

文章编号: 1004-4965(2007)06-0048-09

鼎湖山针阔叶混交林生态系统能量平衡分析

王春林^{1, 2}, 周国逸¹, 王旭¹, 周传艳¹, 于贵瑞³

(1. 中国科学院华南植物园, 广东 广州 510650; 2. 广东省气候与农业气象中心, 广东 广州 510080;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要: 能量平衡分析作为评价涡度相关法通量观测数据可靠性方法, 备受学界重视。本研究应用OLS(Ordinary least squares)和EBR(Energy Balance Ratio)2种方法, 系统分析了鼎湖山针阔叶混交林生态系统能量平衡特点, 并分析各种涡度通量修正方法对能量平衡的影响, 结果表明鼎湖山通量站平均能力平衡不闭合度为33%~47%, 略高于普遍报道的不闭合度范围(10%~30%)。WPL修正、 u^* 订正和坐标转换, 使得能量平衡闭合度有所提高, 但夜间特别是冬季能量平衡较差问题依然没有得到根本解决, 表明夜间弱湍流并不是导致夜间能量平衡闭合度差的主要原因。本研究为客观评价本通量站以及ChinaFLUX能量平衡状况和通量数据质量, 确定涡度相关法CO₂通量数据分析方法和改进策略提供依据。

关 键 词: 鼎湖山; 针阔叶混交林; 能量平衡; 涡度相关法

中图分类号: P

文献标识码: A

1 引 言

随着涡度相关技术在陆地生态系统和大气之间CO₂和水热通量测定研究中的广泛应用, 如何评价涡度相关观测数据可信度成为通量界共同关心的重要问题。利用涡度相关技术测定CO₂和水热通量的基本假设是一致的, 这些物质和能量通量的计算都是建立在相似理论基础之上, 具有相同的传输机制, 因此将能量平衡闭合程度作为评价涡度相关数据可靠性的方法已经被人们广泛接受^[1]。有人^[2-4]还尝试采用能量闭合度对涡度相关法测定的NEE进行校正, 但相反研究^[5-7]则认为能量平衡的测试仅可以作为评价数据质量的参考指标, 而不能作为绝对标准并用于数据校正。FLUXNET许多站点都把能量平衡分析作为一种标准程序用于通量数据的质量评价^[8-9]。

国外关于能量平衡闭合问题已经开展了大量的研究, Wilson^[10]系统分析了FLUXNET站点能量平衡的闭合状况, 并对各站点的能量平衡状况进行了综合评价, 认为湍流通量观测中普遍存在10%~30%^[5, 10]不闭合度。Blanken^[11]和Aubinet^[12]从理论上证明在夜间当摩擦风速很低时, 有效能量和湍流通量之间会出现很大的差值; Baldocchi^[13]和Kustas^[14]的研究表明, 若涡度相关仪器和有效能量测定仪器所测定的下垫

面存在着很大的异质性(开阔冠层或多组分的冠层), 这种测量面积的不匹配会带来更大的能量不闭合; Moore^[15]和Aubinet^[12]认为由于低通滤波(高频损失)和高通滤波(低频损失)的作用涡度相关技术往往会低估湍流通量; Lee^[16]认为在夜间能量平衡不闭合经常是由于垂直平流引起; Stannard^[17]则认为在地形有较大起伏的地区, 由于容易形成局地环流或夜间泄流, 能量平衡很难闭合; Sun^[18]认为即使在较为平坦的地区, 当大气层结具有很强的稳定性时也会在近地面引起夜间泄流和平流现象。

国内相关研究从2002年开始随着中国通量网络(ChinaFLUX)建成陆续开始。李正泉等^[6]对ChinaFLUX各站点的能量平衡闭合状况进行了综合评价, 认为鼎湖山通量站总体上能量平衡状况较好; 王旭等^[19]分析了鼎湖山通量站旱季能量平衡状况。本文全面分析能量平衡闭合度日变化和季节变化规律及其与摩擦风速、风向等的细致关系, 并分析各种涡度通量修正方法对能量平衡的影响, 揭示影响鼎湖山通量站夜间涡度通量偏低问题的具体原因, 为客观评价本通量站能量平衡状况和通量数据质量, 确定涡度相关法CO₂通量数据分析方法和改进策略提供依据。

2 数据与方法

收稿日期: 2006-10-24; 修订日期: 2007-04-28

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

作者简介: 王春林, 男, 江苏人, 博士, 高级工程师, 研究方向: 生态与农业气象。电话: 020-87762381。e-mail: wangcl@grmc.gov.cn

2.1 研究区域

北回归线两侧地区是地球上最大的干旱沙漠和半沙漠地带, 而鼎湖山地区由于其独特的地理位置、气候和人文因素, 保存有较为完好的典型地带性植被类型—亚热带常绿阔叶林, 被认为是该纬度带上最具特色、最具研究价值的地区之一。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 4 665 MJm⁻²a⁻¹, 年平均日照时数为 1 433 h; 年平均气温 21.0 °C, 最冷月为 1 月, 平均气温 12.0 °C, 最热月为 7 月, 平均气温 28.0 °C; 年均降水量 1 956 mm, 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 240 m, 坡度 10 度左右, 坡向东偏南。主风方向东北面比较开阔。优势树种为荷树(*Schima superba*)、锥栗(*Castanopsis chinensis*)和马尾松(*Pinus massoniana*), 树龄约为 100a, 树高约 17 m; 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 30~60 cm 之间, 地面枯枝落叶层盖度 80%~90%, 厚度 1~3 cm, pH 值为 3.86。

