

引种植物定植区近地层光合有效辐射特征^{*}

张一平^{1,2*} 赵俊斌^{1,3} 宋清海^{1,2,3} 梁志⁴

(¹ 中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223; ² 中国科学院热带森林生态学重点实验室, 云南勐仑 666303;

³ 中国科学院研究生院, 北京 100049; ⁴ 云南大学资源环境与地球科学学院, 昆明 650091)

摘要 为了探讨西双版纳热带植物园引种植物主要定植区近地层的光合有效辐射特征及其变化规律, 利用 2008—2009 年不同季节的小气候观测资料, 分析了西双版纳热带植物园引种植物主要定植区近地层的光合有效辐射的季节和日变化特征。结果表明: 西双版纳热带植物园区域的光合有效辐射具有明显的日变化和季节差异, 雨季最强, 旷地的光合有效辐射日总量可达 $406.6 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 雾凉季最弱, 旷地光合有效辐射日总量为 $236.0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 由于受高大树木遮蔽的影响, 在沟谷林、龙脑香林和树木园的光合有效辐射数值较低; 受太阳高度角变化和林冠林隙的影响, 在雨季近地层光合有效辐射会出现“突跃”现象。各引种植物定植区近地层的光合有效辐射的数值也不同, 存在地域差异和季节差异。在具有高大树木、遮蔽较大的定植区, 近地层光合有效辐射的数值较小; 而遮蔽较小的定植区, 情况则反之, 近地层光合有效辐射的季节差异与旷地相似, 雨季较大, 雾凉季较小。在具有高大树木、遮蔽较大的定植区, 近地层光合有效辐射与旷地的比值较小, 不足旷地的 10%, 其中在具有多层多种森林群落结构的沟谷林, 其最小比值(雾凉季)仅为 1.6%; 而遮蔽较小的定植区比值较大(> 55%) 在干热季其数值甚至与旷地相当, 比值达 98.7%。结果表明, 西双版纳热带植物园不同引种植物定植区近地层光合有效辐射存在明显的时空异质性, 这势必对引种植物, 特别是栽培在林下的引种植物生长起到重要的作用。

关键词 迁地保护; 光合有效辐射; 热带引种植物; 西双版纳热带植物园

中图分类号 Q945 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)2-0226-07

Characteristics of photosynthetically active radiation in near surface layer of four introduced plant sites in Xishuangbanna Tropical Botanical Garden. ZHANG Yiping^{1,2}, ZHAO Junbin^{1,3}, SONG Qinghai^{1,2,3}, LIANG Zhi⁴ (¹Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, Yunnan, China; ²Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, Yunnan, China; ³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁴College of Resources & Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming 650091, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2010 29(2): 226-232

Abstract Based on the micro-climate observation data from 2008 to 2009, the diurnal and seasonal variations of photosynthetically active radiation (PAR) in the near surface layer of four introduced plant sites in Xishuangbanna Tropical Botanical Garden were analyzed. All the plant sites showed obvious diurnal and seasonal variations in PAR. The highest PAR appeared in rainy season, which reached $406.6 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ in open field, while the lowest one appeared in fog cool season, which was $236.0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ in open field. In the sites with tall trees, including the Rain Forest Valley, Dipterocarp Garden and Arboretum, the PAR was relatively lower with the effects of solar elevation angle and canopy gap, there was a “jump up” for the PAR in rainy season. Spatially, the PAR appeared to be higher in the sites with tall trees. Temporally, rainy season had a higher PAR than other seasons. The PAR in the sites with tall trees

* 国家自然科学基金项目 (30670395)、中国科学院植物园与生物分类研究项目 (KSCX2-YW-Z-004) 和云南省自然科学基金资助项目 (2004C0053M)。

** 通讯作者 E-mail: yipingz@xtbg.ac.cn

收稿日期: 2009-06-27 接受日期: 2009-09-19

and large shelters was less than 10% of that in open field and the PAR ratio was only 1.6% in the Rain Forest Valley compared with the open field in fog cool season, which was the lowest among all the sites. However, this ratio reached 98.7% in dry hot season in the Tropical Fruits Garden, which had little shading. Generally, the temporal and spatial heterogeneities of PAR existed in different plant sites, which could definitely affect the rhythm of the introduced plant species in Xishuangbanna Tropical Botanical Garden.

