第 25 卷第 10 期
2005 年 10 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol. 25, No. 10
Oct., 2005

东北阔叶红松林能量平衡特征

吴家兵[1,2], 关德新[1*], 赵晓松[1], 韩士杰[1], 金昌杰[1], 于贵瑞[3]

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 采用涡度相关法, 结合小气候观测, 对东北阔叶红松林的能量平衡特征进行了研究。结果表明, 森林全年获得的辐射能量为 2.3×10^9 J/m^2, 平均净辐射(Rn)强度为 72.1 W/m^2, 12 月最小, 平均为 5.8W/m^2, 6 月最大, 平均为 127 W/m^2。除了受太阳高度角的支配, Rn 对中小尺度天气变化响应显著。非生长季, 森林主要能量支出项为感热通量(H), 约占 Rn 的 72%, H 最大值出现在 5 月份; 生长季, 主要能量支出项为潜热通量(LE), 约占 Rn 的 60%, LE 最大值出现在 7 月份。全年因蒸散消耗的能量为 1.2×10^9 J/m^2, 占净辐射的 52%, 森林蒸散的水量为 493mm, 占降水量的 88%。波文比 β 近似呈 U 字型变化, 其值受森林物候变化影响显著, 在非生长季平均值约为 3.0, 生长季为 0.5 左右。土壤热通量(G)在非生长季表现为能量平衡方程的收入项, 约占有效能量的 5.0%; 生长季表现为支出项, 约占有效能量的 4.0%, 其变化过程与土壤温度梯度及叶面积指数密切相关。长白山通量观测站能量平衡收支闭合度为 86%, 不闭合的原因有待于进一步的研究。

关键词: 涡度相关; 能量平衡; 阔叶红松林; 感热通量; 潜热通量

文章编号: 1000-0933(2005)10-2520-07 **中图分类号**: P422.4, Q948, S718 **文献标识码**: A

Characteristic of the energy balance in broad-leaved Korean pine forest of northeastern China

WU Jia-Bing[1,2], GUAN De-Xin[1], ZHAO Xiao-Song[1], HAN Shi-Jie[1], JIN Chang-Jie[1], YU Gui-Rui[3] (1. *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang*, 110016, *China*; 2. *Graduate Sschool of Chinese Academy of Sciences, Beijing*, 100049, *China*; 3. *Institute of Geographic Sciences and Natural Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing*, 100101, *China*). ***Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2520～2526.**

Abstract: As a part of the ChinaFlux program, components of energy balance fluxes were measured continuously over a broad-leaved Korean pine forest in northeastern China from January to December in 2003. Sensible fluxes (H) and latent heat fluxes (LE) were measured using the eddy covariance technique. The net radiation (Rn) was influenced by both solar altitude and synoptic weather changes. The yearly average intensity of Rn was 72.1 W/m^2, the minimum value of monthly average intensity was appeared in December and the maximum was in June, with the values of 5.8 W/m^{2}and 127.0 W/m^2, respectively. In growing season, the energy components were dominated by upward latent heat flux (LE). About 60% of Rn was used in evapotranspiration, which resulted in an average daily Bowen ratio (β) of 0.5. This contrasted dramatically with non-growing season, when was dominated by upward sensible heat flux (H), and nearly 72% of Rn was used in sensible heat transformation, which resulted in an average daily β of 3.0. The accumulated LE was 1.2×10^9 J/(m^2 · a), accounting for 52% of the net radiation. The annual precipitation was 558mm; comparing with 493mm of evapotranspiration, the result

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30370293); 中国科学院知识创新工程重大资助项目(KZCX1-SW-01-01A); 中国科学院沈阳应用生态研究所领域前沿资助项目

收稿日期: 2004-07-06; **修订日期**: 2005-01-25

作者简介: 吴家兵(1977～), 男, 安徽明光市人, 博士生, 助理研究员, 主要从事森林气象与森林生态研究. E-mail: bjfu_1999@hotmail.com

* **通讯作者** Author for corresponding. E-mail: bjfu_2000@hotmail.com

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30370293), Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX1-SW-01-01A), Science Frontiers Project of Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences

