

鼎湖山针阔混交林光合有效辐射的时空格局

王旭^{1,2,3} 尹光彩⁴ 周国逸² 孙阁² 唐旭利^{2,3} 王春林² 闫俊华²

(1 华南热带农业大学环境与植物保护学院 2 中国科学院华南植物园
3 中国科学院研究生院 4 广东工业大学环境科学与工程学院)

摘要:光合有效辐射(PAR)是影响生态系统能量转化和物质生产的重要生态因子,对其时空格局的研究,有助于深入理解生态系统的生理生态因子变化和光合行为.该文分析了2003年鼎湖山南亚热带针阔混交林生态系统PAR通量的时空分布特征及相互关系.结果表明,在日尺度上,PAR在进入冠层内部的过程中,其强度不断减弱,变异系数(CV)则不断增大;各层次PAR月总量的年变化均呈单峰形,并分别于7月和3月达到最大值和最小值.雨季和旱季,各层次PAR的日均变化均呈单峰曲线,其中冠层上方(PAR₁)和乔木第1亚层(PAR₂)呈规则的单峰曲线,而乔木第3亚层(PAR₃)和灌木及草本层(PAR₄)则为不规则的单峰曲线;旱季各层次PAR的平均值为雨季的68.99%~71.48%;旱季各层次PAR日通量的CV非常接近,而雨季PAR₃和PAR₄的CV则明显增加.全年PAR₁、PAR₂、PAR₃和PAR₄总量分别为1 842.27、1 374.37、471.38和288.39 MJ/m²,各占下行短波辐射(R_{sd})的40.07%、29.89%、10.25%和6.27%.全年PAR₂、PAR₃和PAR₄的相对光合有效辐射分别为74.6%、23.6%和15.7%.在日尺度和月尺度上PAR₁与R_{sd}均呈极显著直线相关,而R_{sd}的系数远小于通常的范围(0.44~0.50).

关键词:南亚热带, 针阔混交林, 光合有效辐射, 时空格局

中图分类号: P422.9; S716 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1522(2007)02-0018-06

WANG Xu^{1,2,3}; YIN Guang-cai⁴; ZHOU Guo-yi²; SUN Ge²; TANG Xu-li^{2,3}; WANG Chun-lin²; YAN Jun-hua². **Temporal and spatial distribution of photosynthetically active radiation flux of coniferous and broadleaved mixed forests at the Dinghushan Mountain, low subtropical China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2007) 29(2) 18-23 [Ch, 27 ref.]

1 College of Environment and Plant Protection, South China University of Tropical Agriculture, Danzhou City, Hainan Province, 571737, P. R. China;

2 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510650, P. R. China;

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, P. R. China;

4 Faculty of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510090, P. R. China.

PAR (photosynthetically active radiation) is an important ecological factor which controls the energy transforming and matter production. It is very helpful to understand the physio-ecological factors and photosynthesis to research the temporal and spatial characteristics of PAR flux of the ecosystem. The temporal and spatial distribution of PAR of the coniferous and broadleaved mixed forests at the Dinghushan Mountain, low subtropical China, was analyzed in 2003 in this paper. The results were as the followings: the intensity of daily PAR reduced and the variation coefficients (CV) increased, when PAR came into the ecosystem. The curves of monthly total PAR for each forest layer presented a single peak in a year. The maximum and minimum PAR values of each layer appeared in July and March respectively. The diurnal changes of average

收稿日期: 2006-03-14

<http://journal.bjfu.edu.cn>

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2002CB1115)、国家自然科学基金面上项目(30470306)、海南省重点科技计划项目(05102)、中国热带农业科学院博士后启动基金项目.

第一作者:王旭,博士,讲师. 主要研究方向:生态系统生态学. 电话:0898-23301064 Email: wxdick@scib.ac.cn 地址:571737 海南省儋州市华南热带农业大学环境与植物保护学院.

责任作者:周国逸,博士生导师,首席研究员. 主要研究方向:生态系统生态学. 电话:020-37252708 Email: gyzhou@scib.ac.cn 地址:510650 广东省广州天河华南植物园.

