

文章编号: 1008-2786-(2009)1-033-08

哀牢山亚热带常绿阔叶林林区太阳辐射特征

高进波^{1,2,3}, 张|平^{1*}, 巩合德¹, 刘玉洪¹

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223 2. 西南林学院, 云南 昆明 650224;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 利用中国科学院西双版纳热带植物园哀牢山森林生态系统研究站林外自动气象站 2005-02到 2007-12 的辐射观测数据, 对哀牢山北部山顶亚热带常绿阔叶林林区的太阳辐射平衡各分量的年、季节和日变化特征进行了分析, 得出哀牢山林区太阳辐射年总辐射为 $5\,146.4\text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 干季的太阳总辐射量 ($2\,764.7\text{ MJ}/\text{m}^2$) 占全年总量的 53.7%, 雨季的太阳总辐射量 ($2\,381.7\text{ MJ}/\text{m}^2$) 占全年总量的 46.3%。各辐射分量年值占总辐射年值的百分率为净辐射 41.3%, 反射辐射 21.0%, 有效辐射 37.7%。太阳辐射各分量占太阳总辐射的比率在不同的季节由于天气状况和大气中含水量的不同存在一定的差异, 反射辐射和有效辐射的分配率均是干季大于雨季, 净辐射的分配率则是雨季大于干季。从全年来看, 净辐射分配率的变幅最大 (31.1% ~ 51.9%), 有效辐射次之 (28.6% ~ 48.6%), 反射辐射最小 (18.4% ~ 24.2%); 从分配率的日变化可知, 反射辐射和有效辐射均是清晨和傍晚较高, 昼间较小, 净辐射则相反, 各辐射分量分配率在昼间的变化均较小。不同季节各辐射分量占总辐射的比重不同, 干季有效辐射所占比重最大, 其次是净辐射, 反射辐射最小; 雨季净辐射所占比例最大, 其次是有效辐射, 反射辐射最小。与相近纬度的鼎湖山和鹤山林区相比, 哀牢山林区总辐射量高于两地, 而年均气温 (热量) 低于两地, 由此可以认为哀牢山林区在较低的气温条件下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原因之一。

关键词: 太阳辐射; 哀牢山; 常绿阔叶林; 分配率

中图分类号: P422.1, S718.5

文献标识码: A

太阳辐射能是地球大气的重要能量来源。辐射能环境是生态系统能量输入的物质基础, 作为生态系统驱动力, 影响着生态系统的动态, 最终决定生态系统的性质。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。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。

在森林辐射环境研究领域, 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^[1-14, 24, 25], 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。

哀牢山山脉位于云南中部, 呈现准南北走向, 是东南季风和西南季风的分界线^[15]。在哀牢山 2 200 m 以上地区, 分布着大面积原生的亚热带常绿阔叶林, 与相近地区比较, 其分布海拔较高。如此高海拔地区为什么能够分布大面积的原生亚热带常绿阔叶林, 其气候条件对其的生存的贡献如何? 乃是人们

收稿日期 (Received date): 2008-09-03; 改回日期 (Accepted): 2008-12-05.

基金项目 (Foundation item): 国家重点基础研究发展计划 (国家 973 项目) (2003CB415101), 云南省自然科学基金重点项目 (2003C0002Z) 资助。[Supported by the National Key Project for Basic Research on Ecosystem Changes in Longitudinal Range-Gorge Region and Transboundary Ecosystem of Southwest China (2003CB415101), the Natural Science Foundation of Yunnan Province (2003C0002Z).]

作者简介 (Biography): 高进波 (1978-), 男, 汉族, 安徽人, 硕士, 主要研究领域: 生态气候。[Gao Jinbo (1978-), male, the Han nationality. Mostly field ecological climatology.] Tel 0871-3862778; E-mail gaojb@xtbg.ac.cn

* 通讯联系人 (Corresponding author): 张一平 [Zhang Yiping], Tel 0871-5160904; E-mail yipingz@xtbg.ac.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

关注的问题。张克映^[16]曾对其山地气候特征、张一平等^[17]对常绿阔叶林林窗的小气候特征进行过研究,刘玉洪^[18]研究了林内外的气温、地温的变化特征,表明较高的地温是亚热带常绿阔叶林能够生存的原因之一。但是,对于作为森林生态系统能量来源(驱动力)的太阳辐射的变化特征尚还没有进行过系统的研究。

作者利用哀牢山生态站林外自动气象站接近 3 a 连续的辐射观测资料,对哀牢山北段山顶(徐家坝)亚热带常绿阔叶林林区的太阳辐射的时间变化规律及其太阳辐射分配率进行了初步研究,以把握哀牢山亚热带常绿阔叶林林区的太阳辐射特征及其分配规律。

