

DOI: 10.5846/stxb201404090680

颜廷武, 尤文忠, 张慧东, 魏文俊, 王睿照, 赵刚. 辽东山区天然次生林能量平衡和蒸散. 生态学报, 2015, 35(1): 0172-0179.

Yan T W, You W Z, Zhang H D, Wei W J, Wang R Z, Zhao G. Energy balance and evapotranspiration in a natural secondary forest in Eastern Liaoning Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 0172-0179.

辽东山区天然次生林能量平衡和蒸散

颜廷武, 尤文忠*, 张慧东, 魏文俊, 王睿照, 赵 刚

辽宁省林业科学研究院, 沈阳 110032

摘要: 基于辽宁冰砬山森林生态系统定位研究站 2012 年森林内、外微气象观测数据, 采用波文比-能量平衡法 (BERB) 研究了辽东山区天然次生林能量平衡组分及蒸散特征。结果表明, 天然次生林全年获得净辐射能量 (R_n) 为 $1.63 \times 10^9 \text{ J/m}^2$, 其中生长季 R_n 占全年的 71%。 R_n 月均值呈单峰状季节变化; 5 月份 R_n 最大, 达 101.73 W/m^2 ; 12 月份最小, 仅为 -2.38 W/m^2 。 R_n 在晴朗天气的日变化呈单峰型, 峰值出现在 12:00 前后, R_n 在日出后 0.5 h 至日落前 1.5 h 为正值, 其它时间为负值。潜热通量 (LE)、感热通量 (H) 在晴朗天气呈单峰型日变化规律。 LE 呈单峰型季节变化, 7 月份最大。 H 呈双峰型季节变化, 峰值在 4 月份, 次峰值在 9 月份。波文比 (β) 近似呈“U”字型季节变化, 非生长季 β 均值为 1.50, 即 H 占有有效能量的 60%, 生长季 β 均值为 0.43, 即 LE 占有有效能量的 70%。生长季土壤热通量 (G) 为能量支出项, 约占有有效能量的 2.5%, 晴朗天气呈单峰型日变化。非生长季 G 为能量收入项, 约占有有效能量的 6.8%, 1 月份几乎没有日变化。辽东山区天然次生林全年蒸散 (E) 总量为 541.8 mm, 占全年降水总量的 70.3%, 蒸散耗水是该森林生态系统最主要的水分支出项。

关键词: 天然次生林; 波文比; 能量平衡; 蒸散

Energy balance and evapotranspiration in a natural secondary forest in Eastern Liaoning Province, China

YAN Tingwu, YOU Wenzhong*, ZHANG Huidong, WEI Wenjun, WANG Ruizhao, ZHAO Gang

Liaoning Academy of Forestry, Shenyang 110032, China

Abstract: Evapotranspiration is one of the major components of forest water budgets, and therefore, must be estimated accurately. Accordingly, it is essential to thoroughly understand the relationships among evapotranspiration and the components of energy balance fluxes to enable development of forest hydrology and forest meteorology, which are the foundation of management and utilization of water resources. This study was conducted in a natural secondary forest in a mountainous area of Eastern Liaoning Province, China. Components of energy balance fluxes and characteristics of evapotranspiration were investigated at the Bingla Mountain Forest Ecological Station ($42^\circ 35' \text{ N}$, $125^\circ 03' \text{ E}$) during 2012, by using the Bowen ratio-energy balance method (BERB). The monthly variation in net radiation (R_n) exhibited a single peak, with the maximum value (101.73 W/m^2) occurring in May and the minimum value (-2.38 W/m^2) in December. Additionally, during fine weather, the diurnal peak variation of R_n occurred at noon, indicating a distinctive positive trend from 0.5 h after sunrise to 1.5 h before sunset and a negative trend for the remaining time. Latent heat flux (LE) and sensible heat flux (H) exhibited the same diurnal single peak pattern. However, seasonal variations of LE and H showed different trends, with LE exhibiting a single peak in July and H showing double peaks, the highest in April and the second highest in September. The seasonal characteristics of the Bowen-ratio (β) values generated an approximate U-shaped

基金项目: 国家科技支撑计划 (2012BAD22B04); 林业公益性行业科研专项 (201204101, 201404303); 辽宁省科技计划项目 (2011207001); 辽宁省农业领域青年科技创新人才培养计划 (2014015) 资助