Received date: 2004-07-06; **Accepted date**: 2005-01-25

Biography: WU Jia-Bing, Ph. D. candidate, Assistant professor, mainly engaged in forest meteorology and forest ecology. E-mail: bjfu_1999@hotmail.com

showed that more than 88% of water was returned to the atmosphere through evapotranspiration. The seasonal change in the Bowen ratio appeared 'U' shaped, and the annual β averaged 0.72. During the non-growing season, soil heat flux (G) was acted as the incoming components of energy balance equation, which was about 5.0% to the available energy. While during the growing season, it turned to consumer, which was about 4.0% to the available energy. The magnitude and direction of G were generally influenced by soil temperature profile and leaf area index (LAI). Energy balance closure averaged 86% on a half-hourly basis with all dataset.

Key words: eddy covariance; energy balance; broad-leaved korean pine forest; sensible heat flux; latent heat flux

森林对能量的再分配对区域乃至全球的气候有着重要影响[1],同时,再分配的结果又影响着植被光合生产力的分布[2]。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。自 20 世纪 50 年代起,国外在这个方面做了大量工作[3]。特别是近 10a 来,随着涡度相关技术的发展,实现了对森林能量平衡方程的主要收支项——感热与潜热通量的直接观测,加之遥感地面信息验证的需要,在欧洲,美国、日本等国家掀起了新一轮的研究高潮[4~6]。我国对森林能量平衡的研究起步于 20 世纪 60 年代初[7],迄今为止,已对杉木人工林[8]、油松林[9]、次生栎林[10]、章子松人工林[11]、常绿阔叶林[12]、北方针叶林[13]等不同林型能量平衡特征进行了较为系统的研究。但以往的研究多集中在生长季,时间尺度较短(数日至数月),难以反映森林能量平衡的季节变化特征。而且,对平衡方程的两个重要分量——感热与潜热的获取仍依赖于传统的梯度或估算方法,精度存在局限[14]。

近年来,涡度相关技术开始引入我国[15],并以其高精度,高时间分辨率等优点被迅速的运用到森林、农田、草地等生态系统物质与能量交换研究中。刘允芬等[16]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。但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[17],在寒带森林区,则主要用于感热传输[18]。东北阔叶红松林是中国温带区域典型的森林生态系统,它对平衡我国北方地区 CO_2、H_2O 与能量收支有着重要意义[19]。本文拟以其为研究对象,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,以服务于全球变化背景下的中国东北样带(NECT)研究。

1　研究地概况及研究方法

1.1　研究地概况

本项研究在中国科学院长白山森林生态系统定位站一号标准地阔叶红松林内进行(42°24′N,128°6′E,海拔 738m)。该站区属于受季风影响的温带大陆性气候,年均降水量 695mm,多集中在 6~8 月份,全年日照时数为 2271~2503h,生长季为 5~9 月份。观测场附近下垫面地势平坦,均质,最小风浪区长度大于 500m。林下土壤为山地暗棕色森林土,林型为成熟原始林,主要乔木有红松(*Pinus koriaensis*)、椴树(*Tilia amurensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、色木(*Acer momo*)。林分为复层结构,郁闭度 0.8,下木覆盖度 40%,最大叶面积指数(LAI)约为 5.8m²/m²,平均株高 26m,立木株数约 560 株/hm²,总蓄积量 380m³/hm²。

1.2　研究方法

1.2.1　实验设计　森林样地内建有高 62m 的微气象观测塔,在观测塔 40m(1.5 倍林冠高)高处的主风方向布设一套开路式涡度相关系统。风速与空气温度脉动采用 CSAT3 三维超声风速仪(Campbell,USA)测量,水汽浓度脉动采用 LI-7500 开路式 CO_2/H_2O 气体分析仪(LI-Cor,USA)测量。湍流脉动信号采样频率为 10Hz,脉动数据通过 CR5000 数据采集器(Campbell,USA)采集。

在观测塔 32m 高处,采用 CNR-1 净辐射表(Kipp & Zonen,Netherlands)测量净辐射,同时采用 HMP-45C 空气温湿仪(Vaisala,Finland)测量空气温、湿梯度。在林内 5cm 土壤深,安置 2 个 HFP01 土壤热通量板(HukseFlux,Netherlands)测量土壤热通量。在观测塔 60m 高处,安置一雨量筒观测降水。所有常规气象因子测量频率为 0.5Hz,通过 CR23X-TD 数据采集器(Campbell,USA)每 30min 自动记录其平均值。另外,在生长季采用 LI-2000 植物冠层分析仪(LI-Cor,USA)每间隔 2~7d 观测一次森林叶面积指数(LAI)。观测时间为 2003 年全年。

