哀牢山亚热带常绿阔叶林与林外草地太阳辐射比较*

李麟辉[1,4] 张一平[1,2,3**] 谭正洪[1,4] 宋清海[1,4] 罗有勇[5]

([1]中国科学院热带森林生态学重点实验室(西双版纳热带植物园),昆明 650223; [2]中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站,云南景东 676209; [3]云南哀牢山森林生态系统国家野外科学观测研究站,云南景东 676209; [4]中国科学院研究生院,北京 100049; [5]哀牢山国家级自然保护区景东保护局,云南景东 676209)

摘 要 太阳辐射是森林生态系统的主要能量来源,为探讨亚热带常绿阔叶林对太阳辐射的影响,本研究利用哀牢山亚热带森林生态系统研究站太阳辐射观测数据,对林外草地、林冠上的太阳辐射平衡各分量的年、季节变化特征进行了分析。结果表明:森林辐射的季节变化因随植被的变化而与林外草地辐射有所差异。森林有效辐射占总辐射的比率、反射率均低于林外草地,导致净辐射占总辐射比率高于后者。与我国各地的辐射分配率相比,哀牢山亚热带常绿阔叶林的净辐射占总辐射比率较高,反射率较低。总辐射与相近纬度同植被类型的鼎湖山、鹤山相比,分别高 207.7和 357.5 MJ·m^{-2},这对生长在海拔 2200 m以上、温凉潮湿环境下的亚热带常绿阔叶林来说,显得异常重要。

关键词 辐射分配率; 净辐射; 反射率

中图分类号 S718.5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)7-1435-06

Variation patterns of solar radiation above subtropical evergreen broadleaved forest and open area in Ailao Mountains LI Lin-hui[1,4], ZHANG Yi-ping[1,2,3**], TAN Zheng-hong[1,4], SONG Qing-hai[1,4], LUO You-yong[5] (*[1]Key Laboratory of Tropical Forest Ecology (Xishuangbanna Tropical Botanical Garden), Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, Yunnan, China; [2]Ailaoshan Station for Subtropical Forest Ecosystem Studies, Chinese Academy of Sciences, Jingdong 676209, Yunnan, China; [3]National Forest Ecosystem Research Station at Ailaoshan, Jingdong 676209, Yunnan, China; [4]Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; [5]Jingdong Protection Agency of Ailaoshan Mountain National Nature Reserve, Jingdong 676209, Yunnan, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(7): 1435-1440.

Abstract Solar radiation is the primary source of energy for forest ecosystem. To explore the influence of subtropical evergreen forest on the distribution of solar radiation, a comparative study was made on the variation patterns of solar radiation above the forest canopy and open area in Ailao Mountains, based on the observation data of solar radiation from the Subtropical Forest Ecosystem Station in Ailao Mountains. There existed differences in the annual variation of solar radiation above the forest canopy and open area due to the seasonal variation of vegetation. The ratio of effective radiation to global radiation and the albedo above the canopy was lower than that above the open area, but the ratio of net radiation to global radiation was in adverse, due to the influence of the canopy. Compared with those in other areas of China, the ratio of net radiation to global radiation above the forest canopy in Ailao Mountains was higher, while the albedo was lower. The glboal radiation in the Mountains was averagely 207.7 MJ·m^{-2} and 357.5 MJ·m^{-2} higher than that in the Dinghu Mountains and Heshan Mountains with the similar altitude and vegetation type as Ailao Mountains, respectively, suggesting that high global radiation looked very important for the subtropical evergreen forests at the altitude above 2200 m and under temperate cool moist condition.

Key words radiation ratio; net radiation; albedo.

