



西双版纳热带季雨林通量分配及能量平衡问题

金艳, 廖立国, 张颖, 刘玥, 刘嘉慧, 谭正洪

引用本文:

金艳, 廖立国, 张颖, 刘玥, 刘嘉慧, 谭正洪. 西双版纳热带季雨林通量分配及能量平衡问题[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(4): 472–482.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4509>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

云南热带雨林:特征、生物地理起源与演化

Tropical Rain Forest of Yunnan (Southwestern China): Characteristics, Biogeographical Origin and Evolution

热带亚热带植物学报. 2022, 30(4): 575–591 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4536>

雷州半岛尾巨桉人工林土壤呼吸动态变化及其对气象因子的响应

Soil Respiration of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* Plantation and Its Response to Meteorological Factors in Leizhou Peninsula

热带亚热带植物学报. 2018, 26(4): 346–354 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3833>

鼎湖山锥栗木质部形成及其对气候的响应

Xylem Formation and Response to Climate of *Castanea henryi* in Dinghushan Mountain

热带亚热带植物学报. 2020, 28(5): 445–454 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4204>

中国东南部不同海拔亚热带森林中马尾松径向生长对气候的响应

Elevational Heterogeneity in Radial Growth–climate Association of *Pinus massoniana* in Southeastern China

热带亚热带植物学报. 2019, 27(6): 633–641 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4038>

武夷山常绿阔叶林土壤微生物多样性的季节动态

Seasonal Dynamics in Soil Microorganisms Diversity of Evergreen Broad-leaved Forest in Wuyi Mountains, Southeastern China

热带亚热带植物学报. 2017, 25(2): 115–126 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3656>

向下翻页，浏览PDF全文

西双版纳热带季雨林通量分配及能量平衡问题

金艳, 廖立国, 张颖, 刘玥, 刘嘉慧, 谭正洪*

(海南大学生态与环境学院, 海口 570228)

摘要: 为了探讨我国西双版纳热带季雨林的通量分配和平衡问题, 利用涡度相关系统和常规气象仪器的连续监测结果, 分析了不同季节的通量特征和闭合特点。结果表明, 西双版纳热带季雨林全年的净辐射、潜热通量、显热通量、土壤热通量和热储量分别是 4 546.07、2 453.24、492.22、-10.47 和 45.93 MJ/m², 土壤为热源, 潜热年总值占净辐射的 54.0%, 显热占 10.8%, 能量以蒸发散为主要的耗损形式。辐射和能量有明显的日变化和季节动态, 各能量分量的日变化几乎都呈白天高夜间低的单峰趋势, 反照率整体为 0.10~0.12, 波动不大; 波文比季节差异明显, 为 0~0.8。热带季雨林的全年闭合度为 0.67, 未考虑热储量时, 闭合度为 0.51~0.79, 考虑热储量为 0.53~0.80。可见, 在林冠茂密的热带季雨林中, 热储量对能量闭合度的贡献不大, 忽略热储量并不是导致能量不闭合的主要原因。

关键词: 热带季雨林; 涡度相关系统; 热储量; 能量

doi: 10.11926/jtsb.4509

Studies on the Flux Distribution and Energy Closure in Xishuangbanna Tropical Seasonal Rainforest, China

JIN Yan, LIAO Ligu, ZHANG Ying, LIU Yue, LIU Jiahui, TAN Zhenghong*

(College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: In order to explore the energy distribution and energy balance closure of the tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, China, the energy flux characteristics and closure features in different seasons were analyzed by using the continuous monitoring results of the eddy covariance system and conventional meteorological instruments. The results showed that the annual net radiation, latent heat flux, sensible heat flux, soil heat flux and heat storage were 4 546.07, 2 453.24, 492.22, -10.47 and 45.93 MJ/m², respectively. It was suggested that soil was a heat source. The latent and sensible heat fluxes were accounted for 54.0% and 10.8% of the net radiation, respectively. The main form of energy dissipation was evapotranspiration. There was obvious diurnal variation and seasonal dynamics in radiation and energy, and the diurnal variation of each energy components almost showed a unimodal trend of high daytime and low nighttime. The overall albedo ranged from 0.10 to 0.12, with a little fluctuation, and the seasonal variation of the Bowen ratio was significant, fluctuating from 0 to 0.8 throughout the year. The annual closure of tropical seasonal rainforest was 0.67, which varied from 0.51 to 0.79 when the heat storage was not considered, and from 0.53 to 0.80 when the heat storage was taken into account. Therefore, the contribution of heat storage to energy closure was small in tropical seasonal rainforest with dense forest canopies, and neglecting heat storage was not the main cause for energy non-closure.

Key words: Tropical seasonal rainforest; Eddy covariance system; Heat storage; Energy

收稿日期: 2021-08-21

接受日期: 2021-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(4186010159, 41771099)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 4186010159, 41771099).

作者简介: 金艳, 硕士研究生, 主要从事生态系统研究。E-mail: jinyan8197@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: tan@ynu.edu.cn

森林作为陆地上结构最复杂、物种最丰富的生态系统,对区域和全球碳水循环及物质能量交换具有影响^[1-2],而热带雨林作为森林生态系统中最重要的生物群系之一,其辐射和能量通量的变化可直接引起下垫面温度、水分传输和生产力的变化^[3],因此在能量分配和平衡问题方面备受关注^[4-5]。涡度监测方法的兴起为辐射和能量闭合研究提供了平台,可以直接测量生态系统和大气间物质能量交换,被广泛运用到不同生态系统的研究中,旨在了解时空尺度上二氧化碳、水蒸气和能量交换的机制^[6]。

云南省分布着大片热带雨林,占全国热带雨林总面积的59.4%,其中西双版纳勐腊县的热带雨林分布面积最广,有 $1.21 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[7]。西双版纳的热带雨林分为2部分,高海拔地区(海拔770 m以上)的热带山地常绿阔叶林和位于沟谷和低丘(海拔低于770 m)的热带季节雨林^[8],同其他热带雨林相比,热带季节雨林具有独特的气候模式和物候特征^[9]。自2002年以来,西双版纳先后设置了3处涡度通量塔,分别对碳水通量、辐射特征、温度变化等开展了研究,探讨了热带季雨林的小气候和能量转换特征^[10],但专门针对地表能量平衡闭合的研究仍然不足。能量闭合研究对区域通量的定量估计有重要意义,能侧面反映碳通量、水热通量的数据精确度^[11]。本研究选用勐腊县补蚌村 20 hm^2 大样地内的通量塔监测数据,此通量塔于2014年设置在海拔为653.4 m的热带季雨林中,通量监测时间不长,我们选取了有限时间范围内几乎连续的观测数据(2014.11—2016.8),对该区域的能量分配及闭合情况展开分析。

过去的研究中,生态系统的能量普遍存在不闭合情况,一般湍流能量(显热通量 H_s +潜热通量 LE)只占有有效能量(净辐射 R_n -土壤热通量 G -热储量 S)的70.0%~90.0%^[12],正确估算各热储量分量可有效改善能量不平衡的问题,从目前情况来看,未充分考虑下垫面与大气间的能量储量是造成能量不闭合的主要原因之一^[13-14],McCaughy^[15]的研究表明在冠层较高的生态系统中(植物高度大于8 m),热储量应该被考虑。此外值得注意的是,该区域是有名的静风区,湍流交换较弱,在多雾的天气状况下浓雾覆盖会起到一定的保温作用以及下垫面凋落物分解会产生部分热量。那么在大气相对稳定的静风区,湍流发育不完全,物质能量交换不

