

文章编号 1001-8166(2004)04-0658-06

基于涡度相关技术估算植被 / 大气间 净 CO_2 交换量中的不确定性

温学发, 于贵瑞, 孙晓敏

(中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

摘要 近年来, 涡度相关技术的进步使陆地生态系统 CO_2 通量的长期和连续观测成为可能。目前, 涡度相关技术是全球通量观测网络 (FLUXNET) 测定植被 / 大气间 CO_2 通量的主要技术手段, 但绝大部分 CO_2 通量观测站点都处于非典型的理想条件下, 不能完全满足涡度相关技术的基本假设条件, 从而导致基于涡度相关技术估算植被 / 大气间净生态系统 CO_2 交换量的不确定性。系统介绍了涡度相关技术的基本假设, 基本理论公式和误差的类型与特征等理论问题, 重点阐述了通量测定中仪器本身的物理限制、二维和三维的气流运动、数据处理的方法和夜间通量的低估等不确定性的主要来源, 并据此对通量观测研究中需要优先考虑的问题提出一些建议。研究认为数据质量控制与分析以及误差评价是不同通量站点间的结果比较和全球尺度综合分析的过程中需重点考虑的问题。

关键词 涡度相关技术; 净生态系统 CO_2 交换量; CO_2 通量; 非理想条件; 不确定性
中图分类号: Q945 文献标识码: A

大气中 CO_2 、 CH_4 和其它温室气体浓度升高导致的气候变化是人类共同关注的最为重要的全球环境问题之一, 是世界社会经济可持续发展和国际社会所面临的最为严峻的挑战。植被与大气间 CO_2 通量的长期和连续的观测能够促进人们对陆地生态系统在全球碳循环中科学地位的理解^[1]。涡度相关技术 (eddy covariance technique) 是对森林、灌木、草地或农田与大气间进行非破坏性的 CO_2 湍流通量测定的微气象学技术^[2]。近年来, 涡度相关技术上的进步使长期和连续的涡度相关测定成为可能^[3-5], 并已广泛应用于陆地生态系统 CO_2 吸收与排放的测定^[4-7]。目前, 全球通量网络 (FLUXNET) 内已经有 100 个以上的研究小组主要利用涡度相关技术测定陆地生态系统各种植被与大气间 CO_2 、 H_2O 和能量通量^[8]。但是全球通量观测站点大部

分设置在高大森林、非平坦地形、斑块状冠层、自由对流等非理想或更现实的条件下^[9, 10], 这种观测站不能完全满足涡度相关技术的基本假设条件, 从而导致 CO_2 湍流通量 (在不进行任何修正条件下, 涡度相关观测系统所获得的观测结果) 测定中存在着巨大的不确定性^[11, 12]。生态学家、农业学家、森林学家、微气象学家、生物气象学家以及生物地理化学家渴望获得生物圈 / 大气圈间的物质交换信息 (净生态系统 CO_2 交换), 而不仅仅是 CO_2 湍流通量。如在涡度相关系统测定高度以下 CO_2 发生平流消耗或者发生储存, 那么 CO_2 湍流通量就不等于净生态系统 / 大气间 CO_2 交换量^[13]。如果没有一定的理解力和技术方法来补偿这些差异, 那么在不同站点间的比较和全球尺度综合分析的过程中就会面临着巨大的困难^[14]。如何解释现实的涡度相关测定结

* 收稿日期: 2003-05-21, 修回日期: 2003-11-30.

* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”子课题 (编号 KZCX1-SW-01-01A) 资助。
作者简介: 温学发 (1975-) 男, 辽宁铁岭人, 博士, 主要从事陆地生态系统碳收支研究。E-mail: wenzxf@igsnrr.ac.cn
通讯作者: 于贵瑞 (1959-) 男, 辽宁大连人, 研究员, 主要从事生态系统和植物生理生态学研究。E-mail: yugr@igsnrr.ac.cn

果,使其能够代表大气与植被间的物质交换信息对当代微气象学家来说是个巨大的挑战^[15]。

目前,在我国以中国生态系统研究网络(CERN)为依托,以微气象学的湍度相关技术为主要手段的中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)已经正式启动,因此也面临着与FLUXNET 同样的难题,为此,需要对基于湍度相关技术估算植被/大气间净 CO₂ 交换量中的不确定性有深刻的认识和理解。

