

# 哀牢山亚热带常绿阔叶林光合有效辐射的时空分布\*

李麟辉<sup>1,4</sup> 张一平<sup>1,2,3,\*\*</sup> 游广永<sup>1,4</sup> 姚玉刚<sup>1,4</sup> 谭正洪<sup>1,4</sup> 宋清海<sup>1,4</sup> 罗有勇<sup>5</sup>

(<sup>1</sup>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; <sup>2</sup>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; <sup>3</sup>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; <sup>4</sup>中国科学院研究生院,北京 100049; <sup>5</sup>哀牢山国家级自然保护区景东保护局,云南景东 676209)

**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。本研究分析了2009年哀牢山亚热带常绿阔叶林生态系统PAR的时间与垂直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;各层次PAR月总量的年变化不尽相同,冠层上在2月和1月分别达到最大值和最小值。冠层上的PAR(PAR<sub>1</sub>)的日均变化呈单峰曲线,冠层底部(PAR<sub>2</sub>)、乔木亚层(PAR<sub>3</sub>、PAR<sub>4</sub>)和灌木层(PAR<sub>5</sub>)则为不规则的单峰曲线;各层全年PAR总量分别为8824.98、682.20、403.09、216.62、208.52 mol·m<sup>-2</sup>。全年PAR<sub>2</sub>-PAR<sub>5</sub>占PAR<sub>1</sub>的比率分别为7.73%、4.57%、2.45%和0.92%;雨季各层次PAR的平均值分别为干季的89.77%、89.34%、97.32%、116.36%和115.09%。

**关键词** 透射率;冠层;乔木亚层;垂直分布

中图分类号 S718.5 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2011)11-2394-06

**Spatiotemporal distribution pattern of photosynthetically active radiation in subtropical evergreen broadleaved forest in Ailaoshan Mountains of Southwest China.** LI Lin-hui<sup>1,4</sup>, ZHANG Yi-ping<sup>1,2,3,\*\*</sup>, YOU Guang-yong<sup>1,4</sup>, YAO Yu-gang<sup>1,4</sup>, TAN Zheng-hong<sup>1,4</sup>, SONG Qing-hai<sup>1,4</sup>, LUO You-yong<sup>5</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory of Tropical Forest Ecology (Xishuangbanna Tropical Botanical Garden), Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; <sup>2</sup>Ailaoshan Station for Subtropical Forest Ecosystem Studies, Chinese Academy of Sciences, Jingdong 676209, Yunnan, China; <sup>3</sup>National Forest Ecosystem Research Station at Ailaoshan, Jingdong 676209, Yunnan, China; <sup>4</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>5</sup>Jingdong Protection Agency of Ailaoshan Mountain National Nature Reserve, Jingdong 676209, Yunnan, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(11): 2394-2399.

**Abstract:** Photosynthetically active radiation (PAR) is an important ecological factor affecting the energy transformation and matter production of plant ecosystem. Studies on the spatiotemporal distribution patterns of PAR in a plant ecosystem are helpful to understand the physiological and ecological characteristics and photosynthesis of the ecosystem. In this paper, the temporal and vertical distributions of PAR in a coniferous and subtropical evergreen forest in Ailaoshan Mountains of Southwest China were analyzed. At daily scale, the intensity of PAR during passing through the forest canopy decreased gradually. At monthly scale, the PAR flux varied in each forest layer, with the maximum and minimum values above the canopy in February and January, respectively. The diurnal change of the PAR above the canopy (PAR<sub>1</sub>) presented a single-peak curve, while that of the PAR at the bottom of the canopy (PAR<sub>2</sub>) and in the arbor sub-layers (PAR<sub>3</sub> and PAR<sub>4</sub>) and shrub layer (PAR<sub>5</sub>) presented an irregular single-peak curve. The PAR<sub>1</sub>, PAR<sub>2</sub>, PAR<sub>3</sub>, PAR<sub>4</sub> and PAR<sub>5</sub> fluxes at yearly scale were 8824.98, 682.20, 403.09, 216.62 and 208.52 mol·m<sup>-2</sup>, and the ratios of yearly PAR<sub>2</sub>, PAR<sub>3</sub>, PAR<sub>4</sub> and PAR<sub>5</sub> to PAR<sub>1</sub> were 7.73%, 4.57%, 2.45% and 0.92%, respectively. The average PAR<sub>1</sub>, PAR<sub>2</sub>, PAR<sub>3</sub>,

\* 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: 2011-05-06 接受日期: 2011-06-29

PAR<sub>4</sub> and PAR<sub>5</sub> in rain season were 89.77% ,89.34% ,97.32% ,116.36% and 115.09% of those in dry season , respectively.

