

# 我国亚热带毛竹林生长季能量通量过程及闭合度分析

孙成<sup>1</sup>, 江洪<sup>1,2\*</sup>, 陈云飞<sup>1</sup>, 刘玉莉<sup>1</sup>, 张金梦<sup>1</sup>

(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:** 为探讨我国亚热带毛竹林(*Phyllostachys edulis*)生长季的能量平衡关系, 利用开路涡度相关法, 对 2011 年毛竹林生长季的能量通量的变化特征进行了研究, 并应用能量平衡比率法和线性回归 2 种方法, 分析了能量闭合的特点。结果表明, 我国亚热带毛竹林生长季的净辐射总量为 1738.2 MJ m<sup>-2</sup>, 显热通量为 354.3 MJ m<sup>-2</sup>, 潜热通量为 1146.0 MJ m<sup>-2</sup>, 土壤热通量为 58.9 MJ m<sup>-2</sup>, 土壤为热汇, 显热通量占净辐射的 20.4%, 潜热通量占 65.9%, 土壤热通量占 3.4%。毛竹林生长季的能量闭合度为 0.89, 月平均闭合度为 0.91, 但仍有 11% 的能量不闭合。可见, 毛竹林生长季以潜热能量散失形式为主, 各能量分量均以净辐射变化为基础, 且日变化基本呈单峰型曲线。

**关键词:** 能量通量; 能量闭合度; 涡度相关法; 毛竹林

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2014.01.007

## Energy Flux and Energy Balance Closure Analysis of *Phyllostachys edulis* Forest in Subtropical China during Growing Season

SUN Cheng<sup>1</sup>, JIANG Hong<sup>1,2\*</sup>, CHEN Yun-fei<sup>1</sup>, LIU Yu-li<sup>1</sup>, ZHANG Jin-meng<sup>1</sup>

(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:** In order to understand the energy balance closure of *Phyllostachys edulis* forest in subtropical China during growing season, the changes in energy flux of *P. edulis* forest were studied from April to September in 2011 by using open-path eddy covariance method, and the characteristics of energy closure were analyzed by using EBR (Energy balance ratio) and OLR (Ordinary linear regression). The results showed that total net radiation of the forest in growing season was 1738.2 MJ m<sup>-2</sup>, and the sensible flux heat, latent heat flux, and soil heat flux were 354.3 MJ m<sup>-2</sup>, 1146.0 MJ m<sup>-2</sup>, and 58.9 MJ m<sup>-2</sup>, respectively. It was suggested that soil was a heat sink. The sensible and latent heat fluxes were accounting for 20.4% and 65.9% of the net radiation, respectively. The energy balance closure of *P. edulis* forest in growing season was 0.89, and the monthly average was 0.91, but there was 11% of energy imclosure. Therefore, the latent heat flux was the main form of energy loss. Diurnal variation in energy components all showed single peak curves based on net radiation, and energy closure was at high level.

**Key words:** Energy flux; Energy balance closure; Eddy covariance method; *Phyllostachys edulis* forest

气候变化是通过近地层能量的改变来实现的, 不同的气候背景和下垫面条件下的能量传输过程

存在着很大的差异<sup>[1]</sup>。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

收稿日期: 2013-07-22

接受日期: 2013-09-29

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)资助

作者简介: 孙成(1987~), 男, 硕士研究生, 主要从事森林生态系统碳循环研究。E-mail: suncheng0115@126.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianghong\_china@hotmail.com

重要的作用。陆面过程实验中,能量不闭合是地表通量观测中经常遇到的问题,国际上已经开展了大量的相关研究<sup>[2-3]</sup>。21世纪初开展的EBEX-2000试验专门针对地表能量平衡问题进行观测研究<sup>[4]</sup>,分析能量不闭合的潜在因素。地表土壤热通量是能量平衡的重要组成部分,精确估算地表土壤热通量的大小也是能量平衡分析中的关键问题。已有用多层土壤温度和湿度观测资料来估算土壤热通量的研究报告<sup>[5]</sup>,还有的研究提出考虑热扩散和热对流的计算方法<sup>[6]</sup>。目前,应用涡动相关技术研究生态系统碳水通量是国际上公认的标准方法<sup>[7-8]</sup>,根据涡度相关技术观测的基本假设,FLUXNET许多站点都把能量平衡闭合状况分析作为观测系统性能和数据质量评价的一个有效途径<sup>[9]</sup>。目前,利用涡度相关技术对毛竹林生态系统能量通量进行研究的报道较少。