1 样地概况和研究方法

1.1 样地概况

哀牢山国家级自然保护区纵贯云南省中南部,其中保存着大面积原生亚热带常绿阔叶林,且是云南特有种为优势的中山湿性常绿阔叶林。本研究所选择的观测地在哀牢北部的徐家坝(24°32'N, 101°01'E, 海拔 2 450 m),最热月气温 15.6℃、最冷月气温 5.4℃。年平均气温 11.3℃, $\sum t > 10^\circ\text{C}$ 活动积温 3 420℃;年降水 1 931 mm; 11月至次年 4 月为干季,天气晴朗,少雨,降水量占年降水量的 13%; 5~10 月为雨季,云雨天气频繁,降水量占年降水量的 87%。常绿阔叶林林区的土壤主要为山地黄棕壤,森林植被类型是以木果石栎为标志的中山湿性常绿阔叶林,连续分布于海拔 2 200~2 600 m 的范围内,面积约为 29.22 km²,占该区总面积的 77.94%^[19]。

1.2 观测方法

分析数据来源于中国科学院西双版纳热带植物园哀牢山森林生态系统研究站于 2005-01 设置的林外自动气象站,观测用的仪器为总辐射仪(CM-11, 荷兰 KIPP & ZONEN 公司)、净辐射仪(QMN-101, 芬兰 Vaisala Oy 公司)、反射辐射仪(CM-6B, 荷兰 KIPP & ZONEN 公司)和太阳日照时数计(CSD-1, 荷兰 KIPP & ZONEN 公司),均放置在地表以上 1.5 m。

数据为每小时记录一次,包括:总辐射、净辐射、反射辐射的瞬时值和每小时总和值。观测使用的时间为地方时,与北京时间相比推迟 1 h 16 min。研究中使用的数据是 2005-02-01 到 2007-12-31

接近 3 a 的观测数据。

1.3 计算方法

地表的辐射平衡 R_n 表示为某段时间内单位面积地表所吸收的总辐射和其有效辐射之差值。公式为

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

式中 Q 为总辐射; Q_a 为反射辐射; I 为有效辐射。

地面有效辐射表示为地面放射的辐射与地面吸收的大气逆辐射之差。由于总辐射、反射辐射和净辐射均为自动气象站的观测量,所以,地面有效辐射可以由公式 1 进行计算。其计算公式为

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

各辐射分量的百分率的计算为各辐射分量与太阳总辐射的比值:

$$\text{净辐射百分率} = R_n \times 100 / Q \quad (3)$$

$$\text{反射辐射百分率} = Q_a \times 100 / Q \quad (4)$$

$$\text{有效辐射百分率} = I \times 100 / Q \quad (5)$$

式中 Q 为总辐射; R_n 为净辐射; Q_a 为反射辐射; I 为有效辐射。

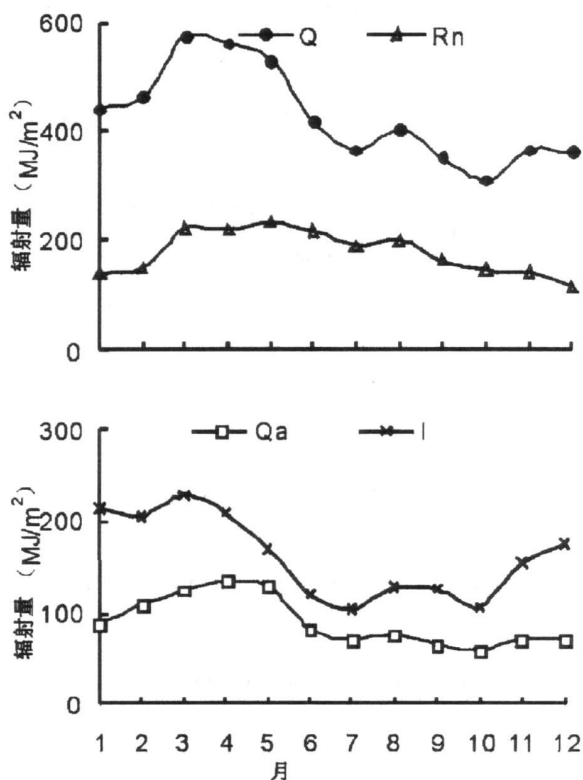


图 1 太阳辐射月总量变化

Fig 1 Monthly variation of solar radiation

2 结果与分析

2.1 太阳辐射特征

2.1.1 年变化特征

从图 1 可见,林区的太阳总辐射和有效辐射的最大值出现在 3 月,净辐射的最大值出现在 5 月,反射辐射则出现在 4 月,总辐射和反射辐射最小值出现在 10 月,净辐射的最小值出现在 12 月,有效辐射出现在 7 月;总辐射量在 6~12 月低于其他月;有效辐射和反射辐射也表现出相似的趋势;从各辐射分量月总值的波动性上来说,反射辐射的波动性最大(变异系数 CV 为 0.30),其次为有效辐射和净辐射(CV 分别为 0.28 和 0.23),总辐射的波动性最小(CV 为 0.20)。从干、雨季的差异来看,总辐射、反射辐射和有效辐射都是干季大于雨季,干季的太阳辐射总量分别占到了全年总值(5 146.4 MJ/m²、1 080.3 MJ/m² 和 1 941.3 MJ/m²) 的 53.7%,55.4% 和 61.1%,而净辐射则是雨季大于干季,干季的净辐射总量只占到全年总值(2 124.8 MJ/m²) 的 46.1% (表 1)。

