

西双版纳热带季节雨林太阳辐射特征研究

张一平¹ 窦军霞^{1,3} 于贵瑞² 赵双菊^{1,3} 宋清海^{1,3} 孙晓敏²

(1 中国科学院西双版纳热带植物园 2 中国科学院地理科学与资源环境研究所 3 中国科学院研究生院)

摘要: 为探讨热带季节雨林太阳辐射特征, 利用西双版纳 2003 年热带季节雨林太阳辐射整年观测资料, 统计、分析了热带季节雨林冠层太阳辐射能量平衡各分量的年、季节和日变化特征. 得出热带季节雨林林冠太阳辐射年日总辐射为 131 75 MJm⁻², 各辐射分量占年总辐射的百分率为净辐射 591 98%、有效辐射 281 68%、反射辐射 111 34%、透射辐射 71 13%. 因季节间气候特征的差异, 使得雾凉季林冠上的太阳辐射时间变率较小, 而雨季的较大; 干热季则受林冠集中换叶的影响, 太阳辐射各分量的变化较为特殊. 在热带季节雨林, 透射辐射具有不可忽视的强度, 特别是干热季时数值较高; 一天中, 透射辐射数值在中午较高, 并且干热季时存在“突跃现象”, 其 12:00 的透射百分率可达 491 9%. 林冠向上的长波辐射呈现单峰的时间变化趋势, 而大气向下的长波辐射呈现双峰双谷的时间变化, 使得林冠上的有效辐射均为正值. 从年平均状态来说, 热带季节雨林林冠均是作为热源向外放热, 呈现加热近旁空气的热力效应. 由林冠放出的向上的长波辐射, 虽然在不同月份和季节间数值有所差异, 但都具有较好的日变化规律; 但大气向下的长波辐射则受大气状况的影响, 不仅在不同月份和各季节间数值不同, 在不同季节其时间变化也有较大差异; 由此引起林冠上的有效辐射值随月份的改变而不同, 且在不同季节的时间变化也呈现较大差异. 年反射率的时间变化除与通常出现的早、晚高的状况之外, 在昼间还出现上午高、下午低的变化趋势; 年透射率的时间变化则表现出中午数值最大, 上午、下午数值较小的变化趋势. 热带季节雨林太阳辐射各分量数值、百分率及长波辐射、反射率与透射率变化趋势, 与西双版纳特殊的气候条件, 以及由此导致的森林群落林相的变化等有密切关系.

关键词: 太阳辐射, 百分率, 热带季节雨林, 林冠, 西双版纳

中图分类号: S7181.51 文献标识码: A 文章编号: 1002-1522(2005)05-0201-09
ZHANG Yi_ping¹; DOU Jun_xia^{1, 3}; YU Gui_ru²; ZHAO Shuang_ju^{1, 3}; SONG Qing_hai^{1, 3}; SUN Xiao_min².
Characteristics of solar radiation and its distribution above the canopy of tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China. Journal of Beijing Forestry University (2005) 27(5) 172-25 [Ch, 39 ref.]

- 1 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming, 650223, P. R. China;
- 2 Institute of Geographic Sciences and National Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, P. R. China;
- 3 The Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, P. R. China.

Based on the observation information of solar radiation in a tropical seasonal rain forest in west China's Xishuangbanna through 2003, annual, seasonal and daily variation of energy balance components, and values of components relative to global radiation, long wave radiation, albedo and transmissivity were analyzed in order to discuss solar radiation characteristics in tropical seasonal rain forests. The results show that yearly average of total daily global radiation is 131 75 MJm⁻², with 591 98%, 281 68%, 111 34% and 71 13% of global radiation partitioned into net radiation, effective radiation, reflective radiation and transmission radiation separately. Because of the seasonal differences of weather conditions, velocity of above-canopy solar radiation is smaller in foggy_cool seasons while greater in rainy seasons. As for the dry_hot season, daily variation of

solar radiation components is different to a certain degree due to leaves shedding concentratedly in this season. In addition, transmission radiation should not been neglected in a tropical seasonal rain forest, especially when it is greater in the dry_hot season. During a day, transmission radiation is greater around midday; especially in the dry_hot season, there is the phenomenon of / sudden emergence0, with a transmissivity as high as 491 9% at 12: 00. Through a day, upward long_wave radiation present an one_peaked pattern, while downward long_wave radiation shows a pattern of two peaks and two troughs, which results in positive effective radiation above the canopy. So, as far as annual average values are concerned, tropical seasonal rain forest canopies always act as heat sources to heat up the surrounding air. Though values of upward long_wave radiation change monthly and seasonally, daily variations are all similar. However, influenced by weather conditions, not only the values of downward long_wave radiation change with month and season, but also daily variations of downward long_wave radiation differ in different seasons. Finally, effective radiation above the canopy have different values in different months, and there exist greater daily variation differences among seasons. Besides the general fact that daily albedo is higher in the early morning and dusk, the albedo has the tendency of higher values in the forenoon and lower in the afternoon during the daytime. Also, daily transmissivity shows a tendency of maximum value at the noon and smaller in the forenoon and afternoon. In the tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, above_canopy solar radiation components and values of components relative to the global radiation, and annual, seasonal and daily variations of long_wave radiation, albedo and transmissivity are all closely related with local climate conditions and forest community appearance variations.

Key words solar radiation, distributing ratio, tropical seasonal rain forest, canopy, Xishuangbanna

太阳辐射是森林植物的生长过程中的最重要限制因子之一, 它影响许多重要的过程, 例如光合作用、植物的生长和形态形成、种子的萌发等. 几十年来, 有关热带森林的太阳辐射环境始终是研究的热点, 而研究内容则主要体现在林内的辐射量、光质、光模型的建立以及辐射环境对植物生理和生长过程的影响等方面^[129].