毛竹(*Phyllostachys edulis*)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,是我国重要的森林资源之一,也是我国竹林中分布最广、面积最大的一种竹类。根据全国森林资源普查的数据,在南方陆地森林生态系统中,竹林面积从第五次普查的 $4.21 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,增加到第七次的 $5.38 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。竹林有着较高的经济效益和生态效益,在亚热带地区的种植面积不断扩大,而毛竹林兼具森林和农田的特点。研究毛竹林生长季的能量过程,有助于了解和分析各能量分量的分配特征,并为揭示生态系统的水分和能量平衡过程提供分析依据。本研究在浙江省安吉县山川乡利用涡动相关系统观测塔于2011年获得的毛竹林生长季的能量通量和气象观测数据,对毛竹林能量通量进行研究分析,探讨毛竹林生长季的能量通量变化特征,旨在为毛竹林生产和区域模型模拟提供基础数据,并为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 研究区概况

实验区位于浙江省湖州市安吉县山川乡,地理位置为 $30^{\circ}28'34.5'' \text{ N}$ ,  $119^{\circ}40'25.7'' \text{ E}$ 。属亚热带季风气候,年平均气温为 $16.6^{\circ}\text{C}$ ,1月温度最低,7月温度最高,生长季平均气温 $21.8^{\circ}\text{C}$ ,年降水量为761~1780 mm,降雨主要集中在夏季,6~7月份为梅雨季节,年平均相对湿度在70%以上。实验

区竹林面积 $2155 \text{ hm}^2$ ,其中毛竹林面积 $1693 \text{ hm}^2$ ,占竹林总面积的78.6%,分布很广。观测塔站点建在海拔380 m处,坡度约为 $11^{\circ}$ ,坡向北偏东,毛竹群落平均高度15.8 m,平均胸径14 cm,以4~6年生(2、3度)竹为主,林下灌草层稀少。每年的3月下旬为初春季节,随着温度和湿度逐渐升高,毛竹开始出笋,4月是出笋旺盛期,到5月上旬基本结束。5月底毛竹开始抽叶,6月份开始大量展开。因此,本文毛竹林的生长季时间段为4~9月份,其中4月份为出笋旺盛期,6月份为大量展叶期,9月份为生长季。

## 2 方法

### 2.1 观测方法

实验区建有高40 m的微气象观测塔,开路涡动相关系统的探头安装在距地面38 m的高度上,由三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Inc., 美国)和开路 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 红外分析仪(Li-7500, LiCor Inc., 美国)组成,原始采样频率为10 Hz,所有数据储存到数据采集器(CR1000, Campbell Inc., 美国),同时在线计算并存储30 min的 $\text{CO}_2$ 通量( $F_c$ )、潜热通量( $LE$ )和显热通量( $H$ )等统计量。

气象数据的观测,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 m、7 m和38 m;2个SI-111红外温度观测仪分别置于2 m和23 m,分别用于采集地表和冠层温度;1台净辐射仪传感器(CNR4, Kipp & Zonen, 荷兰)安装高度为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;土壤温度传感器(CS109, Campbell, 美国),分别位于距土表5 cm、50 cm和100 cm深度处。林内分布4个自动雨量筒,林外空地1个,降雨量来自林外空地雨量数据。土壤热通量利用土壤热通量板(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,水平插入,分别距土表3 cm和5 cm深。根据相关研究报告<sup>[10-12]</sup>,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。

### 2.2 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。开路涡动相关系统据此计算的显热通量( $H$ ,  $\text{MJ m}^{-2}$ )、潜热通量( $LE$ ,  $\text{MJ m}^{-2}$ )、 $\text{CO}_2$  通量必须进行剔除处理。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, $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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<sup>[13]</sup>。常规气象仪器受天气影响较小,观测的太阳净辐射( $R_n$ ,  $\text{MJ m}^{-2}$ )、土壤热通量( $G$ ,  $\text{MJ m}^{-2}$ )可不作剔除处理。由于每天的能量数值变化较小,单位用  $\text{W m}^{-2}$  表示,而每个月的能量积累量的数值较大,用  $\text{MJ m}^{-2}$  表示。在长期通量观测中,由于仪器故障、系统校正以及天气、风向等因素影响,往往造成观测数据丢失和异常,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。对每个月插补以后的相同半小时时刻下的数据作平均处理,以表征该月能量通量的日变化进程。