**Key words:** transmissivity; canopy; arbor sub-layer; vertical 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直接参与植物的光合作用,是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生理学研究的重要内容之一。近年来,国内外学者对散射的PAR和直接的PAR对光合作用的影响和对冠层叶面积估算差异进行了关注。许多学者认为,由于多云天气下散射的PAR要比晴天下的PAR大,所以植物在多云天气下能更好地吸收CO<sub>2</sub>(Min, 2005; Johnson & Smith 2006)。也有学者认为,用多云天气下的PAR值来估算冠层叶面积更真实(Hyer & Goetz 2004)。

PAR在生态系统内的分布式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(Chiesi et al. 2005; Min & Lin 2006)。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(李英年和周华坤 2002; 张运林和秦伯强 2002; 王锡平等, 2004; 刘金祥等 2005; 姚济敏等 2005),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(藺琛等 2002; 马志波等 2004),以及冠层PAR的时间分布规律(闫俊华 2001)等方面。仅有的一些对于PAR在森林生态系统内部的时间与垂直分布规律研究,或局限于相对简单的人工林(卢琦等, 1997),或仅为某一时段的研究资料(林益民等, 1997),或只研究了林冠上、林下2处(袁凤辉等 2008)。而对亚热带常绿阔叶林等冠层高大、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(任海和彭少麟, 1997; Vesaka et al. 2000; 王旭 2007)。本文对哀牢山亚热带常绿阔叶林生态系统中全年不同高度PAR进行了系统的测定,着重分析了其时空变化

规律,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 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究地点位于哀牢山自然保护区的徐家坝地区(24°32'N, 101°01'E, 海拔2400~2600 m)。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℃。

亚热带常绿阔叶林主要分布在东亚,特别是在中国有着广泛分布区域。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(约130年以上)和面积较大(近5333 hm<sup>2</sup>)的常绿阔叶林(邱学忠和谢寿昌, 1998)。主要优势种为木果柯(*Lithocarpus xylocarpus*),乔木上层高20~25 m,除木果柯外,还有相当数量的腾冲栲(*Castanopsis wattii*)、滇木荷(*Schima noronhae*)和景东石栎(*L. chintungensis*)等;乔木亚层高5~15 m,主要为绿叶润楠(*Machilus viridis*)、红花木莲(*Manglietia insignis*)和米饭树(*Vaccinium duclouxii*)等;灌木层高1~3.5 m,主要以箭竹(*Sinnoarundinaria nitida*)为主;草本层在0.5 m以下,主要为滇西瘤足蕨(*Plagiogyria communis*)和细梗苔草(*Carex teinogyne*)。

### 1.2 观测方法

常规气象观测系统(routine meteorological measurement system, RMMS)安装于30 m高的气象观测塔上,本研究选择铁塔上安装的5层光合有效辐射仪(LQS70,美国LI-COR公司),分别位于28.6 m、19.0 m、10.8 m、4.3 m、1.9 m。其中28.6 m、19.0 m分别位于上层林冠的顶部和底部,而10.8 m、4.3 m分别位于亚层林冠的顶部和底部,1.9 m位于灌木层中间的位置。其中28.6 m处可视为全光照条件下的光合有效辐射,代表林冠层可以获得的最大光合有效辐射。

林冠光合有效辐射受太阳轨迹、风、云、雨等天文或气象的影响。为了避免单点测量受片云、光斑

的影响,本实验布置的探头上均匀分布了10个感应器,每个探头的观测结果为1 m范围内空间光合有效辐射的平均值,有效地降低了空间差异引起的人为观测误差。另外,由于长期的定位观测可以消除短期枝叶摆动、片云等因素的影响,进一步反映较长时间内气候状况和冠层叶面积变化的影响,较准确地阐述哀牢山亚热带常绿阔叶林不同高度的光合有效辐射特征,得以排除由天气状况、太阳高度角的影响而得出各不同高度 PAR 的异质性,以及各高度不同的冠层厚度、树木组成引起的。观测采用连续观测;采样频率为0.5 Hz,计算30 min 平均值。