Key words ex-situ conservation; photosynthetically active radiation; tropical introduced plant; Xishuangbanna Tropical Botanical Garden

伴随全球气候变化和人类活动加剧, 人类正以前所未有的速度改变着地球的面貌, 使地球上的生物多样性不断减少, 生物多样性正以前所未有的高速度在丧失, 其速度比人类干预以前的自然灭绝速度要快 1000 倍 (Wilson, 1988), 很多物种已经灭绝或面临绝种。使得人类生存的基础正在受到严重威胁, 迫使人们采取多种多样的保护措施, 迁地保护就是其中之一。迁地保护中将进行大量的引种, 为了保障引入物种能够长期生存, 完成生长发育过程, 达到引种保护的目的, 引入物种对其引入地生境的应对策略乃是人们所关注的问题之一。

太阳辐射是植物生长过程中的最重要限制因子之一, 引种植物保护区域的太阳辐射状况深刻影响着引种植物的光合作用、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。但森林植被光合作用利用的仅是波长在 400~700 nm 的光合有效辐射 (PAR)。对于林下环境来说, 光合有效辐射作为主要的生态因子, 不但影响林下植被的更新、生长和分布 (Liefers *et al.*, 1999; Vierling & Wessman, 2000); 而且与林上的光合有效辐射一起制约着林地的边界气候 (Kalthoff *et al.*, 1999; Kossmann *et al.*, 2002)、水汽 (Famiglietti & Wood, 1995) 和 CO_2 (Vesala *et al.*, 2000) 等主要生命物质交换, 并作为净初级生产量模型、气候模型、水文模型、生物地球化学模型等生态模型的关键变量而被重视 (Thomas *et al.*, 2006)。

研究表明, 由于多云天气下散射的光合有效辐射要比晴天下的光合有效辐射大, 植物在多云天气下能更好地吸收 CO_2 (Min, 2005; Johnson & Smith, 2006)。Alton 等 (2007) 通过对 *Manaus* 热带阔叶林的散射光增加条件下的光能利用率变化的研究表明, 光能利用率较天空晴朗时高 30%~36%; 关德

新等 (2004) 对长白山红松林冠层透射率进行了研究, 认为林冠结构对于透射辐射有重要影响; 袁凤辉等 (2008) 通过对长白山红松林林内的光合有效辐射观测资料的分析, 认为在生长季林下的光合有效辐射具有较大的空间变异性。

在西双版纳地区, 张一平等 (2001) 曾对西双版纳热带次生林林窗区域的光照强度和日照时间进行了研究, 并分析了西双版纳热带季节雨林太阳辐射特征和热力特征 (张一平等, 2004, 2005), 以及热带季节雨林的太阳辐射分配特征 (窦军霞等, 2006)。但是, 对于不同森林类型的光合有效辐射的研究仍显不足, 特别是针对引种植物不同定植区光合有效辐射研究更少, 这对于引种植物的栽培的有效管理十分不利。

中国科学院西双版纳热带植物园作为热带植物保存和热带植物迁地保护的大本营, 承担着热带植物的收集和热带珍稀濒危植物的保护任务, 从 20 世纪 60 年代开始就进行了热带、亚热带植物物种的引种、收集和保存, 特别是近年来热带植物引种、收集、保存工作更是大规模开展, 现在已有 1 万余种热带植物引种、栽培在西双版纳植物园, 其中有许多是生存在林下的植物。其中, 早期引种栽培的乔木现已长成高大树木, 形成了郁闭的群落。由于热带森林是具有多层结构, 适合于引种植物需要环境也是各不相同, 要使引种植物能良好地生长, 必须给与引种植物以适宜的生长环境, 这就需要对不同定植区的小气候环境开展研究。但是, 在西双版纳热带植物园对于各引种植物定植区的小气候特征, 特别是与植物生长息息相关的光合有效辐射的观测、研究尚不充分。