### 2.3 能量平衡研究方法

所谓的能量平衡闭合是指利用涡动相关仪器直接观测的显热和潜热通量之和与净辐射通量、土壤热通量、冠层热储量等之和之间的平衡。生态系统观测中,能量平衡方程表达式为<sup>[14]</sup>:

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

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。由于  $S$  和  $Q$  项小而常被忽略,此时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。

国际上常用的能量闭合状况的方法有最小二乘法(Least squares method, LS)、压轴回归法(Reduced major axis regression, RMA)、能量平衡比率法(Energy balance ratio, 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和线性回归(Linear regression, LR)来分析毛竹林生长季能量平衡状况。EBR 是指用涡度相关系统直接测定的

湍流能量与有效能量的比值;用 LR 方法求出回归斜率和截距,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斜率达不到 1,截距也不能通过原点。

## 3 结果和分析

### 3.1 环境因子的变化

由图 1 可以看出,生长季毛竹林的气温、地温和 5 cm 深土壤温度呈现明显的单峰曲线。4 月份的 3 个温度均最低,分别为  $15.2^\circ\text{C}$ 、 $17.3^\circ\text{C}$  和  $13.6^\circ\text{C}$ ,出现地温高于气温的现象,这可能是由于 4 月份毛竹大量出笋,推测是呼吸加强所致。其余月份温度非常接近;3 个温度的最大值均出现在 7 月份,分别为  $26.9^\circ\text{C}$ 、 $26.6^\circ\text{C}$  和  $25.7^\circ\text{C}$ ,同时也为全年最高值;6 月份三者均升幅较缓,而降雨量则为整个生长季的最高,这是由于该地区 6 月份为梅雨季节,有大量阴雨天而导致的。生长季的降雨量为  $1285.2\text{ mm}$ ,占全年降雨量的 83.3%,其中 6 月份的降雨量最大,为  $453.0\text{ mm}$ ,8 月份次之,为  $416.5\text{ mm}$ ,夏季(6-8 月)降雨量为  $1062.2\text{ mm}$ ,占全年降雨量的 68.8%,占生长季降雨量的 82.6%,可见降雨量较集中。而 6 月份的降雨量大也是导致温度升幅较缓的主要原因。

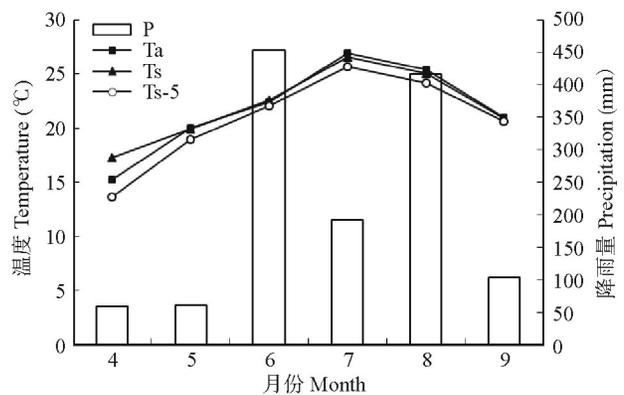


图 1 毛竹林的降雨量(P)、气温(Ta)、地温(Ts)和土壤 5 cm 处温度(Ts-5)的变化

Fig. 1 Changes in precipitation (P), air temperature (Ta), surface soil temperature (Ts) and soil temperature at 5 cm depth (Ts-5) in *Phyllostachys edulis* forest

### 3.2 能量通量的日变化

由图 2 可以看出,毛竹林生长季各能量分量的日变化,均呈明显的单峰型曲线。净辐射进入生态

系统,记作正值,反之,记作负值。夜间,净辐射全为负值,基本稳定在 $-50 \text{ W m}^{-2}$ 左右,受日出时间影响,6月份在5:00-5:30变为正值,9月份在6:30-7:00变为正值,此后逐渐增加,中午(约在11:00-12:00)达到峰值,然后逐渐降低,日落后转变为负值,并逐渐趋于平稳。净辐射最大值出现在4月份,为 $497.9 \text{ W m}^{-2}$ ,受降雨的影响,6月份净辐射的最大值为 $306.8 \text{ W m}^{-2}$ 。显热通量和潜热通量与净辐射具有类似的日变化特征,但日变化曲线均比净辐射曲线平缓。显热通量的最大值出现在4月份,为

