

鼎湖山针阔混交林旱季能量平衡研究

王旭^{1,2}, 尹光彩³, 周国逸^{1*}, 闫俊华¹, SUN Ge^{1,4}, 王春林^{1,2}

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100101; 3. 广东省工业大学, 广州 510643;

4. Southern Global Change Program, USDA Forest Service, 920 Main Campus Drive, Venture Center II, Suite 300, Raleigh, NC 27606)

摘要: 运用涡度相关(Eddy covariance, EC)法开路系统、常规微气象观测系统及土壤热通量板等设施对鼎湖山季风常绿阔叶林旱季(2003/1/9–2003/1/23)的能量分量进行测定。结果表明,平均净辐射通量(Net radiation, Rn)为 53.14 W m⁻²,与下行短波辐射具有相同的变化趋势。林冠上层 EC 法潜热通量(Latent heat, LE)、显热通量(Sensible heat, Hs)实测平均值分别为 57.18 W m⁻²、43.40 W m⁻²,林冠下层分别为 12.61 W m⁻²、7.61 W m⁻²。白昼 EC 法所测得的 LE 和 Hs 数据与利用波文比-能量平衡法(Bowen ratio and energy balance, BREB)计算出的数据相比,略偏低,而夜间及凌晨数据差异较大。土壤热通量日变化曲线呈“S”形,平均土壤热通量为 -1.50 W m⁻²,表面土壤总热通量(Gt)仅为 5 cm 处土壤热通量的 84.0%,可见表层土壤尽管很薄,但其热储量不能忽略。将 LE、Hs 之和与可供能量(Rn-Gt)进行闭合,回归直线斜率为 0.9128,相关系数达 0.8517,与许多研究结果的 60%–90%的区间相符,这说明鼎湖山涡度相关法通量观测数据是非常可靠的。

关键词: 能量平衡; 涡度相关法; 潜热通量; 显热通量; 鼎湖山

中图分类号: S718.512.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2005)03-0205-06

Dry Season Energy Balance of a Coniferous and Broad-leaved Mixed Forest at Dinghushan Mountain, Southern China

WANG Xu^{1,2}, YIN Guang-cai³, ZHOU Guo-yi^{1*}, YAN Jun-hua¹, SUN Ge^{1,4}, WANG Chun-lin^{1,2}

(1. South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Graduate School of

the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100010, China; 3. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510643, China;

4. Southern Global Change Program, USDA Forest Service, 920 Main Campus Drive, Venture Center II, Suite 300, Raleigh, NC 27606)

Abstract: Net radiation and heat fluxes in a coniferous and broad-leaved mixed forest were monitored by a microclimate monitor system, an eddy covariance (EC) open-path system, and soil heat flux plates during January 9–23, 2003 in Dinghushan Mountain, Southern China. The average net radiation (Rn) above the canopy was 53.14 W m⁻². The average latent heat flux (LE) and sensible heat flux (Hs) above the canopy were 57.18 W m⁻² and 43.40 W m⁻², while the LE and Hs below the forest canopy were 12.61 W m⁻² and 7.61 W m⁻², respectively. The LE and Hs fluxes estimated by the EC and by the Bowen ratio energy balance method were very similar in daytime, but very different in the rest of the day. The diurnal changes of soil heat flux (Gt) were in an “S” shape. The average Gt was -1.50 W m⁻², which suggested that soil was one of the heat sources. The total Gt was only 84.0% of the soil heat flux at 5 cm depth, which indicated that the heat stored by the soil should not be ignored in spite of the thin soil layers. A significant correlation ($r = 0.8517$) between the amount of heat flux (LE+Hs) and available energy (Rn-Gt) with a slope of 0.9128 suggested that the LE and Hs measured by EC at the research site were within the reasonable range reported in the literature.