2.2 观测设计

冠层上方开路涡度相关通量观测系统(Open Path Eddy Covariance, OPEC)安装高度为 27 m, 采用三维超声风速仪(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(IRGA) (Li-7500, LiCor Inc, USA)测量 CO₂/H₂O 浓度脉动。湍流信号采样频率为 10 Hz, 通过数据采集器(CR5000, CSI)自动存储 10 Hz 原始数据, 并在线计算 30 min 的 CO₂ 通量(*F_c*)、潜热通量(*LE*)和显热通量(*H_s*)等。*F_c*、*LE*、*H_s* 在线计算中自动作了虚温订正^[20]和空气密度脉动订正^[21], 但是未考虑地形和仪器倾斜影响。净辐射 *R_n*(CNR-1, CSI)观测高度为 36 m; 2 层土壤热通量 *G*(HFP01, Hukseflux)观测深度分别为 3、5 cm, 7 层气温观测高度分别为: 4、9、15、21、27、31、36 m, *R_n* 等常规气象数据采样频率为 0.5 Hz, 通过 4 个数据采集器(CR23X-TD/CR10X-TD, CSI)在线计算并存储 30 min 统计数据。按照微气象学符号协定, *F_c*、*LE*、*H_s* 正号表示向上通量, 而 *G* 相反, 正号表示向下通量。

2.3 能量平衡方程

这里的能量平衡是指涡度相关仪器直接观测的生态系统/大气界面湍流能量通量(包括潜热和显热)

与常规气象仪器测得的有效能量(包括净辐射、土壤热通量、冠层热储量三者之和)之间的平衡。基于涡度相关技术的通量测量系统中, 能量平衡公式为:

$$LE + H_s = R_n - G - S - Q \quad (1)$$

式(1)中左边2项为涡度相关系统测量项, 其中 *LE* 为潜热通量, *H_s* 为显热通量; 右边前3项为常规气象测量项, 其中 *R_n* 为冠层净辐射, *G* 为土壤热通量, *S* 为冠层热储量。 *Q* 为附加能量源汇的总和, 因 *Q* 项值很小通常被忽略。冠层热储量项(*S*)的计算公式为

$$S = \int_0^{hc} \lambda \frac{\partial \rho_v}{\partial t} dz + \int_0^{hc} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dz \quad (2)$$

式(2)右边两项分别为冠层内潜热和显热储存量, 其中 *hc* 为湍流能量观测高度(也可以采用冠层高度), λ 为水汽潜热系数(2 400 J/g), ρ 为空气密度(kg/m³), *C_p* 为空气定压比热(1 004.67 J/(kg · K)), ρ_v 为冠层内空气湿度, *T* 为冠层气温。这里忽略冠层内叶、枝干中的热储量。这里忽略净辐射 *R_n* 和涡度相关法热通量观测高度之间的净辐射衰减。研究^[15, 22]认为当冠层高度超过 8 m 时(如森林生态系统), 冠层热储量是不能忽略的。

本文采用2个能量平衡指标来评价能量平衡闭合度。第一个是根据有效能量(*R_n*-*G*-*S*)和湍流通量(*LE*+*H_s*)之间线性回归方程的斜率(Slope)、截距(intercept)。线性回归方法一般有OLS(Ordinary Least Squares)和RMA(Reduced Major Axis)两种, 以往研究表明^[6, 10]二者没有太大区别, 因此本文仅采用OLS回归方法。在理想的能量平衡状况下, 有效能量和湍流能量的回归直线斜率为1, 截距为0(即通过原点)。

第二个指标是能量平衡比率(Energy Balance Ratio, EBR), 其定义为

$$EBR = \frac{\sum(LE + H_s)}{\sum(R_n - G - S)} \quad (3)$$

3 结果与分析

3.1 湍流能量和有效能量日变化特征

生态系统水热过程本质上是由进入系统的辐射能量驱动的。显热通量(*H_s*)、潜热通量(*LE*)均与净辐射(*R_n*)具有类似的日变化特征(图 1): 白天 *H_s*、*LE* 和 *R_n* 同步变化, 均在正午前后达到峰值; 夜间 *H_s*、*LE* 基本为零, 而 *R_n* 为负。土壤热通量(*G*)与前面 3 者相比要小 1~2 个数量级, 其日变化特点冬、夏季略有不同。冬季 12: 00~21: 00 *G* 为正, 其余大部分时间 *G* 为负, 总体上土壤表现为热源。从土壤温度垂直梯度可以进一步发现, 总体上深层温度高于地表, 整层土壤以向上传输热量为主。夏季土壤热通量 *G* 仅在凌晨 4: 00~9: 00 为负, 其余大部分时段 *G* 为正, 因此总体上土壤表现为热汇(图 1)。

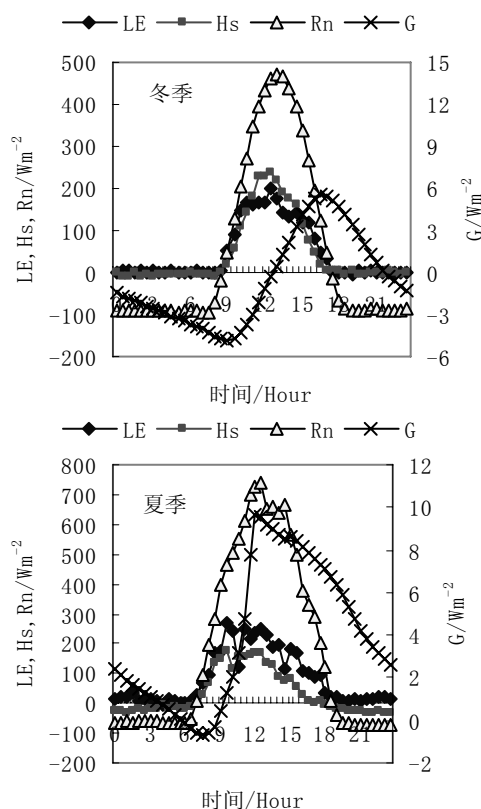


图1 能量平衡各分量日变化 LE 为潜热通量, Hs 为显热通量; Rn 为净辐射, G 为土壤热通量。冬季为2003年1月13~23日平均, 夏季为2003年7月13~19日平均。