1 湍度相关技术

1.1 基本假设

湍度相关技术要求仪器应固定在 CO₂ 通量随高度不发生变化的内边界层即常通量层内。对于常通量层的明确理解,可以通过 CO₂ 的物质守恒方程^[16]得到:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \mu_i \frac{\partial c}{\partial x_i} - D \frac{\partial^2 c}{\partial x_i^2} = S \quad (1)$$

c 是 CO₂ 密度, t 是时间, μ_i 是正相交方向 x_i ($i=1, 2, 3$) 上的风速分量, D 为 CO₂ 在空气中的分子扩散系数, S 是物质守恒方程控制体积内的源或汇强度, $\bar{\quad}$ 表示时间平均。左边的第一项是单位体积内 CO₂ 密度的变化平均速率,而第二、第三项是引起控制体积的边缘发生净平流和分子扩散的通量辐合或辐散项。

常通量层假设^[16]要求满足 3 个条件: 稳态 ($\partial c / \partial t = 0$); 测定下垫面与仪器之间没有任何的源或汇 ($S = 0$); 在足够长的风浪区内具有水平均匀的下垫面,在这种条件下可以假定 $\sum_{i=1}^2 \mu_i \partial c / \partial x_i = 0$ 和 $D \partial^2 c / \partial x_i^2 = 0$ ($i=1, 2$) 则方程(1)简化为:

$$\frac{\partial w c}{\partial z} - D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

这里 $w = \mu_3$ 是垂直风速, $z = x_3$ 是垂直坐标。近地层由于分子粘性力的作用,湍流受到抑制,但在测定高度 z 处湍流输送量要比分子扩散大几个数量级^[17]。于是,对方程(2)积分,并运用雷诺变换($w = \overline{w} + w'$, $c = \overline{c} + c'$)得出:

$$F_0 = D \left(\frac{\partial c'}{\partial z} \right)_0 = (\overline{w'c'})_z = F_z \quad (3)$$

这里 F_0 是土壤和植被与大气间交换的 CO₂ 通量, F_z 是仪器测定高度 z 处的 CO₂ 湍流通量。

1.2 基本理论公式

湍度相关技术应用的最基本理论公式是从雷诺经典定义出发推导得到的,当忽略平均垂直通量时,

CO₂ 湍流通量可定义为:

$$F = \overline{w'c'} \quad (4)$$

这里 ρ 是干空气密度, s 是 CO₂ 混合比率的脉动, w' 是垂直风速脉动, $\bar{\quad}$ 代表时间平均。利用坐标轴系统的旋转迫使 $\overline{w'c'} = 0$, 从而可以消除平均垂直通量。由于大多数传感器不能直接测量 CO₂ 混合比率,而是测定 CO₂ 的密度,因此由于水气和热量对密度脉动效应的存在,必须对测定结果进行 WPL 校正^[18]。

当大气热力分层达到稳定或湍流混合作用较弱时,从土壤和植被与大气间交换的 CO₂ 也就不能传输到测定仪器的高度。在这种条件下观测高度以下的储存项不为 0, 因此只有在湍度相关测定结果中加入储存项,才能真正评价土壤和植被与大气间交换的 CO₂ 通量。净生态系统 CO₂ 交换定义为:

$$N_e = \overline{(w'c')_z} + \int_0^z \frac{\partial c}{\partial t} dz \quad (5)$$

方程(5)忽略了 CO₂ 物质守恒方程中的大部分项,尤其是在非理想条件下忽略水平和垂直平流项是有疑问的^[9, 10, 19]。但是,目前 FLUXNET 内大部分研究人员估算净生态系统 CO₂ 交换量的理论框架是方程(5)^[3, 6, 19]。

1.3 误差的类型与特征

在野外测定时,影响数据质量的各种要素如图 1 所示^[17],说明在湍度相关技术中误差不仅与仪器有关,也与常通量层假设所需要的条件满足程度有关。实际的误差可划分为随机误差和系统误差两大类。系统误差可以分为完全系统误差和选择性系统误差。随机误差也可以分为完全随机误差和选择性随机误差,但不会影响它们的本质属性。

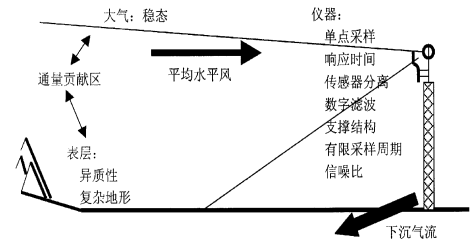


图 1 评价湍度相关系统通量测定结果有效性需考虑的主要过程及项目

Fig.1 Schematic of the main processes and terms which have to be considered when assessing the validity of flux measurement made by an eddy covariance system

