

西双版纳望天树林林窗小气候特征研究^{*}

刘文杰 李庆军 张光明 施济普 白坤甲

(中国科学院西双版纳热带植物园热带雨林生态站, 云南勐腊 666303)

摘 要 对西双版纳望天树林林窗小气候要素的季节变化、水平差异进行了观测研究, 并对比分析了两个大小不同林窗内温度垂直分布状况、相对湿度差别。结果表明: 大林窗内温度、湿度、光照的日变化均比林内大; 大林窗中央光照强度为林内的 10 倍以上, 太阳总辐射量、净辐射量为林内的 5 倍以上; 大林窗中央的蒸发耗热量大于林内, 且均占各自净辐射的较大比例(70%~ 80%); 干季大林窗内温度、湿度日变化比雨季剧烈; 大林窗内具有两个加热层(幼苗冠层、地表), 小林窗仅有一个加热层(幼树冠层), 且前者的加热强度大于后者, 相对湿度日变化则是大林窗内较剧烈。

关键词 望天树林 林窗 小气候特征 西双版纳

M ICROCL MATIC CHARACTERISTICS OF CANOPY GAPS IN SHOREA CH IN ENS IS FOREST IN X ISHUANGBANNA

L IU Wen-Jie L IQ ing-Jun ZHANG Guang-M ing SH I Ji-Pu and BA I Kun-Jia

(X ishuangbanna T ropical B otanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, M eng la, Yunnan 666303)

Abstract Seasonal and horizontal variation in microclimatic elements in closed forest and canopy gaps of two different sizes (200m^2 and 140m^2) were studied within a *Shorea chinensis* dominated tropical rainforest in Xishuangbanna. The following variables were measured: gross radiation, net radiation, light intensity, components of thermal balance, air relative humidity, vertical air temperature gradient, maximum and minimum air temperature, ground surface and leaf surface temperature. Variation of air, ground surface and leaf surface temperatures, air relative humidity and light intensity was greater in the large gap than in closed forest. Under dry season clear sky conditions both gross and net radiation in the center of the large gap were at least five times higher than in the closed forest, and light intensity was at least ten times higher. Variation in air temperature and relative humidity in the large gap was also higher in the dry than in the rainy season. In the large gap center and in the closed forest about 70%~ 80% of the net radiation was used for evaporation. In the large gap there were two heating layers—the seedling canopy and ground surface, while in the small gap only one heating layer was apparent—the canopy of young trees. Heating intensity was also greater in the large gap. Diurnal variation in relative humidity was greater in the large gap than in the small gap.

Key words *Shorea chinensis*, Canopy gaps, Microclimatic characteristics, Xishuangbanna

林窗作为一种森林干扰(Forest disturbance)的因素(Whimore, 1978), 是在 80 年代以后才普遍受到重视的。林窗干扰(Canopy gap disturbance)是推动植被演替和更新的重要动力, 因此, 干扰体系(Disturbance regime)和植物对干扰的反应是植被动态研究的重要内容(夏冰等, 1997)。林窗形成后, 林窗内的物理特征及辐射状况的改变, 极大地促进

了林窗内幼苗幼树的生长, 而植物的生长又不停地改变着林窗内的微环境(Canham, 1988)。林窗内的小气候随着林窗形状、面积、纬度及位置的变化而表现出不同的特点。其中, 小林窗的方位角极大地影响着林窗内的光照水平, N-S 向的光照水平大于 E-W 向, 中午太阳光可直射 N-S 向林窗北缘林冠上而达不到地面(Lertzman & Krebs, 1991)。随着林窗面积

^{*} 收稿日期: 1999-06-30 修订日期: 1999-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(39700019)资助项目

唐建维先生给予了很大帮助, 张云飞同志参加了观测工作, 谨此致谢。

的增大, 太阳辐射强度和时间增加, 相应地, 空气和土壤温度也升高, 湿度则降低 (Freitas & Enright, 1995; Brokaw, 1985; Runkle, 1985; Chazdon & Fetcher, 1984; Pearcy, 1987)。从纬度变化来看, 热带森林林窗形成初期的最大光照强度高于温带林窗形成初期, 且林窗中心的光强最大, 边缘减弱 (Poulson & Platt, 1989)。对面积相同的林窗, 长形林窗的日照率小于圆形 (Ash-ton, 1992; Veblen, 1992)。我国在林窗研究方面起步较晚, 且多是针对林窗内物种变化方面的研究, 林窗小气候方面研究较少。

