

复杂地形条件下森林植被湍流通量测定分析*

温学发^{①②} 于贵瑞^{①**} 孙晓敏^① 刘允芬^①

(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 作为中国陆地生态系统通量观测网络(ChinaFLUX)的组成部分, 利用涡度相关技术对千烟洲红壤丘陵区亚热带人工针叶林 2 倍和 3 倍冠层高度 CO₂ 等湍流通量进行了长期观测. 采用谱分析、方差相似性关系和能量平衡闭合分析 3 种测试手段对 2003 年千烟洲人工林两个高度的湍流通量测定数据质量进行了分析. 研究表明: (i) 两个测定高度的三维风速, CO₂, H₂O 和温度的功率谱在惯性子区内基本符合 -2/3 定律, 而 CO₂, H₂O 和温度与垂直风速的协谱在惯性子区内也基本符合 -4/3 定律. 谱分析表明大尺度运动对物质和能量传输的贡献随测定高度的增加而增加, 也表明不同高度的涡度相关系统对高频信号的响应能力是满足观测要求的. (ii) 根据莫宁-奥布霍夫相似理论的分析表明, 两个高度的垂直风速和温度归一化的方差都是大气稳定度的普适函数. 夜间垂直风速的归一化方差与莫宁-奥布霍夫相似函数预测值的偏离和低估量是摩擦风速的函数. 千烟洲人工林夜间湍流通量测定适宜的摩擦风速界限值应该为 0.2~0.3 m s⁻¹, 保证涡度相关测定处于较强湍流条件下, 排除或降低非湍流通量成分的影响. (iii) 当摩擦风速大于界限值时, 千烟洲人工林能量平衡闭合程度可以达到大约 72%~81% 左右, 与文献报道的 10%~30% 不闭合度是相一致的. 影响能量平衡的因素多, 包括对通量测定有影响的因素也包括对通量测定无影响的因素, 因此, 能量平衡闭合评价仅可作为数据质量评价的重要参考指标.

关键词 涡度相关 谱分析 莫宁-奥布霍夫相似理论 能量平衡闭合 夜间湍流通量

陆地生态系统碳水循环机理及其收支的研究一直是生态系统碳水循环研究中的关键科学问题^[1-3]. 近年来, 涡度相关技术上的进步使得长期和连续的涡度相关测定成为可能, 并已广泛应用于陆地生态系统 CO₂, 水和能量交换的研究之中^[1,4-6]. 目前, 从微气象

学的角度而言, 在地势平坦冠层均质且广阔的通量观测站所获得的涡度相关湍流通量测定数据是最值得信赖的^[7,8]. 但是现实中陆地生态系统是由各种斑块状冠层构成的, 特别是森林生态系统主要分布在复杂的高山地形条件下, 这种条件下难以完全满足涡度相