收稿日期: 2014-04-09; 修订日期: 2014-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzhyou2002@163.com

pattern. The average value of β was 0.43 in the growing season (May to Sep), indicating that latent heat flux accounted for 70% of the effective energy. In contrast, the average value of β was 1.5, indicating that sensible heat flux accounted for 60% of the effective energy during the non-growing season. Soil heat flux (G) showed different diurnal variations in different periods. During the growing season, the diurnal variation of G showed an obvious single peak, and G accounted for 2.5% of the effective energy of energy expenditure. However, during the non-growing season, G showed no apparent diurnal variation and accounted for 6.8% of the effective energy as energy deposition. The annual total evapotranspiration was 541.8 mm in natural secondary forest in mountainous areas, accounting for a large proportion (70.3%) of the total annual precipitation (771 mm). The total evapotranspiration in the growing season was 398.3 mm, accounting for 61.8% of the annual precipitation (644.4 mm) in the same period. Taken together, these findings indicate that forest evapotranspiration was the most important expenditure for natural secondary forest in the Eastern Liaoning Mountainous Region. The evapotranspiration value assessed using the BERB method in this study was equivalent to those reported by similar studies, demonstrating that this method is reliable and accurate in natural secondary forest. The results of this study implied that evapotranspiration was not only influenced by precipitation but also by energy flux, roughness of the underlying surface, soil thermal properties, soil moisture, presence of plants and litter, and canopy density. Owing to its complexity and variability, the response mechanisms for energy balance and evapotranspiration in this region should be further investigated.

Key Words: natural secondary forest; Bowen-ratio method; energy balance; evapotranspiration

森林对能量的再分配过程是形成森林小气候的物理基础,对区域乃至全球气候具有重要影响^[1-2],同时再分配结果决定了植被光合生产力的分布^[3]。伴随全球气候变化受到广泛关注,森林的能量平衡特征也成为森林水文学研究的热点问题。蒸散是森林能量平衡与水量平衡的一个重要分量,是影响区域气候和全球水循环的重要因素^[4-5]。因此,估算森林蒸散量对认识地区乃至全球水分循环规律、正确理解陆地生态系统结构与功能的关系有着重要意义^[6-7]。

目前能量平衡与蒸散主要研究方法有:蒸渗仪法、涡动相关法、水量平衡法、波文比-能量平衡法(Bowen Ratio-Energy Balance, BREB)、彭曼联合法(Penman-Monteith 法)等^[8]。其中, BREB 法因其方法简单、精度较高等特点,成为森林蒸散研究中最实用的方法之一^[9-14]。自 1926 年 Bowen 引入波文比概念以来, BREB 法测定蒸散被广泛地应用于水文、气象等领域。国外学者利用 BREB 法对森林能量平衡及蒸散做了大量的研究^[15-19],国内学者从 20 世纪 80 年代开始对阔叶红松林^[9]、油松林^[20]、常绿阔叶林^[21]、北方针叶林^[22]、樟子松人工林^[23]、落叶松人工林^[7]等不同林型的能量平衡特征进行了较为系统的研究。大量的试验结果表明, BREB 法测定的能量平衡及蒸散与同类实验仪器的测定结果相吻合,符合精度要求^[9,14]。然而目前对森林热量平衡和全年水汽通量的报道还相对较少^[24],特别是对我国辽东山区天然次生林的水汽交换特征认识仍很欠缺。本文以辽东山区天然次生林为研究对象,利用辽宁冰砬山森林生态系统定位研究站 2012 年野外气象观测数据,分析其能量平衡及蒸散变化特征,旨在为土壤-植被-大气连续体中能量、物质交换的研究奠定基础,也可为深入认识我国辽东山区天然次生林的水文和气象功能提供基础数据。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

研究地位于辽宁冰砬山森林生态系统定位研究站(124°45'—125°15' E, 42°20'—42°40' N)。冰砬山为吉林哈达岭向西南延续地带,平均海拔 500—600 m,最高峰 870 m。气候属温带大陆性气候。根据西丰气象观测站(距研究地 35 km)多年观测数据统计,该地区年均气温 5.2 °C,年均降水量 684.8 mm,年均蒸发量 1379.8 mm,无霜期 133 d,最高温 35.2 °C,最低温 -41.1 °C,具有典型的山区气候特征。土壤以暗棕色森林土为主,其次为棕色森林土,土壤质地多为粉砂壤质、壤质,土层深厚,有机质含量高,土壤 pH 值为 6—7。本研究在冰砬

