

文章编号:1000-5641(2007)06-0088-09

天童常绿阔叶林林隙的形成特征

姜良才, 刘丽正, 王希华

(华东师范大学 环境科学系, 上海 200062)

摘要: 对天童常绿阔叶林内林隙的形成特征进行了研究, 结果表明: 该地区林隙的线密度为 $17.08 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-1}$, 扩展林隙所占面积比例为 15.42% , 冠空隙所占的比例为 5.46% . 冠空隙的年平均形成频率为 0.287% , 林隙形成的返回间隔期为 348.4 a 左右. 林隙的面积普遍偏小, 扩展林隙面积在 $39.3 \sim 251.2 \text{ m}^2$ 之间, 平均面积为 106.32 m^2 , 冠空隙大小变化在 $11.8 \sim 131.9 \text{ m}^2$ 之间, 平均面积为 37.68 m^2 . 树木枯立、风灾以及对病树的人为择伐是该地区林隙的主要形成方式, 木荷、马尾松、栲树和石栎等乔木层常见种类是其主要形成木. 在山坡上部、中部和下部等不同地形条件下分别以风灾、枯立和择伐为主要方式形成林隙. 调查的 41 个林隙中, 每个林隙的形成木平均拥有量仅为 1.71 株. 形成木径级主要分布在 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 范围内, 平均基径为 28.93 cm .

关键词: 林隙; 林隙形成木; 形成特征; 形成频率; 常绿阔叶林; 天童

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A

Forming Characteristics of Gap in an Evergreen Broad-leaved Forest in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province, Eastern China

JIANGLiang-cai, LIU Li-zheng, WANG Xi-hua

(Department of Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Gap is a common disturbance regime in forest ecosystem. This paper studied their forming characteristics in an evergreen broad-leaved forest in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province. The results showed: the linear gap density in the forest is 17.08 gaps/km , the expanded gaps occupy 15.42% , and canopy gaps occupy 5.46% . The yearly gap forming frequency is 0.287% and the forming rotation is about 348.4 a . The gap size is smaller than other regions, its expanded gaps vary from 39.3 m^2 to 251.2 m^2 and the average size is 106.32 m^2 . Canopy gaps vary from 11.8 m^2 to 131.9 m^2 and the average size is 37.68 m^2 . Standing litter, wind damage and selective lumber are main manners of gaps formation, most of gap-makers are *Schima superba*, *Pinus massoniana*, *Castanopsis fargesii*, *Lithocarpus glaber*, *Lithocarpus harlandii*, and so on. They are all dominant species in tree layer in this region. The types of gap-makers are different at different landforms. The average gap-maker number in each gap is 1.76 , the main distribution range of Base Diameter (BD) of gap-makers is from 20 cm to 40 cm , and their

收稿日期:2006-08

第一作者:姜良才(1981-),男,硕士研究生.

通讯作者:王希华(1964-),男,副教授. E-mail:xhwang@des.ecnu.edu.cn.

average BD is 28.93 cm.

Key words: gap; gap-maker; forming characteristics; forming frequency; evergreen broad-leaved forest; Tiantong National Forest Park

0 引言

对林隙的研究可以增加对群落动态调控机制以及群落更新等生态过程的认识,因此,一直是森林动态学研究的重点.至今,围绕着林隙的基本特征和干扰状况^[1-6]以及更新规律^[7-14]两个方面进行了大量研究.研究表明:林隙的形成特征及干扰状况在不同地区差异显著,而林隙的发育过程是森林生态系统自然更新的重要途径,同时对维持森林生态系统的物种多样性具有重要的作用.

我国是世界上常绿阔叶林的主要分布区.迄今对中亚热带南部、西南部地区以及南亚热带常绿阔叶林的林隙形成特征、干扰状况和更新动态都有了较为全面的研究^[2,6-8,15].但对中亚热带北缘东部沿海的常绿阔叶林林隙研究却鲜有报道.天童国家森林公园距东海咫尺之遥,常绿阔叶林保存完好,对该区植被演替动态已有较为深入的研究^[16,17].在此基础上,本文对该地区林隙的形成特征进行了调查分析,以期进一步认识东部沿海亚热带常绿阔叶林的森林动态循环特征,为森林生态系统经营管理提供理论依据.