2004-07-14 收稿, 2004-10-26 收修改稿

* 中国科学院知识创新工程重大项目(编号: KZCX1-SW-01-01A)和国家重点基础研究发展规划项目(编号: 2002CB412501)共同资助

** E-mail: yugr@igsrr.ac.cn 或 yuguirui@cern.ac.cn

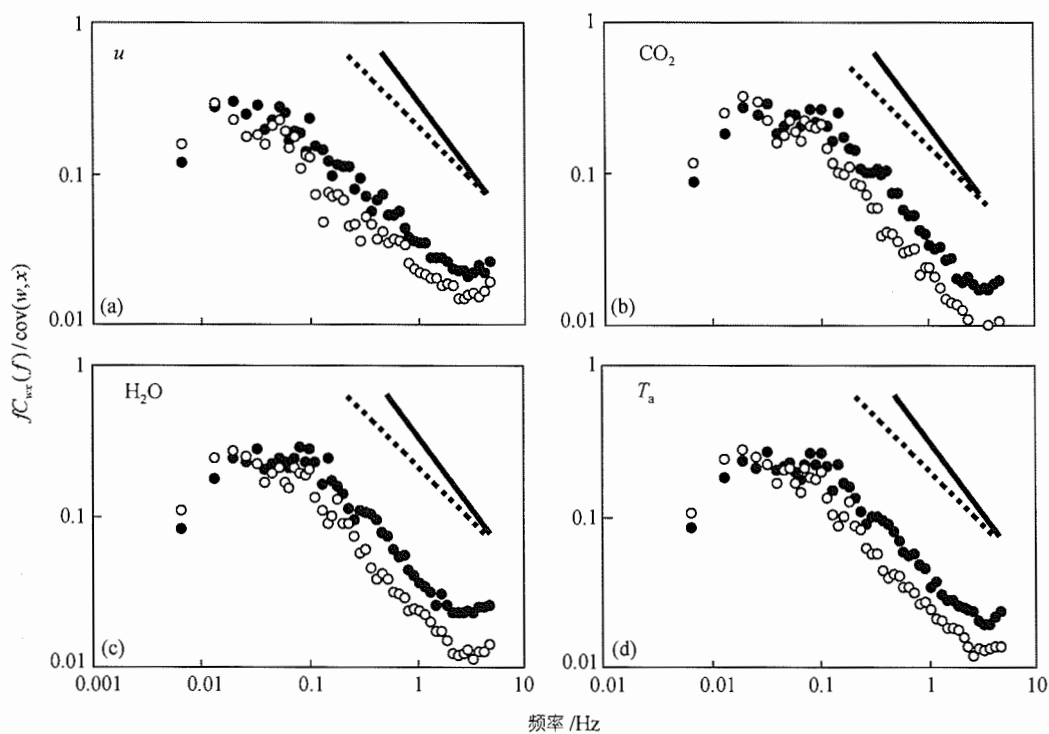


图 2 对数坐标下, 垂直风速 w 和变量 x , 包括水平风速 u (a), CO_2 (b), 水汽 H_2O (c) 和空气温度 T_a (d) 的协谱数据为 2003 年 10 月 11 日 10:00~14:00 共 8 个 30 min 的垂直风速 w 和变量 x 协谱的平均值; 2 倍冠层高度测定为实心圆, 3 倍冠层高度测定为空心圆; 图中实线为 $-4/3$ 斜率, 而虚线为 -1 斜率

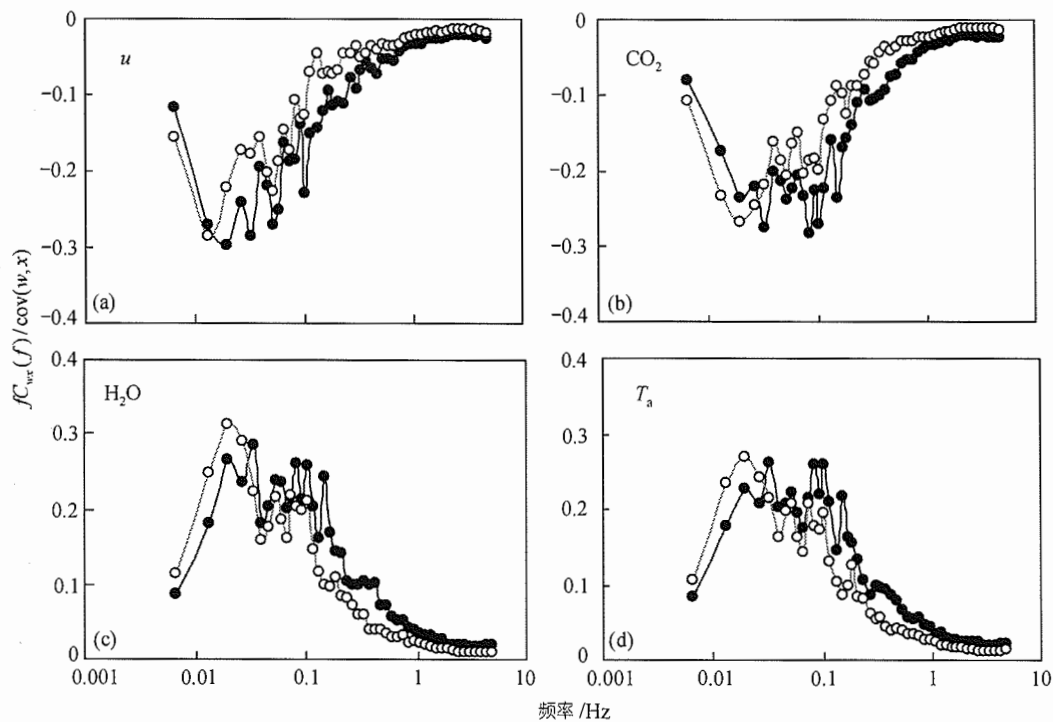


图 3 半对数坐标下, 垂直风速 w 和变量 x , 包括水平风速 u (a), CO_2 (b), 水汽 H_2O (c) 和空气温度 T_a (d) 的协谱数据为 2003 年 10 月 11 日 10:00~14:00 共 8 个 30 min 的垂直风速 w 和变量 x 协谱的平均值; 2 倍冠层高度测定为实心圆, 3 倍冠层高度测定为空心圆