Key words: Energy balance; Eddy covariance; Latent heat flux; Sensible heat flux; Dinghushan

能量作为森林生态系统演替的驱动因子,是生态系统一切功能过程的原动力,并与水循环等生态

过程紧密相联。能量平衡是森林生态学研究的基础和重点问题之一,但一直以来,由于森林,尤其是自

收稿日期: 2004-07-14 接受日期: 2004-11-02

基金项目: 中国科学院重要方向项目 (KSCX2-SW-120); 国家重点基础研究发展计划 (2002CB11115); 中国科学院重大项目(KZCX1-SW-01-01A3); 广东工业大学博士基金项目(043027)资助

* 通讯作者 Corresponding author

然林层次较多、结构复杂、地形多变,受观测技术和设备的限制,很多理论和方法均直接来源于农田生态系统。然而,森林作为顶极生态群落,与干扰剧烈的农田生态系统在结构和功能上存在着显著差别,从而导致了森林能量平衡研究相对滞后的现状。

对于南亚热带森林生态系统的能量平衡,前人已经开展过一些探索,但对于一些分项,特别是潜热通量、显热通量(有时还包括土壤热通量)等还是通过来源于农田能量平衡研究的相关估算方法得出^[1]。由于森林生态系统与农田生态系统的显著差异,很多在农田上的假设不能应用于森林,导致了相关数据的精确度较低和时间尺度上的模糊性^[2]。鼎湖山森林生态系统定位研究站从 2002 年 10 月开始,设置了通量观测塔,将常规微气象观测设备与 EC 法通量观测系统相结合,对南亚热带针阔混交林的能量平衡过程进行了长期定位研究,本文报道初步的观测研究结果,为南亚热带森林生态系统的能量平衡研究提供参考。

1 研究地概况

研究地设于广东省肇庆地区境内的鼎湖山自然保护区(23°10'N, 112°34'E),主要为丘陵和低山,海拔在 100–700 m 之间,属南亚热带季风湿润型气候,年太阳辐射约 4 665 MJ m²a⁻¹,年平均日照时数 1 433 h,年平均温度 21℃,最热月 7 月,最冷月为 1 月,极端最高温为 38℃,极端最低温为 -0.2℃。多年平均降雨量为 1 900 mm,4 月–9 月为雨季,10 月–3 月为旱季,年平均蒸发量为 1 115 mm,年平均相对湿度为 82%。

鼎湖山由下向上垂直分布着赤红壤、黄壤和山地灌丛草甸土,其中赤红壤分布在 300 m 以下的丘陵谷地。马尾松林-针阔叶混交林-季风常绿阔叶林演替序列是南亚热带森林演替过程的典型代表。通量观测塔所在的林分处于针阔混交林演替后期,优势树种为荷木(*Schima superba*)、锥栗(*Castanopsis chinensis*)和马尾松(*Pinus massoniana*),平均树高约 17 m,郁闭度为 0.7,是目前保存下来的最为典型、完整的南亚热带针阔混交林生态系统。

2 研究方法

2.1 微气象资料的收集

微气象资料观测设施分为地上 7 层和地下 5 层,地上部分安装于通量观测塔上,其中净辐射(Net radiation, R_n)的 4 个分量:下行短波辐射(Downwelling shortwave radiation, R_{sd})、上行短波辐射

(Upwelling shortwave radiation, R_{su})、下行长波辐射(Downwelling longwave radiation, R_{ld})和上行长波辐射(Upwelling longwave radiation, R_{lu})均由安装于塔顶部 38 m 处的 CNR-1PRT-L210 辐射观测系统(KIPP & ZONEN Ltd, USA)测定;地上各层次的温度和湿度分别由 HMP45 温度计(Campbell Scientific Ltd, USA)和 IRTS-P 湿度计(Apogee Ltd, USA)进行测定,风速用 A100R 风速仪(Vector Ltd, USA)测定;地下各层的温度和湿度分别用 105-T 土壤温度计(Campbell Scientific Ltd, USA)、107-L 土壤湿度计(Campbell Scientific Ltd, USA)测定。所有的气象资料均采用 CR10X 数据采集器(Campbell Scientific Ltd, USA)直接记录。