充分,如果在该区域开展涡度通量监测,会出现怎样的结果?在林冠高大茂密的森林,忽略热储量导致能量不闭合的问题是否会更加突出?冠层能量储量变化对能量闭合度的贡献有多大?因此,研究西双版纳热带季雨林的通量分配和闭合过程,揭示以上问题的答案,有助于理解生态系统的物质能量交换和水热平衡。这是对西南方热带季雨林通量观测的一个很好的补充,为深入了解我国西南方热带季雨林生态系统物质和能量交换提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

选择云南省西双版纳勐腊县补蚌的热带季雨林作为观测样地($21^\circ 37' 4'' \text{ N}$, $101^\circ 34' 56'' \text{ E}$),2014年该观测样地内修建了森林塔吊(最大工作高度为81 m,臂长有60 m),涡度协方差系统和常规气象仪器分层安装在森林塔吊固定不移动的主体部分(以下简称塔吊),对小气候、能量通量以及一些生态过程开展长期动态监测。该区域处于东南亚热带北缘,属于热带季风气候,常年受西南季风影响,有着独特的气候模式,夏季以印度洋暖湿气团为主,冬季以亚热带大陆气团为主,具有很强的季节性^[16],多年气象监测数据显示年均温为 $21.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。降水分配极不均匀。一年可划分为干湿两季^[17],干季(从11月至次年4月)在亚热带大陆气团影响下,多雾少雨,降水量约为 194.1 mm ,干季又可划分为干热季(3—4月)和雾凉季(11—2月)。干热季日间温度较高(日间最高温度可达 $38 \text{ }^\circ\text{C}$),雾容易散开,雾凉季的特点是温度低($17.5 \text{ }^\circ\text{C}$),全天大部分时间被浓雾笼罩^[18]。季风通常和西南风以及来自印度洋的潮湿海洋气团平流有关,这是雨季常有的现象,这一时期大约从5月持续到10月。温度高且湿润,降雨量占全年降水(1429.03 mm)的79.1%左右。

观测样地为原生热带季雨林,所在区域的海拔不高,地形起伏较大,样地共有3条沟谷,底部地势平缓,坡面较陡峭。热带季雨林主要分布在谷底及两侧坡面,以望天树(*Parashorea chinensis*)为主,样地内物种丰富,优势种还有假海桐(*Pittosporopsis kerrii*)、短刺锥(*Castanopsis echidnocarpa*)、蚁花(*Mezzettiopsis creaghii*)、毛猴欢喜(*Sloanea tomentosa*)等^[9],上层林冠高达50~60 m。塔吊设置在海拔约

为 653.4 m 的山间沟谷(图 1)。干湿季水分条件差异导致物候有明显变化, 雾凉季叶片轻微凋落, 干热

季水分亏缺, 不足以维持叶片生长, 出现集中落叶现象, 雨季水分充足、温度适宜, 植物重新展叶^[19]。

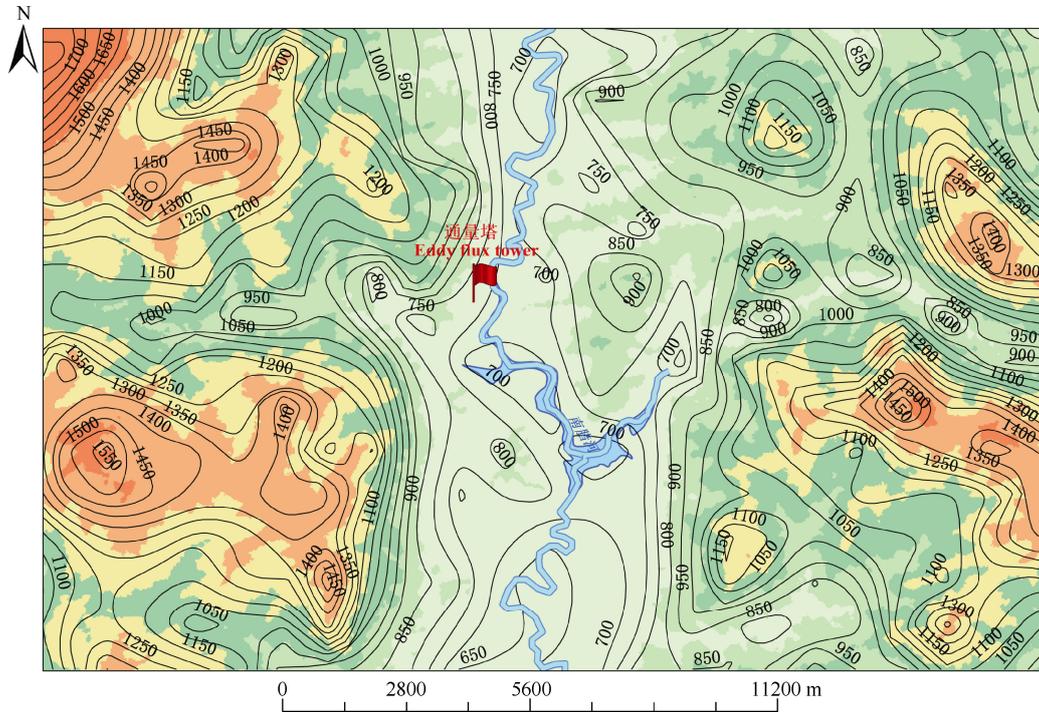


图 1 涡度通量塔周围地形概况

Fig. 1 Terrain situation of eddy flux tower

1.2 仪器设置

观测区域的林冠高度普遍在 30~35 m, 林冠种可高达 60 m。在最大工作高度为 81 m 的塔吊上安装开路涡度系统和常规气象观测系统。开路涡度相关系统安装在塔吊 68.1 m 处, 包括快速响应红外气体分析仪(Li-7500, Li-Cor Inc., USA)、三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA)和数据采集系统(CR3000, Campbell Scientific Inc., USA), 通量数据以 10 Hz 频率采集存储。

在 77.7 m 采用 CNR4 (Kipp & Zonen, Netherlands) 净辐射仪测定太阳辐射、反射辐射和净辐射, 同时在 1.4、62.1、68.1、77.7、81.6 m 监测空气温湿度(HMP45C, Vaisala, Helsinki, Finland)、风速(A100R, Vector Instruments, Denhighshire, UK)和光合有效辐射(LQS70-10, Apogee, USA)。在地表下 5、10、20、40、60、80、100 cm 处安装传感器, 监测土壤温度(105T/107L, Campbell Scientific, USA)和湿度(CS616L, Campbell Scientific, USA)。地表下 5 cm 处放置了 2 块热通量板(HFP01, HukseFlux, Netherlands)测定土壤热通量, 气象数据资料以 0.5 Hz 频率采集。