2.2 方差相似性关系

莫宁-奥布霍夫相似理论的假设认为，在近地边界层内各种大气参数和统计特征可以利用速度尺度 u_* 或温度尺度 T_* 归一化为大气稳定度 $(z_m-d)/L$ 的普适函数，这里 z_m 是湍流通量测定高度， d 是零平面位移， L 是莫宁-奥布霍夫长度。湍流积分统计特性也就是方差相似性关系，可以作为涡度相关数据质量检验的可靠标准^[5,16,22]。特别是垂直风速和温度方差的相似性关系得到了广泛的应用，并获得了许多经验拟合方程。在不稳定大气条件下，被广泛应用和接受的垂直风速以及温度的方差相似性关系分别为^[22,24]：

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = a_1 \cdot [1+3|(z_m-d)/L|]^b, \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_T}{T_*} = a_2 \cdot [1+9.5|(z_m-d)/L|]^{b_2}, \quad (2)$$

式中 a_1, b_1, a_2 和 b_2 是经验系数。

湍流方差相似性关系测试可以检验湍流是否能

够很好地形成与发展，是否符合湍流运动的相似性理论，从而可以获得有关观测站点特性和仪器配置影响的信息。如果湍流方差相似性关系的观测值与模拟值相差不超过 20%~30%，可以认为数据质量是令人满意的。通过这个湍流方差相似性关系测试可以发现非均质地形条件下的一些典型效应。第一，如果是由于障碍物或仪器自身导致附加的机械湍流，则湍流方差相似性关系的观测值会显著高于模型的预测值。第二，在近地边界层温度和湿度异质的地形条件下，湍流方差相似性关系的观测值会显著高于模型预测值，但是在近地边界层粗糙度异质的条件下则并不存在这种效应。

如图 4(a)和(c)所示，在不稳定大气条件下可以用方程(1)描述两个高度的垂直风速归一化的标准偏差 σ_w/u_* 与大气稳定度 $(z_m-d)/L$ 间的普适函数关系。另外，方程(1)也可以在稳定大气即中性大气层结条件下得到很好的应用。利用最小二乘法确定方程(1)经验系数 b_1 ，在两倍冠层高度处， $b_1 = 0.14 \approx 1/7$ ，其

