

DOI: 10.5846/stxb201803290650

牛晓栋, 刘晓静, 刘世荣, 孙鹏森. 亚热带-暖温带过渡区天然栎林的能量平衡特征. 生态学报, 2018, 38(18): - .

Niu X D, Liu X J, Liu S R, Sun P S. Energy balance characteristics of a natural oak forest (*Quercus aliena*) at a transitional area from a subtropical to warm temperate climate, China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): - .

## 亚热带-暖温带过渡区天然栎林的能量平衡特征

牛晓栋<sup>1</sup>, 刘晓静<sup>2</sup>, 刘世荣<sup>1,\*</sup>, 孙鹏森<sup>1</sup>

1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所/国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

2 河南宝天曼国家级自然保护区管理局, 南阳 474350

**摘要:** 利用开路涡度相关系统和常规气象观测仪器观测了我国北亚热带-暖温带气候过渡带(河南南阳)的一片锐齿栎天然林的能量通量及常规气象。以一个完整年(2016年10月-2017年9月)的观测数据为依据, 定量分析了此锐齿栎林的能量通量的日变化、季节变化以及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: 锐齿栎林观测期间一整年净辐射为 2626.17 MJ/m<sup>2</sup>, 感热通量为 867.1 MJ/m<sup>2</sup>, 潜热通量为 1417.25 MJ/m<sup>2</sup>, 土壤热通量为 -2.60 MJ/m<sup>2</sup>, 土壤为热源; 各能量分量日变化基本呈单峰型曲线, 季节变化特征明显。非生长季, 锐齿栎林的能量主要分配给感热通量, 占净辐射的 54.18%; 生长季, 能量主要分配给潜热通量, 占净辐射的 67.48%。观测期间研究区年降雨量较平均值稍大(1231.8 mm), 森林蒸散量为 579 mm, 仅为降雨量的 47%。波文比受森林物候变化影响较大, 在非生长季平均值约为 2.1, 生长季约为 0.2。土壤热通量在生长季 2017 年 4—9 月份为正值, 土壤表现为热汇, 其余月份皆为热源。土壤热通量的变化过程主要受净辐射调控, 森林物候也起了一定的作用。河南宝天曼锐齿栎森林通量观测站全年能量闭合度为 67%, 在国际同类观测站的范围之内(55%—99%)。不能完全闭合的原因可能与通量源区面积不匹配、计算能量平衡时忽略冠层热存储等有关。

**关键词:** 锐齿栎林; 涡度相关; 能量平衡; 气候过渡带

## Energy balance characteristics of a natural oak forest (*Quercus aliena*) at a transitional area from a subtropical to warm temperate climate, China

NIU Xiaodong<sup>1</sup>, LIU Xiaojing<sup>2</sup>, LIU Shirong<sup>1,\*</sup>, SUN Pengsen<sup>1</sup>

1 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry/State Forestry Administration Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, Beijing 100091, China

2 Baotianman National Nature Reserve Administrative Bureau, Nanyang 474350, China

**Abstract:** In the lower atmospheric planetary boundary layer, turbulent transport is an important connection for substance and energy exchange between the atmosphere and earth's surface. Currently it is a focus of earth system science. As a part of the ChinaFlux program, the components of energy balance fluxes were measured continuously over an oak (*Quercus aliena*) natural forest at a transitional climatic zone in Central China since 2009. Using an 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 measured in the oak forest in Henan Province from October 2016 to September 2017. The diurnal and monthly variation of energy balance, as well as the distribution pattern of each component were analyzed, and the energy closure and Bowen ratio were also calculated. As an important index to evaluate the reliability of eddy covariance measurements, energy balance analysis has been widely accepted by the FLUXNET community. Using the ordinary least squares (OLR) method, energy balance characteristics of the oak forest were systematically analyzed. The

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2015DFA31440)

收稿日期: 2018-03-29; 修订日期: 2018-07-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liusr9311@163.com

results showed that the annual net radiation of the forest ecosystem was  $2626.17 \text{ MJ/m}^2$ , and the latent heat flux, sensitive heat flux, and soil heat flux were  $1417.25 \text{ MJ/m}^2$ ,  $867.1 \text{ MJ/m}^2$ , and  $-2.60 \text{ MJ/m}^2$ , respectively, suggesting that soil was a heat source. The energy balance components had obvious seasonal variations, whereas diurnal variations of energy balance components showed a single peak curve. In the dormant season, the turbulent energy exchange was dominated by an upward sensible heat flux, accounting for 54.2% of the available energy; whereas in the growth season, turbulent energy exchange was dominated by an upward latent heat flux, accounting for 67% of the available energy. The annual rainfall in the study area was slightly higher than the average (1,231.8 mm); compared with 579 mm of evapotranspiration at the same time period, the results showed that only 47% of precipitation was returned to the atmosphere through evapotranspiration. The Bowen ratio was more affected by the forest phenology, with an average value of about 2.1 and 0.2 in the dormant and growing season, respectively. Soil heat flux during the growth season was positive, suggesting that soil was a heat sink, whereas it was a heat source during the dormant season. The process of soil heat exchange was mainly controlled by the net radiation, whereas the phenology of the forest also plays a role. Energy balance closure is regarded as a standard, evaluating the reliability of the eddy covariance measurement at FLUXNET sites. Energy balance closure in the Baotianman station was 67% on a half hourly basis, which fell in the range of the most FLUXNET sites (55%—99%), indicating that the flux data was basically reliable. Energy imbalance may result from the complex land surface, sampling mismatch between the flux footprint and sensors measuring other components of energy balance, negligence on the canopy heat storage, etc.

