

DOI: 10.5846/stxb201411062195

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.

Yuan W W, Tong X J, Zhang J S, Meng P, Li J, Zheng N. Characteristics of energy balance of a mixed plantation in the Xiaolangdi area in the growing season. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13): 4492-4499.

黄河小浪底人工混交林生长季能量平衡特征

原文文¹, 同小娟^{1,*}, 张劲松², 孟平², 李俊³, 郑宁²

1 北京林业大学林学院, 北京 100083

2 中国林业科学研究院林业研究所 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091

3 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101

摘要:利用涡度相关系统和小气候梯度观测系统,对黄河小浪底人工混交林 2012 年生长季(5—9 月)各能量通量进行了连续观测,分析了该生态系统能量平衡各项的变化特征,讨论了能量闭合状况。结果表明:潜热通量、感热通量和土壤热通量均与净辐射有类似的日变化特征。各项的绝对值大小表现为净辐射>潜热通量>感热通量>土壤热通量。受日照时数的影响,5—9 月能量平衡各项正值的日持续时间逐渐缩短。生长季,净辐射、感热通量和土壤热通量在 6 月份最大,最大值分别为 418.5、231.4 和 12.5 MJ m⁻² month⁻¹);潜热通量在 7 月份达到最大,最大值为 320.8 MJ m⁻² month⁻¹)。潜热通量、感热通量和土壤热通量占净辐射的比例分别在 0.48—0.62、0.15—0.55、0.02—0.05 之间。人工混交林生长季的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。波文比呈单峰曲线:6 月最大,8 月最小。黄河小浪底人工混交林生长季全天能量闭合度为 79%。其中,白天闭合程度较高(81%),夜晚较低(41%)。本研究站点存在 21%的能量不闭合。其原因可能与通量源区面积不匹配、忽略冠层热储存、湍流能的相位差等有关。

关键词:人工混交林; 涡度相关; 能量平衡; 波文比; 能量闭合

Characteristics of energy balance of a mixed plantation in the Xiaolangdi area in the growing season

YUAN Wenwen¹, TONG Xiaojuan^{1,*}, ZHANG Jinsong², MENG Ping², LI Jun³, ZHENG Ning²

1 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China

3 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Energy balance in the terrestrial ecosystem plays an important role in regional climate and water balance. By using the open-path eddy covariance and micrometeorological observation systems, turbulent energy fluxes and available energy were measured in a mixed plantation in the Xiaolangdi area in the North China during the growing season of 2012 (May–September). The diurnal and monthly variations of energy balance terms were analyzed, and energy closure and Bowen ratio were discussed. The results showed that the diurnal variation of energy balance terms were similar to that of net radiation, and the variation order of energy balance terms was net radiation>latent heat flux>sensible heat flux>soil heat flux. The time of keeping positives for energy balance terms in a day became shorter from May to September as energy balance terms were influenced by sunshine hour. The maximal net radiation occurred in June with a value of 418.5 MJ m⁻²

基金项目:国家自然科学基金(31100322); 国家林业局公益性行业项目(GYHY20110400904); 北京林业大学科技创新计划项目(YX2011-19)

收稿日期:2014-11-06; **网络出版日期:**2015-01-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tongxjsxbs@sina.com

month⁻¹, and the minimum in September with a value of 309.3 MJ m⁻² month⁻¹. Latent heat flux peaked in July, with a value of 320.8 MJ m⁻² month⁻¹. The maximal sensible heat and soil heat fluxes appeared in June, with the values of 231.4 and 12.5 MJ m⁻² month⁻¹, respectively. During the growing season, the proportions of latent heat, sensible heat and soil heat fluxes to net radiation ranged between 0.48 and 0.62, 0.15 and 0.55, 0.02 and 0.05, respectively. It is indicated that energy distribution was mainly latent heat and sensible heat fluxes in the growing season of the mixed plantation, and latent heat flux was as twice as sensible heat flux. Bowen ratio (β) can be used to indicate energy exchange between the land surface and the atmosphere. The monthly variation of Bowen ratio was obvious in the growing season, and the maximum and minimum occurred in June and August, respectively. Energy balance closure is regarded as a standard evaluating the reliability of the eddy covariance measurement at FLUXNET sites. Energy imbalance is about 10%—30% in the most FLUXNET sites. For the mixed plantation during the growing season, energy balance closure in the whole day was 79% on a half hourly basis, and with the highest in the daytime and lowest at nighttime. Energy imbalance was about 21% in the Xiaolangdi station in the growing season of 2012. Energy imbalance may result from the complex land surface, the sampling mismatch between the flux footprint and the sensors measuring other components of energy balance, ignoring heat storage of the canopy, the phase difference of turbulent energy.