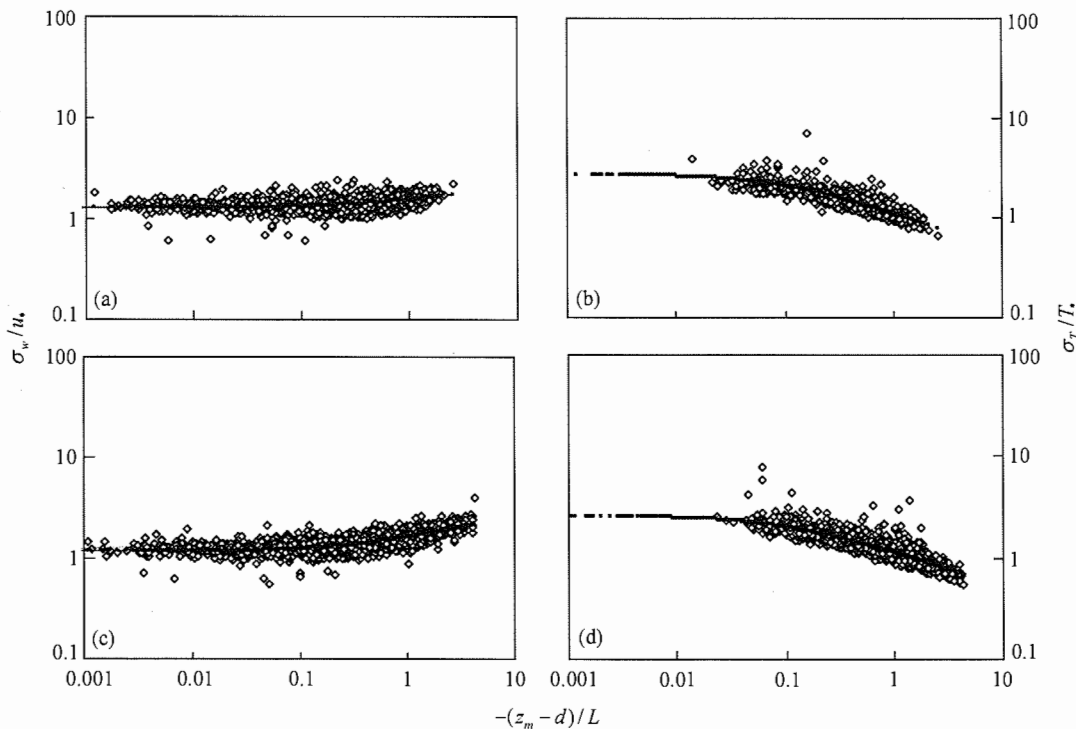


图 4 在不稳定大气条件下垂直风速归一化的标准偏差 σ_w/u_* 和温度归一化的标准偏差 σ_T/T_* 与大气稳定度 $(z_m-d)/L$ 的关系 (a)和(b)为在 2 倍冠层高度通量测定；(c)和(d)为在 3 倍冠层高度通量测定；图中实线为最小二乘法确定的相似性函数曲线

值小于平坦地形条件下被广泛报道的 $1/3$; 而在三倍冠层高度处, $b_1 = 0.24 \approx 1/4$, 其值非常接近平坦地形条件下的报道. 这也验证了谱分析的结果, 在较低的测定高度下高频成分对通量贡献较大. 经验系数 a_1 代表机械湍流影响 σ_w/u_* 的程度, 2 倍冠层高度处的 $a_1 = 1.28$, 而 3 倍冠层高度则为 $a_1 = 1.17$, 都非常接近平坦地形条件下的 $1.25^{[22]}$.

在中性大气条件下, 空气温度归一化的标准偏差 σ_T/T_* 由于会受到较大的相对误差的影响. 为此需要剔除中性条件下 σ_T/T_* 数据, 我们挑选了显热通量大于 100 W m^{-2} 的数据进行分析. 如图 4(b)和(d)所示, 可以利用方程(2)描述两个高度的 σ_T/T_* 与大气稳定度 $(z_m-d)/L$ 间的普适函数关系. 利用最小二乘法确定方程(2)的经验系数 b_2 , 在两倍冠层高度处的 $b_2 = -0.38 \approx -1/3$, 而在三倍冠层高度处的 $b_2 = -0.35 \approx -1/3$, 都非常接近平坦地形条件下广泛报道的 $-1/3^{[22]}$. 2 倍冠层高度处的经验系数 $a_2 = 2.71$, 而 3 倍冠层高度则为 $a_2 = 2.59$, 都大于平坦地形条件下的 $2^{[22]}$.

如图 4 所示, 湍流方差相似性关系的观测值与模型理论预测值间的一致性是令人满意的. 可以说明千烟洲亚热带人工针叶林 2 倍和 3 倍冠层高度湍流通量观测基本上不存在由于障碍物或仪器自身干扰产生的附加机械湍流, 也几乎不存在近地边界层温度和湿度异质性对数据质量的影响. 2 倍和 3 倍冠层高度的湍流通量测定都在近地边界层内^[22,24], 尽管观测站并不能完全满足涡度相关技术的基本假设, 但两个高度的湍流通量测定都是有效的, 并且能够代表站点通量特征.

2.3 夜间湍流通量

在大气稳定的夜间条件下, 由于涡度相关技术不能测定非湍流过程的 CO_2 通量, 而这种非湍流过程对 CO_2 交换的影响更为显著, 即使考虑 CO_2 的储存效应时, 涡度相关测定也可能低估净生态系统 CO_2 交换量. 在夜间摩擦风速 u_* (作为湍流混合强度的标准) 与 CO_2 释放量间存在着明显的相关关系也证明了上述问题^[25]. 事实上, 夜间 CO_2 释放量主要来源于生态系统呼吸(生态系统呼吸是土壤微生物、根、叶和茎秆呼吸的总和), 其主要受温度条件控制. 如果排除温

度与摩擦风速间的相关性, 夜间 CO_2 释放量应该与摩擦风速无关. 夜间 CO_2 释放量的低估会造成长期的碳收支平衡预算中严重的选择性系统误差(指仅仅作用于湍流测定的部分昼夜过程而造成的测量值与真值的系统偏离, 如夜间空气泄流等造成的夜间通量低估的现象), 特别是基于短期通量测定来获得长期的碳收支平衡预算^[6,26].

