

中国通量观测网络(ChinaFLUX)能量 平衡闭合状况的评价*

李正泉^{①②} 于贵瑞^{①**} 温学发^{①②} 张雷明^① 任传友^① 伏玉玲^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 涡度相关观测网络能够对生态系统的水碳通量及其气候背景资料进行长期观测, 能量平衡闭合状况作为通量观测数据评价的一个重要参考指标, 备受通量界研究者的重视. 本研究运用 OLS(Ordinary Least Squares)、RMA(Reduced Major Axis)、EBR(Energy Balance Ratio)和 δ 频率分布四种统计方法对湍流通量(显热和潜热)与有效能量(净辐射、土壤热通量、冠层热储量)的关系进行了分析, 对 ChinaFLUX 各站点的能量平衡闭合状况进行了综合评价, 给出了能量平衡闭合程度日变化和季节变化趋势. 研究表明各站点能量平衡都没有完全闭合, 但因站点的条件不同, 其不闭合程度略有差异; 在夜间不闭合的程度比白天更加明显; 闭合程度随摩擦风速的增大而有所改善. 总体来说, 在现有通量观测系统中, 显热和潜热湍流通量往往会被低估, 而有效能量项则会被高估. 最后讨论了通量观测中的采样误差、仪器测量可能产生的系统偏差、其他能量吸收项的作用、高频与低频湍流通量损失以及平流作用对能量平衡闭合状况的影响.

关键词 能量平衡 ChinaFLUX 涡度相关技术

近年来, 涡度相关技术(Eddy Covariance, 简记为 EC)被广泛地应用在陆地生态系统和大气之间 CO₂, H₂O 等物质传输和能量交换的研究中. 现今全球各地的涡度相关通量测定站点约有 271 个之多, 正在对各类生态系统的 CO₂, H₂O 和能量通量进行着长期观测, 为全球气候变化研究提供了有效的观测数据. 随着涡度相关通量观测站点的不断增多, 使得生物圈和大气圈之间物质和能量交换研究得以迅速发展. 与

此同时如何评价涡度相关观测数据的可信度则成为通量界共同关心的重要问题. 在生态系统中, CO₂, H₂O 和能量的源汇分布方式虽然各不相同, 但是在利用涡度相关技术测定它们的通量时的基本假设是这些物质和能量的传输机制是一致的, 其通量的计算都是建立在相似理论基础之上. 根据热力学第一定律和涡度相关观测的基本假设, 理论上能量平衡闭合程度可以作为观测系统性能和数据质量评价的一

2004-07-14 收稿, 2004-10-14 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)与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

个有效途径. 所谓的能量平衡闭合是指涡度相关仪器直接观测的潜热和显热湍流通量与净辐射通量、土壤热通量、冠层热储量三者之和的有效能量之间的平衡. 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^[1,2], FLUXNET 许多站点都把能量平衡闭合状况分析作为一种标准的程序用于通量数据的质量评价^[3,4].

在国外关于能量平衡闭合问题已经开展了大量的研究, McCaughey^[5]和 Moore^[6]分析了不同高度冠层的冠层热储量对能量平衡闭合程度的影响; Schmid^[7]较为细致地讨论了净辐射表、三维风速仪和 CO₂/H₂O 红外分析仪三者之间测量面积的差异与能量平衡闭合程度的关系, Baldocchi^[8]和 Kustas^[9]的研究表明, 若是涡度相关仪器和能量仪表所测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; Mayocchi^[10]和 Verhoef^[11]研究了用土壤热通量板测量土壤热通量时可能产生的测量误差; Moore^[12]和 Aubinet^[13]分析表明, 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; 关于平流对能量平衡闭合程度的影响, Stanard^[14] 研究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^[15]的分析结果进一步表明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的发生; Blanken^[16]和 Aubinet^[13]证明了在夜间当摩擦风速值很低时, 有效能量和湍流通量之间会出现很大的差值这一现象; Lee^[17]认为在夜间能量平衡的不闭合经常是由于垂直

平流引起的. 然而很多研究工作都是针对某一观测站点可能造成能量平衡不闭合的原因展开的, 就多站点能量平衡闭合状况的综合评价并不多见, Wilson^[18]细致分析了 FLUXNET 站点能量平衡的闭合状况, 并对 FLUXNET 站点的能量平衡进行了综合评价.

在国内运用涡度相关技术大规模地观测不同生态系统物质和能量通量的工作起步较晚^[19]. ChinaFLUX 的建立为研究中国陆地生态系统与大气之间 CO₂, H₂O 和能量交换提供了研究平台. 对于各通量观测站点的能量平衡闭合状况进行分析和评价是 ChinaFLUX 所面临的紧迫任务, 也是国际通量研究中共同关注的重要科学问题. 本文的主要研究目的是评价中国通量网能量平衡闭合状况, 分析能量平衡闭合的日变化和季节变化趋势, 讨论能量平衡闭合与摩擦风速的关系, 为客观评价 ChinaFLUX 观测数据的质量, 确定数据分析方法和改进策略提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 观测站点

中国通量网(ChinaFLUX)拥有 8 个微气象通量观测站包括 4 个森林(长白山、千烟洲、鼎湖山、西双版纳)、3 个草地(海北、内蒙古、当雄)和 1 个农田生态系统类型, 基本涵盖了中国陆地生态系统的主要类型^[20]. 各站点的基本情况如表 1 所示, 其他详细信息参见中国通量网网站(<http://www.chinaflux.org>).

