

DOI: 10.5846/stxb201308272161

孙成, 江洪, 陈健, 刘玉莉, 牛晓栋, 陈晓峰, 方成圆. 亚热带毛竹林生态系统能量通量及平衡分析. 生态学报, 2015, 35(12): 4128-4136.

Sun C., Jiang H., Chen J., Liu Y L., Niu X D., Chen X F., Fang C Y. Energy flux and balance analysis of *Phyllostachys edulis* forest ecosystem in subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 4128-4136.

亚热带毛竹林生态系统能量通量及平衡分析

孙 成¹, 江 洪^{1,2,*}, 陈 健¹, 刘玉莉¹, 牛晓栋¹, 陈晓峰¹, 方成圆¹

¹ 浙江农林大学浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 杭州 311300

² 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093

摘要: 利用开路涡度相关系统和常规气象观测仪器, 对亚热带(浙江省)毛竹林生态系统 2011 年的净辐射、显热通量、潜热通量、土壤热通量以及气温、地温、降雨量等气象要素进行了连续观测, 定量分析了毛竹林生态系统能量通量的变化和各能量分量的分配特征, 并计算了能量闭合度以及波文比。结果表明: 毛竹林全年净辐射为 2628.00 MJ/m², 显热通量为 576.80 MJ/m², 潜热通量为 1666.77 MJ/m², 土壤热通量为 -7.52 MJ/m², 土壤为热源, 各能量分量季节变化明显, 日变化基本呈单峰型曲线变化。显热通量占净辐射的 22.0%, 潜热通量占 63.4%, 毛竹林生态系统潜热通量为能量散失的主要形式。波文比逐月变化规律不明显, 波动较大, 在 0.07—1.77 之间变化, 能量平衡比率法得出毛竹林年能量闭合度为 0.85, 月平均闭合度为 0.84, 能量闭合度高于线性回归法计算结果, 但仍有 15% 的能量不闭合。

关键词: 毛竹林; 能量通量; 能量闭合度; 湍流能量; 有效能量; 波文比

Energy flux and balance analysis of *Phyllostachys edulis* forest ecosystem in subtropical China

SUN Cheng¹, JIANG Hong^{1,2,*}, CHEN Jian¹, LIU Yuli¹, NIU Xiaodong¹, CHEN Xiaofeng¹, FANG Chengyuan¹

¹ Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China

² International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: The atmospheric boundary layer is a passage between the atmosphere and the land surface, through the atmospheric momentum, energy and substances are transported upwards and downwards in two layers on earth surface. In the lower atmospheric planetary boundary layer turbulent transport is important connection for substance and energy exchange between the atmosphere and the earth surface, currently it is one focus of earth system science. By using open-path eddy covariance system and micro-climate instruments, the net radiation, sensitive heat flux, latent heat flux, soil heat flux, air temperature, soil temperature, and precipitation were conducted in Mao bamboo forest ecosystem of subtropical in China since 2011. But the energy flux and analysis of Mao bamboo forest ecosystem reported in the literature at home and abroad is very few, in subtropical regions to establish long-term continuous observation of the flux tower, enhancing the research is highly requirement. The diurnal and monthly variation of energy balance as well as the distribution pattern of each component were analyzed, and energy closure and Bowen ratio also were calculated. 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 OLR(Ordinary least squares) and EBR(Energy balance ratio), energy imbalance characteristics of the Mao

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(61190114); 国家“973”重点基础研究发展规划基金项目(2011CB302705, 2010CB950702, 2010CB428503); 国家自然科学基金项目(41171324); 科技部重大国际合作项目(20073819)

收稿日期: 2013-08-27; 网络出版日期: 2014-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianghong_china@hotmail.com

bamboo forest ecosystem were systematically analyzed compared in the paper. The results showed that: the yearly net radiation of the Mao bamboo forest ecosystem was 2628.00 MJ/m², and the sensitive flux heat, latent heat flux, and soil heat flux were 576.80 MJ/m², 1666.77 MJ/m², and -7.52 MJ/m², respectively. The results suggest that soil of Mao bamboo forest was a heat source. The energy balance components had obvious seasonal pattern, diurnal variations of energy balance components existed on expected single peaks. The sensible and latent heat fluxes almost have 22.0% and 63.4% of the net radiation, respectively, indicating that latent heat flux was the main form of energy loss in this forest ecosystem. Monthly variation of the Bowen ratio is slight, and fluctuated from 0.07 to 1.77, the yearly energy balance closure of the Mao bamboo forest ecosystem was 0.85, and the mean monthly average was 0.84, yet energy imbalance of 15% still existed for the energy balance of Mao bamboo forest ecosystem.