冠层热储量项 S (包括潜热和显热)大小与土壤热通量 G 相当, 但日变化规律不明显, 且日总量接近0, 当将冠层热储量(S)加入有效能量项后OLS 回归斜率平均增加了0.01, 表明忽略冠层热储量对能量平衡影响很小, 因此本文对冠层热储量 S 予以忽略。值得注意的是, 图1中夜间由于对外长波辐射散热, 有效能量小于0, 而湍流能量接近于0, 意味着夜间能量闭合度可能较差, 特别是在冬季更明显, 后面对此有进一步分析。

3.2 能量平衡状况

湍流能量($LE+Hs$)与有效能量($Rn-G$)的线性回归方程的斜率(截距为0), 冬季为0.77, 大于夏季的0.53(图2), 方程的解释方差 R^2 也是冬季大于夏季, 表明冬季能量平衡好于夏季, 这一点正好与北方通量站情况^[6]相反。在有效能量($Rn-G$)小于0部分(对应夜间时段, 图1), 冬、夏季均存在系统性偏离拟合直线现象, 即湍流能量($LE+Hs$)绝对值小于有效能量($Rn-G$)(图2), 这与夜间弱湍流条件下湍流量偏低估计有关。

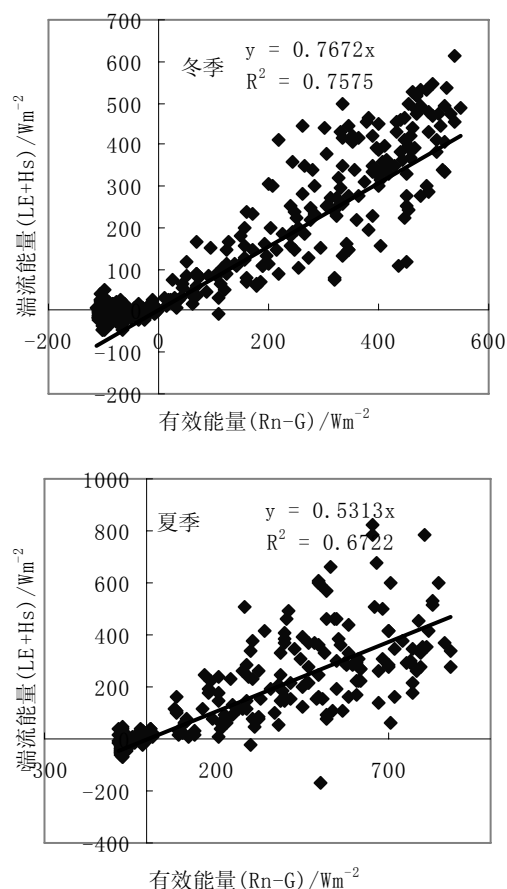


图2 湍流能量($LE+Hs$)与有效能量($Rn-G$)的关系 为方便比较这里强制拟合直线截距为0。冬季资料为2003年1月13~23日, 夏季资料为2003年7月13~19日。

进一步分析能量平衡比率 EBR 日变化表明, 白天 EBR 明显大于夜晚(图3), 日出、日落前后 EBR 波动较大, 这可能与大气稳定度转化有关。值得注意的是冬季和夏季白天的 EBR 均在日出后不久达到最大, 然后逐渐下降, 这与李正泉等^[6]对北方的长白山森林分析结果不同, 具体原因有待进一步研究。从白天能量平衡比率 EBR 看, 冬季为 0.8 ± 0.2 , 夏季为 0.5 ± 0.3 , 冬季好于夏季。夜间 EBR 为 $0.1 \sim 0.2$ 之间, 夏季好于冬季。可见夜间(特别是冬季)能量平衡状况差是本通量站存在的突出问题。

3.3 WPL 修正对能量平衡的影响

WPL 订正是涡度相关法通量观测中基本方法之一。对于能量通量, WPL 修正只对潜热通量进行, 显热通量不需要此项修正。潜热通量的 WPL 修正包括水汽脉动修正项(WPL_h2o)和气温脉动修正项(WPL_T), 二者均与未经 WPL 修正的潜热通量(LE_irga)之间呈良好的线性关系, 且均呈日射型日变化规律(图4)。WPL_T 大于 WPL_h2o, 其中冬季 WPL_T 和 WPL_h2o 各占 LE_irga 的 8.5% 和 1.5%(图4); 夏季 WPL_h2o 比重上升到 3.5%, 与夏季水汽压较大有关。WPL 修正使得潜热通量增加 10% 左右。