* 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB833501)、国家自然科学基金项目(31061140359)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q1-05-04)资助。

** 通讯作者 E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn

收稿日期: 2010-12-14, 接受日期: 2011-03-20

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

太阳辐射能是地球大气的重要能量来源, 是生态系统能量输入的来源和决定生态系统生产力的重要因子, 它作为生态系统物质和能量的驱动力, 影响着生态系统的各个环节 (朱劲伟, 1982)。对于植物而言, 太阳辐射是其生长过程中重要的限制因子之一, 不仅影响到植物的光合作用, 还对树木茎、叶的生长和形态结构产生影响 (高进波, 2009)。并且由太阳辐射产生的热效应, 进一步影响着植物的生理活动和生长发育及其地理分布。

在森林辐射研究领域, 自 20世纪初以来, 国内外学者先后对各种类型的森林群落的辐射环境进行了研究 (Gates & Tantrapon, 1965; Federer & Tanner, 1966; 崔启武和朱劲伟, 1981; 朱劲伟和崔启武, 1982), 研究内容主要集中在森林群落中的辐射平衡、能量平衡和太阳辐射分布状况以及林内辐射状况对生长、发育和光合作用的影响等方面 (Castro & Fetcher, 1998; Agyeman *et al*, 1999; Poorter, 1999; Thomas & Bazzaz, 1999; Finch *et al*, 2004)。对于森林生态系统净辐射及其时空分布的研究尚不多见。

位于云南中部哀牢山地区分布着目前世界上保存最完整的亚热带常绿阔叶林 (吴征镒, 1983), 同时它也是目前世界上树龄较长 (130年以上) 和面积较大的常绿阔叶林 (邱学忠和谢寿昌, 1998)。同时, 由于哀牢山山脉位于云南中部, 呈现准南北走向, 是云南东西部气候的分界线 (吴征镒等, 1983), 因此, 哀牢山亚热带常绿阔叶林具有重要的科研价值。

在哀牢山海拔 2200 m以上地区, 分布着大面积原生的亚热带常绿阔叶林。与相近地区相比, 其分布海拔较高。如此高海拔地区生长大面积的原生亚热带常绿阔叶林, 太阳辐射作为森林生态系统的能量输入项值得深入研究。高进波 (2009)对哀牢山亚热带常绿阔叶林林外草地的太阳辐射的变化规律进行了初步研究, 得出哀牢山地区太阳辐射的变化特征, 但是, 对林冠上与林外草地的太阳辐射状况的差异还缺乏进行系统研究, 亚热带常绿阔叶林对林内外太阳辐射的影响程度尚不清楚。本研究以哀牢山的亚热带常绿阔叶林的太阳辐射为研究对象, 利用实测数据, 分析林冠上方的太阳辐射特征和时间变化规律, 并且比较其与林外草地的差异, 以期揭示亚热带常绿阔叶林林冠上方的辐射能的特征。

1 研究地区与研究方法

1.1 样地概况

研究地点位于哀牢山国家自然保护区的徐家坝地区 (24°32′N, 101°01′E, 海拔 2400~ 2600 m)。该地区受西南季风影响, 干湿季分明, 干季为 11月—次年 4月, 雨季为 5—10月。年均降水量 1931.9 mm, 年平均相对湿度为 83%, 年均日照时数 1543.5 h, 年均气温 11.3℃。以木果柯 (*Lithocarpus xylocarpus*)为建群种的哀牢山亚热带常绿阔叶林是徐家坝地区分布面积最大、保存最好的原生植被 (邱学忠和谢寿昌, 1998)。乔木冠层高, 垂直分层明显, 主要有乔木上层, 20~ 25 m; 乔木亚层, 5~ 15 m; 灌木层, 1.5~ 3.5 m; 草本层, 1.5 m以下。哀牢山亚热带常绿阔叶林的叶面积指数为 6.02, 冠层坡向为西坡, 坡度为 25°。

林外草地的观测点位于林外气象站内, 距林冠上的观测点直线距离为 600 m左右。

1.2 研究方法

林外草地的太阳辐射数据来自于设置在林外气象站中的总辐射仪 (CM-11, 荷兰 KIPP & ZONEN公司)、净辐射仪 (QMN-101, 芬兰 Vaisala Oyi公司)、反射辐射仪 (CM-6B, 荷兰 KIPP & ZONEN公司) 和日照时数计 (CSD-1, 荷兰 KIPP & ZONEN公司), 均安装在离地表高 1.5 m处。地表覆盖的是草地、草高约 5 cm。

