

天童常绿阔叶林林窗的地形分布格局*

张志国^{1,2} 马遵平^{1,2} 刘何铭^{1,2} 郑泽梅^{1,2} 谢玉彬^{1,2} 方晓峰^{1,2} 王希华^{1,2**}

(¹ 华东师范大学环境科学系, 上海 200241; ² 浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站, 浙江宁波 315114)

摘要 为探究多维地形因素对林窗分布的影响,以天童 20 hm² 常绿阔叶林动态监测样地内的林窗为对象,结合地理信息系统软件,分析了林窗空隙率、林窗密度以及林窗面积在海拔、坡度、坡向、坡形、坡位 5 种地形因子下的分布格局。结果表明:该样地林窗空隙率为 13.1%,林窗密度为 9.5 个·hm⁻²,林窗平均面积为 137.82 m²;因高海拔台风干扰的强度较大,高海拔段(≥500 m)林窗的空隙率和密度显著大于中低海拔段(<500 m);台风带来的强降雨极易引起小范围滑坡,使得沟谷的林窗空隙率和密度显著大于侧坡,林窗平均面积显著大于侧坡和山脊。台风及其带来的强降雨是造成林窗在海拔及坡位梯度上具有显著性差异的主要原因。

关键词 常绿阔叶林 林窗空隙率 林窗密度 林窗平均面积

文章编号 1001-9332(2013)03-0621-05 中图分类号 S718 文献标识码 A

Topographic distribution patterns of forest gap within an evergreen broad-leaved forest in Tiantong region of Zhejiang Province, Eastern China. ZHANG Zhi-guo^{1,2}, MA Zun-ping^{1,2}, LIU He-ming^{1,2}, ZHENG Ze-mei^{1,2}, XIE Yu-bin^{1,2}, FANG Xiao-feng^{1,2}, WANG Xi-hua^{1,2} (¹Department of Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; ²Tiantong National Station of Forest Ecosystem, Chinese National Ecosystem Observation and Research Network, Ningbo 315114, Zhejiang, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2013 24(3): 621-625.

Abstract: To explore the effects of multi-dimensional topographic factors on forest gap distribution, the forest gaps in a 20 hm² dynamic monitoring plot of an evergreen broad-leaved forest in Tiantong region of Zhejiang were taken as the objects to study the distribution patterns of the gap fraction, gap density, and gap area under the effects of altitude, slope degree, slope shape, slope aspect, and slope position by using a geographic information system (GIS) software. In the plot, the gap fraction was 13.1%, gap density was 9.5 ind·hm⁻², and average gap area was 137.82 m². Because of the greater intensity of typhoon disturbance at high altitudes, the gap fraction and gap density at the high altitude (≥500 m) sections were significantly larger than those at the medium and low altitude (<500 m) sections. The heavy precipitation produced by typhoon could easily cause small scale landslide, and thus, lead to the gap fraction and gap density being larger in valley area than in side-slope and ridge. It was suggested that typhoon and its produced heavy precipitation could be the main causes of the significant differences in the forest gaps along the gradients of altitude and slope position.

Key words: evergreen broad-leaved forest; gap fraction; gap density; average gap area.

林窗是森林内普遍存在和经常发生的重要干扰之一,对维持森林群落的物种共存与生物多样性具有重要意义^[1]。作为森林群落结构的一部分,林窗的分布是多次干扰事件的综合结果^[2]。它不仅随时间推移而发生变化^[3],而且也存在空间差异,具有一定的地形格局特征^[4]。有研究表明,高海拔、陡坡、

凹坡以及沟谷更易形成林窗^[5-7],但林窗在坡向梯度上的分布格局则有较大差异。例如,在辽东山区的针阔混交林中^[8],北坡由于温度低且积雪保持时间长,林窗面积更大;而在亚热带北缘的三峡大老岭常绿阔叶混交林,不同坡向上林窗的分布格局并无明显差异^[9]。另外,在北美温带云冷杉林^[5],低海拔地区因混生阔叶树的倒伏形成的林窗面积更大,而山脊大部分处在高海拔区域,自然干扰强度加剧,增大了林窗形成的几率。由此可见,不同森林植被类型中林窗的

* 国家自然科学基金重大国际合作项目(31210103920)资助。

** 通讯作者。E-mail: xhwang@des.ecnu.edu.cn

2012-05-30 收稿, 2012-12-22 接受。

地形分布格局的空间变化规律各异^[10].