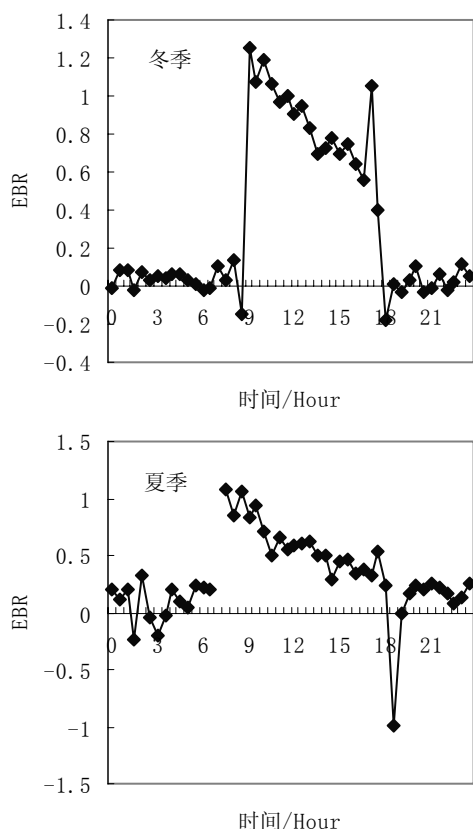


图3 能量平衡比率 EBR 日变化 冬季为 2003 年 1 月 13~23 日平均, 夏季为 2003 年 7 月 13~19 日平均。

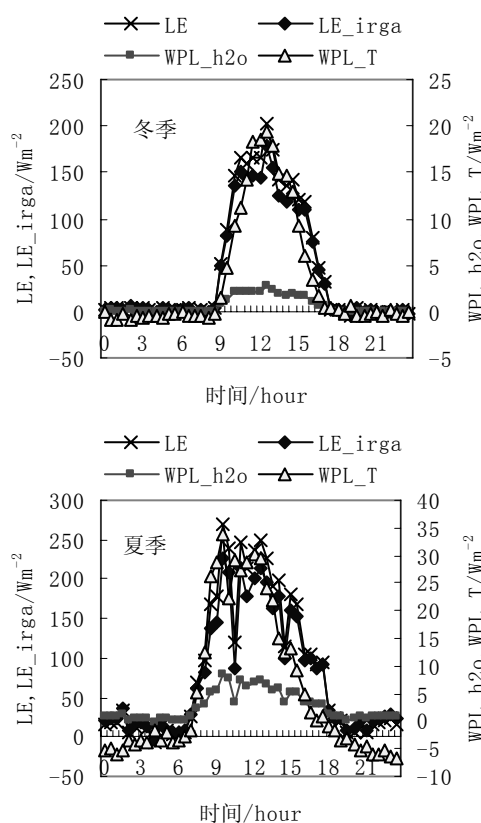


图4 潜热通量及其 WPL 订正项日变化 LE_{irga} 为未

经过 WPL 修正的潜热通量; WPL_{h2o} 为水汽脉动修正项; WPL_T 为温度脉动修正项; LE 为 WPL 修正后的潜热通量。冬季资料为 2003-1-13~23; 夏季资料为 2003-7-13~19。

冬季 WPL 修正对 EBR 影响呈准辐射型日变化趋势, EBR 增加值白天大于夜晚, 表现平稳(图 5, 左)。而夏季 WPL 修正对 EBR 影响日变化不明显(图 5, 右), 但 WPL 修正使得夜间的 EBR 也得到如白天一样的增加值, 对改善原本偏低的夜间能量平衡比较有意义。总体上 WPL 修正使得能量平衡比率 EBR 增加约 0.02~0.05, 夏季比冬季更加明显(图 5)。

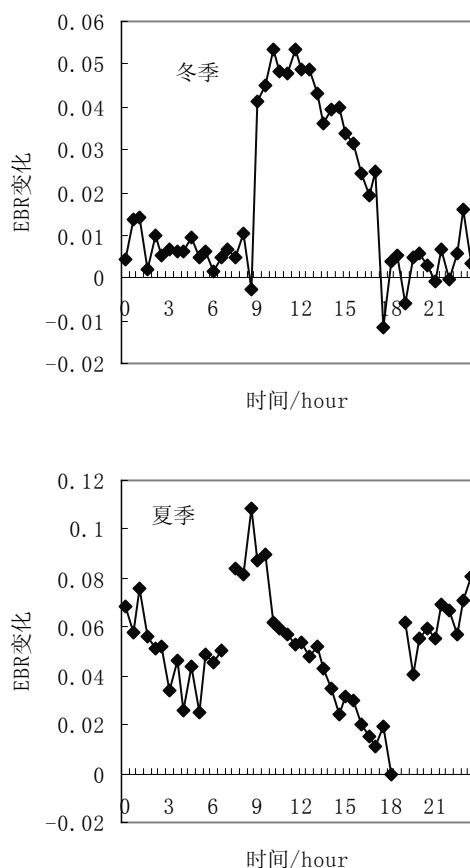


图5 WPL 修正对能量平衡比率 EBR 的影响日变化 EBR 变化指 WPL 订正后 EBR 与订正前 EBR 之差, 冬季资料为 2003-01-13~23, 夏季资料为 2003-07-13~19。

3.4 湍流混合强度对能量平衡的影响

对于能量平衡不能闭合特别是夜间能量平衡低于白天这一普遍存在的现象, 目前比较一致的看法认为, 湍流交换不足导致涡度相关法对通量的估算偏低, 从而导致能量不能闭合。

定义夜间为林冠层上方光合有效辐射(PAR)低于 1 W/m^2 的时段, 白天为 PAR 大于等于 1 W/m^2 的时段。这里以摩擦风速 u^* 作为度量湍流混合强度的指标, 对白天和夜间数据分别按照 0.05 m/s 间隔的摩擦风速分类统计平均能量平衡比率 EBR 。白天湍流状况比较好, 摩擦风速最大频率出现在 0.2 m/s , 冬季和夏

季差别不大(图6a); 夜间湍流状况比较差, 摩擦风速明显低于白天, 且冬夏季差异较大, 冬季大部分摩擦风速低于0.1 m/s, 夏季大部分风速大于0.2 m/s(图6b)。