**Key Words:** oak natural forest; eddy covariance; energy balance; transitional climatic zone

在全球气候变化背景下,陆地生态系统的结构和功能正在发生一系列的变化<sup>[1]</sup>。陆地生态系统的能量平衡是生态系统与大气间相互作用研究的重要内容之一<sup>[2]</sup>,是影响区域气候和水量平衡的重要因素,也是生态系统功能评价的重要方面<sup>[3]</sup>。森林作为地球上最大的陆地生态系统,它对能量的再分配对区域乃至全球的气候有着重要影响<sup>[4]</sup>,同时,再分配的结果又影响着植被光合生产力的分布<sup>[5]</sup>。了解能量再分配后的平衡特征不仅对认识森林的生态效应有重要意义,也为其光合生产力研究提供了环境参数。基于微气象学的涡度相关技术为森林生态系统能量平衡的研究提供了可能<sup>[6]</sup>。截至 2017 年底,全球不同地区已建立了 900 多个通量站<sup>[7]</sup>(<http://fluxnet.fluxdata.org/sites/site-summary/>)。近年来,我国利用通量塔在热带<sup>[8]</sup>、亚热带<sup>[9]</sup>、温带森林<sup>[10]</sup>也开展了大量的能量通量特征和闭合度方面的研究。如刘允芬<sup>[11]</sup>等率先报道了采用该技术对亚热带人工林能量通量进行研究的结果;Wu<sup>[10]</sup>等通过对长白山阔叶红松林能量平衡研究指出,感热通量和潜热通量占净辐射的比例超过 90%,土壤热通量占净辐射的比例仅为 5%—10%。同小娟<sup>[1]</sup>等通过对黄河小浪底人工混交林生长季能量平衡特征研究指出,生长季,人工混交林能量分配主要以潜热通量和感热通量为主,且潜热通量为感热通量的 2 倍;陈云飞<sup>[12]</sup>和孙成<sup>[13]</sup>也分别对临安雷竹林和安吉毛竹林的能量平衡特征做了报道。但需要指出的是,位于不同气候带的不同森林类型,其能量平衡特征往往具有显著差异。例如,在热带雨林区,净辐射主要用于蒸散耗热<sup>[14]</sup>,在寒带森林区,则主要用于感热传输<sup>[15]</sup>。然而,以往的利用涡度相关技术对森林能量平衡的研究大多集中于典型气候带下的森林生态系统,在气候过渡带的典型森林利用通量塔进行能量平衡的研究还未见报道。锐齿栎林是我国地理南北分界山脉秦岭林区落叶阔叶林的代表类型<sup>[16]</sup>,分布广泛,主要分布于海拔 800—2300 m 的中山地带,它对平衡我国北亚热带-暖温带过渡区  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  与能量收支有着重要意义。

本文以我国亚热带-暖温带过渡带的锐齿栎林为研究对象,利用涡度相关法的整年观测数据,结合同步微气象资料,分析其能量平衡在不同季节的动态变化特征,探讨能量闭合状况;旨在为该地区锐齿栎林的保护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为准确评估气候过渡带锐齿栎林生态系统与大气间的物质和能量交换提供依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究地区概况

本研究在国家林业局河南宝天曼森林生态定位研究站进行。该站位于河南省内乡县宝天曼自然保护区(111°47′—112°04′E, 33°20′—33°36′N), 相对海拔高度 600—1800 m, 最高峰曼顶海拔 1830 m。年平均气温 15.1℃, 1 月平均气温 1.5℃, 7 月平均气温 27.8℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  的年积温为 4200—4900℃。年平均降水量为 791.9 mm, 大多集中分布于 6—8 月份的雨季, 年蒸发量 991.6 mm。土壤垂直分布明显, 海拔 1300 m 以上为山地棕壤, 海拔 800—1300 m 为山地黄棕壤, 海拔 600—800 m 为山地褐土, 土壤厚度 20—60 cm, 土壤 pH 值 6.5 左右。该地区属于我国北亚热带—暖温带的过渡区域, 植被以暖温带落叶阔叶林为主, 兼具有亚热带常绿落叶阔叶林特点, 栎类是宝天曼的主要建群树种, 约占整个乔木树种的 70%<sup>[17]</sup>。本站点也是中国通量观测研究联盟 Chinaflux 成员之一。

### 1.2 通量塔下垫面植被简介

通量塔位于海拔 1410.7 m, 地理坐标 33°29′59″N, 111°56′07″E。观测林分下垫面比较平缓, 坡度在 5°左右。2012 年在通量塔周围建立 1 个 1 公顷样地并做了植被调查。优势种为锐齿栎 (*Quercus aliena* var. *acuteserrata*), 占乔木类的 67%。其它伴生乔木有三桠乌药 (*Lauraceae. obtusiloba* Bl), 垂枝条泡花树 (*Meliosma flexuosa* Pamp.), 大椴 (*Tilia nobilis* Rehd. et Wils.), 华榛 (*Corylus chinensis* Franch) 等。活立木密度为 1314 株/hm<sup>2</sup>。平均乔木树高 18 m, 胸径 (19.8±2.8) cm。灌木包括刚毛忍冬 (*Lonicera hispida* Pall. ex Roem. et Schult.), 柞叶荚蒾 (*Viburnum betulifolium* Batal.), 接骨木 (*Sambucus williamsii* Hance), 连翘 (*Forsythia suspense*), 毛花绣线菊 (*Spiraea dasyantha* Bge) 和秦岭木姜子 (*Litsea tsinlingensis* Yang et P. H. Huang) 等。平均高度 3.8 m。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 实验设计

微气象观测塔高 40 m, 开路式涡度相关系统安装在塔 30 m (1.5 倍林冠高) 高处的上风方向位置。风速与空气温度脉动采用 GILL 三维超声风速仪 (Gill, UK) 测量, 水汽浓度脉动采用 Li-7500 开路式 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 气体分析仪 (Li Cor Inc., USA) 测量。湍流脉动信号采样频率为 10 Hz, 脉动数据通过 CR3000 (Campbell Inc., USA) 采集。

在观测塔 22 m 高处, 采用 CNR-1 净辐射表 (Kipp&Zonen, Netherlands) 测量净辐射, 同时采用 HMP-45D 空气温湿度仪 (Vaisala, Finland) 测量 5 层空气温、湿度。2 套 AV-IRT3 红外传感器分别安装在 22 m 和 29 m 处。4 套土壤温度传感器 (107, Campbell Inc., USA) 分别埋设在距土表以下 5、10、20、40 cm 深度。一套土壤湿度仪 (CS616, Campbell Inc., USA) 埋于土下 5 cm 处。一套 EasyAG 型土壤湿度梯度仪埋设在距土表以下 10、20、30、50 cm 深度。在林内 10 cm 和 30 cm 土壤深处, 分别安置 1 个 AV-FHT3 土壤热通量仪测量土壤热通量。本站点土壤热通量采用 10 cm 深度观测数据, 同时, 30 cm 深度的数据用于插补和校正。所有常规气象因子测量频率为 0.5 Hz, 通过 CR3000 数据采集器 (Campbell Inc., USA) 每 30 min 自动记录其平均值。文中的空气温度使用 22 m 高度的数据, 土壤温度采用 5 cm 深度土壤的观测数据。

#### 1.3.2 数据处理

利用 LiCor 公司开发的 Eddypro 软件对采样频率为 10 Hz 的原始湍流数据进行预处理。数据处理过程包括二次坐标旋转、除趋势修正、统计检验、WPL 修正、超声虚温修正、谱修正等<sup>[18]</sup>。同时, 剔除了摩擦速度  $< 0.1 \text{ m/s}$ <sup>[19]</sup> 的通量数据, 降雨时期的数据, 本文根据水汽和能量通量特征曲线<sup>[20]</sup> 分析, 确定感热与潜热通量域值, 剔除域值外数据。利用下列方法插补被去除的数据和缺失的数据: 小于 2 h 的缺失数据用线性内插法插补; 大于 2 h 的缺失数据采用平均日变化法进行插补<sup>[21]</sup>。