2.2 显热通量和潜热通量的测算

2.2.1 LE 和 Hs 的测定

运用涡度相关法(EC)开路系统直接测定潜热通量和显热通量。目前,涡度相关法已成为测定森林潜热通量(LE)和显热通量(Hs)最为直接、有效的方法,相关公式为:

$$LE = \rho C_p \omega' q' \quad (1)$$

$$Hs = \rho C_p \omega' T' \quad (2)$$

式中, ρ 为空气密度, C_p 为空气的定压比热, T' 、 q' 分别为温度和水汽含量的脉动量。

EC 开路系统分别安装在 27 m 高的第 5 层(林冠上层)和 9 m 高的第 2 层(林冠下层),CO₂和潜热通量、显热通量由开路系统 CO₂/H₂O 分析仪(Li-cor Ltd, USA)测定,传感器的频率为 10 Hz,用 SDM 数据采集器(Campbell Scientific Ltd, USA)直接记录。潜热通量数据和显热通量数据均经过 WPL^[3]校正和 TR 坐标转换^[4]处理。

2.2.2 LE 和 Hs 的估算

利用 BREB 法计算冠层显热通量和潜热通量^[5],LE 和 Hs 的计算式分别为:

$$LE = \frac{Rn - Gt}{1 + 0.64 \times \frac{\Delta T}{\Delta e} \times \frac{P}{P_0}} \quad (3)$$

$$Hs = \frac{Rn - Gt}{1 + 1.56 \times \frac{\Delta e}{\Delta T} \times \frac{P_0}{P}} \quad (4)$$

式中: ΔT 为林冠作用层上 0.5–2.0 m 气温差; Δe 为林冠作用层上 0.5–2.0 m 气温差; P 为测点气压; P_0 为标准大气压。

2.3 土壤热通量的测定

土壤表面热通量(G_t)可表示为 5 cm 深度处土

壤热通量($G_{5\text{cm}}$)和 0–5 cm 土壤层贮热(S)之和,即:

$$Gt = G_{5\text{cm}} + S \tag{5}$$

其中, $G_{5\text{cm}}$ 采用多个埋设于距土表 5 cm 深度处的土壤热通量板(Delft Ltd, Holland)进行测定,取其平均值。而土壤贮热(S)为:

$$S = C_v \frac{\delta T}{\delta t} \delta Z \tag{6}$$

其中, C_v 是土层平均的容积热容量($\text{J m}^{-3}\text{K}^{-1}$), $\delta T/\delta t$ 是该层土壤温度随时间的平均变化率(K s^{-1}), δZ 是土层厚度(m)。

本研究选取的观测资料为 2003 年 1 月 9 日至 23 日。所有数据均为 0.5 h 内观测数据的平均值,观测期间没有降水,平均气温 14.7°C ,平均相对湿度 55.1%,具有南亚热带旱季气候的特征。

3 结果和分析

3.1 净辐射通量

净辐射通量的日变化均呈较规则的倒“U”形,日均净辐射通量为 $19.4\text{--}70.0 \text{ W m}^{-2}$; 向下(指向地面,为正值)的日最大净辐射通量变幅为 $346\text{--}457.7 \text{ W m}^{-2}$,相差 111.7 W m^{-2} ,达到极值的时间段集中在 12:00–14:30,其中有 10 d 的最大值出现在 13:00; 向上(指向天空,为负值)的日最大净辐射通量变幅为 $-123.4\text{--}-81.4 \text{ W m}^{-2}$,相差仅 42.0 W m^{-2} ,出现极小值的时间段较长,为 20:00 至次日 3:00。夜间净辐射值变化相对平缓,这是森林生态系统的普遍特性^[6]。

就平均净辐射通量的日变化过程(图 1)而言,

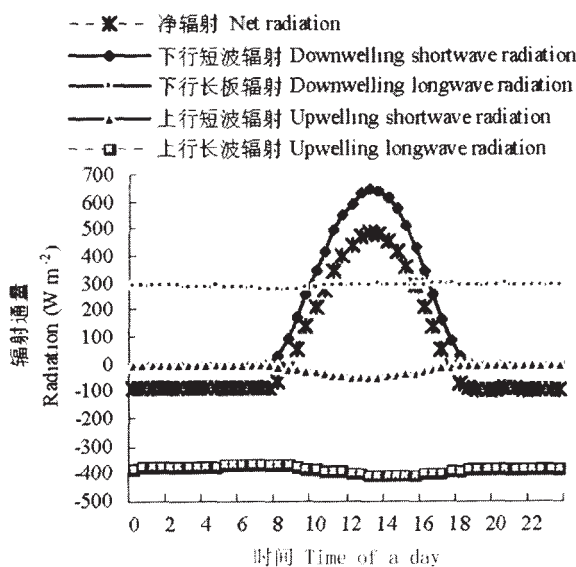


图 1 辐射通量日均变化总图(2003 年 1 月 9 日–23 日)

Fig. 1 Average diurnal changes in radiation fluxes from 9 Jan. to 23 Jan.