常绿阔叶林是我国亚热带地区分布最广泛的森林植被类型之一^[11]. 在我国东部沿海低山丘陵地带发育的亚热带常绿阔叶林,为了应对台风和偶发的雪灾等自然干扰,加之沟、脊相间的复杂地貌条件,形成了独特的林窗格局,对揭示该区域森林植被动态及维持物种多样性具有重要意义.但一直以来这方面的研究鲜见报道.为此,本文以天童 20 hm² 常绿阔叶林动态监测样地调查数据为依托,采用地理信息系统软件,分析了多维地形因素下林窗的空隙率、密度和面积的分布格局及其主控因素,以期研究群落物种共存与多样性的维持机制提供依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

天童国家森林公园位于浙江省宁波市鄞州区东南部.该地区属亚热带季风气候,年均降雨量 1374.7 mm,年均温 16.2 °C,≥10 °C 年积温 5166.2 °C.天童 20 hm² 样地位于该森林公园的核心保护区(29°48.696'—29°48.938' N,121°46.953'—121°47.278' E),距东海直线距离约 10 km.台风和强降雨常导致天童地区树木折干、掘根^[12],是浙江东部沿海地区的主要自然灾害之一^[13].调查样地东西长 500 m、南北宽 400 m(图 1),海拔为 304.26~602.89 m,凹凸度为-0.44~0.48,坡度为 13.81°~50.28°;地势总体呈北高南低,包含较大的山脊和沟谷各两条,南北向纵贯样地,地形复杂.植被为常绿阔叶林,内有胸径≥1 cm 的木本植物 152 种 94603 株,隶属 51 科 94 属,其优势科为樟科、壳斗科和山茶科^[14].

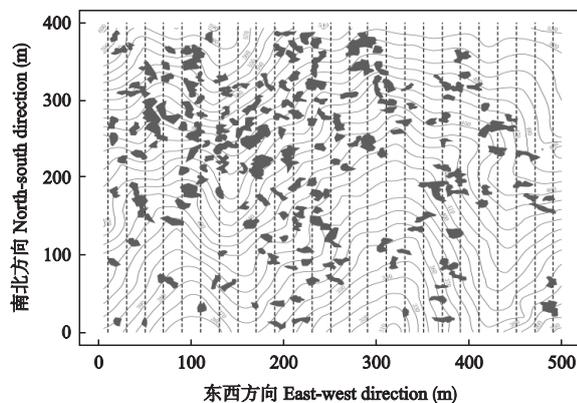


图 1 样线设置和林窗分布

Fig. 1 Sample lines and gap positions.

图中虚线为调查样线,灰色阴影部分为林窗,曲线为等高线. Dashed lines, gray shapes and curved lines represented sample lines, gaps and contours, respectively.

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及林窗调查 用全站仪将整个 20 hm² 样地划分成 500 个 20 m×20 m 的样方.以样地西南角为原点,东西向为横轴(x),南北向为纵轴(y),测量出每个 20 m 节点的高程值.对每个样方内所有胸径(DBH)≥1 cm 的木本植物挂牌,调查每株植物的种类、胸径、坐标、样方编号和植物生长状况等^[14].