#### 1.3.3 波文比的计算

波文比 ( $\beta$ ) 的概念是 1926 年 Bowen 提出的。它是地表感热通量 ( $H$ ) 和潜热通量 ( $LE$ ) 之比:

$$\beta = \frac{H}{LE}$$

式中,  $H$  为感热通量 ( $W/m^2$ ),  $LE$  为潜热通量 ( $W/m^2$ )。

### 1.3.4 能量闭合状况的评价

根据热力学第一定律, 地表能量平衡方程可表达为<sup>[22]</sup>:

$$LE + H = R_n - G - S - Q$$

式中  $R_n$  为净辐射 ( $W/m^2$ ),  $H$  为感热通量 ( $W/m^2$ ),  $LE$  为潜热通量 ( $W/m^2$ ),  $G$  为土壤热通量 ( $W/m^2$ ),  $S$  为冠层热储量 ( $W/m^2$ ),  $Q$  为附加能量源汇的总和 ( $W/m^2$ )。当平衡方程以日为时间尺度时,  $S$  和  $Q$  通常忽略不计, 能量平衡方程可简化为<sup>[23]</sup>:

$$LE + H = R_n - G$$

当湍流能 ( $LE+H$ ) 与有效能 ( $R_n-G$ ) 相等时, 称为能量闭合, 反之称为能量不闭合。

评价能量闭合状况的常见方法有最小二乘法 (OLS) 线性回归、能量平衡比率 (EBR) 和能量平衡相对残差 ( $\delta$ ) 频率<sup>[24]</sup>等。本文采用 OLS 线性回归来分析宝天曼锐齿栎林能量闭合状况。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究期间气温、地温及降雨量的变化

由图 1 可以看出, 2016 年 10 月到 2017 年 9 月, 研究区的降水量为 1231.8 mm, 为近几年最高, 是一个相对湿润的年份<sup>[25]</sup>。由图 2 可以看出年降雨量呈现明显的季节变化, 最大值出现在 2017 年 9 月 (235 mm), 最小值为 1 月 (9 mm)。2017 年 6-9 月份的降雨量为 796.4 mm, 占全年降水量的 64.65%。年平均气温 (22 m 高) 为 10.1℃。最高气温 (21.54℃) 与土壤 5 cm 温度 (18.93℃) 均出现在 7 月份。最低气温 (-0.78℃) 和土壤 5 cm 温度 (1.33℃) 均出现在 1 月份。值得注意的是, 从 2016 年 10 月份开始至 2017 年 3 月份, 气温都是低于土壤 5 cm 温度的, 3 月份二者已非常接近; 而从 2017 年 4 月至 9 月, 气温都高于土壤 5 cm 温度。

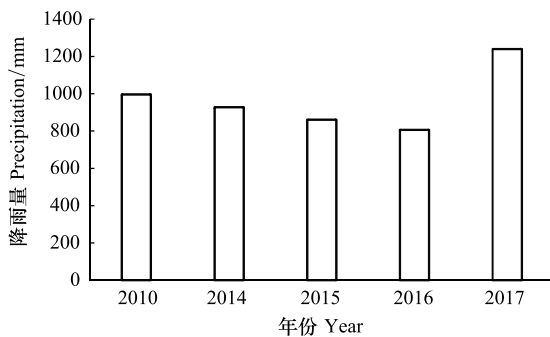


图 1 研究区近几年年均降雨量

Fig. 1 Annual fluctuation of precipitation in experimental site

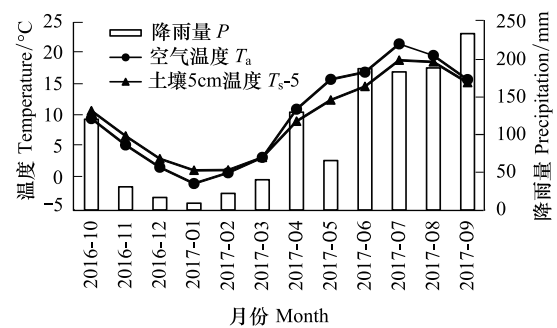


图 2 锐齿栎林气温 ( $T_a$ )、土壤 5cm 温度 ( $T_{s-5}$ ) 和降雨量 ( $P$ ) 的月变化

Fig. 2 Monthly variations of air temperature ( $T_a$ ), soil temperature at 5cm and precipitation ( $P$ ) in the oak natural forest

### 2.2 能量平衡各分量的日变化

在太阳辐射的驱动下, 生态系统完成能量流动、物质合成转移和碳水循环等生理活动。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。将典型季节性代表的 1 月、4 月、7 月、10 月半小时间隔时刻下的能量通量数据作月平均处理 (图 3), 以表征该月的能量通量日变化进程。

从 4 个月全天的变化趋势来看, 各能量分量均以净辐射为基础, 呈单峰型曲线变化, 峰现时间春夏秋冬四季并无明显差异, 均在 12:00—13:00 左右。秋季, 在 7:30—8:00 净辐射通量转变为正值, 13:00 达到最大值



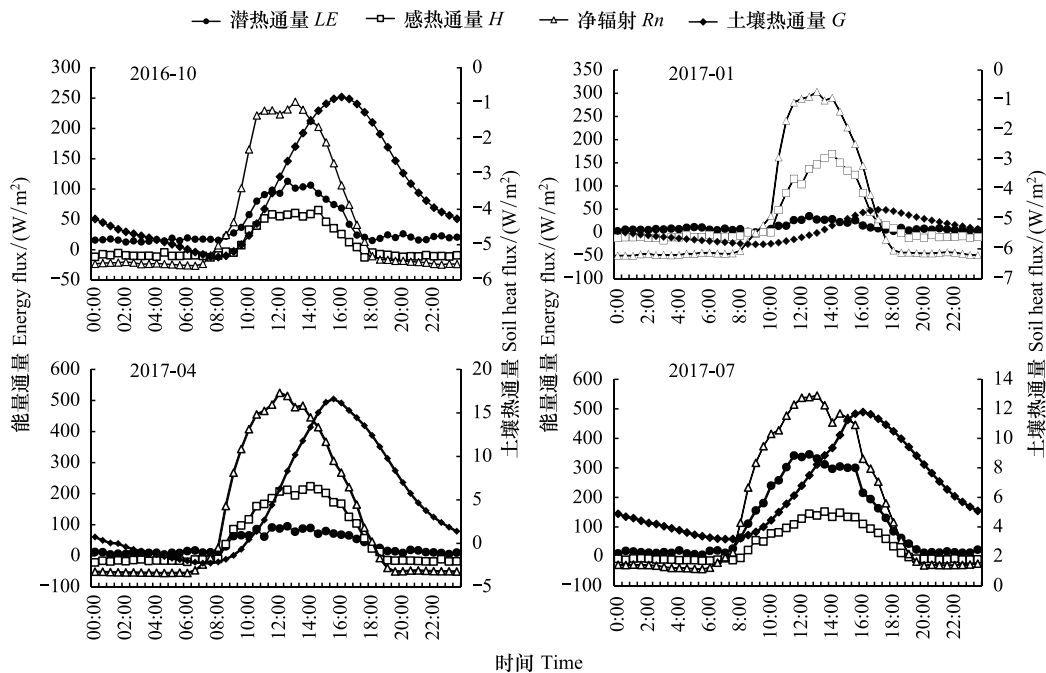


图3 不同季节锐齿栎林能量平衡分量的日变化

Fig.3 Diurnal variations of energy flux in the oak natural forest in different seasons