1.2 数据集选取

分析使用的数据集包括长白山(CBS)、千烟洲(QYZ)、鼎湖山(DHS)、西双版纳(XSBN)、海北(HB)

表 1 中国通量网(ChinaFLUX)观测站点的基本信息^{a)}

站点名称	经度/°E	纬度/°N	植被类型	观测高度/m	年降水/mm	年均温/°C	IRGA
长白山	128.0958	42.4025	针阔混交林	41.5	750	-2.4	O/C
千烟洲	115.0667	26.7333	人工林	23.6	1443	17.8	O/C
鼎湖山	112.5333	23.1667	长绿阔叶林	27	1956	20.9	O
西双版纳	101.2000	21.9500	热带雨林季雨林	48.8	1493	21.8	O
海北	101.3000	37.6000	高寒草甸	2.2	600	-1.7	O
内蒙古	117.4500	43.5000	草地	2.2	350	-0.4	O
当雄	91.0833	30.8500	高原草甸	2.2	477	1.3	O
禹城	116.6000	36.9500	农田	2.2	528	13.1	O

a) 表内 O: 开路涡度相关观测系统; O/C: 开路与闭路涡度相关观测系统

和禹城(YC)各观测站周期为一年的通量数据和常规气象数据, 由于内蒙古(NMG)和当雄(DX)两观测站建站较晚, 因此只选取了跨度为 8 个月的观测数据进行分析。

1.3 数据预处理

为了消除物质守恒方程中的垂直平流项^[13], 我们将每个观测站测定得到的 30 min 通量数据进行 3D 坐标轴旋转, 使得平均侧风和垂直风速为零, 并校正由于水热传输造成的 CO₂ 通量变化的密度效应^[21]. 在此基础上又剔除了同期有降水的通量数据、30 min 内记录不完整的通量数据以及 $|F_{NEE}| > 3.0 \text{ mg CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的通量数据. 利用涡度相关技术进行物质和能量通量测定时, 湍流强弱对通量数据的质量有较大的影响, 摩擦风速(u^*)能够度量湍流的强弱, 因此选择了大于一定 u^* 阈值条件下的通量数据用于数据处理与分析, 可以减少通量数据的不确定性^[22], 本研究选择了 $u^* > 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的通量数据进行数据分析. 由于能量平衡计算涉及到净辐射(R_n)、土壤热通量(G)、冠层热储量(S)项, 因此所使用的分析数据必须保证湍流通量数据与其相关的常规气象数据在观测时间上的一致性. 经过筛选的最终数据集为: DHS, XSBN, CBS, HB, DX, NMG, QYZ 和 YC 数据集, 各数据集分别记录了 9239, 4403, 12916, 11383, 3673, 7835, 6732, 8219 条有效数据.

1.4 数据分析

根据热力学第一定律: 能量既不会产生, 也不会消失, 能量只能从一种形式转化为另一种形式. 在运用涡度相关技术测定物质和能量通量系统中, 能量平衡公式可表示为

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

式中, LE 为潜热通量, H 为显热通量, R_n 为净辐射, 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 项值很小常常被忽略.

为了能够对中国通量网(ChinaFLUX)各站点的能量平衡闭合状况进行综合评价, 本研究利用 4 种统计方法来分析各站的能量平衡闭合状况. OLS (Ordinary Least Squares)和 RMA (Reduced Major Axis)是两种不

同的线形回归, 两者不同之处在于它们的回归基本假设条件不同. OLS 回归基本假设条件是使 E_{OLS} 最小, 而 RMA 回归基本假设条件是使 E_{RMA} 最小.

$$E_{OLS} = \sum [(x_i - X_i)^2 + (y_i - Y_i)^2], \quad (2)$$

$$E_{RMA} = \sum (x_i - X_i)(y_i - Y_i), \quad (3)$$

公式(2)、(3)中 x_i, y_i 为数据点的横纵坐标值, X_i, Y_i 为回归直线上离数据点最近点的横纵坐标值. 在理想的能量平衡状况下, 有效能量($R_n - G - S$)和湍流通量($LE + H$)的 OLS 和 RMA 的回归直线都应该是斜率为 1, 并通过原点.

能量平衡比率 EBR 也可用来评价能量平衡闭合程度, 所谓的能量平衡比率是指由涡度相关仪器直接观测的潜热和显热湍流通量与有效能量(R_n, G, S 三者之和)的比值,

$$EBR = \left[\frac{\sum (LE + H)}{\sum (R_n - G - S)} \right], \quad (4)$$

另一个用于评价能量平衡闭合程度的参考因素是能量平衡相对残差 δ 频率分布图, 能量平衡相对残差是指有效能量和湍流通量两者之差与有效能量的比值.

$$\delta = [(R_n - G - S) - (LE + H)] / (R_n - G - S), \quad (5)$$

若 $\delta > 0$ 时, 表明在涡度相关系统观测的显热和潜热湍流通量项小于常规辐射平衡观测系统观测的有效能量项, 然而如果 $\delta < 0$, 情况则相反.

上述公式中 R_n, G 由净辐射仪(CNR-1, Kipp 和 Zonnen)和两个土壤热通量板(HFP01, Hukseflux Thermal Sensors)直接观测, H 和 LE 分别由三维超声风速仪(CSAT-3, Campbell Scientific Inc)与 H₂O/CO₂ 红外气体分析仪(IRGA, Li7500, LICOR Inc)测定. McCaughey^[5]和 Moore^[6]研究表明当冠层高度超过 8 m 时, 冠层热储量对能量平衡闭合程度的影响很大. 本研究在分析 4 个森林站能量平衡时, 考虑了冠层热储量(S)对能量平衡闭合的影响, 在农田和草地的分析过程中没有考虑冠层热储量项(S). 冠层热储量(S)的计算公式为

$$S = S_a + S_\lambda + S_{leaves} + S_{trunks}, \quad (6)$$

$$S_a = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{hc} \rho C_p (1 + 0.84q) T_b dz, \quad (7)$$

$$S_{\lambda} = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{hc} \rho \lambda q_b T_b dz, \quad (8)$$

式中 S 为冠层热储量, S_a 为冠层内显热通量, S_{λ} 为冠层内潜热通量, S_{leaves} 为冠层内叶热储量, S_{trunks} 为冠层内枝干热储量, hc 为冠层高度, ρ 为空气密度, C_p 为空气比热, q_b 为冠层内空气湿度, \bar{q} 为冠层内空气平均湿度, T_b 为冠层内空气温度。

本研究由于缺乏树叶和树枝干等生物温度观测数据, 因此在计算冠层热储量时, 冠层内叶热储量 S_{leaves} 和枝干热储量 S_{trunks} 没有考虑. 研究分析表明: 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 6.6%, 对于草地、农田和灌丛考虑土壤热储量可以使 OLS 回归的斜率增加了 8% 左右, 然而土壤热储量对森林站点的影响较小, 回归斜率只增加了 3% 左右。

2 研究结果

2.1 能量平衡闭合的 OLS, RMA 线性回归分析与能量平衡比率 EBR

能量平衡闭合的理想状况是有效能量(R_n-G-S)和湍流通量($LE+H$)线性回归的斜率为 1、截距为零. 由于有效能量和湍流通量之间的线性关系的截距通常不能通过原点, 因此我们在分析过程中分别给出了单纯统计上的线性回归的斜率 S_1 和强制通过原点线性回归的斜率 S_2 . 8 个通量站有效数据集内所有 30 min 数据的 OLS 线性回归参数见表 2.