$214.0 \text{ W m}^{-2}$ ,夜间通量值基本稳定在 $-25 \text{ W m}^{-2}$ 左右,显热通量的波动较大,可能与间歇性湍流和夜间湍流的低估有关<sup>[15]</sup>。潜热通量最大值出现在6月份,为 $220.2 \text{ W m}^{-2}$ ,夜间通量值也都为正值,但数值很小。

毛竹林吸收的净辐射除了以显热、潜热的形式传播到大气中,还有一部分能量向下传导到土壤中去,即土壤热通量。土壤热通量为正值表示热量由植被-大气辐射进入土壤,土壤为热汇;土壤热通量为负值表示热量由土壤辐射到植被-大气,土壤为热源。土壤热通量在数值上比其他能量分量小1~2个数量级,毛竹林4月份的土壤热通量为 $-7.2 \sim 56.6 \text{ W m}^{-2}$ ,6月份为 $-1.7 \sim 32.8 \text{ W m}^{-2}$ ,9月份为 $-8.9 \sim 29.1 \text{ W m}^{-2}$ ,正负发生转变的时间要比净辐射延迟1.5~2.5 h。因不同月份土壤理化性质不同,土壤热导率也不同,影响土壤吸热散热在延迟时间上的差异<sup>[10-11]</sup>,因而在热源/汇上也有差异<sup>[12]</sup>。

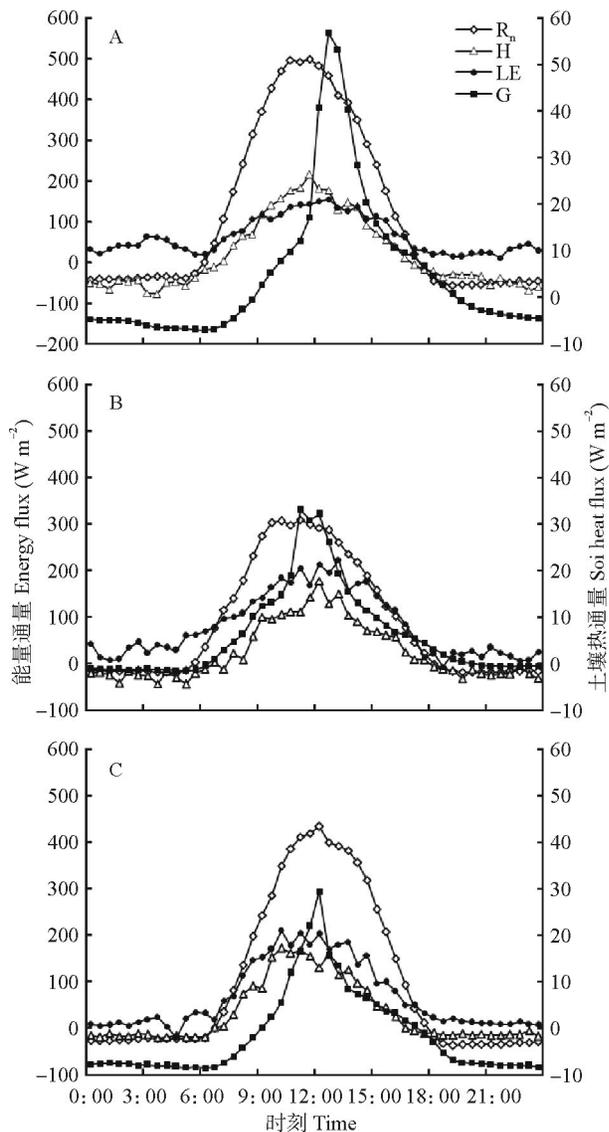


图2 毛竹林生长季能量通量的日变化。A: 4月; B: 6月; C: 9月;  $R_n$ : 净辐射; H: 显热通量; LE: 潜热通量; G: 土壤热通量。图3同。  
Fig. 2 Diurnal changes in energy flux of *Phyllostachys edulis* forest during growing season. A: April; B: June; C: September.  $R_n$ : Net radiation; H: Sensible heat flux; LE: Latent heat flux; G: Soil heat flux. The same is Figure 3.