1.2.2　数据处理方法　森林能量平衡方程可表示为:

$$R_n - G - S = LE + H \tag{1}$$

式中,R_n 为净辐射,G 为土壤热通量,S 为冠层储热变化,$Rn-G-S$ 表示森林可用能量(available energy),$(H+LE)/(Rn-G-S)$ 表示基于涡度相关法的湍流能量通量对森林可用能量的闭合度。当平衡方程步长以日为时间尺度时,S 通常忽略不计。

LE 与 H 分别表示感热与潜热通量。根据涡度相关理论,二者可以通过下列方程获得:

$$H = \rho_a C_p \overline{w'T'} \tag{2}$$

$$LE = L\overline{w'\rho'_v} \tag{3}$$

式中，H 为感热通量，LE 为潜热通量，正值表示水、热从森林向大气传输，负值与之相反。ρ_a 为空气密度，它是空气温度、水汽浓度与气压的函数，可通过公式计算：

$$\rho_a = e/(T + 273.15) \times R_d) + \rho_v \tag{4}$$

式中，e 为水汽压，R_d 为干空气比气体常数，取值为 287 J/(kg·K)；ρ_v 为水汽密度；C_p 为空气定压比热，取值为 1004 J/(kg·K)；w' 为垂直风速脉动值；T' 为空气温度脉动值；L 为汽化潜热，它是温度的函数，$L=(2500.78-2.360T)$ J/g；ρ'_v 为水汽密度脉动值；上横线表示单元数据平均，在这里通量平均化时间取为 30 min。

为消除由于水热传输产生的水汽密度脉动效应，根据 Webb 提出的 WPL 修正理论[20]，对潜热通量做了相应的修正，修正后的潜热通量 LE 可表示为：

$$LE = L\left(1 + \mu\frac{\bar{\rho}_v}{\bar{\rho}_a}\right)\left\{\overline{w'\rho'_v} + \left(\frac{\bar{\rho}_v}{\bar{T}}\right)\overline{w'T'}\right\} \tag{5}$$

式中，μ 为干燥空气和水汽分子量之比，ρ_a 表示干燥空气密度。

受降雨、霜或仪器标定、维护等影响，涡度相关数据存在奇异值或缺测。为获得完整的时间序列，利用 32m 与 60m 的温、湿梯度数据，根据波文比-能量平衡法的计算结果进行了插补。

2 结果与讨论

2.1 能量平衡分量的日变化

森林能量平衡各分量均有显著的日变化趋势。以图 1 所示的冬季与夏季各 4 个典型观测日为例，净辐射在晴好天气呈单峰型日变化，峰现时间冬季与夏季并无明显差异，均在正午 12:00～12:30 左右。冬季，在日出后 3h(9:30～10:00)净辐射通量变为正值，即转变为森林能量的收入项，午间达到最大值(约 345 W/m²)，至日落前 1h 左右(16:00)转变成负值，期间不到 7h 的平均净辐射强度约为 174 W/m²。一天中剩余超过 2/3 的时间森林表现为长波辐射能的损失，其平均净辐射强度为 −75 W/m²。夏季，净辐射在日出后 1h 左右(7:00)转变为正值，午间达到最大值(约 750 W/m²)，至日落前 2h 左右(17:00)转变为负值，期间约 10h 的平均净辐射强度为 325 W/m²，其余约 14h 森林表现为辐射能的损失，其平均净辐射强度为 −52 W/m²。可以看出，冬季森林日间辐射能收入小于夏季，而晚间损失量又大于夏季，这使得其冬季显得异常寒冷。

土壤热通量在夏季也呈单峰型日变化趋势，峰现时间较净辐射滞后约 3h，即午后 15:00 左右，平均峰值约为 16.0 W/m²。在天气晴好的夜间，有数小时表现为向上传输，但较为微弱。与之相对照的是冬季土壤热通量，全天均表现为向上的热传输，平均通量为 6.2 W/m²。