Key Words: mao bamboo forest; energy flux; energy balance closure; turbulent flux; available energy; bowen ratio

森林作为地球上最大的陆地生态系统,在全球水循环和能量再分配中都发挥着重要的作用。而森林生态系统能量通量能够直接影响地面温度、水分输送及植被生长发育与生态系统生产力^[1]。目前,由于涡动相关法具有不干扰生态系统、时间分辨率高等优点,已逐渐成为生态系统地-气间能量和物质通量观测研究的标准方法,并利用涡动相关技术对各种生态系统的水热过程进行了大量研究^[2-4]。根据涡度相关技术观测的基本假设,理论上能量平衡闭合度可以作为观测系统性能和数据质量评价的一个有效途径。21 世纪初在美国佛罗里达州开展的 EBEX-2000 实验就是专门针对地表能量通量平衡问题进行的观测研究^[5-6]。就目前来看,土壤-植被-大气之间的能量储存未充分计入是造成地表能量不平衡的主要原因之一^[7-9]。因此,研究毛竹林的能量过程,分析各能量分量的分配特征,有助于揭示生态系统水分和能量平衡过程,对提高毛竹林生态系统生产力有一定的实践意义。但目前利用涡度相关技术对毛竹林生态系统能量通量的研究尚未见文献报道。

目前亚热带地区通量观测系统有江西千烟洲和大岗山观测站,云南哀牢山观测站,广东鼎湖山观测站和湖南会同等观测站。几个站点南北跨度较大,主要针对常绿阔叶林和针叶林进行观测,亚热带植被类型以常绿阔叶林为主,混杂有针叶林、混交林、落叶林和竹类。毛竹(*Phyllostachys edulis*)秆高达 13—20 m,胸径达 12—18 cm,节间短,壁厚,笋期 3—5 月,连年出笋能力强,是我国南方的重要植被类型和经济林,也是我国竹林中分布最广、面积最大的一种竹林,因此开展毛竹林的生态系统能量通量研究具有重要意义。

本文对毛竹林的通量观测正是对亚热带通量观测很好的补充和创新研究。本文利用浙江省安吉县山川乡涡度相关系统观测塔 2011 年的气象和能量通量观测数据,对毛竹林能量通量进行研究分析。旨在为毛竹林生产和区域模型模拟提供基础数据,并客观评价涡度相关观测数据的质量以及准确评估毛竹林生态系统与大气间的物质和能量交换提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省湖州市安吉县山川乡,地理位置 30°28'34.5"N,119°40'25.7"E,属亚热带季风气候。研究区竹林面积 2155 hm²,毛竹林面积 1693 hm²,占竹林面积 78.6%,分布面积很广。研究区年平均气温 16.6 °C,1 月温度最低,平均气温 -0.4—5.5 °C,7 月温度最高,平均气温 24.4—30.8 °C,年降水量 761—1780 mm,年平均相对湿度均在 70%以上。观测塔站点海拔 380 m,毛竹群落平均高度 15.8 m,平均胸径 14 cm,以 4—6 年生竹为主,林下灌木草本很少。

毛竹和一般树木相比,具有生长快,成材时间短(3—6a),产量高,繁殖更新能力强等特点,具有易于人工种植,一次栽造成功,即可年年抽笋成竹等优点。研究区毛竹林均采用粗放式经营,只在每年笋期 3—5 月人工挖笋,11 月左右钩梢,减少对毛竹林生态系统的人为干扰。

1.2 观测仪器

观测林地建有高 40 m 的微气象观测塔,开路涡度相关系统的探头安装在距地面 38 m 高度上,由三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Inc., 美国)和开路 CO₂/H₂O 分析仪(Li-7500, LiCor Inc., 美国)组成,原始采样频率为 10 Hz,所有数据利用数据采集器(CR1000, Campbell Inc., 美国)进行存储,同时在线计算并存储 30 min 的 CO₂ 通量(F_c)、摩擦风速(Ustar)、潜热通量(LE)和显热通量(H)等参数。

气象数据的观测采用 40 m 高的 CO₂ 通量观测系统中的气象观测设施,包括 3 层风速传感器(010C, metone, 美国)、3 层大气温度和湿度传感器(HMP45C, Vaisala, Helsinki, 芬兰),安装高度分别为 1、7、38 m;一台净辐射仪传感器(CNR4, Kipp&Zonen, 荷兰)安装于 38 m,用于采集下行的长/短波辐射、上行的长/短波辐射、净辐射的数据;2 个 SI-111 红外温度观测仪置于 2 m 和 23 m,分别用于采集地表和冠层温度;土壤温度传感器(109, Campbell, 美国),分别距土表 5、50、100 cm 深度处,水平插入各一个探针。林内分布 4 个自动雨量筒,林外空处分布 1 个,降雨量来自林外空地雨量数据。土壤热通量采用土壤热通量板(HFP01, Hukseflux, 荷兰)进行测定,选取具有很好代表性的点,挖开土壤剖面,分别距土表 3、5 cm 深度,水平插入,并将土壤回填。本站点土壤热通量采用 5 cm 深度观测数据,同时,3 cm 深度的数据用于插补和校正。全部观测数据保存到数据采集器的 TF 卡上,同时配置无线传输模块,利用远程计算机加载虚拟串口通过 GPRS 连接数据采集器,实时监测传感器状态。