林外草地的观测频率为每小时记录一次, 包括: 总辐射、净辐射、反射辐射的瞬时值和每 1 h总和值。

辐射平衡公式表示为 (傅抱璞, 1994; 贺庆棠, 2001):

$$R_n = Q - Q_r - I \quad (1)$$

则林外草地有效辐射 I由式 (2)计算:

$$I = Q - Q_r - R_n \quad (2)$$

反射率 r利用式 (3)计算:

$$r = Q_r / Q \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{净辐射占总辐射的比率} = R_n / Q \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{有效辐射占总辐射的比率} = I / Q \times 100\% \quad (5)$$

式中: R_n为净辐射; Q为总辐射; Q_r为反射辐射; I为有效辐射。

林冠上各辐射数据均采自林内通量塔上的辐射仪 (CNR-1, 荷兰 KIPP & ZONE公司), 位置在冠层上 (距林冠顶 1.6 m左右, 距地 26.6 m), 该仪器为

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

上下各有一组(长、短波长各 1个)辐射观测探头组成, 可分别观测向下和向上的长波、短波辐射。

林冠上太阳辐射数据为 1 s自动读取 10次, 经仪器处理后输出每 30 min的平均值, 由计算机记录。数据包括: 总辐射、反射辐射、向上长波辐射、向下长波辐射。

由此计算森林有效辐射 I:

$$I = Q_{La} - \delta Q_L \quad (6)$$

并用式(1)算出森林净辐射 R_n。式(6)中: Q_{La} 为林冠作用面向外发出的长波辐射; δ为灰体系数(为 0.95); Q_L 为大气逆辐射。

本研究使用 2009年 1月 1日—2010年 12月 31日的林外草地和林冠上太阳辐射整年观测数据。数据时间为北京时间。

2 结果与分析

2.1 太阳辐射年变化特征及森林与林外草地辐射差异

林外草地、森林的辐射年变化随季节的变化而变化, 即随太阳高度角的变化而变化。从图 1a可见, 林外草地总辐射在 2—5月较高, 为 550.17~571.93 MJ·m^{-2}。森林总辐射大体规律和林外草地相似(图 1b), 只不过 2月峰值最大, 达到了 558.52 MJ·m^{-2}; 7月各辐射最低, 这主要是因为 7月云量最多。有效辐射、反射辐射在 2月最高, 净辐射则是在 4—5月较高。

由于研究样地特殊的地形原因, 哀牢山森林总辐射只占林外草地的 92.7%(表 1)。森林有效辐射和反射辐射均远低于林外草地, 分别只占后者的 73.1%、43.8%。森林净辐射高于林外草地, 前者占后者的 128.7%。这说明即使森林获得的总辐射比林外草地少, 由于其有效辐射和反射辐射比林外草地少, 因而净辐射仍然比林外草地多近 30%。

森林林冠的反射辐射状况是最具特色的林冠特性之一。由于哀牢山亚热带常绿阔叶林样地与林外草地仅相距 600 m左右, 太阳高度变化基本一致。

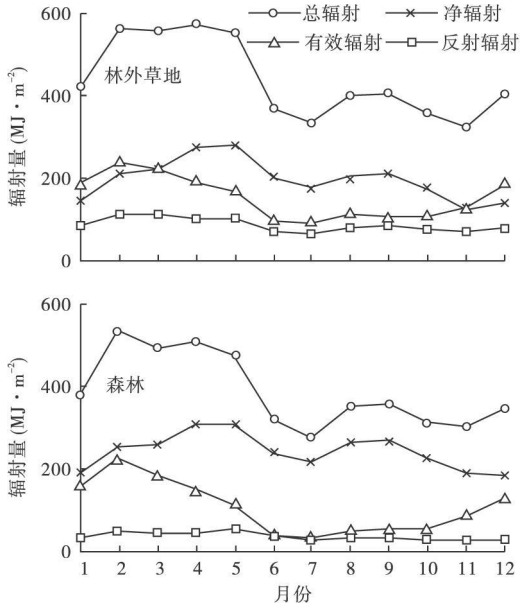

图 1 太阳辐射年变化

Fig 1 Annual variation of solar radiation components of the forest canopy and open area