Key Words: mixed plantation; eddy covariance; energy balance; bowen-ratio; energy balance closure

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^[1]。陆地生态系统的能量平衡特征是生态系统与大气间相互作用研究的重要内容之一^[2],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^[3-4]。能量平衡是森林生态学研究的重点问题之一。森林对能量的再分配对区域乃至全球气候有着重要的影响^[5]。第八次全国森林资源清查结果显示:全国人工林面积为 0.69 亿 hm²,蓄积量 24.83 亿 m³,位居世界首位。我国森林碳储量的增加主要与人工造林有关^[6]。与天然林相比,人工林具有生长迅速、生长量大的特点。这决定了人工林有别于天然林的水、热交换特征及影响机制。研究人工林的能量平衡闭合状况,分析能量各分量的分配特征,有助于揭示生态系统水分和能量平衡过程,为今后指导林业生产有一定的实践意义。

基于微气象学的涡度相关技术为森林生态系统能量平衡特征的研究提供了可能^[7-10]。截至 2009 年 3 月底,全球不同地区已建立了 576 个通量站(<http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet>)。与此同时,如何评价涡度相关观测数据的可信度成为人们共同关注的焦点。国际通量网(FluxNet)观测站点都把能量闭合状况分析作为评价通量数据质量的标准^[11-12]。近年来,在热带、亚热带、温带森林开展了大量的能量通量特征和能量闭合方面的研究^[13-20]。如 Wu 等^[13]对长白山阔叶红松林能量平衡特征研究指出,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%。对于亚热带雷竹林,感热通量和潜热通量占净辐射的比例为 79%^[18]。对森林生态系统能量闭合研究发现,在通量站点中存在 10%—30% 能量不闭合度^[18,21-26]。白天能量平衡度高于夜间^[21,27-28],冬季能量平衡度高于夏季^[14]。

本文以华北南部丘陵山地栓皮栎-侧柏-刺槐人工混交林生态系统为例,利用生长季内的净辐射、土壤热通量、感热和潜热通量数据分析该生态系统能量各分量在不同时间尺度上的变化特征,探讨能量闭合状况;研究结果为准确评估人工混交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黄河小浪底森林生态定位研究站进行。该站位于河南省济源市(35°01'N、112°28'E,海拔 410 m)。研究区属暖温带亚湿润季风气候。年平均气温 12.4℃,年平均降水量 641.7 mm。受季风气候影响,降水季节分配不均匀,5—9 月平均降水量为 438.0 mm,占全年的 68.3%。生长季风向以东北偏东、西

南为主。研究区主要树种为栓皮栎 (*Quercus variabilis*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*), 林龄分别为 32、30 和 28a, 平均株高分别为 10.5、8.2 和 9.3 m。生长季植被叶面积指数 (LAI) 最大为 6.3。

通量观测塔周围 1.8 km² 范围内坡度平均为 14°, 林木覆盖率约为 96.0%, 栓皮栎、侧柏、刺槐所占比例分别为 80%、8% 和 12%。

1.2 涡动相关系统和小气候梯度观测系统

涡度相关系统主要由 CSAT3 型三维超声风速仪 (Campbell Sci. Inc., USA) 和快速响应的 LI-7500 型开路红外 CO₂/H₂O 分析仪 (Li-Cor. Inc., USA) 组成, 安装高度距地面 30 m。上述仪器均与 CR5000 型数据采集器 (Campbell Sci. Inc., USA) 相连, 昼夜连续自动采集, 原始数据采样频率为 10 Hz, 每 30 min 输出 1 组平均值。