1.3 数据处理

在实际观测中由于受到降水、凝水、昆虫以及随机电信号异常等的影响,需要对通量数据进行有条件的剔除。开路涡度相关系统据此计算的显热通量(H , MJ/m²)、潜热通量(LE , MJ/m²)、CO₂ 通量必须进行剔除处理。常规气象仪器受天气影响较小,观测的太阳净辐射(R_n , MJ/m²)、土壤热通量(G , MJ/m²)可不作剔除处理。显热和潜热通量根据三维超声风速仪观测的风速、风向与虚温计算得到,CO₂ 通量数据质量与显热、潜热通量数据具有一致性,因此本文以 CO₂ 通量数据质量为标准来判断相应时刻下的能量通量数据。分别经过二次坐标旋转校正,水汽校正(WPL),再根据阈值剔除异常通量值^[10],对于各能量分量缺失值要进行插补,缺失 1 d 内数据采用线性插补法,缺失超过 1 d 的数据,利用该能量分量与该月净辐射回归关系进行插补。在实际分析时,经过数据质量控制和数据插补后的数据都处理成半小时平均资料,并进一步计算。

1.4 能量平衡研究方法

生态系统观测中,当能量向下进入生态系统时, R_n 取正值;反之, R_n 取负值。地表能量平衡方程表达式为^[11]:

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

式中, R_n 为净辐射; G 为土壤热通量; S 为植被冠层热储存量; Q 为附加能量项的总和, H 为显热通量, LE 为潜热通量。由于 S 和 Q 项小而常被忽略,此时草原能量平衡方程可表示为:

$$R_n - G = H + LE \quad (2)$$

式中, ($R_n - G$) 简称为有效能量, ($H + LE$) 简称为湍流能量。当有效能量与湍流能量相等时,称为能量平衡闭合,否则称为能量平衡不闭合。

目前,国际上常用的能量闭合评价方法有 4 种,即最小二乘法(OLS)、压轴回归法(RMA)、能量平衡比率法(EBR)和能量平衡残差频率分布图法。本文采用能量平衡比率法(EBR)和线性回归(OLR)分析方法来分析毛竹林能量平衡状况。EBR 是指涡度相关系统直接测定的湍流能量与有效能量的比值。OLR 方法是根据最小二乘法原理求出回归斜率和截距,分析能量平衡闭合程度,在理想状况下有效能量和湍流能量的回归直线的斜率为 1,并通过原点,但通常二者线性关系的截距不能通过原点。

2 结果与分析

2.1 气象因子的变化

由图 1 可以看出,毛竹林全年降雨量整体呈单峰型曲线变化,年降雨量为 1543.1 mm,且雨水主要集中在

夏季(1062.2 mm),占全年降雨量的68.8%。最大降雨量出现在6月份为453 mm,最小出现在2月份为16.3 mm。空气相对湿度均在70%以上,整体上随降雨量的增加相对湿度会逐渐升高,其中6月份,受梅雨季节影响,降雨量和相对湿度均达到全年最大值。

全年月平均气温、地温和土壤5 cm处温度整体呈明显的单峰型曲线变化,三者变化趋势基本保持一致。气温、地温和土壤5 cm处温度最高值均出现在7月份,最低值均出现在1月份。其中2月份的地表温度变化较缓慢,是由于冬季冰雪覆盖,温度回升较气温和土壤温度慢一些,到3月份变化基本同步。

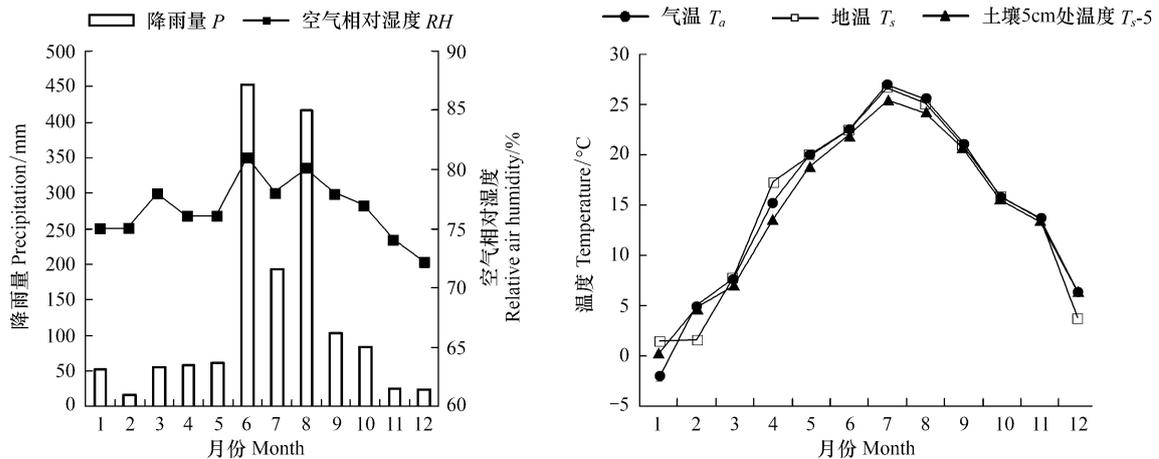


图1 毛竹林降雨量(P)、空气相对湿度(RH)、气温(T_a)、地温(T_s)和土壤5cm处温度(T_{s-5})的月变化

Fig.1 Monthly variations of Precipitation(P), Relative air humidity(RH), air temperature(T_a), soil temperature(T_s) and soil temperature at 5 cm in the Mao bamboo forest