山生态站天然次生林标准地(125°03' E, 42°35' N)内进行。标准地内主要乔木有色木槭(*Acer mono* Maxim.)、春榆(*Ulmus propinqua* Koidz.)、蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch.)、花曲柳(*Fraxinus rhynchophylla* Hance.)、紫椴(*Tilia amurensis* Rupr.)、怀槐(*Maackia amurensis* Rupr.)。林分平均高为 18 m、平均胸径为 15.2 cm, 密度 1140 株/hm², 郁闭度 0.9, 灌木盖度 0.5, 草本盖度 0.9。

1.2 研究方法

1.2.1 野外观测与数据采集

研究采用 2012 年林内微气象梯度观测系统数据和林外标准气象场观测数据。林内微气象梯度观测系统安装于 30 m 高观测塔上, 距地面 20、25 m 高度处安装空气温湿度传感器(HMP45C, Vaisala, Helsinki, Finland), 25 m 高度安装净辐射传感器(CNR1, Kipp & Zonen, Netherlands), 土壤 5 cm 深度安装土壤热通量板(HFP-01, HukseFlux, Netherlands), 采样频率为 2 Hz, 通过数据采集器(CR1000, Campbell, USA)采集并存储每分钟数据。林外标准气象场利用 ENVIS 自动气象站测量降水(52202, R. M. Young, USA)、气压(CS105, Vaisala, Helsinki, Finland)、总辐射(CMP3, Kipp & Zonen, Netherlands)、净辐射(NR-LITE, Kipp & Zonen, Netherlands)和空气温湿度(HMP45C, Vaisala, Helsinki, Finland)。

1.2.2 数据处理方法

研究方法采用波文比-能量平衡法(BREB)。森林能量平衡方程可表示为^[25-26]:

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

式中, R_n 为净辐射; G 为土壤热通量; S 为冠层储热变化; $R_n - G - S$ 表示森林有效能量; H 为感热通量; LE 为潜热通量; L 为水的汽化潜热系数, $L = (2500.78 - 2.360T) \text{ J/g}$; E 为森林蒸散。

波文比(β)定义为某一界面上 H 与 LE 的比值, 为垂直方向上温度梯度和湿度梯度的函数。用公式表示为^[27]:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{\rho C_p K_h \frac{\Delta T}{\Delta z}}{\rho L K_w \frac{\Delta q}{\Delta z}} = \gamma \frac{K_h \frac{\Delta T}{\Delta z}}{K_w \frac{\Delta e}{\Delta z}} \quad (2)$$

式中, ρ 为空气密度; C_p 为空气定压比热; K_h 和 K_w 分别为热量湍流交换系数和水汽湍流交换系数; ΔT 、 Δe 、 Δq 和 Δz 分别为两个高度的温度差、水汽压差、比湿差和高度差; γ 为干湿表常数。根据相似性原理, 在假定 K_w 和 K_h 相等的条件下, 即 $K_h = K_w$, 可得:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (3)$$

针对海拔较高的高山和高原地区, H 和 LE 的计算需要作气压和密度的高度订正才可使用^[1,7]。 S 是温度变化的函数^[25], 由于半小时内温度变化不大, S 很小, 一些研究将 S 忽略^[1,7,26-27]。因此本研究中使用的 BREB 法公式为:

$$H = \frac{\frac{p}{p_0} \beta (R_n - G)}{1 + \beta \frac{p}{p_0}} \quad (4)$$

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta \frac{p}{p_0}} \quad (5)$$

式中, p 和 p_0 分别为观测地气压和海平面气压。

2 结果与分析

2.1 能量平衡各分量的日变化特征

森林能量平衡各分量具有明显的日变化规律(图 1)。1 月份(14—17 日)和 8 月份(14—17 日)内连续 4

个晴朗日的 R_n 、 H 、 LE 呈现单峰型日变化,而 G 在 8 月份呈现单峰型,1 月份的日变化动态则呈现水平直线型(图 1)。

1 月份和 8 月份 R_n 变化规律相同,峰值均出现在 12:00 前后;1 月份日出后 0.5 h(7:30)至日落前 1.5 h(15:30), R_n 为正值,历时 10 h,森林平均获得 R_n 为 77 W/m^2 ,其余时间 R_n 为负值,平均值为 -25 W/m^2 ;8 月份日出后 0.5 h(5:30)至日落前 1.5 h(17:30), R_n 为正值,平均值为 275 W/m^2 ,其它时间 R_n 为负值,平均值为 -44 W/m^2 (图 1)。