(约  $244 \text{ W/m}^2$ ), 至 18:00 转为负值, 净辐射为正的时长为 10 h, 这一期间的平均净辐射强度为  $146 \text{ W/m}^2$ 。冬季, 在 9:00—9:30 净辐射通量变为正值, 即转变为森林能量的收入项, 13:00 达到最大值(约  $303 \text{ W/m}^2$ ), 至 17:30 转为负值, 净辐射为正的时长为 8 h, 这一期间的平均净辐射强度约为  $195 \text{ W/m}^2$ 。春季, 在 7:30—8:00 净辐射通量转变为正值, 12:30 达到最大值(约  $524 \text{ W/m}^2$ ), 至 18:30 转为负值, 净辐射为正的时长为 10.5 h, 这一期间的平均净辐射强度为  $330 \text{ W/m}^2$ 。夏季, 在 7:00—7:30 净辐射通量转变为正值, 13:00 达到最大值(约  $545 \text{ W/m}^2$ ), 至 19:30 转为负值, 净辐射为正的时长为 12 h, 这一期间的平均净辐射强度为  $338 \text{ W/m}^2$ 。需要注意的是, 秋季(2016 年 10 月)的净辐射日峰值( $244 \text{ W/m}^2$ )比冬季(2017 年 1 月)的低, 主要原因是因为 2016 年 10 月份阴雨天气较多, 有降雨的天数达到了 21 天, 降雨量达到了 120.8 mm, 而 2017 年 1 月降雨量只有 9 mm, 这造成了 2016 年 10 月份的净辐射值低于 2017 年 1 月份的。

感热与潜热通量和净辐射通量有相似的日变化趋势, 但过程线均不如后者平滑, 这是间歇性湍流传输的一个特点<sup>[26]</sup>。从潜热通量来看, 由于冬季研究区空气温度较低(2017 年 1 月的平均温  $-0.78^\circ\text{C}$  是全年最低), 地面大部分处于冻结状态, 水汽传输非常微弱, 所以 2017 年 1 月的  $LE$  峰值只有  $35 \text{ W/m}^2$ , 约为夏季(2017 年 7 月)的  $LE$  的峰值( $346 \text{ W/m}^2$ )十分之一。从感热通量来看, 春季(2017 年 4 月份)的  $H$  的峰值( $224 \text{ W/m}^2$ )是最高的, 夏季的  $H$  的峰值为  $152 \text{ W/m}^2$ , 秋季的  $H$  的峰值为  $65 \text{ W/m}^2$ , 冬季的  $H$  的峰值为  $169 \text{ W/m}^2$ 。

土壤热通量为负值表示由土壤辐射到植被-大气, 土壤为热源; 土壤热通量为正值时表示热量进入土壤, 由植被-大气辐射到土壤, 土壤为热汇<sup>[27]</sup>。在秋季(2016 年 10 月)和冬季(2017 年 1 月), 土壤热通量在全天均表现为向上的热传输, 平均通量密度分别为  $3.6$  和  $5.4 \text{ W/m}^2$ 。春季, 土壤热通量从 10:00 开始至翌日 1:00 点这一阶段都为正值, 表现为热汇, 从 1:00 点至 10:00 点表现为热源。夏季, 土壤热通量全天均表现为向下的热传输, 平均通量密度为  $6.4 \text{ W/m}^2$ 。

### 2.3 能量平衡分量的季节变化

以年为时间尺度的净辐射  $R_n$  近似呈单峰变化, 但由于受中小尺度天气变化影响, 其过程线存在着锯齿状波动。从图 4 我们可以看到除了 7 月的每日平均净辐射明显较高外, 6, 8, 9 月份的大部分的日平均净辐射均小于 5 月份。这是由于观测期间的 6—9 月份降雨量较丰富, 4 个月降雨量依次为 188.2, 184, 189.2 mm 和

235 mm,降水天数分别为 22 d,13 d,15 d 和 18 d。所以导致除了 7 月份的平均净辐射通量 ( $153.9 \text{ W/m}^2$ ) 高于 5 月份 ( $130.3 \text{ W/m}^2$ ) 外,6 ( $114.7 \text{ W/m}^2$ )、8 ( $103.2 \text{ W/m}^2$ )、9 ( $77.9 \text{ W/m}^2$ ) 月份的平均净辐射通量皆明显小于 5 月份的平均净辐射强度。观测期间 2017 年生长季(5—9 月)的平均净辐射强度排名为 7 月>5 月>6 月>8 月>9 月。