因此, 2009—2010年前者反射辐射比后者小 593.7 MJ·m^{-2}(表 1), 占林外草地全年反射辐射的 56.2%。其原因就是因下垫面差异导致, 也就是说由于森林的存在使反射辐射发生了变化; 由于亚热带常绿阔叶林林冠上较林外草地颜色深、粗糙度大、群落结构复杂, 相对湿度高, 所以, 哀牢山样地森林反射辐射小于林外草地。

从图 2可见, 森林与林外草地总辐射比在 86%~97%; 净辐射比在 114%~156%; 反射辐射比在 35%~56%; 有效辐射比波动很大, 最高 100.8%(出现在 2月), 最低 34.2%(出现在 7月)。总体来说, 雨季期间有效辐射比较低。

图 2显示, 森林的反射辐射、有效辐射均小于林外草地, 导致净辐射远高于林外草地。

2.2 辐射分配率特征

林外草地净辐射占总辐射比率在 4—10月较高(图 3a), 在 48%~53%内波动; 12月最低, 为 34.7%。林外草地的有效辐射占总辐射比率在

表 1 太阳辐射各分量的季节总量和年总量(MJ·m^{-2})

Table 1 Seasonal and annual values of solar radiation components

	Q		R_n		I		Q_r	
	林外草地	森林	林外草地	森林	林外草地	森林	林外草地	森林
干季	2841.8	2678.1	1121.3	1446.7	1148.6	980.1	571.9	233.2
雨季	2412.9	2194.6	1245.6	1598.8	683.2	359.1	484.1	229.1
年	5254.7	4872.7	2366.9	3045.5	1831.8	1339.2	1056.0	462.3

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

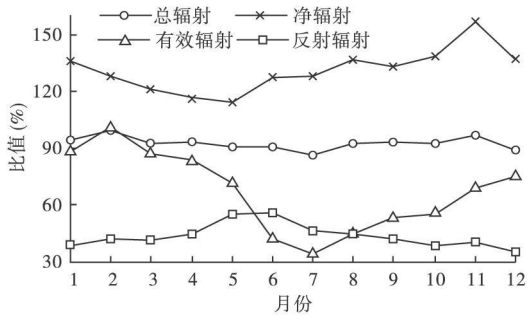

图 2 森林与林外草地太阳辐射比值的年变化

Fig. 2 Annual variation of ratio between solar radiation components of the forest canopy to its open area