本文利用热带引种植物主要定植区近地层不同季节的光合有效辐射的实际观测资料, 分析了西双版纳植物园主要定植区近地层的光合有效辐射特征及其变化规律, 以期对热带植物的引种栽培和迁地

保护提供支持。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

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一年中有雾凉季(11月—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,年雾日数可达 186.4 d。在雾凉季月平均雾日数超过 23.0 d 最多 1 月可达 26.1 d 一般 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 23:00 之后才开始起雾,而翌日 10:00 左右就逐渐消散。

1.2 研究方法

本研究选择了 4 个引种植物主要定植区,在近地层进行了小气候观测。旷地对照选择了中国科学院西双版纳热带雨林生态系统研究站的勐仑气象站资料。各观测点位置如图 1 所示。

样地 1 设置在定植栽培、保存有多种珍稀濒危植物的沟谷林中,该样地保存有部分原始热带雨林,森林结构为多层多种的沟谷雨林,观测点附近的主要乔木为上层:绒毛番龙眼(*Pometia tomentosa*)、千果榄仁(*Terminalia myriocarpa*)和缅漆(*Shorea reticulata*)等;中层:白颜树(*Gironniera subaequalis*)、玉蕊(*Barringtonia macrostachya*)和核实(*Drypetes indica*)等;下层:金钩花(*Pseuduvaria indochinensis*)和小叶藤黄(*Carcinia cava*)等;灌木层:细罗伞(*Ardisia tenera*)和染木(*Saprosma ternatum*)等。树木高度约在 35 m。

样地 2 设置在定植栽培、保存有热带典型植物龙脑香科植物的龙脑香林,观测点附近的主要乔木为望天树(*Parashorea chinensis*)、版纳青梅(*Vatica guangxiensis*)、羯布罗香(*Dipterocarpus tuninatus*)、锡兰龙脑香(*D. zeylanicus*)和海南坡垒(*Hopea hainanensis*)等。树高约 25 m,北侧较空旷。

样地 3 设置在为定植栽培有多种引种植物的树木园,观测点距离路约 20~25 m,乔灌木郁闭度较高,西南侧有个林窗,附近的主要乔木为千果榄仁、腊肠树(*Cassia fistula*)、粘叶豆(*Schizolobium excelsum*)、盾柱木(*Peltophorum fernugineum*)和雨树(*Samanea saman*)等。植株株高约 20~30 m,下垫面是枯枝落叶层,有少量幼苗。

样地 4 设置在定植栽培多种经济植物的百果园,观测点距离路约 15~20 m,乔灌木郁闭度低,光线容易直射或斜射到地面,附近的主要乔木为蛋黄果(*Luama nervosa*)、荔枝(*Litchi chinensis*)和阳桃(*Averrhoa carambola*)等。株高约 3~5 m,下垫面是草坪。

由图 2 可见,树木园的叶面积指数最大(5.01),而百果园的最小(1.73)。

1.3 观测方法

对于 4 个引种植物主要定植区的观测,均采用小气候自动观测系统(CAMPBELL 公司,美国),其中光合有效辐射观测采用 LI-190SB 光合有效辐射仪(LI-COR 公司,美国),树木园由于仪器故障,导致干热季缺测。观测频率为 0.5 Hz 观测数据由系统处理,输出 30 min 平均值。观测仪器设置在地