1.3 数据处理和计算

1.3.1 异常值剔除

本文选用 2014 年 11 月至 2016 年 8 月的连续监测数据进行分析。数据采集系统收集到的数据, 根据涡度原理及相关计算, 每 30 min 输出 1 个通量和气象因子平均值。为了消除水平和垂直平流项, 根据 Aubinet 和 Grelle 等的方法, 对测出的 30 min 通量数据进行 3D 坐标轴旋转^[20], WPL 校正^[21], 然后利用旋转垂直风速与水汽浓度、气温和 CO₂ 浓度的协方差计算潜热 LE、显热 Hs 和 CO₂ 通量。在实际的观测中, 由于涡度系统是开路, 受降雨、风速等因素的影响, 会引起部分数据异常, 因此根据中国通量观测网络(ChinaFLUX)的筛选标准^[22-23]以及观测地的实际气候特征对通量数据进行有条件的筛选, 同时也剔除某点与连续 5 点平均值之差的绝对值大于 5 点方差 2.5 倍的异常数据。常规气象监测仪几乎不受天气影响, 故辐射值和土壤热通量只进行异常突出值剔除。若连续缺失数据少于 4 个(<2 h), 用线性内插法对剔除后的数据进行插补; 连续缺失数据超过 4 个(>2 h), 则用多重插补法插补数据。

1.3.2 能量平衡

由能量守恒定律可知, 能量无论如何转换, 总量保持不变。在涡度系统中, 能量平衡表示为湍流通量(潜热通量 LE 、感热通量 H_s)和有效能量(净辐射 R_n 、土壤热通量 G 、热储量 S)之间的平衡。地表能量平衡^[24]: $LE+H_s=R_n-G-S-Q$, 其中, Q 为附加能量, 因其值很小常常被忽略; S 为总热储存量, 包括土壤热通量板与地表之间的土壤热储量 S_s 、冠层下方空气显热 S_a 、潜热储量 S_e 、冠层热储存量 S_c 、树木枝干热储存量 S_t 和光合作用耗能 S_p , 总热储量 $S=S_s+S_a+S_e+S_c+S_t+S_p$ 。本数据集缺少枝干的监测数据, 故计算时忽略 S_t ; Tajchman^[25] 认为 S_p 的影响微乎其微, 因此忽略其对热储量的贡献。各热储存量参照 Blanken 等^[26]和 Oliphant^[27]的方法计算。

对于能量平衡闭合的判定方法, 通常有4种方法: 普通最小二乘法(Ordinary Least Squares, OLS)、简化主轴法(Reduced Major Axis, RMA)、能量平衡比率(Energy balance ratio, EBR)和能量平衡相对残差 δ ^[12]。其中 OLS 和 RMA 方法没有太大差别^[12,20], 反映的是瞬时的能量闭合状况^[28]。 δ 是从能量残余量的角度去反映能量闭合程度, 残余量越多, 能量闭合度越低, 而 EBR 是在一定的观测周期内去分析能量平衡闭合, 相比较而言, EBR 更能反映一段时期内的整体情况, 减少了随机仪器测量的误差和其他不确定性, 也减弱了不同能量分量之间的滞后效应^[29], 且更方便与其他地区的研究结果进行对比。因此在本次研究中, 借助能量平衡比率 EBR 来评价能量闭合情况。 $EBR = \frac{\sum(LE+H_s)}{\sum(R_n-G-S)}$, EBR 越接近 1, 说明该系统能量闭合度越高, 涡

度通量数据越可靠, 受干扰程度越小。

1.3.3 能量残余量^[12,30]

当生态系统的能量不闭合时, 就会有部分能量残余, 残余量 $Res=R_n-G-LE-H_s-S$ 。

2 结果和分析

2.1 气温、降雨量和土壤含水量的变化

西双版纳勐腊县补蚌的热带季雨林年总降雨量为 1 429.03 mm, 雾凉季降雨最少, 平均降雨量为 41.48 mm。进入干热季后开始增加, 月降雨总量在 8 月达到峰值(352.43 mm), 降雨量主要集中在夏季, 占全年的 79.1% (图 2)。土壤含水量整体呈单峰变化, 3 层土壤含水量变化趋势基本一致, 含水量随土层深度增加而增大。降雨量和土壤含水量在时间序列上变化趋势保持一致性, 均呈现出夏季最大, 雾凉季最小的特点。全年的日均温为 15 °C ~ 26 °C, 雾凉季气温低, 干热季雾减少, 太阳辐射增强, 气温回升快, 夏季气温变化不大, 保持在 25 °C 上下波动。

2.2 能量通量的变化

2.2.1 日变化

地表辐射和能量受天气影响, 在不同气候状况下, 会有明显的日变化特征。对不同季节各能量分量数据求日平均(图 3), 可见能量通量存在明显的日变化和季节变化。 R_n 、 LE 和 H_s 有相似的变化趋势, 日出后随太阳高度角增大而迅速升高, 午后达到峰值便迅速开始下降, 日落后相对稳定, 白天的变化幅度大于夜晚。 R_n 呈单峰变化, 在 13:00—13:30 达

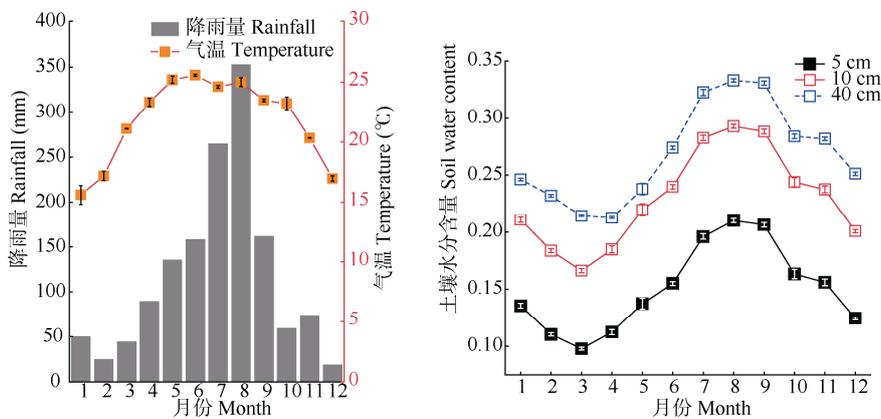


图2 热带季雨林中气温、降雨量和不同深度土壤含水量的月变化

Fig. 2 Monthly changes of temperature, rainfall and soil water content at different depths in the tropical seasonal forest

到峰值 510.5 W/m², 干热季地面获得的辐射量最多, 达 604.8 W/m², 雨季和雾凉季分别达到 496.8 和 488.0 W/m²。夜间净辐射值为负, 雨季从清晨 7:30 开始转为正值, 比干热季和雾凉季提早 1 h 左右, 傍晚由正变负的时间为 19:30, 比其他季节延迟 1 h。3 个季节均在日落 1 h 后出现最小值。

LE 和 Hs 都呈单峰变化, 白天高于夜间。一天中 Hs (W/m²) 最大值出现时间与 Rn 同步, 日总量为

干热季(751.4)>雾凉季(631.1)>雨季(360.3), 白天为正值, 夜间转为负值, 最小值出现在 18:30—19:30。雨季降雨量多, 植物生长不受水分限制, 气孔张开进行光合作用, 水分蒸腾也加剧, LE 上升速度快。干热季温度高降水少, 水分不可避免地通过蒸发蒸腾方式耗散, 故日累计 LE (W/m²) 呈现雨季(4 672.0)>干热季(3 985.9)>雾凉季(2 725.4), 全天 LE 均为正值。