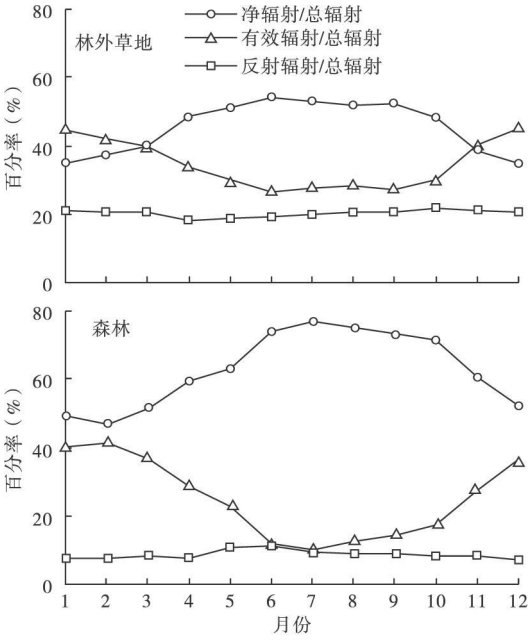

图 3 太阳辐射各分量占总辐射比率的年变化

Fig. 3 Annual variation of distribution ratios of solar radiation components

26.7% ~ 44.8% 波动, 6月最低, 12月最高。反射率波动不大, 在 18% ~ 21% 。

森林的净辐射占总辐射比率 (图 3b)明显高于林外草地, 有效辐射占总辐射比率、反射率低于林外草地。有效辐射占总辐射比率 7月最低, 为 10.5%, 2月最高, 达到 42.5%; 反射率在 8% ~ 11% 变化。净辐射占总辐射比率在 2月最低 (47.7%), 7月最高, 达到 78.3%。

表 2显示了不同季节和年的各辐射分量的分配率, 年分配率特征是: 森林的净辐射占总辐射的比率为 62.7%, 有效辐射占总辐射比率为 27.7%, 反射率为 9.6%; 林外草地净辐射占总辐射比率为 45.0%, 有效辐射占总辐射比率为 34.9%, 反射率为 20.1% 。可见森林的有效辐射占总辐射比率、反射率较林外草地都偏低, 而净辐射占总辐射比率偏高了 17.7% 。

表 2 不同季节和年辐射分配率 (%)

Table 2 Solar radiation ratios in different seasons

	R_n/Q		I/Q		Q_r/Q	
	林外草地	森林	林外草地	森林	林外草地	森林
干季	39.5	54.0	40.4	36.6	20.1	8.7
雨季	51.6	72.9	28.3	16.4	20.1	10.4
年	45.0	62.7	34.9	27.7	20.1	9.6

季节分配情况是: 有效辐射占总辐射比率干季大于雨季。反射率, 林外草地干季大于雨季; 森林, 由于干季不如雨季植被生长繁盛, 冠层叶面积指数大于后者, 造成了干季透射率大于雨季, 所以最终反射率干季小于雨季。净辐射比率干季小于雨季, 说明森林在雨季获得了更多的能量。

3 讨 论

3.1 太阳辐射特征及森林与林外草地辐射比较

由于受到大气环流 (西南季风)、地理位置和地方气候的共同影响, 哀牢山亚热带常绿阔叶林林外草地 2009—2010年的辐射变化特点是在 2—5月较高, 10月时最低 (图 2)。它的变化特征和 2005年 2月—2007年 12月近 3年 (高进波等, 2009)的年平均变化趋势基本相似。

哀牢山常绿阔叶林的总辐射在冬春季高于夏秋季 (图 1), 而此时正是林区气温较低的时期, 由于辐射量的增加, 通过太阳辐射能的热量效应, 使得林区获得的热量以及地温和植物体温度也相应的增加, 这与刘玉洪 (1993)对哀牢山北段地温资料的分析相一致, 而地温和气温之间具有相当密切的关系, 地面的冷热程度直接影响到气温的高低。气温较低时, 太阳辐射量的增加以及由此造成的地温和植物体温度的增加可以降低由于气温较低对于森林植物造成的胁迫, 对于森林植被带在山地上的抬升有力。由此可以认为, 哀牢山徐家坝亚热带常绿阔叶林较低的气温条件下 (年均温只有 11.3 ℃)能分布大面积的中山湿性常绿阔叶林, 且生长繁茂、发育良好, 较强的太阳辐射应是其重要原因之一。

哀牢山样地 2009—2010年林外草地年总辐射达到 5254.7 MJ• m^{-2} (表 3), 这和 2005年 2月—2007年 12月这近 3年的平均值相比, 偏高了 2.1% 。这是由于2009年降水较少、日照时数相应

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3 林外草地太阳辐射年值比较 (MJ• m^{-2})

Table 3 Total annual values of solar radiation out of the forest in different years

时间	Q	R_n	I	Q_r
2009—2010	5254.7	2366.9	1831.8	1056.0
2005年 2月—2007年 12月	5145.4	2125.5	1939.2	1080.7

