

# 坐标旋转订正对农田林网水热通量 测算精度的影响

郑宁<sup>1,2</sup>, 张劲松<sup>1,2\*</sup>, 孟平<sup>1,2</sup>, 李岩泉<sup>1,2</sup>, 黄辉<sup>1,2</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;

2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

**摘要:**农田防护林的特殊结构使附近农田地表大气运动形成了特有的动力学和热力学效应,影响着周边物质和能量交换过程。坐标旋转订正方法的选择成为提高农田防护林水热通量测算精度的核心问题,选取2012年3月9日至5月7日共60 d的防护林网内农田的涡度相关观测数据,对相关湍流特征及能量闭合率等关键参数进行坐标旋转订正并进行比较,结果表明:(1)在整个试验过程中,采用平面拟合法进行坐标旋转时,当订正参数的计算周期小于15 d时,x-z平面内旋转角度有一定的波动,而在计算周期大于15 d后,则基本维持在 $-2.8^\circ$ 左右。采用二次旋转法订正的x-z平面内旋转角度受原始水平风向的影响始终很大;(2)2种坐标旋转方法对于三维风速的处理结果基本一致,在风速较大的情况下,需要考虑坐标旋转方法的选择对结果的影响。二次旋转方法订正后的垂直风速全部为零,平面拟合方法订正后的垂直风速接近于0;(3)平面拟合订正后摩擦风速基本与订正前一致,而二次旋转方法订正后的结果增大了将近5%;(4)平面拟合方法对显热通量及潜热通量的订正误差较小,二次旋转方法则分别将原始测得值提高了5%左右;(5)防护林网通量的能量闭合率经过平面拟合订正后提高了17%,而经过二次旋转法订正后则提高了30%。总之,坐标旋转方法可以对观测设备倾斜引起的误差进行订正,订正后的结果比订正前更精确。二次坐标旋转方法因为可以订正较短时间段内的单组数据,比较适用于下垫面情况变化较快时的观测;平面拟合方法适用于观测系统及其周围环境在整个测量过程中相对稳定时的观测。二次旋转方法对防护林网水热通量订正更好。

**关键词:** 农田防护林; 涡度相关法; 坐标旋转; 通量测算

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

## Effects of Coordinate Rotation on Precision of Heat and Latent Fluxes Estimating in Farmland Shelterbelts

ZHENG Ning<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin-song<sup>1,2\*</sup>, MENG Ping<sup>1,2</sup>, LI Yan-quan<sup>1,2</sup>, HUANG Hui<sup>1,2</sup>

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 2. Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

**Abstract:** The nearby farmland surface atmospheric motion forms the unique kinetic and thermodynamic effects by the special structure of shelterbelt. The unique effects contribute to the surrounding material and energy exchange process, so the selection of coordinate rotation method is the key to improve the accuracy of shelterbelts flux. This paper focuses on the effect of coordinate system on the eddy fluxes. Based on the data observed over the farmland shelterbelts in North China from March 9 to May 7 in 2012, the effects of two coordinate system transforming meth-

收稿日期: 2015-02-10

项目基金: 林业公益性行业科研专项项目(201204105); 国家自然科学基金项目(41105076)

作者简介: 郑宁(1981—), 男, 安徽芜湖人, 助理研究员, 主要从事林业气象研究. E-mail: realzheng7@126.com

\* 通讯作者: 研究员, 博导, 主要从事林业生态、林业气象研究. E-mail: cafzhangjs@263.com

ods (Double Rotation-DR, and Planar Fit-PF) on the turbulent fluxes were analyzed with the key parameters of the turbulence characteristics and energy closure rate. It showed that: (1) The planar fit method utilizing many runs data to get the rotation angle of the x-z plane was from  $-2.5^\circ$  to  $-3.0^\circ$  when the calculation period was less than 15 days, and the angle almost kept invariant when the calculation period was more than 15 days. The rotation angle of the y-z plane was  $0.15^\circ$  during the experiments. The rotation angle of x-z plane with double rotation method was mainly determined by original horizontal wind. The change of the rotation angle was relatively large. (2) The composed velocities corrected by the two methods were almost the same; but the vertical velocities corrected by the two methods were different, and the vertical velocity corrected by double rotation methods was zero and that corrected by planar fit method was close to zero but unequal to zero. When the wind speed was large, it needed to consider the impact of selecting coordinate rotation method of the results. (3) It reflected the true vertical velocity after correction by planar fit method. The friction velocity corrected by the planar fit method was almost as the same as the corresponding result without correction individually, and those derived from double rotation method were 105% of the corresponding result without correction. The relative differences of friction velocities corrected by the two methods were investigated. The result showed that the stress correction error caused by double rotation method increased with the decreasing of velocity because of the mean velocity and the lateral stress sampling errors; (4) The heat and latent fluxes corrected by double rotation method were 106% and 104% of the corresponding result without correction individually, and those derived from Planar fit method were almost as the same as the corresponding result without correction. (5) The energy closure rate of shelterbelt corrected by the planar fit method was improved by 17% compared with the corresponding results without correction, and that derived from double rotation method was improved by 30% compared with the corresponding result without correction. In a word, the errors and uncertainties caused by the tilting observation device could be corrected with the effects of two coordinate system transforming methods. The double rotation method was suitable for the observation period with situation of underlying changed rapidly, and the planar fit method was suitable for observation period that the observing system and its surrounding environment was relatively stable throughout the measurement process.