从 0:00–7:30, 净辐射稳定在 $-93.4\text{--}-88.6 \text{ W m}^{-2}$ 之间,随后急剧上升,到 9:00 左右净辐射通量变为正值,到 13:00 达到最大值 483.3 W m^{-2} ,随后开始持续下降,到 17:30 变为负值,至 22:30 左右达到最小值 -96.7 W m^{-2} 。净辐射为下行辐射与上行辐射之差。由于夜间各分量的变化幅度均较平稳,而白昼下行短波辐射的变化幅度大且与其它辐射分量的变化节律基本一致,故可认为下行短波辐射是影响森林净辐射的主要因素。分别对 R_n 与下行短波辐射 R_{sd} 和下行总辐射 R_t 进行回归分析可得:

$$R_n = 0.8849R_{sd} - 91.583, F = 52194.1, P = 0.0001, \text{ 相关系数 } r = 0.9931;$$

$$R_n = 0.886R_t - 346.39, F = 148684, P = 0.0001 \text{ 相关系数 } r = 0.9976.$$

相关性均达极显著水平,可认为净辐射具有与下行短波辐射相同的变化。

3.2 潜热通量和显热通量

3.2.1 不同方法测值的差异

将 EC 法所测得的潜热通量(图 2 A)和显热通量(图 2 B) 数据与利用 BREB 法计算的数据相比较,发现在白昼(9:00–17:00)数据吻合情况较好,EC 法实测的潜热通量和显热通量平均值分别为: 147.4 W m^{-2} 、 137.6 W m^{-2} , 而 BREB 法相应的值分别为 156.5 W m^{-2} 、 149.2 W m^{-2} , 前者分别是后者的 94.21%和 92.22%, EC 法实测值的结果偏低,这与 Black 等人的研究结果一致^[7]。夜间及凌晨数据差异较大,BREB 法计算数据在夜间常有突然增大或减小的情况,且在一些情况下无法得到结果,这与实际情况不符,可能的原因有: (1)BREB 法成立的理论假设之一是潜热扩散系数(K_w)与显热扩散系数(K_h)之比为 1,而很多研究表明在森林地区这一假设仅在白昼的中性大气层状态下成立,目前,在粗糙的森林表面,对于 BREB 的直接应用还没有公认的看法^[8,9]; (2)BREB 法的精度主要取决于辐射通量的观测精度和 $\beta(\Delta t/\Delta e)$ 值的确定,而在早晚及夜间, β 多在 -1 附近变动,这时计算出的潜热通量值不稳定,结果误差大,不能应用,且当 $\beta = -1$ 时方程无意义。同时,由于夜间湍流较弱,摩擦风速很小,EC 法实测值也出现较大偏差,使得两种估算方法的夜间结果难以比较。

3.2.2 潜热通量与显热通量的日变化

从图 3 可见: 林冠上层潜热通量在 0:00–8:30 处于较平稳的状态,随后开始显著上升,到 10:30 达到第一个峰值(217.98 W m^{-2}),在 12:30 达到另一个峰