在已建成的 20 hm² 样地上进行林窗调查^[15].以 45 m² 作为定义林窗的最小面积^[16].考虑到天童常绿阔叶林存在两层乔木层,且乔木二层的盖度往往大于乔木一层^[17],故在确定林窗时,乔木一、二层树木均作为边界木处理.在样地内沿每个 20 m×20 m 样方的中心线按南北方向均匀设置 25 条样线(图 1 中虚线),沿着样线调查出现的林窗(图 1 中不规则多边形),记录每个林窗的边界木编号、林窗所在的坡位(如林窗跨越两种坡位,则以其主体面积所在的坡位为准)、林窗形成木(DBH>10 cm)的数量和状态(包括掘根、干基折断、干中折断和枯立 4 类),其中干中折断指折断高度在距离树基 1.3 m 以上,包括树冠折断和大枝折断.由于样地东北角部分样方的乔木层处于非连续状态,无法准确界定林窗的边界,因此本次调查未包括东北角的 41 个 20 m×20 m 样方.

1.2.2 林窗特征参数 本研究涉及的林窗特征参数包括:1) 林窗面积,为林窗的边界木围成多边形的面积;2) 林窗空隙率,指林窗面积占样地面积的百分比,指示林窗干扰的强度^[18];3) 林窗密度,指单位样地面积(1 hm²)的林窗数量,反映林窗的形成和周转速度^[19];4) 林窗平均面积,为取样林窗面积的平均值.

1.2.3 地形因子数据 选取海拔、坡度、坡向、坡形和坡位 5 个地形因子来评价林窗的地形分布格局.利用 ArcGIS 9.3 软件计算每个 5 m×5 m 样方的海拔、坡向、坡度及凸度值.计算方法为:根据样地每个 20 m×20 m 样方节点的高程数据,应用线性内插法建立数字高程模型(DEM),分辨率为 5 m.海拔高程数据直接从 DEM 中获取,坡度、坡向和凸度值利用 DEM 数据在 Arc/Info 的 3D Analyst 中生成.海拔、凸度、坡度的计算方法详见谢玉彬等^[20]的研究方法.样方的坡位采用实地调查,沿坡位梯度由低到高,分为沟谷、侧坡、山脊 3 类坡位,分别用 1、2、3 表示.

利用 ArcGIS 9.3 根据每个林窗的边界木坐标计算出林窗面积. 林窗的海拔、坡度、坡向及凸度值为林窗中心点对应 5 m×5 m 样方的相应地形因子数值.

1.2.4 地形因子分级 不同地形因子对林窗影响的尺度特征不同^[19]. 对计算出的海拔、坡度、坡向、坡形进行分级量化: 海拔分为低海拔 (<400 m)、中海拔 (400~500 m) 和高海拔 (≥500 m) 3 个高程段; 坡度分为缓坡 (≤35°) 和陡坡 (>35°) 两类; 坡向分为东 (67.5—112.5°)、东南 (112.5—157.5°)、南 (157.5—202.5°)、西南 (202.5—247.5°) 和西 (247.5—292.5°) 5 个方向 (以正北记为 0°); 坡形分为凹坡 (凸度 ≤ -0.15)、平坡 (-0.15 ~ 0.15) 和凸坡 (凸度 ≥ 0.15) 3 类.

1.3 数据处理

按不同地形因子对林窗空隙率和林窗密度进行单因素方差分析 (海拔、坡度、坡向、坡形、坡位均按 25 条样线分组计算). 对不同地形因子的林窗面积进行 Kruskal-Wallis 秩和检验, 具有显著性差异的再进行 Dunnett T3 多重比较检验. 利用 Spearman 秩相关分析地形因子与林窗形成木的相关性. 以上检验与分析均利用 SPSS 18.0 软件完成, 显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$.