能量的分配, 特别是可利用能量(指净辐射 R_n) 的分配, 决定大气边界层的形成速度和性质, 影响热量、水汽和污染物等在大尺度范围内的输送; 决定空气中水分和热含量的多少, 是区域和全球尺度气候过程的驱动力^[122]. 短波段的光在散射辐射中所占比例要较长波段的光大^[13]. 但是西双版纳由于雾日减少, 雾时缩短, 使得该地区光照强度改变, 光质发生变化, 而光质在植物的生理生长过程和形态的发育方面同样起着重要作用^[14219].

在森林辐射能量环境研究领域, 自 1923 年 Burns 将其 11 a 的观测结果在 Ecology 发表以来, 国内外学者对不同森林群落的冠层和林内太阳辐射的总量、反射量、透射量和吸收量特征及其与群落冠层结构等的关系进行了研究^[2033], 但是研究主要集中在中高纬度的亚热带、温带森林.

在西双版纳热带森林, 张一平等^[34]曾对林窗地面附近的光辐射特征进行过研究; 同时对热带季节雨林及林缘的热力效应进行了探讨^[35, 36]. 但是, 对于森林整体的太阳辐射的研究仍显不足; 对不同波长辐射, 特别是长波辐射的研究更少. 因此, 本文利

用周年观测资料, 对处于特有地方气候(浓雾)影响下的西双版纳热带季节雨林的太阳辐射环境进行了初步研究.

1 样地概况与研究方法

111 样地概况

观测点位于云南省西双版纳州勐腊县境内的国家级自然保护区内(21b57N、101b12E, 海拔 756 m). 观测样地所在的热带季节雨林、群落特征详见文献[37].

受大气环流、地理位置及地方气候的影响, 地处热带北缘的西双版纳 1 年中有雾凉季(11) 翌年 2 月)、干热季(3) 4 月) 和雨季(5) 10 月) 之分, 该地区雾日较多, 年雾日可达 18614 d. 在雾凉季月平均雾日超过 23 d, 最多 1 月可达 2611 d; 一般夜间 22: 00 左右开始起雾, 直到次日 12: 00 后才逐渐消散; 与雾凉季相比, 干热季的雾生成时刻较迟, 维持时间较短, 一般夜间 23: 00 之后才开始起雾, 而次日上午 10: 00 左右就逐渐消散.

112 观测方法

研究区域的热带季节雨林林冠高度约为 30~34 m, 观测用的辐射仪(CNR21, 荷兰 KIPP & ZONEN 公司)设置在冠层上(4116 m), 该仪器为上下各有一组(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短波、长波辐射. 林下设置一总辐射仪(管状表辐射表, 锦州 322 研究所), 观测林内辐射.

考虑整个森林系统, 在林冠作用面的辐射平衡
可以表示为^[38,39]:

$$R_n = (Q - Q_r) - I \tag{1}$$

有效辐射 I 由式(2)计算:

$$I = Q_{La} - DQ_L \tag{2}$$

反射率 r 利用式(3)计算:

$$r = Q_r/PQ \tag{3}$$

透射率 t 对于森林辐射研究也是一个不可忽视
的因子, 由式(4)计算^[38,39]:

$$t = Q_tP(Q - Q_r) \tag{4}$$

式(1~4)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, Q_{La} 为林冠作用面向外发出的
长波辐射, D 为灰体系数(= 0.95), Q_L 为大气逆辐
射, Q_t 为透射辐射(林内总辐射).

数据为 2 s 自动读取 1 次, 经仪器处理后输出每
30 min 的平均值, 由计算机记录. 观测、记录使用北
京时间, 地方时比其推迟 1 h 15 min. 本研究使用的是
2003 年 1 月 1 日至 2003 年 12 月 31 日的整年观
测数据.

2 结果与分析

211 太阳辐射特征

21111 年变化特征

从图 1 可见, 林冠上的太阳辐射总量(图 1a)与
多数地区不同, 其 2) 5 月的太阳辐射量高于其他月
份; 有效辐射和透射辐射(图 1b)也有相似趋势; 净
辐射(图 1a)和反射辐射(图 1b)的年变化相对较小.
对于长波辐射而言(图 1c), 不论是向下、还是向上
的辐射, 均在 7 月出现最大值, 2 月出现最小值; 并
且向上的长波辐射总大于向下的长波辐射, 其差异
在 1) 5 月较大, 显示了林冠在 1 年中, 均作为热源
的功效, 对近旁大气呈现加热作用, 使得有效辐射总

为正值(图 1b).

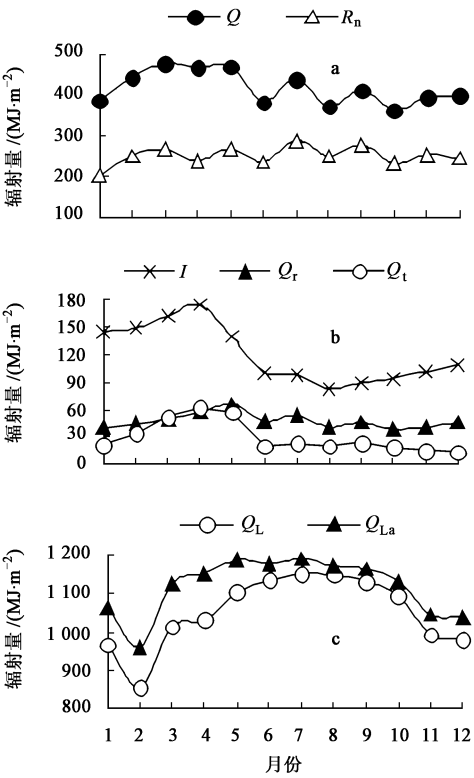


图 1 太阳辐射月总量的年变化

FIGURE 1 Annual variation of total monthly solar radiation

21112 日变化特征

2111211 年辐射日变化

从全年平均的日变化可以看出(图 2), 总辐射
和净辐射在中午时分(13: 30、14: 00)出现最大值
(61012, 48211 WPm^2); 反射辐射最大值(7013 WPm^2)
出现时刻较早(12: 30); 有效辐射最大值(6515 WP
 m^2)出现在 13: 00; 透射辐射的最大值出现最早
(12: 00, 6311 WPm^2). 另外, 净辐射上午由负值转为
正值的时段为 8: 00) 8: 30 之间; 而傍晚由正值转为
负值的时段在 18: 00) 18: 30 之间.