### 3.3 能量通量的分配特征

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。绘制毛竹林生长季的净辐射、显热、潜热和土壤热通量的每月积累量图。从图3可以看出,毛竹林各能量分量的变化都是以净辐射的变化为基础的。由于太阳辐射时间和角度不断增加,净辐射从4月份( $297.2 \text{ MJ m}^{-2}$ )开始逐渐增加,到7月份为最大值( $343.7 \text{ MJ m}^{-2}$ ),而6、8月份由于大量阴雨天导致净辐射降低,这与同一地区雷竹林<sup>[16]</sup>的研究结果一致。毛竹林生长季的净辐射总量为 $1738.2 \text{ MJ m}^{-2}$ 。显热通量最大值出现在5月份,为 $96.1 \text{ MJ m}^{-2}$ ,生长季的总量为 $354.3 \text{ MJ m}^{-2}$ ,占净辐射的20.4%。潜热通量最大值出现在7月份,为 $284.6 \text{ MJ m}^{-2}$ ,生长季的总量为 $1146.0 \text{ MJ m}^{-2}$ ,占净辐射的65.9%。土壤热通量变化比较稳定,最大值出现在7月份,为 $18.7 \text{ MJ m}^{-2}$ ,生长季总量为 $58.9 \text{ MJ m}^{-2}$ ,占净辐射的3.4%。土壤热通量占净辐射的比重很小,因此,到达地面的辐射能量进入生态系统后,主要以显热和潜热的形式加热大气。毛竹林生长季能量在生态系统中的分配以潜热大于显热,潜热约为显热的3.2倍,这与华北农田<sup>[17]</sup>的结果相似。

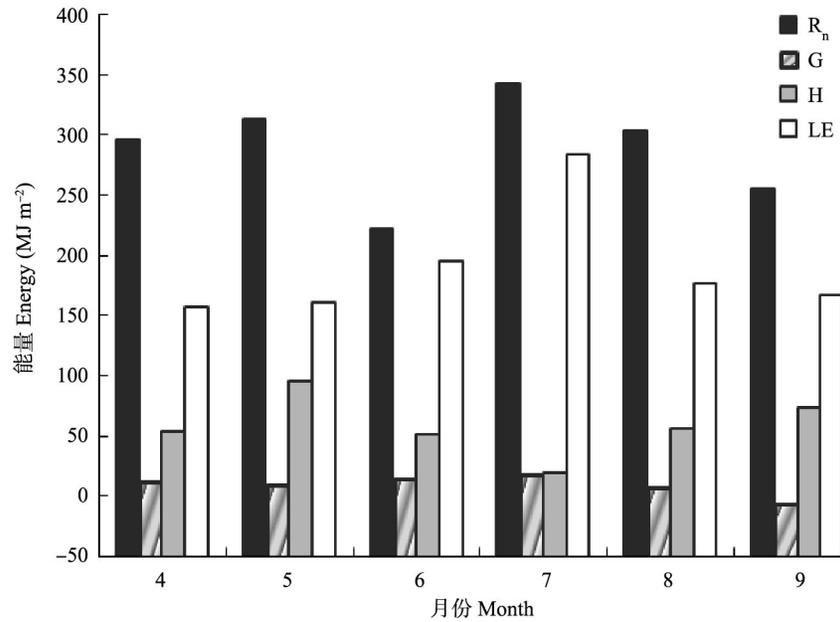


图3 毛竹林能量分量的月积累

Fig. 3 Monthly accumulation of energy components in *Phyllostachys edulis* forest

### 3.4 能量闭合度分析

根据热力学第一定律,生态系统内的能量应当守恒, Wilson 等<sup>[18]</sup>通过分析 FLUXNET 站点能量平衡的闭合状况,认为湍流通量观测中普遍存在 10%~30%<sup>[18-19]</sup>不闭合度。

由图 4 可以看出,毛竹林生长季湍流通量(H + LE)与有效能量( $R_n - G$ )之比 EBR 值呈单峰型变化,

以 4 月份的最低,为 0.75, 6 月份的最高,为 1.19, 6 月份出现过闭合现象;7 月份的闭合度为 0.94,是生长季中能量闭合最好的月份。生长季月平均闭合度为 0.91,生长季总闭合度为 0.89,高于草原区<sup>[20]</sup>生长季能量闭合度(晴天为 0.83,阴天为 0.82),毛竹林生长季能量闭合状况良好。