小气候梯度观测系统包括 7 层 AR-100 型 3 杯风速计 (Vector Instruments, UK) 和 7 层 HMP-45C 型温湿度传感器 (Vaisala, Finland) (安装高度分别为 7、10、11、13、17、24、31 m)。此外, 对净辐射表 (CNR-1, Kipp and Zonen)、总辐射表 (CM11, Kipp and Zonen)、气压计 (Model 52203) 和雨量计 (RM Yong, Inc) 等进行了观测。土壤温度传感器 (Model TCAV, Campbell Scientific) 分别安装于地表、地下 5、10、20 cm。土壤湿度用土壤水分传感器 (EC5-H₂O, Decagon Inc. USA) 采集, 采集深度为土壤 20 cm 深处。通过 AR5 数据采集器 (Avalon Inc., USA) 自动采集记录土壤水分数据。

1.3 数据处理

利用英国爱丁堡大学发展的 EdiRe 软件对采样频率为 10 Hz 的原始湍流数据进行再处理。数据处理过程包括异常值 (含野点) 去除、延迟时间校正、坐标旋转、频率损失订正、感热通量超声虚位温修正以及 WPL 修正等必要的修正^[29]。同时, 剔除了夜间摩擦速度 < 0.35 m/s 的通量数据。当仪器出现故障、人为影响以及雨天或清晨有露水时, 所得的异常值应当剔除。对以上经过初步筛选的数据计算出各月平均值和方差, 与平均值相差超过 3 倍方差的数值也要剔除掉。利用下列方法插补被去除的数据和缺失的数据: 小于 2h 的缺失数据用线性内插法插补; 大于 2h 的缺失数据采用平均日变化法 (MDV) 进行插补^[30]。

1.4 波文比的计算

波文比 (β) 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:

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (1)$$

式中, H 为感热通量 (W/m²), LE 为潜热通量 (W/m²)。

1.5 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^[10]:

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

式中, R_n 为净辐射 (W/m²), H 为感热通量 (W/m²), LE 为潜热通量 (W/m²), G 为土壤热通量 (W/m²), S 为冠层热储量 (W/m²), Q 为附加能量源汇的总和 (W/m²)。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^[31]:

$$LE + H = R_n - G \quad (3)$$

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、简化主轴法 (RMA) 线性回归、能量平衡比率 (EBR) 和能量平衡相对残差 (δ) 频率等^[27-28]。本文采用线性回归来分析黄河小浪底人工混交林生长季能量闭合状况。

2 结果与分析

2.1 能量闭合度

能量闭合状况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。Willson^[21]等通过分析 22 个 FLUXNET 站点能量平衡的闭合状况,发现通量观测中普遍存在 10%—30% 的不闭合。本文对小浪底人工混交林生长季全天、白天和夜间的能量闭合度进行了分析(图 1 和表 1)。人工混交林湍流能($LE+H$)小于有效能(R_n-G)。这表明涡度相关法测定的感热通量(H)与潜热通量(LE)之和小于有效能量(R_n-G);人工混交林生态系统存在能量不平衡现象。从图 1 中可以发现,当(R_n-G)为负时(尤其是夜间),($LE+H$)出现低估现象。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^[32]。

人工混交林白天的能量闭合度最大(81%),全天次之(79%),夜间最低(41%)。本研究所得全天和白天能量闭合度与部分国外较为成熟的通量网络森林台站的相关研究结果相一致^[21,33]。这说明采用涡度相关法获得的黄河小浪底人工混交林的通量观测数据是比较可靠的。林分结构基本稳定且具有一定的同质性。此外,该通量塔观测区域具有足够的风浪区,基本满足研究范围足够大、下垫面均一的要求。同时,涡度相关观测系统的高度正好位于与风向方向上的均匀下垫面长度之比小于 1/100 的地方,因此通量数据质量良好^[34]。

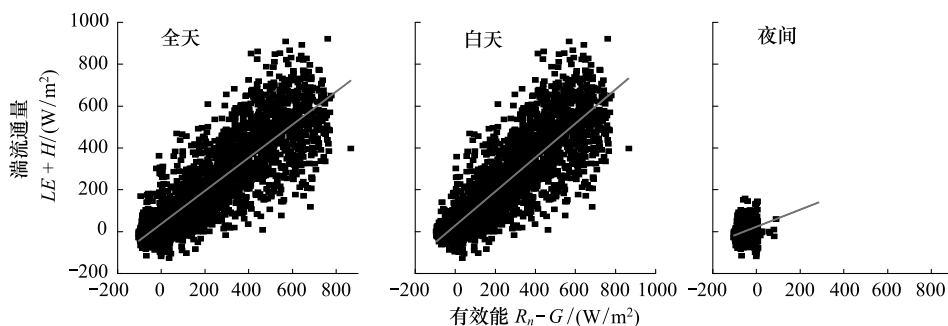


图 1 涡度相关观测的 2012 年人工混交林生长季的能量闭合分析

Fig.1 Analysis on energy balance closure of EC measurement in the mixed plantation in the growing season of 2012