西双版纳望天树林以龙脑香科植物望天树 (*Shorea chinensis*) 为上层优势树种, 属于热带北缘季节雨林群落。其性质与特点不同于中国热带北缘地区的各种热带山地雨林, 是一种最接近湿润雨林的季雨林。由于地处具有山原地貌和季风气候特点的热带北缘, 该群落受到了季节干旱和冬季一定低温的影响 (朱华, 1992; 1993)。本文对西双版纳望天树林林窗小气候要素的季节变化进行了观测研究, 比较了林窗中央至林内小气候要素的水平差异, 并对比分析了两个大小不同林窗内的温度垂直分布状况、相对湿度差别, 为深入研究热带雨林树种更新与小气候的关系提供参考。

1 样地自然环境与群落结构特征

观测样地在西双版纳勐腊县东南部 15 km 处的补蚌望天树林内 (21°29'N, 101°34'E), 海拔 750 m, 属北热带西南季风气候。一年中有干季 (雾凉季 11~2 月和干热季 3~4 月) 和雨季之分 (张克映, 1963)。与世界热带雨林分布的主要地区相比, 本区纬度偏北、海拔偏高、气候偏干, 表现为热量偏低、年和日温差偏大、降雨偏少和降雨季节变化明显。年均温 21.1 °C, 相对湿度 87%, 年均风速 0.5 m·s⁻¹。年降雨量 1500~1600 mm, 主要分布在雨季 (占 83%), 干季仅占 17%, 但干季多大雾、重露 (热带雨林覆盖区几乎天天出现), 部分弥补了降雨的不足。

群落上层优势种为望天树 (高 40~60 m), 中层树种主要有小叶藤黄 (*Garcinia cowa*)、番龙眼 (*Pometia tentosa*)、大叶白颜树 (*Gironniera subaequalis*) 等 (高 18~30 m), 下层主要树种有三桠果 (*Baccaurea ramiflora*)、假海桐 (*Pittosporopsis kerri*) (高 6~20 m) 等。其中林冠不连续的望天树可高出下层林冠 20~30 m, 成为超冠层树 (Emergent)。群落结构特征详见文献 (朱华, 1992;

1993)。

所选的两个林窗近似圆形, 冠空隙 (Canopy gap) (臧润国, 1998; 臧润国等, 1998) 面积分别约 200 m²、140 m², 所在地坡向均为 SE, 坡度约 10°; 位置为坡中部, 两林窗相距约 1 km。大林窗内多为望天树幼苗, 幼苗分布较稀疏, 其冠层不连续, 冠层高 1 m。对照小林窗内也以望天树幼树居多, 但混有其它幼树, 幼树冠层较连续, 冠层高约 2~3 m。大林窗的形成时间较小林窗约晚半年。

2 研究方法

在大林窗内自林窗中央至林内 (42 m) 每 6 m 间距布设一套 TR-71 型自记温湿度计 (日本 TAND 株式会社生产) (距地面高 1.5 m), 测定空气温湿度的水平变化, 同时在各水平测点测定地表温度、1.5 m 高处照度 (用照度计 (德国 GOSSEN 公司生产), 自林窗中央至林内移动观测)、冠层顶部叶表面温度 (用 COM-PAC3 型红外辐射温度计 (日本 Minolta 株式会社生产) 移动观测, 每测点测定 10 张叶片取平均值); 在大林窗中央地表、1.5 m 高处和林窗东、西、南、北边缘地表、1.5 m 高处各布设最高及最低温度表, 测定不同方位的极端温度; 在大林窗中央及林内 (相距 35 m) 1.5 m 高处用 TBQ-31 型管状总辐射表、TBB-1 型净辐射表 (锦州 322 研究所生产) 测定总辐射、净辐射, 用热流板 (锦州 322 研究所生产) 测定土壤热通量; 在大林窗中央距地表 1.5 m、3.0 m 高处及林内 0.5 m、2.0 m 高处各布设一套 TR-71 型自记温湿度计, 测定温湿度梯度变化, 用于计算幼苗林冠层及林下的感热、潜热, 计算方法据文献 (翁笃鸣等, 1981)。以上观测选择在 1998 年干季 4 月 10~12 日及雨季 9 月 2~5 日, 均为晴朗少云天气, 人工观测项目频度为每小时 1 次, 自记项目 10 min 采集 1 次。同时, 在干热季 4 月 11 日, 在两个林窗内自地表至幼苗或幼树冠层以上 1 m 每 30 cm 布设一套 TR-71 型自记温湿度计, 测定气温的垂直分布及相对湿度变化, 自记间隔为 10 min。