PAR were just like single peak types both in rainy season and dry season. The PAR above the canopy (PAR_1) and that in the first arbor layer(PAR_2) presented a normal peak type curve, but it was not with the third arbor layer(PAR_3) and forth arbor layer(PAR_4). The average PAR values in dry season were about 68.99 %~71.48 % of those in wet season. The CV values of daily PAR flux for each layer were very similar in dry season, but those of PAR_3 and PAR_4 became dramatically higher in wet season. The annual PAR_1 , PAR_2 , PAR_3 and PAR_4 were 1 842.27, 1 374.37, 471.38 and 288.39 MJ/m² respectively, about 40.07 %, 29.89 %, 10.25 % and 6.27 % of downwelling shortwave solar radiation (R_{sd}) respectively. The RPF_D (relative photosynthesis photon flux density) of PAR_2 , PAR_3 and PAR_4 were 74.6 %, 23.6 % and 15.7 % respectively. An obviously significant linear correlation existed between the daily and monthly PAR_1 and R_{sd} . The coefficients of R_{sd} were less than the usual values, which ranges from 0.44 to 0.50.

Key words low subtropical China, coniferous and broadleaved mixed forests, photosynthetically active radiation(PAR), temporal and spatial distribution

植物在进行光合作用时对太阳辐射的吸收和利用具有一定的选择性,通常把绿色植物能进行光合作用的 400~700 nm 波段能量称为光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR). PAR 作为形成生物产量的基本能源,与系统的能量转化和物质生产过程有着密切关系,是到达地表面的太阳辐射光谱中最重要的波段之一,一直以来是植物生态学和生理学研究的重要内容^[1-4].

PAR 在生态系统内的分布是由进入冠层的总辐射经植物体和下垫面的多次透射、反射和吸收等一系列物理作用后形成的,其时空分布规律在很大程度上影响着系统的光合积累等关键生态过程乃至更大时空尺度上的群落结构和系统演替^[5-6]. 目前,农田、草地等结构简单、均质性强的生态系统中 PAR 的分布规律及其对系统光合的影响等研究得较为透彻^[7-9],而对于森林生态系统中 PAR 的相关研究,仍主要停留在 PAR 对叶片、单株的光合作用的影响^[10-11],以及冠层 PAR 的时间分布规律^[12]等方面. 仅有的一些对于 PAR 在森林生态系统内部的时空分布规律研究,或局限于相对简单的人工林^[13],或仅为某一时段的研究资料^[14]. 而对亚热带针阔混交林等冠层高大、结构复杂、组成种类繁多的自然林生态系统的长期定位研究资料,特别是 PAR 在生态系统内部的重新分配格局尤其缺乏^[15-16]. 本文对鼎湖山针阔混交林生态系统中全年各层次 PAR 进行了系统的测定,着重分析了其时空变化规律以及与其他辐射分量的关系,为进一步了解森林生态系统中生理生态因子的变化及光合行为提供参考.

1 研究地概况

研究地位于广东省肇庆地区境内的鼎湖山自然保护区 (23°10' N, 112°34' E), 主要为丘陵和低山,属南亚热带季风湿润型气候. 年平均日照时数为

1 433 h,年平均温度 21 °C,最热月 7 月,最冷月为 1 月,年平均降雨量为 1 900 mm,4—9 月为雨季,10—3 月为旱季,年平均蒸发量为 1 115 mm,年平均相对湿度为 82 %.

气象观测塔所在的林分为针阔混交林,优势树种为马尾松 (*Pinus massoniana*)、山钩樟 (*Lindera metcalfiana*)、锥栗 (*Castanopsis chinensis*) 和黄果厚壳桂 (*Cryptocarya concinna*),均为常绿树种,群落总叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 变动范围为 3.73~4.17,年平均值为 4.00. 乔木层分为 3 个亚层,其中第 1 亚层不连续,高度为 20~22 m,第 2 亚层高度为 14~17 m,第 3 亚层高度为 4~9 m,由小乔木组成,其下是灌木和草本层. 是目前保存下来的最为典型、完整的南亚热带针阔混交林生态系统.

2 研究方法

2.1 PAR 的测定

常规气象观测系统 (Routine Meteorological Measurement System, RMMS) 安装于 38 m 高的气象观测塔上, PAR 共分 4 个层次进行观测:在观测塔 36 m 处测定冠层上方总光合有效辐射 PAR_1 (LI190SB, APPGEE);在 21 m 处测定进入乔木第 1 亚层的光合有效辐射 PAR_2 (LQS70, APPGEE);在 9 和 4 m 处分别设置两个重复,测定进入乔木第 3 亚层和下木层的光合有效辐射 PAR_3 、 PAR_4 (LQS70, APPGEE). 采用数据采集器 (CR10X, Campbell) 进行数据记录,所有数据均为 0.5 h 平均值,本文是 2003 年 1 年的观测结果.