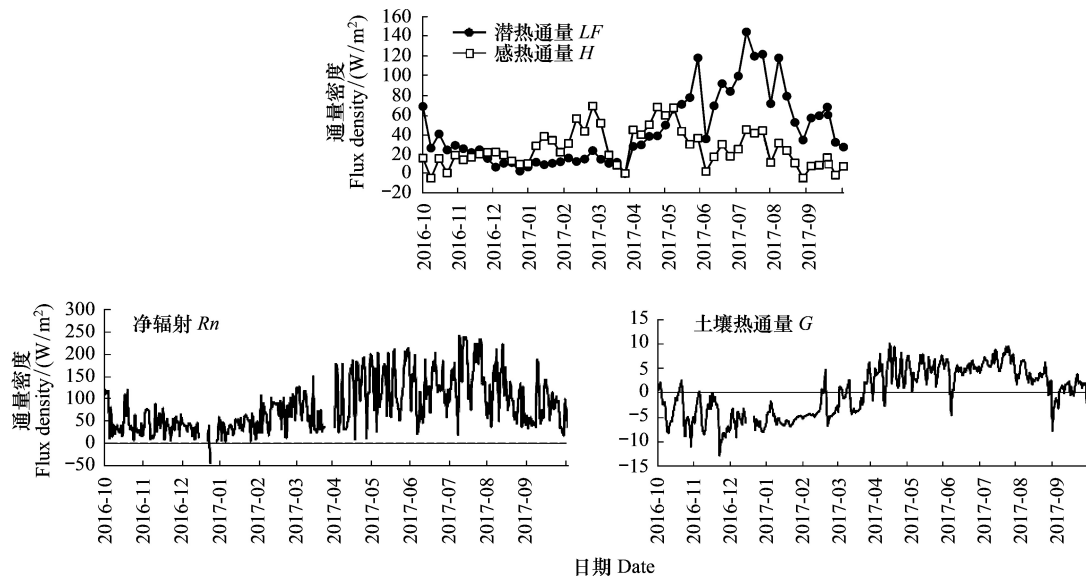


图 4 能量平衡通量季节变化

Fig.4 Seasonal variations of energy balance components

土壤热通量整体上呈现了一定的季节变化趋势,但是受个别天气的影响,也出现了一些峰值。土壤热通量年累计值为 $-2.6 \text{ MJ/m}^2$ ,整体上表现为热源。从 2016 年 10 月 5 日至 2017 年 3 月 23 日, $G$  的日总量多为负值,表明土壤是个热源,一直在向植被-大气释放热量。从 3 月 24 日开始,随着净辐射的不断增长,植被-大气开始向土壤输送热量,土壤热通量在短期内迅速积累并在 4 月 14 日达到一年中最高值  $9.9 \text{ W/m}^2$ ,之后  $G$  随着  $R_n$  的增加没有再增加,但与吴家兵<sup>[10]</sup>在长白山观测到的  $G$  之后逐渐下降的现象不同,从图 4 可以看到  $G$  之后一直维持在一个较高的水平,直到 8 月初才逐步下降,这可以从净辐射、空气温度和土壤 5 cm 温度以及森林物候来解释:从图 4 可以看到,土壤热通量的季节变化总的来说是和  $R_n$  的变化保持一致的;2016 年 10 月份随着净辐射强度的减少,植被-大气间的热量明显减小,空气温度降低,而由于枯枝落叶的覆盖作用,土壤温度没有像空气温度那样因为净辐射的减小迅速降低,这一期间土壤 5 cm 温度要高于空气温度,说明土壤中存储的热量较多,土壤会逐渐地向储存热量较低的空气释放,在这一期间土壤是个热源,而春季开始随着净辐射的迅速增加,植被-大气间的热量明显增加,而土壤热储量相对空气来说则变低,所以大气的热量开始向土壤传输,2017 年 4—9 月期间,土壤一直保持吸热状态,呈现一个热汇。有趣的是,土壤热通量在 4 月 14 日达到最高值而不是净辐射最高的 5 月或 7 月,这可能是和森林物候造成的林内特殊的小气候有关<sup>[28]</sup>,通过物候观测我们发现 4 月开始一些林下植被开始萌发,而大部分的乔木也开始发芽展叶,这时候潜热通量开始转变为能量支出最重要的方式,并且迅速增大且在整个生长季期间保持高水平,而随着植物的叶面积从 5 月 1 日至 6 月 1 日迅速增大<sup>[29]</sup>,生长季期间的较密的冠层会影响太阳辐射传到林内,对大气到土壤的热通量的传输产生一定影响。另一方面由于锐齿栎林的冠层结构没有长白山阔叶红松林的复杂,导致大部分的太阳辐射能可以传输至林内,使得土壤热通量没有像长白山观测到的那样从植物萌芽后开始逐渐降低,而是直到 8 月份都保持在相对较高的水平。观测期间山上阴雨天气较多造成的较多的散射辐射<sup>[30]</sup>也可能是原因之一。

感热与潜热日平均通量密度变化较剧烈,为了便于观察,本研究做了一个 7 日平均。从图 4 可以看到,从 2016 年 10 月 1 日到 2016 年 11 月 19 日,潜热通量是高于感热通量的,但是二者的变化趋势不一致,潜热在逐

渐降低,感热在逐渐增加,在 11 月 19 日交汇。这之后到 2017 年 5 月 6 日,感热通量都是大于潜热通量的,从 2017 年 5 月 6 日至 9 月 30 日,潜热都大于感热。这一观测结果与吴家兵<sup>[9]</sup>在长白山观测到的较一致,有一点不同的是感热通量最大值出现在 2017 年 2 月,而不是 2017 年 4 月或 5 月。吴家兵在长白山站的观测也发现在冬季的个别天气里,感热支出甚至超过了夏季。另外我们根据感热与潜热的变化趋势预测宝天曼锐齿栎完全落叶的时间是晚于长白山阔叶红松林的,这一结果与我们的物候观测结果<sup>[31]</sup>是一致的。观测期间蒸散量为 579 mm,由于观测期间降雨量较高,这一期间的蒸散量仅为降雨量的 47%,这一比例远小于我国北方温带森林(80%—90%)<sup>[32]</sup>,一方面可能是因为观测期间是一个较湿润的年份;另一方面也可能是由于处在北亚热带-暖温带气候过渡带,本站点的锐齿栎林的蒸散耗水表现出南方热带森林(40%—50%)的一些特征。

从波文比  $\beta$  季节变化过程(图 5)也可以看出潜热与感热的季节变化动态。观测期间,波文比日平均值的变化过程比较准确地刻画出了锐齿栎林的物候过程。从图 5 我们可以看到从 2016 年 11 月中旬开始,波文比明显增大,直到 2017 年的 5 月中旬开始才逐渐降低到 1 以下,这与我们物候观测是一致的,我们观测到 2016 年 11 月中旬锐齿栎的叶子掉落了大部分,而 2017 年 5 月中旬正是叶面积迅速增大的时候。 $\beta$  值在非生长季变幅较大(-2—8.1),生长季, $\beta$  值变化范围较小,大部分在 0.1—1.4 之间(除却个别极端阴雨天气为负值)。与长白山站点观测结果有所不同的是本地区生长季的负值较多,查询数据得知是感热通量的负值造成的,主要是因为观测期间降雨量异常多,造成下垫面强的辐射冷却所致。比如从图 5 上可以发现 8 月底—9 月初近半个月的  $\beta$  值大部分为负值,这是由于该段时间连续的阴雨天气导致的。生长季的平均波文比为 0.2,小于长白山观测到的 0.5,与灌区小麦 0.19<sup>[33]</sup>接近。

#### 2.4 能量平衡分量的各月累积值

我们对观测期间的各月的净辐射、土壤热通量、潜热通量和感热通量做了计算(图 6)。观测期间年净辐射量为 2626.17 MJ/m<sup>2</sup>,7 月份净辐射累积量最高,为 412.17 MJ/m<sup>2</sup>,其次为 5 月份(349.01 MJ/m<sup>2</sup>),6 月(297.39 MJ/m<sup>2</sup>),8 月(201.93 MJ/m<sup>2</sup>);年累积量最低的为 2016 年 12 月份(90.73 MJ/m<sup>2</sup>)。土壤热通量年累积值仅为 -2.60 MJ/m<sup>2</sup>,仅占净辐射总量的 0.1%。总体表现为微弱的热源。其中土壤热通量在生长季 2017 年 4—9 月份均为正值,土壤表现为热汇,其余月份皆为热源。