为解决这个问题, 在大量的研究工作中是采用剔除摩擦风速临界值(通常 $0.15\sim 0.3 \text{ m s}^{-1}$) 以下的夜间观测数据以保证涡度相关测定处于强湍流的条件下, 并利用高摩擦风速条件下数据分析获得的呼吸与温度的关系函数来模拟碳释放量^[5,6]. 这种处理方法只能对夜间数据是有效的, 因为如果白天湍流通量被低估, 那么可能与低湍流混合强度有关, 也可能与较低的有效能有关^[24]. 在夜间, 没有发现任何湍流通量的低估与有效能有关^[24]. 这里选取夜间大气稳定度 $-2 \leq (z-d)/L \leq 1$ 间的湍流通量数据, 根据方程(1)建立了 σ_w/u_* 与大气稳定度间的函数关系. 如图 5(a)所示, 对于 CO_2 通量测定来说, 当两个高度的 σ_w/u_* 观测值与模型预测值小于 20% 时, 可以确定夜间摩擦风速的界限值为 $0.2\sim 0.3 \text{ m s}^{-1}$. 这也表明利用摩擦风速剔除夜间涡度通量的缺点, 即摩擦风速与测定高度有关. 由于 σ_w/u_* 测定值与模型预测值间的差异与测定高度无关, 因此其可以作为实用的数据筛选的标准^[24], 但同时这也是确定夜间摩擦风速的界限值比较可行的途径.

涡度相关技术是通过测定垂直风速和 CO_2 密度脉动而直接获得植被/大气间 CO_2 通量, 只能捕捉大气湍流运动的信号, 而不能捕捉到非湍流运动的信号. 低湍流如夜间条件下, 储存和平流效应可能会造成 CO_2 通量的系统性低估. 即使考虑了 CO_2 通量储存的校正, 这种非湍流过程通常也可以造成 4%~36% 的选择性系统性误差^[25].

如果在低摩擦风速条件下, CO_2 通量发生了选择性系统低估, 那么符合同样假设和理论的其他湍流通量如显热和潜热通量也应该受到低估. 如图 5(b)和(c)的结果表明, 当摩擦风速低于摩擦风速界限值时, 显热和潜热通量也都会被系统地低估, 相应的 σ_w/u_* 观测值与模型预测值差小于 20%. 因此, 在涡度相关