2.2 下行短波辐射的测定

在气象观测塔第 7 层 (36 m) 处安装荷兰 KIPP & ZONEN 公司的 CNR-1 辐射仪,朝向正南,支臂长度 2.5 m,用于测定下行短波辐射 (R_{sd}),本处下行指由天空指向地面.

2.3 PAR 的换算

PAR 既可用光合有效辐射中单位时间单位面积上入射的光量子数,即光量子通量密度(Photosynthesis photon flux density, PPFD)来表示,也可用辐射能量来表示,PPFD 的辐射能量换算公式为^[16]:

$$1\text{ W/m}^2 = 4.6\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})\tag{1}$$

2.4 相对光量子通量密度的计算

以到达群体冠层水平的光量子通量密度(PPFD₁)为 100%,则群落内 X 层次 PPFD_x 的相对百分比即为该层次的相对光量子通量密度(Relative photosynthesis photon flux density, RPPFD),即:

$$RPPFD = PPFD_x / PPFD_1\tag{2}$$

2.5 统计分析

采用 SAS9.0 对 R_{sd} 与 PAR 通量进行直线回归分析,并计算各层次 PAR 通量的变异系数.

3 结果与分析

3.1 PAR 的日总量变化

从各 PAR 通量的日总量变化(表 1)可以看出:就辐射分量的数值而言,PAR₁ > PAR₂ > PAR₃ > PAR₄,随着 PAR 进入森林生态系统内部,PAR 的强度也逐渐降低,这种趋势不仅表现在平均值上,在 PAR 日总量的最大值和最小值上也有体现. PAR 最小值均出现在 1 月 24 日,该日的 R_{sd} (0.51 MJ/(m²·d))和净辐射 R_n (-0.10 MJ/(m²·d))分别也是全年最少的一天. PAR₁ 和 PAR₂ 的最大值均出现在 7 月 4 日,也是 R_{sd} (27.19 MJ/(m²·d))最大的一天,而 PAR₃ 和 PAR₄ 的最大值出现在 7 月 27 日,该日的 R_{sd} 为 24.46 MJ/(m²·d),这说明下层 PAR 的强度除了受系统上方总 PAR 的影响外,还受系统内枝叶着生方式等因素的影响.

表 1 光合有效辐射通量日总量

	TABLE 1 Daily PAR flux			
	冠层上方 PAR ₁	乔木第 1 亚层 PAR ₂	乔木第 2 亚层 PAR ₃	灌木和 草本层 PAR ₄
平均值/ (MJ m ⁻² d ⁻¹)	4.99	3.72	1.28	0.78
变异系数	0.53	0.53	0.56	0.59
最大值/ (MJ m ⁻² d ⁻¹)	11.49	8.70	3.55	2.58
出现日期	07-04	07-04	07-27	07-27
最小值/ (MJ m ⁻² d ⁻¹)	0.26	0.22	0.07	0.04
出现日期	01-24	01-24	01-24	01-24

就变异系数而言,CV 的大小依次是:PAR₁ < PAR₂ < PAR₃ < PAR₄,说明进入系统内部后,在各种

因素的影响下,CV 的变异增大.虽然 PAR₁ 和 PAR₂ 之间在空间距离上相隔 17 m,但由于乔木第 1 亚层不连续,对 PAR 的影响仅为数值上的减少,且这种作用较稳定,故二者的 CV 相当接近.当深入系统内部后,由于各种因素的作用,对 PAR 的影响不仅表现在数值上的急剧减小,而且由于这些作用的不稳定性,导致了 PAR₃ 和 PAR₄ 的 CV 明显增加.