3 结 果

3.1 大林窗中央至林内小气候要素的水平变化 (以干季为例)

3.1.1 温度和相对湿度

由表 1 可看出, 由于干季 (4 月) 太阳高度角偏南, 林窗北缘日照较长, 因而其地表、空气最高温度均较林窗中央、林内及林窗其它边缘高。其中以林内最低, 林窗南缘次之。值得指出的是, 林窗南缘最高

表 1 干季和雨季大林窗内及林内极端温度、相对湿度比较

Table 1 Comparison of extreme temperature and relative humidity between in large gap and in closed forest in dry season and rainy season

		最大值 Maximum						最小值 Minimum					
		C	N	S	W	E	I	C	N	S	W	E	I
干季 Dry season	空气温度 Ta(°C)	32.3	32.5	32.0	32.2	32.3	27.1	18.2	18.3	18.3	18.3	18.3	18.6
	地表温度 Tg(°C)	40.7	40.9	31.7	34.5	40.7	25.2	17.8	17.9	18.0	17.9	18.0	18.3
	相对湿度 RH(%)	100	100	100	100	100	100	52	54	61	59	54	68
雨季 Rainy season	空气温度 Ta(°C)	29.5	29.4	29.1	29.0	29.3	26.5	20.1	20.2	20.1	20.2	20.2	20.8
	地表温度 Tg(°C)	27.4	27.3	26.3	26.5	27.3	25.7	19.7	19.8	19.7	19.7	19.8	20.3
	相对湿度 RH(%)	97	95	95	96	97	97	64	65	68	66	65	74

C: 林窗中央 Gap center N: 北缘 North side S: 南缘 South side W: 西缘 West side E: 东缘 East side I: 林内 Closed forest
Ta: Air temperature Tg: Ground surface temperature RH: Relative humidity

地表温度低于林窗中央及其它边缘达 4~9 °C, 这是因为林窗南缘受上部林冠遮挡, 昼间没有太阳直接照射之故。水平各测点地表、空气最低温度则是林内最高, 林窗中央最低。其中, 林内因受林冠层对地表长波有效辐射的阻挡作用, 其地表、空气最低温度可比林窗内高 0.3~0.4 °C, 但林窗内各测点差别较小。叶表温度的水平变化与地表温及气温相似, 如图 1 可看出, 由林窗中央至林内 12 m 处, 叶表温已趋于稳定, 14:00 时的林窗中央叶表温比林内的高出 7 °C。

表 1 还可看出, 林窗内各测点及林内的最大相对湿度都达到了 100% (凌晨 4:00 时, 森林被雾所笼罩), 最小相对湿度以林窗中央最低 (52%), 林内最高 (68%)。林窗内各测点相比, 以林窗南缘、西缘较高 (南缘全天、西缘午后无太阳直接照射)。由林窗中央至林内 24 m 处相对湿度趋于稳定, 14:00 时林窗中央相对湿度低于林内 20%。

3.1.2 光照、辐射和热平衡各分量

以林窗中央照度为 100, 则由林窗中央至林内的照度百分率分布具 S 曲线特征 (图 1)。由图 1 可看出, 由林窗至林内相对光强持续降低, 约至林内 36 m 处才趋于稳定。同时, 在林内 36 m 处的光强不及林窗中央的 10%。

图 2 表明, 昼间林内接受的太阳总辐射远远小于林窗中央, 14:00 时前者不及后者的 23%, 林内的全天总辐射量仅为林窗中央的 15%。因而林内的净辐射也远小于林窗中央, 全天的净辐射量前者不及后者的 10%。

由辐射引起的热平衡各分量的昼间变化如表 2 所示。可看出, 8:00 时林窗中央 P (感热) 已为正值 (以湍流形式向上层空气输送热量), 到 14:00 时输送强度达到最大 (58.0 W·m⁻²·min⁻¹), 20:00 时 P 变为负值 (上层空气向下层输送热量); 而林