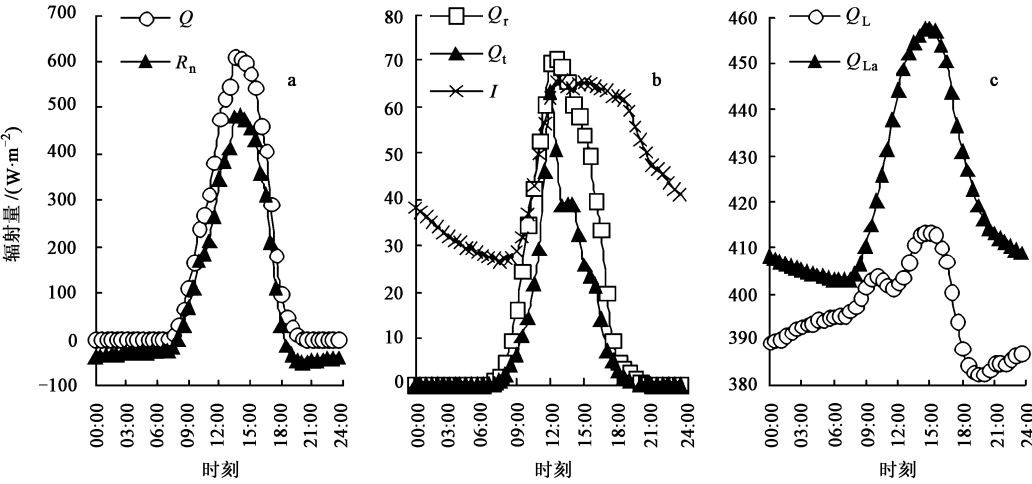


图 2 太阳辐射各分量日变化

FIGURE 2 Daily variations of solar radiation components

日间林冠上的向上长波辐射 Q_{La} 均高于向下长波辐射 Q_L (图 2c), 且 Q_{La} 和 Q_L 的最大值均出现在 15:00, 分别为 45717 和 41314 W/m^2 ; 但最小值出现的时刻有较大差异, Q_{La} 的最小值 (40311 W/m^2) 出现在清晨 7:00; 而 Q_L 的最小值 (38216 W/m^2) 则出现在前半夜 19:30; 此外, Q_{La} 呈现单峰的时间变化趋势, 而 Q_L 则为双峰双谷的时间变化趋势。如此的分布特征, 使得林冠上的有效辐射 (图 2b) 均为正值, 且在清晨出现最小值。从年平均状态来说, 日间季节雨林林冠均是作为热源向外放热, 呈现加热近旁空气的热力效应。

2111212 各季节辐射日变化

通过分析不同季节太阳辐射各分量平均值的日变化规律发现, 总辐射和净辐射 (图 3) 在雾凉季变率较小, 而雨季变率较大, 这主要是由于西双版纳雾凉季的天气状况比较稳定, 而雨季却因阵性对流天气较多的季节气候特征的差异所造成。另外, 总辐射和净辐射的最大值在雾凉季和干热季时较明显, 出现在 13:00) 14:00; 而雨季则出现高值区间, 在 13:30) 15:30 间均维持相近的较高值; 此外值得注意的是干热季的净辐射, 在 11:00) 12:00, 出现了较低值。反射辐射 (图 4) 时间变化趋势与总辐射相近; 从最大值的比较结果来看, 干热季数值最大, 雾凉季次之, 雨季最小; 而且各季节最大值出现的时刻也有所不同, 雾凉季出现在 13:00, 干热季在 12:00, 雨季

则出现在 12:30。雾凉季和雨季的透射辐射值 (图 4) 总低于反射辐射, 但在干热季, 由于林冠较为稀疏, 太阳辐射可以更多地透过树木冠层到达地面, 使得中午前后的透射辐射量值出现迅速达到最大后又急速下降, 呈现/ 突跃现象0。这与张一平等^[34] 对热带季节雨林林窗太阳辐射的研究结果相似。

林冠上不同季节长波辐射的日变化如图 5 所示, 对于向上长波辐射 (Q_{La}) 来说, 日变化趋势与总辐射相似, 最小值出现在清晨时分, 而最大值出现时刻有所差异, 在 14:30) 15:30 之间, 数值在 $43619\sim 46918\text{ Wm}^2$ 间, 且干热季和雨季的值基本相同。对于向下的长波辐射 (Q_L), 各季节间存在较大差异, 雾凉季向下长波辐射呈现双峰双谷变化趋势, 在 10:00 和 15:30 各出现一个峰值, 在 12:00 和 18:30 各出现一个谷值, 其峰值以上午的为高, 而谷值以下午的为低; 干热季的向下长波辐射同样呈现双峰双谷的日变化趋势, 但出现时刻有所不同, 峰值分别出现在 9:00 和 14:30, 而谷值则出现在 10:30 和 22:30, 并且峰值以中午为高, 谷值以夜间为低; 雨季大气向下长波辐射的日变化呈现单峰型变化趋势, 峰值出现在 14:00, 而谷值在 22:00。由于各季节向上和向下长波辐射的日变化趋势的不同, 导致林冠上有效辐射的日变化也呈现不同的趋势 (图 6), 总的来看, 各季节清晨的有效辐射数值均较小, 随着日出, 有效辐射值迅速升高, 在 12:00 前后达到最大

