规则的下垫面。本文以4个站的观测资料为例,我们对不同方法的校正效果进行了比较。结果表明:(i)校正后的通量可能大于也可能小于未校正的通量值,其校正量的大小主要与坡度、风速和风向有关;(ii)校正后新的垂直风向倾斜角和风向之间表现出一种正弦关系,尤其在比较规则的坡地上,这种关系非常明显。(iii)平面拟合法(PF)可以看作是3次旋转方法的简

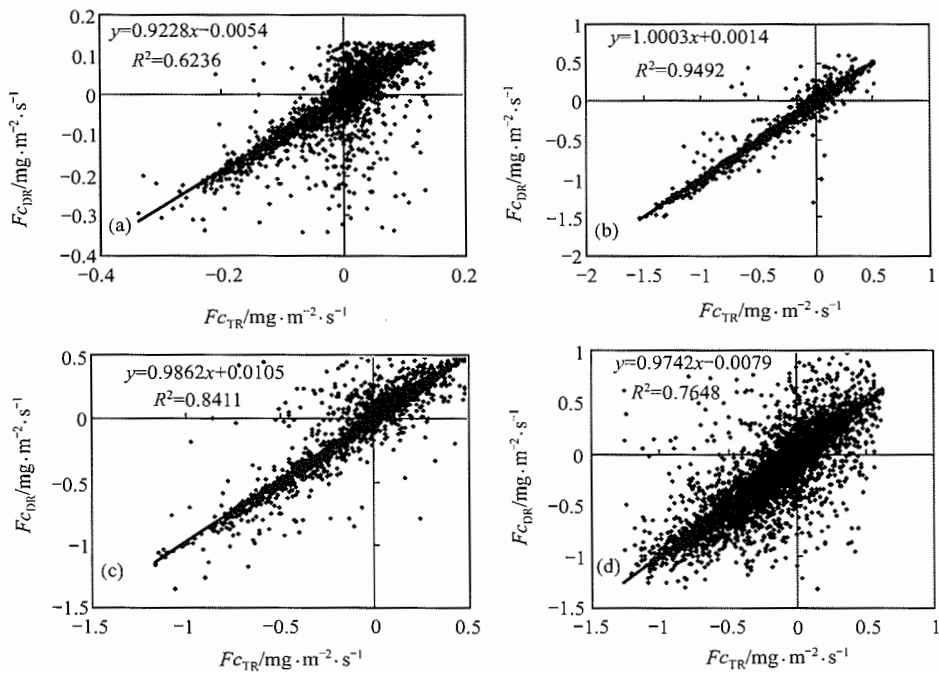


图 5 4 个站点 CO<sub>2</sub> 通量在经过 2 次旋转(DR)和 3 次旋转(TR)后的结果比较

(a) 内蒙古草原站; (b) 禹城农田站; (c) 长白山森林站; (d) 千烟洲森林站

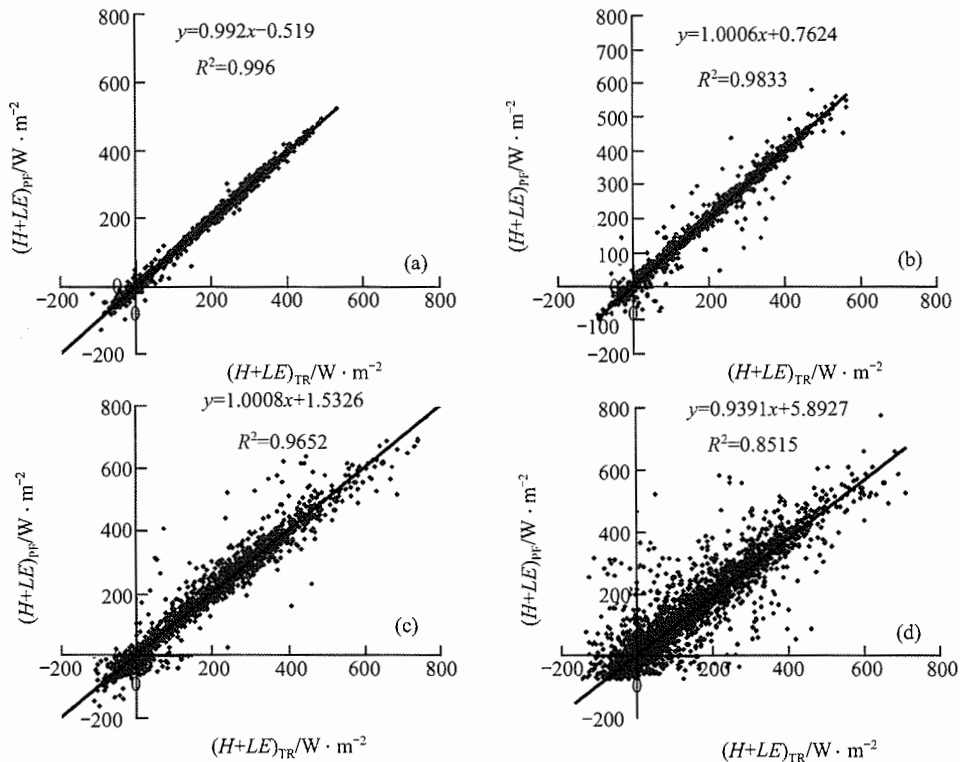


图 6 4 个站点  $(H+LE)$  通量在经过平面拟合法(PF)和 3 次旋转(TR)后的结果比较

(a) 内蒙古草原站; (b) 禹城农田站; (c) 长白山森林站; (d) 千烟洲森林站



化, 在比较规则和均匀的坡地和平地, 该方法使用效果比较好, 两者之间没有明显的区别。但是 PF 方法对于不平坦和复杂的森林观测点(例如, 千烟洲站)是不太合适的。

对于我们研究的 4 个站点中, 各种方法校正的效果是不一样的。内蒙草原站: 用 2 次旋转、3 次旋转和平面拟合 3 种方法得到的通量结果非常接近, 而与没有经过校正的通量值之间存在很大的差别, 这说明在该点的通量必须要进行坐标校正, 至于采用什么方法都是可以的, 其相互之间差别不大。对于下垫面比较平坦禹城观测点来说, 无论采用什么方法, 其结果与不经过任何校正的通量值都非常接近, 这表明在该地方可以忽略下垫面状况和仪器的安装情况对通量结果的影响。在长白山站点: 虽然下垫面相对比较平坦, 且仪器的安装高度比较高, 但毕竟下垫面是比较柔软的树冠层, 用不同的方法校正的结果是不一样的, 与未校正的值也有一定的差别, 建议该站用 3 次旋转(TR)方法校正通量数据。对于千烟洲观测点, 由于下垫面的复杂性, 用 PF 方法校正通量是不适当的, 3 次旋转(TR)方法校正是一个比较好的选择。总之, TR 方法是目前广泛使用的一种方法, 已经成为通量计算的常规校正方法, 平面拟合(PF)方法对于比较规则的下垫面也是一个很好的选择, 在草原坡地应用非常成功, 在森林观测站的应用效果不是很理想。

**致谢** 作者在此感谢禹城站, 长白山站, 千烟洲站和内蒙草原站为本研究提供了大量的观测数据。

### 参 考 文 献

- Houghton R A, Davidson A E, Woodwell G M. Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance. *Global Biogeochem Cys*, 1998, 12: 25~34.
- Black T A, Hartog G D, Neumann H H, et al. Annual cycles of water vapour and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest. *Global Change Biology*, 1996, 2: 219~229
- Lee X. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91: 39~49
- Berbigier P, Jean-Marc B, Patricia M. CO<sub>2</sub> and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 183~197
- Schulze E D, Wirth C, Heimann M. Managing forests after Kyoto. *Sciences*, 2000, 289: 2058~2059
- Baldocchi D 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. *Bull Am Meteor Soc*, 2001, 82: 2415~2434
- Eva F, Dennis B, Richard O, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107: 43~69