进一步从能量平衡比率 EBR 与摩擦风速 u^* 的关系看(图7), 白天在 u^* 低于0.2 m/s时, EBR 随 u^* 增大而迅速增大; 在 u^* 大于0.2 m/s时, EBR 在0.5水平波动(图7a)。结合风速频率分布可见白天总体上能量平衡状况较好(印证图3结论), 摩擦风速是影响白天总体能量平衡的关键因素, 可以采取 u^* 订正方法来提高能量平衡状况。

夜间能量平衡比率 EBR 随摩擦风速 u^* 变化不明显(图7b)。夏季夜间 EBR 在0.2上下波动, 看不出与 u^* 的变化关系; 冬季夜间能量平衡状况比夏季更差, EBR 在 u^* 小于0.3 m/s时几乎为0, 虽然在 u^* 大于0.3 m/s时 EBR 上升到0.2左右, 但 u^* 大于0.3 m/s的有效样本非常少, 因此无法通过 u^* 订正方法将 EBR 提升到0.2以上的水平。总之, 鼎湖山通量站夜间能量平衡状况较差, 且与 u^* 关系不明显, 不能采用常见的 u^* 订正方法从根本上得以改善。

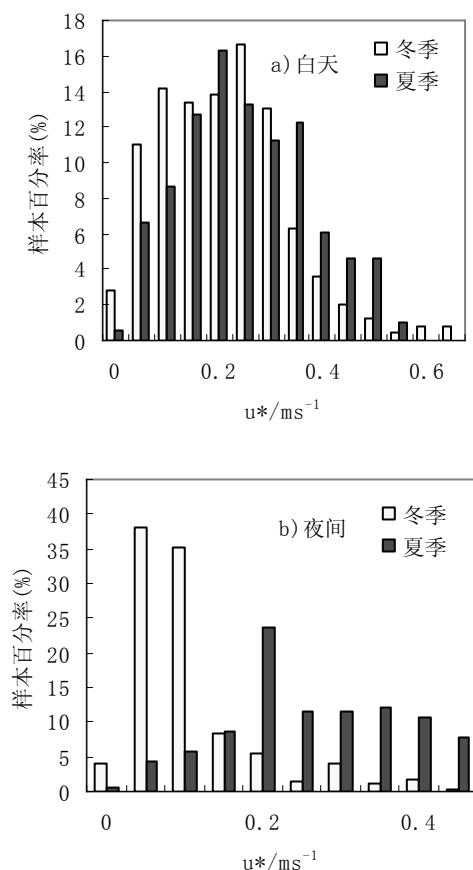


图6 白天(a)和夜间(b)摩擦风速(u^*)频率分布
冬季资料为 2003-01-13~23, 夏季资料为 2003-07-13~19。

坦冠层均质且广阔的通量观测站所获得的数据是值得信赖的^[23-24]。但是现实中陆地生态系统是由各种斑块状冠层构成的, 特别是森林通量站往往处于比较复杂的地形环境中, 难以完全满足涡度相关技术所需要的地表均一性假设条件, 因此在不进行坐标修正条件下, 湍流通量可能存在较大的不确定性^[10, 23, 25]。常见的坐标转换方法有流线坐标转换(包括两次旋转法(Double Rotation, DR)和三次旋转法(Triple Rotation, TR)和平面拟合方法(Planner Fit, PF)^[26-27]。朱治林等^[28]认为在特别复杂的地形条件下, PF是不适合的, 应该选用DR或TR方法。文采用DR方法来分析坐标转换对能量平衡的影响。

坐标转换后的湍流能量($LE+Hs$)与原来的相比, 冬季总体上增加约14.5%, 而夏季没有明显变化, 甚至略有减少(图8)。从湍流能量($LE+Hs$)与有效能量($Rn-G$)线性回归斜率来看, 冬季的斜率由原来的0.77增加到0.88(图9上), 而夏季的斜率变化不明显(图9下)。从坐标转换前后能量平衡比率 EBR 的关系来看则更明显, 坐标转换后冬季 EBR 增加13.9%(图10上), 而夏季比坐标转化前减少近33%(图10下)。