2.2 能量通量日变化特征

陆地生态系统通过感热和潜热的形式与大气进行热量和水汽交换。不同类型生态系统的群落类型和下垫面不同,造成蒸发和热传导能力的差异,因此生态系统获得净辐射能量后,能量在系统内的分配变化特点各异。为分析各季节毛竹林地表各主要能量分量的日变化特征,将有典型季节性代表的1月份、4月份、7月份、10月份的半小时时刻下的能量通量数据作月平均处理,以表征该月的能量通量日变化进程(图2)。可见亚热带毛竹林能量平衡各分量呈显著的日变化,季节差异也较明显,主要分量呈明显的单峰型变化趋势。

由图2显示,4个月全天的能量分量变化均以净辐射为基础,呈单峰型曲线变化。净辐射日最大值出现时刻差异不大,在11:00—12:30。冬季,7:00—7:30净辐射通量变为正值,即能量开始进入毛竹林成为收入项,11:00达到日最大值258.49 W/m²,到16:00—16:30转变成负值,即能量成为支出项。一天中净辐射大于零的平均通量为158.74 W/m²,全天净辐射平均通量为39.73 W/m²。春季,在6:00—6:30净辐射通量变为正值,11:30达到日最大值497.92 W/m²,至17:00—17:30转变成负值。一天中净辐射大于零的平均通量为300.78 W/m²,全天净辐射平均通量为114.60 W/m²。夏季,6:00—6:30净辐射通量变为正值,日最大值为504.41 W/m²,至18:00—18:30转变为负值。一天中净辐射大于零的平均通量为291.48 W/m²,全天净辐射平均通量为131.27 W/m²。秋季,6:30—7:00净辐射通量变为正值,日最大值为386.95 W/m²,至16:30—15:00转变为负值。一天中净辐射大于零的平均通量为218.72 W/m²,全天净辐射平均通量为68.96 W/m²。

显热通量和潜热通量均与净辐射具有类似的日变化特征,但其日变化曲线均不如净辐射曲线平滑,而潜热通量波动较大可能与间歇性湍流和夜间湍流的低估有关^[12]。从显热通量来看,冬季由于地面地温冻结,加之降雨稀少,显热通量值较大,最大值为126.96 W/m²。春季,土壤解冻和冰雪融化,虽降雨量多于冬季,但由于净辐射显著增加,导致显热通量值也增加,达到214.04 W/m²。夏季是亚热带的主要降雨时段,空气相对湿度较高,能量大部分用来水汽传输,显热通量较小,为96.35 W/m²。秋季,降水量减少,显热通量增加,达到162.86 W/m²。各季节的潜热通量日变化趋势与显热通量非常相似,但在数值上冬季最弱,最大值为

38.27 W/m², 春季最大值为 154.25 W/m², 夏季最强, 达到 297.12 W/m², 秋季最大值为 143.63 W/m²。

土壤深层向土壤表层或大气中释放热量时土壤热通量记作负值, 土壤为热源; 相反, 土壤表层或大气向土壤深层传递热量时土壤热通量记作正值, 土壤为热汇。图 2 显示, 土壤热通量日变化有明显的差异。冬季变化趋势不明显, 变化范围为 -7.74—-6.76 W/m², 春季净辐射增加, 加之毛竹出笋期呼吸作用强烈, 土壤热通量变化较大, 在 -7.23—56.68 W/m², 夏季受江南梅雨季节影响, 变化范围为 -1.35—43.27 W/m², 秋季为 -11.28—7.84 W/m²。土壤热通量的峰值出现时间较净辐射延迟约 0.5—1 h, 因不同季节土壤理化性质不同, 土壤热导率不同, 影响土壤吸热散热在延迟时间上的差异^[13,14], 在热源/汇上也有差异^[15]。