表 1 太阳辐射各分量不同季节总量值占年值的百分率(%)
Tabal 1 Ratios of total seasonal values to annual values for solar radiation components (%)

季节	Q	Q_a	R_n	I
干季	53.7	55.4	46.1	61.1
雨季	46.3	44.6	53.9	38.9

2.1.2 日变化特征

2.1.2.1 年辐射日变化

从干季雨季和年各辐射分量平均值的日变化(图 2)可见,太阳辐射各分量的变化均呈现单峰分布,随着太阳高度角不断增大,总辐射、净辐射和反射辐射强度不断增加,在中午前后出现最大值;总辐射、反射辐射和净辐射最大值出现的时间均出现在 12:00 左右;有效辐射最大值的出现时刻在、比其他辐射分量最大值出现的时刻晚 1 h。另外,净辐射由负值转为正值的时段为早上 6:00~7:00 间,由正值转为负值的时段为傍晚 17:00~18:00 间。从有效辐射的日变化来看,干季、雨季和年有效辐射平均值全天均为正值,其数值干季均大于雨季,说明无论是在干季还是雨季,地面总是作为热源起到加热近旁

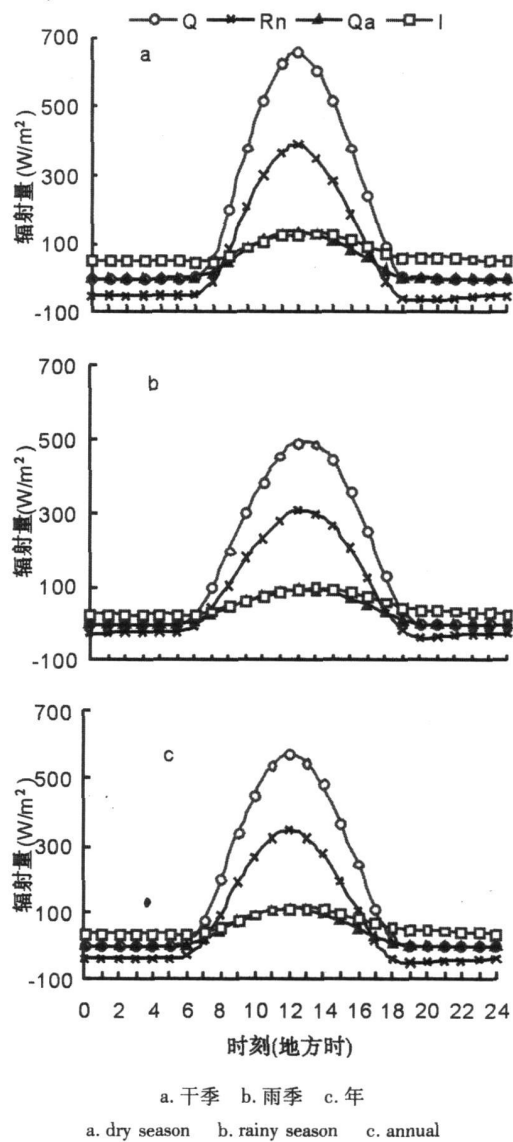


图 2 太阳辐射各分量的日变化
Fig 2 Daily variation of solar radiation components in different seasons (local time)

空气的作用,而干季作用更为明显。从时间变化上来看,有效辐射的最小值总是出现在清晨时分,随着太阳高度角的升高,有效辐射迅速升高,在达到最大值以后迅速下降,日落以后其变化速率变慢,至次日清晨达到最小值,同时,其昼间的变幅大于夜间。

2.1.2.2 各季节辐射日变化

通过分析不同季节的太阳辐射各分量的平均值日变化(见图 2)可以看出,总辐射、反射辐射、净辐射和有效辐射的最大值总是在干季时高于雨季;总辐射的最大值在干季和雨季时均出现在中午 12:00 并维持一定的时间,然后迅速下降,净辐射的最大值在干、雨季的出现时间和总辐射的相一致,反射辐射