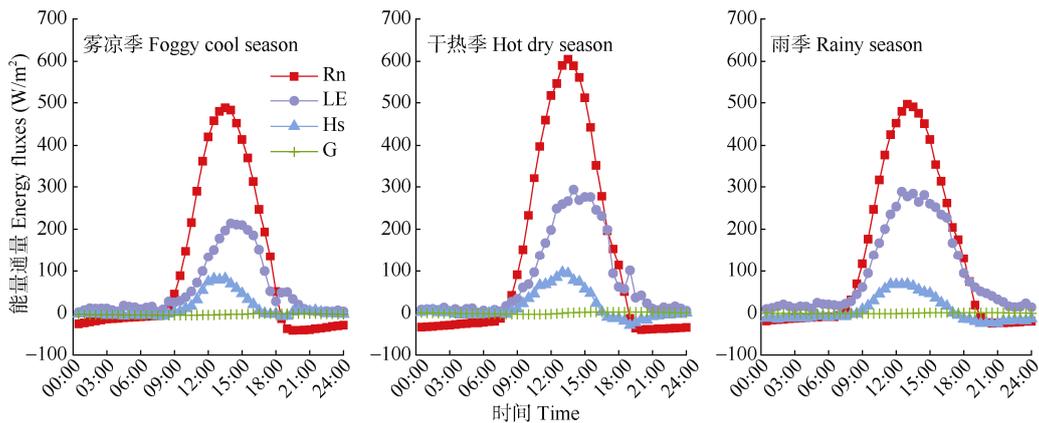


图 3 不同季节能量通量日变化。Rn: 净辐射; LE: 潜热通量; Hs: 显热通量; G: 土壤热通量。

Fig. 3 Diurnal variation of radiation and energy flux in different seasons. Rn: Net radiation; LE: Latent heat flux; Hs: Sensitive heat flux; G: Soil heat flux.

2.2.2 反照率和波文比的月变化特征

地表和大气间的辐射平衡可以用反照率表示, 月均反照率变化呈现出下图特点(图 4)。热带季雨林的反射率整体处于 0.10~0.12, 波动不大, 存在明显的季节变化, 3—4 月反照率最高, 雨季逐渐下降, 在 10 月最小(0.103), 雾凉季维持在一个平缓水平。推测是因为干热季水分亏缺, 植物调节气孔大小减少蒸腾, 上下水势差不足以将足够的水分运输至林冠去维持叶片生长, 集中落叶的物候现象使该时段叶绿素含量减少(叶面积指数的月变化见表 1), 反照率增加。进入雨季降雨量增加, 植物重新展叶, 前期嫩叶叶面积小, 叶绿素含量少, 反照率变化不大, 后期随着太阳高度角增加, 且叶片完全伸展成熟, 反照率减小。

波文比反映的是地表和大气间的水热通量交换情况, 根据 LE 和 Hs 的日总量计算波文比(图 5)。全年波文比为 0~0.8, LE 占比高于 Hs, 季节差异明显, 雾凉季>干热季>雨季, 年均波文比为 0.31。

2.2.3 能量热储量和残余量变化趋势

为探究热带季雨林热储存量对能量平衡的贡献, 对各热储量分量进行了计算(图 6)。不同季节

空气显热储量 Sa 均呈现单峰单谷变化, 白天变化剧烈, 夜间和清晨变化缓慢。8:00 前太阳辐射值小, 温度升高缓慢, 温差小, Sa 变化不大; 8:00 之后, 太阳高度角增加, 下垫面和冠层开始储量快速增大, 在正午前后达到峰值, 雾凉季和雨季受天气和降水影响, Sa 低于干热季(14.31 W/m²)。通过对各监测层的温度数据分析, 发现在 10:30—12:30 期间气温变化率最大, 所以正午前后积累的 Sa 达到

表 1 叶面积指数(LAI)的月变化

Table 1 Monthly variation of leaf area index (LAI)

季节 Season	月份 Month	LAI	平均 Mean
雾凉季 Foggy cool eason	11	6.44±0.050	6.40±0.084
	12	6.54±0.046	
	1	6.52±0.059	
干热季 Hot dry season	2	6.12±0.055	5.28±0.243
	3	5.63±0.040	
雨季 Rainy season	4	4.94±0.057	5.77±0.077
	5	5.68±0.026	
	6	6.02±0.046	
	7	5.92±0.054	
	8	5.52±0.046	
	9	5.64±0.080	
	10	5.85±0.069	

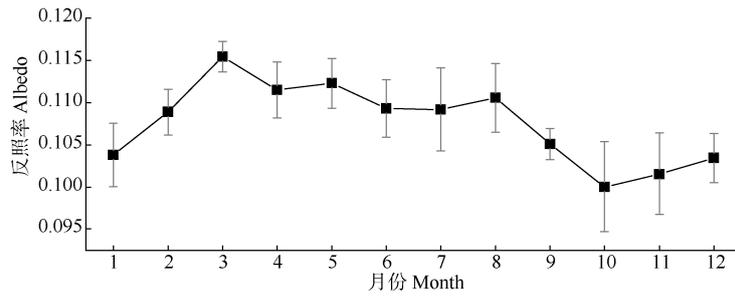


图 4 反照率的月变化趋势

Fig. 4 Monthly variation in albedo

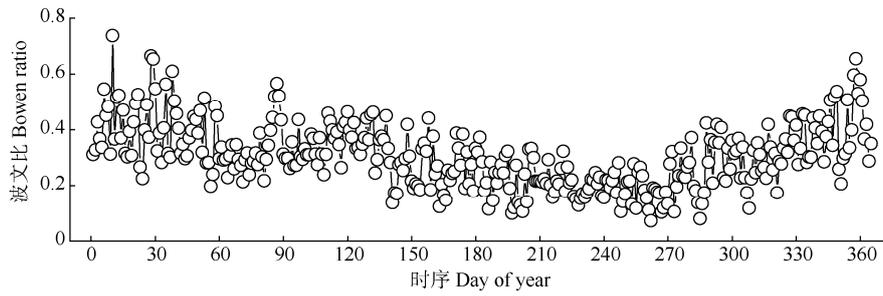


图 5 波文比的月变化趋势

Fig. 5 Monthly variation in Bowen ratio

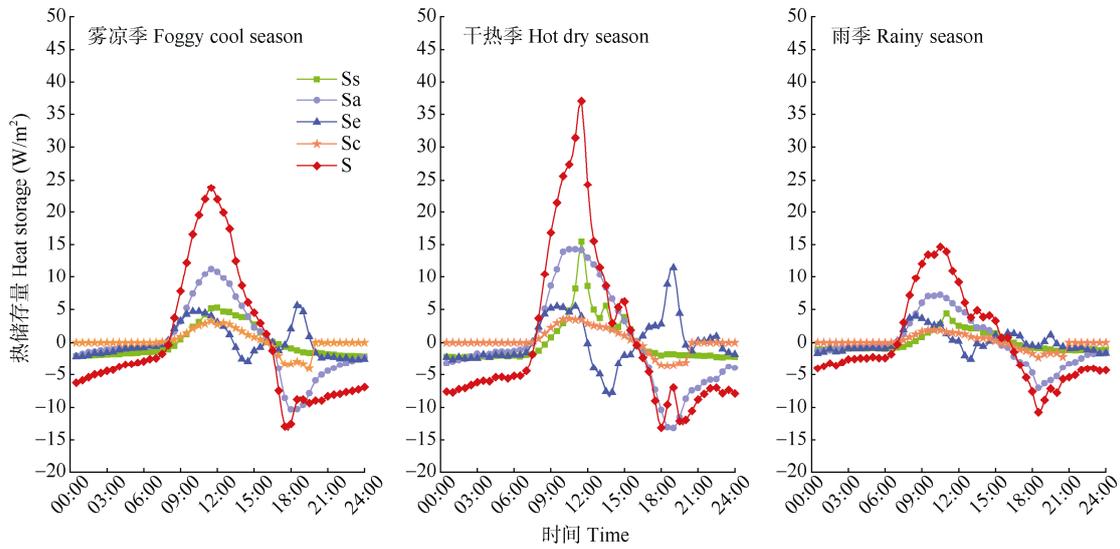


图 6 不同季节热储存量日变化。S: 总热储存量; Ss: 土壤热储量; Sa: 冠层下方空气显热储量; Se: 冠层下方空气潜热储量; Sc: 冠层热储存量。

Fig. 6 Diurnal variation of heat storage in different seasons. S: Total heat storage; Ss: Soil heat storage; Sa: Sensible heat storage of air below the canopy; Se: Latent heat storage of air below the canopy; Sc: Canopy heat storage.