增加。净辐射比 2005年 2月—2007年 12月相应升高了 11.3%, 有效辐射相应降低了 5.5% (表 3), 可能的原因是, 净辐射增加, 空气温度升高, 大气逆辐射增强, 导致地面有效辐射减小。

森林与林外草地太阳辐射的比较: 森林总辐射小于林外草地, 这主要是由于坡向的原因造成的, 林冠上辐射所在研究样点位于西坡, 林外草地则位于平坦地。由于坡向的影响, 使坡面上每天日出和日落时间减少 (从辐射资料来统计, 林冠上每天的日照时间在 8:30—18:30, 而林外草地则为 7:00—19:00), 再加上直射光与坡面的交角小, 引起林冠上直射光到达量的减少。

在计算森林辐射平衡时, 除了反射辐射, 还必须考虑有效辐射的辐射热消耗。林外草地较森林有效辐射高 (表 2), 说明林外草地温度和气温之间差别较大, 林外草地对大气有较强的热力效应, 对近旁大气增温效应明显, 而森林相对较弱。森林和林外草地干季时有效辐射均较雨季高, 说明干季时较高的有效辐射可以减少气温偏低对植被产生的胁迫, 有利于森林植被的分布和生存。

由于林内土壤含水量较林外草地高, 森林比林外草地具有较高的净辐射 (年相差 678.6 MJ• m^{-2}), 除了用于增加气温 (显热通量), 其余绝大部分被用于土壤水分的蒸发 (潜热通量), 使森林较林外草地具有较高的相对湿度, 这对于林内附生植物生长和分布有利, 使林区具有较高的生物多样性指数 (李苏等, 2007)。同时, 较高的林内相对湿度也是植物学家将哀牢山徐家坝林区的亚热带常绿阔叶林称为"湿性"常绿阔叶林的原因 (刘玉洪, 1993)。

本研究除探讨了辐射的变化外, 还比较了反射率, 发现林外草地的反射率 (20.1%) 大于森林 (9.5%), 年平均相差 10.6%。原因有 3个方面: 1)林外草地在干季时枯黄, 引起反射率增大, 林冠上由于常年颜色较深, 林冠粗糙又引起多次反射, 增加了林冠太阳辐射的吸收和透过量; 2)林冠透光空隙的黑体效应和林木的蒸腾与光合作用等, 都有减小林冠反射率的作用; 3)哀牢山亚热带常绿阔叶林的蒸腾和光合作用等生理过程选择吸收了其所需光谱的太阳辐射, 反射率相应降低。

3.2 与其他地区比较

与相近纬度同植被类型的鼎湖山、鹤山相比, 哀牢山林区在日照时数比鹤山小 255 h, 和鼎湖山基本持平, 总辐射 (4872.7 MJ• m^{-2}) 却比鼎湖山、鹤山分别高出 207.7和 357.5 MJ• m^{-2} (表 4), 这样的辐

表 4 我国各地森林辐射状况对比

Table 4 Solar radiation in different regions in China

地点	植被类型	海拔 (m)	纬度 N	经度 E	Q(MJ• m^{-2})	辐射比率 (%)			日照时数 (h)	时段	文献
						R_n/Q	I/Q	Q_r/Q			
哀牢山	草地	2450	24°32′	101°01′	5254.70	45.04	34.86	20.10	1543	全年	本研究
西双版纳	热带季节雨林	756	21°57′	101°12′	5018.75	59.98	28.68	11.34	1828	全年	张一平等, 2005
尖峰岭	热带山地雨林次生林	867	18°44′	108°51′	5005.9	55.49	–	–	–	全年	周璋, 2009
长白山	温带阔叶红松林	738	42°24′	128°6′	4875.9	–	–	27.00	2120	全年	金昌杰等, 2000
哀牢山	亚热带常绿阔叶林	2478	24°32′	101°01′	4872.7	62.50	27.48	9.49	1543	全年	本研究
尖峰岭	热带山地雨林	890	18°43′	108°53′	4669.2	67.77	–	–	–	全年	周璋, 2009
鼎湖山	亚热带针阔混交林	100~700	23°10′	112°34′	4665.0	60.19	32.10	7.71	1433	全年	王旭等, 2007
鹤山	亚热带阔叶混交林	80	22°40′	112°53′	4515.2	60.70	27.90	11.40	1798	全年	任海和彭少麟, 1997
北京小龙门	暖温带落叶阔叶林	2313	39°58′	115°26′	4372.95	55.04	29.40	15.56	2003	全年	桑卫国等, 2001
千烟洲	亚热带丘陵区人工林	110.8	26°44′	115°57′	4336	64.94	–	–	1306	全年	刘允芬等, 2006 崔莎莎等, 2010
会同	杉木林	270~350	26°50′	119°45′	3844.97	73.50	19.00	7.50	2000	以上	全年
北京东灵山	暖温带落叶阔叶林	1250	39°58′	115°41′	3095.45	53.59	–	–	2600	5—8月	孙雪峰和陈灵芝, 1996