一般以  $PAR \geq 30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$  作为白昼的标准,就平均而言,哀牢山地区的干季,白昼时段为8:30—19:00,雨季为7:30—19:30。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同高度 PAR 的日变化、年变化

研究区域森林群落的林冠高度约为25 m,乔木分层明显。从图1可以看出,由于不受植被遮挡,

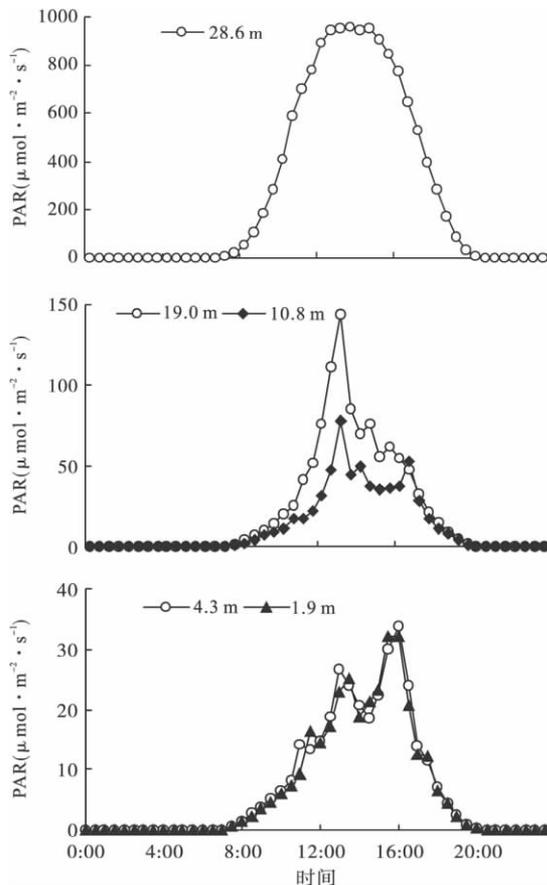


图1 不同高度 PAR 的日变化  
Fig.1 Diurnal variation of PAR in different heights

28.6 m 处的光合有效辐射为正态分布,在13:30达到最大( $959.02 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。冠层底部(19.0 m)和乔木亚层顶部(10.8 m)由于受到上层林冠的遮挡,PAR 明显减少,最大值仅为143.99 和  $77.67 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,出现在13:00。乔木亚层底部(4.3 m)和灌木层(1.9 m)的 PAR 几乎没有差别。说明在乔木亚层以下,PAR 的变化已经很小。在16:00达到最大,分别为  $33.76、32.01 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。原因是林窗引起太阳辐射透射,造成光斑‘突跃’。

从图2可以看出,受向下短波辐射的影响,乔木冠层顶部(28.6 m) PAR 变化规律,1月和7月较低,分别为  $554.09、552.82 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,2月最高,为  $946.09 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ;乔木冠层底部(19.0 m)和乔木亚层上部(10.8 m)在4月达到最高,分别为  $118.11、73.53 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ;乔木层以下和灌木层(4.3 m、1.9 m)在5月 PAR 月总量最高,达到  $39.63、36.17 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在7月以后、2月之前这段时间月总量较平稳,可见虽然全光照 PAR 随年时间尺度太阳辐射变