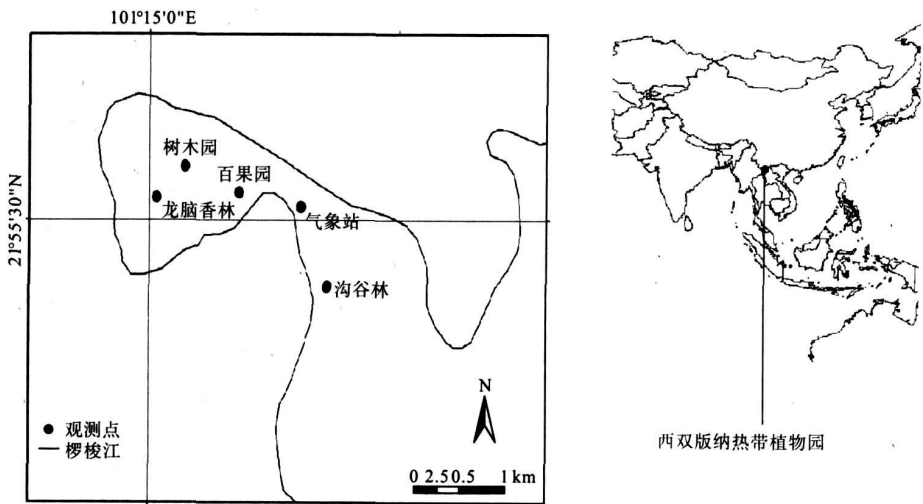


图 1 各引种植物定植区观测点和旷地(气象站)位置示意图

Fig 1 Position of the introduced plant sites and the open field (weather station)

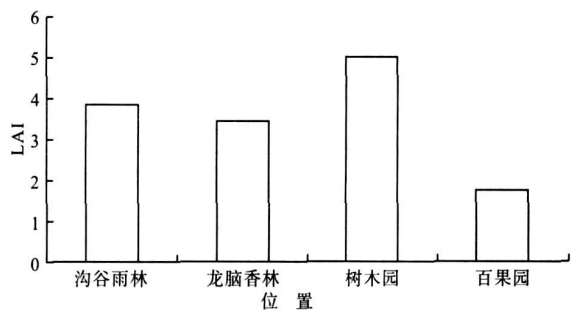


图 2 各引种植物定植区的叶面积指数
Fig 2 Leaf area index of the introduced plant sites

面, 观测高度为 1.5 m。
观测时间为 2008 年 8 月 14—25 日 (雨季)、2008 年 12 月 23—29 日 (雾凉季)、2009 年 3 月 22 日—4 月 5 日 (干热季)。观测采用北京时间, 比地方时间提前 1 小时 13 分。

叶面积指数使用 LAI-2000 (LFCOR 公司, 美国), 在 2008 年 8 月测定。观测高度为 1.0 m, 在每个种植区里分别选取东、南、西、北、中 5 个点各测 5 个值, 最后取其平均值为该种植区叶面积指数。

各引种植物定植区近地层的光合有效辐射与旷地 (气象站) 的光合有效辐射差异分析, 采用引种植物定植区近地层与旷地的光合有效辐射的比值来进行。

1.4 数据处理

首先, 根据 3 个不同季节仪器采集的光合有效辐射数据, 针对不同种植园区, 对其进行多天不同时刻平均, 得到每个季节的光合有效辐射日变化格局 (图 3 和图 4); 然后, 根据仪器采集的光合有效辐射 30 min 平均值 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 乘以 1800 s 得到 30 min 光合有效辐射总量, 再把 1 d 的 30 min 总量加和, 得到光合有效辐射日总量 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), 不同种植园区算得该数值后, 参考其叶面积指数进行比较分析 (表 1); 同时, 各种植区的该数值也与旷地的光合有效辐射日总量相比, 得到百分比后再进行比较 (图 5), 以说明其关系大小。

表 1 不同季节各引种植物定植区和旷地的光合有效辐射日总量 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

季节	沟谷林	龙脑香林	树木园	百果园	旷地
雨季	21.98	32.24	22.04	311.97	406.60
雾凉季	3.69	7.62	13.06	130.62	236.00
干热季	15.95	24.02	-	261.54	264.98