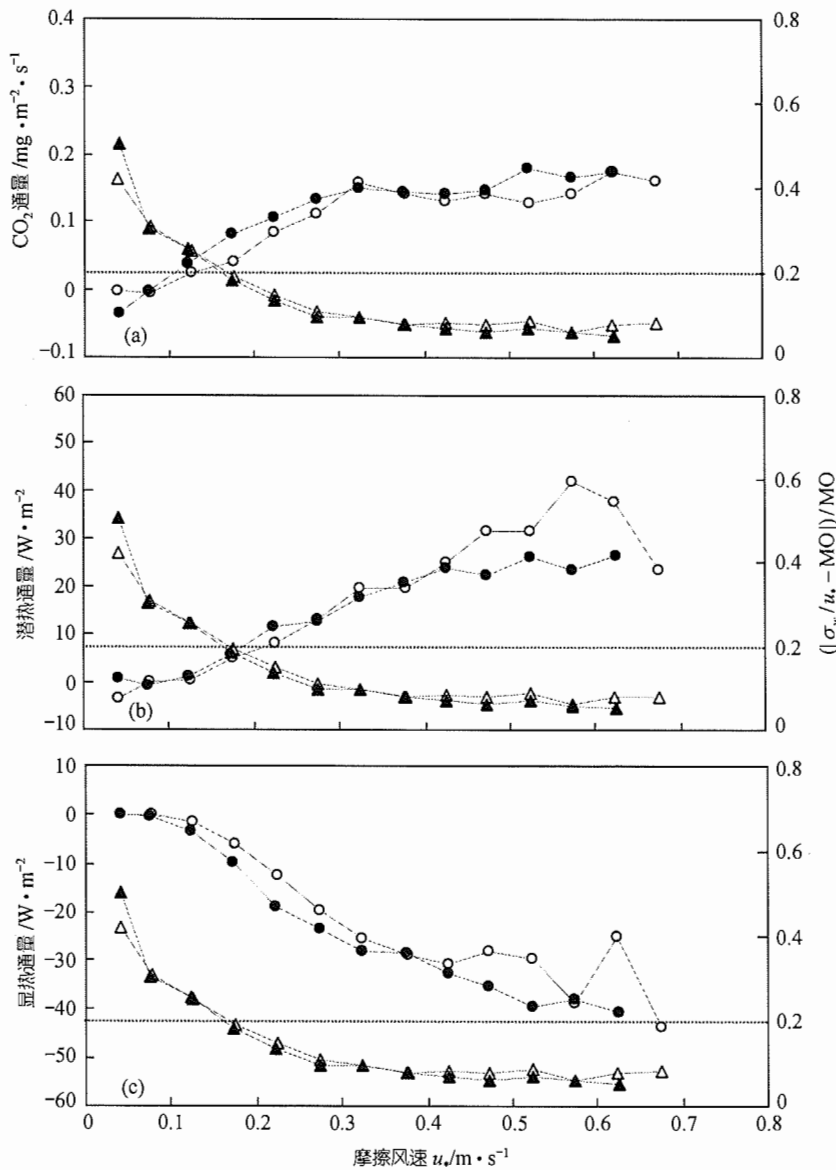


图5 CO_2 通量 F_c (a), 潜热通量 LE (b)和显热通量 H (c)以及湍流均质性指标 $(\sigma_w/u_* - MO)/MO$ 与夜间摩擦风速 u_* 的关系
 实心圆和空心圆代表 F_c , LE 和 H , 实心三角和空心三角代表 $(\sigma_w/u_* - MO)/MO$; 实心圆和实心三角代表 2 倍冠层测定高度, 空心圆和空心三角代表 3 倍冠层测定高度; MO 代表莫宁-奥布霍夫相似理论预测的 σ_w/u_*

技术应用中, 需要剔除非湍流过程占主导地位的低摩擦风速条件的湍流量数据^[27]. 虽然谱分析表明涡度相关仪器不是湍流量测定的限制性因素, 但是气象学上的限制也就是非湍流过程的增加如冷泄流等对通量测定的影响会限制高植被复杂地形条件下湍流通量的测定.

2.4 能量平衡闭合

根据热力学第一定律, 无论通量观测站存在任何生态和生物气候学上的差异, 生态系统内的能量都应该是守恒的. 因此, 对于不同通量站点的能量闭合程度成为检验数据质量的有效手段. 理论上湍流

显热和潜热通量的总和与有效能(净辐射减去土壤热通量以及观测生态系统包括空气、土壤和生物量的储存热通量)是相等的。如果湍流显热和潜热通量的总和与有效能彼此平衡,可以认为通量数据质量是令人满意的。然而,许多通量研究站点包括草地和森林等的能量不闭合现象被广泛报道^[10]。能量不闭合现象是森林冠层上方湍流通量观测中普遍存在的问题,其不闭合程度通常在 10%~30%左右^[5,10,28]。

为比较 30 min 尺度上的有效能(净辐射减去土壤热通量和空气中热储存通量)与显热和潜热之和的相对闭合程度,通常利用线性回归斜率 s_1 以及设置截距为 0 的线性回归斜率 s_2 表示。图 6(a)和(b)分别给出了 2 倍和 3 倍冠层高度湍流通量测定的能量闭合状况。2 倍冠层高度线性回归斜率为 s_1 为 0.72 和 s_2 为 0.75,而 3 倍冠层高度线性回归斜率为 s_1 为 0.76 和 s_2 为 0.81。可见两个高度的能量闭合程度大约在 72%~81%之间,与文献中报道的 10%~30%的不闭合度是一致的^[5,10,28]。在两个不同测定高度,有效能与显热和潜热和之间