1 研究区域概况及研究方法

1.1 自然植被概况

天童国家森林公园位于浙江省宁波市鄞州区东南部,气候为亚热带季风气候,年平均温度 16.2℃,大于 10℃ 的年积温为 5 166.2℃,年平均降雨量 1 374.7 mm. 公园内土壤主要为山地黄红壤,土层厚度一般在 1 m 左右. 公园内亚热带常绿阔叶林植被保存良好,是浙江东部丘陵地区地带性植被类型的代表地段. 详细的自然及植被状况见文献[16].

1.2 野外调查和数据采集

本研究采用 Runkle^[18]关于冠空隙(canopy gap, CG)和扩展林隙(expanded gap, EG)的定义.考虑到天童常绿阔叶林乔木层存在两层,且往往乔木二层的盖度大于乔木一层^[16],故确定扩展林隙的面积时,以离形成木最近的乔木(包括乔木一、二层树木)所围起的范围计算,同样确定冠空隙的面积时,也要考虑乔木二层的遮蔽作用,这样计算的面积将远小于以乔木一层计算的面积,但能更真实地反映林隙在森林中的作用.

本研究对象为近 20 a 以内形成的中、早期林隙,群落类型是以木荷(*Schima superba*)和栲树(*Castanopsis fargesii*)为优势种的常绿阔叶林.采用样线法^[19]在研究区域均匀设置 8 条样线(见图 1),为减少山脊线防火道上人为干扰的影响,样线最高处至少离开山脊线 50 m.沿样线,从出发点始记录海拔高度,当遇到林隙时,测定所在点的海拔高度和坡度,以此估计相邻林隙间的距离和计算样线长度,测量林隙处于调查线路方向上的长度、扩展林隙和冠空隙的长轴与短轴.通过树皮或残桩上的萌生枝条鉴定每株林隙形成木的种类,测量其基径,部分无法判定种类的也做相应记录.在林场有经验的工作人员帮助下,根据形成木或其树桩的腐烂程度结合林场择伐记录及择伐后残桩的腐烂程度推测由枯立或择伐方式形成的林隙年龄,对折干或掘根形成的林隙,可分别根据萌生枝条的年龄或倒丘上更新苗木的年龄

来判断其年龄,有多个形成木的林隙以最先死亡的一株为准^[20,21].对每一个林隙(指 EG)内所有的木本植物进行每木调查,记录种名、高度和胸径(低于 1.5 m 的测量其基径),草本植物和蕨类植物记录种名与盖度.