按照各地的总辐射的大小顺序排列, 所有森林站点辐射都按林冠上辐射统计。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

射能量分配说明: 和鼎湖山、鹤山相比, 哀牢山北部山顶有更多的能量用于森林生长, 以及显热、潜热耗散; 太阳辐射对温度较低的哀牢山亚热带常绿阔叶林来说是重要的能量补充来源 (哀牢山样地年均温仅 11.3 ℃, 比鼎湖山、鹤山分别低 9.6 ℃、10.7 ℃; 10 ℃以上积温仅有 3049 ℃, 比鼎湖山、鹤山分别低 4447 ℃、4548 ℃)。

从表 4可以看出, 林外草地净辐射占总辐射比率比森林偏低, 即: 有植被覆盖样地净辐射占总辐射比率比裸地高。在植被类型上, 杉木林的净辐射占总辐射比率最高, 为 73.5%, 热带山地雨林为 67.7%, 亚热带常绿阔叶林为 60.1% ~ 62.5%, 热带季节雨林为 59.9%, 温带落叶阔叶林最低, 为 53.5% ~ 55.0%。

究其原因, 会同杉木林为 14年生的人工林, 种植密集 (2490株 • hm^{-2}), 吸收率较高, 年净辐射达到 2741.15 MJ• m^{-2}; 暖温带落叶阔叶林冬天反射率很高, 所以获得的净辐射偏低, 小于亚热带常绿阔叶林平均水平。因此, 可以得出这样的结论, 净辐射占总辐射比率落叶林不如常绿林高。

在植被类型上, 反射率的变化趋势是: 温带落叶阔叶林最高, 为 27.0%, 暖温带落叶阔叶林 15.5%, 亚热带针叶林 13.4%, 亚热带阔叶林 9.4% ~ 11.4%, 热带季节雨林 11.3%, 杉木林 7.5%。显然, 反射率随森林冠层郁闭度、群落结构粗糙度的增大而减小。

各样地的辐射分配率受当地的气候、植被、下垫面综合影响, 导致最终近地层得到了不同的辐射分量。哀牢山亚热带常绿阔叶林特殊的气候地理条件: 较大的降雨量 (1931.9 mm)和较高相对湿度 (相对湿度 83%), 较大的净辐射 3045.53 MJ• m^{-2}, 较高的海拔 (2450 m)和较低的年均温 (11.3 ℃), 共同形成了当地温凉潮湿、辐射能相对较多的生境, 使得当地分布了如此大面积的亚热带常绿阔叶林, 且生长繁茂, 发育良好。

致 谢 本研究得到了中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站的大力支持, 在此表示感谢。中国科学院西双版纳热带植物园的姚玉刚博士、赵俊斌博士、游广永博士对本文提出的宝贵意见; 中国科学院西双版纳热带植物园的 Douglas Schaefer博士修改了英文摘要, 在此一并表示感谢。