从表 2 中我们可以看出, 所有站点的有效能量和湍流通量的统计回归斜率 S_1 的范围在 0.49~0.81 之间, 平均值为 0.67, 截距的范围在 10.8~79.9 Wm^{-2} , 平均值为 28.9 Wm^{-2} , 回归方程的决定系数 R_1^2 平均值为 0.82, 范围在 0.52~0.94 之间. 通过强制线性回归截距为零时的斜率 S_2 的范围 0.54~0.88, 平均值为 0.73, R_2^2 的平均值为 0.77, 范围 0.51~0.93.

OLS 回归的先决假设条件是自变量不存在随机误差^[23], 然而在 R_n , G 和 S 实际测量中存在着随机采样误差. 我们通过 RMA 回归方法消去采样中随机误差的影响进一步分析了各站能量平衡闭合状况. 使用 RMA 方法后, S_1 回归斜率平均值增到 0.72, 斜率增

幅在 1.5%~9.6%, RMA 的平均截距略低于 OLS 统计回归截距, 但是 RMA 回归的平均 R^2 有所减小($R^2=0.75$). 当用湍流通量的年总量和有效能量(R_n-G-S)的比值表示能量平衡闭合状况时, 可以发现能量不闭合的现象还是普遍存在, 所有站点年 EBR 的平均值为 0.83, 范围 0.58~1.00.

表 2 各站点能量平衡闭合 OLS 线性回归参数和能量平衡比率 EBR ^{a)}

站名	样本数	S_1/S_2	S_1 截距	R_1^2/R_2^2	EBR
长白山	12916	0.71/0.73	10.8	0.89/0.89	0.83
千烟洲	6732	0.72/0.76	16.9	0.88/0.88	0.77
鼎湖山	9239	0.70/0.74	24.4	0.77/0.76	0.82
西双版纳	4403	0.49/0.54	22.5	0.52/0.51	0.58
海北	11383	0.70/0.77	40.4	0.93/0.90	0.91
内蒙古	7835	0.70/0.73	13.7	0.94/0.93	0.83
当雄	3673	0.53/0.70	79.8	0.75/0.52	0.90
禹城	8219	0.81/0.88	23.2	0.89/0.78	1.00

a) 表内 S_1 和 S_2 为两种截距处理条件下的 OLS 统计回归斜率; R_1^2 和 R_2^2 为两种情况下统计方程的决定系数

因站点的自身条件(地形、植被状况、地理位置)不同, 各站点不闭合程度略有差异. 从各站点的有效能量和湍流通量之间的线性回归参数以及能量平衡比率来看, $XSBN$ 站的能量平衡状况较差, DX , NMG , DHS , HB , CBS , QYZ 的能量平衡状况较好, YC 站点的能量平衡状况最好, OLS 线性回归 S_1 为 0.81, S_2 为 0.88, 年能量平衡比率为 1.00.

2.2 能量平衡相对残差 δ 的频率分布

为了能更为细致地表明各站点能量平衡闭合状况, 我们把所有白天(总辐射值大于 $1 Wm^{-2}$) 30 min 数据的能量平衡闭合残差 δ 值按照 0.1 的间距进行分类, 总共分为 20 类, 提取出每一类别中的观测记录数, 统计得到了每类别的频率值, 绘制出能量平衡闭合残差 δ 频率的分布图(参见图 1~2). 能量平衡相对残差 δ 频率分布图能够比较清楚地表明有多少湍流通量($LE+H$)数据和有效能量(R_n-G-S)数据相吻合, 在不同的相差等级上分别分布着多少数据. 图 1 中虚线是根据四个森林站的 δ 平均频率分布拟合出的正态分布曲线, 图 2 中曲线是根据草地和农田四站的 δ 平均频率分布拟合出的正态分布曲线. 图 1~2 中实线是与相

应拟合曲线具有相同总体标准差 σ , 总体平均数 $\mu=0$ 的正态分布曲线. 对于森林站而言, 在能量平衡相对残差 δ 数学期望值为零($\mu=0$)的 $\pm\sigma$ 标准差区间内分布的观测数据量为总观测数据量的 46%, CBS, DHS, QYZ, XSBN 分别为 51%, 47%, 56%, 29%. 在 $\pm 2\sigma$ 标准差区间内分布的观测数据量为总观测数据量的 81%, CBS, DHS, QYZ, XSBN 分别为 83%, 80%, 84%, 75%. 对于草地和农田站来说, 在 $\pm\sigma$ 区间内分布的观测数据量为总观测数据量的 55%, HB, DX, NMG, YC 分别为 63%, 36%, 64%, 59%. 在 $\pm 2\sigma$ 区间内, 分布的观测数据量为总观测数据量的 78%, HB, DX, NMG, YC 分别为 79%, 72%, 83%, 76%.

在理想条件下, 总体标准差 σ 一定时, 涡度相关观测数据能量平衡相对残差 δ 的分布应类似实线的正态分布. 然而从图 1~2 中我们可以清楚地看到实际观测数据的能量平衡相对残差 δ 拟合曲线(虚线), 无论是森林站还是草地和农田站都相对于理想条件下的正态分布曲线(实线)向右偏移, 森林站向右偏移了

3.6 个区间, 草地和农田站向右偏移了 2.6 个区间, 这种偏移现象说明, 产生能量平衡闭合程度误差的原因不是随机因素决定的, 而是涡度相关技术测量的湍流通量($LE+H$)与由常规气象观测系统测定的有效能量(R_n-G-S)之间存在着系统性偏差所引起的. 在假定常规的观测系统测定的有效能量正确的条件下, 则可以认为涡度相关系统测定的湍流通量可能偏低, 但是就这种假设是否成立, 以及产生这种偏差的原因有待于进一步地综合性研究.