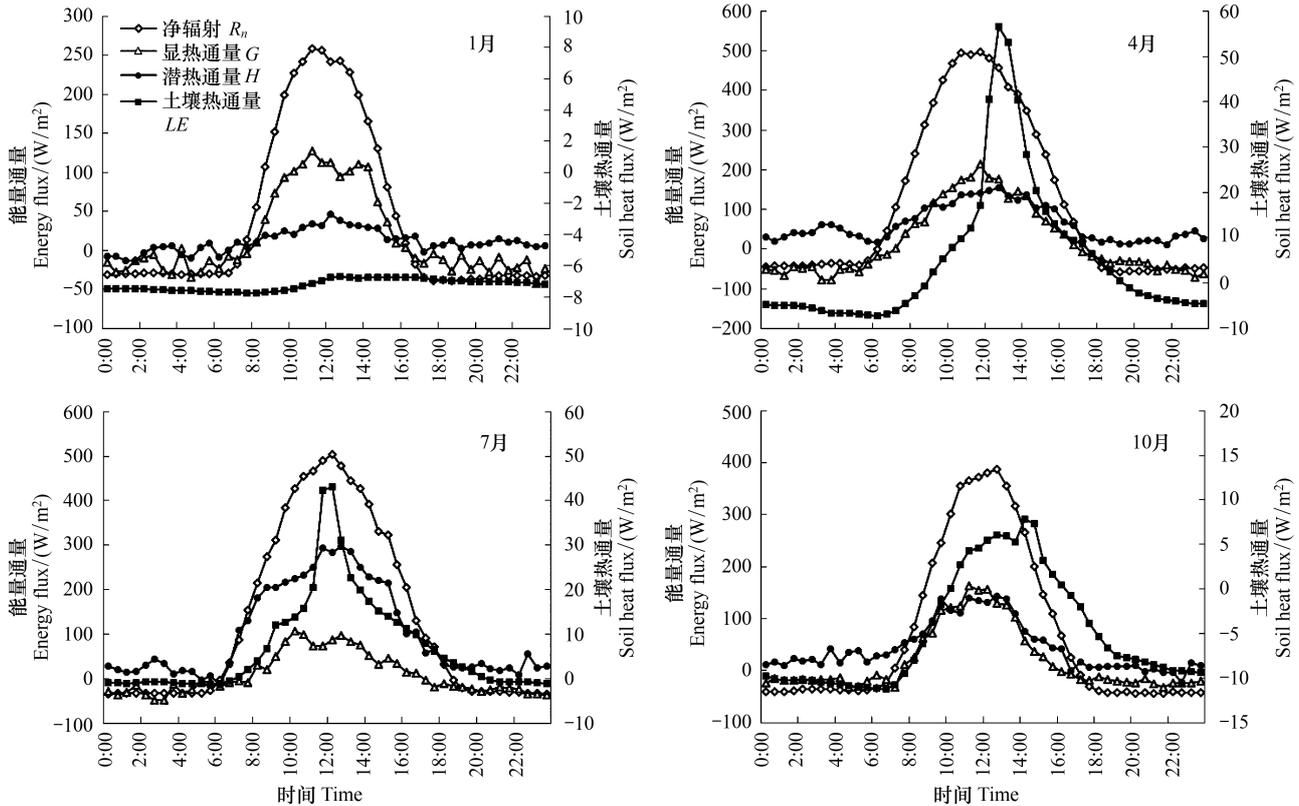


图 2 不同季节毛竹林能量平衡分量的日变化

Fig.2 Diurnal variations of energy flux in the Mao bamboo forest in different seasons

R_n : 净辐射 net radiation, G : 土壤热通量 soil heat flux, H : 显热通量 sensitive heat flux, LE : 潜热通量 latent heat flux

2.3 能量通量的季节变化

以年为时间尺度, 毛竹林的净辐射、显热通量、潜热通量和土壤热通量近似呈单峰型变化。但是受中小尺度天气变化的影响, 能量平衡各分量呈现一定程度的锯齿状波动, 特别是夏季雨期差异较大。由图 3 可以看出毛竹林净辐射的最大值出现在 7 月 (343.67 MJ/m²), 最低值出现在 1 月 (1.6.31 MJ/m²), 全年净辐射总量为 2628.00 MJ/m²。其中 6 月份净辐射有明显的降低, 为 222.76 MJ/m², 这是由于 6 月份为江南梅雨季节, 大量阴雨天气造成的, 而 6 月份的降雨量也达到全年最大值 453 mm (图 1)。

显热通量的变化与净辐射基本同步, 但在 6 月份没有出现降低的现象。最大值出现在 5 月 (96.06 MJ/m²), 最低值出现在 12 月 (5.05 MJ/m²), 全年总量为 576.80 MJ/m², 占净辐射总量的 22.0%。潜热通量为蒸散耗热, 1—7 月份随水热同期逐渐升高, 7 月份达到峰值 284.59 MJ/m², 之后, 潜热通量逐渐下降, 全年总量为 1666.77 MJ/m², 占净辐射总量的 63.4%。与黄土高原半干旱草原相比^[16], 毛竹林的净辐射高于半干旱草原 (2269.23 MJ/m²), 其能量分配方向为潜热通量大于显热通量。土壤热通量全年变化不明显, 而且在数值上比其他能量分量小 1—2 个数量级。土壤热通量在 7 月份达到正向最大值 (18.71 MJ/m²), 1 月份达到负向最大

值(19.33 MJ/m^2),全年总量为 -7.52 MJ/m^2 ,土壤为热源,仅占净辐射总量的0.3%。

2.4 能量通量分配特征及波文比

具体分析能量分量一方面可以了解能量闭合状况,另一方面可依据净辐射的主要消耗项,分析和判断下垫面的干湿状况。将毛竹林2011年能量通量按雨季(6—9月份)和非雨季(1—5月份,10—12月份)分别分析净辐射与显热通量、潜热通量的关系。

毛竹林雨季显热通量为 203.89 MJ/m^2 ,净辐射为 1126.48 MJ/m^2 ,占净辐射的18.1%,潜热通量为 825.89 MJ/m^2 ,占净辐射的73.3%;非雨季显热通量为 372.90 MJ/m^2 ,净辐射为 1501.52 MJ/m^2 ,占净辐射的24.8%,潜热通量为 840.88 MJ/m^2 ,占净辐射的56.0%。毛竹林雨季降水量占全年总量的75.5%,地表相对湿润,空气相对湿度接近80%,潜热通量在能量分配中所占比例较大,潜热通量约为显热通量的4.05倍。非雨季由于降水量较少(377.3 mm),地表相对干燥,空气相对湿度为75%,潜热通量约为显热通量的2.25倍。全年显热通量占净辐射的22.0%,潜热通量占净辐射的63.4%,总体来看,毛竹林潜热通量在能量分配中起主导作用,潜热通量约为显热通量的3倍,这与华北农田^[17]结果相似。