全年来看,感热通量全年累计 867.1 MJ/m<sup>2</sup>,潜热通量全年累计 1417.25 MJ/m<sup>2</sup>,说明锐齿栎林净辐射主要分配给潜热通量,占 53.97%;感热通量占 33%。其中,非生长季,感热通量占净辐射的 54.18%,潜热通量占净辐射的 30.43%;生长季,感热通量占净辐射的 20.86%,潜热通量约占净辐射的 67%。锐齿栎林全年的潜热通量占净辐射量的 54%。这一比例稍大于长白山站点观测的结果(52%),小于国外一些温带森林的报道,原因可能是涡度相关系统对通量的低估造成的。吴家兵<sup>[10]</sup>认为观测期间的降水偏少也是原因之一,本研究认为这个原因需要进一步证实,因为本研究观测期间的降水量达到 1231.8 mm,为近几年最高,但是森林的蒸散量依然较低。

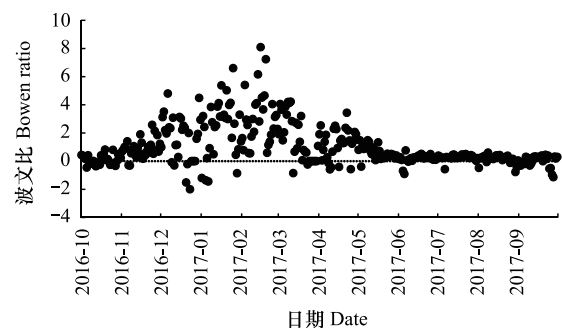


图 5 波文比  $\beta$  的季节变化

Fig.5 Seasonal variations of  $\beta$

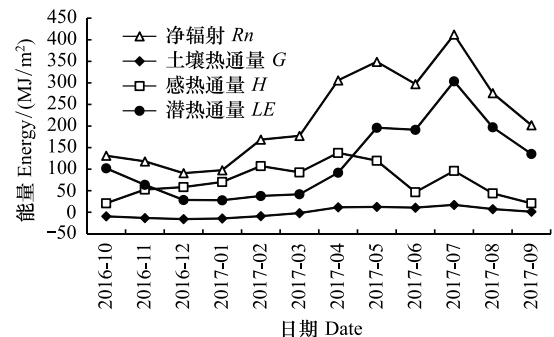


图 6 锐齿栎林能量分量的月累积

Fig. 6 Monthly energy components accumulated in the oak natural forest

## 2.5 能量闭合度

能量闭合度是检验涡度相关观测值可靠性的重要指标,即根据能量平衡原理分析湍流能和有效能之间的闭合程度。依据 2016 年 10 月到 2017 年 10 月的一整年的数据,对涡度相关系统测得的能量通量 ( $LE+H$ ) 与辐射系统测得的可利用能量 ( $Rn-G$ ) 进行闭合度分析,如图 7,30 min 平均值的回归方程为: $LE+H=0.6727(Rn-G)+17.07$ ,  $R^2=0.8264$ 。

本文中 30 min 平均值闭合度为 67%,在国际同类观测的范围之内 (55%—99%)<sup>[34]</sup>,表明本站点通量观测的数据是可靠的。但与辐射系统和土壤热通量测量仪器实测的可用能量相比,涡度相关系统实测的  $LE$  和  $H$  存在低估的可能。这主要是夜间湍流弱、开路涡度相关系统对潜热通量的测量结果比实际偏低造成的<sup>[35]</sup>。另一方面是因为没有考虑森林储热项,以及涡度相关系统与辐射系统观测源区不同造成的<sup>[36]</sup>。为了进一步分析,表 1 给出了 12 个月份的逐月线性回归系数。

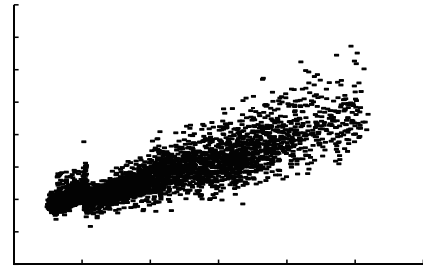


图 7 涡动相关系统 30 min 观测值的能量闭合分析  
Fig. 7 Analysis on the energy balance closure using 30 min average fluxes measured by eddy covariance system

表 1 观测期间逐月线性回归系数

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

月份 Month	$(H+LE)/(R_n-G)$ : (感热通量+潜热通量)/(净辐射-土壤热通量), (Sensible heat flux+Latent heat flux)/(Net radiation-Soil heat flux)			数据条数 n Number of data
	截距 Intercept	斜率 Slope	相关系数 Coefficient	
10	9.915	0.694	0.799	1488
11	22.043	0.446	0.754	1440
12	12.931	0.474	0.788	942
1	14.884	0.521	0.803	1488
2	19.224	0.568	0.832	1344
3	8.364	0.6194	0.835	1089
4	22.728	0.582	0.853	1440
5	27.963	0.722	0.855	1431
6	16.822	0.678	0.823	1440
7	23.843	0.85	0.902	1448
8	13.812	0.758	0.841	1448
9	11.512	0.63	0.805	1440

可以看出,本站点一年中各月的截距变化范围为 8.364—27.963  $W/m^2$ ,斜率变化范围为 0.446—0.85,相关系数范围为 0.754—0.902。中国通量网中有报道的 8 个站点<sup>[24]</sup>的回归斜率、相关系数和截距的平均值分别为 0.67(0.49—0.81)、0.82(0.52—0.94)和 28(10—79.9)。国外通量研究站点(包括森林、草地等)的  $LE+H$  与  $Rn-G$  的回归线斜率一般在 0.55—0.99 之间,截距范围是 -32.9—36.9  $W/m^2$ ,相关系数范围是 0.64—0.96<sup>[37-38]</sup>。可见本站点观测的 12 个月中除秋冬季的 11,12,1 月份低于 0.55,其他月份的斜率均在范围之内;而 12 个月中的截距和相关系数均在国内外其他站点报道的范围之内。11,12,1 月的斜率较低的原因可能与这 3 个月份的风向<sup>[39]</sup>有关,造成了辐射系统、土壤热通量测量仪与涡度相关系统感应源区的空间取样误差加大。对能量不能完全闭合的这一问题接下来我们会进一步地分析。



### 3 讨论

#### 3.1 国内森林生态系统的能量闭合度分析

基于涡度相关法获得的能量通量通常不能平衡森林实际获得的能量。Wilson<sup>[40]</sup> 等对全球通量网 50 个站/a 的观测数据分析表明,各观测站普遍存在着 10%—30% 的能量不闭合现象,由涡度相关法观测获得的能量通量要较辐射仪偏低。一些学者<sup>[41-42]</sup> 因此开始怀疑能量及其有相似传输机制的 CO<sub>2</sub> 通量测定结果,不闭合现象及其产生机制也成为湍流通量研究中的一个热点,备受关注。