感热与潜热通量与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[21]。由于冬季地面低温冻结(1 月 18～22 日平均气温为 −15.7 C)，水汽传输非常微弱，森林平均 LE 不到 5 W/m²，较夏季 LE 小一个数量级。冬季能量平衡方程中，感热为主要的支出项，个别天气里，感热支出甚至超过了夏季。

另外，中小尺度的天气变化在很大程度上影响着森林能量的收支。例如，图 1 所示的 8 月 22 日为阴雨天气，净辐射表现为多峰变化，通量最大值仅为 299 W/m²，不到正常天气的一半，相应的土壤热通量、潜热与感热通量也随之衰减。这类天气在 6～8 月份出现较为频繁。

2.2 能量平衡分量的季节变化

以年为时间尺度的净辐射 Rn 近似呈单峰变化(图 2)，但由于受中小尺度天气变化影响，其过程线存在着锯尺状波动，特别是在雨季，净辐射的日间差异较大。全年的平均净辐射通量密度为 72.1 W/m²，即森林通过太阳辐射获得的能量为 2.3×10^9 J/(m²·a)，占冠层上部太阳总辐射能的 48%。Rn 日总量峰值出现在 7 月份，约为 1.6×10^7 J/m²，不过，由于该月降水集中(降水天数 13 d，降水量 183 mm)，部分观测日净辐射反而低于邻近月份，使得月平均通量密度 7 月<8 月<6 月份，6 月份平均净辐射通量为 127 W/m²。冬季净辐射最小月份出现在 12 月份，平均仅为 5.8 W/m²，分别小于 1 月份的 10.5 W/m² 与 11 月份的 23.3 W/m²。另外，在 1 月及 11～12 月份均出现了 5～8d 不等的日总量小于 0 的观测日，表明森林在冬季有时会成为大气的热源。从图 2 中还可以看出，净辐射通量对森林物候变化的响应并不明显，表明森林的能量收入季节动态主要还是受太阳高度角变化的驱动。

土壤热通量的季节变化趋势较为明显。在融雪之前(3 月下旬)，G 的日总量始终为负值，即林地土壤损失能量。在 4 月中旬，随着林下积雪的融化，5cm 深土壤开始解冻，土壤向下的热传输有个快速增加的过程，至 5 月上旬日总量迅速达到全年土壤热通量的最大值 21 W/m²。之后，G 随着 Rn 的增加反而逐渐减弱。这可根据林下土壤温度及森林物候的观测解释如下：随着冬季土壤损失能量的补充，土壤温度梯度减小，相应的土壤向下的热通量降低。另外，进入生长季，植被叶面积迅速增大(5 月 1 日

LAI 为 1.9m²/m²,至 5 月 27 日增加到 4.6m²/m²),降低了地表辐射能的获得,也是 *G* 降低的原因之一。8 月下旬,*G* 的日总量变为负值,这与 5cm 深土壤温度在 8 月 24 日达到全年最高值相一致,表征土壤再次转变成大气的热源,这也使得 8 月份成为森林可用能量最多的月份。非生长季,土壤热通量表现为能量平衡方程的收入项,约占有效能量的 5.0%,12 月份比重达到了 30%,日收入最大值为 9.2 W/m²;生长季,土壤热通量作为支出项,约占有效能量的 4.0%。

