

复杂地形条件下涡度相关法通量测定修正方法分析*

王春林^{1,2}, 周国逸¹, 王旭¹, 周传燕¹, 于贵瑞³

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 广东省气候与农业气象中心; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所)

摘要: 复杂地形条件下涡度相关法通量观测修正方法以及夜间净生态系统 CO₂ 交换通量 (NEE) 质量评价方法, 是世界范围内通量观测研究中的重大技术问题。本文以鼎湖山亚热带针阔叶混交林生态系统涡度相关法碳通量观测数据, 探讨典型订正方法对 CO₂ 通量估算的影响。主要结论有: 1) 基于流线坐标系统的二次坐标旋转 (DR)、三次坐标旋转 (TR) 和平面拟合坐标旋转 (PF), 均使得 CO₂ 通量 (Fc) 绝对值趋于变小, 变化幅度依次为: DR < PF < TR。坐标转换对 Fc 影响程度白天小于夜间, 冬季小于夏季, 冠层上方小于冠层下方。2) 冠层下方和冠层上方 CO₂ 通量合适的 u* 订正阈值分别为 0.05、0.2 m s⁻¹。3) 对于涡度相关通量观测中普遍存在的夜间 CO₂ 涡度通量偏低问题, WPL 订正没有帮助, 坐标转换甚至起到反作用, 冠层储存项订正在一定程度上减少夜间偏低程度, 但效果不显著; u* 订正可以明显减少夜间偏低幅度, 但估算结果与箱式法相比依然偏低。夜间涡度通量观测数据最好能结合箱式法观测结果进行校正。
关键词: 涡度相关; 碳通量; 鼎湖山; 针阔叶混交林

Analysis of Correction Method on Eddy Flux Measurement over Complex Terrain

WANG Chun-lin^{1,2}, ZHOU Guo-yi¹, WANG Xu¹,

Zhou Chuan-yan¹, YU Guirui³

(1. South China Botanical Garden, CAS, Guangzhou 510650, China; 2. Climate and Agrometeorological Center of Guangdong Province;

3. Institute of Geographical Science and Natural Resources Research)

Abstract: Based on the observation data of the flux measurement in the subtropical coniferous and broad-leaved mixed forest ecosystem in Dinghushan, the influence of the typical correction method on eddy flux estimates of carbon dioxide was analyzed. The main results were as follows: 1) By using all of the three coordinate system transforming methods of Double Rotation (DR), Triple Rotation (TR) and Planer Fit (PF), the absolute values of CO₂ flux (Fc) after terrain correction tended to be smaller than uncorrected values. Sequence order of changed Fc extend was DR < PF < TR. The influence of coordinate transforming on eddy flux was smaller in daytime than that in nighttime, smaller in winter than that in summer, and smaller above canopy than below canopy. 2) The appropriate corrected u* threshold of Fc below and above canopy were estimated as 0.05 m s⁻¹ and 0.2 m s⁻¹ respectively. 3) For the commonly problematic issue of underestimation of nighttime CO₂ Eddy flux, WPL correction contributed nothing, while coordinate system transforming even made further underestimation. The correction of the nighttime storage item (Fs) increased slightly, but not significantly. The u* correction of the nighttime Fc increased significantly, but still lower than that measured by chamber method. Nighttime Eddy flux measurement could be better corrected if chamber measurement was available and combined.

Key words: Eddy covariance; Carbon flux; Dinghushan; Coniferous and broad-leaved forest

涡度相关法是目前通量测定中最直接的、理论与技术上发展最为迅速的一种微气象学方法, 在全球通量网 (FLUXNET) 包括中国通量网 (ChinaFLUX) 不同陆地生态系统的物质与能量交换研究中得到广泛应用^[1]。随着研究结果的相继报道, 涡度相关法在观测条件相对复杂的森林中出现的问题也引起了生态学家与微气象学家的广泛关注。首先, 夜间涡度相关法观测结果比箱式法测定或模型模拟结果普遍低估 20% ~ 42%^[2], 这种夜间 CO₂ 通量低估的现象影响了涡度相关法 CO₂ 交换研究的可信度^[3-4]。其次, 各通量观测站普遍存在 10% ~ 30% 的能量不闭合现象^[5-6], 一些学者^[7-8] 因此怀疑与能量具

有相似传输机制的 CO₂ 通量测定结果。深入研究复杂地形条件下涡度相关法通量观测和修正方法, 建立复杂地形和夜间 NEE 质量评价与校正的方法论体系, 是世界范围内通量观测研究中面临的重大技术问题^[9]。

从较早时期的气温/水汽脉动校正^[10]开始, 关于涡度相关法通量修正特别是夜间偏低估计问题一直是学界探讨的重点^[11-14]。导致上述问题的原因主要有 2 类, 一类是测量仪器和原理本身的局限, 如频率响应局限和平流损失造成涡度通量低估^[15-16]; 另一类是环境干扰, 如超声风速仪倾斜和地表均一性差等因素^[17-19]。实践中, 常常由于缺乏可操作的统一的校正方法, 对通量低

* 收稿日期: 2006-10-23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB412501); 中国科学院知识创新工程 (KZCX1 - SW - 01 - 01A); 中国科学院重要方向项目 (KSCX2 - SW - 120); 广东省自然科学基金重点项目 (010567)

作者简介: 王春林 (1969-), 江苏人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 农业气象, 生态系统生态学, 干旱、寒冷灾害监测评估。