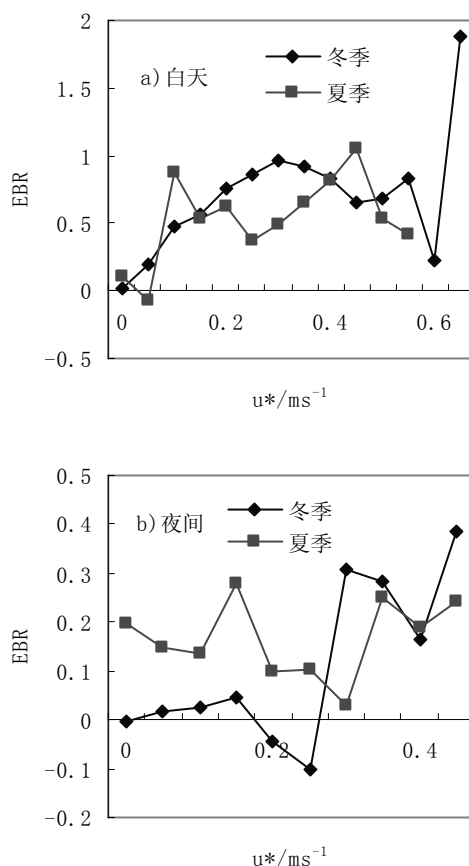


图7 白天(a)和夜间(b)能量平衡比率(EBR)
随摩擦风速(u^*)的变化 说明同图6。

3.5 坐标转换对能量平衡的影响

从涡度相关法湍流通量测定原理上看, 在地势平

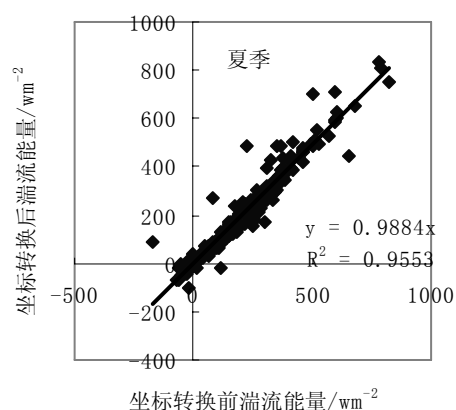
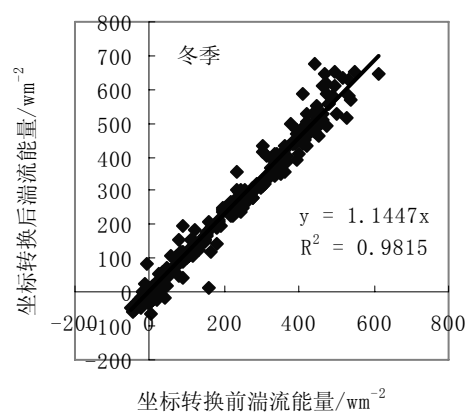


图 8 坐标转换前后湍流能量($LE+H_s$)的关系
说明同图 6。

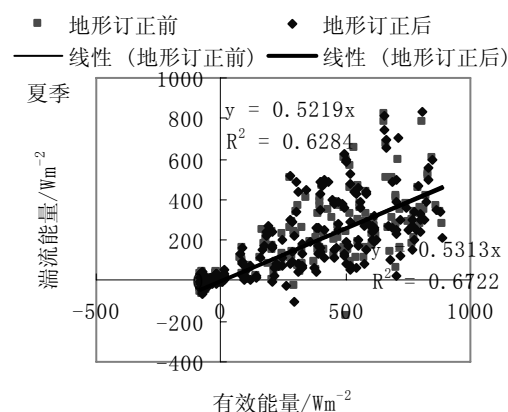
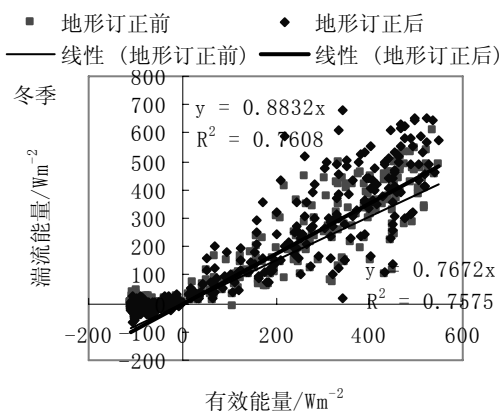
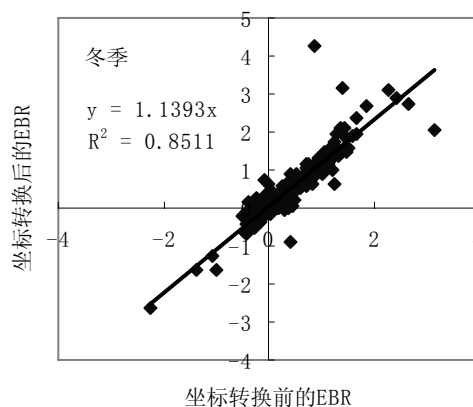


图 9 坐标转换对湍流能量($LE+H_s$)与有效能量(R_n-G)线性回归斜率的影响 说明同图 6。

上述结果表明,经过坐标转换后,冬季的能量平衡状况有所改善,而夏季几乎没有影响。进一步分析坐标转换后湍流能量(EC)的变化率(EC 变化量与原来 EC 之比)的日变化发现,冬季的湍流能量主要在白天时段有所增加且表现稳定,而夜间变化波动较大,看不出明显变化(图11)。冬季能量平衡比率EBR也仅在白天时段比坐标转换前增加0.2左右,而夜间EBR增加不如白天明显,仅增加0.1左右。原本较低的冬季夜间能量平衡比率依然没有得到根本改善(图12)。