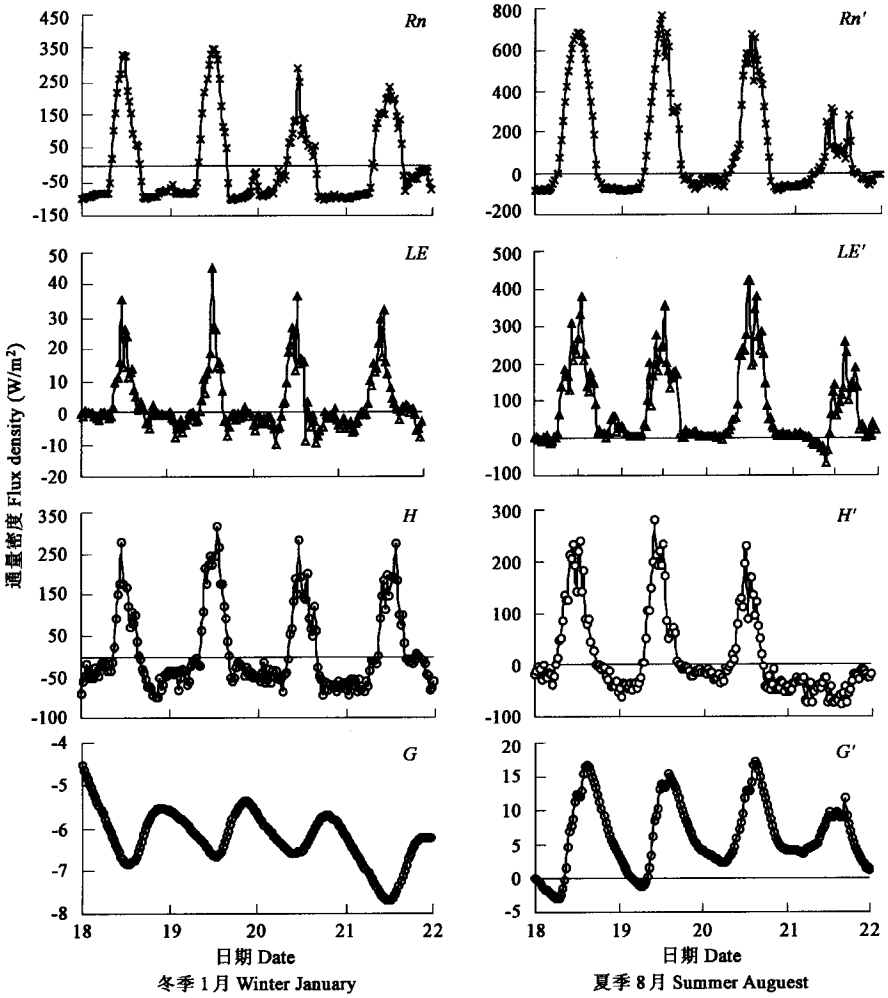

图 1　能量平衡分量的日变化

Fig. 1　Daily variation of the energy balance components

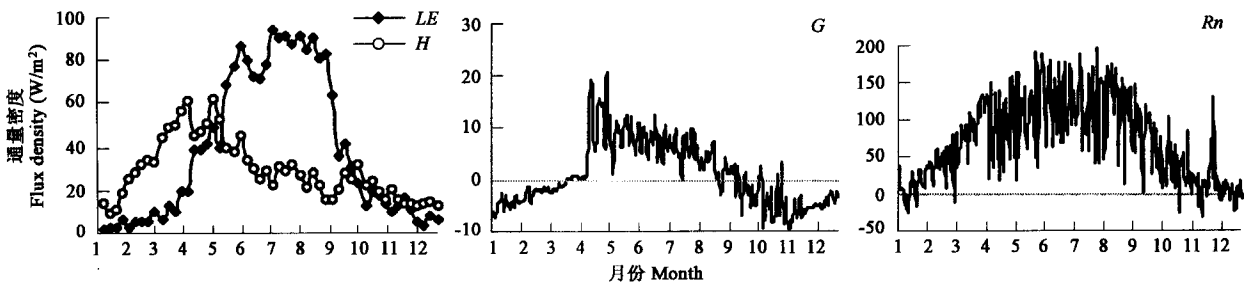

图 2　能量平衡通量季节变化

Fig. 2　Seasonal variation of energy balance components

感热与潜热日平均通量密度变化剧烈,图 2 所示为 7 日平均。感热通量最大值并非出现在净辐射最强的 7 月份,而是在植

被刚刚萌牙的 5 月上旬，随后，逐渐降低，并很快在 5 月中旬被潜热通量超过，成为能量平衡的次要支出项。潜热通量最大值出现在降水最多的 7 月份，至 9 月中下旬，虽然植被尚未完全落叶，已呈显著降低趋势，这除了植被在生长后期生理活动减弱的原因外，林下土壤水分的亏缺也是原因之一（9 月中旬，5cm 深土壤层平均含水量为 $0.18m^3/m^3$，为整个生长季的最低点）。期间，感热通量有略微增加趋势，至 10 月上旬阔叶树基本落叶，开始取代潜热成为主要的能量支出项，但受净辐射持续降低的影响，很快又开始降低。由此可见，除了受有效辐射季节变化的影响，森林物候变化也是感热与潜热季节变化的重要影响因子。非生长季，森林主要能量支出项为感热通量，约占净辐射通量的 72%。生长季阶段，森林主要能量支出项为潜热通量，约占净辐射通量的 60%。阔叶红松林全年因蒸散消耗的能量为 1.2×10^9 J/m^2，占净辐射的 52%。这一比例远小于其它温带森林的研究报道[5,8,22]，估计一方面是因为涡度相关系统对通量的低估所致，另一方面，观测期间降水偏少也是一个重要原因。2003 年降水量仅有 558mm，为近 10a 最低。森林蒸散的水量为 493mm，占降水量的 88%，说明森林收入的水量绝大部分是以气态形式支出。

从波文比 β 季节变化过程（图 3）也可以看出感热与潜热的季节变化动态。观测期间，以日为时间尺度的波文比 β 近似呈 U 字型变化，变化过程清晰的勾绘出了萌芽与落叶的时段，即生长季与非生长季节的界限。β 值在非生长季变幅较大（−1.5～12.8），平均感热通量 3 倍于潜热通量。最小值为负值，间断的出现在 1 月及 10～12 月间，考察其能量平衡分量变化，发现期间感热通量均为负，即传输方向向下，因此，可以认为 β 负值的出现是由于下垫面强的辐射冷却所致。生长季，β 值变幅相对较小，范围为 0.1～1.7，平均波文比在 0.5 左右，远大于水稻（0.06）、灌区小麦（0.19）的 β 值，但较草地（0.57）的要小[23]。波文比年均值为 0.72，与 Wilson 和 Baldocchi[6]在北美温带落叶阔叶林的研究结果很相似（0.68～0.78），但明显低于 Arain 等[24]在寒带云杉林中的研究结果（1.3）。这也说明生态系统辐射能的再分配受气候、土壤与植被的共同影响。