参考文献

崔启武, 朱劲伟. 1981. 林冠结构和光分布——光的透射和反射理论. 地理学报, **36**(2): 196-208.
崔莎莎, 康文星, 赵仲辉, 等. 2010. 杉木人工林生态系统太阳辐射特征研究. 中南林业科技大学学报, **30**(3): 18-24.
傅抱璞, 翁笃鸣, 虞静明, 等. 1994. 小气候学. 北京: 气象出版社.
高进波, 张一平, 巩合德, 等. 2009. 哀牢山亚热带常绿阔叶林林区太阳辐射特征. 山地学报, **27**(1): 33-40.
贺庆堂. 2001. 中国森林气象学. 北京: 中国林业出版社.
金昌杰, 关德新, 朱廷曜. 2000. 长白山阔叶红松林太阳辐射分光谱特征. 应用生态学报, **11**(1): 19-21.
李苏, 刘文耀, 王立松, 等. 2007. 云南哀牢山原生林及次生林群落附生地衣物种多样性与分布. 生物多样性, **15**(5): 445-455.
刘玉洪. 1993. 哀牢山北段山地的地温气候资源分析. 自然资源学报, **8**(2): 158-165.
刘允芬, 于贵瑞, 李 菊, 等. 2006. 红壤丘陵区人工林能量平衡闭合研究——以江西省泰和县千烟洲为例. 林业科学, **42**(2): 13-20.
邱学忠, 谢寿昌. 1998. 哀牢山森林生态系统研究. 昆明: 云南科技出版社.
任 海, 彭少麟. 1997. 鹤山人工林的辐射能环境研究. 生态科学, **16**(1): 22-29.
桑卫国, 郑 豫, 张德全. 2001. 暖温带落叶阔叶林林冠表面辐射通量动态与特点. 东北林业大学学报, **29**(3): 40-43.
孙雪峰, 陈灵芝. 1996. 暖温带落叶阔叶林辐射能量环境初步研究. 生态学报, **15**(3): 278-286.
王 旭, 周国逸, 孙 阁, 等. 2007. 鼎湖山针阔混交林生态系统外向辐射通量研究. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), **33**(3): 328-337.
吴征镒. 1983. 云南哀牢山森林生态系统研究. 昆明: 云南科技出版社.
张一平, 窦军霞, 于贵瑞, 等. 2005. 西双版纳热带季节雨林太阳辐射特征研究. 北京林业大学学报, **27**(5): 17-25.
周 璋. 2009. 海南尖峰岭热带山地雨林小气候特征研究 (硕士学位论文). 北京: 中国林业科学研究院.
朱劲伟, 崔启武. 1982. 林冠的结构和光分布——光的吸收理论的探讨. 林业科学, **18**(3): 258-265.
Agyeman VK, Swaine MD, Thompson J. 1999. Response of tropical forest tree seedlings to irradiance and the derivation of a light response index. *Journal of Ecology*, **87**: 815-827.
Castro F, Fetcher N. 1998. Three dimensional model of the interception of light by a canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, **90**: 215-223.
Federer CH, Tanner CB. 1966. The spectral distribution of light in the forest. *Ecology*, **47**: 555-560.
Finch DA, Bailey WG, Mcarthur LJB, *et al*. 2004. Photosynthetically active radiation regimes in a southern African savanna environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, **122**: 229-238.
Gates DM, Tantrapon W. 1965. The reflectivity of deciduous trees and herbaceous plants in the infrared to 25 microns. *Science*, **115**: 613-616.
Poorter L. 1999. Growth responses of 15 rain-forest trees species to a light gradient: The relative importance of morphological and physiological traits. *Functional Ecology*, **13**: 396-410.
Thomas SC, Bazzaz FA. 1999. Asymptotic height as a predictor of photosynthetic characteristics in Malaysian rain forest trees. *Ecology*, **80**: 1607-1622.

作者简介 李麟辉, 男, 1984年生, 硕士。主要从事生态气候学研究。E-mail: lilinhui@xtbg.ac.cn
责任编辑 王 伟

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net