3.2 PAR 的月平均值的变化

由光合有效辐射通量的月平均变化(图 1)可以看出:各层次 PAR 通量的月总量变化大致呈单峰形,并均分别于 7 月和 3 月达到最大值和最小值.在北半球,太阳天文辐射在 6 月最高,12 月最低,这可能与 2003 年 7 月云量较少和 3 月云量偏多有关. PAR₁ 和 PAR₂ 的月平均值分别为 58.18 和 43.42 W/m²,具有完全一致的变化趋势,与 R_{sd} 的变化曲线基本一样,只是数值上大为减小. PAR₃ 和 PAR₄ 的变化趋势也基本相同,而与另外两层有所差别,平均值分别为 14.90 和 9.11 W/m².各层次 PAR 月总量的 CV 依次为:PAR₁ (0.36) < PAR₂ (0.50) < PAR₃ (1.53) < PAR₄ (2.61),说明群落下层 PAR 的变异逐渐增加,且至群落下部变异幅度越来越大,这与日尺度的规律类似.

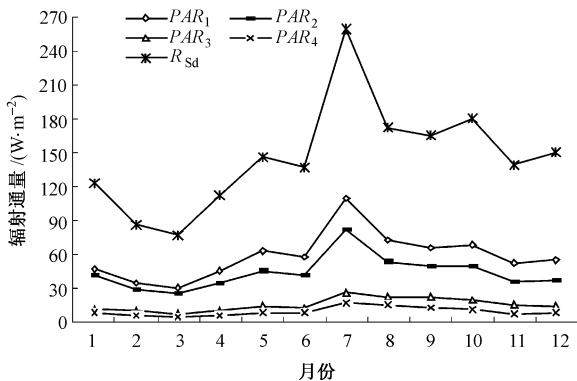


图 1 光合有效辐射通量月分配

FIGURE 1 Distribution of monthly PAR flux

3.3 PAR 的季节变化和年总量特征

由各层次 PAR 在旱季和雨季的平均日变化(图 2)可知:在不同季节,各层次 PAR 的日均变化均呈单峰曲线,其中 PAR₁ 和 PAR₂ 呈规则的单峰曲线,而 PAR₃ 和 PAR₄ 则为不规则的单峰曲线.在数值上旱季 PAR 远远小于雨季,旱季各层次 PAR 的平均值为雨季的 68.99%~71.48%,这与鼎湖山地区雨热同季的季风性气候有关.一般以 PPFD ≥30 μmol/(m²·s)作为白昼的标准^[7],就平均而言,在鼎湖山地区的旱季,白昼时段为 7:30—18:00,而在雨季,白昼时段为 7:00—19:00.

旱季各层 PAR 日通量的 CV 变动范围为 0.493 8~0.507 3,非常接近,而雨季各层次 CV 依次为: PAR_1 (0.487 6) < PAR_2 (0.499 0) < PAR_3 (0.538 3) < PAR_4 (0.586 8),可见雨季 PAR_3 和 PAR_4 的变异程度大为增加,这从图 2 中雨季下层 PAR 日均变化更

加不规则也可以看出.其原因可能是雨季风雨较多,使得系统内部枝叶不规则运动加剧,对 PAR 的作用更加紊乱,同时枝叶表面雨水多,增加了对 PAR 的反射和折射作用.