2.3 能量闭合特征

基于涡度相关法获得的湍流能量通量通常不能平衡森林实际获得能量[25]。Wilson[26]等对全球通量网（FLUXNET）50 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。一些学者因此开始怀疑能量及其有相似传输机制的 CO_2 通量测定结果[27]，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，倍受关注。

表 1 为对长白山通量观测站涡度相关实测数据与森林可用能量进行回归分析的结果。可以看出，在观测条件相对理想的长白山站也存在着能量不能闭合现象。基于 30 min 的全年能量收支闭合度约为 86%，约有 14%的能量不知去向。若考虑了冠层储热项 S（$S\approx7\%$ 可用能量[28]），结果会改善一些，但也不可能实现完全闭合。这可以从基于日总量的全年能量收支（$S\approx0$）仍存在 9%的不能闭合现象得到佐证。另外，研究发现，冬季的能量闭合程度要好于其他季节，达到了 94%，对此，本文尚不能给出一个合理的解释。

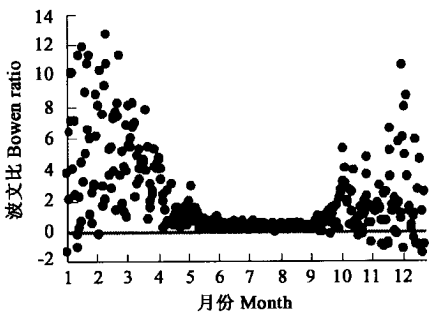

图 3 波文比季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of β

表 1 能量收支闭合特征

Table 1 Characteristic of energy budget closure

数据集（时间尺度） Data set (time scale)	n	斜率 slope	截距 intercept	R^2
全年（30min）	14293	0.86	13.5	0.89
冬季（30min）	2507	0.94	−3.4	0.83
全年（1d）	319	0.91	7.1	0.94

目前，微气象学家初步判断导致能量不闭合的原因可能有：净辐射仪、土壤热通量与涡度相关传感器感应源区（Source area）的不同导致空间取样误差[29]；涡度相关仪器系统对高频信号响应不足或周期长于通量平均化时间的低频信号损失[30]，以及复杂地形下的平流损失等[31]。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，对长白山通量观测站的能量闭合问题仍有待于进一步研究。