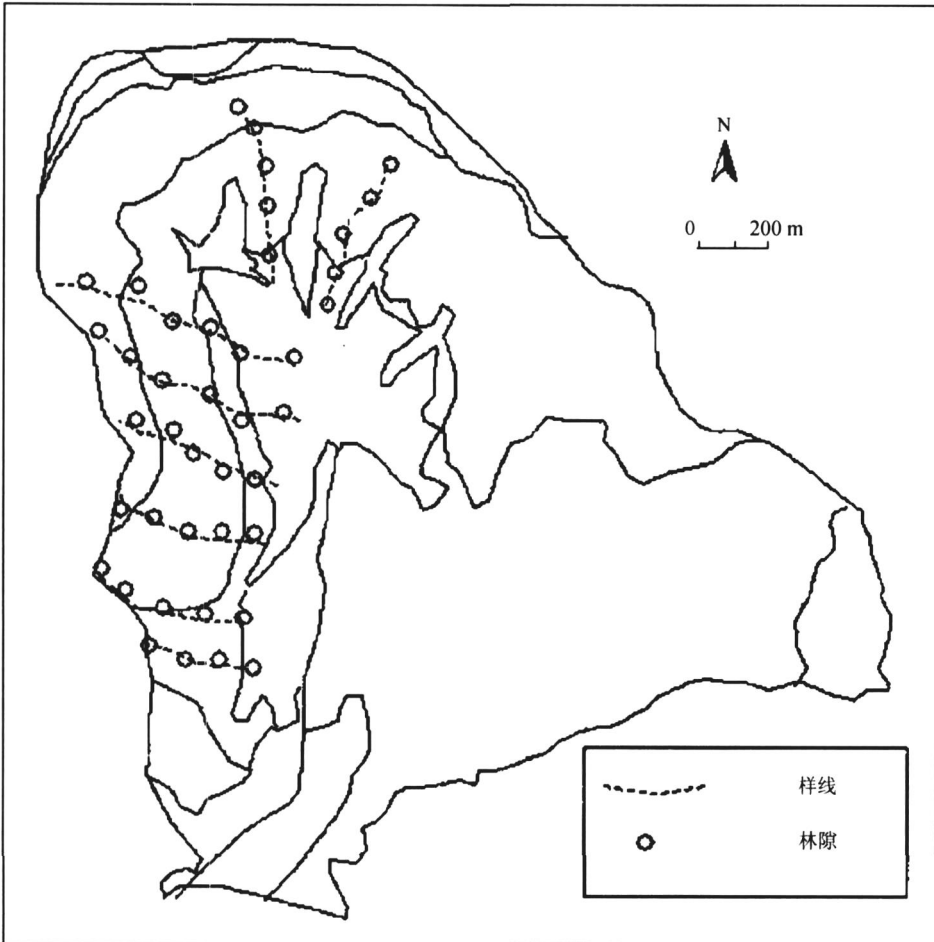


图 1 样线设置和林隙分布图

Fig. 1 The distribution of sample lines and gaps

1.3 数据处理

林隙的景观特征及形成频率:林隙出现在森林景观中的比例用穿过林隙的样线长度与样线总长度之间的比例表示;林隙线密度用林隙个数与样线长度的比值表示;林隙面积在森林景观中的比例以调查的所有林隙面积占有所有调查样带面积之和的比例表示,该处样带可以看作调查样线总长与所有扩展林隙长短轴的平均值组成的矩形.

林隙出现速率表征森林受干扰的频率,用单位面积每年出现的林隙面积来计算,表示为 $\text{m}^2 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,同时还使用单位样线长度上每年出现的林隙内样线长度计算,表示为 $\text{m} \cdot \text{hm}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,林隙内样线长度以扩展林隙长轴和短轴的均值代替.林隙大小及年龄:以椭圆形测算林隙面积,用记录的林隙长轴和短轴代入椭圆公式,分别计算扩展林隙和冠空隙面积.将 41 个林隙的扩展林隙和冠空隙分别以 50 m^2 和 20 m^2 为划分标准(上限排外法),划

分为五个面积等级;按林隙形成木年龄将41个林隙划分为0-5 a,5-10 a,10-15 a和15-20 a四个阶段。

为分析形成木分布与地形的关系,在调查时将整个山坡分为四个坡位,即山坡上部(300-360 m)、山坡中上部(250-300 m)、山坡中部(200-250 m)和山坡下部(0-200 m)。

2 结果与分析

2.1 林隙在常绿阔叶林中的比例及形成频率

2.1.1 林隙所占面积比例

在8条长度共计约2.4 km的样线上共调查到41个林隙,即线密度为 $17.08 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-1}$ 。当以Runkle的样线调查法计算林隙在森林景观中所占的比例时,在2.4 km的样线上,41个林隙的扩展林隙长短轴平均值总和为482.98 m,扩展林隙在整个林隙中所占的比例平均为20.12%,此值可以理解为例线上有20.12%被扩展林隙所占据。这41个林隙的冠空隙的长短轴平均值之和为288.85 m,冠空隙在整个林隙中所占的比例则为12.04%,可以理解为样线上有12.04%被冠空隙占据。

而以“样带法”计算天童常绿阔叶林内林隙在森林景观中所占的比例时,总扩展林隙的面积为 $4\,359.11 \text{ m}^2$,总冠空隙面积为 $1\,544.88 \text{ m}^2$,所有扩展林隙长、短轴的平均值为11.78 m,样线总长度为2 400 m,因此可以得到,扩展林隙在天童常绿阔叶林森林景观的比例为15.42%,冠空隙所占的比例为5.46%。

2.1.2 林隙的形成频率

在41个林隙中,形成时间最早的约20 a,最晚的为当年。因此天童常绿阔叶林中林隙的形成频率为 $0.899 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,即在天童常绿阔叶林内每千米的样线上每年形成0.899个林隙。以扩展林隙面积计算则为 $81.2 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。同理,以冠空隙计算为 $28.7 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,也就是说,平均每年约有0.812%的森林面积转变为扩展林隙,约有0.287%的森林面积转变为冠空隙。以冠空隙的转变速率计算,天童常绿阔叶林林隙形成的返回间隔期为348.4 a。