的的最大值在雨季的出现时刻比干季晚 1 h 出现在 13: 00 左右; 有效辐射最大值的出现时刻在干季和雨季均比总辐射和净辐射最大值出现的时刻晚 1 h

从各辐射分量的时间变化来看, 它们的变化规律基本相似均呈单峰曲线。从各辐射日变幅上来看, 总是干季的变幅大于雨季。

从太阳辐射各分量不同季节日总量 (表 2) 中可以看出, 太阳总辐射、反射辐射和有效辐射日总量均是干季大于雨季, 净辐射日总量则是雨季大于干季。

表 2 太阳辐射各分量不同季节日总量 ($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)
Tabal 2 Total daily values of solar radiation components in different season ($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)

时间	Q	Qa	Rn	I
干季	15.3	3.3	5.4	6.6
雨季	12.9	2.6	6.2	4.1
年	14.1	3.0	5.8	5.3

2.2 太阳辐射分配率特征

2.2.1 年变化特征

太阳辐射分配率反映的是太阳辐射各分量辐射值在太阳总辐射值中所占比例的大小。从图 3 中可以看出: 太阳辐射各分量占总辐射的分配率的大小随着月份的不同而发生变化。净辐射的分配率干季 (5 ~ 10 月) 明显高于雨季, 其值在 43.9% ~ 51.9% 之间, 最大值出现 7 月 (51.9%), 1 月最低 (31.1%); 有效辐射的分配率的年变化规律与净辐射的相反, 雨季较低, 最小值出现在 7 月 (28.6%), 最大值出现在 1 月和 12 月 (48.6%); 反射辐射的

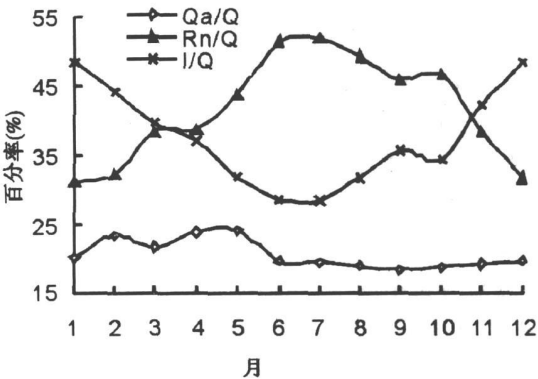


图 3 太阳辐射各分量占总辐射分配率年变化

Fig 3 Monthly variation of distribution ratios of solar radiation components

分配率在 1 ~ 5 月的变化较大 (20.2% ~ 24.2%), 切其值高于其他月, 最大值出现在 5 月 (24.2%), 其他月的变化较小 (18.4% ~ 19.7%), 最小值出现在 9 月 (18.4%)。

2.2.2 日变化特征

从不同季节太阳辐射各分量占总辐射分配率日变化中可以看出, 反射辐射分配率 (图 4a) 总体上是清晨和傍晚较高而昼间较小, 干季和雨季的最小值均出现在 12 00 分别为 20.8% 和 18.7%, 干季各时刻的反射辐射分配率总是大于雨季。从全年平均值的日变化中可以看出昼间 (10 00 ~ 15 00) 的变幅较小, 分配率在 19.9% ~ 20.7% 间, 呈现上午高, 下午低的变化趋势。

净辐射分配率 (图 4b) 总体上的变化规律与反射辐射相反, 呈现清晨和傍晚较大而昼间较小的特

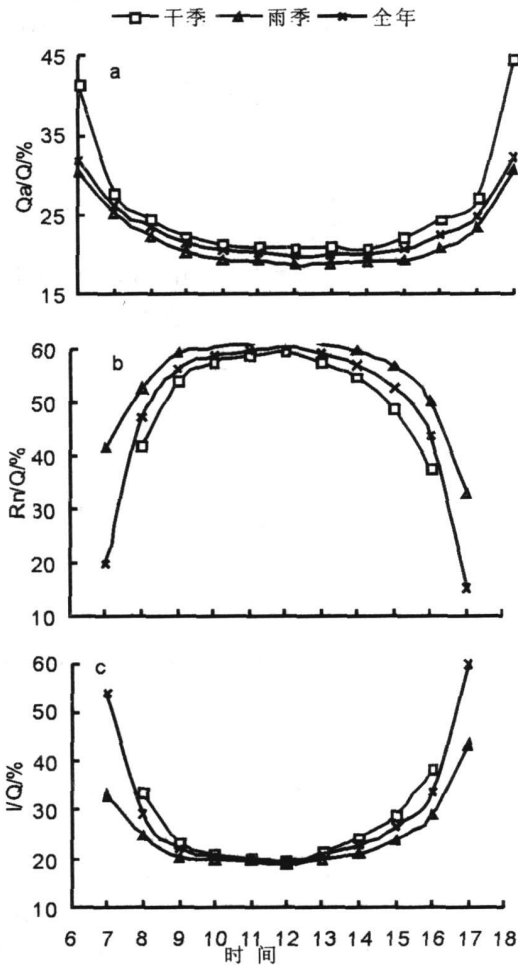


图 4 不同季节太阳辐射各分量
占总辐射分配率日的变化

Fig 4 Daily variation of distribution ratios of solar radiation components in different seasons