**Key words:** farmland shelterbelts; eddy covariance method; coordinate rotation; flux calculation

地气之间水热通量交换过程主要是湍流运动交换过程,直接与大气湍流结构、空气动力学特征等有关<sup>[1-2]</sup>。目前,国内外不同类型地表与大气间能量、物质等交换过程的研究普遍使用涡动相关通量观测系统(Eddy covariance method)进行观测<sup>[3-4]</sup>。由于农田防护林的特殊结构改变了地面粗糙度,使防护林带附近农田地表大气运动形成了特有的动力学和热力学效应,影响着周边物质和能量交换过程<sup>[5]</sup>。因此,了解林带附近农田地表大气运动特征,提高农田防护林水热通量的测算精度,对于加强农田防护林的经营管理,提升防护林的生态功能具有重要意义。涡动相关法最大的优点是可以快速直接测算通量,但是对仪器的安装要求非常严格<sup>[6]</sup>,当仪器的安装方向相对于地形坐标倾斜角度达到 $1^\circ$ 时将会导致 $2\% \sim 10\%$ 的观测误差出现<sup>[7]</sup>。因此,在安装涡动相关系统时,必须尽可能保证三维超声风速仪的垂直方向与水平正交平面的误差减少到最

小<sup>[8]</sup>,但在实际地面观测中,大部分观测区域的地形条件是起伏非均匀的,复杂非均匀的下垫面条件以及由于安装及观测过程中水平校正的误差,将导致超声风速仪的垂直方向与气流的方向无法正交。此时,水平方向的风速将可能导致垂直风速的扰动并产生侧向应力扰动,从而使最后测算得到的通量存在偏差。要将这种偏差的影响降至最小,就必须通过坐标旋转变换使实际风速流动位于真实的坐标系中<sup>[9]</sup>。

目前,比较通用的坐标旋转算法有二次坐标旋转法(Double rotation, DR)<sup>[8,10]</sup>、三次坐标旋转法(Triple rotation, TR)<sup>[8,10]</sup>和平面拟合法(Planar fit, PF)<sup>[9,11]</sup>,相关研究主要集中在农田、草地和原始林地等地形条件相对平坦均匀的区域进行<sup>[8,10,12-16]</sup>。其中,Wilczak等<sup>[9]</sup>比较了二次坐标旋转与平面拟合法在订正过程产生的误差,并分析了两种方法适用的自然条件;朱治林等<sup>[13]</sup>利用中国通量网农田、草

原、森林等4种不同类型的观测数据分析发现,在非平坦、非均匀或由于仪器非垂直安装情况下,用涡动相关方法计算通量时可能会产生误差,需要订正,校正量的大小主要取决于地面的坡度、坡向、风速和风向;王少影等<sup>[17]</sup>通过比较绿洲与戈壁的观测数据研究发现,不同坐标旋转订正方法对最终的数据订正质量影响的,根本原因在于计算得到的摩擦风速与显热通量的差别;柳媛普等<sup>[18]</sup>在黄河源区研究发现,经过2次与3次坐标旋转订正后的感热通量差异不大;但经过3次坐标旋转之后的潜热通量较为离散,2次坐标旋转订正后的结果比较合理。农田防护林对区域气候有明显的影响,并形成特有的防护林生态系统边界层,由于观测条件限制,大部分研究仅局限于单条林带<sup>[19]</sup>或仅在林网上空非常有限的垂直高度范围内<sup>[20]</sup>,相关研究未见详尽文献报道。本研究结合往年物候期的观测资料,选取2012年3月9日至5月7日共60d的防护林网内农田的涡动相关观测数据,对防护林地表大气相关湍流特征及能量闭合率等关键参数进行坐标旋转订正并比较结果,选择最适合观测区域实际情况的坐标旋转订正方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与试验设计

试验区位于太行山南麓的国家林业局黄河小浪底森林生态系统定位研究站东北部的农田防护林试验地(河南省济源市谷杨树庄村)。试验地中心为35°06'N;112°39'E,平均海拔140m,试验地东西长约200m,南北长约400m,四周为2排杨树防护林环绕,树高约5m,试验期间试验地均种植小麦。试验区属于暖温带亚湿润季风气候,年平均气温12.4℃,全年日照时数为2367.7h,年平均降水量641.7mm。受季风气候的影响,降水季节性分配不均匀。5—9月平均降水量为438.0mm,占全年的68.3%。5—9月风向东北偏东、西南为主。

为了进一步检验不同的坐标旋转方法对能量闭合率的影响以及在复杂下垫面的适用情况,选择2011年7月15日至7月29日邻近森林生态系统观测区域内得到的通量资料进行比对分析。

### 1.2 主要观测设备

地表湍流是近地层大气流动的一个重要的物理特征。在试验观测中,观测的项目有三维风速、CO<sub>2</sub>密度、H<sub>2</sub>O密度和气温等气象要素随时间的脉动。

本研究采用的观测设备为涡动相关系统,安装在试验地中心位置。距离东西两边林带约100m,距离南北两边林带约200m。主要由Wind Master型三维超声风速/温度仪(Gill. Inc., UK)和快速响应的LI-7500型开路红外CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O分析仪(Li-Cor. Inc., USA)组成,安装高度距地面1.5m,在系统南北两侧地面3cm深处安装HFPO1型土壤热通量板各1块(Hukseflux. Inc., USA),距地面2m高处安装净NR Lite2型净辐射传感器(Kipp & Zonen. Inc., NL)。上述仪器均与CR5000型数据采集器(Campbell Sci. Inc., USA)相连,昼夜连续自动采集,其中,涡动相关系统的原始数据采样频率为10Hz,土壤热通量和净辐射的原始数据采样频率为1Hz,每30min输出1组平均值。