完全系统误差指作用于测定系统整个的昼夜过程而造成的测量值系统偏离真值,如高频和/或低频

同相谱成分的缺失、系统校正等造成的误差,而选择性系统误差指仅仅作用于测定系统的部分昼夜过程而造成的测量值系统偏离真值,如由于夜间空气冷泄流等造成的夜间通量的低估。当误差为随机误差的情况下,估计平均值和方差时误差会随着数据量增加而递减。相反,系统误差不受数据量多少的影响,因为系统误差以线性的方式永久偏移或增加数据误差,但这些误差是很难被发现的。在实际的观测实践中可能是以某种误差为主,但更多的是多种类型误差的混合作用。

当评价长期涡度相关测定的精度时,必须考虑湍流单点取样的随机特性以及通量贡献区变化的随机误差^[16]。另外必须考虑了三种误差类型:完全系统误差(如校正误差)、选择性系统误差(如传感器下方夜间空气泄流)和取样误差(如仪器故障和极端天气条件造成的数据缺失)^[1, 16]。

2 不确定性的主要来源

2.1 仪器本身的物理限制所导致的不确定性

所有涡度相关系统由于仪器自身存在的各种局限性,都会导致在过高和过低的频率处都会造成真正湍流信号的衰减^[20]。信息的损失产生于仪器的物理尺寸、分离距离、内在的时间响应以及与趋势消除有关的任何信号处理上的限制^[20-24]。目前已经存在许多途径来评价和校正这种信息损失的原始湍流通量,如 Gouden 等^[25]提出的低通滤波法(low-pass filtering method)和 Massam 等^[22, 23]提出的解析法(analytical method),但都存在着一定的不足之处^[14]。目前关于涡度相关系统的主要部分(超声风速仪、气体分析仪和软件)的误差方面的研究已有大量的报道^[20-25]。通常,涡度相关系统本身造成的误差大约为 5%~10%^[20]。对于大气稳定层结条件,所有的谱校正都存在着不足之处。如何对频率衰减造成的误差进行校正需要进一步的探讨。

2.2 二维和三维气流运动所导致的不确定性

许多微气象研究的主要目标是量化大气与下垫面间净 CO_2 交换量,通常是通过垂直湍流通量的近似而获得(对仪器高度以下的 CO_2 储存进行校正)而忽略了 CO_2 的物质守恒方程中的其它各项。如果气流和标量场是几乎水平均匀的,则这个近似是可行的。然而,在二维和三维气流运动影响下,垂直湍流通量可能系统地偏离真正的净生态系统交换量。这主要有以下几方面原因^[14]:第一,以前的研究没有考虑 CO_2 的物质守恒方程各项的复杂性;第

二,以前的研究都假设大气边界层为近中性大气层结条件;第三,以前的研究没有考虑能够引起垂直通量测定偏差的中尺度运动,在二维和三维情况下中尺度运动发生的概率比微气象测定尺度下大的多;第四,以前的研究假设背景地形没有变化。

在非平坦地形的站点二维和三维气流的问题是最难处理的。至少 4 个地形学效应可以引起二维和三维气流的问题^[14]:地形能造成夜间重力气流或泄流的产生;地形障碍能通过非流线形效应调整外界气流,风场变化造成的湍流强度变化可以产生标量通量的空间变异,因此,会产生通量的水平输送^[26];气流方向表面源强度不是均匀一致的;由于水平空间尺度和三维空间性质上的差异,地形障碍产生的重力波已经超出了传统微气象学的范围。在中等强风条件下这种运动类型在分层空气中是常见的。

有关研究认为在年尺度上,如不考虑二维和三维气流运动的影响所估算的净生态系统交换量比过程模型计算的结果大 40%,而考虑垂直平流效应后则获得较好的一致性^[19]。

2.3 数据处理中所引起的不确定性

通量计算时需要将超声风速仪的笛卡儿坐标系转换为自然风或流线型坐标系^[27, 28]。通常使坐标系 x 轴与平均水平风方向平行,从而使平均侧风速度和平均垂直风速度为 0(所谓的二次坐标轴旋转),并且使相应的平均侧风应力也为 0(三次坐标轴旋)。在平坦地形和缺乏中尺度循环的条件下,由于平均垂直速度等于 0 并且与风向无关,所以进行上述坐标轴旋转是可行的^[19]。但在复杂地形或中尺度循环存在的条件下,进行上述坐标轴旋转是值得怀疑的^[19]。对于长期通量计算来说,在通量平均期间平均垂直风速可能不为 0。对于每个半小时通量数据,通过坐标轴旋转使平均垂直风速为 0 会导致显著的系统偏差^[10]。