3 结论

（1）森林全年获得的辐射能量为 2.3×10^9 J/m^2，净辐射平均强度为 72.1 W/m^2，12 月份平均值最小，为 5.8 W/m^2，6 月份平均值最大，为 127 W/m^2。净辐射强度受太阳高度角与中小尺度天气变化共同支配。

（2）非生长季，森林主要能量支出项为感热通量，约占净辐射通量的 72%，感热通量最大值出现在植被萌芽阶段的 5 月份；生长季，主要能量支出项为潜热通量，约占净辐射通量的 60%，潜热通量最大值出现在降水最多的 7 月份。全年因蒸散消耗的能量为 1.2×10^9 J/m^2，占净辐射的 52%，森林蒸散的水量为 493mm，占降水量的 88%。波文比 β 近似呈 U 字型变化，在非生长季变幅较大（−1.5～12.8），平均值约为 3.0；生长季，β 值变幅相对较小，范围为 0.1～1.7，平均波文比在 0.5 左右。β 值的变化受森林物候变化影响显著。

（3）土壤热通量在非生长季表现为能量平衡方程的收入项，约占有效能量的 5.0%；生长季表现为支出项，约占有效能量的

4.0%。**变化过程主要取决于土壤温度梯度及植被覆盖状况。**

(4) **长白山通量观测站能量闭合度约为** 86%,**好于** FLUXNE **平均水平,但不闭合的原因有待于进一步的研究。**

References:

[1] Li Q P, Ding Y H. Research progress in the effect of vegetation change on regional climate. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2004, **27**(1): 131～140.

[2] Wu H S, Liu H P, Huang D J. Energy flux and energy efficiency of three communities in the conservation in Dinghu Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(1): 82～90.

[3] Wang B, Liu S R, Cui X H, *et al*. Advances in the research on water and heat balance laws of the global terrestrial ecosystem. *World Forest Research*, 2002, **15**(1): 19～28.

[4] Suter S, Hoelzle M, Ohmura A. Energy balance at a cold Alpine firn saddle, Seserjoch, Monte Rosa. *Int. J. Climatol.*, 2004, **24**(11): 1423～1442.

[5] Oliphant A J, Grimmond C S B, Zutter H N, *et al*. Heat storage and energy balance fluxes for a temperate deciduous forest. *Agric. For. Meteorol.*, 2004, **126**: 185～201.

[6] Wilson K, Baldocchi D D. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest. *Agric. For. Meteorol.*, 2000, **100**: 1～18

[7] Lu Q Y. Comparison of energy balance and microclimate within and out of forest in tropical region. *Sci. Silvae Sin.*, 1964, **9**(1): 45～53.

[8] Zhou G Y, Kang W X. Energy balance in Chinese fir plantation. *Journal of Northeast Forestry University*, 1990, **18**(1): 4～22.

[9] Xiao W F. The energy balance of a stand(*Pinus tabulaeformis* carr). *Acta Ecologica Sinica*, 1992, **12**(1): 16～24.

[10] Wu L L, Dong J W. Heat balance of the secondary oakery in urban forest. *Journal of Nanjing forest university*(*Nature sciences edition*), 2002, **26**(2): 52～54.

[11] Li Y L, Wang L H, Zhang G S, *et al*. Study on heat balance of pinus sylvestris varmongolica artificial forest in maowusu sands. *Journal of Inner Mongolian Forestry College*, 1998, **20**(4): 31～35.

[12] Chang J, Pan X D, Ge Y, *et al*. Features of the micro-climate in the evergreen broad-leaved forest dominated by *Quercus glauca*. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(1): 68～75.

[13] He Q T, Liu Z C. Heat balance of Forest. *Sci. Silvae Sin.*, 1980, **16**(1): 24～33.

[14] Wang A Z, Pei T F. Research progress on surveying calculation of forest evapotranspiration. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2001, **12**(6): 933～937.

[15] Huang Y. Study on carbon budget in terrestrial and marginal sea ecosystems of China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2002, **17**(2): 104～107.