2.2 林隙大小结构

天童常绿阔叶林林隙大小及分布如表1,在调查到的41个林隙中扩展林隙最小面积为 39.3 m^2 ,最大的为 251.2 m^2 ,冠空隙的最小值和最大值分别为 11.8 m^2 和 131.9 m^2 。从林隙数量在各面积等级中的分布来看,分布很不均匀,以 $50 \sim 100 \text{ m}^2$ 和 $100 \sim 150 \text{ m}^2$ 的数量占优势, $>200 \text{ m}^2$ 的林隙数量最少。每株形成木造成的林隙面积仅为 60.54 m^2 ,冠空隙为 21.46 m^2 。

表1 天童常绿阔叶林林隙面积等级分布

Tab. 1 The distribution of gap sizes in Tiantong evergreen broad-leaved forest

面积/ m^2	<50 (<20)	50~100 (20~40)	100~150 (40~60)	150~200 (40~60)	>200 (>80)	总计	平均值
总面积/ m^2	176.63 (136.59)	1 248.94 (578.55)	1 946.02 (247.28)	516.53 (332.84)	471.00 (249.63)	4 359.11 (1 544.80)	106.32 (37.68)
林隙数量/个	4(8)	16(21)	16(5)	3(5)	2(2)	41	-

注:括号内为冠空隙各参数。

2.3 林隙的年龄结构

林隙年龄是反映林隙特征的重要参数。在被调查的41个林隙中,以5 a为龄级统计不同龄

级内的林隙数(图 2). 结果显示, 0-5 a 以及 5-10 a 形成的林隙数较多, 而 15-20 a 时间段内形成的林隙较少. 这说明天童常绿阔叶林在近 10 a 所受的林内干扰的频率比先前增加.

2.4 林隙的形成方式

在天童常绿阔叶林内, 常见的林隙形成方式有枯立、择伐、掘根风倒、折干、大枝折断以及上述几种方式的组合方式. 所调查到的 41 个林隙的具体形成方式见表 2. 结果显示, 以枯立方式形成的林隙比例最大, 其单独方式形成的林隙个数百分比和面积百分比分别高达 36.59% 和 39.81%. 此外, 另有 13 个林隙的形成与枯立有关, 合计比例更是高达 68.30% 和 67.10%. 折干和掘根风倒等现象是由于树木受到强烈风灾造成的. 在天童常绿阔叶林内, 这种方式形成的林隙也占有相当的比例, 总计个数百分比和面积百分比分别为 24.39% 和 26.24%. 再次是择伐导致林隙形成, 此方式单独形成的林隙个数百分比和面积百分比分别占了 17.07% 和 17.88%, 但另有 9 个林隙的形成与其有关.

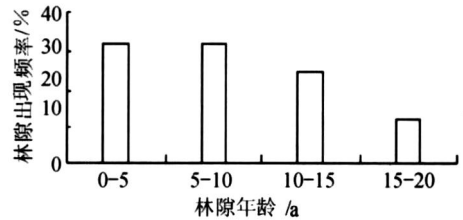


图 2 林隙的年龄结构

Fig. 2 Age structure of gaps

表 2 林隙的形成方式

Tab. 2 The manners of gaps formation

形成方式	个数	个数百分比/%	面积/m ²	面积百分比/%
枯立	15	36.59	1 806.0	39.81
择伐	7	17.07	811.1	17.88
择伐 + 枯立	9	21.95	729.2	16.07
折干	5	12.19	637.6	14.05
折干 + 枯立	2	4.88	289.4	6.38
掘根风倒 + 枯立	2	4.88	219.6	4.84
大枝折断	1	2.44	44.0	0.97
合计	41	100	4 536.9	100

2.5 形成木特征

天童常绿阔叶林内每个林隙最多有 4 株形成木(图 3), 绝大多数仅有 1~2 株形成木, 合计比例为 85.37%. 41 个林隙共调查到 70 株形成木, 因此, 每个林隙形成木的平均拥有量仅为 1.71 株.