最大值。午后 14:30—16:30 出现最高气温，温度变化率减小，故 Sa 减小，在傍晚 18:00 前后达到谷值，雨季 < 雾凉季 < 干热季。

各个季节的潜热储量 Se 都呈现双峰变化，白天变化剧烈，夜间变化幅度小。对各层水汽压监测数据分析表明，夜间没有辐射能量收入，温度

下降，空气中形成大量雾滴，水汽压减小，在 7:30 达到最低点，之后 8:00—12:00 间水汽压快速增加，在 10:30 前后 Se 达到第 1 个峰值，此后太阳辐射增强，温度升高，雾气消散，空气中水分含量减小致使 Se 下降，在 14:00 左右达到谷值(雾凉季、干热季、雨季分别为 -2.88、-7.70、-2.54 W/m²)。下午

气温最高, 空气可容纳水分子的能力增大, 加之下垫面蒸散过程, 在 18:30—19:00 达到第 2 个峰值 (5.58、11.48 和 1.16 W/m^2)。干热季空气湿度低, 植物对气候的调节作用小, 水汽压变化较快, 导致干热季 Se 波动大, 雨季下午降水频繁, 空气湿润, 饱和水汽压值减小, 热储量值变化幅度平缓。

冠层热储量 Sc 的变化规律同 Sa , 呈单峰单谷趋势, 同其他热储量相比, Sc 波动小, 上午出现峰值, 傍晚出现谷值, 雨季出现峰值和谷值的时间比其他季节提前和延迟, 整体在 $-4\sim 4 W/m^2$ 波动。土壤热储量 Ss 为单峰型, 干热季受林冠遮蔽少, 太阳辐射抵达林下的比例大, 土壤获得的能量, 正午最大值达 $15.45 W/m^2$, 雨季土壤含水量丰富, 蒸发量大, 蒸发将能量传向大气, Ss 较小, 约为 $4.39 W/m^2$, 雾凉季处于中等水平 ($5.28 W/m^2$)。

总热储量 S 的变化有明显的季节差异, 日间最大值为干热季 ($36.99 W/m^2$) > 雾凉季 ($23.75 W/m^2$) > 雨季 ($14.68 W/m^2$), 变化剧烈。

不同季节 Res 均呈现出昼高夜低的特点, 雾凉季、干热季和雨季均在午后达最大值, 分别是 203.26、256.93 和 $143.63 W/m^2$, 雨季 Res 比干热季低 56%。夜间没有太阳辐射, 有效能量小于湍流能量, Res 为负值 (图 7)。

2.3 能量分配特征

为了解进入地面的能量去向, 计算了各能量通量分量占 Rn 的比例 (表 2)。发现在西双版纳热带季雨林, 进入生态系统的能量主要通过潜热蒸散的方式返回到大气, 其次是通过显热完成能量传输, Hs 占 Rn 的 14.3%~15.8%, G 和 S 所占的比重很小。

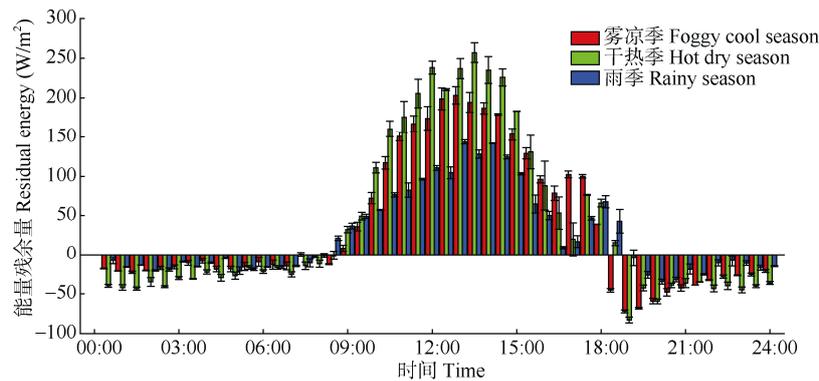


图 7 不同季节能量残余量的日变化

Fig. 7 Diurnal variation of residual energy in different seasons

表 2 不同季节热带季雨林能量分配模式

Table 2 Energy distribution patterns of tropical seasonal forests in different seasons

季节 Season	能量分配 Energy allocation				波文比 Bowen ratio
	LE/Rn	Hs/Rn	G/Rn	S/Rn	
雾凉季 Foggy cool season	0.379	0.143	-0.010	0.028	0.378
干热季 Hot dry season	0.471	0.158	0.002	0.028	0.336
雨季 Rainy season	0.612	0.151	0.002	0.014	0.245

LE: 潜热通量; Rn: 净辐射; Hs: 显热通量; G: 土壤热通量; S: 总热储存量。

LE: Latent heat flux; Rn: Net radiation; Hs: Sensitive heat flux; G: Soil heat flux; S: Total heat storage.

2.4 能量平衡比率 EBR 的变化

EBR 的变化趋势见表 3, 通过对忽略 S 的能量闭合度和包含 S 的能量闭合度进行比较发现, S 对能量闭合的贡献仅为 1.0%~2.0%。EBR 季节间差异显著, 表现为雨季 > 干热季 > 雾凉季, 计算 S 后年均闭合度为 0.670, 能量仍不闭合。

3 结论和讨论

3.1 能量分配的变化

太阳辐射作为生态系统的能量来源, 驱动着一系列的生物化学反应。不同的生态系统, 纬度、天气特点和下垫面状况各异, 获取的能量和能量分配也

表 3 能量平衡比率的季节变化

Table 3 Seasonal variation of energy balance ratio

季节 Season	能量平衡比率 Energy balance ratio		贡献率 /% Contribution rate
	$\Sigma(\text{LE} + \text{Hs}) / \Sigma(\text{Rn} - \text{G})$	$\Sigma(\text{LE} + \text{Hs}) / \Sigma(\text{Rn} - \text{G} - \text{S})$	
全年 Full year	0.653	0.670	1.7
雾凉季 Foggy Cool Season	0.549	0.565	1.6
干热季 Hot dry season	0.613	0.630	1.7
雨季 Rainy season	0.736	0.747	1.1

LE: 潜热通量; Rn: 净辐射; Hs: 显热通量; G: 土壤热通量; S: 总热储存量。

LE: Latent heat flux; Rn: Net radiation; Hs: Sensitive heat flux; G: Soil heat flux; S: Total heat storage.