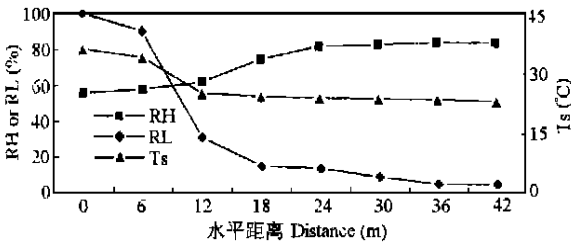


图 1 大林窗内相对湿度(RH)、相对光强(RL)及叶表面温度(Ts)随离开林窗中心的水平距离变化 (1998 年干季 4 月 10 日 14:00)

Fig. 1 Variation of relative humidity (RH), relative light intensity (RL) and leaf surface temperature (Ts) with distance from the large gap center at 14:00 on 10 April,

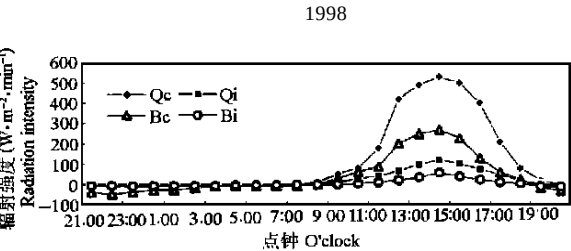


图 2 大林窗中央及林内地上 1.5 m 处总辐射(Q) 净辐射(B) 日进程(干季)

Fig. 2 Variation of gross radiation (Q) and net radiation (B) at 1.5 m above ground in large gap center and in closed forest in dry season
c: 林窗中央 Gap center i: 林内 Closed forest

内 P 值远不及林窗中央的大, 且 10:00~16:00 时均为负值, 即上层空气向下层输送热量, 其最大值仅为林窗中央的 26%。关于 LE (潜热), 8:00 时林窗中央 LE 已成为正值 (蒸发耗热), 直到 20:00 时才转为负值 (凝结露水放热), 而林内 LE 正、负值转化时间却是上午推迟、下午提前, 且林内的 LE 小于林窗中央, 以 14:00 时差别最大 (前者仅为后者的

表2 大林窗中央与林内热平衡各分量的昼间变化(干季4月10日)

Table 2 Variation of the components of thermal balance in large gap center and in closed forest by the daylight on 10 April, 1998

热平衡要素强度($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)		8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
Intensity of components of thermal balance								
林窗中央 Gap center	净辐射 Net radiation (B)	0.0	63.0	206.3	270.1	138.0	29.2	-30.1
	感热 Sensible heat (P)	0.9	15.8	51.8	58.0	28.1	9.8	-7.1
	蒸发潜热 Latent heat of evaporation (L E)	5.1	44.1	144.5	189.1	77.9	28.4	-18.0
	土壤热通量 Heat flux in soil (Qs)	-6.0	3.1	10.0	23.0	32.0	-9.0	-5.0
林内 Closed forest	净辐射 Net radiation (B)	-3.0	7.0	22.0	59.0	28.0	5.0	-14.0
	感热 Sensible heat (P)	0.6	-2.1	-7.2	-15.1	-3.1	2.5	3.1
	蒸发潜热 Latent heat of evaporation (L E)	-0.6	11.1	30.7	72.1	21.8	-2.8	-14.4
	土壤热通量 Heat flux in soil (Qs)	-3.0	-2.0	-1.5	2.0	9.3	5.3	-2.7

38%)。关于 Q_s (土壤热通量), 10:00 时林窗中央 Q_s 转为正值(地面吸收太阳辐射能向下输送热量), 到 18:00 时又转为负值(由地下向地面输送热量); 林内 Q_s 正、负值转化时间却相应推迟, 且其数值也小于林窗中央的 Q_s 值, 其最大值(16:00 时)仅为林窗中央的 29%。

由上述热平衡各分量的昼间变化可看出, 各分量最大值均出现在中午(P 和 L E)或午后(Q_s), 其中蒸发耗热(L E)在林窗中央及林内均占有较大比例, 可占净辐射的 70%~80%。