表 1 是在半小时尺度上生长季的逐月线性回

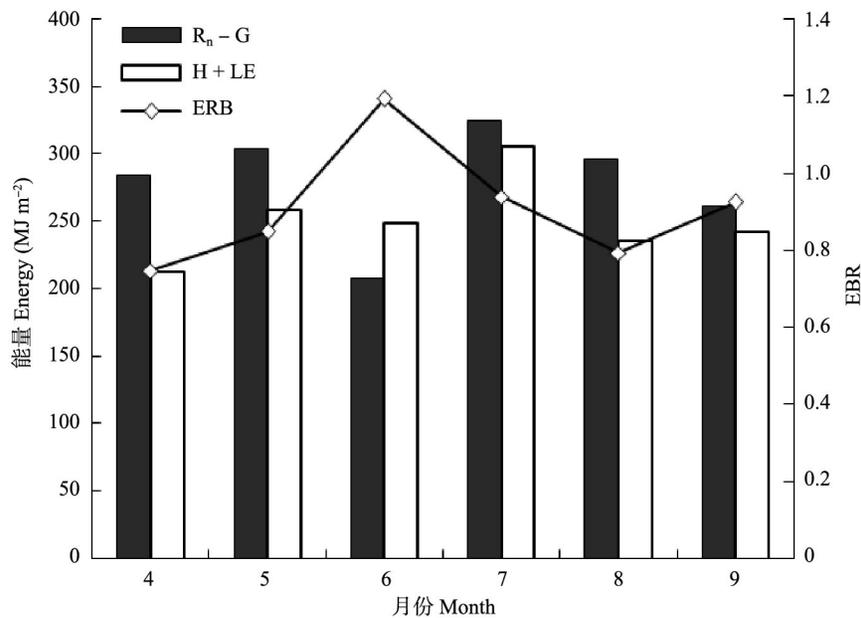


图4 毛竹林能量分量的月积累与能量闭合度。R<sub>n</sub> - G: 有效能量; H + LE: 湍流通量; EBR: 能量平衡比率。

Fig. 4 Monthly accumulation of energy components and energy closure in *Phyllostachys edulis* forest. R<sub>n</sub> - G: Available energy; H + LE: Turbulent flux; EBR: Energy balance ratio.

表 1 2011 年 4-9 月能量平衡的线性回归系数

Table 1 Linear regression (LR) coefficients of energy balance from April to September in 2011

月份 Month	(H + LE)/(R <sub>n</sub> - G)			n
	截距 Intercept	斜率 Slope	相关系数 Coefficient	
4	16.027	0.571	0.801	815
5	5.948	0.595	0.808	821
6	-5.431	0.678	0.895	430
7	8.247	0.588	0.775	539
8	-5.584	0.594	0.792	322
9	7.386	0.521	0.890	794

归系数。可见,生长季的截距为 $-5.58 \sim 16.03 \text{ W m}^{-2}$ ,斜率为 $0.52 \sim 0.68$ ,相关系数为 $0.78 \sim 0.90$ 。生长季的平均截距为 $4.43 \text{ W m}^{-2}$ ,平均斜率为 $0.59$ ,平均相关系数为 $0.81$ 。这些均低于黄土高原干旱草地<sup>[21]</sup>的平均截距( $17.22 \text{ W m}^{-2}$ )、平均斜率( $0.69$ )和平均相关系数( $0.95$ ),与同一地区雷竹林<sup>[6]</sup>的平均截距( $4.71 \text{ W m}^{-2}$ )、斜率( $0.59$ )和平均相关系数( $0.84$ )结果相差不大。而国际通量站点的能量闭合度系数是:斜率在 $0.55 \sim 0.99$ 之间,相关系数在 $0.64 \sim 0.96$ 之间<sup>[18]</sup>;中国通量网中8个站点<sup>[22]</sup>的截距、斜率和相关系数平均值分别为 $28 \text{ W m}^{-2}$  ( $10 \sim 79.9 \text{ W m}^{-2}$ )、 $0.67$  ( $0.49 \sim 0.81$ )和 $0.82$  ( $0.52 \sim 0.94$ )。毛竹林生长季的回归系数中,平均斜率和相关系数基本处于平均水平,需要进一步提高剔除数据的质量,来提高能量闭合度。而对毛竹林非生长季的能量闭合状况以及回归系数分值的研究,能更准确地与其他站点的数据进行比较,这也是下一步的研究方向和重点。