波文比能够表征大气-地表能量交换特征,多用于能量平衡计算^[18]。鉴于本文中土壤热通量占净辐射的比重仅为0.3%,因此净辐射能量主要分配给显热通量和潜热通量,而显热通量与潜热通量之比即为波文比。其大小决定表明了能量在生态系统中的分配。由图4

可以看出,全年波文比的变化波动较大,1月最大为1.77,7月最小为0.07;1月份显热通量大于潜热通量,其余月份均小于潜热通量,月平均波文比0.47,年波文比0.35,全年能量分配潜热通量大于显热通量。黄土高原半干旱草原^[16],年波文比在0.5—3.5,年均值接近1,鼎湖山针阔混交林^[19]波文比在0.4—3.0之间,长江滩地抑螺防病林^[20]的年波文比在0.5—10之间变化。波文比同时受到日出时间、入射净辐射量、降雨量以及毛竹的生长过程等的共同影响,且有一定的年际效应。

2.5 能量平衡分析

根据2011年全年数据,利用能量平衡比率法对涡度相关测得的湍流能量($H+LE$)与有效能量(R_n-G)进行闭合度分析(图5)。EBR有明显的月变化,最大值出现在6月份为1.19,最小值出现在1月份为0.52,除6月份为能量闭合过度现象以外,其余月份均为能量不闭合,月平均闭合度为0.84。当用湍流通量的年总量和有效能量的比值表示能量闭合状况时,年EBR值为0.85。这表明能量不闭合度为15%,采用涡度相关法测定的湍流通量仅为常规气象观测有效能量的85%。其中,雨季的闭合度达到0.96,非雨季为0.78,雨季的能量平衡状况较好。

理论上能量闭合是成立的,但不论下垫面性质如何,出现能量不闭合的现象都比较严重。此现象也是近20年来困扰地气相互作用实验研究的主要难点之一,也是生态学家和微气象学家所关注的焦点问题。而导

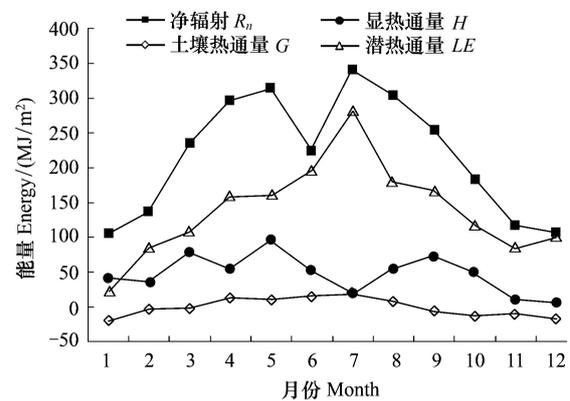


图3 毛竹林能量分量的月积累

Fig. 3 Monthly energy components accumulated in the Mao bamboo forest

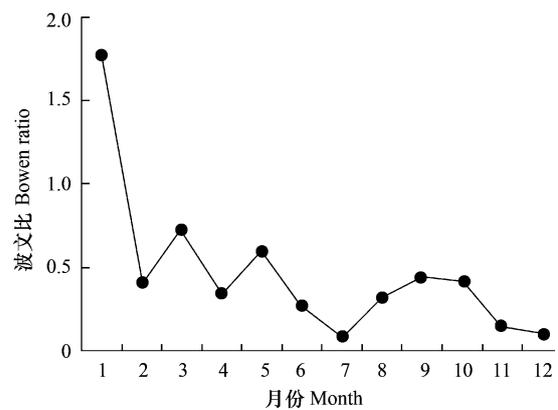


图4 毛竹林波文比月变化

Fig. 4 Monthly variations of Bowen ratio in the Mao bamboo forest

致能量不闭合的原因有很多种,地表到土壤热通量板之间的土壤储存热会对地表能量闭合度产生重要影响^[9,17],土壤热通量的观测距离地表有一定深度,土壤热通量的相位会随土壤深度的加深而延迟,导致能量闭合度降低^[7,21],还有在复杂环境下,湍流不充分和损失^[22]等。针对毛竹林的能量平衡状况,还需要通过长期连续的观测,进一步比较分析。

在半小时尺度上,表 1 给出了全年逐月线性回归系数。截距变化为 $-5.58-16.03 \text{ W/m}^2$,斜率变化为 $0.47-0.68$,相关系数变化为 $0.68-0.89$;年平均截距 3.50 W/m^2 ,平均斜率 0.55 ,平均相关系数 0.81 。这一结果低于黄土高原干旱草地的平均截距 (17.22 W/m^2)、平均斜率 (0.69) 和相关系数 (0.95)^[16],也低于同一地区雷竹林的平均截距 (4.71 W/m^2)、斜率 (0.59) 和相关系数 (0.84)^[23]。国际通量站点的能量闭合度是:斜率在 $0.55-0.99$,相关系数在 $0.64-0.96$ ^[24],中国通量网中 8 个站点^[25]的截距、斜率和相关系数平均值分别为 $28 (10-79.9 \text{ W/m}^2)$ 、 $0.67 (0.49-0.81)$ 和 $0.82 (0.52-0.94)$ 。毛竹林回归系数中斜率处于低水平,相关系数处于平均水平,需要进一步提高剔除数据的质量,来提高能量闭合度。