征, 干季和雨季最大值均出现在 12 00 其值分别为 59. 6% 和 62. 4%。干季呈现上午低, 下午高的趋势, 雨季呈现上午高, 下午低的趋势, 雨季昼间的变幅 (51. 9% ~ 60. 0%) 小于干季 (42. 0% ~ 58. 2%)。雨季各时刻的净辐射分配率的数值均大于干季。

有效辐射分配率 (图 4c) 的变化规律总体上与反射辐射相同, 呈现清晨和傍晚高, 昼间低的趋势, 干、雨季均呈现由上午较低值向下午较高值过渡的趋势, 干季昼间的变幅 (23. 4% ~ 29. 1%) 大于雨季 (19. 0% ~ 23. 9%), 从其数值上看, 各时刻有效辐射分配率均是干季大于雨季。

表 3 不同季节太阳辐射量占总辐射量的分配率 (%)

Tabal 3 Distributing ratios of solar radiation components in different seasons (%)

时间	Q_a	R_n	I
干季	21. 6	35. 5	42. 9
雨季	20. 2	48. 1	31. 7
年	21. 0	41. 3	37. 7

从表 3 中可见, 净辐射在各分量中分配率最大, 年分配率为 41. 3%, 其次是有效辐射年分配率为 37. 7%, 反射辐射最小为 21. 0%; 在不同季节有所不同, 干季有效辐射的分配率最大为 42. 9%, 其次是净辐射 35. 5%, 反射辐射最小 21. 6%; 雨季净辐射分配率 48. 1% 最大, 其次是有效辐射 31. 7%, 反射辐射最小 20. 2%。分析各辐射分量在不同季节分配率的值可以看出, 反射辐射和有效辐射均是在干季时大于雨季, 净辐射则相反, 干季小于雨季。

3 讨论与小结

3. 1 太阳辐射特征

太阳辐射能到达地表时, 除了受太阳辐射角的影响, 还与大气透明度、空气含水量和云量等因素有关。由于受到大气环流 (西南季风)、地理位置和地方气候 (干、雨季分明) 的共同影响, 哀牢山地区太阳辐射年总辐射为 $5\,146.4\text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 最大值出现在 3 月 ($573.7\text{ MJ}/\text{m}^2$), 最小值出现在 10 月 ($310.3\text{ MJ}/\text{m}^2$), 干季的太阳总辐射量 ($2\,764.7\text{ MJ}/\text{m}^2$) 占全年总量的 53. 7%, 雨季的太阳总辐射量 ($2\,381.7\text{ MJ}/\text{m}^2$) 占全年总量的 46. 3%。主要是由于哀牢山处于西南季风区域内, 11 ~ 4 月为来自西