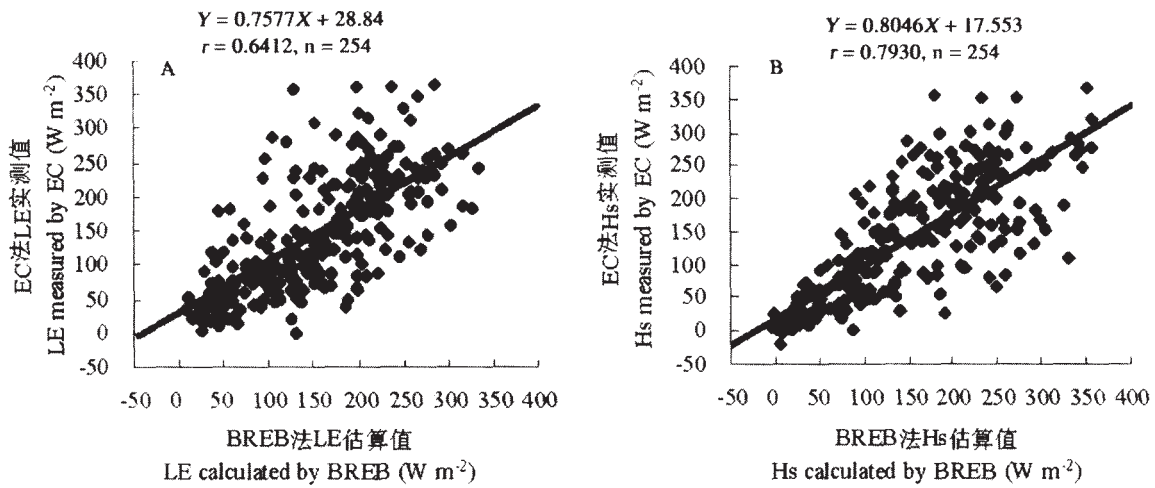


图 2 不同测算方法的潜热通量和显热通量值的比较

Fig. 2 Comparison of the values of latent heat (LE) and sensible heat (Hs) fluxes measured by EC system and by BREB method

值(215.85 W m⁻²),随后急剧下降,到 17:30 开始保持平稳波动;林冠上层显热通量的日变化呈单峰型,0:00-8:00 保持平稳波动,然后急剧上升,在 12:30 达到一天中的最大值(252.85 W m⁻²),此后持续下滑,到 19:30 开始保持平稳波动。

从各层次潜热、显热通量日变化过程可以看出:(1)林冠上层潜热通量均为正值,其平均值较同层次 Hs 大,说明在旱季南亚热带针阔混交林林冠上层蒸腾作用仍十分强烈。林冠下层的潜热通量仅在 4:30-18:00 之间为正值,而其余时间正负交替,这可能是因为林内小环境相对稳定、相对湿度较大导致各层次植物蒸腾作用不剧烈;(2)林冠上层显热通量在 9:00-19:00 基本为正,其余时间为负,而林冠下层在 9:00-18:00 为正,其余时间正负交替,原因可能是夜间林冠下层温度梯度不明显,阻碍了空

气上下层次之间的显热交换;(3)清晨,林冠上层潜热通量迅速增加的时间比显热通量约慢半小时,这可能是因为日出后辐射增加,林冠层气温梯度迅速加大,导致了显热的增加,而树体接受到环境信息,发生一系列生理反应,表现在树液流开始萌动、蒸腾增加有约半小时的延滞;(4)无论是林冠上层还是林冠下层,显热通量都呈现单峰型,这与气温的变化一致,而潜热通量则分别于 10:30、12:30 达到两个峰值,并且均在 12:30 达到最大值。(5)与林冠上层相比,下层显热通量呈现萌动时间迟、结束时间早的特点。

3.3 土壤热通量

土壤热通量密度平均值为 -1.50 W m⁻²,总的热通量为 -1939 751.1 J,说明在该时段,对整个系统而言,土壤是热源,能量通过土壤向系统传送(图4)。