### 1.3 坐标旋转方法

1.3.1 二次旋转法(Double rotation,以下简称DR法) 根据各组数据的平均风速求得倾斜角度后旋转到各组对应的自然坐标系统中,采用该方法求解坐标旋转矩阵的方案称为二次或者三次旋转方法。由于三次旋转方法可能给通量结果计算等带来更大误差,已不推荐使用。二次坐标旋转算法的具体步骤如下<sup>[8][10]</sup>:

第1次旋转为x-y平面绕z轴旋转,使x-z平面与平均风向一致,平均 $v=0$ 。如测量的风速分量用下标 $m$ 表示,则新坐标系的各分量为:

x-y平面绕z轴旋转

$$\begin{cases} u_1 = u_m \cos\alpha + v_m \sin\alpha \\ v_1 = -u_m \sin\alpha + v_m \cos\alpha \\ w_1 = w_m \end{cases} \quad (1)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(\overline{v_m / u_m}) \quad (2)$$

第2次旋转为新的x-z平面绕y轴旋转,进而使平均 $w=0$ :

$$\begin{cases} u_2 = u_1 \cos\beta + w_1 \sin\beta \\ v_2 = v_1 \\ w_2 = -u_1 \sin\beta + w_1 \cos\beta \end{cases} \quad (3)$$

$$\beta = \tan^{-1}(\overline{w_1 / u_1}) \quad (4)$$

式中: $u_1, v_1$ 为第1次旋转后的水平风速; $w_1$ 为第1次坐标旋转后的垂直风速; $u_m, v_m$ 和 $w_m$ 分别为测量的水平风速和垂直风速; $\alpha$ 为x-y平面绕z轴旋转的角度; $u_2, v_2$ 为第2次旋转后的水平风速; $w_2$ 为第2次坐标旋转后的垂直风速; $\beta$ 为新的x-z平面绕y轴的角度。

至此,平均风速  $u = U_{mean} = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ ,并沿平均流线方向。

### 1.3.2 平面拟合法(Planar fit,以下简称PF法)

假定观测系统相对于自然坐标系存在一个固定的倾斜角度,这个角度可根据所有各组平均速度矢量回归计算得到,反过来求得订正矩阵。采用该方法求解坐标旋转矩阵的方案称为平面拟合法。

平面拟合法不是逐时段(30 min)分别旋转坐标系,而是对一个较长时期,设平均风场在一个与地面平行的平面(x-y平面)内,并确定此平面,然后将每一时次的  $u$ 、 $v$ 、 $w$  旋转到此平面上。此坐标系有时称地形跟随坐标系,包含了这一较长时段内多个风向情况,故而有更好的统计意义,且对逐次旋转可能造成的‘过量旋转’及信息丢失等有所改善。具体算法为<sup>[9-11]</sup>:

首先,确定一个时期(如一周或更长),计算旋转之前所有观测时次各风速分量的统计值如平均值等。在平面拟合坐标旋转后风矢量矩阵形式为:

$$\vec{u}_p = p(\vec{u}_m - \vec{c}) \quad (5)$$

式中:  $\vec{u}_m$  为测得风矢量,  $\vec{c}$  为超声仪的流动畸变引起的偏差量<sup>[21]</sup>。

各分量的平均量可写为,

$$\begin{cases} \vec{u}_p = p_{11}(\vec{u}_m - c_1) + p_{12}(\vec{v}_m - c_2) + p_{13}(\vec{w}_m - c_3) \\ \vec{v}_p = p_{21}(\vec{u}_m - c_1) + p_{22}(\vec{v}_m - c_2) + p_{23}(\vec{w}_m - c_3) \\ \vec{w}_p = p_{31}(\vec{u}_m - c_1) + p_{32}(\vec{v}_m - c_2) + p_{33}(\vec{w}_m - c_3) \end{cases} \quad (6)$$

旋转后的坐标系, x-y 平面与平均流线一致, z 轴与此平面垂直,  $w_p = 0$ 。

其次,用多变量线性拟合求  $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 。可得:

$$\begin{cases} nb_0 + (\sum \bar{u}_i)b_1 + (\sum \bar{v}_i)b_2 = \sum \bar{w}_i \\ (\sum \bar{u}_i)b_0 + (\sum \bar{u}_i^2)b_1 + (\sum \bar{u}_i\bar{v}_i)b_2 = \sum \bar{u}_i\bar{w}_i \\ (\sum \bar{v}_i)b_0 + (\sum \bar{u}_i\bar{v}_i)b_1 + (\sum \bar{v}_i^2)b_2 = \sum \bar{v}_i\bar{w}_i \end{cases} \quad (7)$$

解线性代数方程式(7)即可求得  $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ , 然后,由求得的结果据(6)式可得  $p_{31}$ 、 $p_{32}$ 、 $p_{33}$  等,再如(3)和(4)二式那样做二次旋转,进而求得:

$$\begin{cases} \sin\alpha = p_{31} \\ \cos\alpha = \sqrt{p_{32}^2 + p_{33}^2} \\ \sin\beta = -p_{32} / \sqrt{p_{32}^2 + p_{33}^2} \\ \cos\beta = p_{33} / \sqrt{p_{32}^2 + p_{33}^2} \end{cases} \quad (8)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 2种坐标旋转方法订正角度的比较