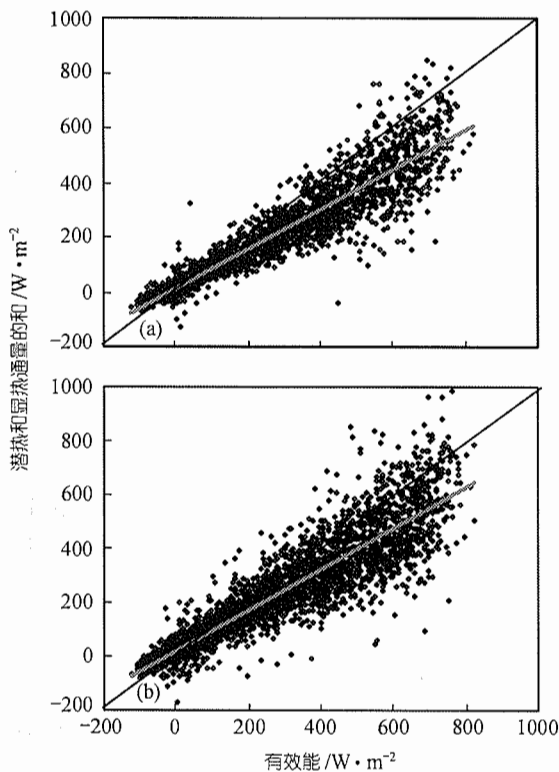


图 6 涡度相关测定的显热和潜热之和与有效能之间的关系 (a) 为 2 倍冠层高度的通量测定; (b) 为 3 倍冠层高度的通量测定; 有效能为净辐射通量减去土壤热通量和空气中显热和潜热储存通量

存在较强的相关关系(2 倍冠层高度 $r^2 = 0.88$ 和 3 倍冠层高度 $r^2 = 0.85$),但是显热和潜热通量的总和则系统性地低于有效能。

引起能量不闭合的原因很多。如表 1 可见,能量平衡不闭合并不一定就表明仅仅是由于涡度相关测定存在的观测误差所致^[5,10]。现阶段,国际上对通量观测过程中出现的能量不闭合的原因给出很多的理论理解,下面的各种因素都有可能引起能量平衡的不闭合现象的发生: (i) 取样误差,按分风向进行的能量闭合状况的分析没有发现规律性的变化,这表明潜热和显热通量贡献区并不是影响能量平衡的重要因素。在异质地形条件下,湍流通量和非湍流通量源面积的不匹配可能会造成能量不平衡。千烟洲净辐射表安装在大约 3 倍冠层高度。如图 6(a)和(b)所示,2 倍和 3 倍冠层高度能量平衡闭合度相差大约 5%左右,这种差异可能是由于涡度相关测定系统和辐射表间的源面积的差异是造成的; (ii) 仪器系统误差,包括涡度相关系统仪器偏差也包括有效能成分的常规测定仪器误差; (iii) 高频和低频通量成分的损失,如涡度相关系统传感器的分离和大尺度涡的低频成分的影响; (iv) 能量平衡方程中相关能量项的忽略,如土壤和生物量中的热储存通量; (v) 平流效应,如夜间空气的冷泄流,需要借助二维或三维平流模型来量化^[8]。以上提到的能量不闭合的原因有的与涡度相关测定系统有关,而有的则无关。因此,能量平衡闭合的测试仅仅可以作为数据质量评价的参考标准之一,而不能作为 ChinaFLUX 涡度相关测定数据质量评价的绝对标准并用于数据校正^[25,29]。

表 1 能量平衡不闭合的可能原因及其对 CO_2 通量的影响^[10]

不平衡的原因	举例	潜热和显热的和	有效能	潜热和显热的和/有效能	是否影响 CO_2 通量
取样误差	源面积不同				不
仪器偏差	净辐射表				如果三维超声风速仪或红外线 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 气体分析仪偏差,是
忽略相关能量项	树杆中热储存传感器		增加	降低	不
高频/低频损失	分离/大尺度涡	降低		降低	是
平流	局地环流				是

3 结论

千烟洲亚热带红壤丘陵人工林 2 倍和 3 倍冠层观测高度测定的三维风速, CO_2 , H_2O 和空气温度的功率谱在惯性子区基本符合 -2/3 定律, 而垂直风速与 CO_2 , H_2O 和温度的协谱在惯性子区也基本符合 -4/3 定律. 谱分析表明大尺度运动对物质和能量传输的贡献随测定高度的增加而增加. 对于该森林冠层上方两个高度的湍流测定数据的功率谱和协谱分析表明, 该观测站仪器响应特性和采样频率都可以满足湍流通量观测的基本要求.

根据莫宁-奥布霍夫相似理论研究表明, 2 倍和 3 倍冠层观测高度的垂直风速和温度归一化的标准偏差是大气稳定度的普适函数, 表明 2 倍和 3 倍冠层观测高度的湍流通量测定都在近地边界层内. 尽管观测站存在着不同程度的空间异质性问题, 虽然客观上不能完全满足涡度相关技术的基本假设条件, 但是经过数据质量控制测试后, 表明两个高度的湍流通量测定都是有效的, 并且能够代表该站点的通量特征.