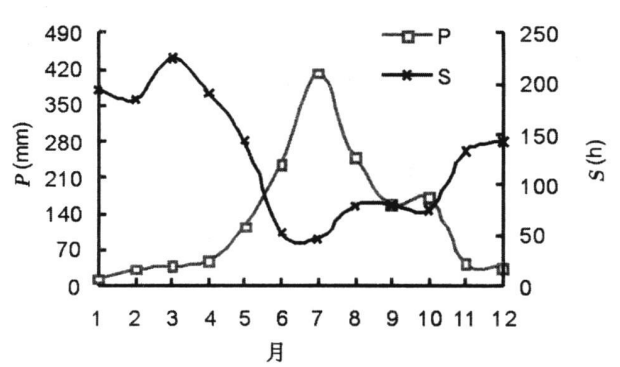


图 5 降水量和日照时数年变化
Fig 5 M monthly variation of precipitation and sunshine duration

部低纬内陆和沙漠区的干湿气候所控制, 天气一般晴朗, 干爽而少雨; 5~ 10 月由于受到西南季风的控制, 由于哀牢山地区的云雨天气频繁, 使太阳辐射量波动很大, 虽然太阳高度角较其他他高, 其太阳辐射量仍然低于其他月。由图 5 可见雨季 (5~ 10 月) 的降雨量明显高于其他月, 相应的照时数则明显低于其他月。与本区哀牢山山麓地带景东气象站^[20] ($24^{\circ}28'N$, $101^{\circ}05'E$; 海拔 $1\,162\text{ m}$) 相比 (年太阳总辐射为 $5\,359.1\text{ MJ}/\text{m}^2$), 海拔高差约达 $1\,400\text{ m}$, 年总辐射减少了 3. 9%, 这与太阳总辐射量随海拔的增加而增加的一般原理不相符合^[21], 其原因可能是由于哀牢山顶 (徐家坝) 的年日照时数 ($1\,543.5\text{ h}$) 比景东站的年日照时数 ($2\,044.1\text{ h}$) 减少了 24. 5%, 降水量相应增加了 37. 0% (徐家坝年降水量为 $1\,549.9\text{ mm}$, 景东为 $1\,131.6\text{ mm}$), 相对湿度增加了 7% (徐家坝的年平均相对湿度为 84%, 景东为 77%) 的缘故; 与云南省其他地区相比, 哀牢山徐家坝地区的年太阳总辐射量居于云南省 ($3\,620\sim 6\,682\text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$) 的中上水平, 年变化趋势除滇东北部地区以外, 与云南省其他地区相似^[22]; 与华南地区^[23] (年总辐射量为 $41\,86.8\sim 5\,987.1\text{ MJ}/\text{m}^2$) 相比, 其年总辐射量高于华南多数地区, 变化规律也不相同, 华南地区由于受到东南季风的影响, 年内总辐射最大值都出现在 7 月, 最小值出现在 2 月; 与具有相同植被类型位于华南地区的鼎湖山 ($23^{\circ}10'N$, $112^{\circ}32'E$) 和鹤山 ($22^{\circ}40'N$, $112^{\circ}53'E$) 相比较, 其年总辐射量比鼎湖山^[24] ($4\,669.3\text{ MJ}/\text{m}^2$) 高 12%, 比鹤山^[25] ($4\,748.2\text{ MJ}/\text{m}^2$) 高 11%; 而年均气温 (11.3°C) 比鼎湖山 (20.9°C) 低 9.6°C , 比鹤山 (21.7°C) 低 10.4°C 。

通过以上的分析可见, 哀牢山常绿阔叶林林区

(徐家坝)的总辐射在冬季时高于夏季,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^[17]对哀牢山北段地温资源的分析相一致,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,哀牢山徐家坝林区较低的气温条件下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。

3.2 太阳辐射分配率特征

通过对太阳辐射各分量分配率变化特征的分析可以更好了解林区的辐射平衡特征。各辐射分量年值占总辐射年值的分配率:净辐射为 41.3%,反射辐射为 21.0%,有效辐射为 37.7%,太阳辐射各分量占太阳总辐射的分配率在不同的季节由于天气状况和大气中含水量的不同存在一定的差异,反射辐射和有效辐射的分配率是干季大于雨季,而净辐射的分配率则是雨季大于干季。从分配率的年变化情况来看,净辐射分配率的变幅最大(31.1%~51.9%),有效辐射次之(28.6%~48.6%),反射辐射最小(18.4%~24.2%)。从日变化可知,反射辐射和有效辐射均是清晨和傍晚较高,昼间较小,净辐射则相反,各辐射分量分配率在昼间的变化均较小。不同季节各辐射分量占总辐射的比重不同,干季有效辐射所占比重最大,其次是净辐射,反射辐射最小;雨季净辐射所占比例最大,其次是有效辐射,反射辐射最小。

哀牢山亚热带常绿阔叶林林区太阳辐射分配呈现如此的变化规律,与徐家坝地区的气候条件有密切的关系。由于受到大气环流,地理位置和太阳高度角的共同影响,徐家坝地区具有干季(11~4月)和雨季(5~10月)之分。干季的降水量只占全年降水量的13%,因而大气和土壤中的含水量在干季都明显的小于雨季,由于反射率主要是决定于地表面的性质和状况,干季时地表比较干燥,因此反射率比较高,清晨和傍晚由于太阳高度角较小,反射率也比较大。有效辐射量的大小,与云量、地表温度以及空气中的温湿度有关,有效辐射分配率总体上是干季大于雨季,主要是由于雨季时降雨量较大,空气的湿

度和云量较大从而导致大气的逆辐射加强,有效辐射减小。净辐射的大小取决与太阳总辐射、反射辐射和有效辐射的大小,干季时虽然总辐射值高于雨季,但是由于反射辐射和有效辐射与总辐射具有相似的变化规律,造成月净辐射值在干季和雨季的变化不大,同时由于雨季太阳总辐射较小,因此,净辐射的分配率在雨季时大于干季。

太阳辐射分配率的这种变化规律对于哀牢山亚热带常绿阔叶林林区的生态环境以及气候特征都会产生一定的影响。干季时时较高的有效辐射说明地温和气温之间差距较大,地面对大气有较强的热力效应,对近旁大气起到一定增温效应。干季时较高的有效辐射可以减小气温较低产生所产生的胁迫,有利于森林植被的分布和生存。雨季具有较高的净辐射,由于哀牢山亚热带常绿阔叶林林区在雨季时降水量很大,土壤含水量几乎饱和,因此地面净辐射除了用于增加气温(潜热通量),其余绝大部分被用于土壤水分的蒸发(潜热通量),使林区雨季具有较高的相对湿度,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^[26]。同时,较高的林区相对湿度也是植物学家将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^[27]。