PF法需要观测系统及其外部环境参数在观测过程中相对固定不变,因此,需要一段比较长的周期进行订正参数的计算。为确定订正计算所需要的具体周期以及PF方法在本观测区域的适用性,分别利用5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60 d的三维风速数据来拟合出不同天数条件下的旋转角度。图1给出了旋转角度 x-z 平面内旋转角  $\alpha$ 、y-z 平面内旋转角  $\beta$  随不同试验天数变化的时间序列。由图1可以看出:在整个试验过程中,当订正参数的计算周期  $< 15$  d 时,  $\alpha$  有一定的波动,而在计算周期  $> 15$  d 后,  $\alpha$  基本维持在  $-2.8^\circ$  左右;同时  $\beta$  则基本上维持在  $-0.02^\circ$  左右。因此,当观测系统及其周围的环境在整个测量过程中均是固定不变时,PF法能够被采用。

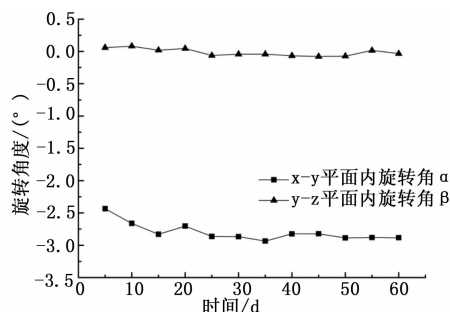


图1 平面拟合方法采用不同周期得到的旋转角度

DR法的初次旋转角度受分组数据的时间区段内垂直风速和水平风速的影响,同时该坐标旋转法首先把水平方向的风速旋转到与主风速方向一致,因而,初次的旋转角度受原始水平风向的影响很大。将研究时间段内60 d的湍流数据资料,以0.5 h为一组,分别进行坐标旋转,并将其初次旋转角度进行分类分析。由不同风速条件下旋转角度的风速风向玫瑰图(图2)所示:DR的 x-z 平面内旋转角度对于每一组数据都有所不同,当主要平均风速大于  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,旋转角度在  $0^\circ$  至  $90^\circ$  之间,与观测区域生长季东北-西南的主风向基本一致,随着风速的减小,旋转角度开始变化到  $-90^\circ$  至  $0^\circ$  的区间内。可见由于DR的角度受实时风速的影响较大,对各组旋转角度有很大影响,波动明显,在复杂下垫面条件下,对于时间尺度较短(小时、单日)的数据分析影响不大,但是对整个观测系统的长时间(月、年)的数据分析采用平面拟合方法更加合适。

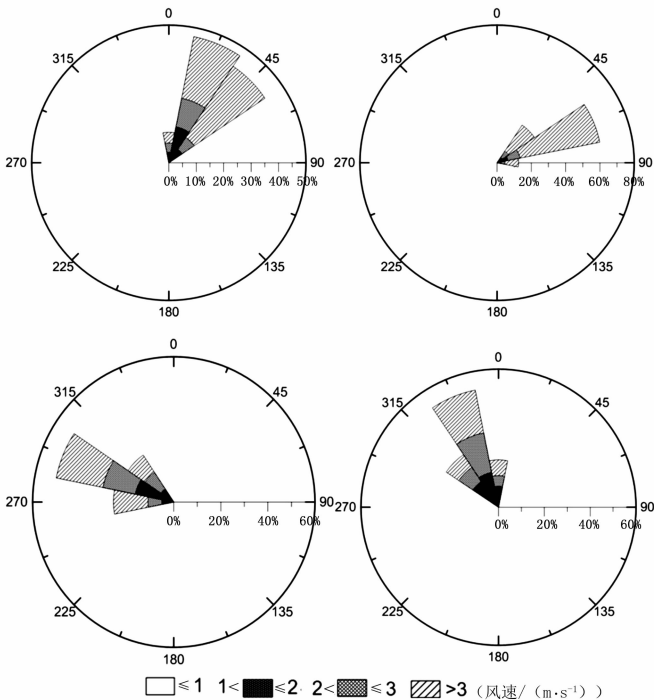


图2 二次坐标旋转角度与风速统计示意图

(横坐标表示图例中4组风速所占的比例,外圈表示旋转角度)

## 2.2 两种坐标旋转方法订正主要湍流参数的比较

2.2.1 合成风速及垂直风速的比较 订正后的三维风速将全部合成为主风向风速,比较两种方法订正后的三维风速,如图3所示,DR和PF法订正得到的主风向风速( $U_{DR}$ 与 $U_{PF}$ )相关性较好。可见,在2个月的时间尺度上,2种坐标方法对于三维风速的处理结果基本一致,相关系数基本为1;但同时由图3可知,在风速较大的情况下,2种方法处理结果出现离散,并且离散的程度随着风速的加大而逐渐增加。可见,在风速较大的情况下,需要认真考虑坐标旋转方法的选择对结果的影响。