## 4 结论和讨论

亚热带毛竹林生长季净辐射为 $1738.2 \text{ MJ m}^{-2}$ ,显热通量、潜热通量和土壤热通量分别为 $354.3 \text{ MJ m}^{-2}$ 、 $1146.0 \text{ MJ m}^{-2}$ 和 $58.9 \text{ MJ m}^{-2}$ ;生长季以潜热通量为主,而土壤为明显的热汇,可能由于生长季毛竹出笋以及快速生长而使土壤呼吸明显加强所致。净辐射、潜热通量、土壤热通量最大值均出现在7月份,由于6月份梅雨季节,净辐射最小,为 $222.8 \text{ MJ m}^{-2}$ ;各能量分量日变化基本呈单峰型曲线,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。在能量分配上,潜热通量占净辐射的 $65.9\%$ ,显热通量占 $20.4\%$ ,土壤热通量仅占

$3.4\%$ ,毛竹林生长季主要以潜热通量形式加热大气,通过蒸发散耗能量。

利用能量平衡比率计算毛竹林生长季各月的EBR值,EBR在 $0.75 \sim 1.19$ 之间变化,4月份最小,6月份最大,而梅雨季节使得毛竹林出现能量过闭合的现象,闭合状况最好的出现在7月份,为 $0.93$ ;生长季月平均闭合度为 $0.91$ ,生长季总闭合度为 $0.89$ ,表征毛竹林能量仍有 $11\%$ 的不闭合现象。对毛竹林生长季的能量数据进行逐月线性回归分析,平均截距为 $4.43 \text{ W m}^{-2}$ ,平均斜率 $0.59$ ,平均相关系数 $0.81$ ,处于通量观测站点的平均水平。可见,采用能量平衡比率计算的结果要高于线性回归法计算的结果,这可能与两种不同计算方法有关,需要长期的观测数据来进一步探索毛竹林能量平衡度的计算。

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。而导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<sup>[5,17]</sup>;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<sup>[23-24]</sup>;还有在复杂环境下,湍流不充分和损失<sup>[25]</sup>以及冠层和空气热量储存项等,针对毛竹林能量闭合状况的分析,还需要长期的数据支持进行更进一步的研究。

## 参考文献

- [1] Zhang Q, Cao X Y. The influence of synoptic conditions on the averaged surface heat and radiation budget energy over Desert or Gobi [J]. Chin J Atmos Sci, 2003, 27(2): 245-254.  
张强,曹晓彦. 敦煌地区荒漠戈壁地表热量和辐射平衡特征的研究 [J]. 大气科学, 2003, 27(2): 245-254.
- [2] Beyrich F, Richter S H, Weisensee U, et al. Experimental deter-