3.2 大林窗内小气候要素的季节变化

图 3 表明, 干季昼间 10:00~18:00 时, 林窗中央空气温度较地表温度低。15:00 时, 叶表温高出气温 5.1℃, 地表温高出气温 9℃。夜间, 凌晨 3:00 时前, 气温低于地表温但高于叶表温; 3:00 时后, 由于雾的生成(凝结水汽放热及雾层对林窗长波有效辐射的阻挡), 气温、地表温及叶表温均有回升, 但此后又缓慢下降, 到 7:00 时均达到最低(接近 18℃, 以叶表温最低)。雨季日间 5:00~15:00 时, 气温一直高于地表温(最大差值 14:00 时达 3℃), 其它时间则低于地表温; 昼间 10:00~17:00 时, 以叶表温最高(14:00 时可高出气温、地表温分别达 5.3℃、7.2℃), 夜间则以叶表温最低(叶表最低温低于空气及地表最低温分别达 0.7℃、0.3℃)。干季与雨季相比, 干季林窗中央气温、地表温的日较差均比雨季大, 其中以地表温的差别最大。

林窗中央、边缘及林内极端温度的季节变化如表 1 所示, 干季空气、地表极端高温以林窗北缘最高, 雨季则以林窗中央最高; 干季和雨季空气、地表最低温度均以林内的较高, 其中以雨季较突出。

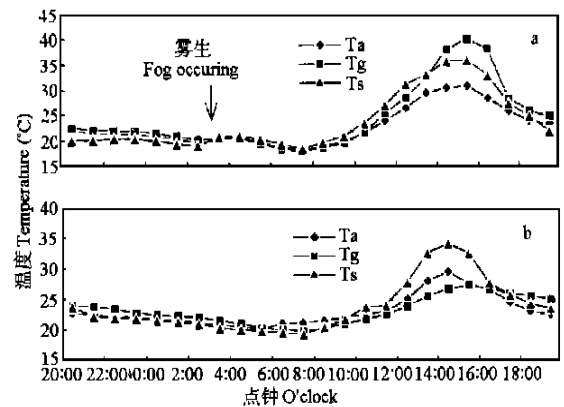


图3 大林窗中央气温(T_a)、地表温(T_g)及叶表温(T_s)日进程
Fig 3 Daily variation of air temperature(T_a), ground surface temperature(T_g) and leaf surface temperature(T_s) at large gap center
a: 干季 Dry season b: 雨季 Rainy season

相对湿度变化如图 4。可看出, 干季林窗中央相对湿度日变化比雨季剧烈, 最大、最小相对湿度分别为 100%、52%, 而雨季分别为 97%、64%。干季夜间有雾生成, 故相对湿度可达 100%。最小相对湿度的

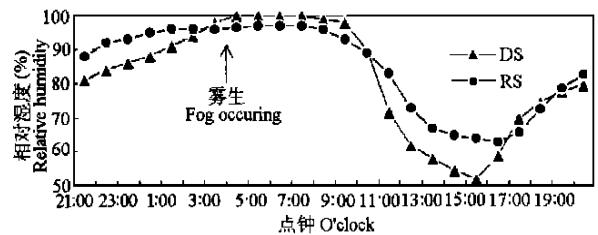


图4 干季(DS)和雨季(RS)大林窗中央地上 1.5 m 处空气相对湿度日进程

Fig 4 Daily variation of air relative humidity at 1.5 m above ground at large gap center in dry season (DS) and rainy season (RS)

水平变化(表 1), 干季和雨季均以林内最高, 其中干季较突出。

3.3 不同林窗内温度的垂直分布及空气相对湿度比较

由图 5 可看出, 大林窗(形成较晚)内昼间有两个加热层(幼苗冠层和地表), 小林窗(形成较早)内却仅有一个加热层(幼树冠层); 大林窗内温度自地面向上首先为绝热分布, 随后为逆温分布, 从幼苗冠层向上又为绝热分布; 小林窗内温度自地面至幼树冠层均为逆温分布, 冠层以上才为绝热分布。这说明, 林窗形成时间不同, 林窗内的温度垂直分布形式也不相同。相对湿度日变化则是大林窗内的较激烈, 大林窗内的相对湿度日较差高于小林窗 6%, 但夜间两者的相对湿度几乎相同(图 6)。