众所周知,由于森林的存在,林冠对于太阳辐射的吸收和反射,造成林内辐射特征与林外相比具有强度减弱、光质改变、分布不均及日照时间缩短的基本特点。对于林冠和林内的太阳辐射特征本研究没有涉及到,将在下一步的工作中进一步的开展。

致谢:本研究得到了中国科学院西双版纳热带植物园哀牢山森林生态系统研究站的大力支持,罗鑫、纪金华参加了观测工作,在此表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] Ghokh L, Clark K L. Energy exchange across a chronosequence of slash pine forests in Florida [J]. *Agric For Meteorol* 2002, 112: 87~102
- [2] Gimbeluca TW, Fox J, Yamasan S, et al. Dry-season radiation balance of land covers replacing forest in northern Thailand [J]. *Agric For Meteorol* 1999, 95: 53~65
- [3] Hardy JP, Melloh R, Koenig G, et al. Solar radiation transmission through conifer canopies [J]. *Agric For Meteorol* 2004, 126: 257~270
- [4] Poorter L. Light-dependent changes in biomass allocation and their importance for growth of rain forest tree species [J]. *Func Ecol* 2001, 15: 111~123
- [5] Kuusk A, Lang M, Nilson T. Simulation of the reflectance of ground vegetation in sub-boreal forests [J]. *Agric For Meteorol* 2004, 126:

- 33~ 46
- [6] Robert S C, Robin L C. Rapid assessment of understory light availability in a wet tropical forest [J]. *Agric For Meteorol*, 2004, 123: 177~ 185
- [7] S. Capers R, Chazdon R L. Rapid assessment of understory light availability in a wet tropical forest [J]. *Agric For Meteorol*, 2004, 123: 177~ 185
- [8] Sinoquet H, Rakocevic M, Varlet-Grancher C. Comparison of models for daily light partitioning in multispecies canopies [J]. *Agric For Meteorol*, 2000, 101: 251~ 263
- [9] Vierling L A, Wesman C A. Photosynthetically active radiation heterogeneity within a monodominant Congolese rain forest canopy [J]. *Agric For Meteorol*, 2000, 103: 265~ 278
- [10] Wilson K B, Bakocchi 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~ 18
- [11] Sun X F, Chen L Z. A preliminary study on the environment of radiation energy of deciduous broad-leaved forest in the warm temperature zone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3): 278~ 286 [孙雪峰, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林辐射能量环境初步研究 [J]. *生态学报*, 1995, 15(3): 278~ 286]
- [12] Ren H, Peng S i, Zhang Z P, *et al* Study on canopy structure and canopy radiation of monsoon evergreen broad leaf forest in Dinghusan biosphere reserve, Guangdong [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(2): 174~ 179 [任海, 彭少麟, 张祝平, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林林冠结构与冠层辐射研究 [J]. *生态学报*, 1996, 16(2): 174~ 179]
- [13] Zhang Y P, Dou J X, Liu Y H, *et al* Radiation characteristics in a tropical seasonal rain forest canopy gap [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(6): 929~ 934 [张一平, 窦军霞, 刘玉洪, 等. 热带季节雨林林窗辐射特征研究 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 929~ 934]
- [14] Zhang Y P, Dou J X, Yu G R, *et al* Characteristics of solar radiation and its distribution above the canopy of tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna Southwest China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(5): 17~ 25 [张一平, 窦军霞, 于贵瑞, 等. 西双版纳热带季节雨林太阳辐射特征研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(5): 17~ 25]
- [15] Laboratory of Ecology, Kunming branch, CAS. A general account on the forest ecosystem in Xishuangbanna of Ailao MTS [A]. In: Research of Forest Ecosystem on Ailao Mountains Yunnan [C]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1983: 1~ 8 [中国科学院昆明分院生态研究室. 哀牢山中北段徐家坝地区森林生态系概述 [A]. 见: 云南哀牢山森林生态系统研究 [C]. 昆明: 云南科技出版社, 1983: 1~ 8]
- [16] Zhang K Y. The characteristics of mountain climate in the north of Ailao MTS [A]. In: Research of Forest Ecosystem on Ailao Mountains Yunnan [C]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1983: 20~ 29 [张克映. 哀牢山北段山地气候特征 [A]. 见: 云南哀牢山森林生态系统研究 [C]. 昆明: 云南科技出版社, 1983: 20~ 29]
- [17] Zhang Y P, Ma Y X, Liu Y H. The characteristics of microclimate in the gap of ever-green broad-leaved forest on the Ailao mountain in Yunnan [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2001, 29(2): 47~ 50 [张一平, 马有鑫, 刘玉洪. 云南哀牢山常绿阔叶林林窗小气候特征 [J]. *东北林业大学学报*, 2001, 29(2): 47~ 50].
- [18] Liu Y H. An analysis of the climatic resource of ground temperature in the north part of the Ailao mountains Yunnan province [J]. *Journal of Natural Resources*, 1993, 8(2): 185~ 165 [刘玉洪. 哀牢山北段山地的地温气候资源分析 [J]. *自然资源学报*, 1993, 8(2): 158~ 165]
- [19] Qiu X Z, Xie X C. Studies on the Forest Ecosystem in Ailao Mountains Yunnan, China [M]. Yunnan Science and Technology Press, 1983: 3~ 7 [邱学忠, 谢寿昌. 哀牢山森林生态系统研究 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 1998: 3~ 7]
- [20] Yunnan Meteorological Bureau. Monthly Statistical Values of Meteorological Factors for Years in Succession (1971~ 2000) [Z]. 2002: 143. [云南省气象局. 累年各月各要素统计值 (1971~ 2000) [Z]. 2002: 143]
- [21] Fu B P. Mountain Climate [M]. Beijing: Science Press, 1983: 38~ 87 [傅抱璞. 山地气候 [M]. 北京: 科学出版社, 1983: 38~ 87]
- [22] Chen Z Y. Introduction of Yunnan Climate [M]. Beijing: China Meteorology Press, 2001: 47~ 51 [陈宗瑜. 云南气候总论 [M]. 北京: 气象出版社, 2001: 47~ 51]
- [23] Lu S J. Climate of South China [M]. Beijing: China Meteorology Press, 1990: 8~ 21 [鹿世瑾. 华南气候 [M]. 北京: 气象出版社, 1990: 8~ 21]
- [24] Peng S L, Ren H. Study on Energy of Subtropical Forest Ecosystem [M]. Beijing: China Meteorology Press, 1998: 24~ 35 [彭少麟, 任海. 南亚热带森林生态系统的能量生态研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1998: 24~ 35]
- [25] Ren H, Peng S H. The studies on the environment of radiation energy of man-made forests in Heshan [J]. *Ecologic science*, 1997, 16(1): 22~ 29 [任海, 彭少麟. 鹤山人工林辐射环境研究 [J]. *生态科学*, 1997, 16(1): 22~ 29]
- [26] Su L j, Wen yao L iu, Lisong Wang, *et al* Species diversity and distribution of epiphytic lichens in the primary and secondary forests in Ailao Mountain Yunnan [J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(5): 445~ 455 [李苏, 刘文耀, 王立松, 等. 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 [J]. *生物多样性*, 2007, 15(5): 445~ 455]
- [27] Liu Yuhong. Study on climate characteristics of evergreen broad-leaf forest on Ailao Mountain [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1993, 29(6): 547~ 552 [刘玉洪. 哀牢山常绿阔叶林林地的气候特征研究 [J]. *林业科学*, 1993, 29(6): 547~ 552]