1 月份和 8 月份 G 日变化规律有所不同。1 月份 G 几乎没有变化,呈水平直线型,全天向上传输能量强度为 2.1 W/m^2 。而 8 月份 G 呈单峰型日变化趋势,6:30 至 22:30 为正值,平均强度为 3.9 W/m^2 ,峰值出现在 16:00 左右,滞后于 R_n 峰值出现时间约 4 h;22:30 至次日 6:30 为负值,平均强度为 -2.8 W/m^2 (图 1)。

H 在 1 月份和 8 月份呈现相同的变化规律,白天为正值,夜间为负值,表明白天森林向林冠上大气层输送热量,夜间林冠上大气层向森林输送热量,且其绝对值白天大于夜间。1 月份峰值为 66 W/m^2 ,8 月份峰值为 129 W/m^2 (图 1)。 LE 是森林生态系统中重要的热量支出分量,8 月份其日最大值为 408 W/m^2 ,平均值为 86 W/m^2 ,1 月份日最大值为 120 W/m^2 ,平均值为 9.9 W/m^2 (图 1)。

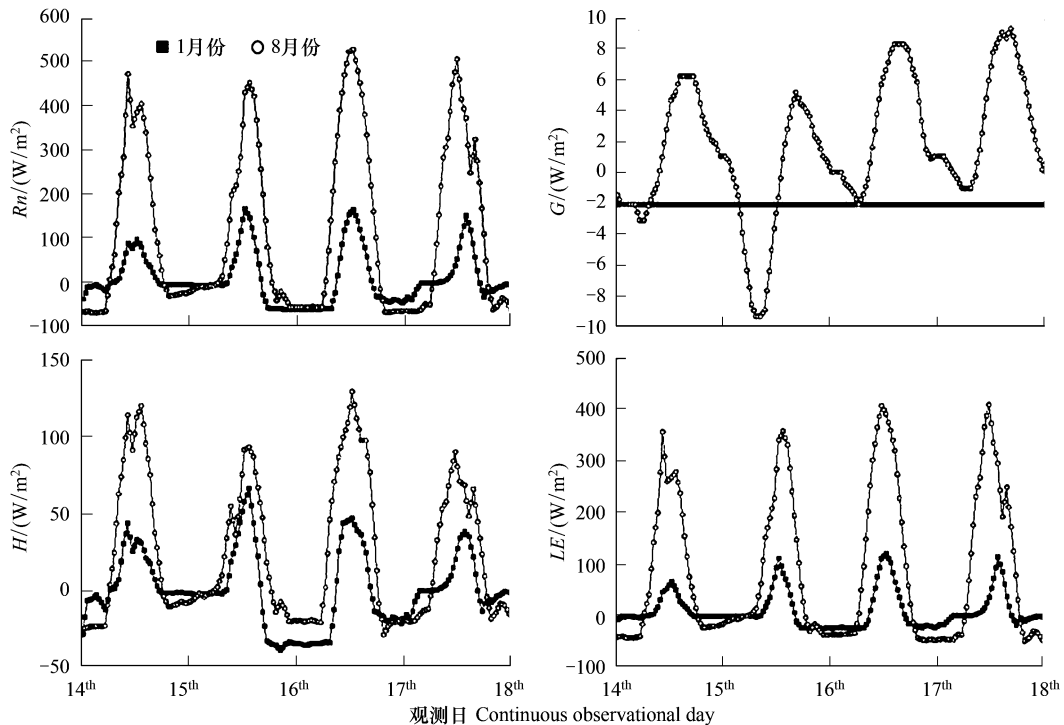


图 1 能量平衡各分量的日变化

Fig.1 Diurnal variation of the energy balance components

2.2 能量平衡分量的季节变化特征

森林能量平衡各分量具有明显的季节变化规律(图 2)。 R_n 月平均值呈单峰型变化,峰值出现在 5 月份(101.73 W/m^2),6—8 月份 R_n 月平均值在 $88\text{—}91 \text{ W/m}^2$ 之间,变化极小,最小值出现在 12 月份(-2.38 W/m^2)(图 2)。生长季(5—9 月份) R_n 总量为 $1.15 \times 10^9 \text{ J/m}^2$,约占全年 R_n 总量($1.63 \times 10^9 \text{ J/m}^2$)的 71%。

LE 也呈现出单峰型的季节变化趋势,7 月份出现最大值(68.24 W/m^2),12 月份出现最小值(0.82 W/m^2),5—8 月份稳定在 $65\text{—}68 \text{ W/m}^2$ 之间(图 2)。 H 呈双峰型变化,峰值出现在 4 月份(39.59 W/m^2),次峰值出现在 9 月份(28.50 W/m^2)(图 2)。