2.3 能量平衡闭合程度的日变化

在白天(总辐射值大于 1 Wm^{-2})能量平衡闭合程度与夜间(总辐射值小于 1 Wm^{-2})之间存在着很大的差别(表 3). 在强制 OLS 的回归直线通过原点的条件下, 白天有效能量与湍流通量 OLS 的回归斜率和利用全天数据 OLS 的斜率结果相接近, 平均斜率为 0.72, 范围 0.54~0.86, R^2 为 0.75. 8 个站点所有白天数据的 EBR 平均值为 0.75, 范围在 0.57~0.95 之间. 在夜间

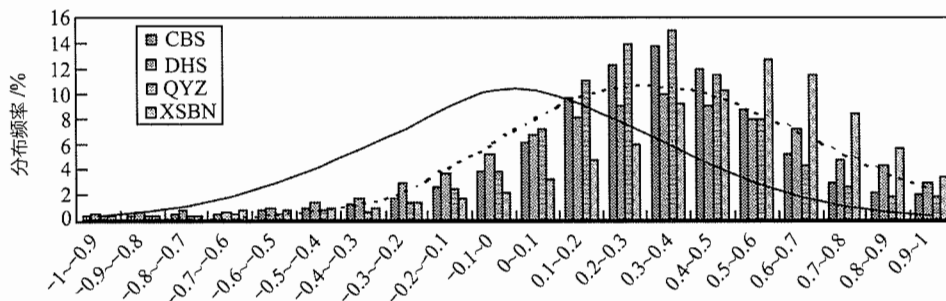


图 1 森林站能量平衡相对残差 δ 频率分布

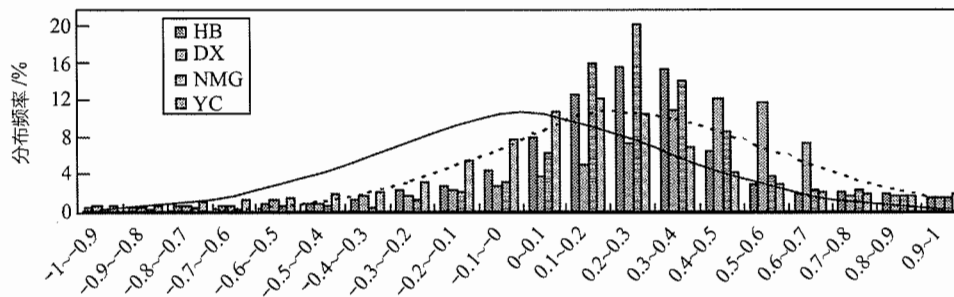


图 2 农田和草地站能量平衡相对残差 δ 频率分布

OLS 回归斜率平均值仅为 0.39, 范围 0.18~0.54, R^2 仅为 0.30. 夜间数据的 EBR 值大部分都特别小, 在两个站还出现了负值情况. 在夜间总的湍流通量与总的有效能量的比率平均值为 0.31, 这个 EBR 值明显小于白天的 EBR 值. 从 OLS 回归斜率和 EBR 值来看, 白天的能量平衡闭合程度明显优于夜间的状况. 在夜间能量不闭合的幅度与湍流混合的强度有很强的相关关系, 这种关系将在后面讨论.

表 3 各站点白天和夜间能量平衡闭合 OLS 线性回归参数和能量平衡比率 EBR^{a)}

站点	S_{night}	R^2_{night}	EBR_{night}	S_{day}	R^2_{day}	EBR_{day}
长白山	0.47	0.26	0.43	0.73	0.82	0.73
千烟洲	0.54	0.50	0.43	0.76	0.84	0.71
鼎湖山	0.53	0.45	0.40	0.74	0.61	0.72
西双版纳	0.18	0.04	-0.01	0.54	0.47	0.57
海北	0.41	0.48	0.37	0.78	0.85	0.80
内蒙古	0.38	0.24	0.49	0.73	0.92	0.75
当雄	0.24	0.18	-0.10	0.63	0.65	0.74
禹城	0.38	0.28	0.54	0.86	0.80	0.95

a) 表内 S 是指定斜率为零时的 OLS 线性回归斜率

为了分析能量平衡闭合程度的日变化趋势, 我们将所有站点每天的 $LE+H$ 和 R_n-G-S 数据按照观测时间每 30 min 分成一类, 总共分成 48 类, 对每类 30 min 的 $LE+H$ 和 R_n-G-S 项求出总和, 计算 30 min 的能量平衡比率, 然后将两个 30 min 的 EBR 值平均得到 1 h 的 EBR 值. 图 3 中显示了 EBR 的日变化趋势, 以及 $LE+H$ 和 R_n-G-S 或 R_n-G 两项的日变化规律.

从图 3 中我们可以看出在早晨和傍晚日出日落这段时间 R_n-G-S 值接近于零, EBR 值变化也最为剧烈,

从早晨到下午 EBR 值一直在不断增大. EBR 值在下午高于早上这一现象在许多站点的暖季和冷季都能观测得到^[18].

2.4 能量平衡闭合程度的季节变化

CBS, QYZ, XSBN3 个森林站、HB 草地站和 YC 农田站在一年 12 个月内湍流通量和常规观测数据的连续性都比较好. 我们把各站点的湍流通量和有效能量按月份分别进行累加, 求出它们各月的能量平衡比率 EBR, 从而分析了它们能量平衡比率的季节变化(如图 4 所示). 从图 4 中可以看出森林、草地和农田从冬季到夏季能量平衡闭合程度不断提高, 冬季的能量平衡闭合最差, 夏季的能量平衡闭合程度较高, 很多站点夏季的 EBR 值都接近于 1. 比较有意思的现象是森林站点在冬季的 EBR 值在很大程度上都小于 1, 这说明在冬季湍流通量值可能会被低估, 然而草地和农田站点在冬季 EBR 值都大于 1, 显然在此阶段湍流通量值的测量高于有效能量的估算. 当我们把 DX 和 NMG 两个草地站也加入图中分析时, 草地和农田站在冬季湍流通量值测量偏高的现象变得更加较为明显了. 由于我们所分析的站点数有限, 是否真正存在冬季森林的湍流通量值测量偏低, 而草地和农田湍流通量值测量偏高这一现象, 还有待于进一步地观测研究.