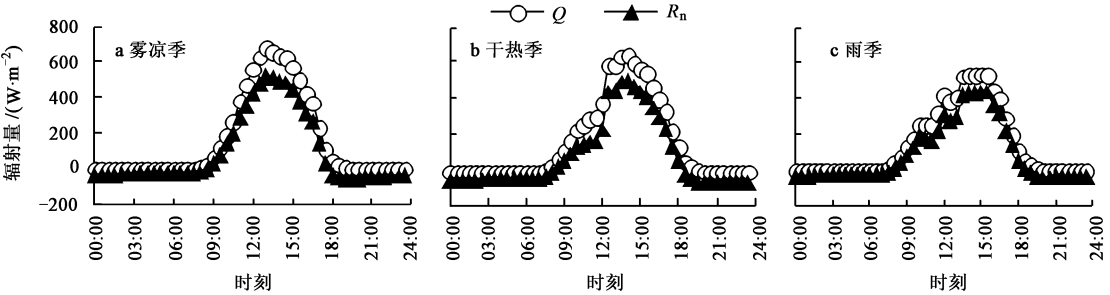


图 3 不同季节总辐射和净辐射日变化
FIGURE 3 Daily variation of global and net radiation in different seasons

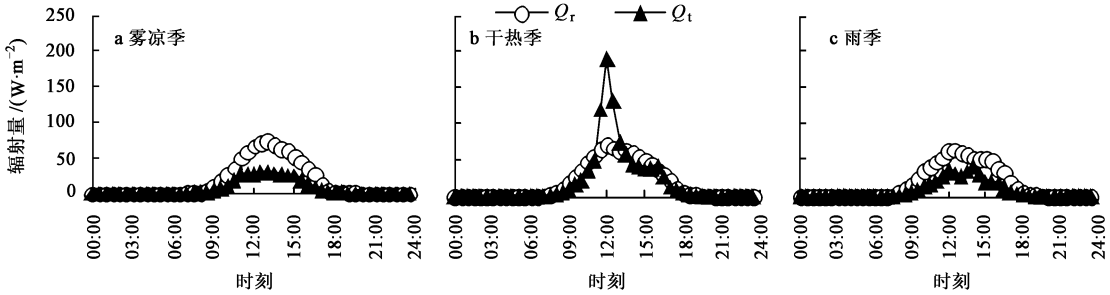


图 4 不同季节反射和透射辐射日变化
FIGURE 4 Daily variation of reflective and transmission in different seasons

值, 其高值均维持一定时段, 一般到下午或傍晚才迅速下降, 至次日清晨达到最低值. 各季节间的差异主要在极值的大小、午后高值维持时段和日变幅等方面. 在雾凉季, 有效辐射最低值为 2210 Wp m^{-2} , 最高值为 8210 Wp m^{-2} , 日变幅为最大; 午后在 12: 30) 18: 30, 其值均维持在 5610 Wp m^{-2} 以上. 干热季有效

辐射最低值为 3417 Wp m^{-2} , 最高值为 8815 Wp m^{-2} , 日变幅次之; 在 11: 00) 18: 00 间, 其值均维持在 7510 Wp m^{-2} 以上. 雨季有效辐射最小值为 2515 Wp m^{-2} , 最大值为 5010 Wp m^{-2} , 日变幅最小; 从 11: 30 到 19: 30, 其值大多维持在 4410 Wp m^{-2} 以上, 其中 12: 00) 14: 00 间, 其值有所下降.

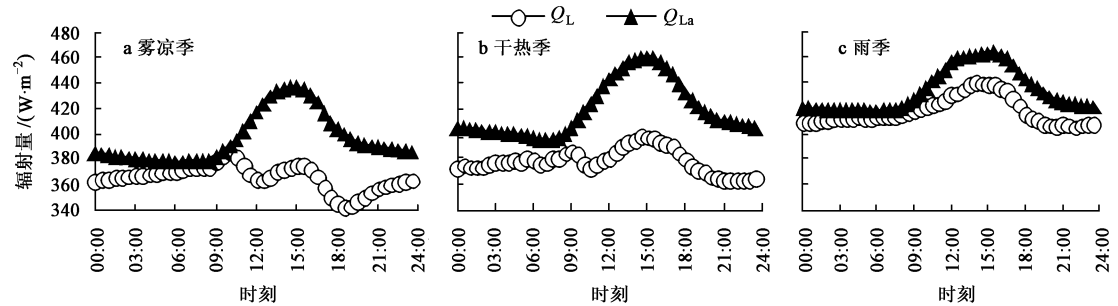


图 5 不同季节长波辐射日变化
FIGURE 5 Daily variation of long wave radiation in different seasons

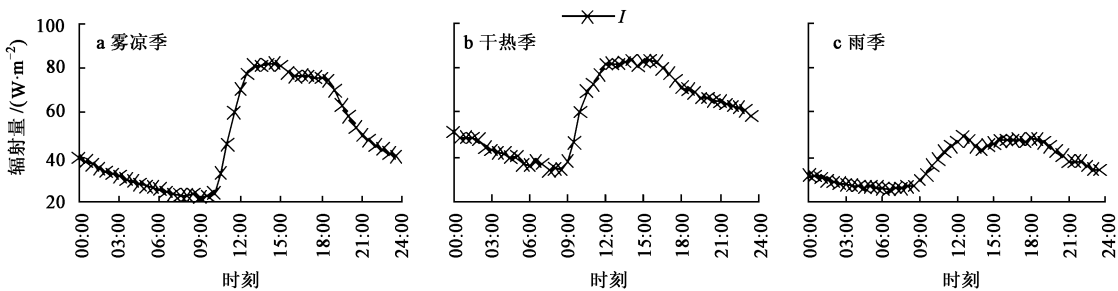


图 6 不同季节有效辐射日变化
FIGURE 6 Daily variation of effective radiation in different seasons