2 结果与分析

2.1 光合有效辐射日变化特征

由图 3 可见, 在西双版纳热带植物园, 不同季节的光合有效辐射均呈现相似的单峰型变化, 最大值均出现在中午时分 (14:00), 雨季为 $1581.2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 雾凉季为 $868.7 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 干热季为 $974.4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 雨季的数值较大; 雾凉季的数值较小。

从不同季节各引种植物定植区近地层的光合有效辐射的日变化 (图 4) 来看, 各引种植物定植区由于群落类型不同, 导致森林结构具有较大差异, 影响了到达地面的光合有效辐射的数值; 比较图 3 和图 4 可见, 各引种植物定植区近地层的光合有效辐射的数值均低于旷地; 且日变化规律受季节的影响较大。雨季在太阳高度角较高的中午, 太阳辐射可以穿过树冠层的林隙, 使得中午时分, 光合有效辐射均出现“突跃”现象; 这与张一平等 (2001, 2004, 2005) 对热带季节雨林和次生林林窗以及林内太阳辐射的研究结果相似。在雾凉季, 各定植地近地层的光合有效辐射的数值较低; 沟谷林的数值最小。干热季, 由于受地方气候的影响, 树木出现集中换叶, 导致林冠较为稀疏, 太阳辐射可以更多地透过树木冠层到达地面, 使得近地层的光合有效辐射的日变化较明显, 总体上数值较大。从图 4 还可看出, 树木遮蔽较小的百果园, 各季节的近地层的光合有效辐射日变化趋近于旷地, 数值均较大, 但其最大值出现时刻与旷地有一定差异。

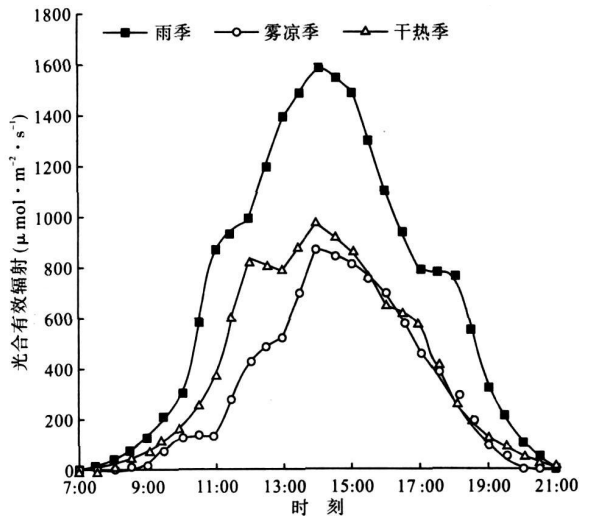


图 3 旷地不同季节的光合有效辐射日变化
Fig 3 Diurnal variation of PAR in different seasons in the open field