表 1 湍流能($LE+H$)和有效能(R_n-G)的线性回归

Table 1 Linear regression of turbulent energy fluxes and available energy

观测时期 Period	斜率 Slope	截距 Intercept	R^2
全天 Whole day	0.79	37.04	0.79
白天 Daytime	0.81	30.08	0.74
夜间 Night	0.41	22.91	0.08

2.2 能量平衡各分量的日变化

人工混交林能量平衡各分量各月的平均日变化均呈明显的单峰型曲线(图 2)。日较差都表现为净辐射>潜热通量>感热通量>土壤热通量。日出时,各分量由负值变为正值;在日落时,各分量由正值变为负值。受可照时数的影响,6—9 月各分量正值持续时间不断缩短,负值持续时间则相应变长;6 月的正值持续时间大约为 12h,而 9 月则只有 9h。

在人工混交林生长季,白天净辐射最大出现在 6 月份,中午最大值为 566 W/m^2 ;5、7 和 8 月次之,中午平均最大值在 $499\text{—}527 \text{ W/m}^2$ 之间;9 月最小,为 495 W/m^2 (图 2)。净辐射的上述变化特征主要与太阳高度角、水汽和云况有关。夜间净辐射负极值变化不大,极值一般在 $-30\text{—}-66$ 之间,5 月负值较大可达 -66 W/m^2 。

生长季,潜热通量各月平均日变化中白天平均最大值在 $281\text{—}417 \text{ W/m}^2$ 之间变动(图 2)。夜间波动较大,极值一般在 $-35\text{—}4 \text{ W/m}^2$ 。白天感热通量平均最大值在 $149\text{—}468 \text{ W/m}^2$ 之间。其中,6 月份感热通量最大值可达 468 W/m^2 ,夜间感热通量极值在 $-17\text{—}-23 \text{ W/m}^2$ 之间。和能量其他分量相比,潜热通量的波动较大,可能与间歇性湍流和夜间湍流低估有关^[35]。

人工林净辐射除了以感热、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,即土壤热通量。土壤热通量比其他能量分量小 1—2 个数量级(图 2)。土壤热通量平均最大值在 $3\text{—}12 \text{ W/m}^2$ 之间。6 月

份达到最大 (12 W/m^2), 9 月份最小 (3 W/m^2), 正负发生转变的时间要比净辐射延迟 0.5—3h。不同月份由于土壤理化性质 (如土壤导热率) 不同, 影响土壤吸热散热在延迟时间上的差异, 因而在热源/汇上也有差异^[36-38]。