- mination of turbulent fluxes over the heterogeneous LITFASS area: Selected results from the LITFASS-98 experiment [J]. *Theor Appl Climatol*, 2002, 73(1/2): 19–34.
- [3] Lee X H, Hu X Z. Forest-air fluxes of carbon, water and energy over non-flatter rain [J]. *Bound-Layer Meteor*, 2002, 103(2): 227–301.
- [4] Oncley S P, Foken T, Vogt R, et al. The energy balance experiment EBEX-2000, Part I: Overview and energy balance [J]. *Bound-Layer Meteor*, 2007, 123(1): 1–28.
- [5] Yang K, Wang J M. A temperature prediction-correction method for estimating surface soil heat flux from soil temperature and moisture data [J]. *Sci China Earth Sci*, 2008, 51(5): 721–729.
- [6] Gao Z, Bian L, Hu Y, et al. Determination of soil temperature in an arid region [J]. *J Arid Environ*, 2007, 71(2): 157–168.
- [7] Meroni M, Mollicone D, Beletti L, et al. Carbon and water exchanges of regenerating forests in central Siberia [J]. *For Ecol Manag*, 2002, 169(1/2): 115–122.
- [8] Heijmans M M P D, Arp W J, Chapin F S. Carbon dioxide and water vapour exchange from understory species in boreal forest [J]. *Agri For Meteor*, 2004, 123(3/4): 135–147.
- [9] Schmid H P, Grimmond C S B, Cropley F, et al. Measurements of CO<sub>2</sub> and energy fluxes over a mixed hardwood forest in the mid-western United States [J]. *Agri For Meteor*, 2000, 103(4): 357–374.
- [10] Wang X, Zhou G Y, Zhang D Q, et al. Soil heat fluxes of mixed coniferous and broad-leaf forest in the south subtropics in China [J]. *Ecol Environ*, 2005, 14(2): 260–265.  
王旭, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带针阔混交林土壤热通量研究 [J]. *生态环境*, 2005, 14(2): 260–265.
- [11] Yin G C, Wang X, Zhou G Y, et al. Study on the soil thermal conditions of coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan Reserve [J]. *J S China Agri Univ*, 2006, 27(3): 16–20.  
尹光彩, 王旭, 周国逸, 等. 鼎湖山针阔混交林土壤热状况研究 [J]. *华南农业大学学报*, 2006, 27(3): 16–20.
- [12] Wang M L, Cui X M, Han P, et al. Studies on the change of soil heat flux in the virgin forest of Great Xinganling Mountains [J]. *J Inner Mongolia Agri Univ*, 2010, 31(4): 139–142.  
王美莲, 崔学明, 韩鹏, 等. 大兴安岭原始林区土壤热通量变化特征的初探 [J]. *内蒙古农业大学学报*, 2010, 31(4): 139–142.
- [13] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for long term energy flux data sets [J]. *Agri For Meteor*, 2001, 107(1): 71–77.
- [14] Baldocchi 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 [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2001, 82(11): 2415–2434.
- [15] Zhang J H, Ding Z H, Han S J, et al. Turbulence regime near the forest floor of a mixed broad leaved/Korean pine forest in Changbai Mountains [J]. *J For Res*, 2002, 13(2): 119–122.
- [16] Chen Y F, Jiang H, Zhou G M, et al. Energy flux and energy balance closure of intensively managed Lei bamboo forest ecosystem [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, 24(4): 1063–1069.  
陈云飞, 江洪, 周国模, 等. 高效经营雷竹林生态系统能量通量过程及闭合度 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1063–1069.
- [17] Guo X F, Kang L, Cai X H, et al. An observation study of surface-air exchanges and energy budget at an agricultural site in south China [J]. *Chin J Atmos Sci*, 2006, 30(3): 454–463.  
郭晓峰, 康凌, 蔡旭晖, 等. 华南农田下垫面地气交换和能量收支的观测研究 [J]. *大气科学*, 2006, 30(3): 453–463.
- [18] Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites [J]. *Agri For Meteor*, 2002, 113(1/2/3/4): 223–243.
- [19] Aubinet M, Chermanne B, Vandenhaute M, et al. Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes [J]. *Agri For Meteor*, 2001, 108(4): 293–315.
- [20] Shi J G. Energy balance closure analysis of the growing season in typical steppe zone [J]. *Chin Agri Sci Bull*, 2010, 26(16): 332–336.  
史激光. 典型草原区生长季能量平衡闭合分析 [J]. *中国农学通报*, 2010, 26(16): 332–336.
- [21] Yue P, Zhang Q, Yang J H, et al. Surface heat flux and energy budget for semi-arid grassland on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31(22): 6866–6876.  
岳平, 张强, 杨金虎, 等. 黄土高原半干旱草地地表能量通量及闭合率 [J]. *生态学报*, 2011, 31(22): 6866–6876.
- [22] Li Z Q, Yu G R, Wen X F, et al. The evaluation of energy balance condition in China flux [J]. *Sci China Ser D: Earth Sci*, 2004, 34(Suppl.): 46–56.  
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)*, 2004, 34(增刊): 46–56.
- [23] Gao Z Q, Fan X G, Bian L G. An analytical solution to one-dimensional thermal conduction-convection in soil [J]. *Soil Sci*, 2003, 168(2): 99–107.
- [24] Yue P, Zhang Q, Niu S J, et al. Characters of surface energy balance over a semi-arid grassland and effects of soil heat flux on energy balance closure [J]. *Acta Meteor Sin*, 2012, 70(1): 136–143.  
岳平, 张强, 牛生杰, 等. 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 [J]. *气象学报*, 2012, 70(1): 136–143.
- [25] Lee X H. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation [J]. *Agri For Meteor*, 1998, 91(1/2): 39–49.