2 结果与分析

2.1 天童常绿阔叶林林窗面积、数量和形成木特征

在天童常绿阔叶林动态监测样地共调查到 174 个林窗, 总面积为 23980.87 m², 样地林窗空隙率为 13.1%, 林窗密度为 9.5 个·hm⁻². 林窗最大面积为 664.04 m²、最小面积为 46.18 m². 其中面积在 45~300 m² 之间的林窗占林窗总面积的 80.1%、林窗总数的 94.2%. 掘根倒木、干中折断木、干基折断木和枯立木分别占林窗形成木总数的 33.5%、28.5%、7.0% 和 31.0%.

2.2 天童常绿阔叶林林窗空隙率和林窗密度的地形分布格局

林窗空隙率与林窗密度在海拔和坡位梯度上有显著差异, 表现为: 高海拔段 (≥500 m) 显著大于中低海拔段 (<500 m), 沟谷显著大于侧坡; 而在坡度、坡形、坡向梯度上均无显著差异 (表 1). 高海拔段和沟谷的林窗空隙率、林窗密度均大于样地平均水平.

2.3 天童常绿阔叶林林窗面积的地形分布格局

Kruskal-Wallis 秩和检验结果表明: 林窗面积仅

在坡位梯度上差异显著, 在海拔、坡向、坡度和坡形梯度上均无显著性差异 (表 2). 沟谷的林窗平均面积显著大于侧坡和山脊, 并大于所有样地林窗的平均面积 (137.82 m²).

2.4 林窗形成木与地形因子的相关性

海拔和坡位与不同类型形成木数量间的相关分析表明: 干中折断木与海拔、枯立木与坡位之间呈极显著正相关, 掘根倒木与坡位之间呈极显著负相关 (表 3). 随海拔梯度升高, 干中折断木数量逐渐增多; 随坡位由沟谷到山脊, 枯立木数量逐渐增多, 掘根倒木数量逐渐减少.

表 1 林窗空隙率、林窗密度沿海拔和坡位梯度的变化
Table 1 Variation in each gap fraction and density along the gradients of altitude and slope position (mean±SE)

地形因子 Topographic factor	样地面积 Gap area (hm ²)	林窗空隙率 Gap fraction (%)	林窗密度 Gap density (ind·hm ⁻²)
海拔 Altitude	低 Low	5.41	7.3±0.3b
	中 Medium	9.77	13.3±0.3b
	高 High	3.18	22.2±0.6a
坡位 Slope position	沟谷 Valley	4.96	22.5±0.8a
	侧坡 Side-slope	9.92	11.2±0.3b
	山脊 Ridge	3.48	4.9±1.7ab

同列不同小写字母表示各梯度间差异显著 ($P < 0.05$). Different low case letters in the same column indicated significant differences at 0.05 level among altitudes and slope positions. 下同 The same below.

表 2 林窗平均面积沿坡位梯度的变化
Table 2 Variation in average gap area along the gradient of slope positions

地形 Topographic	林窗平均面积 Average gap area (m ²)
沟谷 Valley	168.98a
侧坡 Side-slope	119.54b
山脊 Ridge	114.03b

表 3 林窗形成木数量与海拔、坡位的相关系数
Table 3 Correlation coefficients between the number of gap makers with altitude and slope position

形成木 Makers	海拔 Altitude	坡位 Slope position
枯立 Standing death	0.145	0.358**
干中折断 Breakage on trunk	0.404**	0.059
干基折断 Breakage at trunk base	0.025	0.025
掘根 Uprooted	0.135	-0.423**