为了能够更为细致地描绘出能量平衡闭合的季节变化特征, 我们进一步分析了 3 个观测数据连续性较好的观测站点一年内的能量平衡比率 EBR 的逐日变化趋势(参见图 5).

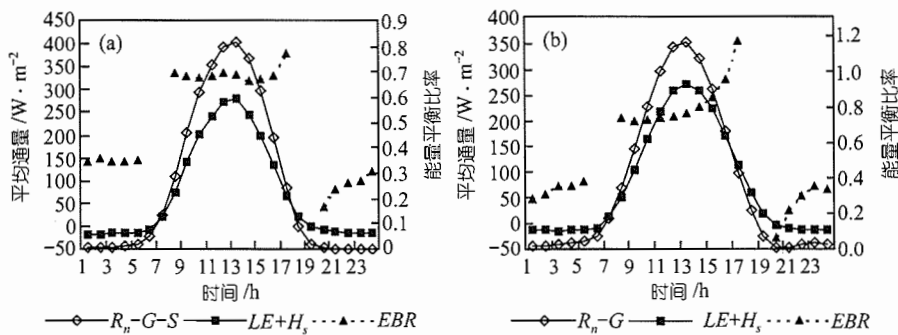


图 3 森林站(a)与草地和农田站(b)能量平衡比率 EBR 日变化与 R_n-G-S 和 $LE+H$ 日变化

从图 5 中我们可以看出, 在暖季 CBS 森林站、YC 农田站和 HB 草地站绝大多数的日能量平衡比率都分布在 1 值附近, 可是在冬季三者的日能量平衡比率的表现形式却不相同. 对于 CBS 森林站来说, 在冬季其日能量平衡比率大多数都低于 1, 而 YC 农田站

的日能量平衡比率值大部分都高于 1, HB 草地站几乎所有的日能量平衡比率值都大于 1. 根据三站日能量平衡比率逐日的变化趋势也可以分析得出在冬季森林的湍流通量值测量偏低而草地和农田湍流通量值测量偏高这一现象. 对于这种现象的解释, 我们大致