[16] Liu Y F, Song X, Liu Q J, *et al*. Preliminary study on surface energy flux over heterogeneous land surface in subtropics red earth hilly region. *Jiangxi Science*, 2003, **21**(3): 183～188.

[17] Shuttleworth W J. Eddy correlation measurements of energy partition for Amazonian forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1984, **110**: 1143～1162.

[18] Sellers P, Hall F, Margolis H, *et al*. The boreal ecosystem-atmosphere study (BOREAS): an overview and early results from the 1994 field year. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1995, **76**: 1549～1577.

[19] Zhou G S, Wang Y H, Jiang Y L. Global Change and water driven IGBP-NECT, Northeast China. *Earth Science Frontiers*, 2002, **9**(1): 198～216.

[20] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal Royal Meteorology Society*, 1980, **106**: 85～100.

[21] 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 Mountain. *Journal of Forestry Research*, 2002, **13**(2): 119～122.

[22] Kang W X. Regularities of energy consumption as related to evapotranspiration in a Chinafir plantation ecosystem. *Journal of Central-south Forestry College*, 1993, **13**(1): 74～80.

[23] 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.

[24] Arain M A, Black T A, Barr A G, *et al*. Year-round observations of the energy and water vapour fluxes above a boreal black spruce forest. *Hydrol. Process*, 2003, **17**: 3581～3600.

[25] Lee X H. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agric. For. Meteorol.*, 1998, **91**: 39～49.

[26] Wilson K, Goldstein A, Falge E, *et al*. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric. For. Meteorol.*, 2002, **113**: 223～243.

[27] Verma A B, Baldocchi D D, Anderson D E, *et al*. Eddy fluxes of CO_2, water vapor, and sensible heat over a deciduous forest. *Boundary Layer Meteorology*, 1996, **36**: 71～91.

[28] McCaughey J H, Saxton W L. Energy balance storage terms in a mixed forest. *Agric. For. Meteorol.*, 1988, **44**: 1～18.

[29] Schmid H P. Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes. *Agric. For. Meteorol.*, 1997, **87**: 179～200.

[30] Massman W J, Lee X H. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agric. For. Meteorol.*, 2002, **113**: 121～144.

[31] Lee X H. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agric. For. Meteorol.*, 1998, **91**: 39～49

参考文献:

[1] **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.

[2] **吴厚水, 刘慧屏, 黄大基, 等. 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): 82～90.

[3] **王兵, 刘世荣, 催向慧, 等. 全球陆地生态系统水热平衡规律研究进展. 世界林业研究**, 2002, **15**(1): 19～28.

[4] **卢其尧. 热带地区林内和林外的能量平衡与小气候的比较. 林业科学**, 1964, **9**(1): 45～53.

[8] **周国逸, 康文星. 杉木人工林能量平衡的研究. 东北林业大学学报**, 1990, **18**(1): 14～22.

[9] **肖文发. 油松林的能量平衡. 生态学报**, 1992, **12**(1): 16～24.

[10] **吴力立, 董家文. 城市次生栎林的热量收支. 南京林业大学学报(自然科学版)**, 2002, **26**(2): 52～54.

[11] **李玉灵, 王林和, 张国盛. 毛乌素沙地樟子松人工林热量平衡研究. 内蒙古林学院学报**, 1998, **20**(4): 31～35.

[12] **常杰, 潘晓东, 葛滢, 等. 青冈常绿阔叶林内的小气候特征. 生态学报**, 1999, **19**(1): 68～75.

[13] **贺庆堂, 刘祚昌. 森林的热量平衡. 林业科学**, 1980, **16**(1): 24～33.

[14] **王安志, 裴铁璠. 森林蒸散研究进展. 应用生态学报**, 2001, **12**(6): 933～937.

[15] **黄耀. 中国陆地和近海生态系统碳收支研究. 中国科学院院刊**, 2002, **17**(2): 104～107.

[16] **刘允芬, 宋霞, 刘琪璟, 等. 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.

[19] **周广胜, 王玉辉, 蒋延玲. 全球变化与中国东北样带**(NECT). **地学前沿**, 2002, **9**(1): 198～216.

[22] **康文星. 杉木人工林蒸发散及能量消耗规律的研究. 中南林学院学报**, 1993, **13**(1): 74～80.