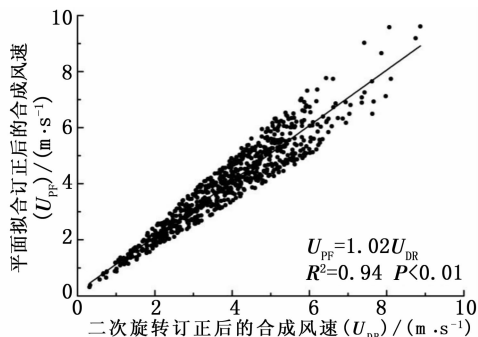


图3 平面拟合后的合成风速( $U_{PF}$ )与二次旋转订正得到的合成风速( $U_{DR}$ )对比

经过DR后侧向平均风速 $v$ 与垂直风速 $w$ 全

部变成0,但是经过PF订正后的垂直风速则与DR法处理后的不同,图4给出了PF订正前垂直方向平均风速( $\bar{U}_w$ )与订正后垂直方向风速( $\bar{U}_{WPF}$ )的变化情况,图4中的实线表示仪器系统误差 $b_0 = -0.047 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,虚线为订正前垂直风速的主要波动范围。如图4所示,经过PF方法对垂直风速有一定的校正效果,经过订正后垂直风速基本在 $\pm 0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间波动,主要是由于本研究的实验区是处于防护林带中的农田下垫面,具有特有的防护林生态系统边界层,拟合平面与实际坡面有一定的差异。朱治林等<sup>[13]</sup>同样发现,草原站地形比较规则,经过PF订正后,垂直风速非常接近于零;在森林站,由于观测点附近的地形变化比较复杂,校正效果不明显,修正后的垂直风速变化仍然比较大。

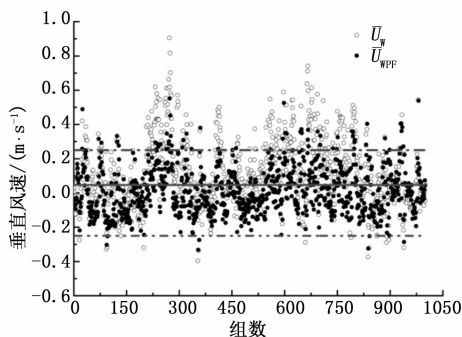


图4 平面拟合方法订正前后平均垂直风速( $w$ )的各组变化图

2.2.2 摩擦风速的比较 摩擦风速是反映湍流通量动量的关键参数,下面分析比较2种方法对于摩擦风速的订正结果。由前面的研究结果发现,DR法针对的是单组数据的订正,结果变化幅度较大;PF法则是建立在系统及其周围的环境关键参数在测量过程中固定不变的条件下,针对实际存在的倾斜角度进行统一订正。由订正前后摩擦风速的相关关系图(图5)可知:PF订正后摩擦风速变化不大,基本与订正前一致,相关系数接近1,而DR法订正后的结果比原始数据增加将近5%。

为了进一步分析2种方法在复杂下垫面条件下对摩擦风速订正的影响,采用相对差变量  $Diff_{corr-mean} = ((u_{*corr} - u_{*meas}) / u_{*meas})$  来比较订正前后的计算结果差异,其中, $u_{*corr}$ 表示订正后得到的摩擦风速的0.5 h平均值, $u_{*meas}$ 表示由观测值直接得到的摩

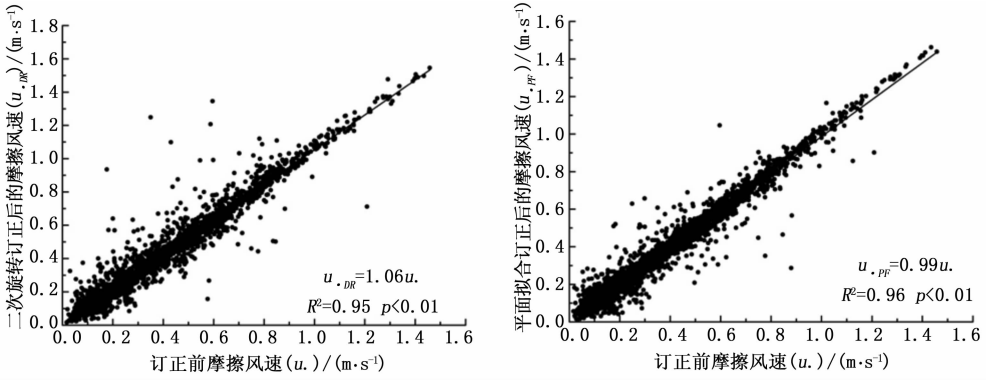


图5 二次坐标旋转方法(左)和平面拟合方法(右)订正后摩擦风速( $u_{DR}$ 、 $u_{PF}$ )与订正前摩擦风速( $u_*$ )的相关分析

擦风速的0.5 h 平均值。2 种方法订正后摩擦风速相对差(Diff\_DR、Diff\_PF)的比较(图6)可知:PF 法订正后结果相对差的绝对值及离散程度相对较小。由于侧应力的存在,2 种方法订正前后的摩擦风速相对差都会出现较大的离散值,DR 法相对差在  $\pm 1\%$  以内占 95.5%,少数几个点达到 2% 以上,所有各组数据平均后为 0.1%,PF 法相对差在  $\pm 1\%$  内占 99.4%,少数几个点达到 1.5% 以上,平均值仅为 0.03%。结合图5 可以看出:随着风速的增大,二者间的相对差明显减小,也就是说它们订正结果差异随着风速的增大而减小,说明经过 DR 订正后的平均垂直风速和侧向应力都受到样本误差的影响,当风速较小时,DR 产生的样本误差也就越大,同时说明 PF 法几乎不受样本误差的影响,由此出现经过两种坐标旋转方法订正后的应力差异随风速的增大而减小。