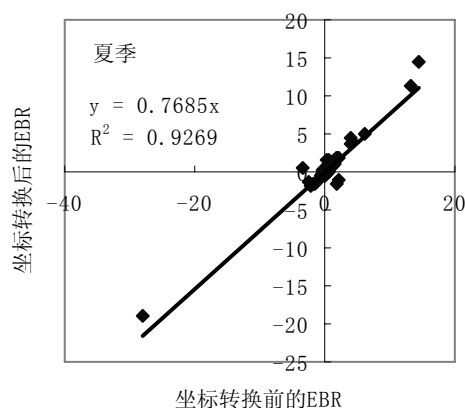


图 10 坐标转换前、后 EBR 的关系 说明同图 6。

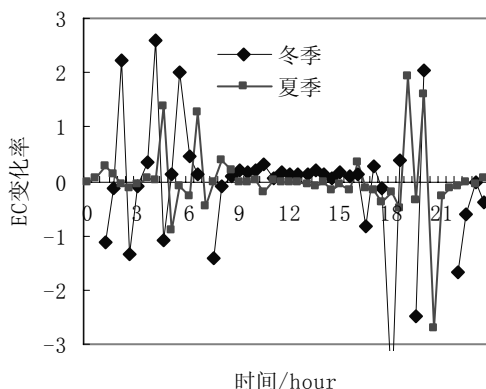


图 11 坐标转换后湍流能量(EC)变化率的日变化特征
EC变化率为坐标转换后的 EC 与坐标转换前 EC 之比值。
其它说明同图 6。

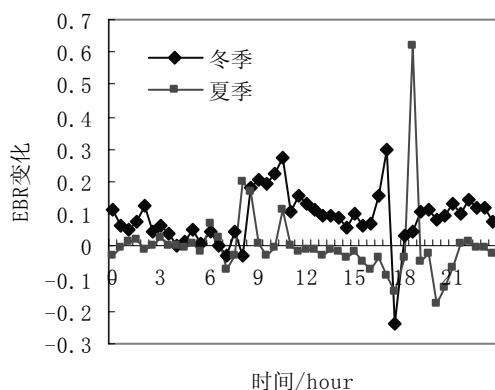


图 12 坐标转换后能量平衡比率 EBR 变化的
日变化特征 说明同图 6。

4 影响能量平衡的原因分析

本文从分析湍流能量和有效能量日变化特征入手,发现夜间有效能量小于湍流能量,进一步分析能

量平衡比率 EBR 日变化发现,白天 EBR 明显大于夜晚,因此猜测可能是夜间湍流不足导致湍流能量低估,事实上 u^* 订正对夜间能量平衡改善有限,反而白天能量平衡状况可以通过 u^* 订正得以较明显改善,揭示夜间湍流能量偏低估算并不是导致能量平衡状况较差的主要原因。WPL 修正、湍流强度订正、坐标转换等均在一定程度上改善能量平衡状况,但冬季夜间能量平衡闭合度仍然较差,揭示鼎湖山通量站由于地形复杂,冬季可能存在夜间泄漏现象。

涡度相关法通量研究中的能量不闭合现象在欧洲、美洲和亚洲通量网也普遍存在,平均不闭合率为 20%^[2, 6, 10]。由于理论、技术方面的原因,目前基于涡度相关系统的通量测量依然存在较大的不确定性^[29],影响能量平衡的因子很多,如何验证和量化各种因素的影响仍然是通量观测研究中相当棘手的理论和技术问题。Wilson 等^[10]根据前人研究,将可能影响能量平衡不闭合的主要原因归纳如表 1。

王旭等^[19]的研究认为,鼎湖山通量站表层土壤热通量占 5 cm 深热通量板测得的热通量 G 的 84%,即忽略热通量板上层土壤热储量,可能导致 16% 的误差。高志球等^[30]认为考虑土壤水分运动,可以明显改善能量平衡状况。此外,本文对冠层热储量(S)中植被的热储量,植物的光合耗能均予以忽略,均可能对有效能量的估算带入误差。

涡度相关法通量观测的基本假设是地表均一、水平平流项可以忽略、垂直平流可以通过坐标旋转使得垂直风速为零从而予以忽略^[31]。然而垂直风速不为零的现象已经被许多观测事实所证实^[18, 23]。下垫面水平异质性可以导致大尺度的局地环流和垂直移动,即使在较为平坦的地区,当大气层结具有很强的稳定性时也会在近地面引起夜间泄流和平流现象发生^[18],从而影响能量平衡的闭合程度。在地形有较大起伏的地区、在夜间尤其是当摩擦风速很小并伴随着热量和水汽向低洼地方流动时,能量平衡闭合程度会很差^[17]。温学发等^[7]认为非湍流过程如冷泄流等可能是限制复杂地形条件下高大植被生态系统湍流通量测定的主要原因。

表 1 可能导致能量不闭合的原因 同时列出是否会低估(-)或高估(+)湍流通量($LE+H$)、有效能量($Rn-G-S$)、能量平衡比率(EBR)以及是否对 CO_2 通量造成影响。

不闭合的原因	举例	$LE+H$	$Rn-G-S$	EBR	CO_2 通量
采样误差	观测面积不等				否
仪器偏差	净辐射表				是
	热通量板上层热储存, 植被热储量		+	-	否
忽略能量项					
高频/低频损失	传感器的分离/大涡平流	-		-	是
	局地环流				是

考察鼎湖山站风向日变化发现,冬季林内存在的明显的类似山谷风的日变化特征,冠层下方尤其明

显,可能是导致本通量站冬季能量平衡状况差的根本原因。鼎湖山通量站夜间平流问题,将来可借助二维或三维平流模型进一步量化研究^[24]。在使用通量数据进行陆地生态系统NEE估算时,应尽量选取白天的观测数据,并进行 u^* 订正,对于夜间通量数据,最好能结合箱式法观测结果进行校正。

5 结 论

鼎湖山针阔叶混交林有效能和湍流能之间存在显著的相关关系,湍流能系统性低于有效能。能量平衡比率(EBR)冬季白天为 0.8 ± 0.2 ,夏季白天为 0.5 ± 0.3 ;线性方程斜率冬季为0.77,夏季为0.53,平均不闭合度为33%~47%,高于普遍报道的10%~30%不闭合度范围。

WPL修正使得 EBR 增加约0.02~0.05,在白天和夏季更加明显。 u^* 订正可以明显提高白天的 EBR ,而夜间特别是冬季, EBR 不能采用 u^* 订正从根本上得以改善,揭示夜间弱湍流并不是导致夜间能量平衡闭合度差的主要原因。冬季的坐标转换可以使湍流能量增加14.5%,夏季坐标转换对能量平衡影响不明显。

经过WPL修正、 u^* 订正和坐标转换,能量平衡闭合度不同程度上有所提高,但夜间特别是冬季能量平衡较差问题依然没有得到根本解决。从风向频率看,冬季夜间鼎湖山通量站存在明显山谷风现象,揭示鼎湖山通量站由于地形原因可能存在夜间泄漏现象。因此在使用通量数据进行陆地生态系统NEE和GPP估算时,应尽量选取暖季白天的观测数据,并需要根据摩擦风速选择湍流交换充分的观测样本以减少不确定性。