E-mail: wangcl@gmc.gov.cn

估进行定量评价比较困难,很多研究有意无意忽略了修订过程,这增加了 CO₂通量估算的不确定性,也为不同站点间的比较和全球尺度综合分析设置了障碍^[20]。

国内对涡度相关法 CO₂通量修正的研究仍处于起步阶段^[21]。孙晓敏等^[22]利用 ChinaFLUX 资料研究了平均周期和采样频率的影响,吴家兵等^[20]利用长白山森林站数据,定量分析了超声风速仪倾斜、频率响应和平流损失修订对 CO₂通量估算的影响;张军辉等^[23]提出强风条件下 CO₂净交换通量的上界摩擦风速 (U_u^{*})修正方法。朱治林等^[24]对不同坐标旋转方法在 ChinaFLUX 典型生态系统的应用效果进行比较分析。与国内其它 3 个森林通量站相比鼎湖山站的观测环境比较复杂。本文旨在探讨涡度相关法通量观测中存在的普遍问题及其在本站复杂地形条件下的特殊表现,分析典型涡度通量修正方法对本通量站的效果及其适用性,为客观评估鼎湖山混交林生态系统碳通量特征提供方法论基础,也对 ChinaFLUX 森林生态系统通量观测数据积累具有积极意义。

1 数据与方法

1.1 研究区域

鼎湖山自然保护区位于广东省肇庆市东北部,受季风湿润气候影响,光、热、水资源丰富且准同步。年太阳辐射约 4665MJ m⁻² a⁻¹,年平均日照时数为 1433h;年平均气温 21.0 ,最冷月为 1月,平均气温 12.0 ,最热月为 7月,平均气温 28.0 ;年均降水量 1956mm,其中 76%集中在汛期(4 - 9月),10 - 3月为相对少雨季节。主导风向冬半年(10 - 3月)为东北风,夏半年(4 - 9月)为西南风。

通量观测塔安装在鼎湖山自然保护区核心区的针阔叶混交林样地内(五棵松,23°10'24"N,112°32'10"E),海拔高度 240m,坡度 10 左右,坡向东偏南。主风方向东北面比较开阔。优势树种为荷树 (*Schin a superba*)、锥栗 (*Castanopsis chinensis*)和马尾松 (*Pinus massoniana*),树龄约为 100a,树高约 17m;群落结构比较简单,可分成 4层:乔木两层,灌木一层,草本及苗木一层;土壤为砂质壤土,土层厚薄不均,一般在 30 ~ 60cm,地面枯枝落叶层盖度 80% ~ 90%,厚度 1 ~ 3cm,pH值为 3.86。

1.2 观测设计

通量观测塔高 38m,包括 2套开路涡度相关通量观测系统(Open Path Eddy Covariance, OPEC)和常规气象观测(Routine Meteorology, RMET)。冠层上方 OPEC 安装高度为 27m,测量生态系统/大气界面 CO₂和水热通量;冠层下方 OPEC 安装高度约 2m,测量冠层下方/地表植被界面的通量。OPEC 采用三维超声风温仪(CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA (CSI))测量三维

风速,采用超声风速仪上附有细线热电偶(FW05, CSI)测量温度脉动,采用开路 CO₂/H₂O 红外气体分析仪(RGA)(Li-7500, LiCor Inc, USA)测量 CO₂/H₂O 浓度脉动。湍流信号采样频率为 10Hz,通过数据采集器(CR5000, CSI)自动存储 10Hz 原始数据,并在线计算 30min 的 CO₂通量(Fc)、潜热通量(LE)和显热通量(Hs)等。Fc、LE、Hs 在线计算中自动作了虚温订正^[25]和空气密度脉动订正^[10],但是未考虑地形和仪器倾斜影响。按照微气象学符号协定,Fc、LE、Hs 正号表示向上通量。RMET 主要包括气温、相对湿度、风速以及辐射和土壤热通量等,数据采集频率为 0.5Hz,通过 4 个数据采集器(CR23X - TD/CR10X - TD, CSI)在线计算并存储 30min 统计数据。

1.3 生态系统碳收支方程

净生态系统 CO₂交换量(Net Ecosystem Exchange, NEE)估算是碳循环研究领域的核心问题之一。涡度相关法测定 NEE 计算方程^[4, 19]可表示为:

$$NEE = \overline{(w c)} + \overline{c} \left(1 + \overline{\left[\frac{w T_a}{T_a} \right]} + \overline{c} \mu_v \overline{w} + \int_0^z \frac{\partial}{\partial t} dz + \overline{w} \left[\overline{c}_r - \frac{1}{z} \int_0^z \overline{c} dz \right] + \int_0^z \overline{u} \frac{\partial \overline{c}}{\partial x} dz \right) \quad (1)$$

式(1)右侧第一项为涡度相关法直接计算的 CO₂通量,w、c 分别代表垂直风速和 CO₂浓度脉动。习惯上,式(1)中第二项及后面各项统称为第一项的修正项。

第二、三项分别为气温脉动修正项 WPL_H 和水汽脉动修正项 WPL_LE,统称为 WPL 订正项^[10, 25],式中 T_a 是空气温度平均,μ_v 是体积混合比,u_v 是干空气与水汽摩尔质量之比,μ_c 是 CO₂的平均质量混合比。

第四项为观测高度以下空气中 CO₂浓度变化所引起的碳储存项变化率 Fs, Z 为 CO₂浓度测定高度,C 为 CO₂浓度。本文采用单层 CO₂浓度变化计算^[26-27],即:Fs = C(z) / t · z,式中 C(z) 为高度 z 处 CO₂浓度变化 ([CO₂]_t - [CO₂]_{t-Δt}), t 为时间步长(1800s), z 为整层高度(27m)。研究表明^[28]这种简单的 Fs 计算结果与标准的全剖面 CO₂浓度测量法^[29]基本吻合。为避免系统误差,本文剔除 |[CO₂]_t - [CO₂]_{t-Δt}| > 20mg m⁻³,控制 Fs 项小于 0.3mg m⁻² s⁻¹。

第五、六项分别为垂直平流项 F_{va} 和水平平流项 F_{ha}。水平平流项计算需要至少 2 个平行观测的通量观测塔,相关研究不多见。最近一些森林生态系统夜间平流测量^[30-32]表明,在低风速条件下 F_{va}、F_{ha} 量级相等符号相反,二者相加接近于 0,一般情况下平流项可以忽略^[33]。但在复杂地形条件下平流项可能较大,但限于技术条件,严格的平流项计算尚不能进行,因此本文采用坐标旋转方法,对由于非平坦地面和仪器倾斜因素所