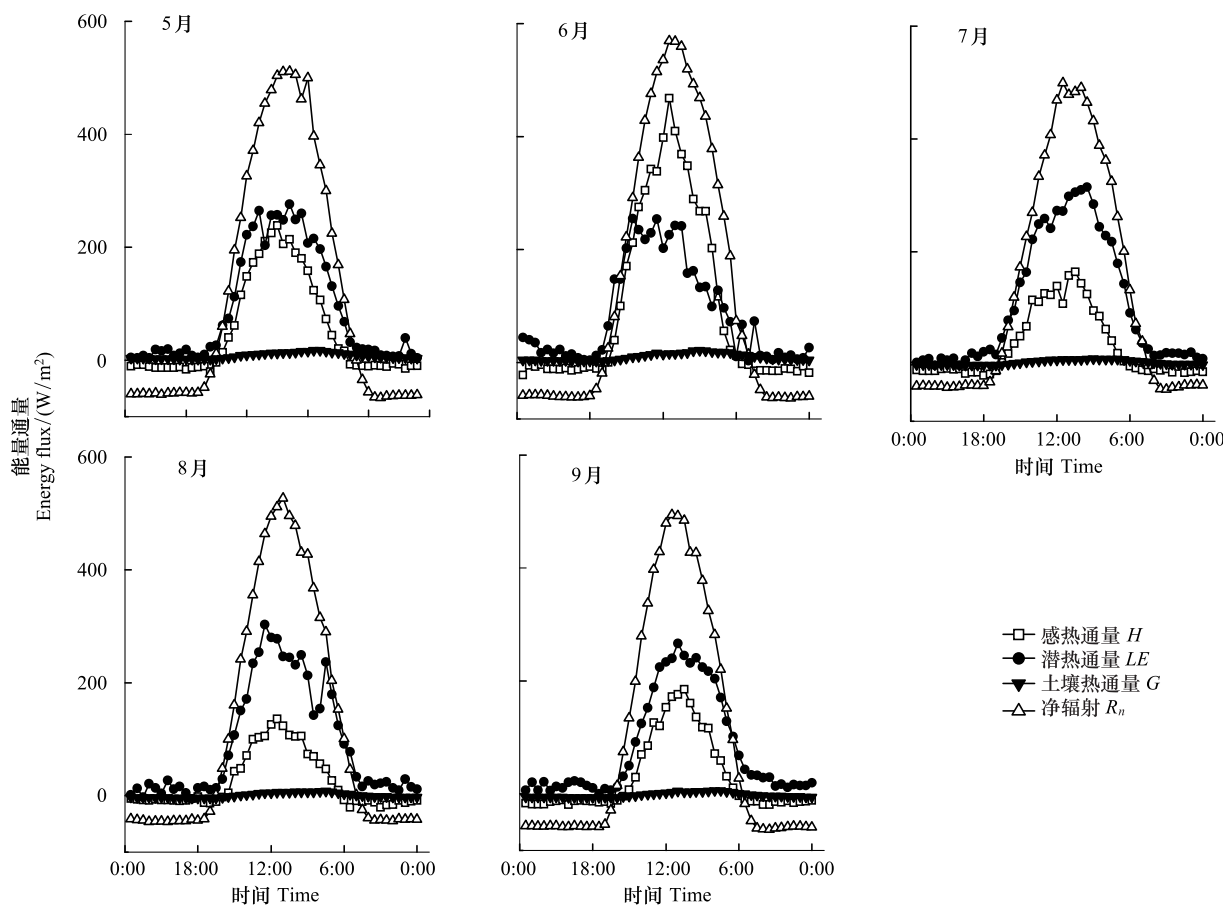


图2 黄河小浪底人工混交林生长季能量通量的月平均日变化

Fig.2 Monthly mean diurnal variations in energy flux of the mixed plantation in the Xiaolangdi area during the growing season

2.3 能量平衡各分量、波文比的季节变化

能量分量的季节变化研究一方面可以了解能量闭合状况, 另一方面可由净辐射的主要消耗项分析来判断下垫面的干湿状况。能量平衡各分量平均月总量的季节变化特点如图3所示: 潜热通量、感热通量、土壤热通量随着净辐射的变化而变化。随太阳辐射角度不断增加, 净辐射在6月最大 ($418.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ month}^{-1}$); 7、8月份由于阴雨天导致净辐射降低; 9月最小 ($309.3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ month}^{-1}$)。潜热通量最大值出现在7月份为 $320.8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ month}^{-1}$; 感热通量最大值出现在6月份为 $231.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ month}^{-1}$; 土壤热通量变化最大值出现在6月份为 $12.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ 。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(图3)。

受树木物候和气象条件的影响, 能量平衡各项占净辐射的比例存在着明显的季节变化(图4)。潜热通量占净辐射的比例在5—9月变化不大 ($0.48—0.62$); 感热通量占净辐射的比例在6月份最高 (0.55), 7、8月份最小 (0.18 和 0.15), 9月有所增加 (0.21); 土壤热通量占净辐射的比例比较小且变化不大 ($0.02—0.05$)。能量平衡各项占净辐射的比例的季节变化表明生长季消耗于植被生命活动的能量 (主要为蒸腾耗热) 比例上升, 而消耗于物理环境的能量比例下降。到达人工混交林冠层的辐射能支出项主要为感热和潜热通量。土壤热通量占净辐射的比重很小。因此, 到达人工混交林冠层的辐射能量进入人工林生态系统后, 主要以感热和潜热的形式加热大气。