G 的季节变化幅度较小,全年在 $-3.58\text{—}5.60 \text{ W/m}^2$ 范围内变化。4—8 月份 G 为正值,土壤吸收热量峰值出现在 4 月份,达 6.2 W/m^2 。其它月份 G 为负值,土壤向上传送热量。非生长季,随着 R_n 的减小, G 对有

效能量的贡献逐渐增加,约占有效能量的 6.8%;生长季, G 约占有效能量的 2.5%(图 2)。

β 具有明显的季节变化趋势,综合反映了 H 与 LE 的季节变化动态。以日为步长的 β 全年变化动态近似呈“U”型;非生长季 β 值(-0.1—6.6)变幅较大,平均值为 1.50,即非生长季 H 占有有效能量的 60%;生长季 β 值(0.2—0.8)变幅相对较小,平均值为 0.43,即生长季 LE 占有有效能量的 70%,为主要的能量支出分量(图 3)。

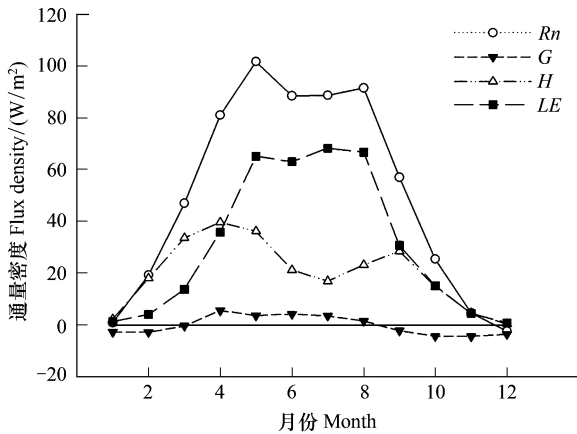


图 2 能量平衡通量季节变化

Fig.2 Seasonal variation of energy balance components

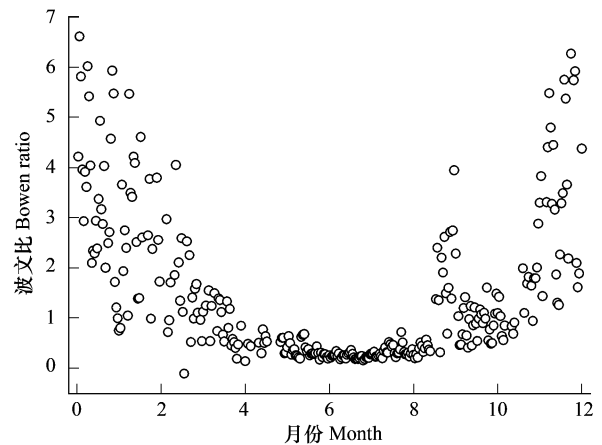


图 3 Bowen 比季节变化

Fig.3 Seasonal variation of Bowen ratio

2.3 蒸散特征

日蒸散总量(E)呈现单峰季节动态特征(图 4),日总量及月总量最大值均出现在 7 月份,分别为 5.8 mm/d 和 92.7 mm/m。全年 E 总量为 541.8 mm,占同期降水总量(771 mm)的 70.3%。森林 E 主要集中在生长季(398.3 mm),占全年 E 的 73.5%,是同期降雨总量(644.4 mm)的 61.8%。由于受中小尺度天气变化影响, E 日总量的季节变化存在着锯齿状波动,生长季 E 日总量在 0.1—5.8 mm/d 之间,其变化范围大于非生长季的变化范围(0—2.56 mm/d)。

3 讨论

辽东山区天然次生林能量平衡各分量均有明显的日变化特征(图 1),1 和 8 月连续晴好天气的 R_n 、 LE 和 H 均呈现出一致的日变化单峰曲线,这与其他学者的研究结果^[1,24,26,29]相一致。 G 日变化规律有所不同,虽然在 8 月份也呈单峰变化,但在 1 月份连续 4d 保持在 -2.1 W/m^2 的水平,显示出热量由土壤传送到植被-大气,土壤为热源。李亮等^[30]对不同土壤类型的土壤热通量研究提出土壤热通量的日较差主要取决于土壤的导热率、热容量和土壤温湿度,不同季节的土壤理化性质、土壤热导率不同,直接影响到土壤吸热散热在延迟时间上的差异。当入射能量通过冠层进入土壤后,由于土壤比热远大于空气,土壤温度的升降也滞后于空气温度的变化。由于研究区天然次生林 1 月份冰雪覆盖致使土壤温度高于气温,从而导致 G 为负值并持续不变,这与陈云飞等^[31]的研究结果相一致。