** $P < 0.01$.

3 讨 论

3.1 常绿阔叶林林窗的基本特征比较

本次调查的林窗平均面积(137.82 m²)和林窗空隙率(13.1%)与先前天童地区常绿阔叶林调查结果(106.32 m²、15.4%)略有差异^[16]。除了林窗一直处于动态变化过程之外,还可能是因为面积的计算方法不同所致。先前的调查是将林窗形状视为椭圆形,根据椭圆面积公式,由林窗长、短轴长度计算其面积^[16]。较之其他地区常绿阔叶林,天童常绿阔叶林林窗的平均面积要远小于哀牢山(268.4 m²)^[21]和万木林(229.7 m²)^[22],其林窗空隙率也比万木林(50.9%)小很多。林窗形成木的大小直接影响着林窗的大小^[4,11]。树木只有达到一定径级并到达林冠层后,才有可能在死亡或受损后形成林窗。因此,林窗形成木的径级和高度与林分的径级和高度直接相关^[23]。树木越高、径级越大、冠幅也越大,树木折干、掘根后所形成的林窗也相应较大。天童常绿阔叶林群落高度一般在15~20 m^[17],调查样地胸径>1 cm的个体平均胸径为5.66 cm^[14],胸径>30 cm的个体仅占胸径≥5 cm个体数的6.8%;而哀牢山样地群落平均胸径为17.4 cm^[24],胸径>30 cm的个体仅占胸径≥5 cm个体数的29.6%^[25];万木林群落高度一般在25~35 m^[26],平均胸径约26 cm^[27]。由于台风是该地区林窗干扰的主要外部驱动力^[13],长期的强风干扰会对群落的垂直结构造成影响^[28],促使乔木的构型趋于灌木化^[29],导致群落高度偏低、径级偏小,所形成的林窗平均面积和空隙率也相对较小。

另外,林窗大小还与林窗形成方式有关^[21]。哀牢山、万木林是以掘根和折干形式为主(前者掘根、折干、枯立分别占形成木的45.0%、35.0%、12.0%,后者为58.0%、33.5%、8.5%),而天童样地枯立木比例(31.0%)明显大于哀牢山和万木林。虽然枯立木形成的林窗面积小于掘根和折干方式,但是天童地区的森林中多数枯立木并非独自形成林窗,68.4%的枯立木与掘根倒木相伴,而枯立木对林窗形成的贡献要小于掘根倒木。因此,树木平均径级较小是天童常绿阔叶林林窗的平均面积和空隙率小于其他常绿阔叶林地区的主要原因。

3.2 林窗的地形分布格局

林窗形成木的类型影响了林窗的大小、数量及发生频率^[21]。形成木的发生除了树木自然死亡外,大多数是由外部干扰引起的。地形条件对自然干扰的广度和强度有再分配的作用,不同类型的形成木

特征在不同的地形条件下会有所差异。在海拔梯度上,调查样地的海拔与干中折断木呈极显著正相关($r = 0.404$),且高海拔段干中折断木密度(25.8株·hm⁻²)明显大于中、低海拔段(8.4和4.3株·hm⁻²)。一般在短时间内聚集的强大外力才会使树干折断。在天童地区,除了台风外,偶发的雪灾也会使大量树木出现折干、折枝等机械损伤^[30],如2008年我国南方发生的冰雪灾害。因为随海拔升高,风雪灾害对森林造成的干扰越大^[8],所以高海拔段林窗的空隙率和密度显著大于中、低海拔段。

在坡位梯度上,调查样地的坡位与掘根倒木数量呈极显著负相关($r = -0.423$),沟谷内掘根倒木密度(27株·hm⁻²)明显大于侧坡和山脊(7.1和4.6株·hm⁻²);坡位还与枯立木数量呈极显著正相关($r = 0.358$),山脊上枯立木密度(15.2株·hm⁻²)明显大于侧坡和沟谷(10.6和9.1株·hm⁻²)。沟谷地段根系土层不稳定,冲刷发生频繁,加之两侧边坡坡度陡,土壤含水量大,树木根系一般较浅^[31],台风带来的强降雨极易造成沟谷内小范围的滑坡^[7],增加了树木掘根倒伏的概率,导致沟谷内林窗的面积和密度偏大。沿坡位梯度升高,林木个体密度随之增大,沟谷、侧坡和山脊分别为4151、9651和15713株·hm⁻²。因此,枯立木数量也沿坡位升高而增大。