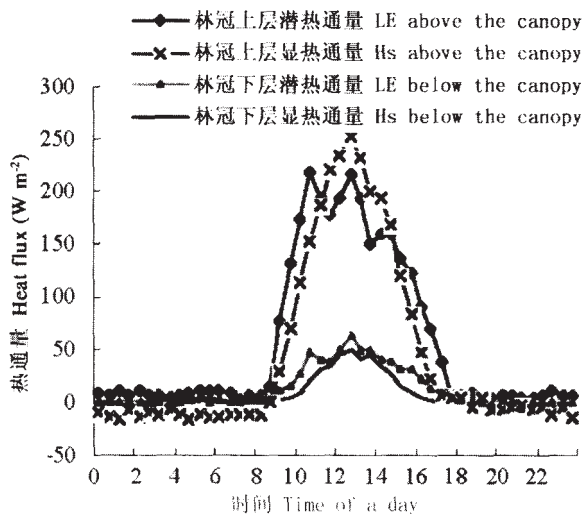


图 3 潜热通量和显热通量的日变化

Fig. 3 Diurnal changes in LE and Hs

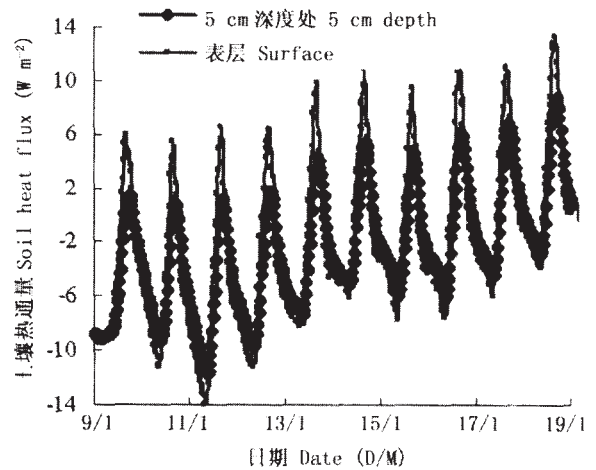


图 4 一月份不同层次土壤热通量

Fig. 4 Heat fluxes on soil surface and at 5 cm depth measured in January

将通量板实测值与加上 5 cm 深度以上土壤的热贮量后的土壤热通量总值进行对比,可以看出两者在趋势上相同,均成波浪形变化,但在数值上表层土壤热通量总值仅为 5 cm 处的土壤热通量的 84.0%。

5 cm 处土壤热通量向下(地层深处)传递的最大值为 8.75 W m^{-2} (1 月 18 日 16:30),向上(地表)传递的最大值为 -11.81 W m^{-2} (1 月 11 日 9:00),相应地,表层土壤热通量向下传递的最大值为 13.36 W m^{-2} (1 月 18 日 16:00),向上传递的最大值为 -14.01 W m^{-2} (1 月 11 日 8:00),负号表示热量由下往上传递。5 cm 处土壤热通量的极值均小于表层土壤,且存在延滞现象。

对不同热通量板的实测值进行分析发现在整体趋势上基本相同,均呈“S”形。热通量板埋设的深度相同时造成的数值差异较大,可能是森林生态系统土壤层本身异质性大,林冠状况、林下植被或枯落物覆盖、坡度以及坡向的不同均会对土壤外部的热状况产生影响,而土壤本身有机质含量等的差异则会导致其导热性能的不同,这也许就是即使在观测技术较为成熟的欧洲通量网(EuroFlux)中,对土壤热通量观测未做统一、规范要求的主要原因^[10]。

3.4 能量闭合情况

判别 EC 法观测数据可靠性的主要方法之一是系统的能量平衡情况,将观测期间白昼时段(9:00–17:00)的潜热通量与显热通量之和(H_s+LE)与可供能量(R_n-G_t)进行闭合,回归直线斜率为 0.9128,且与理想曲线(斜率为 1)十分接近(图 5),相关系数达 0.8517。能量平衡的各项指标与许多研究报道的范围相符,甚至优于部分国外较为成熟的通量网络森