2.2.3 订正前后水热通量及能量闭合率的对比  
湍流通量观测中与能量平衡密切相关的就是显热通量( $H$ )与潜热通量( $LE$ )。由图7 可知:PF 法对显热

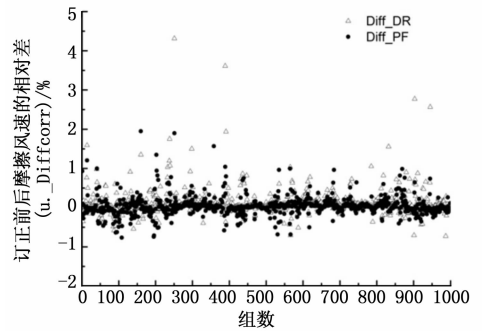


图6 二次旋转方法( $\Delta$ )和平面拟合方法( $\circ$ )订正后摩擦速度与订正前摩擦风速间相对差的( $u_{*} \text{ Diffcorr}$ )比较

通量及潜热通量的影响较小,基本上与原始测定值相似;DR 法对显热通量及潜热通量分别提高了 5% 左右。PF 法比 DR 法得到的通量结果要小,这主要是由于在复杂下垫面条件下,当仪器架设方向相对于地形发生倾斜时,水平方向的风速将导致仪器测得虚假的垂直热量通量产生,PF 法针对于实际存在的倾斜角度进行统一订正,这部分通量更容易被发现剔除,得到的通量结果自然比 DR 得到的结果小。

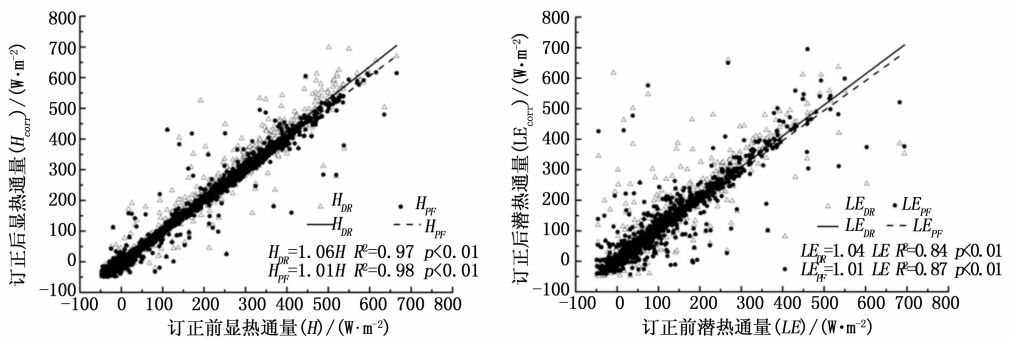


图7 二次旋转方法( $\Delta$ )和平面拟合方法( $\circ$ )订正后的感热通量(左图)、潜热通量(右图)与订正前值的相关分析(实线为二次旋转方法的拟合曲线,虚线为平面拟合方法的拟合曲线)

能量平衡闭合率(观测得到的显热( $H$ )与潜热通量( $LE$ )之和与净辐射( $Rn$ )与土壤热通量( $G$ )之差的比值)作为通量观测数据评价的一个重要参考指标<sup>[22]</sup>,备受通量界研究者的重视。由处理前后能量闭合率(图8)可知:原始数据的能量闭合率只有约50%,这主要是因为选择的农田生态系统位于防护林网内,大气运动状态相对复杂。能量闭合经过PF法处理后,提高了17%,而经过DR法订正后提高了30%。可以明显发现,由于农田防护林的特殊结构改变了地面粗糙度,使防护林带附近农田地表大气运动形成了特有的动力学和热力学效应,影响着周边物质和能量交换的过程,整个观测系统以及

周围环境无法处在一个长期固定的环境中,因此PF法不太适用于防护林网内的农田生态系统<sup>[23]</sup>。由图10可知:森林生态系统的能量闭合经过PF法处理后,提高了20%,而经过DR法订正后仅提高了8%。朱治林等<sup>[13]</sup>研究发现,在坡地草地和普通农田下垫面,用不同坐标方法校正后的通量之间的关系很好,在东北长白山原始森林下垫面,不同校正后的通量之间仍然没有总体上的差别,但离散度略大,在千烟洲森林下垫面下,由于通过水平风速和垂直风速资料很难找到一个满意的平面,PF方法是不合适的。可见,坐标旋转方法的选择主要依据下垫面的复杂程度,这与本研究的结果基本一致。