太阳辐射各分量的年平均日总量及各季节占年总量的百分率见表 1. 从表中可看出, 太阳辐射日总量在干热季最大 ($15155 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), 雨季最小 ($13129 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), 年日总量为 $13175 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. 净辐射日总量则是雨季最大 ($8143 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), 干热季最小 ($7195 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), 年日总量为 $8125 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. 反射辐射日总量数值均较小, 年日总量仅为 $1156 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 以干热季稍大 ($1175 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), 雾凉季略小 ($1142 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$). 有效辐射的年日总量为 $3194 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 以干热季较大 ($5151 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), 雨季较小 ($3127 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$). 透射辐射以干热季最大 ($1186 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), 雾凉季最小 (0169

$\text{MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), 年均日总量为 $0198 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. 对于长波辐射, 向下长波辐射年日总量为 $34153 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 向上长波辐射年日总量为 $36175 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 两者均以雨季最大 ($38119 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), 雾凉季最小 ($31162, 34123 \text{ MJP}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$).

从表 1 可见, 不同辐射分量在各季节的比重是有所不同的.

212 太阳辐射百分率特征

21211 年变化特征

林冠上太阳辐射各分量占总辐射百分率随月份的变化而不同. 净辐射 (图 7a) 1) 4 月的百分率较低, 在 50%~57% 之间, 以 4 月最低 (5018%), 而雨

表 1 太阳辐射各分量不同季节的日总量值和占年值百分率

	日总量值 $(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$							占年值百分率 $\%$						
	Q	R _n	Q _r	I	Q _t	Q _L	Q _{La}	Q	R _n	Q _r	I	Q _t	Q _L	Q _{La}
年	13175	8125	1156	3194	0198	34153	36175	32141	31168	30100	34189	23130	30111	30162
雾凉季	13156	7195	1142	4119	0169	31162	34123	18189	16179	18178	23133	31178	16123	16199
干热季	15155	8129	1175	5151	1186	33153	37136	48169	51152	51123	41177	44192	55175	52139
雨季	13129	8143	1159	3127	0187	38119	38119	32141	31168	30100	34189	23130	30111	30162

季百分率较大,以 9 月最高(6713%);有效辐射百分率(图 7b)的年变化与净辐射相反,1) 4 月较高,雨季较低,1 月出现最大值(3712%),9 月出现最小值(2115%);反射辐射的百分率(图 7c)的年变化较复杂,月际间波动较大,总体上 4) 7 月百分率较高,5

月出现最大值,为 1319%,其他月份百分率值较低,其中 2 月和 11 月分别为 1011%和 1012%,低于其他月份;透射辐射的百分率(图 7d)在 3) 5 月较高,其他月份较低,且月际间变化也较小,最大值为 1313%(4 月),最小值为 314%(12 月).

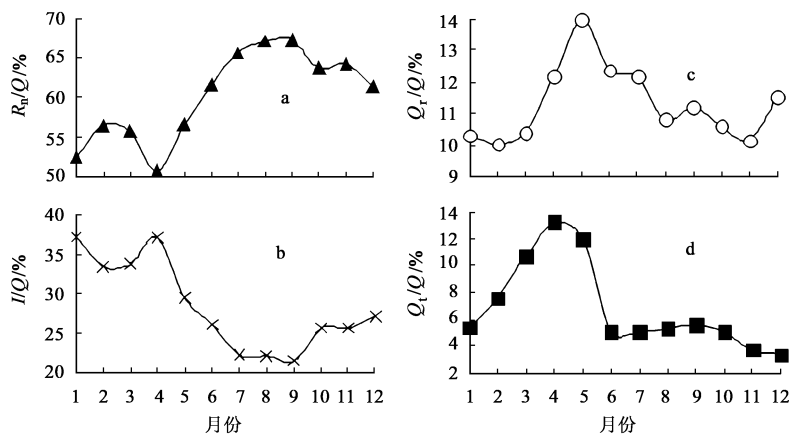


图 7 热带季节雨林林冠上太阳辐射各分量占总辐射百分率年变化
FIGURE 7 Monthly variation of distributing ratios of solar radiation components for tropical seasonal rain forest

21212 日变化特征

从不同季节林冠上太阳辐射各分量占总辐射的百分率的日变化可见,净辐射的百分率(图 8a)总体趋势为早晨和傍晚较小,昼间较高;进一步分析可知,昼间不同季节的百分率存在较显著差异,雾凉季的百分率日变化较小,百分率在 73%~ 77%之间,呈现上午稍低,下午略高的变化趋势;而干热季净辐射百分率的变化趋势最为特别,总体上呈现上午小、下午大的趋势,并且在 11:00) 12:00 有一谷值;雨季的净辐射百分率呈现上午低、下午高的变化趋势,在中午时分变化相对明显.从各季节百分率数值比较看,上午雾凉季最大,雨季次之,干热季最小;而下

午则是雨季最大,雾凉季次之,干热季最小.

对于有效辐射的百分率(图 8b),总体变化趋势与净辐射相反,呈现清晨和傍晚较高,昼间较低的趋势;雾凉季时呈现由上午较低值向下午较高值逐渐增加的变化趋势;干热季为上午高,下午低,在中午时分出现突变的变化趋势;雨季的日变化较小,呈现上午和下午略低,中午稍高的变化趋势.从百分率数值来看,上午干热季最大,雨季次之,雾凉季最小;下午则是雾凉季最大,干热季次之,雨季最小.