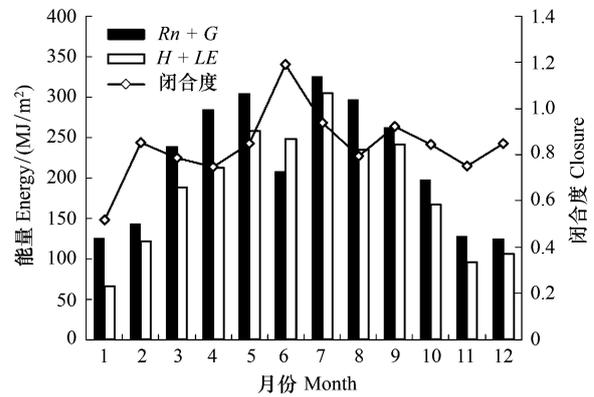


图 5 毛竹林能量的月积累与能量闭合度变化

Fig. 5 Variations of monthly energy accumulated and energy closure in the Mao bamboo forest

($R_n - G$): 有效能量, ($H + LE$): 湍流能量

表 1 2011 年逐月线性回归系数

Table 1 Ordinary linear regression (OLR) coefficients for energy balance

月份 Month	$(H+LE)$ vs $(R_n - G)$			n	月份 Month	$(H+LE)$ vs $(R_n - G)$			n
	截距 Intercept	斜率 Slope	相关系数 Coefficient			截距 Intercept	斜率 Slope	相关系数 Coefficient	
1	-4.315	0.510	0.680	624	7	8.247	0.588	0.775	539
2	2.365	0.513	0.713	679	8	-5.584	0.594	0.792	322
3	7.105	0.513	0.806	573	9	7.386	0.521	0.890	794
4	16.027	0.571	0.801	815	10	2.526	0.550	0.875	834
5	5.948	0.595	0.808	821	11	4.258	0.488	0.779	763
6	-5.431	0.678	0.895	430	12	8.450	0.467	0.882	651

表中 ($H+LE$) 表示有效能量, ($R_n - G$) 表示湍流能量

3 结论与讨论

亚热带毛竹林全年净辐射为 2628.00 MJ/m^2 , 显热通量、潜热通量和土壤热通量分别为 576.80 MJ/m^2 、 1666.77 MJ/m^2 和 -7.52 MJ/m^2 , 土壤为热源。在能量分配上, 毛竹林主要以潜热通量形式加热大气, 通过蒸发散耗能, 占净辐射的 63.4% , 显热通量占 22.0% , 土壤热通量仅占 0.3% 。各能量分量日变化基本呈单峰型曲线变化, 但显热通量和潜热通量都不如净辐射平滑, 这主要是湍流传输的间歇性所致。各能量分量的季节变化明显, 最大值出现在夏季, 潜热通量出现在春季, 最小值均出现在冬季。

利用能量平衡比率法计算毛竹林月 EBR 值在 $0.52-1.19$ 之间变化, 1 月份最小, 6 月份最大; 月平均闭合度为 0.84 , 年闭合度为 0.85 , 表征毛竹林能量仍有 15% 的不闭合现象。而 6 月份出现过闭合现象, 可能因为本月大量阴雨天气造成数据被剔除较多, 加之数据插补及计算方法等综合原因造成。如果考虑显热通量和潜热通量频率损失项 ($\approx 8\%$)、冠层和空气热量储存项 ($\approx 3\%$), 闭合度会得到进一步改善, 全年能量闭合程度将会达到 96% , 但能量还是无法完全闭合, 本文土壤热通量的计算没有考虑地表储存热量等, 毛竹林能量闭合

仍需要进一步观测研究。对 2011 年毛竹林能量数据进行逐月线性回归,平均截距、斜率处于观测低水平,相关系数处于平均水平。波文比的月变化波动较大,在 0.07—1.77 之间,最大值为 1 月 1.77,最小值为 7 月为 0.07,月平均为 0.47,年波文比为 0.35,而全年显热通量约为潜热通量的 1/3,两者结果基本一致。

涡动相关法是目前国际公认的测量通量的主流方法,能够在小时、日、月、年等不同时间尺度上反映能量变化的过程,揭示大气-植被-土壤的能量分配特征,以及环境因子的时空变化,但由于受到地形、观测仪器、物理过程等因素的干扰,其测量结果存在一定的不确定性。该系统在复杂环境的森林生态系统中应用时,其精度还有待于进一步检验。因此,毛竹林的能量通量和平衡状况的研究还有待进一步深入。

参考文献(References):