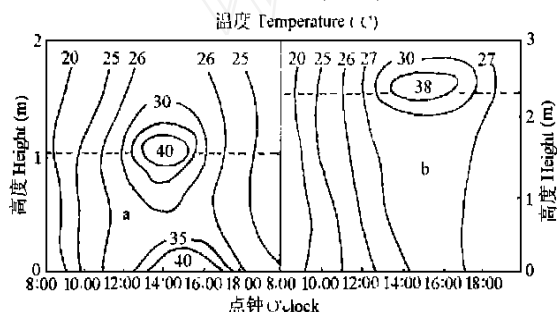


图 5 不同林窗中央空气温度垂直分布日变化
(干季 4 月 11 日)

Fig. 5 Diurnal change of air temperature in different gap center shown as isopleths on height and time coordinates,

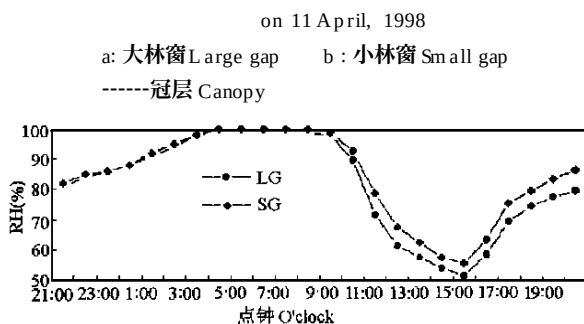


图 6 不同林窗冠层 0.5 m 处空气相对湿度(RH)日变化
(干季 4 月 11 日)

Fig. 6 Diurnal change of air relative humidity (RH) at 0.5 m above canopy in different gap center, on 11 April, 1998

LG: 大林窗 Large gap SG: 小林窗 Small gap

4 结论与讨论

1) 林窗内温度、湿度日变化均较林内大, 干季

林窗内最高气温、最低相对湿度可高于或小于林内分别达 5.2°C (气温)、16% (相对湿度)。林窗中央的光照强度为林内的 10 倍以上, 日太阳总辐射量、净辐射量为林内的 5 倍以上。林窗中央及林内热平衡各分量最大值均出现在中午(P 和 LE) 或午后(Qs), 其中蒸发耗热(LE) 占有净辐射(辐射平衡)的较大比例(70%~80%)。

2) 干季林窗内温、湿度日变化比雨季剧烈, 干季林窗内气温、地表温及相对湿度日较差比林内的相应值分别大 3°C 、 13°C 、15%。干季空气、地表极端温度以林窗北缘最高, 雨季则以林窗中央最高。

3) 昼间, 大林窗(形成晚)内具有两个加热层(幼苗冠层和地面), 小林窗(形成早)只有一个加热层(幼树冠层), 且大林窗内的加热强度大于小林窗, 相对湿度日变化则是大林窗内较剧烈。大林窗内的两个加热层既有利于上层幼苗的生长, 又有利于土壤内其它种子的萌发(因土壤温度较高)。小林窗内的一个加热层在幼树冠层上部有利于幼树生长, 下部则为荫生植物的生长创造了条件, 即: 林窗向高级形式演替发展。

以上结果与 Ashton (1992)、Poulson 和 Platt (1989) 的部分研究结果大致相同。他们的研究表明, 在面积约 200m^2 的林窗中央光照为林下的 9.3~11.7 倍, 林窗中央空气温度、地表温度日变幅比林下高 $5\sim 12^{\circ}\text{C}$, 相对湿度日变幅也是林窗中央的较大。不同的是, 他们没有对林窗及林下热平衡分量、温度垂直分布形式进行观测研究。

林窗导致的林窗内光照增强、土壤及空气温度升高、湿度减小, 对于林窗内幼苗幼树的生长具有极大的促进作用。林窗内幼苗的生长明显高于荫蔽条件下的同类幼苗(Canham, 1988), 林窗内光照的增强对于减少病菌导致的幼苗死亡也具有重要意义(Augspurger, 1988)。又由于林窗中央到林内的光、热、水等环境因子存在着显著而迅速的梯度变化, 使得森林内构成了丰富的生态分异, 进而在很大程度上影响和控制了森林物种多样性的维持和群落的更新过程(奚为民等, 1992)。林窗及林窗内微环境的形成与消亡过程也正是森林不断发育与更新的生态学过程。