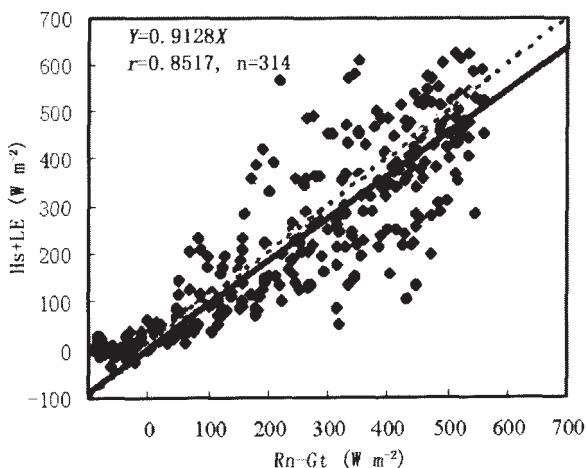


图 5 白昼能量闭合情况

Fig. 5 Energy balance closure in daytime

林台站的相关研究结果^[11-13]。这说明鼎湖山涡度相关法通量观测数据是十分可靠的。尽管林分为自然林且地处丘陵地带,但地形起伏不大,且该林分处于针阔混交林演替后期,林分结构已基本稳定,并具有一定的同质性,故该观测区域具有足够的风浪区长度,基本满足研究范围为足够大的均一下垫面的要求。同时,通量观测塔的选址经过周密论证,EC 开路观测系统的高度正好位于与风向方向上的均匀下垫面长度之比小于 1/100 的地方,故数据质量良好。

$LE+H_s$ 小于 R_n-G_t , 这一结果说明 EC 法测定的显热通量与潜热通量之和小于可供能量,存在能量不平衡性,这一普遍现象已为大多数研究所证实^[14,15],可能的原因是:(1) LE 的测量值可能偏低,当涡度相关法测定水汽浓度的能量谱与频率比小于 -2/3 时,传感器测定水汽浓度值比实际值偏小;(2)在测定土壤热通量时,很多研究测定的是地下一定深度土层的热通量,而忽略该深度以上土层所存储的热量;(3)忽略了系统内生物体热量的变化,这对地上部分生物量较大的南亚热带针阔混交林的影响可能更为明显;(4)忽略了光合作用所消耗的热能;(5)忽略了通量观测高度及尺度效应的影响。具体的原因及解决办法还有待于进一步研究。

4 讨论

森林的能量平衡问题一直是森林生态学研究热点之一,但长期以来,受技术设备限制,主要分项只能通过 BREB 等方法进行估算。由于这些方法大多来自于农田生态系统,在直接应用于层次繁多、地形复杂的森林生态系统时,就必然出现较大误差甚至错误,利用 EC 法通量观测系统等先进的设备进行观测,可以有效地减小误差。

一般认为白昼的标准是光合光子通量密度(Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD) $\geq 30 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,是用 EC 法和 BREB 法测算 LE 和 H_s 的理想时段。然而,该标准仅是从光照的角度定义,并未考虑地形和气象因素。研究发现,昼夜交替时,两种方法测算出的 LE 和 H_s 均出现剧烈的变动,与实际情况明显不符,可能是受山谷风的影响,不能反映真实情况。故本研究采用 9:00–17:00 作为白昼时段,相应地,其白昼标准为 $\text{PPFD} \geq 130 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。如何根据气象因子确定适合相关测算方法的时段,仍有待于进一步研究。

EC 法作为直接测定植被潜热通量和显热通量

的方法, 并作为其它理论计算方法的检验标准, 目前已得到大多数研究者的认可^[6,17], 但在地形复杂、下垫面情况不够理想的森林中的准确应用仍存在一些疑问^[4]。能量闭合情况, 与 BREB 法计算结果比较以及数据本身的变化趋势均表明鼎湖山 EC 法通量观测系统测得的 LE 和 Hs 数据是可靠的, 如实反映了南亚热带针阔混交林的相关能量通量。能量不平衡的原因, 除了 LE 和 Hs 测定过程中受能量谱和频率的影响所产生的系统误差, 晚间大气稳定, 湍流较弱降低测定的精确性以及忽略了光合耗热等问题外^[18-20], 结合鼎湖山针阔混交林的实际情况, 可能主要是由于忽略了系统贮热的变化。

就平均日变化过程而言, 林冠上层 LE 均为正值, 其平均值较 Hs 大, 说明即使在旱季, 南亚热带针阔混交林冠上层蒸腾作用也十分强烈, 并未明显受到水分胁迫的影响。与林冠上层相比, 下层显热通量呈现萌动时间迟、结束时间早的特点, 这与南亚热带针阔混交林较为郁闭, 太阳辐射难以穿透以及系统相对封闭有关。