参 考 文 献:

- VERMA A B, BALDOCCHI D D, ANDERSON D E, et al. Eddy fluxes of CO_2 , water vapor, and sensible heat over a deciduous forest [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1996, 36: 71-91.
- TWINE T E, KUSTAS W P, NORMAN J M, et al.. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 103: 279-300.
- 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.
- SAIGUSA N, YAMAMOTO S, MURAYAMA S, et al.. Gross primary production and net ecosystem exchange of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 112: 203-215.
- AUBINET M, CHERMANNE 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.
- 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等. 中国通量观测网络(ChinaFLUX)能量平衡闭合状况的评价[J]. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2004, 34(Supp. II): 46-56.
- 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 复杂地形条件下森林植被湍流通量测定分析[J]. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2004, 34(Supp. II): 57-66.
- WILSON K, HANSON P J, BALDOCCHI D D. Factors controlling evaporation and energy balance partitioning beneath a deciduous forest over an annual cycle [J]. *Agric For Meteorol*, 2000, 102: 83-103.
- SCHMID H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 159-183.
- WILSON K, GOLDSTEIN A, FALGE E, et al.. Energy balance closure at FLUXNET sites [J]. *Agric For Meteorol*, 2002, 113: 223-243.
- BLANKEN P D, BLACK T A, NEUMANN H H, et al.. Turbulence flux measurements above and below the overstory of a boreal aspen forest [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1998, 89: 109-140.
- AUBINET M, GRELLA A, IBROM A, et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: the EUROFLUX methodology [J]. *Adv Ecol Res*, 2000, 30: 113-175.
- BALDOCCHI D D, LAW B E, ANTHONI P M. On measuring and modeling energy fluxes above the floor of a homogeneous and heterogeneous conifer forest [J]. *Agric For Meteorol*, 2000, 102: 187-206.
- KUSTAS W P, PRUEGER J H, HATFIELD J L, et al.. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site [J]. *Agric For Meteorol*, 2000, 103: 249-264.
- MOORE C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1986, 37: 17-35.
- LEE X, HU X Z. Forest-air fluxes of carbon, water and energy over non-flat terrain [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 103: 277-301.
- STANNARD D I, BLANFORD J H, KUSTAS W P. Interpretation of surface flux measurements in heterogeneous terrain during the Monsoon experiment [J]. *Water Resour Res*, 1994, 30(5): 1227-1239.
- SUN J, DESJARDINS R, MAHRT L, et al.. Transport of carbon dioxide, water vapor, and ozone by turbulence and local circulations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 25 873-25 885.
- 王旭, 尹光彩, 周国逸, 等. 鼎湖山针阔混交林旱季能量平衡研究[J]. *热带亚热带植物学报*, 2005, 13(3): 205-210.
- SCHOTANUS P H, NIEUWSTADT F T M, DE BRUIN H A R. Temperature measurements with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes [J]. *Boundary-Layer Meteorol*. 1983, 26: 81-93.
- WEBB E K, PEARMAN G I, 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.
- MCCAUGHEY J H. Energy balance storage terms in a mature mixed forest at Petawawa, Ontario—a case study [J]. *Bound-Lay Meteorol*, 1985, 31: 89-101.

- [23] LEE X H. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91: 39-49.
- [24] MASSMAN W J, LEE X H. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 121-144.
- [25] BALDOCCHI D D, 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.
- [26] 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 地球科学*, 2004, 34(Supp. II): 95-102.
- [27] WILCZAK J M, ONCLEY S P, STAGE S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J]. *Boundary-Layer Meteorol*, 2001, 99(1): 127-150.
- [28] 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 地球科学*, 2004, 34(Supp. II): 37-45.
- [29] 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 地球科学*, 2004, 34(Supp. II): 15-29.
- [30] GAO Z-Q(高志球), BIAN L-G, WANG J-X, et al.. Discussion on Calculation Methods of Sensible Heat Flux during GAME/Tibet in 1998 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(3): 357-368.
- [31] 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.

ENERGY BALANCE ANALYSIS OF THE CONIFEROUS AND BROAD-LEAVED MIXED FOREST ECOSYSTEM IN DINGHUSHAN

WANG Chun-lin^{1,2}, ZHOU Guoyi¹, WANG Xu¹, ZHOU Chuanyan¹, YU Guirui³

(1. South China Botanical Garden, CAS, Guangzhou 510650, China;

2. Climate and Agrometeorology Center of Guangdong Province, CMA, Guangzhou 510080, China;

3. Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: As an important index to evaluate the reliability of eddy covariance measurements, energy balance analysis has been widely accepted by the community. Using two methods of OLS (Ordinary Least Squares) and EBR (Energy Balance Ratio), energy imbalance characteristics of the coniferous and broad-leaved forest ecosystem in Dinghushan were systematically analyzed in the paper. Results showed that the average energy imbalance ratio of the site was estimated as 33%~47%, which was a bit higher than the widely reported range of 10%~30%. When WPL correction, u*-correction and terrain correction were employed, energy balance condition improved to some extent, yet the problematic situation of poor energy balance in nighttime, especially in winter season, remained unchanged even those correction methods were employed, implying that weak turbulent condition in nighttime was not the main reason for poor energy balance. The study provided a basement to evaluate energy balance closure and data quality, to formulate data processing methods and improve strategies for both the site and other forest stations of ChinaFLUX.

Key words: Dinghushan; coniferous and broad-leaved forest; energy balance; eddy covariance