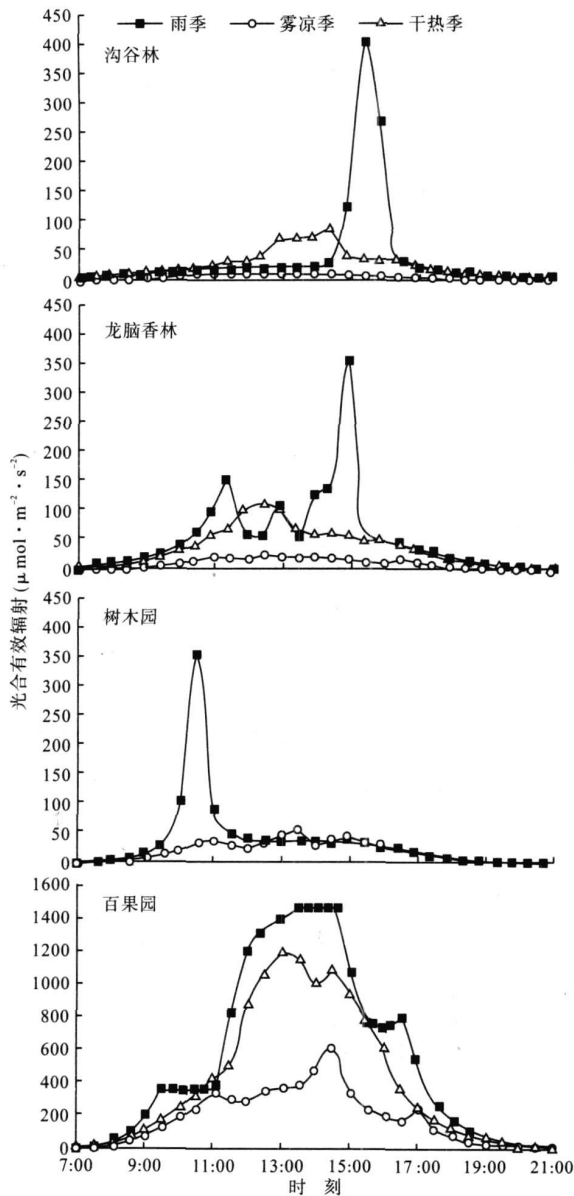


图 4 各引种植物定植区近地层不同季节的光合有效辐射日变化

Fig 4 Diurnal variation of PAR in different seasons in each introduced plant site

2.2 光合有效辐射日总量特征

从表 1 可见, 旷地光合有效辐射数值最高, 各引种植物定植区近地层的光合有效辐射日总量则呈现百果园最大, 沟谷林、龙脑香林、树木园较小。不同季节中, 雨季近地层的光合有效辐射最强, 在旷地日总量可达 $406.60 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 而在遮蔽较小的百果园日总量为 $311.97 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 其他遮蔽较大的定植区近地层光合有效辐射日总量在 $21.98 \sim 32.24 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 但雾凉季近地层光合有效辐射最弱, 在旷地的日总量也仅有 236.0

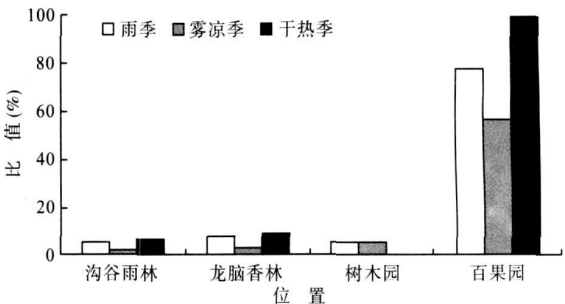


图 5 各引种植物定植区近地层光合有效辐射与旷地的比值
Fig 5 PAR ratio of each introduced plant site compared with the open field

$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 百果园仅为 $130.62 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 其他遮蔽较大的定植区近地层的光合有效辐射日总量数值很小 ($139.39 \sim 493.83 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。

2.3 各引种植物定植区近地层光合有效辐射与旷地的比较

由图 5 可见, 不同的定植区, 近地层的光合有效辐射与旷地的比值具有较大差异。具有高大树木、遮蔽较大的沟谷林、龙脑香林和树木园比值均较小, 而仅有低矮树木、遮蔽较小的百果园的比值较大; 其中, 沟谷林仅为旷地的 $1.6\% \sim 6.0\%$; 龙脑香林为旷地的 $3.2\% \sim 9.1\%$; 树木园为旷地的 $5.4\% \sim 5.5\%$; 百果园为旷地的 $55.3\% \sim 98.7\%$ 。各引种植物定植区近地层光合有效辐射的比值均是干热季 > 雨季 > 雾凉季。

3 讨论

西双版纳热带植物园光合有效辐射具有明显的季节变化 (图 3 表 1) 其光合有效辐射特征呈现雨季较大, 雾凉季较小的分布特征。因此, 可以认为: 在雨季较强光合有效辐射, 可以提供充分的光资源, 有利于植物的生长; 而处于干旱少雨的雾凉季, 较小的光合有效辐射, 降低了植物的光合作用, 从一定方面增强了引种植物应对干旱的能力。