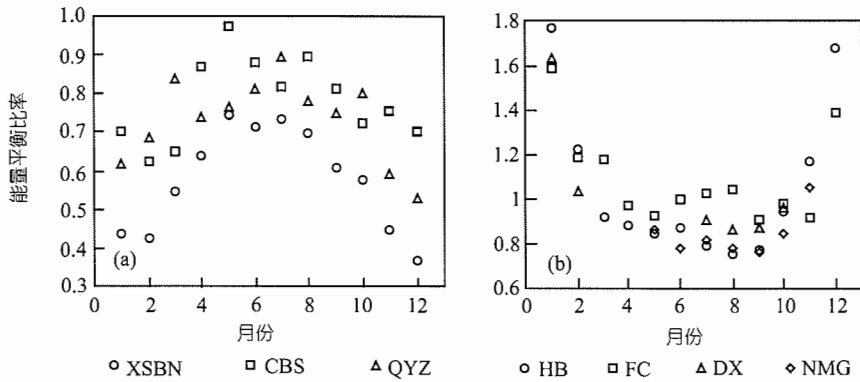


图 4 森林(a)与草地和农田(b)能量平衡比率的季节变化

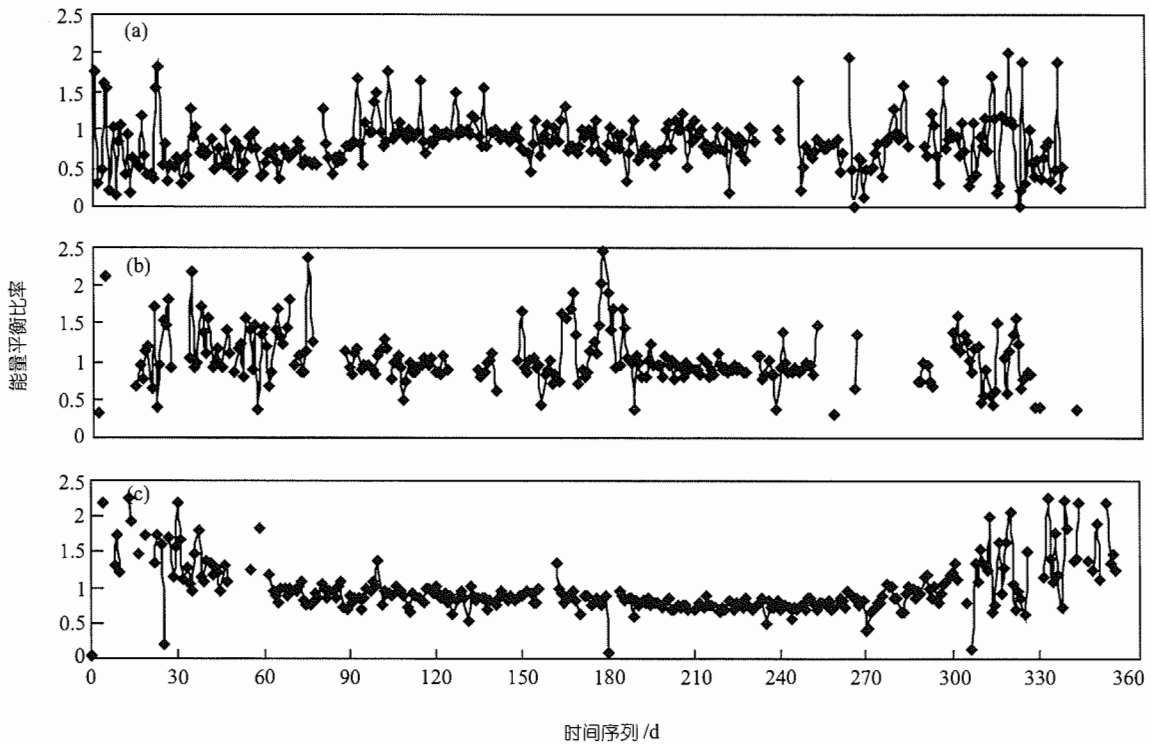


图 5 长白山(a)、禹城(b)、海北(c)的能量平衡比率逐日变化趋势

可以认为在森林站由于冬季地面的长波辐射量减少, 引起净辐射值变大, 从而能量平衡比率值变小. 在草地和农田站, 冬季植物枯萎凋落、分解, 地面裸露, 有时还会有大量积雪覆盖地面, 该时期地面反射率比暖季有植被覆盖时期的反射率明显增大, 净辐射值减小, 能量平衡比率呈现了大于 1 的现象.

2.5 湍流混合对能量闭合状况的影响

影响能量平衡闭合程度的因素很多, 对于能量平衡不能闭合这一普遍存在的现象, 到目前为止仍没有人能够给予充分的解释. 本文针对摩擦风速与能量平衡闭合的关系, 探讨了湍流混合对能量闭合状况的影响. 这里我们把数据整理成白天和夜间两类数据, 分析摩擦风速对能量平衡闭合的影响, 以总辐射值是否大于 1 Wm^{-2} 为数据分类标准, 定义总辐射值大于 1 Wm^{-2} 的时段为白天, 小于 1 Wm^{-2} 的时段

为夜间. 对各站点白天和夜间数据依照摩擦风速值分成 5 个数据子集(每个子集数据量占总数据量的 20%), 分析结果如图 6~7.

从图 6 中我们可以看出, 在白天 OLS 斜率随摩擦风速升高而增大的趋势很弱, 而在夜间虽然 OLS 斜率较小, 但是斜率随摩擦风速的变化比较明显. 在摩擦风速低于 0.5 ms^{-1} 时 OLS 回归斜率随摩擦风速的升高而增加的很快, 可是在摩擦风速高于 0.5 ms^{-1} 时, OLS 回归斜率随摩擦风速增加的比较缓慢, 逐渐趋向缓和, 图 7 显示了夜间摩擦风速与能量闭合斜率的更细致的关系.

在图 7 中 3 个森林站的 OLS 回归斜率在摩擦风速低于 0.5 ms^{-1} 这一段区间内, 随着摩擦风速的增大而迅速增大, 当摩擦风速大于 0.5 ms^{-1} 时, 其 OLS 回归斜率的增加趋势较弱. CBS 站在摩擦风速大于 1 ms^{-1} , OLS 回归斜率好像已经几乎不在增加. HB 与

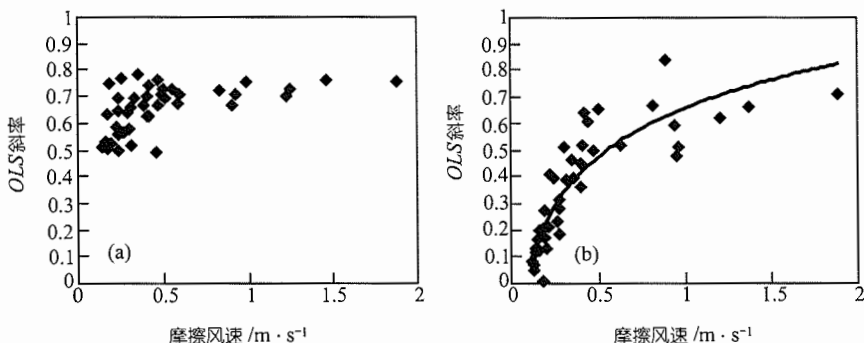


图 6 白天(a)和夜间(b)OLS 斜率与摩擦风速关系

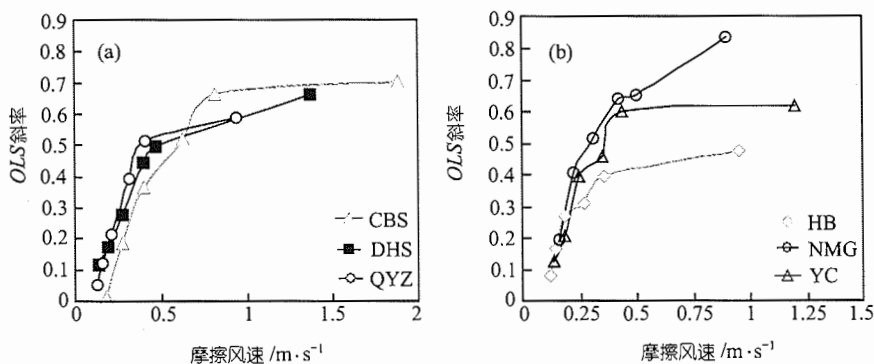


图 7 夜间森林站(a)和农田与草电站(b)OLS 斜率与摩擦风速关系

NMG 两个草地站和 FC 农田站的 OLS 回归斜率在摩擦风速低于 0.5 ms^{-1} 区间内, 随着摩擦风速的增大也是呈迅速增大的趋势, 并且除了 NMG 站外, 它们的 OLS 回归斜率在摩擦风速高于 0.5 ms^{-1} 时增大的趋势也在变缓.