不同季节反射辐射的百分率(图 8c)总体分布趋势为清晨和傍晚较大,昼间较小;在昼间的总的变化趋势是上午较高,下午较低;雾凉季的变化相对平

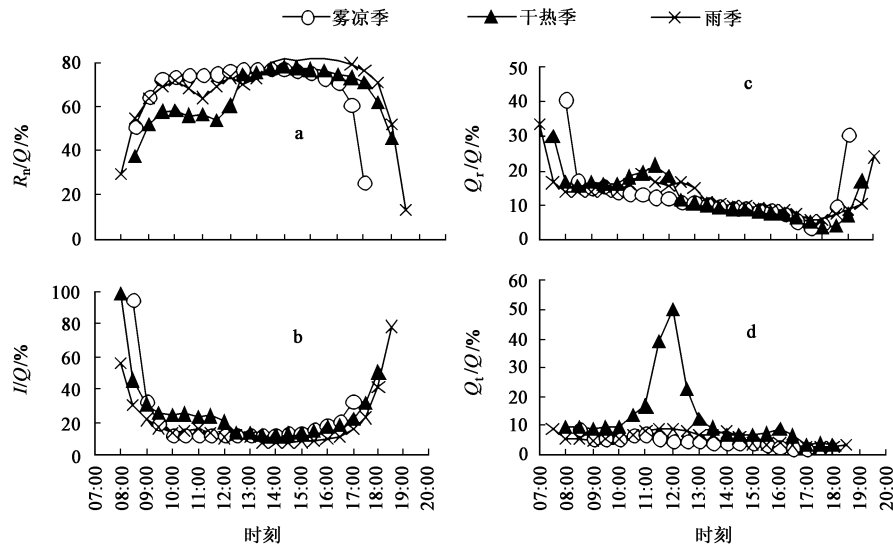


图 8 不同季节太阳辐射各分量占总辐射百分率的日变化
FIGURE 8 Daily variation of distributing ratios of solar radiation components in different seasons

稳, 由上午的较高值逐渐减小; 而干热季和雨季则是在中午出现一个高值后再逐渐减小。

总的说来透射辐射的百分率是中午时较高(图 8d), 这是由于太阳高度较高时, 太阳直射光可以透过林隙, 到达林内, 使得林内辐射数值增加, 导致透射辐射的百分率增加; 特别是干热季时, 由于树木处于集中换叶期, 叶面积指数降低, 使得太阳辐射更容易到达林内, 致使干热季的透射辐射百分率大于雾凉季和雨季, 特别是中午 12: 00 的百分率可达 491.9%。

从表 2 可见, 净辐射在各分量中最大, 年百分率为 591.98%, 不同季节中以雨季最大(631.46%), 干热季最小(531.31%); 年有效辐射的百分率为 281.68%, 但季节差异较大, 干热季最高为 351.42%, 而雨季最小, 仅为 241.60%; 年反射辐射的百分率为 111.34%, 季节之间变化不大, 最大值为 111.94%(雨季), 最小值为 101.50(雾凉季); 透射辐射年百分率为 71.13%, 干热季最大(111.99%), 雾凉季最小(51.12%)。

表 2 不同季节太阳辐射各分量占总辐射的百分率 % TABLE 2 Distributing ratios of solar radiation components in different seasons				
	R_n	I	Q_r	Q_t
年	591.98	281.68	111.34	71.13
雾凉季	581.63	301.87	101.50	51.12
干热季	531.31	351.42	111.28	111.99
雨季	631.46	241.60	111.94	61.58

3 小结与讨论

3.1 热带季节雨林太阳辐射特征

受大气环流(西南季风)、地理位置(低纬度地区)和地方气候(干季浓雾, 雨季多云雨)的共同影响, 热带季节雨林林冠的太阳辐射年日总辐射为 131.75 MJ/m², 各辐射分量占年辐射的百分率: 净辐射为 591.98%, 有效辐射为 281.68%, 反射辐射为 111.34%, 透射辐射为 71.13%。在不同季节中, 太阳辐射各分量的数值和时间变化均有区别, 雾凉季天气状况比较稳定, 导致林冠上的太阳辐射时间变率较小; 而热带雨季, 阵性对流天气较多, 致使林冠上的太阳辐射时间变率较大; 特别是在干热季, 由于热带季节雨林处于集中换叶期, 林相变化较大, 使得太阳辐射各分量的变化较为特殊, 中午透射辐射呈现辐射量值的“突跃现象”。众所周知, 太阳辐射对植物的光合作用、森林小气候的形成等起着重要作用。研究表明^[36], 在西双版纳热带季节雨林的各热力要素在中午变化较大, 且干热季的变化幅度明显大于雾凉季; 热带季节雨林林冠附近, 树冠表温和气温及温度日较差均呈现最大值, 林冠面具有较强的热力

效应; 在热带季节雨林中, 存在复杂、多样的热力作用和热力传递, 导致森林中热力效应趋于多样化等, 这都与热带季节雨林太阳辐射分配的多样化有着不可分割的联系。

3.1.2 林冠上长波辐射

本研究与已有的大多数研究不同之处在于长波辐射是使用直接测量的方法得出, 对数据的分析结果表明, 由林冠放出的向上的长波辐射, 虽然不同月份(图 1c)和不同季节间(图 5)数值有所差异, 但具有较好的日变化规律(图 2c, 图 5), 说明热带季节雨林由于林冠总体上变化程度不大, 下垫面性质基本相同, 使得日变化规律十分相近。但是大气向下的长波辐射则受大气状况(气温、水汽等)的影响, 不仅在不同月份(图 1c)和各季节间(图 5)数值不同, 而且在不同季节其时间变化也有较大差异(图 2c, 图 5)。由此引起林冠上的有效辐射在不同月份呈现不同的数值(图 1b), 而且不同季节的时间变化也有较大差异(图 6)。本研究表明: 热带季节雨林林冠均是作为热源向外放热, 呈现加热近旁空气的热力效应(图 2b, 图 6), 这印证了在西双版纳热带季节雨林热力效应研究中, 所得出的树冠表温和气温及温度日较差均呈现最大值, 林冠面具有较强的热力效应, 乃是热带季节雨林主要热力作用面的结论^[36]。