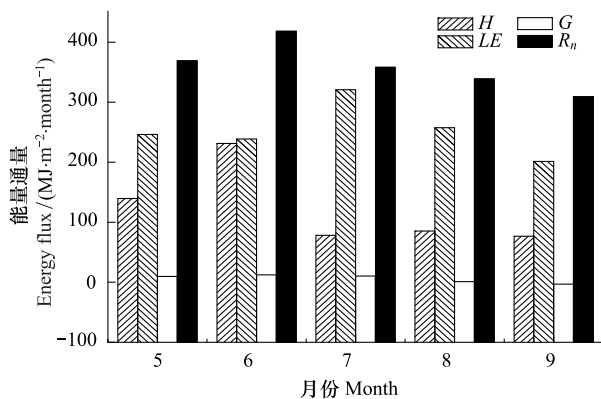


图3 能量平衡各分量月总量的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of the monthly sum of energy balance components

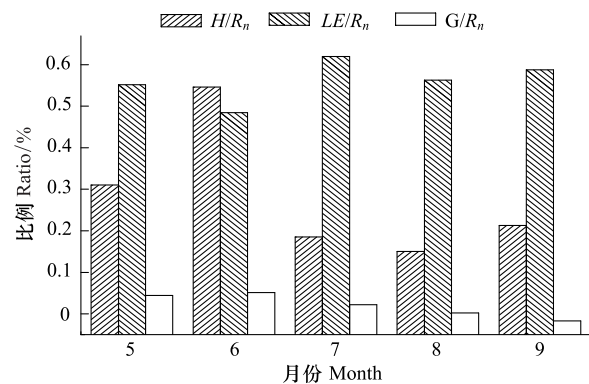


图4 各能量分量占净辐射的比例

Fig.4 The ratio of energy terms to net radiation in the mixed plantation in the growing season

波文比能够表征地表与大气间能量交换特征,多用于计算能量平衡^[39]。波文比的大小决定能量在生态系统中的分配。波文比受日出时间、净辐射、降雨量以及人工林生长过程等的共同影响^[18]。小浪底人工混交林生长季的波文比呈单峰曲线变化(图5)。6月份由于小浪底地区正处于夏季干燥的时期,降雨量少,净辐射主要用于加热大气和植被的耗能,湍流通量以感热通量为主。7、8月份随着雨季的到来,此时森林处于最旺盛生长阶段,能量主要用于生态系统的蒸散耗热,潜热通量比较大,于是造成波文比减小。9月份,波文比有所增高,净辐射分配于感热通量增多。9月份进入秋季后,枯枝落叶使得地表温度有所升高,于是增加了土壤到地表的能量交换。

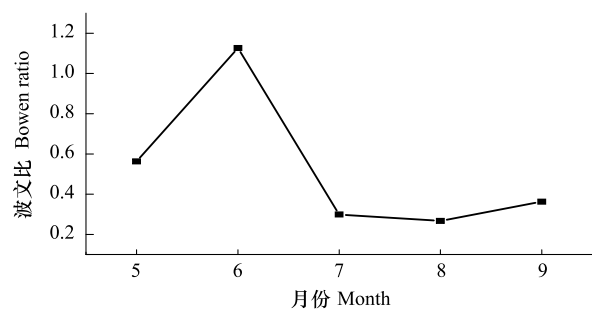


图5 波文比月变化

Fig.5 Monthly variation of β in the mixed plantation

3 结论与讨论

植物生长季,黄河小浪底人工混交林观测站能量闭合度为79%,与长白山阔叶红松林通量观测站点(80%)^[27]、浙江雷竹林生态系统(78.2%)^[18]、科尔沁草甸草地站(80.4%)^[40]接近,低于亚热带毛竹林(89%)^[20]、北京地区杨树人工林(93%)^[41]的结果,高于鼎湖山针阔混交林夏季(约53%)^[14]、新疆塔里木河下游荒漠河岸怪柳灌丛(72.3%)^[42]的能量闭合度。

人工混交林生长季能量平衡各项都与净辐射有相同的日变化特征。不论白天的正值还是夜间负值的绝对值,都表现为净辐射>潜热通量>感热通量>土壤热通量。受可照时数季节变化的影响,5—9月份各分量正负值持续时间发生相应的变化。生长季,能量消耗以潜热通量为主。土壤为明显的热汇,这可能与生长季人工林吸收的太阳辐射比较大有关。各能量分量日变化呈单峰曲线,但感热通量和潜热通量都不如净辐射平滑,这主要是由于湍流传输的间歇性所致^[35]。