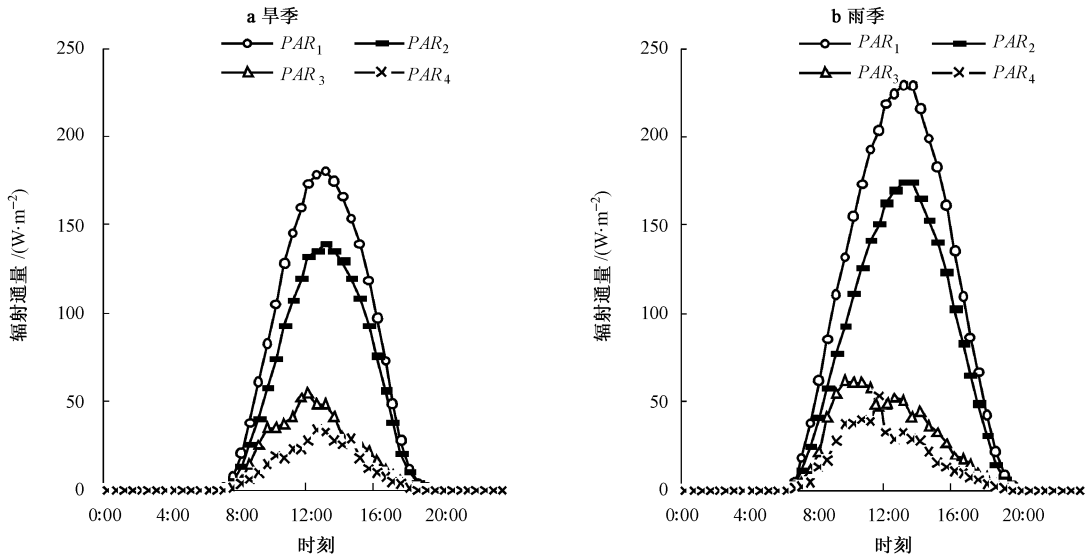


图 2 不同季节光合有效辐射通量平均日变化比较
FIGURE 2 Comparison of average daily fluctuation of PAR among different seasons

进入针阔混交林生态系统的全年总 PAR_1 、 PAR_2 、 PAR_3 、 PAR_4 分别为 1 842.27、1 374.37、471.38 和 288.39 MJ/m²,分别占 R_{sd} (4 597.50 MJ/m²) 的 40.07 %、29.89 %、10.25 %和 6.27 %.

3.4 辐射通量间的关系

3.4.1 相对光子通量密度

就全年而言, PAR_2 、 PAR_3 、 PAR_4 的 RPF_D 分别为 74.6 %、23.6 %和 15.7 %,均远远大于林益民等在黑石顶南亚热带针阔混交林的测定结果^[17]. 由于鼎湖山针阔混交林和黑石顶常绿阔叶林同属南亚热带森林,在地理位置上十分接近,二者冠层上方的辐射环境相似,林分高度和分层等情况也类似,然而由于针阔混交林的乔木层 LAI (3.77) 和群落总 LAI (4.00) 远小于阔叶林的 LAI (分别为 6.50、6.59),而群落内任何高度水平的 RPF_D 与位于该水平上层的 LAI 之间存在负指数关系^[18],故针阔混交林内各层次 RPF_D 远远大于阔叶林.

对各层次 PAR 日总量之间进行回归分析,发现 PAR_1 与 PAR_2 以及 PAR_3 和 PAR_4 的相关性最好,其直线回归方程分别为:

$$PAR_2 = 0.741\,3\,PAR_1 + 0.021\,7 \quad (3)$$
$$R^2 = 0.979\,4, n = 357, P < 0.000\,1, \text{达极显著水平.}$$
$$PAR_4 = 0.612\,9\,PAR_3 - 0.002\,2 \quad (4)$$
$$R^2 = 0.885\,9, n = 357, P < 0.000\,1, \text{也达极显著水平.}$$

3.4.2 与下行短波辐射的关系

以 2003 年全年 PAR_1 和 R_{sd} 月总量资料建立直线回归方程有 (图 3):

$$PAR_1 = 0.427\,8\,R_{sd} - 10.384 \quad (5)$$
$$R^2 = 0.977\,9, n = 12, P < 0.000\,1, \text{达极显著水平.}$$

以 2003 年全年 PAR_1 和下行短波辐射 R_{sd} 日总量资料建立直线回归方程有 (图 3):

$$PAR_1 = 0.401\,1\,R_{sd} - 0.012\,7 \quad (6)$$
$$R^2 = 0.983\,4, n = 357, P < 0.000\,1, \text{达极显著水平.}$$

长久以来,植物生理学家一般将下行短波辐射的近 1/2 作为 PAR 的能量,大多取为 0.44~0.50^[19-21],提出的估算模式为:

$$PAR = \alpha R_{sd} \quad (7)$$

由于式 (5)、(6) 的常数项与 R_{sd} 的数值相比,极其微小,可见在鼎湖山针阔混交林得出的 PAR_1 与 R_{sd} 的直线回归方程与其他研究者的结果类似.然而,其自变量的系数小于通常的取值区间,可见,当根据下行短波辐射数据对光合有效辐射进行估算时,直接将 R_{sd} 能量的 1/2 作为 PAR 的能量会造成较大误差,应根据实际情况确定该系数,以便减小误差,进行合理的估算.