地带性植被的林窗特征是特殊干扰体系、复杂地形格局以及林木结构相互作用的产物。因为地形因子通过对外部能量的再分配,调控着干扰的强度和形式,并间接影响着群落的组成和结构^[32],所以,林窗特征及其格局可以从不同地形因子的变化梯度上反映出来。本研究结果较好地反映出了这种规律。

天童森林作为成熟的常绿阔叶林,林窗的形成也受内部因素如个体树木的衰亡、林木间的竞争以及病虫害等的影响。这些因素对林窗形成的贡献如何,有无相应的时空规律等问题,有待进一步研究。

参考文献

- [1] Spies JA, Franklin JF. Gap characteristics and vegetation response in coniferous forests of the patch north-west. *Ecology*, 1989, **70**: 543-545
- [2] Quine CP, Bell PD. Monitoring of windthrow occurrence and progression in spruce forests in British. *Forestry*, 1998, **71**: 87-97
- [3] Quine CP, Humphrey JW, Ferris R. Should the wind disturbance patterns observed in natural forests be mimicked in planted forests in the British uplands? *Forestry*, 1999, **72**: 337-358
- [4] Hubbell SP, Foster RB. *Canopy Gaps and The Dynamics of A Neotropical Forest*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1986
- [5] Battles JJ, Fahey TJ, Harney EMB. Spatial patterning