- [1] Huenneke L F, Anderson J P, Remmenga M, Schlesinger W H. Desertification alters patterns of aboveground net primary production in Chihuahuan ecosystems. *Global Change Biology*, 2002, 8(3): 247-264.
- [2] Kosugi Y, Katsuyama M. Evapotranspiration over a Japanese cypress forest II Comparison of the eddy covariance and water budget methods. *Journal of Hydrology*, 2007, 334(3/4): 305-311.
- [3] Matsumoto K, Ohta T, Nakai T, Kuwada T, Daikoku K, Shin'ichilida, Yabuki H, Kononov A V, Van der Molen M K, Kodama Y, Maximov T C, Dolman A J, Hattori S. Energy consumption and evapotranspiration at several boreal and temperate forests in the Far East. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(12): 1978-1989.
- [4] Oishi A C, Oren R, Stoy P C. Estimating components of forest evapotranspiration: A footprint approach for scaling sap flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(11): 1719-1732.
- [5] Mauder M, Oncley S P, Vogt R, Weidinger T, Ribeiro L, Bernhofer C, Foken T, Kohsiek W, De Bruin H A R, Liu H P. The energy balance experiment EBEX-2000 Part II: Intercomparison of eddy-covariance sensors and post-field data processing methods. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123(1): 29-54.
- [6] Oncley S P, Foken T, Vogt R, Kohsiek W, De Bruin H A R, Bernhofer C, Christian A, Gorsel E V, Granta D, Feigenwinter C, Lehner I, Liebethal C, Liu H P, Mauder M, Pitacco A, Luis R, Weidinger T. The energy balance experiment EBEX-2000. Part I: overview and energy balance. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123(1): 1-28.
- [7] Gao Z Q, Fan X G, Bian L G. An analytical solution to one-dimensional thermal conduction-convection in soil. *Soil Science*, 2003, 168(2): 99-107.
- [8] Heusinkveld B G, Jacobs A F G, Holtslag A A M, Berkowicz S M. Surface energy balance closure in an arid region; role of soil heat flux. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 122(1/2): 21-37.
- [9] Yang K, Wang J M. A temperature prediction-correction method for estimating surface soil heat flux from soil temperature and moisture data. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(5): 721-729.
- [10] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Celment R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grunwald T, Hollinger D, Jensen N O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik U, Rebmann C, Suker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for long term energy flux data sets. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 71-77.
- [11] Baldocchi D, Falge E, Gu L, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Vans R E, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X H, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, Paw K T, Pilegaard K, Schmid H P, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [12] Zhang J H, Ding Z H, Han S J, Zou C J, Zhou Y M. Turbulence regime near the forest floor of a mixed broad leaved/Korean pine forest in Changbai Mountains. *Journal of Forestry Research*, 2002, 13(2): 119-122.
- [13] 王旭,周国逸,张德强,王春林. 南亚热带针阔混交林土壤热通量研究. *生态环境*, 2005, 14(2): 260-265.
- [14] 尹光彩,王旭,周国逸,张德强. 鼎湖山针阔混交林土壤热状况研究. *华南农业大学学报*, 2006, 27(3): 16-20.
- [15] 王美莲,崔学明,韩鹏,周梅. 大兴安岭原始林区土壤热通量变化特征的初探. *内蒙古农业大学学报*, 2010, 31(4): 139-142.
- [16] 岳平,张强,杨金虎,李宏宇,孙旭映,杨启国,张建忠. 黄土高原半干旱草地地表能量通量及闭合率. *生态学报*, 2011, 31(22): 6866-6876.

- [17] 郭晓峰, 康凌, 蔡旭晖, 朱彤. 华南农田下垫面地气交换和能量收支的观测研究. *大气科学*, 2006, 30(3): 453-46.3
- [18] Flerchinger G N, Cooley K R. A ten-year water balance of a mountainous semi-arid watershed. *Journal of Hydrology*, 2000, 237(1/2): 86-99.
- [19] 王春林, 周国逸, 王旭, 周传艳, 于贵瑞. 鼎湖山针阔叶混交林生态系统能量平衡分析. *热带气象学报*, 2007, 23(6): 643-651
- [20] 王昭艳. 长江滩地抑螺防病林生态系统能量平衡与水汽通量研究. 北京: 中国林业科学研究院, 2008
- [21] 岳平, 张强, 牛生杰, 成华, 王西育. 半干旱草原下垫面能量平衡特征及土壤热通量对能量闭合率的影响. *气象学报*, 2012, 70(1): 136-143.
- [22] Lee X H. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91(1/2): 39-49.
- [23] 陈云飞, 江洪, 周国模, 孙成, 陈健. 高效经营雷竹林生态系统能量通量过程及闭合度. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1063-1069.
- [24] Wilson K, Goldstein A, Falge E, Aubinet M, Baldocchi D, Berbigier P, Bernhofer C, Ceulemans R, Dolman H, Field C, Grelle A, Ibrom A, Law B E, Kowalski A, Meyers T, Moncrieff J, Monson R, Oechel W, Tenhunen J, Valentini R, Shashi V. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 223-243.
- [25] 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 张雷明, 任传友, 伏玉玲. 中国通量观测网络(China FLUX)能量平衡闭合状况的评价. *中国科学 D 辑, 地球科学* 2004, 34(增刊 II): 46-56.