导致的通量误差进行修正,希望在一定程度上达到平流项修正效果^[19,30]。坐标旋转算法采用流线坐标系统的 2 次坐标旋转法(Double Rotatation, DR)、3 次坐标旋转法(Triple Rotation, TR)和平面坐标拟合(Planner Fit, PF),限于篇幅,具体算法参见相关文献^[24,34-35]。

此外,在湍流交换微弱时涡度相关法测定的 CO₂ 通量偏低问题一直是学界关注的重点问题^[19,30]。理论上,若排除摩擦风速与气温的关系,CO₂ 通量应该与风速无关。本文以摩擦风速 u^* 作为湍流强度指标,分析湍流通量与 u^* 的关系,分析不同 u^* 阈值对 CO₂ 通量计算结果的影响。

2 结果与分析

2.1 WPL 修正

从量级上看,WPL 修正项常常比 CO₂ 涡度通量还大,其中温度脉动项大约是水汽脉动项的 5 倍^[10]。WPL

修正效果因生态系统类型、下垫面状况和气候条件不同而不同。

冠层上方 CO₂ 通量的水汽脉动项(WPL_LE)和气温脉动项(WPL_H)均与原始观测值(Fc_irga)符号相反,呈日射型日变化(图 1, a - b),最大值出现在中午。WPL_H 明显大于 WPL_LE,冬季 WPL_H 平均是 WPL_LE 的 6 倍,夏季为 3 倍。WPL 修正前后 CO₂ 通量具有显著的线性关系(图 2, a - b),WPL 修正后 CO₂ 通量减少 42%。值得注意的是冬季夜间的 CO₂ 通量和 WPL 修正项均接近 0(图 1, a),不能反映生态系统夜间呼吸状况,这就是涡度相关通量观测中普遍存在的夜间偏低问题。显然,WPL 修正对解决这个问题几乎没有作用。夏季夜间 CO₂ 通量大于 0(图 1, b),表明夏季夜间的通量观测能够反映夜间生态系统呼吸状况。

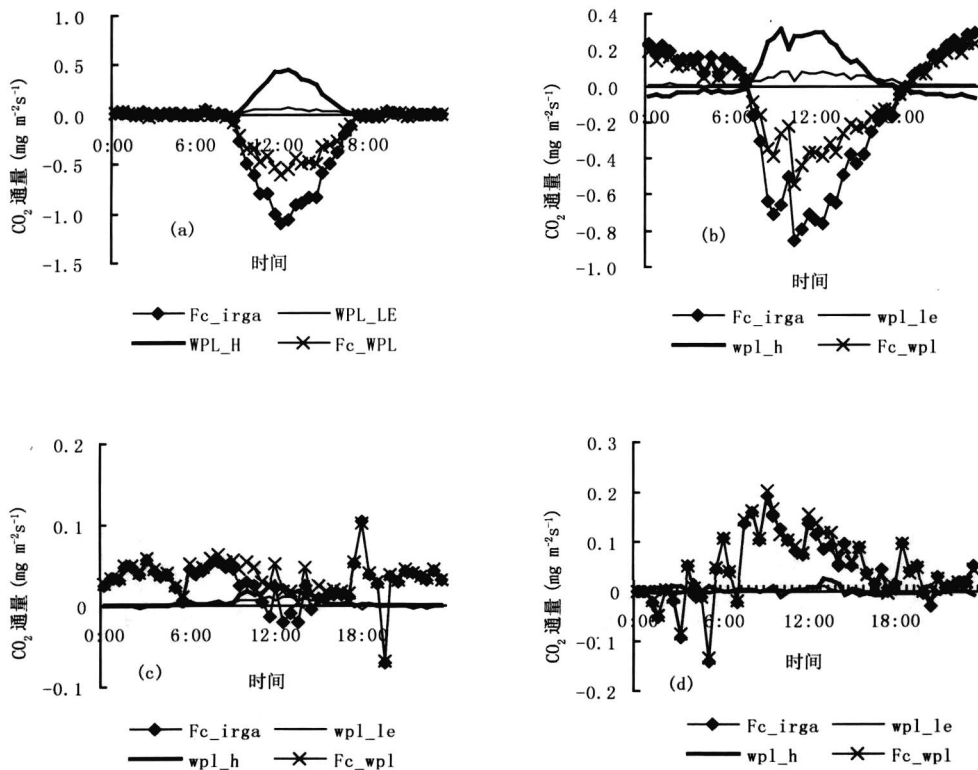


图 1 CO₂ 通量 WPL 修正项日变化特征 (Fc_irga:修正前 CO₂ 通量;WPL_LE:水汽脉动修正项;WPL_H:气温脉动修正项;Fc_WPL:修正后 CO₂ 通量) [(a)冠层上方冬季(2003.01.13 - 23日平均), (b)冠层上方夏季(2003.07.13 - 19日平均), (c)冠层下方冬季(2003.01.13 - 23日平均), (d)冠层下方夏季(2003.07.13 - 19日平均)]

冠层下方 CO₂ 通量日变化规律不如冠层上方的明显(图 1, c - d)。WPL 修正项很小,水汽脉动和气温脉动修正项的日变化以及二者之间的差别均不明显,WPL 修正前后的 CO₂ 通量之间的差别也不显著(图 2, c -

d)。其中夏季冠层下方的 CO₂ 通量日变化与冠层上方相反,在中午达到最大的向上通量(图 1, d),表明夏季中午时段森林冠层具有强大的碳同化能力,而土壤呼吸也在中午时段达到最大。