4 结论与讨论

4.1 PAR 的日总量和月总量变化

各层次 PAR 的日总量依次为 $PAR_1 > PAR_2 >$

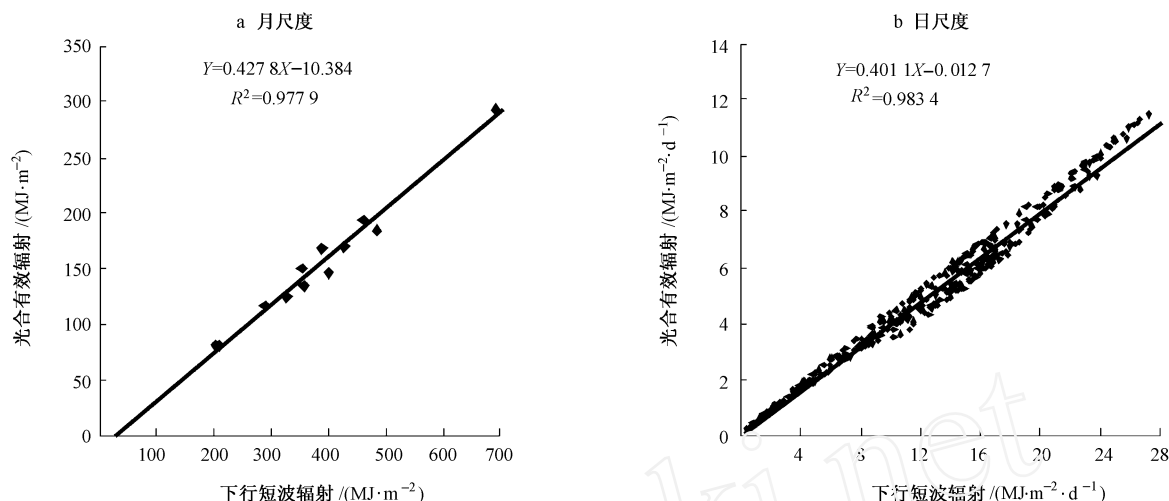


图3 冠层上方光合有效辐射与下行短波辐射的关系

FIGURE 3 Relationship between daily PAR and R_{sd} above the canopy

$PAR_3 > PAR_4$, 随着 PAR 进入森林生态系统内部, PAR 的强度也逐渐降低. PAR 日总量的 CV 的大小依次是: $PAR_1 < PAR_2 < PAR_3 < PAR_4$, 说明进入系统内部后, PAR 的变异程度也增大. PAR 进入森林生态系统内部时, 遇到枝叶后, 发生吸收、反射、透射等作用, 加上林窗等特殊结构的存在, 林内 PAR 包括直接辐射、散射辐射和补充辐射, 故在数值上不断减小的同时, CV 不断增加^[9].

各层次 PAR 通量的月总量变化大致呈单峰形, 并分别于 7 月和 3 月达到最大值和最小值, 其中 PAR_1 和 PAR_2 具有与 R_{sd} 基本一致的月变化趋势, PAR_3 和 PAR_4 的变化趋势也基本相同, 而与上面两层有所差别.

4.2 PAR 的季节变化和年变化

雨季和旱季, 各层次 PAR 的日均变化均呈单峰曲线, 其中 PAR_1 和 PAR_2 呈规则的单峰曲线, 而 PAR_3 和 PAR_4 则为不规则的单峰曲线. 在数值上旱季 PAR 远远小于雨季, 其平均值为后者的 68.99%~71.48%. 旱季各层 PAR 日总通量的 CV 非常接近, 而雨季 PAR_3 和 PAR_4 的变异程度则大为增加.

全年总 PAR_1 、 PAR_2 、 PAR_3 、 PAR_4 分别为 1 842.27、1 374.37、471.38 和 288.39 MJ/m^2 , 分别占 R_{sd} (4 597.50 MJ/m^2) 的 40.07%、29.89%、10.25% 和 6.27%. 鼎湖山针阔混交林全年 PAR_2 、 PAR_3 、 PAR_4 的 $RPFD$ 分别远远大于黑石顶常绿阔叶林的对应值, 这可能是因为针阔混交林各层次的 LAI 远小于常绿阔叶林的 LAI ^[17].

4.3 PAR 的估算

目前, 对于 PAR 的气候学计算方法的理论基础还不完善, 因此往往采用经验公式进行间接推算^[22]. 分别在日尺度和月尺度上以 2003 年全年

PAR_1 和 R_{sd} 建立直线回归方程, 回归关系均达极显著水平, 且相关性良好. 而回归方程中, R_{sd} 的系数远远小于通常的 0.44~0.50 取值区间, 故以往将 R_{sd} 能量的 1/2 作为 PAR 的能量, 这样会造成较大误差^[19], 应根据实际情况合理确定估算系数.