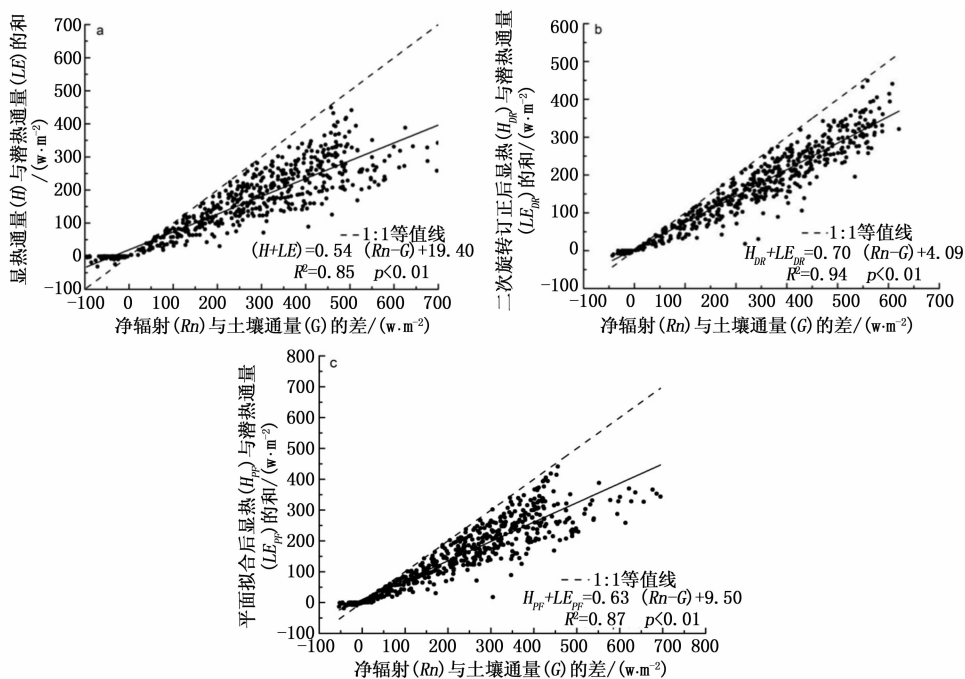


图8 二次旋转方法(b)和平面拟合方法(c)订正后与订正前(a)防护林内农田生态系统能量闭合率

### 3 结论与讨论

(1)DR法因为可以订正较短时间段内的单组数据,比较适用于生长较快的庄稼或草地上测量的数据订正,但短时间内垂直风速的平均样本误差订正容易引起倾斜角度订正误差,同时研究发现,在侧向张力较大的情况下适用DR法产生的误差较大。PF法要求整个测量过程中系统及其环境均固定不变,同时采用较长时间尺度的多组数据回归计算旋转角度,样本误差的影响小,但PF法无法对短时间单组数据进行订正,无法应用到下垫面情况变化较快的生态系统内。

(2)PF法对垂直风速的订正存在一个由于仪器误差、中尺度运动以及仪器扰流造成的偏差 $b_0$ ,因此,当对订正后的垂直风速进行平均后就会得到这个偏差值 $b_0$ 。由图9可知:与订正前原始垂直风速在 $-0.25 \sim 0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 波动的数据相比,PF法得到的平均垂直风速均匀分布在实线的两侧。当剔除由于固定仪器误差 $b_0$ ,由垂直风速与实际垂直风速的相关性分析可知(图9),PF法订正后的数据更均匀的分布在零值附近,说明PF法更能精确的反映并订正由于仪器安装倾斜引起的角度偏差。