Paw 等^[13]和 Wilczak 等^[28]提出了一个新的坐标轴旋转的方法,也就是平面拟合(Planar fit)法。对于长期通量计算来说,可以不强迫平均垂直风速不为 0。目前研究表明其可以减少雨天通量数据的取样误差^[28]。但仍需要在复杂地形下对其进行测试,评价它对长期 CO_2 通量和碳平衡的影响。平面拟合法获得的通量值比二、三次坐标轴旋转的通量值大约减少 4%^[19],但值得注意的是因为非零的平均垂直风速的存在,所以需要考虑非零的平均垂直速度的效应。

数据处理涉及到测定通量低频部分可能的损失。如选择通量平均时期太短将削弱通量低频的成分。这些低频成分的损失已经在能量平衡闭合中有所表现,可以造成白天森林 CO₂ 通量 10%~40% 的低估^[14]。在长期通量数据累计时,缺失数据的内插也会造成一定的误差^[17]。

2.4 夜间通量测定的不确定性

在夜间大气稳定层结条件下,几乎所有涡度相关技术的限制都会发生,一些是仪器本身的,另一些是气象的。仪器限制的根本原因是由于涡度相关设备是为白天的强对流条件下设计的,此时的湍流运动以低频运动占主导地位。而在夜间或稳定大气条件下,湍流运动移向高频,由于传感器分离等造成的仪器响应频率的不足就成为一个严重的限制。

另外,气象上的限制包括大通量贡献区、重力波、平流以及空气动力学或低湍流问题。

(1) 大通量贡献区:众所周知当大气逐渐变得稳定层结时,涡度相关测定通量贡献区迅速扩展^[30-31],并且能超出调查植被类型的范围。然而对于通量贡献区的校正并不是直接的,因为目前通量贡献区的模型都是基于近中性条件下的涡扩散理论建立的。

(2) 重力波:夜间冠层内重力波切变的产生是一个普遍的运动类型^[32-33]。严格的讲,在重力波活动期间稳态条件是不令人满意的,没有积分时间尺度可以定义。数值模拟表明波运动导致常通量层的不存在^[34]。

(3) 平流:在大气稳定层结的条件下,在植被内部雷诺应力的垂直梯度是很小的,因此,与斜压力^[35]、天气系统或斜坡重力^[36]有关的水平气压梯度是相对较大的。由于缺乏强有力的湍流混合,在近地面 CO₂ 浓度可能存在较大的垂直梯度。在这些条件下冠层和表层内空气运动是二维和三维的,因而在夜间发生泄流或(垂直和水平)平流的可能性比白天要大一个数量级多^[37]。

(4) 空气动力学问题:在长期通量观测站点的一个普遍现象就是当湍流水平下降到 0(通过摩擦速度确定)时 CO₂ 湍流通量接近 0,这是以空气动力学原因为基础的^[1]。Wofsy 等^[3]和 Goulden 等^[1]提出 CO₂ 生物学源强度不是空气运动的函数,表明储存通量的校正是不依靠 u_c 的。然而,大量研究表明储存校正并未使通量值达到强风条件下观测通量值的同一水平^[38-39],表明可能存在平流效应。

3 通量观测研究中应优先考虑的问题

3.1 水平和垂直平流效应

Lee^[10]从 CO₂ 的物质守恒方程出发,提出了量化垂直平流效应的一维模式,将净生态系统 CO₂ 交换量定义为参考高度测定的湍流通量、储存通量和垂直平流通量的和。但在复杂地形条件下,评价净生态系统 CO₂ 交换量时,仅仅利用一维的垂直平流校正是远远不够的,因为水平平流可能不为 0,在这种情况下将会低估或高估净生态系统 CO₂ 交换量^[19]。水平和垂直平流效应是不确定性的一个主要来源,特别是在复杂地形条件下,没有二维和三维平流扩散模型的帮助很难进行完全的量化。

3.2 坐标轴转换

坐标轴旋转方式的选择是相当重要的。二次或三次坐标轴旋转法会导致通量垂直平流成分损失,丢失对通量有贡献的部分的低频成分。因此也应该对其它坐标轴旋转方法如平面拟合法或其它的坐标系转换进行对比研究,量化它们对长期碳通量的影响。