将调查到的 41 个林隙中出现的 70 株形成木, 按种类统计它们在风灾(包括折干、掘根风倒和大枝折断三种类型)、枯立和择伐三种方式下的个体数, 以及在不同地形下的分布状况, 结果见表 3. 可以看出, 林隙形成木的种类主要有木荷、马尾松、栲树、石栎和长叶石栎等, 且以木荷最多, 栲树、石栎和长叶石栎也占较大比例. 其中木荷和马尾松主要分布在山坡的中部和下部, 栲树和石栎主要发生在山坡中部和中上部, 长叶石栎则多在山坡上部. 在本研究区域的木荷-栲树群丛 (*Schimetor Castanopsietum fargesii* Association) 中, 由山脚下到山坡上部, 依次分布着以木荷和马尾松为优势种的含苦槠的亚群丛 (*Schimetor Castanopsietum castanopsietosum sclerophyllae* Subass.)、以栲树、木荷、石栎为

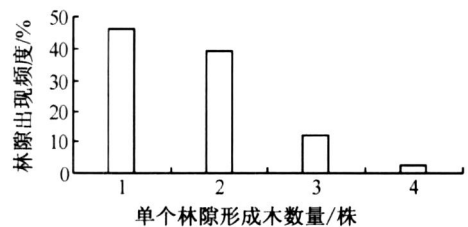


图 3 林隙形成木数量及林隙出现频率

Fig. 3 Number of gap-makers and the frequency of gaps

优势种的典型亚群丛 (*Schimetor Castanopsietum typicum* Subass.) 以及以小叶青冈和云山青冈等为优势种的含杨梅叶蚊母树的亚群丛 (*Schimetor Castanopsietum distylietosum* Subass.), 到最高的山脊线附近则分布着长叶石栎-云山青冈群丛 (*Lithocarpus Cyclobalanopsietum nubii* Association)^[16]. 这种群落类型上的更替体现在群落中优势种的变化上, 而形成木的种类则主要是群落内乔木层的优势种类. 因此, 森林植被类型的分布决定了林隙形成木种类分布状况.

表 3 林隙形成木的种类组成及分布

Tab. 3 The species of gap-makers and their distribution

种名	形成方式	坡上部	坡中上部	坡中部	坡下部	平均基径/cm	合计	百分比/%
木荷	WD *	-	-	2	-	35.00		
<i>Schima superba</i>	WD *	-	-	11	1	25.42	25	35.71
	SL *	-	-	1	10	20.09		
马尾松	WD	1	-	-	-	35.00	15	21.43
<i>Pinus massoniana</i>	SL	-	-	6	8	40.00		
栲树	WD	1	-	-	-	28.00		
<i>Castanopsis fargesii</i>	WD	-	3	4	-	26.43	8	11.43
石栎	WD	-	1	-	-	20.00	7	10.00
<i>Lithocarpus glaber</i>	WD	-	-	6	-	30.00		
长叶石栎	WD	3	-	-	-	30.33		
<i>Lithocarpus harlandii</i>	WD	1	-	-	-	30.00	4	5.71
苦槠 <i>Castanopsis sclerophylla</i>	WD	-	-	-	1	9.00	1	1.43
其他(含未能鉴定种)	WD	2	1	-	-	30.67		
Else species	WD	1	2	4	-	28.43	10	14.29
合计 Total	-	9	7	34	20	-	70	100.00

注: WD * = 风灾 (Wind Damage); WD = 枯立 (Wilt Stand); SL = 择伐 (Selective Lumber)

结果还显示, 各树种形成木在形成方式上还具有一定的空间规律性. 如风灾主要发生在山坡上部, 该处风力强劲, 坡度一般在 30° 以上, 土层薄, 土壤含水量较低, 易造成分布于该处的长叶石栎等形成折干、折枝和风倒等形式的林隙. 枯立主要发生在山坡的中部, 可能是该处的生境条件由中下坡位的潮湿、肥沃转变为上坡位的风大, 土壤干旱贫瘠, 再加上种间竞争激烈等造成的结果, 但具体原因有待于进一步的研究. 山坡下部坡度较小, 一般在 10° 左右, 且离人类居住地较近, 分布着木荷和马尾松等演替前期的树种. 近年来, 由于马尾松的松材线虫病爆发, 很多径级较大的马尾松死亡, 林场对这些死亡的马尾松进行了择伐清理, 再加上附近村民对少量木荷盗伐以用作木料, 因此, 择伐形成的林隙在坡下部最为常见.