3 讨论

分析表明各站点 OLS 回归斜率 S_1 在 0.49~0.81 之间, 平均值为 0.67, S_2 的范围为 0.54~0.88, 平均值为 0.73; 年能量平衡比率 EBR 值在 0.58~1.00 之间, 平均值为 0.83 左右; 从能量平衡相对残差频率分布图的频率分布规律来看, 白天在能量平衡相对残差 δ 数学期望值为零 ($\mu=0$) 的 $\pm 2\sigma$ 标准差区间内森林站分布的观测数据量占总观测数据量的 81%, 草地和农田站数据量为总观测数据量的 78%; 能量平衡比率 EBR 的季节变化表明, 在暖季各站的 EBR 值都比较接近于 1, 可是在冬季能量平衡状况较差, 这有可能是由于在冬季未考虑融解、冻结、升华等一些特定的气象条件下的气象过程中伴随的能量转化对有效能量的影响, 而降低了能量平衡闭合程度; 在一天内, 白天与夜间的能量平衡闭合程度也存在着很大差异. 总体来说能量平衡不闭合是很普遍的现象, 在假定常规的有效能量测定正确的前提下, 我们则可以认为涡度相关测定的湍流通量可能被低估了. 在欧洲、美洲和亚洲通量网能量不闭合现象也是很普遍存在. 根据前人研究能量平衡不闭合的主要原因可以归结为以下几点:

(1) 通量观测中的采样误差: 涡度相关仪器的通量贡献区面积(Flux Footprint)与 R_n , G , S 仪器的测量面积不能相同会带来误差. 净辐射表测量的面积是一个以净辐射表为中心, 以一定半径(与安装高度有关)为圆的下表面面积, 这个测量面积一般不随时间和风速风向而变化. 而涡度相关仪器所测量面积大致成椭圆形, 它随着风速和风向的转变而改变, 并且椭圆长轴偏向盛行风方向. 从理论说, 净辐射表与涡度相关仪器测定的下垫面面积不可能相符. 若是涡度相关仪器和能量仪表所测的下垫面存在着很大的异质性(开阔冠层或多组分的冠层), 这中测量面积的不匹配会给能量平衡闭合带来更大的误差^[8,9]. 土壤

热通量(G)的测量面积与净辐射表和湍流通量的测量面积存在着更大的差异, 通常相差几个数量级, 高植被(森林)站点冠层热储量的计算也存在着此类问题.

(2) 仪器测量可能产生的系统偏差: 仪器的不准确标定和数据处理的不规范会影响能量平衡闭合程度, 对仪器的交叉标定和确保数据采集器的正常运行可能会减少能量平衡闭合研究的不确定性^[13,24]. 仪器测量可能产生的系统偏差主要是由于不能及时准确地进行仪器标定引起的. 一些研究报道了不同型号的净辐射表和同一净辐射表在不同的标定方法下, 净辐射表的测量精度存在着很大的差异^[25-27]. 对于土壤热通量板来说, 在特定条件下, 当土壤热通量板的热传导特性与其周围土壤热传导特性不一致时, 土壤热通量(G)的测定也未免会带有偏差^[10,11]. 仪器偏差也可能发生在涡度相关装置: LE , H 是通过超声风速仪的所测的风速和温度以及 IRGA 所测的水汽计算出的. 仪器的安装可能会遮蔽超声风速仪, 从而在特定的风向上降低了数据质量和能量闭合度.

(3) 其他能量吸收项的忽略: 在能量平衡闭合分析中一种假设是能量在系统中被分成五个测量组分 (LE , H , R_n , G , S), 即使这五个能量项都能被精确地测量, 能量仍会存在不能完全闭合的现象, 这是因为在能量平衡系统中还存在着另一些能量吸收项. 比如土壤热通量板上层土壤的热储量, 冠层热储量(S)中植被的热储量, 植物的光合耗能以及在融解、冻结、升华等某些特定的气象条件下的气象过程中伴随的能量转化. 在本研究中这几个能量吸收项都未加以考虑, 因此可能会给有效能量的估算带入一些误差.

(4) 高频与低频湍流通量损失: 涡度相关技术通常定义的平均通量是指在一定的响应时间内通过指定的采样频率对某种强度范围内的通量数据进行测定, 这样湍流通量就会由于低通滤波(高频损失)的作用和高通滤波(低频损失)的作用往往被低测^[12,13]. 另一方面, 超声风速仪和 IRGA 装置的空间分离也会充当低通滤波的角色造成高频损失. 理论分析和实际经验建议我们应该考虑低频和高频通量的损失. 然而没有一种标准的方法对频率的响应进行矫正, 不同的矫正方法得到的结果也会不尽相同.

(5) 平流的影响: 在涡度相关技术通量观测中,

假定平流(包括 CO_2 平流)可以忽略^[28], 认为垂直平流可以通过坐标旋转使得垂直风速为零而被忽略. 然而垂直风速和垂直平流不为零的现象确实真实存在. 两种水气流动使得忽视垂直平流的假设变得不成立, 一方面由于地表面的水平异质性而形成的大尺度的局地环流和水气的垂直移动. 另一方面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^[15]. 很多研究表明地形会影响能量平衡的闭合程度, Stannard^[14]认为在地形有较大起伏的地区能量平衡很难闭合. 在夜间, 尤其是当摩擦风速很小(湍流强度很弱), 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, 这一点本文分析结果与前人的研究相符^[13,16,17,29].

我们把上述影响能量平衡闭合的可能因素总结为表 4, 表中虽然未涵盖所有可能造成能量不闭合的原因, 但是列举了造成能量平衡不闭合的主要因素, 同时也列出了各种造成能量平衡不闭合的误差项是否会影响到 CO_2 通量的测量结果^[18].

表 4 可能影响能量不闭合的原因^{a)}

不闭合的原因	举例	$LE+H$	R_n-G-S	EBR	CO_2 通量
采样误差	观测面积不等				否
仪器偏差	净辐射表的偏差				CSAT-3 和 IRGA
能量吸收项忽略	热通量板上层热储存	+		-	否
高频低频损失	传感器的分离/大涡	-		-	是
平流	局地环流				是

a) 同时列出了是否会低估或高估湍流通量($LE+H$)、有效能量(R_n-G-S)、能量平衡比率(EBR). 最后一列表明是否对 CO_2 通量造成影响. CSAT-3: 三维超声风速仪, IRGA: $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 红外气体分析仪

4 结论

本研究运用 OLS , RMA , EBR 和 δ 频率分布四种统计方法探讨分析和评价了中国通量观测网(ChinaFLUX)各站点能量平衡闭合状况及其时空变化规律.