3.3 夜间低通量问题

夜间通量低估的原因目前仍然是个有争议的问题。仪器在高频响应的不足会造成通量损失,但不可能是通量损失的根源,因为利用稳定条件下的最大校正要素校正后的通量值仍然过于偏低^[22-23]。因此认为问题实际上是气象上的,这是因为目前还无法利用微气象技术来测定所有的 CO₂ 物质守恒方程各项^[14]。在大气稳定层结条件下,泄流作用就是通量测定值低估的一个主要原因^[10,40]。为解决这些夜间通量问题,需要就重力波,间歇性,泄流等如何影响通量测定结果进行更多的研究。

3.4 净生态系统交换量的评价

涡度相关技术是直接测定植被/大气间 CO₂ 湍流通量的方法。但如何基于涡度相关技术正确评价净生态系统/大气间的 CO₂ 交换量是一个亟待解决的技术问题,特别是基于涡度相关技术估算植被/大气间净 CO₂ 交换量中的误差或置信度分析。开展对比试验研究对于验证涡度相关技术测定结果是非常重要的,如生物统计学测定,通量廓线法测定或模型模拟等。同时减少或消除不同站点之间由于信号处理、高频和低频谱校正、坐标轴系统、数据趋势去除以及质量控制与分析的后处理方法的差异也是减少净生态系统交换量评价不确定性的有效途径。

参考文献(References):

[1] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, et al. Measurements of car-

- bon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy [J]. *Global Change Biology*, 1996, 2: 169-182.
- [2] Baldocchi D D, Hicks B B, Meyers T P. Measuring biosphere-atmosphere exchange of biologically related gases with micrometeorological methods [J]. *Ecology*, 1988, 69: 331-340.
- [3] Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W, et al. Net exchange of CO₂ in a midlatitude forest [J]. *Science*, 1993, 260: 314-317.
- [4] Berbigier P, Bonnefond J M, Mellmann P. CO₂ and water vapor fluxes for 2 years above Euroflux forest site [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 183-197.
- [5] Grace J, Lloyd J, McIntyre J, et al. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in southwest Amazonia, 1992-1993 [J]. *Science*, 1995, 270: 778-780.
- [6] Black T A, den Hartog G, Neumann H H, et al. Annual cycles of water vapor and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest [J]. *Global Change Biology*, 1996, 2: 219-229.
- [7] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, et al. Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: Response to interannual climate variability [J]. *Science*, 1996, 271: 1576-1578.
- [8] Baldocchi D, Falge E, Gu L H, 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.
- [9] Lee X, Hu X Z. Forest-air fluxes of carbon, water and energy over non-flatterrain [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 103: 277-301.
- [10] Lee X. On micrometeorological observation of surface-air exchange over tall vegetation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91: 39-49.
- [11] Leuning R, King K M. Comparison of eddy-covariance measurement of CO₂ fluxes by open- and closed-path CO₂ analysers [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992, 59: 297-311.
- [12] Suyker A E, Verma S B. Eddy correlation measurement of CO₂ flux using a closed-path sensor: Theory and field test against an open path sensor [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1993, 64: 391-407.
- [13] Paw U K T, 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: 487-511.
- [14] 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.
- [15] Foken T, Wichra B. Tools for quality assessment of surface measurement [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 78: 83-105.
- [16] Moncrieff J B, Malhi Y, Leuning R. The propagation of errors in long-term measurement of land-atmosphere fluxes of carbon and water [J]. *Global Change Biology*, 1996, 2: 231-240.
- [17] Businger J A. Evaluation of the accuracy with which dry deposition can be measured with current micrometeorological techniques [J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1986, 25: 1100-1124.
- [18] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurement for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 1980, 106: 85-100.
- [19] Baldocchi D, Finnigan J, Wilson K, et al. On measuring net carbon exchange over tall vegetation on complex terrain [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 96: 257-291.
- [20] Moore C J. Frequency response correction for eddy correction systems [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, 37: 17-30.
- [21] Horst T W. A simple formula for attenuation of eddy fluxes measured with first-order-response scalar sensors [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1997, 82: 219-233.
- [22] Massman W J. A simple method for estimating frequency response correction for eddy covariance systems [J]. *Agricultural Forest and Meteorology*, 2000, 104: 185-198.
- [23] Massman W J. Reply to comment by Rannik on "A simple method for estimating frequency response correction for eddy covariance systems" [J]. *Agricultural Forest and Meteorology*, 2001, 107: 247-251.
- [24] Rannik U. A comment on the paper by W. J. Massman "A simple method for estimating frequency response correction for eddy covariance systems" [J]. *Agricultural Forest and Meteorology*, 2001, 107: 241-245.
- [25] Goulden M L, Daube B C, Fan S M, et al. Physiological response of a black spruce forest to the weather [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 987-996.
- [26] Finnigan J. A comment on the paper by Lee (1998): "On micrometeorological observation of surface-air exchange over tall vegetation" [J]. *Agricultural Forest and Meteorology*, 1999, 97: 55-64.
- [27] Kaimal J C, Finnigan J J. *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement* [M]. New York: Oxford University Press, 1994.
- [28] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99: 127-150.
- [29] Weber R O. Remarks on the definition and estimation of friction velocity [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1999, 93: 207-209.
- [30] Lecler M Y, Theriault G W. Footprint prediction of scalar using a markovian analysis [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1990, 52: 247-258.
- [31] Schmid H P. Source areas for scalar and scalar fluxes [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 67: 293-318.
- [32] Lee X, Barr A G. Climatology of gravity waves in a forest [J]. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 1998, 124: 403-419.
- [33] Fitzjarrald D R, Morre K E. Mechanisms of nocturnal exchange between the rain forest and the atmosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95: 16938-16850.
- [34] Hu X, Lee X, Steven D E, et al. A numerical study of nocturnal