此外, 调查到的 70 株形成木的径级分布范围较宽 (见表 4), 在 9 ~ 70 cm 之间, 并且呈明显的单峰分布, 即主要集中在 20 ~ 30 cm 和 30 ~ 40 cm 范围内, 合计占总株数的 65.71%. 不同径级区间内, 各类形成木分布差异较大, 但总体上, 乔木层树木在径级达到 15 cm 以上时才以风灾、择伐和枯立等方式形成林隙, 径级在 20 ~ 40 cm 时形成林隙的可能性最大, 径级较小的树木的折干或枯立多是由大形成木风倒、折干或择伐时的砸压所引起的. 因此这些小径级的形成木出现在多形成木林隙内, 与大径级的形成木共同形成林隙或几株径级较小的形成木由于择伐原因共同形成林隙. 径级结构中大于 40 cm 的大树较少, 且主要是生病死亡后遭砍伐的马尾松. 所有形成木的平均基径为 28.93 cm.

表4 形成木的径级结构

Tab. 4 The distribution of BD (Base Diameter) structure of gap-makers

种名	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~50 cm	50~60 cm	60~70 cm
木荷	-	4	16	2	3	-	-
马尾松	-	-	2	4	7	1	1
栲树	-	1	4	3	-	-	-
石栎	-	1	1	4	1	-	-
长叶石栎	-	-	2	2	-	-	-
苦槠	1	-	-	-	-	-	-
其他	-	2	1	5	2	-	-
合计	1	8	26	20	13	1	1
百分比/%	1.43	11.43	37.14	28.57	18.57	1.43	1.43

注:各物种的拉丁学名同表3.

3 讨 论

3.1 林隙的形成频率

天童常绿阔叶林内林隙形成的线密度为 $17.08 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-1}$, 扩展林隙和冠空隙所占的比例分别为 15.42% 和 5.46%, 林隙形成的返回间隔期约为 348.4 a, 该值小于长白山暗针叶林的林隙形成返回间隔期 416.7 a 和长白山阔叶红松林的 667 a^[1,22], 但大于闽中山地林隙形成的返回间隔期 180 a^[6], 更大于海南岛热带山地雨林 160 a 的林隙形成返回间隔期^[23]. 这些研究结果都表明随着纬度的增加, 林隙形成的返回间隔期也有着增大的趋势, 原因可能与森林树木的生长速度和更新速度随纬度的增加逐渐变慢有关.

3.2 林隙特征及形成木成因

天童常绿阔叶林内林隙的面积偏小, 冠空隙平均面积仅为 37.68 m^2 , 远小于南部闽中山地的平均林隙面积 200 m^2 ^[6], 也小于同纬度西南地区的缙云山林隙面积^[2], 这可能与各地林隙形成木数量有关, 天童常绿阔叶林内每一林隙的平均形成木只有 1.71 株, 而闽中山地天然林则以 2~4 株居多, 缙云山林隙内平均形成木数量为 2.88 株. 此外, 还与各地林隙的形成方式有关. 由于掘根风倒和折干等方式形成的林隙面积要比枯立方式的大, 因此, 枯立为林隙主要形成方式的现象也是天童常绿阔叶林内林隙面积偏小的原因.

天童常绿阔叶林内林隙形成的方式多样, 其中以树木因生境因素导致的生长状况不良造成的枯立比例最大; 其次是风灾干扰导致的掘根风倒、折干和折枝等; 而该地区人为清理马尾松病树以及村民对木荷等少量的盗伐也是林隙形成的因素之一. 人为清理的马尾松和木荷属于群落演替的先锋树种^[16], 这将有利于加速森林的循环过程. 在长白山暗针叶林和阔叶红松林以及地处南亚热带的广东黑石顶常绿阔叶林、西南地区的缙云山常绿阔叶林中, 林隙形成方式均以掘根风倒、折干和枯立木为主^[1,2,15,23]. 这与天童地区的林隙形成方式有较大的不同.