因此, 林窗干扰对森林循环起着重要的作用, 而林窗特征(大小、形成年龄、形成原因、形成木等变量)则是研究林窗更新与树种反应的重要参数, 但只有将干扰引起的环境变化规律与不同物种的反应结合起来系统分析, 才能深入认识森林生态系统的长

期动态变化过程

参 考 文 献

- Ashton, P. M. S. 1992 Some measurement of the microclimatic differences within a Sri Lankan tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **59**(2): 217~235
- Augsburger, C. K. 1988 Seedling survival of tropical tree species: interaction of dispersal distance, light-gap and pathogens. *Ecology*, **69**(4): 1705~1712
- Brokaw, N. V. L. 1985 Gap-phase regeneration in a tropical forest. *Ecology*, **66**(4): 682~687
- Canham, C. D. 1988 An index for understory light levels in and around canopy gaps. *Ecology*, **69**(3): 786~795
- Chazdon, R. L. & N. Fetcher. 1984 Photosynthetic light environments in a low land tropical forest in Costa Rica. *Journal of Ecology*, **72**(3): 553~564
- Freitas, C. R. & N. J. Enright. 1995 Microclimatic differences between and within canopy gaps in a temperate rainforest. *International Journal of Biometeorology*, **38**(4): 188~193
- Lertzman, K. P. & C. Krebs. 1991 Gap-phase structure of a subalpine old-growth forest. *Canadian Journal of Forest Research*, **21**(4): 1730~1741
- Pearcy, R. W. 1987 Photosynthetic gas exchange responses of Australian tropical forest trees in canopy, gap and understory micro-environments. *Functional Ecology*, **1**(2): 169~178
- Poulson, T. L. & W. J. Platt. 1989 Gap light regimes influence canopy tree diversity. *Ecology*, **70**(3): 553~555
- Runkle, J. R. 1985 Disturbance regimes in temperate forest. In: Pickett, S. T. A. & P. S. White eds. *The ecology of nature disturbance and dynamics*. Orlando: Academic Press. 17~33
- Veblen, T. T. 1992 The regeneration dynamics and species coexistence. In: Glenn-Lewin, D. C., R. K. Peet & T. T. Veblen eds. *Plant succession: theory and prediction*. London: Chapman & Hall. 165~187
- Weng, D. M. (翁笃鸣), W. L. Chen (陈万隆) & J. C. Shen (沈觉成). 1981. *Microclimate and agriculture microclimate*. Beijing: China Agriculture Press. 69~80 (in Chinese)
- Whimore, T. C. 1978 Gaps in the forest canopy. In: Tomlinson, P. B. & M. H. Zimmermann eds. *Tropical trees—an living system*. New York: Cambridge University Press. 639~655
- Xi, W. M. (奚为民), Z. C. Zhong (钟章成) & R. C. Bi (毕润成). 1992 The study of edge effect of the forest communities in Jinyun Mountain. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica (植物生态学与地植物学学报)*, **17**(3): 232~242 (in Chinese)
- Xia, B. (夏冰), F. Deng (邓飞) & S. A. He (贺善安). 1997. Advances on the forest gap studies. *Journal of Plant Resources and Environment (植物资源与环境)*, **6**(4): 50~57 (in Chinese)
- Zang, R. G. (臧润国). 1998 Research advances of gap regeneration dynamics. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, **17**(2): 50~58 (in Chinese)
- Zang, R. G. (臧润国) & H. C. Xu (徐化成). 1998 Advances in forest gap disturbance research. *Scientia Silvae Sinicae (林业科学)*, **34**(1): 90~98 (in Chinese)
- Zhang, K. Y. (张克映). 1963 An analysis on the characteristics and forming factors of climate in the south part of Yunnan. *Acta Meteorologica Sinica (气象学报)*, **33**(2): 210~230 (in Chinese)
- Zhu, H. (朱华). 1992 Research of community ecology on *Shorea chinensis* forest in Xishuangbanna. *Acta Botanica Yunnanica (云南植物研究)*, **14**(3): 237~258 (in Chinese)
- Zhu, H. (朱华). 1993 A comparative study of phytosociology between *Shorea chinensis* forest of Xishuangbanna and other closer forest types. *Acta Botanica Yunnanica (云南植物研究)*, **15**(1): 34~46 (in Chinese)

责任编辑: 张丽赫