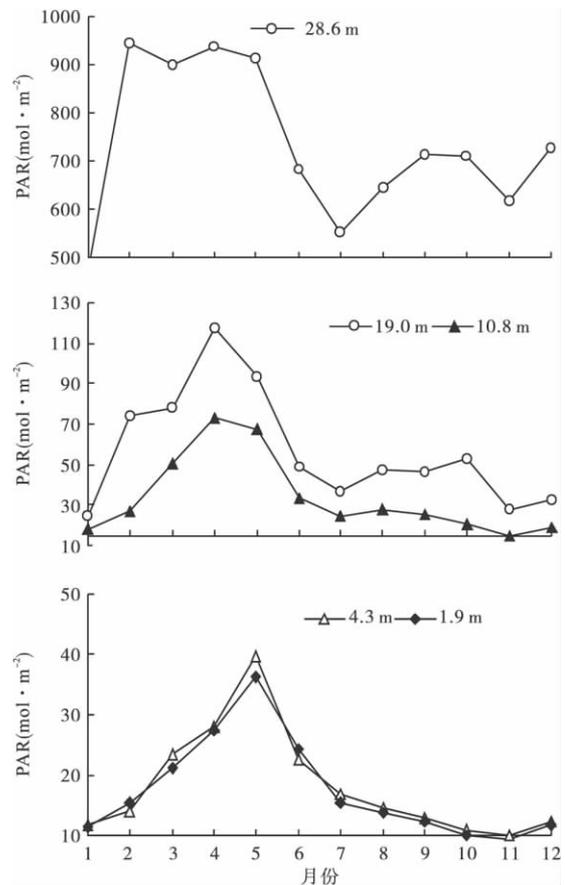


图2 亚热带常绿阔叶林不同高度 PAR 年变化  
Fig.2 Annual variation of PAR in different heights of subtropical evergreen forest

化而变化,但乔木亚层以下只在春季和初夏较高,其他时间都变化不大。

2.2 不同高度 PAR 日总量、年总量

从表 1 可以看出,28.6 m 处 PAR 日总量最多,雨季平均日总量  $22.81 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,比干季 ( $25.41 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 小 10.23%,年平均日总量为  $24.26 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 。乔木冠层吸收反射了大量的光合有效辐射,导致 19.0m 处 PAR 年平均日总量仅为  $1.88 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,仅为全光照条件下的 7.75%。乔木亚层以下,PAR 日总量变化不大,4.3 m 和 1.9 m 处年平均日总量仅为 0.59、 $0.57 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,均小于  $1 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。表 1 还表明,在乔木亚层(10.8 m)以上,PAR 干季大于雨季;而在乔木亚层以下,PAR 干季小于雨季,说明乔木亚层在光合有效辐射穿越时吸收遮蔽的量干季大于雨季。可能的原因是干季的太阳高度角小于雨季,导致光合有效辐射在乔木亚层穿越的距离比雨季长。

从年总量来看(图 3),全光照条件下的光合有效辐射最高,为  $8824.98 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,乔木冠层获得了  $8142.78 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$  光合有效辐射,占全光照的 92.27%。乔木亚层接受了  $186.47 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$  光合有效辐射,占全光照的 2.11%。最后仅有  $216.62 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$  的光合有效辐射到达灌木层。

2.3 林冠下不同高度 PAR 占冠上(28.6 m)比率的日变化、年变化

从图 4 可以看出,冠层底部(19.0 m)占冠上

表 1 不同高度 PAR 的日总量( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ )  
Table 1 Total daily values of PAR in different heights

	28.6 m	19.0 m	10.8 m	4.3 m	1.9 m
干季	25.41	1.97	1.12	0.55	0.53
雨季	22.81	1.76	1.09	0.64	0.61
年	24.26	1.88	1.10	0.59	0.57

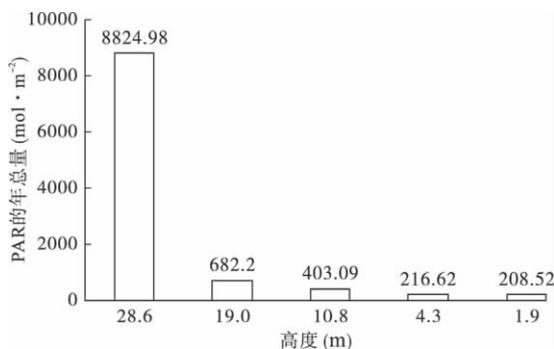


图 3 不同高度 PAR 的年总量( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ )  
Fig. 3 Total annual PAR in different heights

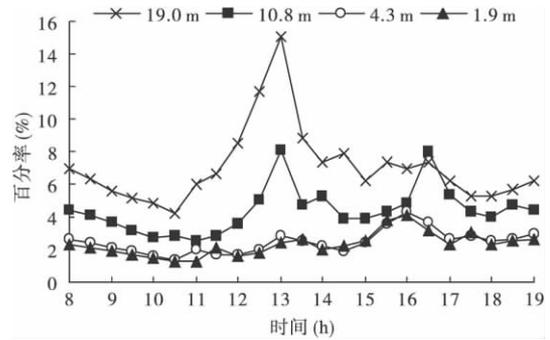


图 4 林冠不同高度 PAR 占林冠上的比率日尺度变化  
Fig. 4 Diurnal variation of PAR ratios in different heights compared to overstory