4.4 系统内部 PAR 的测定与模拟

尽管本研究中气象观测塔的设置以及各层次 PAR 探头的安装已尽量考虑到各种因素的影响, 并选取有代表性的点, 特别是在系统内部 PAR 的观测, 分别设置了两个重复, 以便准确地测定该点的 PAR 时空变化规律, 但对于结构异常复杂的南亚热带针阔混交林而言, 设置的重复数显然还需要增加, 以便更准确、全面地反映 PAR 在整个生态系统内部的变化规律. 即使是在结构简单、均一性较强的农作物和稀树草原生态系统中, PAR 的准确测定, 仍然在探讨当中^[23-24]. 而森林的异质性较大, 全面、准确地测定 PAR 在森林内部的时空格局变得异常困难^[25], 很多研究者寄希望于冠层内部 PAR 分配规律的模型开发, 并在模拟人工林生态系统较大的时空尺度的 PAR 分配格局上已经取得了一些进展, 但这些模型仍需要对各层次 LAI 、林分结构等进行细致的分析, 工作量大、实用性较差^[26-27]. 同时, PAR 的分布模型只有与冠层内 PAR 的三维测定相辅相成, 才能得到更好的验证、表述和应用.

参 考 文 献

- [1] GRANT R H. Ultraviolet-B and photosynthetically active radiation environment of inclined leaf surfaces in a maize canopy and implications for modeling[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 95(3): 187-201.
- [2] MARISCAL M J, MARTENS S N, USTIN S L, et al. Light-transmission profiles in an old-growth forest canopy: Simulations of photosynthetically active radiation by using spatially explicit radiative transfer models[J]. *Ecosystems*, 2004, 7(5): 454-467.