(3)图10为2种坐标旋转方法处理前后森林生态系统能量闭合率,比较2种方法处理后的结果。

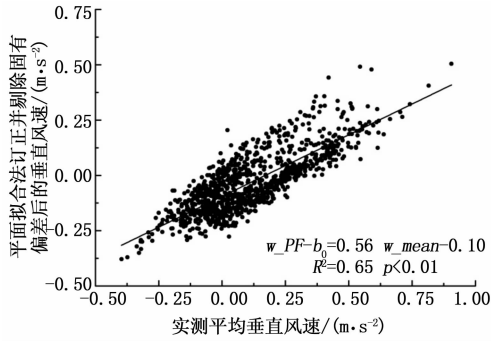


图9 平面拟合方法订正后的垂直风速剔除固有偏差后 ( $w_{pf} - b_0$ ) 与实测平均垂直风速 ( $w_{mean}$ ) 的相关分析

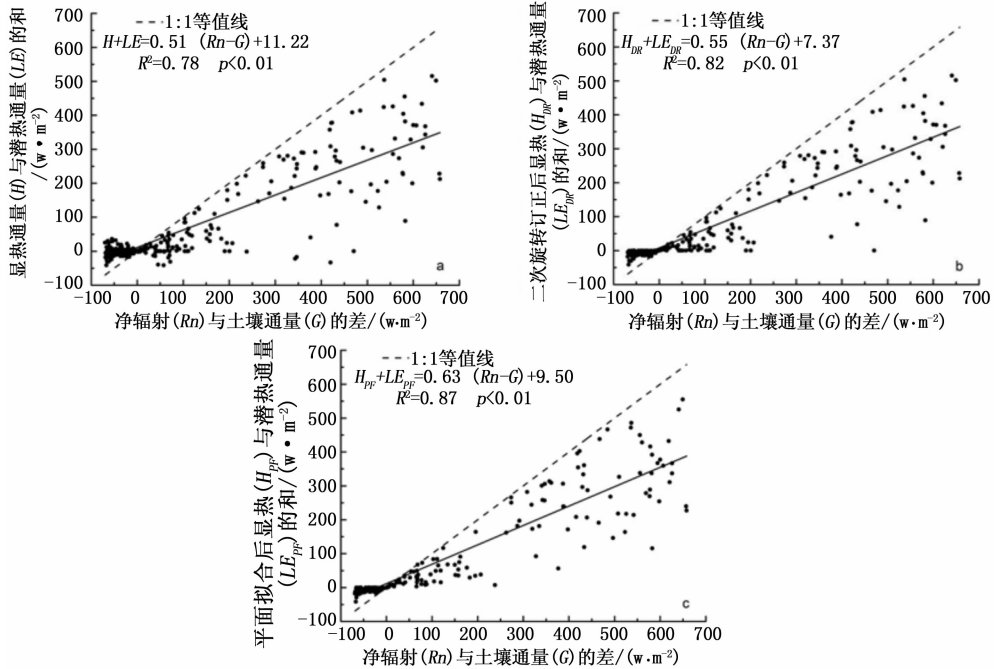


图10 二次旋转方法(b)和平面拟合方法(c)订正后与订正前(a)森林生态系统能量闭合情况

(4)关于坐标转换方法的选择,吴家兵等<sup>[14]</sup>认为,平面拟合坐标变换优于流线坐标变换,而朱治林等<sup>[13]</sup>则认为,其效果与观测点的坡度、坡向风速和风向等因素有关,对于特别复杂的地形条件PF旋转方法不适用;湛志刚等<sup>[16]</sup>指出,DR与PF法均可对仪器倾斜引起的误差进行坐标旋转订正,以及仪器倾斜时水平方向风速引起的虚假湍流流量,2种坐标旋转方法各有一定适用条件;而从本文的研究来看,PF后得到的摩擦风速相对略大,而显热通量、潜热通量则表现为DR后略大,这与朱治林等<sup>[13]</sup>的研究结果基本一致,但从本文中可以看到,对于农田防护林内的水热通量DR相对而言优于PF法,这一结果也与朱治林等<sup>[13]</sup>、湛志刚等<sup>[16]</sup>的结论相一致。

无论是森林生态系统还是农田生态系统,坐标旋转方法在数据处理方面对于消除能量闭合负面效应好于原始情况,由于农田生态系统相对平坦均一,湍流运动相对简单,坐标旋转订正数据后能量闭合提升效果明显;而森林生态系统的构成复杂,有通量观测源区、冠层能量储存等诸多影响能量平衡的因素存在,由于仪器的安装误差、中尺度运动以及仪器扰流造成的偏差只是其中的一个因素,要想提高复杂下垫面观测的能量平衡研究水平,还需要从诸多方面共同考虑研究。

#### 参考文献:

- [1] 刘式达, 梁福明, 刘式适, 等. 大气湍流[M]. 北京: 北京大学出版社, 2008: 50-56.
- [2] Foken T. Micrometeorology[M]. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008: 25-101.
- [3] 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(11): 2415-2434.
- [4] 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: 13-15.
- [5] 范志平, 曾德慧, 朱教君, 等. 农田防护林生态作用特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 130-133.
- [6] Ludi A, Beyrich F, Matzler C. Determination of the Turbulent Temperature-Humidity Correlation from Scintillometric Measurements[J]. Boundary-Layer Meteorol, 2005, 117(3): 525-550.



- [7] Kaimal J C, Haugen D A. Some Errors in the Measurement of Reynolds Stress[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1969, 8(3): 460-462.
- [8] Kaimal J C, Firmigan J J. *Atmospheric Boundary Layer Flows* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1994: 289.
- [9] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic Anemometer Tilt Correction Algorithms[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 2001, 99(1): 127-150.
- [10] Tanner, C B, Thurtell, G W. *Anemometer Measurements of Reynolds Stress and Heat Transport in the Atmospheric Surface Layer* [R], Madison: University of Wisconsin Technical Report, 1969: 82.
- [11] Paw U P K, Baldocchi D D, Meyers T P, *et al.* Correction of eddy-covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 97(1): 487-511.
- [12] Kaimal J C, Gaynor J E. Another look at sonic thermometry[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1991, 56(1): 401-410.
- [13] 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 China FLUX 中的应用[J]. *中国科学( D 辑)*, 2004, 34(增 II): 37-45.
- [14] 吴家兵, 关德新, 孙晓敏, 等. 长白山阔叶红松林 CO<sub>2</sub> 交换的涡动通量修订[J]. *中国科学( D 辑)*, 2004, 34(增 II): 106-115.
- [15] 王春林, 周国逸, 王 旭, 等. 复杂地形条件下涡度相关法通量测定修正方法分析[J]. *中国农业气象*, 2007, 28(3): 233-240.
- [16] 湛志刚, 卞根根, 陆龙骅, 等. 涡度相关仪倾斜订正方法的比较及应用[J]. *气象科技*, 2008, 36(3): 355-358.
- [17] 王少影, 张 宇, 吕世华, 等. 金塔绿洲湍流资料的质量控制研究[J]. *高原气象*, 2009, 28(6): 1260-1273.
- [18] 柳媛普, 李锁锁, 吕世华, 等. 几种通量资料修正方法的比较[J]. *高原气象*, 2013, 32(6): 1704-1711.
- [19] Heisler G M, Dewalle D R. Effects of windbreak structure on wind flow[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, 22-23: 41-69.
- [20] McAneney K J, Judd M J. Multiple windbreaks: An aeolean ensemble[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1991, 54(1-2): 129-146.
- [21] Dyer A J. Flow Distortion By Supporting Structures[J]. *Boundary-Layer Meteorol*, 1981, 20(1): 243-251.
- [22] Wilson K, Goldstein A, Falgec E, *et al.* Energy balance closure at FLUXNET sites [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1-4): 223-243.
- [23] 赵仲辉. 亚热带杉木林生态系统与大气间的碳通量研究[D]. 长沙: 中南林业大学, 2011.