受森林物候和气象条件的影响,辽东山区天然次生林的 R_n 、 G 、 LE 和 H 均存在着明显的季节变化特征,最大值出现在生长季,最小值出现在非生长季。森林生态系统获得 R_n 后,由于不同森林群落类型的下垫面特征不同,造成蒸散和热传导能力的差异,从而导致 R_n 在系统内的分配各不相同。此外,降水量的多少间接

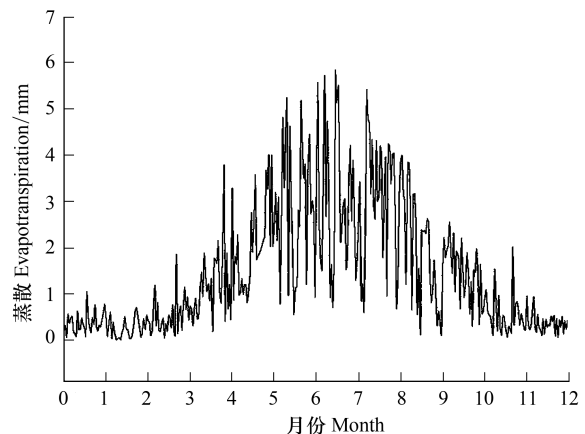


图 4 2012 年日蒸散量动态

Fig.4 Variation of evapotranspiration in 2012

地影响下垫面接受的辐射量。2012 年全年研究区天然次生林 Rn 总量为 $1.63 \times 10^9 \text{ J/m}^2$, 与林外 ENVIS 自动气象站测得的 Rn 总量 $1.61 \times 10^9 \text{ J/m}^2$ 相近, 是吴家兵等^[26] 对东北阔叶红松林 Rn 测量值 ($2.3 \times 10^9 \text{ J/m}^2$) 的 70.9%。分析这 2 种类型森林 Rn 存在较大差异的原因主要有以下两个方面: 一是与降水有关, 研究区全年降水量 771 mm, 是长白山地区当年降水量的 1.38 倍, 一般认为降水量越大降水天气过程就越长, 下垫面获得的总辐射就越小, Rn 随之降低; 二是与植被类型有关, 冬季长白山阔叶红松林中红松不落叶, 净辐射收到的反射辐射很大一部分来自红松绿色树叶对短波的反射, 而研究区天然次生林为落叶乔木林、冬季落叶, 净辐射收到的反射辐射大部分来自地面的积雪对短波的反射, 冬季研究区天然次生林比长白山阔叶红松林的反射率大。

生长季 G 为能量的支出项, 约占有效能量的 2.5%, 非生长季 G 表现为能量平衡的收入项, 约占有效能量的 6.8%。长白山阔叶红松林^[26] 生长季 G 占有有效能量 (4%) 高于本研究, 而非生长季 G 占有有效能量 (5%) 低于本研究。这主要与生长季辽东山区天然次生林具有较高的郁闭度 (0.9) 致使到达地表的辐射能较少和非生长季该森林的净辐射值较低有关, 具体原因还需对土壤热属性、土壤水分、地被物的差异作进一步分析研究。

LE 和 H 主要受辐射、气温、大气饱和水汽压差、土壤湿度等因素的影响^[26]。本研究中生长季主要的能量支出项为 LE , 占有有效能量的 70%; 非生长季主要的能量支出项为 H , 占有有效能量的 60%, 这与北方大多数的研究结果相一致^[7,9,26]。在植物生长旺盛的 5—8 月份, LE 均显著的高于 H , 至 9 月份植被尚未落叶, 然而 LE 已呈显著降低趋势, 这与植被在生长后期生理活动减弱有关。

波文比能够表征大气-地表能量交换特征, 多用于能量平衡计算, 波文比的大小决定能量在生态系统中的分配^[31]。本研究以日为时间尺度的 β 全年近似呈“U”字型变化, 呈现显著的季节变化趋势。非生长季大于生长季, 这与吴家兵等^[26]、张新建等^[24] 对长白山阔叶红松林的研究结果相同。非生长季 β 均值为 1.50, 即 H 占有有效能量的 60%。生长季 β 均值为 0.43, 小于落叶松林 (0.77)、草地 (0.57)^[7], 大于水稻 (0.06)、灌区小麦 (0.19)^[27]。因为水稻、灌区小麦水分条件充足, 蒸散耗能较多, 所以 β 值较小。这也表明生态系统能量的再分配受气候、土壤水分与植被特征多因素的共同作用。