即使将土壤热通量板放置于距土壤表层 5 cm 深度处, 其上层土壤的热储量仍不能忽略, 甚至占总土壤热通量的相当比例。由于林地地形复杂、土壤异质性大和植被覆盖均一性差等原因, 在测定林地土壤热通量时, 应综合考虑包括坡向、坡位在内的多种因素, 设置若干有代表性的点埋设热通量板, 尤其是在对时空尺度有较严格要求的时候。

参考文献

- [1] Yan J H(闫俊华), Zhou G Y(周国逸), Huang Z L(黄忠良), et al. Evapotranspiration of the monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan, Guangdong Province [J]. *Sci Silv Sin(林业科学)*, 2001, 37(1):37-45.(in Chinese)
- [2] Song C H(宋从和). The application of Bowen ratio energy balance method and error analysis [J]. *J Hebei For Coll(河北林学院学报)*, 1993, 8(1):85-96.(in Chinese)
- [3] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer [J]. *Quart J Meteorol Soc*, 1980, 106:85-106.
- [4] Massman W J, Lee X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges [J]. *Agri For Meteorol*, 2002, 113:121-144.
- [5] Spittlehouse D L, Black T A. Evaluation of the Bowen ratio/energy balance method for determining forest evapotranspiration [J]. *Atmosphere Ocean*, 1980, 18(2):98-116.
- [6] Zhou G Y(周国逸), Yu Z Y(余作岳), Peng S L(彭少麟). A study on energy balance in three ecosystems at Xiaoliang Experimental Station [J]. *J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报)*, 1999, 7(2):93-101.(in Chinese)
- [7] Black T A. Evapotranspiration from Douglas-fir stands exposed to soil water deficits [J]. *Water Resour Res*, 1979, 15:164-170.
- [8] Wang A Z(王安志), Pei T F(裴铁璠). Research progress on surveying and calculation of forest evapotranspiration and its prospects [J]. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 2001, 12(6):933-937.(in Chinese)
- [9] Alves P A, Pereira I S. Aerodynamic and surface resistances of complete cover crops: How good is the "big leaf"? [M] *Tranc ASAE*, 1998, 41(2):345-351.
- [10] Ogee J, Lamaud E, Brunet Y, et al. A long-term study of soil heat flux under a forest canopy [J]. *Agri For Meteorol*, 2001, 106:173-186.
- [11] Constantin J, Inclan M G, Raschendorfer M. The energy budget of a spruce forest: field measurements and comparison with the forest-land-atmosphere model (FLAME) [J]. *J Hydrol*, 1998, 212-213:22-38.
- [12] Kelliher F M, Hollinger D, Schulze E D, et al. Evaporation from an eastern Siberian larch forest [J]. *Agri For Meteorol*, 1997, 85:135-147.
- [13] Tirone G, Mollicone D, Beletti L, et al. Carbon and water exchanges of regenerating forests in central Siberia [J]. *For Ecol Manag*, 2002, 169:115-122.
- [14] Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. Estimates of the annual net carbon and water exchanges of forest: the EUROFLUX methodology [J]. *Adv Ecol Res*, 2000, 30:113-175.
- [15] Zhang Y Q(张永强), Shen Y J(沈彦俊), Liu C M(刘昌明), et al. Measurement and analysis of water, heat and CO₂ flux from a farmland in the North China plain [J]. *Acta Geogr Sin(地理学报)*, 2002, 57:333-342.(in Chinese)
- [16] Black T A, Hartog G D, Neumann H H, et al. Annual cycles of water vapour and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest [J]. *Global Change Biol*, 1996, 2:219-229.
- [17] Blanken P D, Black T A, Yang P C, et al. Energy balance and canopy conductance of a boreal aspen forest: Partitioning overstory and understory components [J]. *Geophysic Res*, 1997, 102(28): 915-927.
- [18] Riccardo V, Shashi V. Energy balance closure at FLUXNET Sites [J]. *Agri For Meteorol*, 2003, 113:223-243.
- [19] Kell B W, Paul J H, Patrick J M, et al. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance [J]. *Agri For Meteorol*, 2001, 106:153-168.
- [20] Meiresonne L, Sampson D A, Kowalski A S, et al. Water flux estimates from a Belgian Scots pine stand: a comparison of different approaches [J]. *J Hydrol*, 2003, 270:230-252.