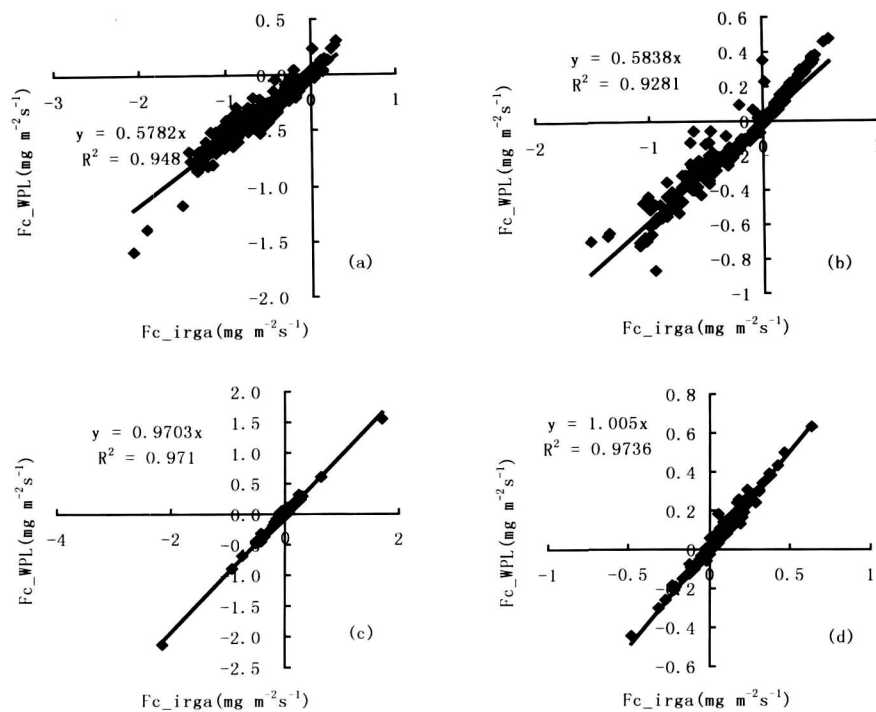


图 2 WPL 订正前 (F_{c_irga})后 (F_{c_WPL}) CO_2 通量的关系 [(a)冠层上方,冬季; (b)冠层上方,夏季; (c)冠层下方,冬季; (d)冠层下方,夏季。资料与图 1一致]

2.2 冠层 CO_2 储存量订正

冠层 CO_2 储存项变化率 (F_s)日变化过程如图 3 所示。白天由于冠层光合作用吸收 CO_2 ,冠层上方 CO_2 浓度呈下降趋势, F_s 小于 0;夜间相反, F_s 大于 0。 F_s 日变化幅度为 $0.04 \sim -0.06 mg m^{-2} s^{-1}$,理论上 F_s 日平均值接近于 0。夏季由于光合强度大, CO_2 浓度和 F_s 日变化

均比冬季明显(图 3),冬季冠层上方 CO_2 浓度($645 mg m^{-3}$)平均比夏季($604 mg m^{-3}$)高 $41 mg m^{-3}$ 。夜间 F_s 随着摩擦风速 u^* 增大而减小^[36]。当湍流交换较弱时,大部分夜间呼吸被冠层储存,相反当湍流交换较强时, F_s 几乎可以忽略(图 4)。

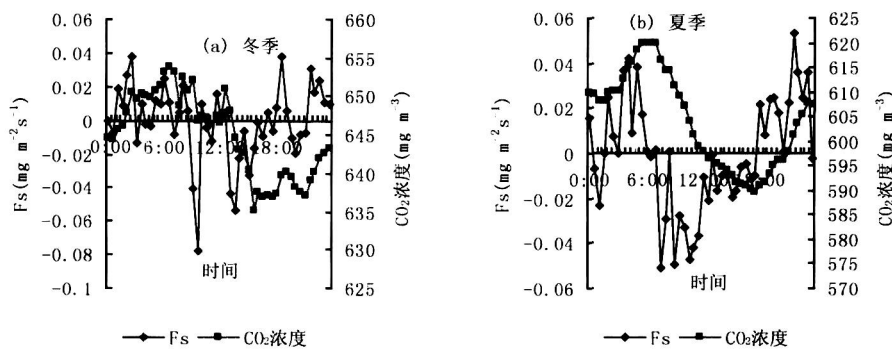


图 3 冠层 CO_2 储存量变化率 F_s 日变化

2.3 坐标旋转修正

为了考察不同坐标转换方法对 CO_2 通量的订正效果,分别采用自然坐标系 2 次旋转 (DR)、3 次旋转 (TR)和平面拟合坐标旋转 (PF)三种方法,对经过 WPL 订正的 CO_2 通量 F_{c_wpl} 分别进行坐标旋转得到新的 CO_2 通量 F_{c_DR} 、 F_{c_TR} 和 F_{c_PF} ,并分别以 F_{c_DR} 、 F_{c_TR} 、 F_{c_PF} 作为因变量 (y),以 F_{c_WPL} 作为自变量 (x),拟合线性方程: $y = kx$ 。这里强制拟合直线通过原

点,以便于通过比较拟合直线的斜率 (k)来评价坐标转换的效果。

表 1和表 2中大多数 k 小于 1,表明 3种坐标转换均使得 CO_2 通量绝对值趋于变小。各种坐标旋转方法对不同高度、季节和昼夜时段的表现也不一样。总的来看,斜率 k 白天的大于夜间,冬季的大于夏季,冠层上方的大于冠层下方。一般认为坐标转换具有一定的消除垂直平流的功能,上述结果反应出鼎湖山通量站可能由

于地形坡度较大,存在比较明显的垂直平流,因此经过坐标转换后 CO₂通量(绝对值)明显减小。

不同坐标转换方法效果不同。DR 旋转的 k 最大(0.6~1.3),其次是 PF 旋转(0.3~1.0),TR 旋转的 k 最小(0.1~1.0);线性方程的解释方差 R²次序也一样。3种坐标转换方法对 CO₂通量影响幅度依次为:DR < PF < TR,其中 DR 旋转对 CO₂通量的影响幅度最小,且线性关系比较明确;而 PF 和 TR 法对 CO₂通量的影响较大,线性关系的不确定性较大,特别对冠层下方,几乎不存在线性关系。