能量平衡各项比例也存在一定的季节变化规律。5—9月潜热通量占净辐射的比例变化不大(0.48—0.62);感热通量所占比例在6月份最大,7、8月份最小,9月有所上升;土壤热通量所占比例在5—9月则表现为持续下降。人工混交林生长季主要以潜热通量形式加热大气,通过蒸发散消耗能量。

本研究所得波文比的单峰波动与北京杨树人工林^[41]和长白山红松林^[17]相一致。黄河小浪底人工混交林生长季波文比的变化范围为0.3—1.1,小于在黄土高原半干旱草原(0.5—3.5)^[43]、长江滩地抑螺防病林

(0.5—10)^[44]所得变化范围。生长季,人工混交林平均波文比为 0.5 左右(图 4),远大于科尔沁温带草甸(0.18)、水稻(0.06)、灌溉春小麦(0.19)的波文比^[45-46],但较草地(0.57)的要小^[46]。6 月份,人工混交林波文比大于 1;7、8 月份由于下垫面蒸散发比较大,感热通量较低,于是造成波文比较小(0.3);9 月份由于气温降低,能量被用来加热空气,潜热通量减小,波文比开始有所增加。这说明小浪底人工混交林生态系统辐射能的再分配受温度、土壤与植被的共同影响。

利用涡度相关技术测定的能量通量可以揭示不同时间尺度(如小时、日、年)上土壤-植被-大气的能量分配特征。理论上,能量闭合是成立的,但多数通量站点都存在能量不闭合现象。下垫面状况影响着能量闭合的程度。人工混交林在生长季植被叶面积指数不断发生变化的,这样会引起空气动力表明粗糙度、大气稳定度的变化^[47],导致潜热和感热测定的源区是不稳定的,于是造成潜热和感热通量测定值偏小^[48],进而导致能量不闭合。本研究在计算平衡方程时忽略冠层热储量可能造成了能量不闭合。此外,湍流能的相位差也可能是导致本研究能量不闭合的原因之一^[49]。本文只是对一个生长季的能量通量特征进行了分析,更长时间尺度上的能量平衡特征以及造成能量不闭合的原因还有待于进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] 宋长春. 湿地生态系统对气候变化的响应. 湿地科学, 2003, 1(2): 122-127.
- [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] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 郑华. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价. *生态学报*, 2004, 24(6): 1101-1110.
- [4] 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.
- [5] 李巧萍, 丁一汇. 植被覆盖变化对区域气候影响的研究进展. *南京气象学院学报*, 2004, 27(1): 131-140.
- [6] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [7] 于贵瑞, 孙晓敏. 中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征. 北京: 科学出版社, 2008: 1-676.
- [8] 于贵瑞, 方华军, 伏玉玲, 王秋凤. 区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展. *生态学报*, 2011, 31(19): 5449-5459.
- [9] 于贵瑞, 高扬, 王秋凤, 刘世荣, 申卫军. 陆地生态系统碳氮水循环的关键耦合过程及其生物调控机制探讨. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1): 1-13.
- [10] Baldocchi D, Falge E, Gu L H, Olson R, Hollinger D Y, Running S W, Authoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X, Malhi Y, Meyers J, 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.
- [11] Wilson K B, Hanson P J, Baldocchi D D. Factors controlling evaporation and energy balance partitioning beneath a deciduous forest over an annual cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 102(2/3): 83-103.
- [12] Schmid H P, Grimmer C S B, Cropley F, Offerle B, Su H B. Measurements of CO₂ and energy fluxes over a mixed hardwood forest in the mid-western United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 103(4): 357-374.
- [13] Wu J B, Guan D X, Han S J, Shi T T, Jin C J, Pei T F, Yu G R. Energy budget above a temperate mixed forest in northeastern China. *Hydrological Process*, 2007, 21(18): 2425-2434.
- [14] 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.
- [15] Li Z H, Zhang Y P, Wang S S, Yuan G E, Yang Y, Gao M. Evapotranspiration of a tropical rain forest in Xishuangbanna, southwest China. *Hydrological Process*, 2010, 24(17): 2405-2416.
- [16] Sun G, Noormets A, Gavazzi M J, McNulty S G, Chen J, Domec J C, King J S, Amaty D M, Skaggs R W. Energy and water balance of two contrasting loblolly pine plantations on the lower coastal plain of North Carolina, USA. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1299-1310.
- [17] 张新建, 袁妮娜, 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.
- [18] 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.
- [19] Igarashi Y, Tanaka N, Tanaka K, Tanaka K, Yoshifuji N, Sato T, Tantasrin C, Suzuki M. Seasonality of water and carbon dioxide exchanges at a teak plantation in northern Thailand. *Ecohydrology*, 2013, 6(1): 125-133.
- [20] 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.