Characteristics of Solar Radiation of Subtropical Broad-leaved Forest Area in Ailao Mountains, Southwest China

GAO Jinbo^{1,2,3}, ZHANG Yiping¹, Gong Hede¹, Liu Yuhong¹

(1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS, Kunming 650223, China;

2. Southwest Forestry College, Kunming 650224, China;

3. The Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Based on the observation data of solar radiation in Ailao mountains forest ecosystem research station from February 2005 to December 2007, temporal variations of solar radiation balance were analyzed. The results show that total annual global radiation is $5\,146.4\text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. The global radiation in the dry season ($2\,764.7\text{ MJ}/\text{m}^2$) accounted for 53.7% of total annual global radiation and in the rainy season ($2\,381.7\text{ MJ}/\text{m}^2$) accounted for 46.3% of it with 41.3%, 21.0% and 37.7% of global radiation partitioned into net radiation, reflective radiation and effective radiation respectively. Because of the seasonal differences of the weather conditions and water content in atmosphere, the distributing ratio of solar radiation components is different. In the dry season the distributing ratio of reflective radiation and effective radiation is higher than that in the rainy season respectively, while the net radiation distributing ratio shows the contrary behavior. On the whole year the variational range of distributing ratio of net radiation (31.1% ~ 51.9%) is the highest, effective radiation (28.6% ~ 48.6%) is lower and the reflective radiation (18.4% ~ 24.2%) is the lowest. On the daily variation, the distributing ratio of reflective radiation and effective radiation is higher in the early morning and dusk, lower in the daytime, but the distributing ratio of net radiation is higher in the daytime, lower in the early morning and dusk. In different seasons, the distributing ratio of solar radiation components is different: effective radiation > net radiation > reflective radiation in the dry season and net radiation > effective radiation > reflective radiation in rainy season. Compared with Dinghushan and Heshan forest area located in the similar latitude, although Ailao Mountains has lower mean annual air temperature (quantity of heat), it has stronger solar radiation. Therefore it suggests that strong solar radiation maybe the important reason for wide distribution and good development of evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountains.

Key words solar radiation, Ailao mountains, evergreen broad-leaved forest, distributing ratio