正如大多数通量站一样,鼎湖山站存在夜间涡度通量偏低问题。如前所述,经过坐标转换后,夜间 CO₂通量不但没有增加,反而有所减少,表明 3 种坐标转换方

法均不能从根本上解决这一问题。3种坐标转换方法中以 DR 旋转对夜间 CO₂通量的影响幅度最小。

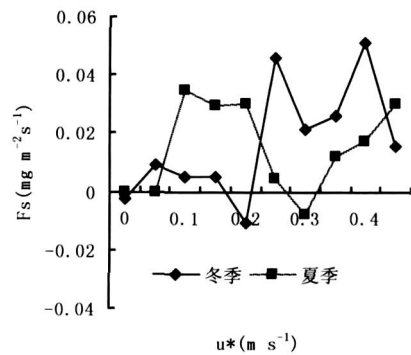


图 4 夜间冠层 CO₂储存量变化率 Fs 随摩擦风速 u* 的变化

表 1 不同坐标转换方法对冠层上方(27m) CO₂通量的影响

		DR		TR		PF		n
		k	R ²	k	R ²	k	R ²	
冬季 (2003.01.13 - 23)	白天	1.2641	0.7957**	1.0449	0.6518**	1.0658	0.9205**	253
	夜间	0.5242	-0.1953*	0.4301	-0.1146	0.567	-0.1091	253
夏季 (2003.07.13 - 19)	白天	0.9945	0.7691**	0.8747	0.7271**	0.9628	0.8997**	196
	夜间	0.9649	0.9748**	0.6486	0.2131*	0.728	0.6561**	802

注: *表示通过 0.01 信度检验; **表示通过 0.001 信度检验,表 2 同。

表 2 不同坐标转换方法对冠层下方(2m) CO₂通量的影响

		DR		TR		PF		n
		k	R ²	k	R ²	k	R ²	
冬季 (2003.12.01 - 31)	白天	1.0045	0.4092**	0.7713	0.1728*	0.5666	-0.0292	638
	夜间	0.7078	0.6431**	0.2344	-0.1457	0.2499	-0.182*	709
夏季 (2003.7.01 - 19)	白天	0.7517	0.6478**	0.4135	-0.1703	0.4704	-0.0885	345
	夜间	0.6017	0.5976**	0.085	-0.4143**	0.2278	-0.0621	94

2.4 u* 订正

2.4.1 冠层下方 CO₂通量的 u* 订正

冠层下方 CO₂通量(Fcb)观测高度为 2m。在摩擦风速较低时(u* < 0.3m s⁻¹),夜间和白天 Fcb 均随 u* 增大而增大(图 5 和图 6),其中夜间的 u* 小于白天,因此夜间 Fcb 随 u* 增大趋势比白天更加明显(图 5),这与其它报道是一致的^[19,23]。总体上不管白天还是夜间,Fcb 随 u* 变化幅度均很小,当 u* 增大到 0.4m s⁻¹ 以上时,Fcb 甚至为负值,张军辉等^[23]对长白山的研究也发现这样的结果,认为在强风条件下有必要进一步做压力脉动和平流订正。对鼎湖山混交林而言,由于 u* 大于 0.4m s⁻¹ 的资料非常少,因此未做压力脉动和平流订正,也避免由于样本太少带来新的不确定性。

ChinaFLUX 要求选择 0.2m s⁻¹ 作为 u* 订正的阈值。对于鼎湖山站冠层下方而言,u* 大于 0.2m s⁻¹ 资料

非常少,且在 0.05~0.2m s⁻¹ 之间 Fcb 随 u* 变化不明显,因此选择 0.05m s⁻¹ 作为冠层下方 u* 订正的阈值是合乎本站情况的。经过 u* 订正后,2003 年 Fcb 平均值为 0.0688mg m⁻² s⁻¹,比订正前提高 10%,但依然比同期的采用静态箱-气相色谱法^[37]观测的土壤呼吸(0.11mg m⁻² s⁻¹) 偏低 37%左右。

2.4.2 冠层上方 CO₂通量的 u* 订正

白天绝大部分时段冠层上方摩擦风速 u* 大于 0.2m s⁻¹,湍流条件良好,因此不需要考虑 u* 订正。夜间冠层上方 CO₂通量(Fca)反应整个生态系统总呼吸(Reco),在 u* < 0.3m s⁻¹ 时,Fca 随 u* 增大迅速增大(图 7);当 u* 在 0.3~0.6m s⁻¹ 时,Fca 随 u* 的变化趋于平稳(仍有小幅上升),这与其它报道是一致的^[19,23]。当 u* > 0.6m s⁻¹ 时,由于样本太少,不确定性较大,Fca 随 u* 变化不稳定。

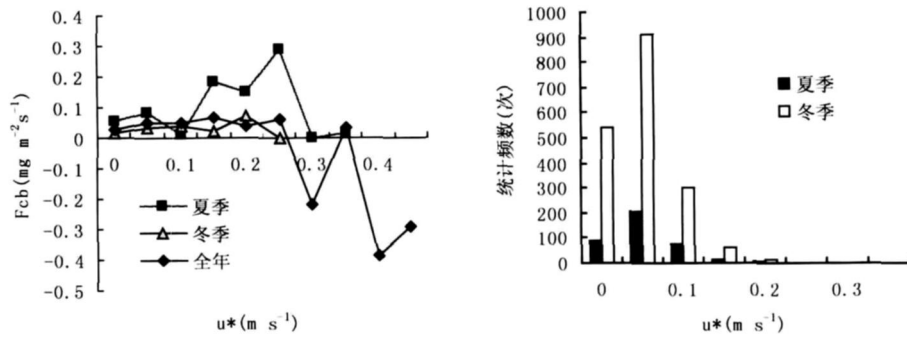


图 5 夜间冠层下方 CO₂ 通量 Fcb(左)及其有效样本频数(右)随摩擦风速 (u^*) 的变化(以 0.05m s^{-1} 为间隔按 u^* 分档统计,第 1 档为 $0 \sim 0.05$,标记 0,第 2 档为 $0.05 \sim 0.1$,标记 0.05,其余类推。其中夏季资料为 2003.07 - 09,冬季资料为 2003.12 - 2004.01,全年资料为:2003.04.13 - 2004.06.10)