大不相同。神农架大九湖湿地公园^[31]内泥炭湿地的全年净辐射总值为 3 146.9 MJ/m², 亚热带暖温带过渡带的天然栎林^[32]全年获得的总值为 2 626.2 MJ/m², 海南岛热带山地雨林^[33]的净辐射为 2 800~3 000 MJ/m², 鼎湖山常绿阔叶林^[34]为 3 488.8 MJ/m², 西双版纳热带季雨林测得的净辐射值达 4 546.07 MJ/m²。西双版纳热带季雨林纬度偏低。在亚洲东部森林小气候特征研究中, 发现辐射具有明显的纬度变化特征, 辐射量与纬度成明显的负相关关系^[35], 在纬度、气候和下垫面的作用下, 热带季雨林的辐射量高于其他植被类型。

辐射能的大小意味着下垫面收入能量的多少, 也决定着热量转化支出的多少。不同的生态系统除了获得的辐射量各异, 能量分配的方式和途径也存在差异, 能量分配不仅可以反映一个区域的能量闭合状况, 还能说明下垫面的干湿程度^[36]。北亚热带季风气候区的湿地生态系统有重要的水源涵养功能, 能量主要分配给 LE, Hs 仅为 LE 的一半^[31]; 半干旱季风气候区的内蒙古草地生态系统, Hs 在能量分配中起主要作用^[37]; 西双版纳热带季雨林中蒸发散是能量的主要耗损形式, LE、Hs、G 和 S 的全年累积量分别是 2 453.24、492.22、-10.47 和 45.93 MJ/m², LE 年总值占 Rn 的 54.0%, Hs 占 10.8%。该涡度通量观测系统设置在山间沟谷, 地势低洼, 是一个集水区, 且通量塔以东 180 m 是澜沧江支流——南腊河, 在河流和降雨对热带季雨林水分的补给下, 植物的水分限制减少, 光合作用加强, 蒸腾作用显著, 在高温的驱动下, 下垫面大量水汽向空中转移, 在能量转换过程中, 进入地表的辐射能量绝大多数以潜热的形式返还大气完成交换, LE 比 Hs 高 4.9 倍。水相态转变吸收能量, 周围温度降低, 分配给显热的能量少。Trenberth 等^[38]分析了全球能量收支, 认为地表吸收的能量有近一半消耗在潜热, 能量分

配与水分平衡受大气水分供需影响。从波文比的月变化情况也能看出 LE 和 Hs 的动态关系, 变化过程和环境条件状况吻合, 在雾凉季夜间 23:00 到次日 11:00 雨林中弥漫着浓雾, 很大程度上缩短了日照时间和辐射强度, 蒸散发也随之减弱^[39], LE 减小, 导致波文比在雾凉季处于高水平。干热季天气晴好, 降水很少, 辐射值突增, 植物在进行光合作用的同时, 蒸腾加剧, 波文比较雾凉季降低。雨季对流天气频率增多, 降水量大, 波文比进一步减小。从整体情况来看, 在热带季雨林生态系统中土壤作为热源向表层和大气中输出热量, S 所占比例小, S 年总值仅为 Rn 的 1.0%。

3.2 能量闭合度分析

前人^[40-41]对高大植物群落内能量平衡问题的研究表明, 观测地能量不闭合现象普遍存在。大多数研究认为热储量 S 和附加能量源汇 Q 数值非常小, 且不易测量, 一般忽略不计^[15]。西双版纳热带季雨林是有名的静风区, 观测年份的平均风速为 0.9 m/s, 能量交换强度不大, 浓雾天气对下垫面的保温作用以及干热季大量落叶分解产生的热量, 在茂密林冠的遮挡下, 冠层下方产生的热量可能难以和大气充分交换, 涡度监测设备难以监测到全部的热通量, 导致能量闭合度被低估。我们推测热储量是该地区能量不闭合的主要原因。因此本文在月尺度上用 EBR 来探讨生态系统的能量闭合状况, 在不考虑 S 时, 月均 EBR 为 0.51~0.79, 考虑了 S 后, EBR 为 0.53~0.80, 年均闭合度为 0.67。中国通量观测网络(ChinaFLUX)包含的 8 个站点的 EBR 分别为 0.58~1.0, 其中西双版纳勐仑镇国家自然保护区内站点的年平均闭合度为 0.58^[12]。本次分析选取的补蚌村通量系统相较于勐仑镇 1 hm² 样地内的通量系统, 该区域的能量闭合情况相对改

善。在分析过程中考虑了 S 的影响, 但发现结果与预期不符, S 对 EBR 的贡献率很小, 热储量不是该地区能量不闭合的主要原因。

本研究结果表明, 热带季雨林的能量平衡闭合存在明显的季节差异, 雨季 > 干热季 > 雾凉季。西双版纳的干热季和雾凉季, 由于季风强度的减弱, 低层大气受干扰小, 较为稳定, 且干燥少雨促进了雾的形成^[37]。静风的特点和雾的笼罩作用在一定程度上阻碍了大气的交换, 可能导致湍流通量的低估, 造成了 EBR 偏小。进入干热季后, 气温回升, 在白天雾逐渐消散, 但干热季高温少雨, 部分叶片选择凋落的生长对策来适应环境条件的变化, 相较于雨季, 下垫面接收到的净辐射增加, LE 比重减小, 所以能量平衡闭合弱于雨季。雨季对流天气频率增多, 降水量大, 能量交换充分, 能量闭合情况最好。

本研究结果表明, 西双版纳勐腊县补蚌热带季雨林的 Res 与不闭合度相匹配, 与窦军霞等^[42]对西双版纳热带季节雨林定位观测样地的热储量研究结果相比, 补蚌热带季雨林的冠层下 LE、Hs 偏低, 根据本文热储量计算方法, 通量塔仅在林下 1.4 m 和冠层 62.1、68.1、77.7 m 处安装温度和水汽压检测仪器, 缺少中间层数据, 导致计算出的显热潜热值被低估。但热储量仅占残余量的小部分, 除了忽略 S 会低估生态系统能量闭合度外, 能量平衡还受其他因素影响。能量闭合可能与湍流强度有关, 当湍流交换不足时, 涡度相关系统监测的结果会偏低, 导致湍流通量一定程度的低估^[43]。西双版纳是著名的静风区, 风速小, 摩擦风速的大小决定着生态系统和大气间物质和能量的传输, 湍流强度随摩擦风速的增大而增强, 显热和潜热的交换更加充分, 能量闭合度就会增大。夜间摩擦风速绝大多数小于 0.2 m/s, 大气层结稳定, 湍流强度弱, 湍流通量和有效能量之间的差距大, 能量闭合度不好。白天日出后, 太阳辐射不断加热地面, 温度不均匀使得近地面层气流交换加剧, 稳定层被打破^[21], 白天的能量闭合度会高于夜间。地形因素也可能是造成能量不闭合的原因之一, Aubinet^[19]和 Lee^[40]认为地形不平坦, 起伏较大的地方能量难以闭合, Stoy 等^[11]分析了 FLUXNET 中 193 个站点的数据, 也认为能量闭合度与地形和植物类型的异质性有显著关系。本研究的通量观测塔处于山谷中, 四周的地势高, 能量和水汽易向低处转移, 造成部分能量的流失, 导致能量闭合度较差。在亚洲的水和能量通量研究中 EBR 约为 0.5~0.99,

其中地形起伏的森林(0.77)和湿地(0.76)的 EBR 值小于相对平坦的农田(0.80)和草地(0.84), 亚洲大部分地形的不平坦造成了能量的普遍不平衡问题^[44]。