就本站点而言,全年的湍流能量( $LE+H$ )与有效能量( $R_n-G$ )在半小时尺度上的线性回归的斜率为 0.67,其中生长季(5—10 月份)的斜率为 0.73,非生长季(11—第二年 4 月份)的斜率为 0.53;而在鼎湖山<sup>[8]</sup> 和长白山<sup>[10]</sup>,冬季的能量闭合度要好于其他季节;说明不同气候条件对于各站点能量的闭合有一定影响。在亚热带地区的毛竹林<sup>[13]</sup>,夏季的能量闭合度要稍高于冬季而在同属亚热带地区的雷竹林<sup>[12]</sup>,全年各月的闭合度无明显差异,表明植被也影响了生态系统的能量闭合。另一方面,也有人<sup>[7]</sup> 指出能量不闭合并不能直接表明 CO<sub>2</sub> 通量的数据差,它只是评价湍流数据质量的一个方面。总的来说,由于不同通量站观测环境与实现手段不同,能量的不闭合程度及其产生机制亦可能不同,对宝天曼通量观测站的能量闭合问题仍有待于进一步研究。

#### 3.2 国内森林生态系统的能量不闭合产生的原因

(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)与净辐射,土壤热通量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。而涡度相关系统所测量的面积大致呈椭圆形,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,而且不同大气稳定度条件下椭圆长轴有很大差异。若是涡度相关系统和能量仪表所测的下垫面存在着很大的异质性(开阔冠层和多组分的冠层),这种测量面积的不匹配会给能量平衡闭合带来更大的误差。土壤热通量( $G$ )的测量面积与净辐射( $R_n$ )表和湍流通量的测量面积存在更大差异<sup>[43]</sup>,高植被(森林)站点冠层热储量的计算也存在着此类问题。上述讲到的森林生态系统的不同月份的能量闭合度的较大差异可能与采样误差有关。

(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,对仪器的经常性的标定可能会减少能量平衡闭合的不确定性<sup>[44]</sup>。

(3) 其他能量吸收项的忽略:在计算能量平衡时,冠层热储量( $S$ )经常被忽略,这会给有效能量的估算带入一些误差,尤其对于植被较高的森林生态系统而言;吴家兵在长白山站的研究中也指出若考虑冠层储热项  $S$  ( $S \approx 7\%$  可用能量),闭合度会有一定提高。本站点的计算中未考虑这一项,因此也会带来一些误差。

(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<sup>[45]</sup>。

(5) 平流的影响: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<sup>[46]</sup>,然而垂直风速不为零的现象已经被许多观测事实所证实。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,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。温学发等<sup>[39]</sup> 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。

### 4 结论

(1) 位于北亚热带-暖温带过渡带的河南宝天曼锐齿栎林全年净辐射量为 2626.17 MJ/m<sup>2</sup>,2017 年 7 月份

净辐射累计量最大为 412.17 MJ/m<sup>2</sup>, 2016 年 12 月份累计净辐射量最小为 90.73 MJ/m<sup>2</sup>。以年为时间尺度进行分析, 我们发现锐齿栎林的能量收入季节动态除了主要受太阳高度角变化的驱动之外, 每日的天气状况最终也会影响月总量的积累。

(2) 土壤热通量年累计量为 -2.60 MJ/m<sup>2</sup>, 仅占净辐射总量的 0.1%, 总体表现为微弱的热源。其中在生长季 2017 年 4—9 月份为正值, 表现为热汇, 其余月份皆为热源。变化过程主要受净辐射的调控, 森林物候对其也有一定影响。

(3) 全年来看, 感热通量全年累计 867.1 MJ/m<sup>2</sup>, 潜热通量全年累计 1417.25 MJ/m<sup>2</sup>, 说明锐齿栎林净辐射主要分配给潜热通量, 占 53.97%, 感热通量占 33%。非生长季, 锐齿栎林的能量主要分配给感热通量, 占净辐射的 54.18%; 感热通量日平均值在森林刚刚萌芽的 4 月 29 日达到最大, 月累计值 4 月最大。生长季, 能量主要分配给潜热通量, 占净辐射的 67.48%。潜热通量日平均值在 7 月份达到最大, 月累计量也在 7 月份达到最大值。观测期间森林蒸散量为 579 mm, 仅为同期降雨量的 47%。波文比日平均值的变化过程比较准确地刻画出了锐齿栎林的物候过程。 $\beta$  值在非生长季变幅较大 (-2—8.1), 生长季的  $\beta$  值变化范围较小, 大部分在 0.1—1.4 之间。

(4) 位于气候过渡带的河南宝天曼锐齿栎森林通量观测站能量平衡收支闭合度为 67%, 在国际同类观测站的范围之内, 说明本站点的通量观测的数据是可靠的。在计算能量闭合度时, 未能考虑森林储热项, 辐射系统、涡度相关系统空间取样范围不一致, 冬季风向变化等都可能是造成本站点能量不能完全闭合的原因, 接下来我们会继续观测进一步地研究分析。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 原文文, 同小娟, 张劲松, 孟平, 李俊, 郑宁. 黄河小浪底人工混交林生长季能量平衡特征. 生态学报, 2015, 35(13): 4492-4499.
- [ 2 ] Brunsell N A, Gillies R R. Scale issues in land-atmosphere interactions: implications for remote sensing of the surface energy balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 117(3/4): 203-221.
- [ 3 ] Pielke R A, Avissar R, Raupach M, Dolman A J, Zeng X B, Denning A S. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. *Global Change Biology*, 1998, 4(5): 461-475.
- [ 4 ] 李巧萍, 丁一汇. 植被覆盖变化对区域气候影响的研究进展. 大气科学学报, 2004, 27(1): 131-140. (本条文献信息为中文文献, 请核对)
- [ 5 ] 吴厚水, 刘慧屏, 黄大基, 何正翀. 鼎湖山自然保护区 3 种群落的能量流和能量利用效率. 生态学报, 1998, 18(1): 82-89.
- [ 6 ] Heijmans M M P D, Arp W J, Chapin III F S. Carbon dioxide and water vapour exchange from understory species in boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 123(3/4): 135-147.
- [ 7 ] Baldocchi D, Chu H S, Reichstein M. Inter-annual variability of net and gross ecosystem carbon fluxes: a review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 520-533.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 孙成, 江洪, 陈云飞, 刘玉莉, 张金梦. 我国亚热带毛竹林生长季能量通量过程及闭合度分析. 热带亚热带植物学报, 2014, 22(1): 38-44.
- [ 10 ] 吴家兵, 关德新, 赵晓松, 韩士杰, 金昌杰, 于贵瑞. 东北阔叶红松林能量平衡特征. 生态学报, 2005, 25(10): 2520-2526.
- [ 11 ] 刘允芬, 宋霞, 刘琪璟, 陈永瑞, 沈艳. 亚热带红壤丘陵区非均匀地表能量通量的初步研究. 江西科学, 2003, 21(3): 183-188.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] Shuttleworth W J, Gash J H C, Lloyd C R, Moore C J, Roberts J, De O Marques Filho A, Fisch G, De Paula Silva Filho V, De Nazaré Góes Ribeiro M, Molion L C B, De Abreu Sá L D, Nobre J C A, Cabral O M R, Patel S R, De Moraes J C. Eddy correlation measurements of energy partition for Amazonian forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1984, 110(466): 1143-1162.
- [ 15 ] Sellers P, Hall F, Ranson K J, Margolis H, Kelly B, Baldocchi D, den Hartog G, Cihlar J, Ryan M G, Goodison B, Crill P, Lettenmaier D, Wickland D E. The Boreal Ecosystem-Atmosphere Study (BOREAS): an overview and early results from the 1994 field year. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1995, 76(9): 1549-1577.
- [ 16 ] 陈存根, 龚立群, 彭鸿, 刘晓正. 秦岭锐齿栎林的生物量和生产力. 西北林学院学报, 1996, 11(S1): 103-114.
- [ 17 ] 刘彦春, 尚晴, 王磊, 田野, 琚煜熙, 甘家兵. 气候过渡带锐齿栎林土壤呼吸对降雨改变的响应. 生态学报, 2016, 36(24): 8054-8061.
- [ 18 ] 徐自为, 刘绍民, 宫丽娟, 王介民, 李小文. 涡动相关仪观测数据的处理与质量评价研究. 地球科学进展, 2008, 23(4): 357-370. (本条