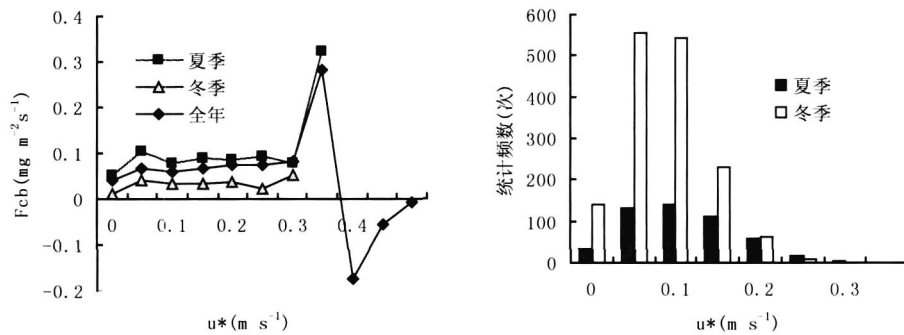


图 6 白天冠层下方 CO₂ 通量 Fcb(左)及其有效样本频数(右)随摩擦风速 u^* 的变化 (u^* 分类方法及资料同图 5)

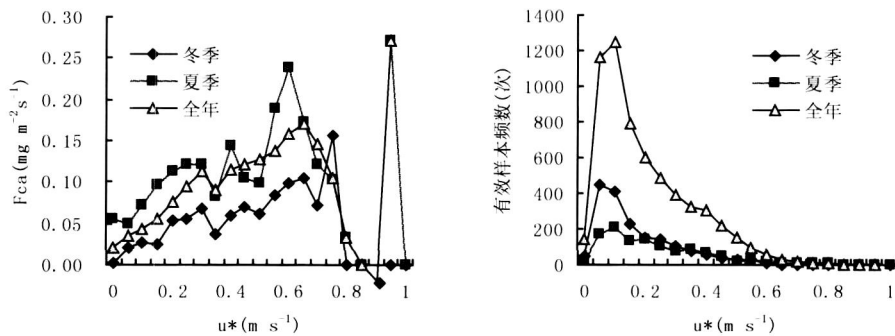


图 7 夜间冠层上方 CO₂ 通量 Fca(左)及其有效样本频数(右)随摩擦风速 u^* 的变化 (u^* 分档方法同图 5。其中夏季资料为 2003.07 - 09,冬季资料为 2003.12 - 2004.01,全年资料为 2003.01.01 - 2003.12.31)

表 3 不同 u^* 阈值计算的夜间冠层上方 CO₂ 通量 (Fca) 及有效样本 (N)

u^* 阈值 (m s^{-1})	夏季 (2003.07 - 09)		冬季 (2003.12 - 2004.01)		全年 (2003)	
	Fca	N (%)	Fca	N (%)	Fca	N (%)
0	0.096	100	0.044	100	0.077	100
0.05	0.097	98	0.045	97	0.078	98
0.10	0.107	83	0.051	73	0.086	78
0.15	0.123	65	0.061	51	0.099	58
0.20	0.135	54	0.070	39	0.110	45
0.25	0.148	41	0.078	31	0.122	35
0.30	0.150	33	0.080	24	0.128	27
0.35	0.149	26	0.078	18	0.131	21

按 0.05m s^{-1} 为间隔依次取不同的 u^* 阈值,分别计算鼎湖山针阔叶混交林夜间冠层上方 CO_2 通量 (F_{ca})及其有效样本数(表 3),可以看出 F_{ca} 随 u^* 阈值增大而增大,而有效样本数随 u^* 阈值增大而减少,冬季和夏季基本一致。当 u^* 阈值大于 0.2m s^{-1} 时, F_{ca} 随 u^* 阈值增大速度变缓,即 F_{ca} 对 u^* 阈值变得不敏感,但有效样本数减少到 50% 以下且减幅增大,因此取 0.2m s^{-1} 作为夜间 u^* 订正阈值,这与其它 ChinaFLUX 森林站的结果是一致的。 u^* 订正后鼎湖山混交林 2003 年夜间 F_{ca} 平均为 $0.11\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$,有效样本占订正前的 45% (表 2)。

3 讨论与结论

如何评价涡度通量观测结果,特别是如何评价复杂地形条件下和夜间弱湍流条件下测定的通量,是通量学界面临的关键性技术性问题。目前针对复杂地形对涡度通量的影响研究,主要集中在坐标旋转、水平和垂直平流项的评估、Footprint/Fetch 估算模型等方面。有人尝试采用能量闭合度对测定的 NEE 进行校正^[38-40],但是这种方法依赖于对湍流能量通量和有效能量的准确测定^[41]。由于技术限制和问题本身的复杂性,目前对平流项和 Footprint/Fetch 的研究仍然处于理论分析阶段,在应用方面特别在亚洲还不多见^[9]。

关于坐标转换方法,吴家兵等^[20]认为平面拟合坐标变换要优于流线坐标变换,而朱治林等^[24]则认为各种方法均可实现对 NEE 的合理校正,但其效果与观测点的坡度、坡向、风速和风向等因素有关。朱治林等^[24]认为对于特别复杂的地形条件 PF 旋转方法不适用,本文进一步发现在鼎湖山复杂地形条件下,TR 和 PF 旋转效果均差于 DR 旋转。

基于自然坐标系统的 DR/TR 旋转修正,是基于通量平均时间单元数据计算,因而可以实现在线计算,且可以起到减少水平与垂直平流影响的作用^[40,42],因而在包括 ChinaFLUX 在内的亚洲通量网 (AsiaFLUX) 中得到广泛应用,尤其适用于地形平坦的(如草原)通量观测。然而,在下垫面起伏条件下,该方法通过强迫平均单元垂直风速为 0,实际上可能掩盖了客观存在的垂直平流项。另外,DR/TR 方法相当于一个非线性的高通滤波器^[43],滤除了周期长于通量平均化时间的低频贡献,造成系统性涡度通量低估^[44]。本研究进一步发现,TR 方法因为其原理上比 DR 更“完美”,因此造成的涡度通量低估也比 DR 方法更加严重。