涡度相关系统是目前主要的通量监测设备, 可以长期连续观测能量的变化, 揭示下垫面与大气间的能量和物质交换过程和分配特征。根据热力学第一定律, 能量平衡等式可以成立, 但不同植物群落的涡度通量监测结果显示, 能量难以闭合, 这是普遍存在的现象。并且由于下垫面地势多变, 以及不同纬度带气候因子差异, 不同生态系统的能量分配和能量平衡情况各异, 能量不闭合问题和地气之间的物质能量交换过程是研究人员一直致力于去解决的难题, 之前的研究发现能量不闭合有多方面的原因, 如冠层表面异质性、地形、时间尺度差异造成的高低频损失和忽略下垫面热储量等。能量闭合研究对区域通量的定量估计有重要意义, 在西双版纳热带季雨林, 湍流交换不充分, 在此开展通量监测, 会在一定程度上低估 LE 和 Hs, 并且低估的主要是 LE (待发表), 导致能量闭合度低于平均水平^[23]。在大多数区域, 造成能量不闭合的原因中热储量占关键位置, 考虑热储量后能量闭合情况有明显改善。但在该地区, 高大茂密林冠储存的热量对能量平衡闭合的贡献不大, 研究表明, 摩擦风速是影响研究区能量闭合状况的主要原因, 闭合度最好的情况出现在摩擦风速较大的时候, 但仍然有部分能量被低估(待发表)。气象因素、大气稳定性和仪器误差等也可能会影响数据的可靠性, 因此, 对于研究区域的能量闭合问题研究还有待进一步深入。

参考文献

- [1] VALENTINI R, MATTEUCCI G, DOLMAN A J, et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests [J]. *Nature*, 2000, 404(6780): 861–865. doi: 10.1038/35009084.
- [2] BALDOCCHI D D, HINCKS B B, MEYERS T P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods [J]. *Ecology*, 1988, 69(5): 1331–1340. doi: 10.2307/1941631.
- [3] HUENNEKE L F, ANDERSON J P, REMMENGA M, et al. Desertification alters patterns of aboveground net primary production in Chihuahuan ecosystems [J]. *Glob Chang Biol*, 2002, 8(3): 247–264. doi: 10.1046/j.1365-2486.2002.00473.x.
- [4] SUTER S, HOELZLE M, OHMURA A. Energy balance at a cold alpine fir saddle, Seserjoch, Monte Rosa [J]. *Int J Climatol*, 2004, 24(11): 1423–1442. doi: 10.1002/joc.1079.
- [5] LINDROTH A, IRITZ Z. Surface energy budget dynamics of short-rotation willow forest [J]. *Theor Appl Climatol*, 1993, 47(3): 175–185.

- doi: 10.1007/BF00867449.
- [6] CUI W H, CHUI T F M. Temporal and spatial variations of energy balance closure across FLUXNET research sites [J]. *Agric For Meteorol*, 2019, 271: 12–21. doi: 10.1016/j.agrformet.2019.02.026.
- [7] State Forestry Administration. Notice of the State Forestry Administration on printing and distributing the national tropical rain forest protection plan (2016–2020) [EB/OL]. (2016-08-31) [2016-10-11]. http://www.lydxx.com/h-nd-565.html#_np=102_509.
国家林业局. 国家林业局关于印发《全国热带雨林保护规划(2016—2020年)》的通知 [EB/OL]. (2016-08-31) [2016-10-11]. http://www.lydxx.com/h-nd-565.html#_np=102_509.
- [8] ZHANG R, DONG T F, DENG X B, et al. Vegetation numerical classification and ordination of a 20-hectare tropical forest plot in Xishuangbanna, southwest Yunnan [J]. *Chin J Ecol*, 2018, 37(2): 347–352. doi: 10.13292/j.1000-4890.201802.028.
张容, 董廷发, 邓晓保, 等. 西双版纳20公顷样地热带森林植被数量分类与排序 [J]. *生态学杂志*, 2018, 37(2): 347–352. doi: 10.13292/j.1000-4890.201802.028.
- [9] LAN G Y, HU Y H, CAO M, et al. Establishment of Xishuangbanna tropical forest dynamics plot: Species compositions and spatial distribution patterns [J]. *J Plant Ecol*, 2008, 32(2): 287–298. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2008.02.006.
兰国玉, 胡跃华, 曹敏, 等. 西双版纳热带森林动态监测样地——树种组成与空间分布格局 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(2): 287–298. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2008.02.006.
- [10] ZHANG Y P, TAN Z H, SONG Q H, et al. Respiration controls the unexpected seasonal pattern of carbon flux in an Asian tropical rain forest [J]. *Atmos Environ*, 2010, 44(32): 3886–3893. doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.07.027.
- [11] STOY P C, MAUDER M, FOKEN T, et al. A data-driven analysis of energy balance closure across FLUXNET research sites: The role of landscape scale heterogeneity [J]. *Agric For Meteorol*, 2013, 171/172: 137–152. doi: 10.1016/j.agrformet.2012.11.004.
- [12] LI Z Q, YU G R, WEN X F, et al. Energy balance closure at China FLUX sites [J]. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2005, 48(S1): 51–62. doi: 10.1360/05zd0005.
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: 地球科学)*, 2005, 48(S1): 51–62. doi: 10.1360/05zd0005.
- [13] LINDROTH A, MÖLDER M, LAGERGREN F. Heat storage in forest biomass improves energy balance closure [J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(41): 301–313. doi: 10.5194/bg-7-301-2010.
- [14] 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.
- [15] MCCAUGHEY J H. Energy balance storage terms in a mature mixed forest at Petawawa, Ontario: A case study [J]. *Bound-Lay Meteorol*, 1985, 31(1): 89–101. doi: 10.1007/BF00120036.
- [16] ZHANG Y P, SHA L Q, YU G R, et al. Annual variation of carbon flux and impact factors in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, SW China [J]. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2006, 49(2): 150–162. doi: 10.1007/s11430-006-8150-4.
- [17] ZHANG K Y. A preliminary analysis of the characteristics of the climate and its formation factors in southern Yunnan [J]. *Acta Meteor Sin*, 1963, 33(2): 218–230. doi: 10.11676/qxxb1963.021.
张克映. 滇南气候的特征及其形成因子的初步分析 [J]. *气象学报*, 1963, 33(2): 218–230. doi: 10.11676/qxxb1963.021.
- [18] LIU W J, ZHANG Y P, LI H M, et al. Fog drip and its relation to groundwater in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, southwest China: A preliminary study [J]. *Water Res*, 2005, 39(5): 787–794. doi: 10.1016/j.watres.2004.12.002.
- [19] TAN Z H, ZHANG Y P, SONG Q H, et al. Leaf shedding as an adaptive strategy for water deficit: A case study in Xishuangbanna's rainforest [J]. *J Yunnan Univ (Nat Sci)*, 2014, 36(2): 273–280.
谭正洪, 张一平, 宋清海, 等. 落叶作为热带雨林水分亏缺适应对策的研究: 以西双版纳热带雨林为例 [J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(2): 273–280.
- [20] AUBINET M, GRELLA A, IBROM A, et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology [J]. *Adv Ecol Res*, 1999, 30: 113–175. doi: 10.1016/S0065-2504(08)60018-5.
- [21] WEBB E K, PEARMAN G I, LEUNING R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1980, 106(447): 85–100. doi: 10.1002/qj.49710644707.
- [22] TAN Z H, ZHANG Y P, YU G R, et al. Spatial and temporal dynamics of CO₂ concentration and its causes in Xishuangbanna tropical seasonal rain forest, China [J]. *J Plant Ecol*, 2008, 32(3): 555–567. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2008.03.004.
谭正洪, 张一平, 于贵瑞, 等. 热带季节雨林林冠上方和林内近地层 CO₂ 浓度的时空动态及其成因分析 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 555–567. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2008.03.004.
- [23] FANG C Y, JIANG H, NIU X D, et al. Energy flux and balance analysis of evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest in Tianmu Mountain during growing season [J]. *J Fujian Agric For Univ (Nat Sci)*, 2016, 45(4): 391–397. doi: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2016.04.005.
方成圆, 江洪, 牛晓栋, 等. 天目山常绿、落叶阔叶混交林生长季能量通量及平衡分析 [J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2016, 45(4): 391–397. doi: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2016.04.005.
- [24] WILSON K, GOLDSTEIN A, FALGE E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites [J]. *Agric For Meteorol*, 2002, 113(1/2/3/4): 223–243. doi: 10.1016/S0168-1923(02)00109-0.
- [25] TAJCHMAN S J. Comments on measuring turbulent exchange within