PAR 比值在日出后逐渐降低,在 10:30 达到最低(4.23%),然后开始升高,在 13:00 达到最高(15.10%),然后开始下降,14:00—19:00 在 5.22%~7.91% 波动。乔木亚层上部(10.8 m)在早上较低,11:00 最低(2.52%),在下午有 2 个波峰,分别是 13:00 的 8.14% 和 16:30 的 8.05%,原因可能是各层林间空隙的不同,随太阳高度角的变化,在 13:00、16:30 太阳辐射恰穿透林冠,导致林内光合有效辐射陡增。乔木亚层底部(4.3 m)和灌木层变化规律基本一致,因为这一段高度之间枝叶较少。灌木层(1.9 m)的 PAR 波动不大,下午较高,在 16:00 达到最高,为 4% 左右。

从年变化情况来看(图 5),乔木冠层底部(19.0 m)占林冠上的比率变化最大,在 4.50%~12.60% 波动,其中 4 月最高,12 月最小。乔木亚层顶部(10.8 m)变化开始变小,在 4 月最高,为 7.85%。2 月、10—12 月较低,11 月最低,为 2.47%。乔木亚层底部在年变化上也和灌木层相似,5 月高(4.33%) 2 月最低,为 1.47%,10—12 月也较低,在 1.51%~1.70%。灌木层(1.9 m) PAR 占全光照

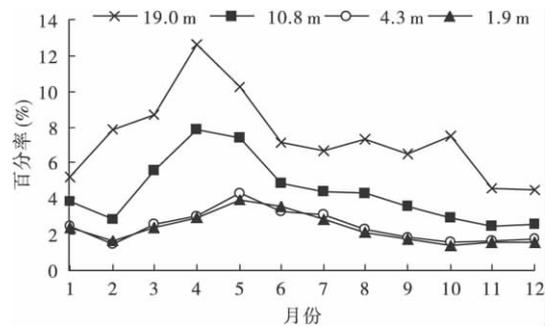


图 5 不同高度 PAR 占林冠上的比率年尺度变化  
Fig. 5 Annual variation of PAR ratios of different heights to overstory

表2 林冠层下不同高度 PAR 占林冠上比率 (%)

Table 2 Ratios of PAR in different heights to overstory

	19.0 m	10.8 m	4.3 m	1.9 m
干季	7.76	4.42	2.16	2.08
雨季	7.72	4.76	2.79	2.66
年	7.75	4.55	2.44	2.36

条件下变化最小,在 1.42% ~ 3.95%,在 5 月最高,但也仅为 4% 左右;10—12 月较低,为 1.42% ~ 1.60%。

从表 2 可以看出,乔木冠层底部(19.0 m)占全光照 PAR 比率为 7.75%,可见乔木冠层吸收反射了 92.25% 的光合有效辐射。而乔木亚层顶部(10.8 m)和底部(4.3 m)占全光照 PAR 比率分别为 4.55%、2.44%,所以乔木亚层仅吸收反射了光合有效辐射的 2.11%。这是因为哀牢山亚热带常绿阔叶林林相完整,乔木冠层郁闭度高,导致最终到达灌木层的 PAR 仅占全光照的 2.36%。从干季雨季来看,乔木亚层以上(19.0 m) PAR 比率干季大于雨季,但以下(10.8 m、4.3 m、1.9 m),受散射影响,干季小于雨季。

### 3 讨论

日时间尺度的透射比,乔木冠层底部(19.0 m)在 13:00 达到波峰,16:30 有个小波峰,2 次峰值都没有超过  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,远没有达到冠层各树种光合有效辐射饱和点。根据实测值,此处的光饱和点为  $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。乔木亚层顶部(10.8 m)由于受到上层林冠的遮挡,光合有效辐射明显减少,该层最大 PAR 时刻不超过  $80 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,属于弱光环境。该层植被(绿叶润楠、红花木莲和米饭树等)具有弱光性,适应这样的光环境,在弱光条件下也能进行光合作用。再下层的乔木亚层底部(4.3 m)和灌木层(1.9 m)生长在耐荫的光环境下,林冠上的光强被上层冠层遮挡,到达这个位置已经较弱。这 2 个高度的植物有耐荫的特性,如箭竹等。PAR 的减弱将导致光能利用率的增高,下层的植物光能利用效率是上层植物的 4 倍多(林益民,1997)。