本研究中天然次生林年蒸散量为 541.8 mm, 占同期降水总量的 70.3%。对比东北地区不同研究地点不同林型的蒸散量和降水量 (表 1), 发现研究区森林的蒸散量占降水量的 70%—76%, 低于长白山阔叶红松林 (83%—87%), 表明蒸散耗水是东北地区温带森林生态系统最主要的水分支出项。蒸散量和降水量的比值与降水量之间具有显著的负相关关系 ($P < 0.05$), 蒸散量受到降水量的制约。此外, 蒸散与下垫面的粗糙程度、土壤的温湿度、蒸汽压差^[24] 以及地被物^[32]、林分郁闭度^[33] 等因子都具有比较密切的关系, 其多因子间互作机制还需开展进一步的研究。

表 1 东北地区不同地点不同林型蒸散量的比较

Table 1 Comparison of forests evapotranspiration in northeast China

地点 Places	坐标 Location	林型 Forest types	年份 Year	蒸散/mm Evapotranspiration	降水/mm Precipitation	蒸散/降水/% Evapotranspiration/ Precipitation	方法 Methods	文献 References
长白山 Changbai mountain	42°24'N, 128°06'E	阔叶红松林	2008	484.7	558.9	86.7	涡度相关法	[24]
	42°24'N, 128°06'E	阔叶红松林	2003	450.8	538.4	83.7	涡度相关法	[28]
冰砬山 Bingla mountain	42°20'N, 124°45'E	落叶松林	2007—2008	531.4	707.9	75.1	BREB 法	[7]
	42°35'N, 125°03'E	天然次生林	2012	541.8	771.0	70.3	BREB 法	本研究

4 结论

(1) Rn 年总量为 $1.63 \times 10^9 \text{ J/m}^2$, 其中生长季 Rn 占 71%。 Rn 月均值呈单峰状季节变化, 5 月份 Rn 最大,

达 101.73 W/m^2 , 12 月份最小, 仅为 -2.38 W/m^2 。晴朗天气, R_n 呈单峰型日变化, 峰值出现在 12:00 前后, 日出后 0.5 h 至日落前 1.5 h R_n 通量为正值, 其它时间为负值。

(2) LE 、 H 在晴朗天气下呈单峰型日变化规律。 LE 呈单峰型季节变化, 7 月份最大。 H 呈双峰型季节变化, 峰值出现在 4 月份, 次峰值出现在 9 月份。以日为时间尺度的 β 全年近似呈“U”字型变化, 非生长季 β 均值为 1.50, 即 H 占有有效能量的 60%, 生长季 β 均值为 0.43, 即 LE 占有有效能量的 70%。

(3) 生长季 G 为能量支出项, 约占有效能量的 2.5%, 晴朗天气条件下呈单峰型日变化。非生长季 G 为能量平衡方程的收入项, 约占有效能量的 6.8%, 1 月份几乎没有日变化。

(4) 辽东山区天然次生林全年 E 总量为 541.8 mm, 占全年降水总量的 70.3%。生长季 E 总量为 398.3 mm, 占全年 E 总量的 73.5%, 占同期降雨总量的 61.8%。

参考文献 (References):