平面拟合坐标变换 (PF) 方法保留了平均单元数据内的平均垂直风速,使得 CO_2 通量绝对值趋于变小,个别时段还发生了通量正负符号的改变,这对去除超声风速仪倾斜产生的虚假信息、正确揭示森林碳循环及其动力学机制具有重要意义。通常采用 PF 坐标旋转方法得

到的涡度通量要比采用 TR 方法在量值上高出 5% ~ 10%^[20,45-46],本文对鼎湖山混交林的试验结果也得出相似结论,但 PF 方法得到的涡度通量低于 DR 方法。理论上 PF 可能更适用于具有大的涡旋与低频信号的森林生态系统,于贵瑞等^[9]认为 PF 坐标旋转方法对长期的特别是在复杂地形条件下 CO_2 通量和碳收支的影响还有待进一步分析。此外由于 PF 方法需要较长时间序列的资料,因此不适合在线计算。

本研究中各种坐标转换方法均使得 CO_2 通量绝对值趋于变小,变化幅度依次为: $\text{DR} < \text{PF} < \text{TR}$ 。坐标转换对 CO_2 通量影响程度白天小于夜间,冬季小于夏季,冠层上方小于冠层下方。对于涡度相关通量观测领域普遍存在的夜间 CO_2 涡度通量偏低问题,WPL 订正没有帮助,坐标转换甚至起到反作用;冠层储存项 F_s 夜间为正值,在一定程度上减少夜间偏低程度,但量级太小,效果不显著;冠层下方和冠层上方 CO_2 通量合适的 u^* 订正阈值分别为 0.05m s^{-1} 、 0.2m s^{-1} , u^* 订正可以明显减少夜间偏低幅度。

风向频率分析表明鼎湖山通量站在冬季存在明显山谷风现象,揭示本通量站可能存在由于地形原因导致的非湍流过程,平流修订对弥补夜间 CO_2 通量低估具有显著意义^[20],但由于鼎湖山通量站没有 CO_2 浓度廓线观测,目前尚无法对平流问题作出定量评估。因此,目前夜间涡度通量观测数据需要结合箱式法观测结果进行进一步校正。

参考文献:

- [1] Baldocchi DD, Falge E, Gu LH, 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]. Bull. Am. Meteorol. Soc., 2001, 82(11): 2415-2434.
- [2] Lavigne MB, Ryan MG, Anderson DE, et al. Comparing nocturnal eddy covariance measurements to estimates of ecosystem respiration made by scaling chamber measurements at six coniferous boreal sites [J]. Journal of geophysical research, 1997, 102 (D24): 28977-28985.
- [3] Baldocchi DD, Finnigan J, Wilson K, et al. On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain [J]. Boundary Layer Meteorology, 2000, 96: 257-291.
- [4] Paw UKT, Baldocchi DD, Meyers TP, et al. Correction of eddy-covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes [J]. Boundary Layer Meteorology, 2000, 97: 487-511.
- [5] Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113: 223-243.
- [6] 李正泉,于贵瑞,温学发,等. 中国通量观测网络 (Chin-

- aFLUX)能量平衡闭合状况的评价[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(增): 46-56
- [7] Vema AB, Baldocchi DD, Anderson DE, et al Eddy fluxes of CO₂, water vapor, and sensible heat over a deciduous forest[J]. Boundary Layer Meteorology, 1996, 36: 71-91.
- [8] Mahrt L. Flux sampling errors for aircraft and towers[J]. Journal of Atmospheric and Ocean Technology, 1998, 15: 416-429.
- [9] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 等. 亚洲区域陆地生态系统碳通量观测研究进展[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(增): 15-29.
- [10] Webb EK, Peaman GI, 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.
- [11] Garratt JR. Limitations of the eddy correlation technique for determination of turbulent fluxes near the surface[J]. Boundary Layer Meteorology, 1975, 8: 255-259.
- [12] Moncrieff JB, Massheder JM, Elbers J. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapor and carbon dioxide[J]. Journal of Hydrology, 1997, 188: 589-611.
- [13] Running SW, Baldocchi DD, Turner DP, et al Global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data[J]. Remote Sens Environ, 1999, 70: 108-127.
- [14] Wohlfahrt G. Quantifying nighttime ecosystem respiration of a meadow using eddy covariance, chambers and modelling[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 128(3-4): 141-162.
- [15] Lee XH. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 91: 39-49.
- [16] Baldocchi DD, Law BE, Anthoni PM. On measuring and modeling energy fluxes above the floor of a homogeneous and heterogeneous conifer forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 102: 187-206.
- [17] Vickers D, Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data[J]. Journal of Atmospheric and Ocean Technology, 1997, 14: 512-526.
- [18] Baldocchi DD, Hicks BB, Meyers TP. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods[J]. Ecology, 1988, 69: 1331-1340.
- [19] Massman WJ, Lee XH. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113: 121-144.
- [20] 吴家兵, 关德新, 孙晓敏, 等. 长白山阔叶红松林 CO₂交换的涡动通量修订[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(增): 95-102.
- [21] 毛子军. 森林生态系统碳平衡估测方法及其研究进展[J]. 植物生态学报, 2002, 26(6): 731-738.
- [22] 孙晓敏, 朱治林, 许金萍, 等. 涡度相关测定中平均周期参数的确定及其影响分析[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(增): 30-36.
- [23] 张军辉, 韩士杰, 孙晓敏, 等. 冬季强风条件下森林冠层/大气界面开路涡动相关 CO₂净交换通量的 UU^{*}修正[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(增): 77-83.
- [24] 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 ChinaFLUX 中的应用[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(增): 37-45.
- [25] Schotanus PH, Nieuwstadt FTM, de Bruin HAR. Temperature measurements with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes[J]. Boundary Layer Meteorology, 1983, 26: 81-93.
- [26] Leuning R, King KM. Comparison of eddy-covariance measurements of CO₂ fluxes by open and close-path CO₂ analyses[J]. Boundary Layer Meteorology, 1992, 59: 297-331.
- [27] Valentini R, Matteucci G, Dolman AJ, et al Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests[J]. Nature, 2000, 404: 861-865.
- [28] Carrara A. Net ecosystem CO₂ exchange of mixed forest in Belgium over 5 years[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 119(3-4): 209-227.
- [29] 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.
- [30] Aubinet M, Heinesch B, Yemaux M. Horizontal and vertical CO₂ advection in a sloping forest[J]. Boundary Layer Meteorology, 2003, 108: 397-417.
- [31] Feigenwinter C, Bernhofer C, Vogt R. The influence of advection on the short term CO₂-budget in and above a forest canopy. Boundary Layer Meteorology, 2004, 113: 201-224.
- [32] Staebler RM, Fitzjarrald DR. Observing subcanopy CO₂ advection[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 122: 139-156.
- [33] Wofsy SC, Goulden ML, Munger JW, et al Net exchange on CO₂ in a mid-latitude forest[J]. Science, 1993, 260: 1314-1317.
- [34] Wilczak JM, Oncley SP, Stage SA. Sonic anemometer tilt correction algorithms[J]. Boundary Layer Meteorology, 2001, 99(1): 127-150.
- [35] 王春林. 鼎湖山针阔叶混交林生态系统碳通量观测研究[D]. 广州: 中国科学院华南植物园, 2006.
- [36] Berbigier P, Bonnefond JM, Melmann P. CO₂ and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108: 183-197.
- [37] 周存宇, 张德强, 王跃思, 等. 鼎湖山针阔叶混交林地表温室气体排放的日变化[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1738-1741.