乔木亚层以下和灌木层(4.3 m、1.9 m)在 7 月一次年 2 月期间月总量较平稳,7—10 月时,上层乔木叶面积指数高,到达乔木亚层以下 PAR 较低;11 月一次年 2 月时,林相简单化,但太阳高度角低,导致透过林冠的 PAR 没有较大变化。随着春季来

临,太阳高度角开始逐渐增高,此时乔木冠层树叶还较少,使得 PAR 穿越上层冠层,到达乔木亚层以下和灌木层,PAR 开始升高。

林冠上年平均 PAR 日总量为  $24.26 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,冠层上的曲线呈现规则的单峰趋势,在 12:00—14:00 较高。林冠上年总 PAR 达到  $8824.98 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,即平均昼间达到  $561.57 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于本研究样地在正午时分经常超过  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,这使得林冠上的优势种耐受了很高的光强,所以叶子都包被着一层蜡质角质层以保护里面的组织不受伤害;同时有研究表明,此时植物叶片净光合速率(NPR)随 PAR 的增强而下降(林益民,1997);而且由于冠层竞争激烈,使得顶层优势种分枝和叶都集中在冠层,而在冠层以下,就只有树干,这一规律也适用于乔木亚层树种。PAR 经过林冠抵达乔木冠层底部后,仅为  $682.20 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,可见冠层截获及反射了全光照条件下 92.27% 的 PAR,乔木亚层以下仅占 7.73%,日均小于  $1 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,这使得乔木亚层树种、灌木层以及林下幼苗形成了较强的弱光适应机制,即耐受弱光光合,符合已有的植物生理学研究。研究表明,林下幼苗的光合作用光补偿点、暗呼吸速率和最大净光合速率都是最低的,耐荫能力最强,非常适应林下阴生光照环境(郑征,1998)。

林冠上杆 PAR(28.6 m)在林冠上 3 m 左右,不被林冠遮挡,只受冠上总辐射、天空散射辐射影响,观测结果较稳定;冠层底部(19.0 m)在林冠下,受林冠遮蔽,只有透射辐射和散射辐射,由于距枝叶较近,所以测定会稍稍偏小,但这种误差无法避免。乔木亚层和灌木层在水平面上不连续,在垂直尺度上也不相连,辐射主要是枝叶的反射辐射、散射辐射等等,所观测的光合有效辐射能较准确的反映真实值。本实验中,分别位于 72%、40%、16%、6% 相对于林冠高度观测点(铁塔附近群落高度为 25 m)与冠上的 PAR 日总量的比值分别为 7.73%、4.57%、2.45% 和 2.36%。而在刚果地区,一个以 *Gilbertiodendron dewevrei* 为优势种的热带雨林中,受林冠顶层浓密且连续的叶层的影响,林冠对 PAR 的削弱作用相对较强,在林冠内 81%、57% 和 7% 的相对高度中,PAR 日总量值分别只占到冠上的 5.1%、5.1% 和 2.0%(Vierling & Wessman, 2000)。与其比较,本研究的亚热带常绿阔叶林林冠对 PAR 的削弱作用和它相似。这从一个侧面说明了哀牢山样地群落

结构和叶面积指数接近于热带雨林,但还需进一步的实验依据证明。

季节间 PAR 的变率往往与光合作用适应性、叶形态、植物生长以及生长分配等特征相联系(Ackerly, 1997)。有报道指出,在亚热带常绿森林中,辐射值的季节性变化是控制该生态系统净辐射生产力和物候的一个强有力因子,如在干季 PAR 日平均值较雨季高很多,这使得耐旱物种,以及次林冠植物的长叶和开花均在 PAR 值达到全年最大时的干季早期(Weight & Schaik, 1994)。在本研究中,这点得到了很好的印证。哀牢山样地乔木冠层底部(19.0 m)、乔木亚层顶部(10.8 m)在 4 月 PAR 达到峰值,乔木亚层底部(4.3 m)、灌木层(1.9 m)在 5 月达到最大,而哀牢山主要树种恰好在 4—5 月进入展叶盛期和开花期(谢寿昌等, 1997)。因此,可以认为,哀牢山的主要树种已经很好地适应了 PAR 的变化规律。