(1) 在中国通量观测网, 也存在能量平衡不能闭合的现象. 能量平衡不闭合程度因站点的自身条件而异, 平均不闭合度在 27% 左右. 白天在能量平衡相对残差 δ 数学期望值为零的 $\pm 2\sigma$ 标准差区间内分布的观测数据量约占总观测数据量的 80%.

(2) 在夜间, 尤其是在湍流混合强度较弱的条件下, 能量平衡闭合程度较差, 闭合程度明显比白天弱. 从能量平衡闭合度的日变化趋势分析, 在早晨和傍晚日出日落这段时间 EBR 值变化最为剧烈, 在下午能量平衡闭合状况要优于上午.

(3) 能量平衡比率在暖季大部分都在 1 左右浮动, 能量平衡闭合程度较高, 在冬季能量平衡闭合程度比暖季偏低. 并存在冬季森林的湍流通量比有效能量偏低而草地和农田湍流通量比有效能量偏高的现象.

(4) 能量平衡闭合程度随摩擦风速的增大而增大, 白天 OLS 斜率随摩擦风速升高而增大的趋势很弱, 而在夜间虽然 OLS 斜率较小, 但是斜率随摩擦风速的变化比较明显, 在摩擦风速低于 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 随摩擦风速的加强 OLS 斜率迅速增大.

根据本文分析结果, 单纯从能量平衡闭合的角度来说, 在使用通量数据进行陆地生态系统 NEE 和 GPP 估算等科学问题研究时, 我们应尽量选取暖季(如生长季)白天的观测数据, 并需要用一定摩擦风速(u^*)的阈值对观测数据进行有效筛选, 以便减少研究中的不确定性; 对于冬季和夜间通量数据的使用, 需加以慎重考虑, 应结合箱式法的观测结果对夜间通量低估进行校正.

参 考 文 献

- Mahrt L. Flux sampling errors for aircraft and towers. *J Atmos Ocean Technol*, 1998, 15: 416-429
- Verma A B, Baidocchi D D, Anderson D E, et al. Eddy fluxes of CO_2 , water vapor, and sensible heat over a deciduous forest. *Bound-Lay Meteorol*, 1986, 36: 71-91
- Wilson K B, Hanson P J, Baldocchi D D. Factors controlling evaporation and energy balance partitioning beneath a deciduous forest over an annual cycle. *Agric For Meteorol*, 2000, 102: 83-103
- Schmid H P, Grimmond C S B, Cropley F, et al. Measurements of CO_2 and energy fluxes over a mixed hardwood forest in the mid-western United States. *Agric For Meteorol*, 2000, 103: 357-374
- McCaughey J H. Energy balance storage terms in a mature mixed forest at Petawawa, Ontario—a case study. *Bound-Lay Meteorol*, 1985, 31: 89-101
- Moore C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Bound-Lay Meteorol*. 1986, 37: 17-35

- 7 Schmid H P. Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes. *Agric For Meteorol*, 1997, 87: 179~200
- 8 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. *Agric For Meteorol*, 2000, 102:187~206
- 9 Kustas W P, Prueger J H, Hatfield J L, et al. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. *Agric For Meteorol*, 2000, 103: 249~264
- 10 Mayocchi C L, Bristow K L. Soil surface heat flux: some general questions and comments on measurements. *Agric For Meteorol*, 1995, 75: 43~50
- 11 Verhoef A, Hurk B J M, Adrie F G, et al. Thermal properties for vineyard (EFEDA-1) and savanna (HAPEX-Sahel) sites. *Agric For Meteorol*, 1996, 78: 1~18
- 12 Moore C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Bound-Lay Meteorol*, 1986, 37: 17~35
- 13 Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: the EUROFLUX methodology. *Adv Ecol Res*, 2000, 114~175
- 14 Stannard D I, Blanford J H, Kustas W P. Interpretation of surface flux measurements in heterogeneous terrain during the Monsoon experiment. *Water Resour Res*, 1994, 30(5): 1227~1239
- 15 Sun J, Desjardins R, Mahrt L, et al. Transport of carbon dioxide, water vapor, and ozone by turbulence and local circulations. *J Geophys Res*, 1998, 103: 258~273
- 16 Blanken P D, Black T A, Neumann H H, et al. Turbulent flux measurements above and below the overstory of a boreal aspen forest. *Bound-Lay Meteorol*, 1998, 89: 109~140
- 17 Lee X. Forest-air fluxes of carbon, water and energy over non-flat terrain. *Bound-Lay Meteorol*, 2002, 103: 277~301
- 18 Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 223~243
- 19 Wen X F, Yu G R, Sun X M, et al. Net water vapour exchange and environment control over a conifer-broad leaved forest during autumn-winter transition in Changbai mountain. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 13(4): 463~468
- 20 GuiRui Yu, XiaoMing Sun, Bertrand Tanner, et al. Overview of ChinaFLUX and evaluation of Its eddy covariance measurement. *Agric For Meteorol* (in review)
- 21 Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Ruair J R Met Soc*, 1980, 106: 85~100
- 22 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
- 23 Meek D W, Prueger J H. Solutions for three regression problems commonly found in meteorological data analysis. In: *Proceedings of the 23rd Conference on Agricultural Forest Meteorology*. American Meteorological Society, Albuquerque, NM, November 2~6, 1998. 141~145
- 24 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. *Bull Am Meteorol Soc*, 2001, 82: 2415~2434
- 25 Kustas W P, Prueger J H, Hipps L E, et al. Inconsistencies in net radiation estimates from use of several models of instruments in a desert environment. *Agric For Meteorol*, 1998, 90: 257~263
- 26 Culf A D, Folken. The energy balance closure problem. In: *Vegetation, Water, Humans and the Climate*, 2002
- 27 Halldin S. Radiation measurements in integrated terrestrial experiments. In: *Vegetation, Water, Humans and the Climate* Springer, Berlin, 2002
- 28 Paw U KT, Baldocchi D D, Meyers T P, et al. Corrections of eddy covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. *Bound-Lay Meteorol*, 2000, 97: 487~511
- 29 Lee X. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agric For Meteorol*, 1998, 91: 39~50