- [3] RUBIO M A, LÓPEZ G, TOVAR J, *et al.* The use of satellite measurements to estimate photosynthetically active radiation [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30: 159-164.
- [4] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 不同风浪条件下太湖梅梁湾光合有效辐射的衰减[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(6): 1 133-1 137.
- ZHANG Y L, QIN B Q, CHEN W M, *et al.* Attenuation of photosynthetically available radiation (PAR) in Meiliang Bay under different winds and waves[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(6): 1 133-1 137.
- [5] CHIESI M, MASELLI F, BINDI M, *et al.* Modelling carbon budget of mediterranean forests using ground and remote sensing measurements[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 135: 22-34.
- [6] MIN Q L, LIN B. Remote sensing of evapotranspiration and carbon uptake at Harvard forest[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100: 379-387.
- [7] 姚济敏, 高晓清, 冯起, 等. 额济纳地区苜蓿地光合有效辐射 (PAR) 的基本特征[J]. *高原气象*, 2005, 24(5): 772-776.
- YAO J M, GAO X Q, FENG Q, *et al.* Characteristics of photosynthetically active radiation at clover land over Ejina Region [J]. *Plateau Meteorology*, 2005, 24(5): 772-776.
- [8] 刘金祥, 莫穗秋. 三裂叶蟛蜞菊光合生理特性对光合有效辐射增强的响应[J]. *草原与草坪*, 2005(109): 27-31.
- LIU J X, MO S Q. Response of photosynthetic physiological characteristics of *Wedelia trilobata* to the increasing photosynthetic active radiation[J]. *Grassland and Turf*, 2005(109): 27-31.
- [9] 王锡平, 李保国, 郭焱, 等. 玉米冠层内光合有效辐射三维空间分布的测定和分析[J]. *作物学报*, 2004, 30(6): 568-576.
- WANG X P, LI B G, GUO Y, *et al.* Measurement and analysis of the 3D spatial distribution of photosynthetically active radiation in maize canopy[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(6): 568-576.
- [10] 蔺琛, 马钦彦, 韩海荣, 等. 山西太岳山辽东栎的光合特性[J]. *生态学报*, 2002, 22(9): 1 399-1 406.
- LIN C, MA Q Y, HAN H R, *et al.* Photosynthesis characteristic of *Quercus liaotungensis* in Taiyue Mountain Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1 399-1 406.
- [11] 马志波, 马钦彦, 韩海荣, 等. 北京地区6种落叶阔叶树光合特性的研究[J]. *北京林业大学学报*, 2004, 26(3): 13-18.
- MA Z B, MA Q Y, HAN H R, *et al.* Photosynthetic characteristics of six broad-leaved deciduous trees in Beijing[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2004, 26(3): 13-18.
- [12] 闫俊华. 鼎湖山主要生态系统的水热过程研究及脆弱性初探[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2001: 128-134.
- YAN J H. *Studies on water-heat processes and fragibility of the dominating ecosystems in Dinghushan Mountain* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2001: 128-134.
- [13] 卢琦, 阳含熙, 慈龙俊, 等. 农桐间作系统辐射传输对农作物产量和品质的影响[J]. *生态学报*, 1997, 17(1): 36-44.
- LU Q, YANG H X, CIL J, *et al.* Effect of radiation transmission on crop yield and quality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(1): 36-44.
- [14] 林益民, 韩博平, 王伯荪, 等. 南亚热带森林群落光合作用的模拟研究[J]. *生态科学*, 1997, 16(1): 13-21.
- LIN Y M, HAN B P, WANG B S, *et al.* Simulation on the photosynthesis of the lower subtropical forest community[J]. *Ecologic Science*, 1997, 16(1): 13-21.
- [15] 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): 23-29.
- 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): 23-29.
- [16] VESAKA T M, NARJABEB T M, OAKVA K, *et al.* Effect of variations of PAR on CO₂ exchange estimation for Scots pine [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 100: 337-347.
- [17] 林益民, 王伯荪, 张宏达, 等. 黑石顶森林群落光能的时空变化与利用效率[J]. *生态科学*, 1997, 16(1): 1-11.
- LIN Y M, WANG B S, ZHANG H D, *et al.* The variation of PAR and its effects on NPR of plants in Heishiding lower subtropical forest [J]. *Ecologic Science*, 1997, 16(1): 1-11.
- [18] FEDERER C A. Spatial variation of net radiation, albedo and surface temperature of forest [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1968, 7(2): 789-795.
- [19] ALADOS I, FOYO-MORENO I, OLMO F J, *et al.* Relationship between net radiation and solar radiation for semi-arid shrub-land [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 116: 221-227.
- [20] 李英年, 周华坤. 祁连山海北高寒草甸地区植物生长期的光合有效辐射特征[J]. *高原气象*, 2002, 21(1): 90-95.
- LI Y N, ZHOU H K. Features of photosynthetic active radiation (PAR) in Haibei alpine meadow area of Qilian Mountain during plant growing period[J]. *Plateau Meteorology*, 2002, 21(1): 90-95.
- [21] GRANT R H, HEISLER G M, GAO W. Photosynthetically active radiation: Sky radiance distributions under clear and overcast conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 82: 267-292.
- [22] 张运林, 秦伯强. 太湖地区光合有效辐射 (PAR) 的基本特征及其气候学计算[J]. *太阳能学报*, 2002, 23(1): 118-122.
- ZHANG Y L, QIN B Q. The basic characteristic and climatological calculation of the photosynthetically available radiation in Taihu Region[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2002, 23(1): 118-122.
- [23] 史泽艳, 高晓飞, 谢云. 冠层底部光合有效辐射三种测量方法的比较[J]. *资源科学*, 2005, 27(1): 104-107.
- SHI Z Y, GAO X F, XIE Y. Comparison of three methods for measurement of transmitted photo-synthetically active radiation [J]. *Resources Science*, 2005, 27(1): 104-107.
- [24] FINCH D A, BAILEY W G, MCARTHUR L J B, *et al.* Photosynthetically active radiation regimes in a southern African savanna environment[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 122: 229-238.
- [25] VIERLING L A, WESSMAN C A. Photosynthetically active radiation heterogeneity within a monodominant Congolese rain forest canopy[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 103: 265-278.
- [26] 刘荣高, 刘纪远, 庄大方. 基于 MODIS 数据估算晴空陆地光合有效辐射[J]. *地理学报*, 2004, 59(1): 64-73.
- LIU R G, LIU J Y, ZHUANG D F. Estimation of land photosynthetically active radiation in clear sky using MODIS [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1): 64-73.
- [27] ZHANG L, MORAN M D, BROOK J R. A comparison of models to estimate in-canopy photosynthetically active radiation and their influence on canopy stomatal resistance [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35: 4 463-4 470.

(责任编辑 董晓燕)