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;中国科学院版纳植物园赵俊斌博士对本文提出了诸多建议, Douglas Schaefer 博士为本文英文摘要做了修改,在此一并表示感谢。

#### 参考文献

- 李英年,周华坤. 2002. 祁连山海北草甸地区植物生长期的光合有效辐射特征. 高原气象, **21**(1): 90-95.
- 林益民,韩博平,王伯荪,等. 1997. 南亚热带森林群落光合作用的模拟研究. 生态科学, **16**(1): 13-21.
- 林益民,王伯荪,张宏达,等. 1997. 黑石顶森林群落光能的时空变化与利用效率. 生态科学, **16**(1): 1-11.
- 藺琛,马欣彦,韩海荣,等. 2002. 山西太岳山辽东栎的光合特性. 生态学报, **22**(9): 1399-1406.
- 刘金祥,莫穗秋. 2005. 三裂叶蟛蜞菊光合生理特性对光合有效辐射增强的响应. 草原与草坪, (2): 27-31.
- 卢琦,阳含锡,慈龙俊,等. 1997. 农桐间作系统辐射传输对农作物产量和品质的影响. 生态学报, **17**(1): 36-44.
- 马志波,马欣彦,韩海荣,等. 2004. 北京地区 6 种落叶阔叶树光合特性的研究. 北京林业大学学报, **26**(3): 13-18.
- 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): 23-29.
- 王旭,尹光彩,周国逸,等. 2007. 鼎湖山针阔混交林光合有效辐射的时空格局. 北京林业大学学报, **29**(2): 18-23.

- 王锡平,李保国,郭焱,等. 2004. 玉米冠层光合有效辐射三维空间的分布的测定和分析. 作物学报, **30**(6): 568-576.
- 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.
- 谢寿昌,盛才余. 1997. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林主要树种的物候研究. 生态学报, **17**(1): 51-60.
- 闫俊华. 2001. 鼎湖山主要生态系统的水热过程研究及脆弱性初探(硕士学位论文). 北京: 中国科学院研究生院.
- 姚济敏,高晓青,冯起,等. 2005. 额济纳地区苜蓿地光合有效辐射(PAR)的基本特征. 高原气象, **24**(5): 772-776.
- 袁凤辉,关德新,吴家兵,等. 2008. 长白山红松针阔叶混交林林下光合有效辐射的基本特征. 应用生态学报, **19**(2): 231-237.
- 张运林,秦伯强. 2002. 太湖地区光合有效辐射(PAR)的基本特征及其气候学计算. 太阳能学报, **23**(1): 118-122.
- 郑征,曹敏. 1998. 西双版纳热带季节雨林 6 种树种幼树在林下的光合作用. 植物生态学报, **22**(6): 499-504.
- Ackerly D. 1997. Allocation, leaf display and growth in fluctuating light environments // Bazzaz FA, Grace J, eds. Plant Resource Allocation. Academic Press, San Diego. 231-264.
- Chiesi M, Maselli F, Bindi M, et al. 2005. Modelling carbon budget of Mediterranean forests using ground and remote sensing measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, **135**: 22-34.
- Hyer EJ, Goetz SJ. 2004. Comparison and sensitivity analysis of instruments and radiometric methods for LAI estimation: Assessments from a boreal forest site. *Agricultural and Forest Meteorology*, **122**: 157-174.
- Johnson DM, Smith WK. 2006. Low clouds and cloud immersion enhance photosynthesis in understory species of a southern Appalachian spruce-fir forest. *American Journal of Botany*, **93**: 1625-1632.
- Min QL, Lin B. 2006. Remote sensing of evapotranspiration and carbon uptake at Harvard forest. *Remote Sensing of Environment*, **100**: 379-387.
- Vesaka TM, Narjabe TM, Oakva K, et al. 2000. Effect of variations of PAR on CO<sub>2</sub> exchange estimation for Scots pine. *Agricultural and Forest Meteorology*, **100**: 337-347.
- Vierling LA, Wessman CA. 2000. Photosynthetically active radiation heterogeneity within a monodominant Congolese rain forest canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, **103**: 265-278.
- Weight SJ, Schail CPV. 1994. Light and the phenology of tropical trees. *American Naturalist*, **143**: 192-199.

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