从各引种植物定植区近地层的光合有效辐射分布日变化特征来看 (图 4), 近地层光合有效辐射受到定植区植物群落结构特征影响较大, 在栽培有高大乔木, 并已经形成密闭群落的定植区 (沟谷林、龙脑香林和树木园), 近地层光合有效辐射特征已经具有了与热带季节雨林和次生林林内、林窗相似的分布特征 (张一平等, 2001, 2004, 2005; 窦军霞等, 2006), 数值较小; 在中午时分, 受太阳高度和林冠

林隙等的影响, 近地层的光合有效辐射会出现“突跃”现象。而在仅有低矮树木的百果园, 近地层的光合有效辐射与旷地有较多相似性, 数值较高, 仅仅在早晚受到树木遮挡, 使得近地层的光合有效辐射降低。在树木集中换叶的干热季, 各引种植物定植区近地层的光合有效辐射的数值均有增加。

各引种植物定植区不同季节近地层的光合有效辐射日总量同样具有显著差异 (表 1), 具有高大树木的沟谷林、龙脑香林和树木园, 光合有效辐射的日总量均较小, 特别是雾凉季数值更小, 其中沟谷林的光合有效辐射日总量仅为 $3.69 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。但是, 遮蔽较小的百果园, 近地层的光合有效辐射值均较大, 在干热季, 其数值几乎与旷地相当。这充分显示, 在西双版纳热带植物园, 经过多年的种植, 引种植物形成的植物群落近地层已经具有与原生森林植被相近的光合有效辐射特征。从一个侧面反映了在西双版纳热带植物园进行热带植物保存以及热带植物迁地保护是可行的; 另外, 从近地层的光合有效辐射特征来看, 西双版纳热带植物园引种植物构成的森林植物群落已经满足引种或迁地保护林下植物对光合有效辐射的需要。

通过比较各引种植物定植区近地层的光合有效辐射与旷地的差异 (图 5), 可以看出, 在栽培有高大树木, 并且树木结构密闭较好的沟谷林、龙脑香林和树木园, 近地层光合有效辐射日总量不足旷地的 10%, 特别是具有多层植物结构的沟谷林, 近地层光合有效辐射占旷地的 6.0% 以下, 其中, 雾凉季仅为 1.6%。百果园近地层的光合有效辐射与旷地的差异较小, 其中干热季的光合有效辐射基本上与旷地相当 (98.7%)。由于各引种植物定植区近地层的光合有效辐射与旷地的差异具有明显的季节变化 (图 5), 势必对引种植物, 特别是栽种在林下的引种植物的光合作用产生影响。

从以上的分析可以看出: 在西双版纳热带植物园, 不同的定植区, 近地层光合有效辐射的数值和变化特征均具有差异, 因此在管理目前引种栽培的 1 万余种热带植物, 以及进行迁地植物保护时, 对于栽培生存在林下的热带引种植物, 应该充分考虑引种植物所需要适当的环境, 包括光环境, 尽量在栽培地选择与热带森林的多层多种结构相似的光环境, 以利于热带引种或迁地保护植物的良好生长, 达到有效保护的目的。