- Lee X, Fuentes J D, Staebler R M, et al. Long-term observations of the atmospheric exchange of CO<sub>2</sub> with a temperate deciduous forest in southern Ontario, Canada. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 15975~15984
- Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W, et al. Net exchange on CO<sub>2</sub> in a mid-latitude forest. *Science*, 1993, 260: 1314~1317
- Nobuko S, Susumu Y, Shohei M, et al. Gross primary production and net ecosystem exchange of a cool-temperature deciduous forest estimated by the eddy covariance method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 112: 203~215
- Takashi H, Ryuichi H, Yasumi F, et al. CO<sub>2</sub> and water vapor exchange of a larch forest in north Japan. *Tellus*, 2003, 55B: 244~257
- 王树森, 朱治林, 孙晓敏. 拉萨地区农田能量物质交换特征. *中国科学, D 辑*, 1996, 26(4): 359~364
- 朱治林, 孙晓敏, 张仁华. 内蒙古半干旱草原能量物质交换的微气象方法估算. *气候与环境研究*, 2002, 7(3): 351~358
- Zhu Z L, Sun X M, Zhang R H. Statistical Analysis and Comparative Study of Energy Balance Components Estimated Using Micrometeorological Techniques during HUBEX/IOP 1998/99. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(2): 285~291
- Wen X F, Yu G R, Sun X M, et al. Net water vapour exchange over a mixed needle and broad-leaved forest in Changbai Mountain during autumn. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 13(4): 463~468
- Massman W J, Lee X. Eddy covariance corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113, 121~144
- Kell W, Allen G, Eva F, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 223~243
- Kaimal J C, Haugen D A. Some errors in the measurement of Reynolds stress. *J App Meteorol*, 1969, 8: 460~462
- Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary Layer Meteorology*, 2001, 99: 127~150
- Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *J Roy Met Soc*, 1980, 106: 85~100