3.1.3 林冠反射率和透射率

森林对太阳辐射的反射与透射是研究森林能量平衡和植被能量的重要因子之一。从图 9a 可见, 热带季节雨林林冠的反射率的年变化幅度相对较小, 反射率在 01.10~01.14 之间, 以 4) 5 月较高; 整层森林的透射率的年变化相对较大, 在气候较干燥的 3) 5 月数值较高, 4 月最大(01.15); 进入雨季后, 透射率迅速减小, 月际间变化也减小, 12 月达最小值(01.04)。从图 9b 可见, 年反射率的日变化除与通常出现的早晚高的状况之外, 在昼间还呈现上午高, 下午低的变化趋势, 并且, 日变化上午较小, 下午较大。年透射率的日变化则呈现中午数值最大, 上午、下午数值较小的变化趋势。热带季节雨林反射率与透射率如此的变化趋势, 与西双版纳特殊的气候条件, 以及由此导致的森林群落林相的变化等有密切关系。在西双版纳, 由于受大气环流、地理位置和太阳高度的共同影响, 1 年中有雾凉季(11) 2 月)、干热季(3) 4 月)和雨季或称湿热季(5) 10 月)之分。在雾凉季中, 虽然大气降水较少, 但是浓雾现象较多, 不仅雾浓厚, 且雾时较长, 一般从 22: 00 至次日 12: 00 均有浓雾出现, 使得该季节树木仍保持较多的树叶, 反射率和透射率均不大; 而在 3) 4 月, 随着大气的进一步干燥, 雾的浓度降低, 雾时缩短, 树木进入集

中换叶期,大量树木叶片枯黄、脱落,导致反射率和透射率增大;5月中、下旬进入雨季,树木恢复枝繁叶茂,反射率和透射率重新降低。而在一日中,上午由于地方气候(雾)的影响,反射率和透射率的日变化均较小;下午反射率和透射率均呈现下降趋势;中午,太阳高度处于天顶,反射率和透射率都有所增加。

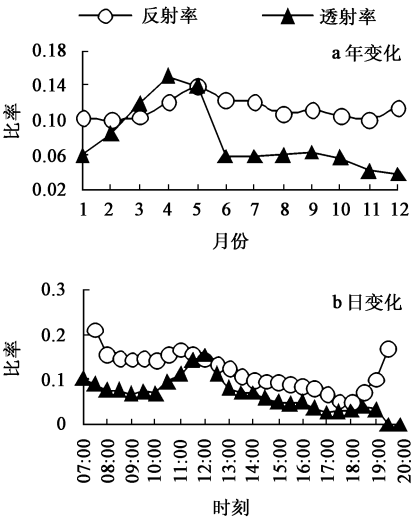


图 9 反射率和透射率变化

FIGURE 9 Variation of albedo and ratio of transmission

众所周知,森林林冠太阳辐射受多种因素影响,特别是森林的有效辐射受到大气水汽、温度影响的大气向下长波辐射以及林冠特性影响的向上长波辐射控制,反射率和透射率受林冠状况和树木叶片特征及叶面积等的影响,在本研究中该方面的分析尚不充分。林冠上有效辐射与树冠上气象要素的关系以及热带季节雨林林冠状况林相变化对太阳辐射各分量影响等方面的研究将是下一步工作中深入开展的内容。

致谢 本研究得到中国科学院西双版纳热带森林生态系统定位研究站的大力支持,刘梦楠参加了观测工作,在此表示感谢。

参 考 文 献

[1] CASTRO F, FETCHER N. Three dimensional model of the interception of light by a canopy [J]. *Agric For Meteorol*, 1998, 90: 215-233.

[2] AGYEMAN V K, SWAINE M D, THOMPSON J. Responses of tropical forest tree seedlings to irradiance and the derivation of a light response index [J]. *J Ecol*, 1999, 87: 815-827.

[3] KYEREH B, SWAINE M D, THOMPSON J. Effect of light on the germination of forest trees in Ghana [J]. *J Ecol*, 1999, 87: 772-783.

[4] POORTER L. Growth responses of 15 rain forest tree species to a light gradient: the relative importance of morphological and physiological traits [J]. *Funct Ecol*, 1999, 13: 396-410.

[5] THOMAS S C, BAZZAZ F A. Asymptotic height as a predictor of photosynthetic characteristics in Malaysian rain forest trees [J]. *Ecology*, 1999, 80 (5): 1 607-1 622.

[6] MURACKA H, HIROTA H, MATSUMOTO J, et al. On the convertibility of different microsite light availability indices, relative illuminance and relative photon flux density [J]. *Funct Ecol*, 2001, 15: 792-803.

[7] POORTER L. Light dependent changes in biomass allocation and their importance for growth of rain forest tree species [J]. *Funct Ecol*, 2001, 15: 1132-123.

[8] STERCK F J, BONGERS F. Crown development in tropical rain forest trees: patterns with tree height and light availability [J]. *J Ecol*, 2001, 89: 1213.

[9] FINCH D A, BAILEY W G, MCARTHUR L J B, et al. Photosynthetically active radiation regimes in a southern African savanna environment [J]. *Agric For Meteorol*, 2004, 122: 229-238.

[10] DIRMEYER P A. Vegetation as a feedback mechanism in midlatitude drought [J]. *J Clim*, 1994, 7: 1 463-1 483.

[11] SEITH A, GIORGI F. Three dimensional model study of organized mesoscale circulations induced by vegetation [J]. *J Geophys Res*, 1996, 101 (3): 7 371-7 391.

[12] WILSON K B, BOLDOCCI D D. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America [J]. *Agric For Meteorol*, 2000, 100: 121-138.

[13] FLINT S D, CALDWELL M M. Solar UV-B and visible radiation in tropical forest gaps: measurements partitioning direct and diffuse radiation [J]. *Global Change Biol*, 1998, 4: 863-870.