通过分析, 得出以下结果: 1) 西双版纳热带植

物园区域的光合有效辐射具有明显的日变化和季节差异, 雨季最强, 旷地的光合有效辐射日总量可达 $406.6 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 雾凉季最弱, 旷地光合有效辐射日总量为 $236.0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。2) 在不同的引种植物定植区, 近地层光合有效辐射具有明显的日变化和季节差异; 由于受高大树木遮蔽的影响, 在沟谷林、龙脑香林和树木园, 近地层的光合有效辐射数值较低; 但是太阳高度角变化以及林冠林隙的影响, 在雨季光合有效辐射会出现“突跃”现象。3) 由于树木结构和遮蔽状况的不同, 各引种植物定植区近地层光合有效辐射的数值也不同, 存在地域差异和季节差异。在具有高大树木、遮蔽较大的定植区, 近地层光合有效辐射的数值较小; 而遮蔽较小的定植区, 情况则反之。近地层光合有效辐射的季节差异与旷地相似, 雨季较大, 雾凉季较小。4) 旷地相比, 在具有高大树木、遮蔽较大的定植区, 近地层光合有效辐射与旷地的比值较小, 不足旷地的 10%, 其中在具有多层多种森林群落结构的沟谷林, 其最小比值 (雾凉季) 仅为 1.6%; 而遮蔽较小的定植区比值较大 (> 55%) 在干热季其数值甚至与旷地相当, 比值高达 98.7%。

致谢 中国科学院西双版纳热带雨林生态系统研究站, 提供了气象站的相关数据; 宋富强、谭正洪、高富、张明达、姚玉刚、张会宁、李志恒、高进波等参加了野外观测; 中国科学院西双版纳热带植物园景观生态组李红梅女士制作了观测点位置图, 在此一并表示感谢。

参考文献

- 窦军霞, 张一平, 赵双菊, 等. 2006 西双版纳热带季节雨林辐射垂直分布特征. 北京林业大学学报, 28(2): 15-21.
- 关德新, 金明淑, 徐 浩. 2004 长白山阔叶红松林冠层透射率的定点观测研究. 林业科学, 40(1): 31-35.
- 袁凤辉, 关德新, 吴家兵, 等. 2008 长白山红松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.
- 张一平, 窦军霞, 刘玉洪, 等. 2004 热带季节雨林林窗辐射特征研究. 应用生态学报, 15(6): 929-934.
- 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.
- 张一平, 王进欣, 刘玉洪, 等. 2001 西双版纳不同季节热带次生林林窗光照时空分布特征. 南京林业大学学报, 25(1): 13-17.

- light on canopy light use efficiency, gross photosynthetic product and net ecosystem exchange in three forest biomes. *Global Change Biology*, **13**: 1–12.
- Famiglietti JS, Wood EF. 1995. Effects of spatial variability and scale on areally averaged evapotranspiration. *Water Resources Research*, **31**: 699–712.
- Johnson DM, Smith WK. 2006. Low clouds and cloud immersion enhance photosynthesis in understory species of a southern Appalachian spruce-fir forest (USA). *American Journal of Botany*, **93**: 1625–1632.
- Kalthoff N, Fiedler F, Kohler M, *et al*. 1999. Analysis of energy balance components as a function of orography and land use and comparison of results with the distribution of variables influencing local climate. *Theoretical and Applied Climatology*, **62**: 65–84.
- Kossmann M, Stumán AP, Zawar-Reza P, *et al*. 2002. Analysis of the wind field and heat budget in an alpine lake basin during summertime fair weather conditions. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **81**: 27–52.
- Lieffers VJ, Messier C, Stadt KJ, *et al*. 1999. Predicting and managing light in the understory of boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*, **29**: 796–811.
- Münch G. 2005. Impacts of aerosols and clouds on forest-atmosphere carbon exchange. *Journal of Geophysical Research*, **110**: D06203. 1–D06203. 12.
- Thomas V, Finch DA, McCaughey JH, *et al*. 2006. Spatial modeling of the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by a boreal mixedwood forest using a lidar-hyperspectral approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, **140**: 287–307.
- Vesala T, Mäkelä T, Palva L, *et al*. 2000. Effect of variations of PAR on CO₂ 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.
- Wilson EO. 1988. Biodiversity. Washington DC: National Academic Press.

作者简介 张一平,男,1957年8月生,博士,研究员。主要从事生态气候研究。E-mail: yipingzhang@xtbg.ac.cn
责任编辑 王伟