(下转第 267 页)

- 气象, 2002, 25 (3): 14-15.
- [8] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖无锡地区近 40 年来日照的变化特征分析 [J]. 气象科学, 2003, 23 (2): 231-237.
- [9] 杨彦武, 于强, 王靖. 近 40 年华北及华东局部主要气候资源要素的时空变异性 [J]. 资源科学, 2004, 26 (4): 45-50.
- [10] 赵芳芳, 徐宗学. 黄河兰州以上气候要素长期变化趋势和突变特征分析 [J]. 气象学报, 2006, 64 (2): 246-255.
- [11] 肖军, 赵景波. 西安市 54a 来气候变化特征分析 [J]. 中国农业气象, 2006, 27 (3): 179-182.
- [12] 安月改, 李元华. 河北省近 50 年蒸发量气候变化特征 [J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19 (4): 159-162.
- [13] 孙静, 阮本清, 蒋任飞. 宁夏引黄灌区参考作物蒸发蒸腾量及其气候影响因子的研究 [J]. 灌溉排水学报, 2006, 15 (1): 53-57.
- [14] 苏春宏, 陈亚新, 王亚东, 等. ET_0 计算模型及其主要输入因子的影响分析评估 [J]. 灌溉排水学报, 2006, 25 (1): 14-19.
- [15] 倪广恒, 李新红, 丛振涛, 等. 中国参考作物蒸发量时空变化特性分析 [J]. 农业工程学报, 2006, 22 (5): 1-4.
- [16] 张莉, 丁一汇, 任国玉. 我国北方沙尘天气演变趋势及其气候成因分析 [J]. 应用气象学报, 2005, 16 (5): 583-592.
- [17] 姜朝阳, 于强, 王天铎, 等. 小波变换方法在植物冠层微气象研究中的应用 [J]. 中国农业气象, 2004, 25 (1): 62-65.
- [18] 谢庄, 曹鸿兴, 李慧, 等. 近百余年北京气候变化的小波分析 [J]. 气象学报, 2000, 58 (3): 362-369.
- [19] 袁玉江, 魏文寿, 何清. 天山山区近 40 年冬季温度变化特征 [J]. 气象, 2005, 31 (5): 12-16.
- [20] 魏凤英. 华北干旱不同时间尺度的变化特征 [A]. 华北农业干旱研究进展 [C]. 北京: 气象出版社, 1997: 1-10.
- [21] 沈锦花, 胡波. 浙江省近 534 年旱涝发生规律及突变分析 [J]. 气象, 2005, 31 (10): 76-78.
- [22] 龚建福, 王毅荣, 张存杰. 黄土高原土壤干旱及其敏感阶段特征 [J]. 中国农业气象, 2005, 26 (2): 67-72.
- [23] 王毅荣, 王润元, 邓振镛. 黄土高原气候生产力演变特征 [J]. 中国农业气象, 2006, 27 (2): 70-75.
- [24] 丁裕国, 江志红. 气象数据时间序列信号处理 [M]. 北京: 气象出版社, 1998: 278-283.

(上接第 240 页)

- [38] Twine TE, Kustas WP, Norman JM, et al. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 103: 279-300.
- [39] Yamamoto S, Murayama S, Saigusa N, et al. Seasonal and inter-annual variation of CO_2 flux between a temperate forest and the atmosphere in Japan [J]. Tellus B, 1999, 51: 402-413.
- [40] Yasuda Y, Ohtani Y, Watanabe T, et al. Measurement of CO_2 flux above a tropical rain forest at Pasoh in Peninsular Malaysia [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 114: 235-244.
- [41] Schmid HP. Source areas for scalar and scalar fluxes [J]. Boundary Layer Meteorology, 1994, 67: 293-318.
- [42] Nakai Y, Kitamura K, Suzuki S, et al. Year-long carbon dioxide exchange above a broadleaf deciduous forest in Sapporo, Northern Japan [J]. Tellus B, 2003, 55: 305-312.
- [43] Sakai RK, Fitzjarrald DR, Moore KE. Importance of low-frequency contributions to eddy fluxes observed over rough surfaces [J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40: 2178-2192.
- [44] Finnigan JJ, 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.
- [45] Berger BW, Davis KJ, Yi C. Long-term carbon dioxide fluxes from a very tall tower in a northern forest: flux measurement methodology [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, 18 (4): 529-542.
- [46] Wilson K, Hanson PJ, Baldocchi DD. Factors controlling evaporation and energy balance partitioning beneath a deciduous forest over an annual cycle [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 102: 83-103.