仪器限制不是涡度相关技术应用的主要问题, 而气象学上的限制如非湍流过程的增加才是该站涡度相关测定中的主要制约因素. 对于千烟洲人工林湍流通量的测定, 适宜的夜间摩擦风速界限值应该为 $0.2\sim 0.3 \text{ m s}^{-1}$. 当摩擦风速大于界限值时, 千烟洲人工林的能量平衡闭合程度可以达到大约 72%~81% 左右, 与文献报道的 10%~30% 不闭合度是相一致的. 能量平衡闭合的测试仅仅可以作为数据质量评价的参考标准, 而不能作为涡度相关测定数据质量评价的绝对标准, 并应用于数据校正.

参 考 文 献

- 1 Running S W, Baldocchi D D, Turner D P, et al. Global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sens Environ*, 1999, 70: 108~127
- 2 Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 2000, 404: 861~865
- 3 Baldocchi D 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. *Bull Am Meteorol Soc*, 2001, 82: 2415~2434
- 4 Baldocchi D D, Hicks B B, Meyers T P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 1988, 69: 1331~1340
- 5 Aubinet M, Chermanne B, Vandenhaute M, et al. Long-term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. *Agric For Meteorol*, 2001, 108: 293~315
- 6 Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Biology Change*, 2003, 9: 479~492
- 7 Lee X. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agric For Meteorol*, 1998, 91: 39~50
- 8 Massman W J, Lee X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long term studies of carbon and energy exchanges. *Agric For Meteorol*, 2002, 113: 121~144
- 9 Baldocchi D D, Finnigan J, Wilson K. On measuring net carbon exchange over tall vegetation on complex terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 96: 257~291
- 10 Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric For Meteorol*, 2002, 113: 223~243
- 11 Lee X, Hu X Z. Forest-air fluxes of carbon, water and energy over non-flat terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 103: 277~301
- 12 Griffis T J, Black T A, Morgenstern K, et al. Ecophysiological controls on the carbon balances of three southern boreal forests. *Agric For Meteorol*, 2003, 117: 53~71
- 13 Baldocchi D D, Falge E, Wilson K W. A spectral analysis of biosphere-atmosphere trace gas flux densities and meteorological variables across hour to multi-year time scales. *Agric For Meteorol*, 2001, 107: 1~27
- 14 Bian L G, Xu X D, Lu L H, et al. Analyses of turbulence parameters in the near-surface layer at Qamdo of southern Tibetan Plateau. *Advance in Atmospheric Sciences*, 2003, 20: 369~378
- 15 Wen X F, Yu G R, Sun X M, et al. Net water vapour exchange and environmental control over a conifer-broad leaved forest during autumn-winter transition in Changbai Mountain. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 13: 463~468
- 16 Foken T, Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agric For Meteorol*, 1996, 78: 83~105
- 17 Vickers D, Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1997, 14: 512~526
- 18 Mahrt L. Flux sampling errors for aircraft and towers. *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, 1998, 15: 416~429
- 19 Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Bound-Lay Meteorol*, 2001, 99: 127~150
- 20 Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurement for density effects due to heat and water vapour transfer. *Ruair J R Met Soc*, 1980, 106: 85~100
- 21 Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic, Dordrecht, 1988
- 22 Kaimal J C, Finnigan J. Atmospheric boundary layer flows: their

- structure and measurement. New York: Oxford University Press, 1994
- 23 Amiro B D. Drag coefficients and turbulence spectra within three boreal forest canopies. *Boundary-Layer Meteorology*, 1990, 40:227~246.
- 24 Blanken P D, Black T A, Neumann H H, et al. Turbulence flux measurements above and below the overstory of a boreal aspen forest. *Boundary-Layer Meteorology*, 1998, 89: 109~140
- 25 Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the Euroflux methodology. *Advance in Ecological Research*, 2000, 30: 113~175
- 26 Moncrieff J B, Malhi Y, Leuning R. The propagation of errors in long-term measurement of land-atmosphere fluxes of carbon and water. *Global Change Biology*, 1996, 2: 231~240
- 27 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 等. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 84~94
- 28 Goulden M L, Munger J W, Fan S M, et al. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Glob Change Biol*, 1996, 2: 169~182
- 29 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等. 中国通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 能量平衡闭合状况的评价. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 46~56