- and above forest canopy [J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 1981, 62(11): 1550–1559. doi: 10.1175/1520-0477(1981)062<1550:COMTEW>2.0.CO;2.
- [26] 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]. *J Geophys Res Atmos*, 1997, 102(D24): 28915–28927. doi: 10.1029/97JD00193.
- [27] OLIPHANT A J, GRIMMOND C S B, ZUTTER H N, et al. Heat storage and energy balance fluxes for a temperate deciduous forest [J]. *Agric For Meteorol*, 2004, 126(3/4): 185–201. doi: 10.1016/j.agrformet.2004.07.003.
- [28] ZHANG X J, YUAN F H, CHEN N N, et al. Energy balance and evapotranspiration in broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountains [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, 22(3): 607–613. doi: 10.13287/j.1001-9332.2011.0125.
- 张新建, 袁凤辉, 陈妮娜, 等. 长白山阔叶红松林能量平衡和蒸散 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 607–613. doi: 10.13287/j.1001-9332.2011.0125.
- [29] GRACHE A A, FAIRALL C W, BLOMQUIST B W, et al. On the surface energy balance closure at different temporal scales [J]. *Agric For Meteorol*, 2020, 281: 107823. doi: 10.1016/j.agrformet.2019.07823.
- [30] CHEN C. Observational study of surface energy balance and energy closure in the farmland ecosystems in Huaihe River Basin [D]. Anhui: Anhui Agricultural University, 2012.
- 陈琛. 淮河流域农田生态系统能量平衡与闭合研究 [D]. 安徽: 安徽农业大学, 2012.
- [31] ZHOU Y, GE J W, PENG F J, et al. Energy flux and balance analysis of Dajiuhu peatland in Shennongjia [J]. *J Hydroecol*, 2019, 40(4): 14–21. doi: 10.15928/j.1674-3075.2019.04.003.
- 周颖, 葛继稳, 彭凤姣, 等. 神农架大九湖泥炭湿地能量通量及平衡分析 [J]. *水生态学杂志*, 2019, 40(4): 14–21. doi: 10.15928/j.1674-3075.2019.04.003.
- [32] NIU X D, LIU X J, LIU S R, et al. Energy balance characteristics of a natural oak forest (*Quercus aliena*) at a transitional area from a subtropical to warm temperate climate, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, 38(18): 6701–6711. doi: 10.5846/stxb201803290650.
- 牛晓栋, 刘晓静, 刘世荣, 等. 亚热带-暖温带过渡区天然栎林的能量平衡特征 [J]. *生态学报*, 2018, 38(18): 6701–6711. doi: 10.5846/stxb201803290650.
- [33] ZHOU Z. Study on microclimate characteristics of tropical mountain rainforest in Jianfengling, Hainan Island [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009.
- 周璋. 海南尖峰岭热带山地雨林小气候特征研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [34] YAN J H, ZHOU G Y, WEI Q. Environment of microclimate of monsoon evergreen broad-leaves forest in Dinghushan [J]. *J Wuhan Bot Res*, 2000, 18(5): 397–404. doi: 10.3969/j.issn.2095-0837.2000.05.009.
- 闫俊华, 周国逸, 韦琴. 鼎湖山季风常绿阔叶林小气候特征分析 [J]. *武汉植物学研究*, 2000, 18(5): 397–404. doi: 10.3969/j.issn.2095-0837.2000.05.009.
- [35] TAN Z H, YU G R, ZHOU G Y, et al. Microclimate of forests across East Asia biomes: 1. Radiation and energy balance [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2015, 39(6): 541–553. doi: 10.17521/cjpe.2015.0052.
- 谭正洪, 于贵瑞, 周国逸, 等. 亚洲东部森林的小气候特征: 1. 辐射和能量的平衡 [J]. *植物生态学报*, 2015, 39(6): 541–553. doi: 10.17521/cjpe.2015.0052.
- [36] SUN C, JIANG H, CHEN J, et al. Energy flux and balance analysis of *Phyllostachys edulis* forest ecosystem in subtropical China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, 35(12): 4128–4136. doi: 10.5846/stxb201308272161.
- 孙成, 江洪, 陈健, 等. 亚热带毛竹林生态系统能量通量及平衡分析 [J]. *生态学报*, 2015, 35(12): 4128–4136. doi: 10.5846/stxb201308272161.
- [37] CHEN S P, CHEN J Q, Lin G H, et al. Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types [J]. *Agric For Meteorol*, 2009, 149(11): 1800–1809. doi: 10.1016/j.agrformet.2009.06.009.
- [38] TRENBERTH K E, FASULLO J T, KIEHL J. Earth's global energy budget [J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 2009, 90(3): 311–324. doi: 10.1175/2008BAMS2634.1.
- [39] LIU W J, ZHANG Y P, LI H M, et al. Fog characteristics in a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, southwest China [J]. *Acta Phytocool Sin*, 2004, 28(2): 264–270. doi: 10.17521/cjpe.2004.0039.
- 刘文杰, 张一平, 李红梅, 等. 西双版纳热带季节雨林内雾特征研究 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28(2): 264–270. doi: 10.17521/cjpe.2004.0039.
- [40] LEE X, BLACK T A. Atmospheric turbulence within and above a douglas-fir stand, Part II: Eddy fluxes of sensible heat and water vapour [J]. *Bound-Lay Meteorol*, 1993, 64(4): 369–389. doi: 10.1007/BF00711706.
- [41] WILSON K B, BALDOCCHI D D. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America [J]. *Agric For Meteorol*, 2000, 100(1): 1–18. doi: 10.1016/S0168-1923(99)00088-X.
- [42] DOU J X, ZHANG Y P, YU G R, et al. A preliminary study on the heat storage fluxes of a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna [J]. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2006, 49(2): 163–173. doi: 10.1007/s11430-006-8163-z
- 窦军霞, 张一平, 于贵瑞, 等. 西双版纳热带季节雨林热储量初步研究 [J]. *中国科学: D辑 地球科学*, 2006, 49(2): 163–173. doi: 10.1007/s11430-006-8163-z
- [43] DING R S, KANG S Z, LI F S, et al. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China [J]. *Agric Water Manage*, 2010, 98(1): 87–95. doi: 10.1016/j.agwat.2010.08.001.
- [44] KANG M, CHO S. Progress in water and energy flux studies in Asia: A review focused on eddy covariance measurements [J]. *J Agric Meteorol*, 2021, 77(1): 2–23. doi: 10.2480/agrmet.D-20-00036.