- in the canopy gap regime of a subalpine *Abies-Picea* forest in the northeastern United States. *Journal of Vegetation Science*, 1995, **6**: 807-814
- [6] Gale N. The relationship between canopy gaps and topography in a western Ecuadorian rain forest. *Biotropica*, 2000, **32**: 653-661
- [7] Hunter JC, Parker VT. The disturbance regime of an old-growth forest in coastal California. *Journal of Vegetation Science*, 1993, **4**: 19-24
- [8] Zhu J-J (朱教君), Liu S-R (刘世荣). Ecological Research on Forest Disturbances. Beijing: China Forestry Press, 2007 (in Chinese)
- [9] Shen Z-H (沈泽昊), Wang G-F (王功芳), Li D-X (李道兴). Gap related disturbance in mixed mountain forests at Mt. Dalaoling in the Three Gorges. II. Topographic patterns. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2001, **26**(2): 149-156 (in Chinese)
- [10] Runkle JR. Gap dynamics in an Ohio *Acer-Fagus* forest and speculations on the geography of disturbance. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, **20**: 632-641
- [11] Editorial Committee of China Vegetation (中国植被编辑委员会). Vegetation of China. Beijing: Science Press, 1980 (in Chinese)
- [12] Yang L (杨玲), Huang X-L (黄晓兰), Wang X-H (王希华), et al. Characteristics of typhoon disturbance on evergreen broad-leaf forest at Tiantong National Forest Park. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology* (浙江林业科技), 2006, **26**(5): 10-14 (in Chinese)
- [13] Editorial Board of Climography of Zhejiang Province (浙江省气象志编纂委员会). Climography of Zhejiang Province. Beijing: Zhonghua Book Company, 1999 (in Chinese)
- [14] Yang Q-S (杨庆松), Ma Z-P (马遵平), Xie Y-B (谢玉彬), et al. Community structure and species composition of an evergreen broad-leaved forest in Tiantong's 20-ha dynamic plot, Zhejiang Province, eastern China. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2011, **19**(2): 215-223 (in Chinese)
- [15] Runkle JR. Gap regeneration in some old-growth forest of the eastern United States. *Ecology*, 1981, **62**: 1041-1051
- [16] Jiang L-C (姜良才), Liu L-Z (刘丽正), Wang X-H (王希华). Forming characteristics of gap in an evergreen broad-leaved forest in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province, eastern China. *Journal of East China Normal University* (Natural Sciences) (华东师范大学学报·自然科学版), 2007, **2007**(6): 88-96 (in Chinese)
- [17] Song Y-C (宋永昌), Wang X-R (王祥荣). Vegetation and Flora of Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press, 1995 (in Chinese)
- [18] Vries PG. Sampling Theory for Forest Inventory. Berlin: Springer, 1986
- [19] Shen Z-H (沈泽昊), Zhang X-S (张新时), Jin Y-X (金义兴). Gradient analysis of the influence of mountain topography on vegetation pattern. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2000, **24**(4): 430-435 (in Chinese)
- [20] Xie Y-B (谢玉彬), Ma Z-P (马遵平), Yang Q-S (杨庆松), et al. Coexistence mechanisms of evergreen and deciduous trees based on topographic factors in Tiantong region, Zhejiang Province, eastern China. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2012, **20**(2): 159-167 (in Chinese)
- [21] Li G-C (李贵才), He Y-T (何永涛), Han X-G (韩兴国). Features of gaps of middle mountain moist evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountain. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2003, **22**(3): 13-17 (in Chinese)
- [22] Yan S-J (闫淑君), Hong W (洪伟), Wu C-Z (吴承祯), et al. Gaps and their natural disturbance characteristics in mid-subtropical evergreen broad-leaved forest in Wanmulin. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(7): 1126-1130 (in Chinese)
- [23] Zang R-G (臧润国), Liu J-Y (刘静艳), Dong D-F (董大方). Gap Dynamics and Forest Bioiversity. Beijing: China Forestry Press, 1998 (in Chinese)
- [24] Gong H-D (巩合德), Yang G-P (杨国平), Lu Z-Y (鲁志云), et al. Diversity and spatial distribution patterns of trees in an evergreen broad-leaved forest in the Ailao Mountains, Yunnan. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2011, **19**(2): 143-150 (in Chinese)
- [25] Wu B-X (吴邦兴). Study on the dynamics and rhythms of midmontane wet evergreen broad-leaved forest at Xujia, Ailao Mountains, Yunnan. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 1995, **37**(12): 969-977 (in Chinese)
- [26] Gao J (高峻), Yang B-S (杨斌生), Geng L-B (耿连波). The basic characteristics of the evergreen broad-leaf forest in Wanmulin of Jianou, Fujian Province. *Journal of Shanghai Teachers University* (Natural Sciences) (上海师范大学学报·自然科学版), 1994, **23**(3): 89-96 (in Chinese)
- [27] Zhu J-M (朱锦懋), Jiang Z-L (姜志林), Zheng Q-R (郑群瑞). A study on the species diversity in the forest community of Wanmulin Nature Reserve, Fujian province. *Journal of Nanjing Forestry University* (南京林业大学学报), 1997, **21**(4): 11-16 (in Chinese)
- [28] Greenberg CH, McNab WH. Forest disturbance in hurricane-related downbursts in the Appalachian Mountains of North Carolina. *Forest Ecology and Management*, 1998, **104**: 179-191
- [29] Van Bloem SJ, Lugo AE, Murphy PG. Structural response of Caribbean dry forests to hurricane winds: A case study from Guánica Forest, Puerto Rico. *Journal of Biogeography*, 2006, **33**: 517-523
- [30] Xu J-M (徐建明), Li G-Y (李光友), Lu Z-H (陆钊华), et al. Investigation on eucalypt forest plantations subjected to the freezing catastrophe in southern China. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2008, **44**(7): 103-110 (in Chinese)
- [31] Almquist BE, Jack SB, Messina MG. Variation of the treefall gap regime in a bottomland hardwood forest: Relationships with microtopography. *Forest Ecology and Management*, 2002, **157**: 155-163
- [32] Song Y-C (宋永昌). Vegetation Ecology. Shanghai: East China Normal University Press, 2001 (in Chinese)

作者简介 张志国 男, 1984年生, 硕士研究生. 主要从事植被生态研究. E-mail: zzl0909@126.com

责任编辑 李凤琴