文献为中文文献信息,请核对)

- [19] 朱治林, 孙晓敏, 温学发, 周艳莲, 田静, 袁国富. 中国通量网(ChinaFLUX)夜间 CO<sub>2</sub> 湍度相关通量数据处理方法研究. 中国科学 D 辑 地球科学, 2006, 36(S1): 34-44.
- [20] 张新建, 袁凤辉, 陈妮娜, 邓珺丽, 于小舟, 盛雪娇. 长白山阔叶红松林能量平衡和蒸散. 应用生态学报, 2011, 22(3): 607-613.
- [21] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grünwald T, Hollinger D, Jensen N O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Wofsy S. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43-69.
- [22] Baldocchi D, Falge E, Gu L H, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, Paw U 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.
- [23] McCaughey J H, Pejam M R, Arain M A, Cameron D A. Carbon dioxide and energy fluxes from a boreal mixedwood forest ecosystem in Ontario, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1/4): 79-96.
- [24] 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(ChinaFLUX)能量平衡闭合状况的评价. 中国科学 D 辑 地球科学, 2004, 34(S2): 46-56.
- [25] 姚松, 朱学灵, 束庆龙, 王华同, 孙小波, 朱从波, 赵艳丽. 宝天曼国家级自然保护区近 15 年来气温与降水的变化趋势及相关性分析. 湖北农业科学, 2012, 51(3): 497-500.
- [26] 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.
- [27] 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. 生态环境学报, 2005, 14(2): 260-265. (本条文献为中文文献请核对)
- [28] 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(自然科学版), 2010, 31(4): 139-142. (本条文献为中文文献请核对)
- [29] 刘广全, 赵士洞, 王浩, 土小宁, 龚立群. 锐齿栎林个体光合器官生长与营养季节动态. 生态学报, 2001, 21(6): 883-889.
- [30] 卫楠, 张弥, 王辉民, 张雷明, 温学发, 刘寿东. 散射辐射对亚热带人工针叶林光能利用率的影响. 生态学报, 2017, 37(10): 3403-3414.
- [31] 关德新, 金明淑, 徐浩. 长白山阔叶红松林生长季反射率特征. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1544-1546.
- [32] Wei X, Liu S, Zhou G, Wang C. Hydrological processes in major types of Chinese forest. *Hydrological Processes*, 2005, (19): 63-75.
- [33] Zhu Z L, Sun X M, Zhang R H. Statistical analysis and comparative study of energy balance components estimated using micrometeorological techniques during HUBEX/IOP 1998/99. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(2): 285-291.
- [34] 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, Verma S. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 223-243.
- [35] 陈家宜, 范邵华, 赵传峰, 肖雪, 蔡旭辉, 刘辉志. 涡旋相关法测定湍流通量偏低的研究. 大气科学, 2006, 30(3): 423-432.
- [36] Ding R S, Kang S Z, Li F S, Zhang Y Q, Tong L, Sun Q Y. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(1): 87-95.
- [37] Mahrt L. Flux sampling errors for aircraft and towers. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1998, 15(1998): 416-429. (请核对期号)
- [38] Shi T T, Guan D X, Wang A Z, Wu J B, Jin C J, Han S J. Comparison of three models to estimate evapotranspiration for a temperate mixed forest. *Hydrological Processes*, 2008, 22(17): 3431-3443.
- [39] 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏, 刘允芬. 复杂地形条件下森林植被湍流通量测定分析. 中国科学 D 辑 地球科学, 2004, 34(S2): 57-66.
- [40] Wilson K B, Hanson P J, Baldocchi D D. Factors controlling evaporation and energy partitioning beneath a deciduous forest over an annual cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 102(2/3): 83-103.
- [41] Stoy P C, Mauder M, Foken T, Marcolla B, Boegh E, Ibrom A, Arain M A, Arneth A, Aurela M, Bernhofer C, Cescatti A, Dellwik E, Duce P, Gianelle D, van Gorsel E, Kiely G, Knohl A, Margolis H, Varlagin A. A data-driven analysis of energy balance closure across FLUXNET research sites: the role of landscape scale heterogeneity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171-172: 137-152.
- [42] Leuning R, van Gorsel E, Massman W J, Isaac P R. Reflections on the surface energy imbalance problem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 156: 65-74.
- [43] 王旭, 尹光彩, 周国逸, 闫俊华, 王春林. 鼎湖山针阔混交林旱季能量平衡研究. 热带亚热带植物学报, 2005, 13(3): 205-210.
- [44] Baldocchi D. Breathing of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany*, 2008, 56(1): 1-26. (本条文献与第 22 条文献重复, 请核对)
- [45] Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, Rannik Ü, Moncrieff J, Foken T, Kowalski A S, Martin P H, Berbigier P, Bernhofer C, Clement R, Elbers J, Granier A, Grünwald T, Morgenstern K, Pilegaard K, Rebmann C, Snijders W, Vesala T. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests; the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30: 113-175.
- [46] Paw U K T, Baldocchi D D, Meyers T P, Wilson K B. Correction of eddy-covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 97(3): 487-511. (本条文献与第 39 条文献重复, 请核对)