此外, 天童林隙形成木所受干扰方式与地形因素有关. 在山坡上部、中部和下部, 主要的干扰方式分别为风灾、枯立和择伐. 各地形因素的生境条件差异可能是产生这些现象的主要原因, 如山坡中、上部, 风力强劲, 坡度很大, 因此风灾情况较多. 山坡中部多是不同类型群落的更替区, 常生长着两种群落类型的优势种, 彼此间竞争激烈, 再加上该处多是不同生境条件的过渡区, 这些可能是造成此坡位以枯立方式为主形成林隙的主要原因. 山脚下人类活动

较频繁,再加上松类病害和林场的择伐管理,择伐方式比例较大.即地形因素造成了形成木种类以及林隙形成方式上的差异,该结果也验证了本区微地形因素对植被物种组成和林隙结构的影响^[24].

天童林隙形成木的径级呈明显的单峰分布,而其它地区的林隙形成木既有单峰分布,如长白山暗针叶林形成木径级主要分布在10~30 cm之间,缙云山和茂兰喀斯特森林则分别在20~50 cm和10~30 cm之间^[1,2,5];也有波动较小的双峰型分布,如卧龙保护区暗针叶林形成木径级主要在20~50 cm及60 cm以上的范围内^[4].即使同为单峰型分布,径级的主要分布区间差别也较大.已有研究表明,该地区木荷、石栎和长叶石栎三个物种的种群年龄结构中径级在20 cm以上的个体数明显下降^[25],这可能是这些种类在该径级上成为形成木的机会较大的原因之一.栲树和马尾松分别在20 cm以上的大径级处出现个体数的小峰^[25],表明天童常绿阔叶林中径级较大的栲树和马尾松分布较多,这可能也是它们在该处成为形成木比例较高的原因.总之,形成木的径级分布差异可能受多因素的影响,如树种种类、林龄和所受的干扰方式等,但具体影响因素还需进一步研究.

本研究是对天童常绿阔叶林林隙干扰状况和一般特征的探讨分析,对于该地区林隙的更新动态规律还需进一步的研究,以增进对森林循环动态变化规律的认识.

[参 考 文 献]

- [1] 杨修.长白山暗针叶林林隙一般特征及干扰状况[J].生态学报,2002,22(11):1 825-1 831.
- [2] 王周平,李旭光,石胜友,等.缙云山森林林隙形成特征的研究[J].西南师范大学学报(自然科学版),2000,25(3):305-309.
- [3] 杨娟,刘丽娟,葛剑平,等.卧龙自然保护区林隙干扰特征[J].植物生态学报,2004,28(5):723-726.
- [4] 王微,陶建平,李宗峰,等.卧龙自然保护区亚高山暗针叶林林隙特征研究[J].应用生态学报,2004,15(11):1 989-1 993.
- [5] 龙翠玲,余世孝,魏鲁明,等.茂兰喀斯特森林干扰状况与林隙特征[J].林业科学,2005,41(4):13-19.
- [6] 陈碧华,洪伟,叶功富.闽中山地天然林林隙动态及自然干扰特征[J].福建林学院学报,2005,25(2):107-111.
- [7] 王周平,李旭光,石胜友,等.重庆缙云山针阔混交林林隙树木更替规律研究[J].植物生态学报,2001,25(4):399-404.
- [8] 闫淑君,洪伟,吴承祯.福建万木林中亚热带常绿阔叶林林隙更新研究[J].林业科学,2004,40(6):25-31.
- [9] 龙翠玲,余世孝,熊志斌,等.茂兰喀斯特森林林隙的植物多样性与更新[J].生物多样性,2005,13(1):43-50.
- [10] 臧润国,余世孝,刘静艳,等.海南霸王岭热带山地雨林林隙更新规律的研究[J].生态学报,1999,19(2):151-158.
- [11] 臧润国,杨彦承,林瑞昌,等.海南霸王岭热带山地雨林森林循环与群落特征研究[J].林业科学,2003,39(5):1-9.
- [12] 臧润国,蒋有绪,余世孝.海南霸王岭热带山地雨林森林循环与树种多样性动态[J].生态学报,2002,20(1):24-32.
- [13] 陶建平,臧润国.海南霸王岭热带山地雨林林隙幼苗库动态规律研究[J].林业科学,2004,40(3):33-38.
- [14] 罗大庆,郭泉水,薛会英,等.西藏色季拉山冷杉原始林林隙更新研究[J].林业科学研究,2002,15(5):564-569.
- [15] 刘静艳,王伯荪,臧润国.南亚热带常绿阔叶林林隙形成方式及其特征的研究[J].应用生态学报,1999,10(4):385-388.
- [16] 宋永昌,王祥荣.浙江天童国家森林公园的植物区系[M].上海:上海科学技术出版社,1995:1-3,11-15,114-142.
- [17] 丁彦彦.常绿阔叶林演替系列比较生态学[M].开封:河南大学出版社,1999.
- [18] RUN KLEJ R. Gap regeneration in some old-growth forest of the eastern united states[J]. Eco,1981,62(4):1 041-1 051.
- [19] RUN KLEJ R. Comparison of methods for determining fraction of land area in treefall gaps[J]. For Sci,1985,31:15-19.
- [20] HENRY J D, SWAN M A. Reconstructing forest history from live and dead plant material ——an approach to the