- [21] 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, Verma S. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 223-243.
- [22] Barr A G, Morgenstern K, Black T A, McCaughey J H, Nesic Z. Surface energy balance closure by the eddy covariance method above three boreal forest stands and implications for the measurement of the CO₂ flux. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1/4): 322-337.
- [23] Ma Y, Wang Y, Wu R, Hu Z, Yang K, Li M, Ma W, Zhong L, Sun F, Chen X, Zhu Z, Wang S, Ishikawa H. Recent advances on the study of atmosphere land interaction observations on the Tibetan Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(7): 1103-1111.
- [24] Wen J, Wang L, Wei Z G. An overview of the LOess Plateau mesa region land surface process field EXperiment series (LOPEXs). *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13: 945-951.
- [25] Su Z, Timmermans W J, van der Tol C, Dost R, Bianchi R, Gómez J A, House A, Hajnsek I, Menenti M, Magliulo V, Esposito M, Haarbrink R, Bosveld F C, Rothe R, Baltink H K, Vekerdy Z, Sobrino J A, Timmermans J, van Laake P, Salama S, van der Kwast H, Claassen E, Stolk A, Jia L, Moors E, Hartogensis O, Gillespie A. EAGLE 2006-Multi-purpose, multi-angle and multi-sensor in-situ and airborne campaigns over grassland and forest. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(6): 833-845.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 田红, 伍琼, 童应祥. 安徽省寿县农田能量平衡评价. *应用气象学报*, 2011, 22(3): 356-361.
- [29] 王介民, 王维真, 刘绍民, 马明国, 李新. 近地层能量平衡闭合问题——综述及个例分析. *地球科学发展*, 2009, 24(7): 705-712.
- [30] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grunwald T, Hollinger D, Jensen N, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J, Pilegaard K, Rannik U, Rebmann J, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43-69.
- [31] Sauer T J, Hatfield L, Prueger J H, Norman J M. Surface energy balance of a corn residue-covered field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 89(3/4): 155-168.
- [32] 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.
- [33] Heijmans M, Arp W J, Chapin F S. Carbon dioxide and water vapor exchange from understory species in boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 123(3/4): 135-147.
- [34] 郑宁, 张劲松, 孟平, 黄辉, 高俊, 贾长荣, 任迎丰. 基于闪烁仪观测低丘山地人工混交林通量印痕与源区分布. *地球科学进展*, 2010, 25(11): 1175-1186.
- [35] 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.
- [36] 王旭, 周国逸, 孙阁, 张德强, 闫俊华, 赵辉. 亚热带针阔混交林辐射通量特征. *北京林业大学学报*, 2006, 28(5): 28-34.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 徐亚琪, 陈妮娜, 高西宁, 关德新. 科尔沁草甸草地生长季能量平衡特征. *气象与环境学报*, 2012, 28(3): 31-36.
- [41] 张燕. 北京地区杨树人工林能量平衡和水量平衡[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [42] 马虹, 陈亚宁, 李卫红. 荒漠河岸柽柳(*Tamarix chinensis*) 灌丛的能量平衡特征. *中国沙漠*, 2014, 34(1): 108-117.
- [43] 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. *生态学报*, 2011, 31(22): 6866-6876.
- [44] 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[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.
- [45] 李辉东, 关德新, 袁凤辉, 任艳, 王安志, 金昌杰, 吴家兵. 科尔沁温带草甸能量平衡的日季变化特征. *应用生态学报*, 2014, 25(1): 69-76.
- [46] 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.
- [47] 郭建侠, 卞林根, 戴永久. 玉米生育期地表能量平衡的多时间尺度特征分析及不平衡原因的探索. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(9): 1103-1111.
- [48] Ding R S, Kang S Z, Li F S, Zhang Y Q, Ling T, Sun Q T, Kang S Z. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(1): 87-95.
- [49] 刘渡, 李俊, 同小娟, 于强. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作田能量闭合状况分析. *中国农业气象*, 2012, 33(4): 493-499.