[14] TURNBULL M H, YATES D J. Seasonal variation in the red far red ratio and photon flux density in an Australian sub tropical rainforest [J]. *Agric For Meteorol*, 1993, 64: 112-127.

[15] BROWN M J, PARKEY G G, POSNER N E. A survey of ultraviolet B radiation in forests [J]. *J Ecol*, 1994, 82: 843-854.

[16] LEE D W. Irradiance and spectral quality affect Asian tropical rain forest tree seedling development [J]. *Ecology*, 1996, 77 (2): 568-580.

[17] VALLADARES F S, WHIGHT J, LASSO E, et al. Plastic phenotypic response to light of 16 congeneric shrubs from a Panamanian rainforest [J]. *Ecology*, 2000, 81(7): 1 925-1 936.

[18] VIERLING L A, WESSMAN C A. Photosynthetically active radiation heterogeneity within a monodominant Congolese rain forest canopy [J]. *Agric For Meteorol*, 2000, 103: 265-278.

[19] GENDRON F, MESSIER C, COMEAUB P G. Temporal variations in the understory photosynthetic photon flux density of a deciduous stand: the effects of canopy development, solar elevation, and sky conditions [J]. *Agric For Meteorol*, 2001, 106: 232-240.

[20] GATES D M, TANTRAPON W. The reflectivity of deciduous trees and herbaceous plants in the infrared to 25 microns [J]. *Science*, 1965, 115: 613-616.

[21] FEDERER C H, TANNER C B. The spectral distribution of light in the forest [J]. *Ecology*, 1966, 47 (4): 555-560.

[22] 崔启武,朱劲伟. 林冠结构和光分布))) 光的透射和反射理论[J]. *地理学报*, 1981, 36(2): 196-208.

CUI Q W, ZHU J W. Theoretical study on the transmission and reflection of light by forest canopy various structures [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1981, 36 (2): 196-208.

[23] 朱劲伟, 崔启武. 林冠的结构和光分布))) 光的吸收理论的探讨[J]. *林业科学*, 1982, 18 (3): 258-265.

ZHU J W, CUI Q W. Theoretical study on the absorption of light by forest canopy various structures [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1982, 18 (3): 258-265.

[24] 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: 8-284.

PENG S L, REN H. Study on energy of subtropical forest ecosystem [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1998: 8-284.

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

ZHOU G Y, KANG W X. Energy balance in Chinese fir plantation [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1990, 18 (1): 14-22.

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

XIAO W F. The energy balance of a stand (*Pinus tabulaeformis* Carr.) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1992, 12 (1): 16-24.

[27] 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.

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.

[28] 任海, 彭少麟, 张祝平, 等. 鼎湖山季风长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.

REN H, PENG S L, ZHANG Z P, et al. Study on canopy structure and canopy radiation of monsoon evergreen broad leaf forest in Denghushan biosphere reserve, Guangdong [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16 (2): 174-179.

[29] 任海, 彭少麟. 鹤山人工林的辐射能环境研究[J]. *生态科学*, 1997, 16(1): 22-29.

REN H, PENG S L. The studies on the environment of radiation energy of man-made forests in Heshan [J]. *Ecologic Science*, 1997, 16 (1): 22-29.

[30] 刘志刚, 马钦彦, 潘向丽, 等. 华北落叶松放叶过程中的辐射特征[J]. *生态学报*, 1997, 17(5): 519-524.

LIU Z G, MA Q Y, PAN X L, et al. Radiation characteristics of a *Larix principis-rupprechtii* plantation during the course of leaf growth [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17 (5): 519-524.

[31] 金昌杰, 关德新, 朱廷曜. 长白山阔叶红松林太阳辐射分光谱特征[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(1): 19-21.

JIN C J, GUAN D X, ZHU T Y. Spectral characteristics of solar radiation in broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11 (1): 19-21.

[32] 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[J]. *沈阳农业大学学报*, 2002, 33(5): 33-34.

GAO X N, TAO X X, GUAN D X. A study on the quantity of heat balance and evapotranspiration in the broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2002, 33 (5): 33-34.

[33] 关德新, 金明淑, 徐浩. 长白山阔叶红松林生长季反射率特征[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(2): 154-156.

GUAN D X, JIN M S, XU H. Reflectivity of broad-leaved Korean pine forest in growing season on Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 (2): 154-156.

[34] 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.

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.

[35] 张一平, 马友鑫, 刘玉洪, 等. 热带季节雨林林缘不同热力作用面热力特征初探[J]. *北京林业大学学报*, 2001, 23(6): 22-26.

ZHANG Y P, MA Y X, LIU Y H, et al. Temperature characteristics of different thermal active surfaces near edge of tropical rain forest [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2001, 23 (6): 22-26.

[36] 张一平, 赵双菊, 窦军霞, 等. 西双版纳热带季节雨林热力效应时空分布特征初探[J]. *北京林业大学学报*, 2004, 26(4): 127.

ZHANG Y P, ZHAO S J, DOU J X, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of thermal effects in a tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, southwest of China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2004, 26 (4): 127.

[37] 任泳红, 曹敏, 唐建维, 等. 西双版纳季节雨林与橡胶多层林凋落物动态的比较研究[J]. *植物生态学报*, 1999, 23(5): 418-425.

REN Y H, CAO M, TANG J W, et al. A comparative study on litterfall dynamics in a seasonal rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, SW China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23 (5): 418-425.

[38] 贺庆棠. 中国森林气象学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 40-41.

HE Q T. Forest meteorology in Chinese [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2001: 40-41.

[39] 傅抱璞, 翁鸣鸣, 虞静明, 等. 小气候学[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 318-319.

FU B P, WENG D M, YU J M, et al. Microclimate [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1994: 318-319.

(责任编辑 董晓燕)