study of forest succession in southwest New Hampshire[J]. *Eco*,1974,55(4):772-783.

- [21] D YNESIUS M, JONSSON B G. Dating uprooted trees: comparison and application of eight methods in a boreal forest[J]. *Can J For Res*,1991,21:655-665.
- [22] 吴刚. 长白山落叶红松阔叶林林冠空隙特征的研究[J]. *应用生态学报*,1997,8(4):360-364.
- [23] 臧润国,杨承彦,刘静艳,等. 海南岛热带山地雨林林隙及其自然干扰特征[J]. *林业科学*,1999,35(1):2-8.
- [24] 杨永川,达良俊,由文辉. 浙江天童国家森林公园微地形与植被结构的关系[J]. *生态学报*,2005,25(11):2 830-2 840.
- [25] 达良俊,杨永川,宋永昌. 浙江天童国家森林公园常绿阔叶林主要组成种的种群结构及更新类型[J]. *植物生态学报*,2004,28(3):376-384.

(上接第 68 页)

- [7] SAKKAS V A, ARABATZIS I M, KONSTANTINO I K, et al. Metolachlor photocatalytic degradation using TiO₂ photocatalysts [J]. *Appl Catal B: Environ*,2004,49: 195-205.
- [8] ARABATZIS I M, STERGIOPOULOS T, ANDREEVA D, et al. Characterization and photocatalytic activity of Au/ TiO₂ thin films for azo-dye degradation [J]. *J Catal*,2003,220:127-135.
- [9] LI J, LIL, ZHENG L, et al. Photoelectrocatalytic degradation of rhodamine B using Ti/ TiO₂ electrode prepared by laser calcination method [J]. *Electrochimica Acta*,2006,51:4 942-4 949.
- [10] KONSTANTINO I K, ALBANIS, T A. TiO₂ assisted photocatalytic degradation of azo dyes in aqueous solution kinetic and mechanistic investigations A review [J]. *Appl Catal B: Environ*,2004,49:1-14.
- [11] COLON G, HIDALGO M C, NAVIO J A, Photocatalytic deactivation of commercial TiO₂ samples during simultaneous photoreduction of Cr() and photooxidation of salicylic acid [J]. *J Photochem Photobiol A: Chem*,2001,138:79-85.
- [12] ZHANG T Y, OYAMA T, HORIKOSHI S, et al. Photocatalytic decomposition of the sodium dodecylbenzene sulfonate surfactant in aqueous titania suspensions exposed to highly concentrated solar radiation and effects of additives [J]. *Appl Catal B: Environ*,2003,42:13-24.
- [13] KONSTANTINO I K, SAKELLARIDES T M, SAKKAS V A, et al. Photocatalytic degradation of selected s-triazine herbicides and organophosphorus insecticides over aqueous TiO₂ suspensions [J]. *Environ Sci Technol*,2001,35:398-405.
- [14] DIECKMAN M S, GRAY K A. A comparison of the degradation of 4-nitrophenol via direct and sensitized photocatalysis in TiO₂ slurries [J]. *Water Res*,1996,30:1 169-1 183.
- [15] MARTYANOV I N, KLABUNDE K J. Comparative study of TiO₂ particles in powder form and as a thin nanostructured film on quartz [J]. *J Catal*,2004,225:408-416.
- [16] EMMANUEL T, ANTHONY E G C, BRIAN O, et al. Immobilisation and bioelectrochemistry of proteins on nanoporous TiO₂ and ZnO films[J]. *J Electroanal Chem*,2001,517:20-27.