- [1] 高西宁, 陶向新, 关德新. 长白山阔叶红松林热量平衡和蒸散的研究. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(5): 331-334.
- [2] 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.
- [3] 吴厚水, 刘慧屏, 黄大基, 何正翔. 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.
- [4] 宛志沪, 蒋跃林, 李万莲, 许亚清. 三种林型蒸散量测定方法的研究. 安徽农业大学学报, 1999, 26(4): 481-487.
- [5] Garratt J R. Sensitivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary-layer treatments — A review. Journal of Climate, 1993, 6(3): 419-448.
- [6] Pereira L S, Perrier A, Allen R G, Alves I. Evapotranspiration: Concepts and future trends. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1999, 125(2): 45-51.
- [7] 颜廷武, 邢兆凯, 尤文忠, 赵刚, 魏文俊, 张慧东. 辽宁冰砬山长白落叶松林能量平衡和蒸散的研究. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(4): 449-452.
- [8] 王安志, 裴铁璠. 森林蒸散测算方法研究进展与展望. 应用生态学报, 2001, 12(6): 933-937.
- [9] 吴家兵, 关德新, 张弥, 韩士杰, 金昌杰. 涡动相关法与波文比-能量平衡法测算森林蒸散的比较研究——以长白山阔叶红松林为例. 生态学杂志, 2005, 24(10): 1245-1249.
- [10] Malek E, Bingham G E. Comparison of the Bowen ratio-energy balance and the water balance methods for the measurement of evapotranspiration. Journal of Hydrology, 1993, 146: 209-220.
- [11] 刘和平, 刘树华, 朱廷曜, 金昌杰, 孔繁智, 关德新. 森林冠层空气动力学参数的确定. 北京大学学报: 自然科学版, 1997, 33(4): 522-528.
- [12] Li F Q, Lyons T J. Estimation of regional evapotranspiration through remote sensing. Journal Applied Meteorology, 1999, 38(11): 1644-1654.
- [13] Malek E. Night-time evapotranspiration vs. daytime and 24h evapotranspiration. Journal of Hydrology, 1992, 138(1/2): 119-129.
- [14] 康峰峰, 马钦彦, 牛德奎, 曹文强. 山西太岳山地区辽东栎林夏季热量平衡的研究. 江西农业大学学报, 2003, 25(2): 209-214.
- [15] Angus D E, Watts P J. Evapotranspiration-How good is the Bowen ratio method? Agricultural Water Management, 1984, 8(1/3): 133-150.
- [16] Devitt D A, Sala A, Smith S D, Cleverly J, Shaulis L K, Hammett R. Bowen ratio estimates of evapotranspiration for Tamarix ramosissima stands on the Virgin River in Southern Nevada. Water Resources Research, 1998, 34(9): 2407-2414.
- [17] Grelle A, Lundberg A, Lindroth A, Morén A S, Cienciala E. Evaporation components of a boreal forest: Variations during the growing season. Journal of Hydrology, 1997, 197(1/4): 70-87.
- [18] Hölscher D, de A Sá T D, Bastos T X, Denich M, Fölster H. Evaporation from young secondary vegetation in eastern Amazonia. Journal of Hydrology, 1997, 193(1/4): 293-305.
- [19] Nie D, Flitcroft I D, Kanemasu E T. Performance of bowen ratio systems on a slope. Agricultural and Forest Meteorology, 1992, 59(3/4): 165-181.
- [20] 肖文发. 油松林的能量平衡. 生态学报, 1992, 12(1): 16-24.
- [21] 常杰, 潘晓东, 葛滢, 陈增鸿, 刘珂, 陈启常. 青冈常绿阔叶林内的小气候特征. 生态学报, 1999, 19(1): 68-75.
- [22] 贺庆棠, 刘祚昌. 森林的热量平衡. 林业科学, 1980, 16(1): 24-33.
- [23] 李玉灵, 王林和, 张国盛, 董智, 韩淑英. 毛乌素沙地樟子松人工林热量平衡的研究. 内蒙古林学院学报, 1998, 20(4): 31-35.
- [24] 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.
- [25] Shi T T, Guan D X, Wu J B, Wang A Z, Jin C J, Han S J. Comparison of methods for estimating evapotranspiration rate of dry forest canopy: Eddy covariance, Bowen ratio energy balance, and Penman-Monteith equation. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2008, 113(D19):

doi: 10.1029/2008JD010174.

- [26] 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.
- [27] 戚培同, 古松, 唐艳鸿, 杜明远, 吴力博, 赵亮. 三种方法测定高寒草甸生态系统蒸散比较. 生态学报, 2008, 28(1): 202-211.
- [28] 施婷婷, 关德新, 吴家兵, 张弥, 王安志, 金昌杰, 韩士杰. 用涡动相关技术观测长白山阔叶红松林蒸散特征. 北京林业大学学报, 2006, 28(6): 1-8.
- [29] 关德新, 吴家兵, 王安志, 赵晓松, 金明淑, 徐浩, 戴冠华, 何秀. 长白山阔叶红松林生长季热量平衡变化特征. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1828-1832.
- [30] 李亮, 张宏, 胡波, 刘广仁, 刘子锐, 王跃思. 不同土壤类型的热通量变化特征. 高原气象, 2012, 31(2): 322-328.
- [31] 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.
- [32] Villegas J C, Breshears D D, Zou C B, Law D J. Ecohydrological controls of soil evaporation in deciduous drylands: how the hierarchical effects of litter, patch and vegetation mosaic cover interact with phenology and season. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(5): 595-602.
- [33] Qiu R J, Song J J, Du T S, Kang S Z, Tong L, Chen R Q, Wu L S. Response of evapotranspiration and yield to planting density of solar greenhouse grown tomato in northwest China. *Agricultural Water Management*, 2013, 130: 44-51.