- wavelike motion in forest [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 102, 199-223.
- [35] W ynsgaard J, Kosovic B. Similarity of structure-function parameters in the stratified boundary-layer [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 71, 277-296.
- [36] Mahrt L. Momentum balance of gravity flow [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1982, 39, 2701-2711.
- [37] Sun J, Desjardins R, Mahrt L, et al. Transport of carbon dioxide, water vapour, and ozone by turbulence and local circulations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103, 25873-25885.
- [38] Black T A, Chen W J, Barr A G, et al. Increased carbon sequestration by boreal deciduous forest in years with a warm spring [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27, 1271-1274.
- [39] Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forest: The EUROFLUX methodology [J]. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30, 113-175.
- [40] Grace J, Malhi Y, Lloyd J, et al. The use of eddy covariance to infer the carbon dioxide uptake of Brazilian rain forest [J]. *Global Change Biology*, 1996, 2, 209-217.

UNCERTAINTIES IN LONG-TERM STUDIES OF NET ECOSYSTEM CO₂ EXCHANGE WITH THE ATMOSPHERE BASED ON EDDY COVARIANCE TECHNIQUE

W EN Xue-fa, YU Gui-rui, SUN Xiao-min

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Direct and continuous long-term measurements of canopy-scale carbon dioxide fluxes have only recently become possible due to the improvement of eddy covariance technique. Now it has been widely used in long-term observation studies of CO₂ uptake and release by terrestrial ecosystem. A global network of micrometeorological tower sites (FLUXNET) uses eddy covariance methods to measure the exchanges of CO₂ between terrestrial ecosystem and atmosphere, but a majority of the sites are not in ideal conditions, which can not fully meet the basic assumption of eddy covariance technique for the CO₂ flux measurement, thus resulting in some uncertainties in the flux measurement. Chinese Terrestrial Ecosystem Flux Observational Research Network (ChinaFLUX) has been established, which relies on Chinese Ecosystem Research Network (CERN) and applies eddy covariance of micrometeorology as main research method to study fluxes of carbon dioxide between the vegetation and soil of typical ecosystem and atmosphere. The objective of this paper is to introduce the basic assumption of the eddy covariance technique, the basic theoretical equations, the types and characteristics of errors in long-term measurements and to elucidate emphatically the uncertainties in the flux measurement due to physical limitation of instrumentation, two and three dimensional air flow motion effects, methods of data processing, and underestimation of nighttime fluxes, etc. Where possible, this paper makes recommendations concerning methodologies and research priorities. Without some understanding of and ability to compensate for these uncertainties, cross-site comparisons and global scale synthesis are difficult and uncertain at best. Thus, data quality analysis and control (QA/QC) and errors assessments are necessary for cross-site comparisons and global scale synthesis.

Key words: Eddy covariance technique; Net ecosystem CO₂ exchange; CO₂ flux; Non-ideal condition; Uncertainty.