

杭州湾北岸沿海防护林冠层结构及林下光环境

成向荣¹, 冯利², 虞木奎¹, 刘志龙¹, 张翠¹, 王宗星¹, 葛乐¹

(1. 中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400; 2. 河北省兴隆县发展改革局, 河北 兴隆 067300)

摘要: 利用跟踪辐射与冠层结构测量仪(TRAC)研究了杭州湾北岸6种沿海防护林冠层结构及林下光环境特征。结果表明: 6种林分以中山杉 *Taxodium ascendens* × *mucronatum* 间隙分数最大, 红叶椿 *Ailanthus altissima* ‘Hongye’, 洋白蜡 *Fraxinus pennsylvanica* 和美国皂荚 *Gleditsia triacanthos* 的平均间隙分数接近, 乌桕 *Sapium sebiferum* 和女贞 *Ligustrum lucidum* 的平均间隙分数相对较小。而各林分叶面积指数特征与间隙分数相反, 女贞和乌桕平均叶面积指数(LAI)较高, 红叶椿、洋白蜡、美国皂荚和中山杉的叶面积指数接近。红叶椿叶丛生效应较低, 而美国皂荚、乌桕、中山杉、洋白蜡和女贞具有类似的丛生效应。各林分内光量子通量密度(PPFD)具有较大差异, 其大小依次为中山杉>美国皂荚>红叶椿, 洋白蜡>乌桕>女贞。图2表4参18

关键词: 森林生态学; 沿海防护林; 冠层结构; 光环境

中图分类号: S718.45 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2010)06-0872-05

Understory light environment and canopy structure of six coastal protection forests on the north coast of Hangzhou Bay

CHENG Xiang-rong¹, FENG Li², YU Mu-kui¹, LIU Zhi-long¹, ZHANG Cui¹, WANG Zong-xing¹, GE Le¹

(1. Institute of Subtropical Forestry, The Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China;

2. Bureau of Development and Reform, Xinglong 067300, Hebei, China)

Abstract: The canopy structure and environmental characteristics from understory light for six coastal protection forest stands (*Taxodium ascendens* × *mucronatum*, *Ailanthus altissima* ‘Hongye’, *Fraxinus pennsylvanica*, *Gleditsia triacanthos*, *Sapium sebiferum*, and *Ligustrum lucidum*) on the north coast of Hangzhou Bay were measured by Tracing Radiation and Canopy Architecture (TRAC). Results showed that the canopy gap fraction of the *T. ascendens* × *mucronatum* stand was greater than the other five stands which had no major difference between them. The stand leaf area index (LAI) was opposite of the gap fraction with the average LAI of *S. sebiferum* and *L. lucidum* significantly ($P < 0.05$) higher than the other stands with the other four stands being about the same. Leaf clumping was significantly ($P < 0.05$) lower for the *A. altissima* ‘Hongye’ stand with the other five stands about the same. Understory photosynthetic photon flux density (PPFD) for the six stands had significantly ($P < 0.05$) differences with the order of light intensity as: *T. ascendens* × *mucronatum* > *G. triacanthos* > *A. altissima* ‘Hongye’, *F. pennsylvanica* > *S. sebiferum* > *L. lucidum*. [Ch, 2 fig. 4 tab. 18 ref.]

Key words: forest ecology; coastal protection forest; canopy structure; light environment

近年来, 中国东部地区沿海防护林的建设得到迅速发展, 对改善区域气候环境和防御自然灾害方面发挥着积极的作用。针对沿海防护林构建技术及其生态效益已开展了较多研究^[1-3], 但不同林分冠层结构特征的研究较少。森林冠层作为林木接受太阳辐射, 进行光合作用的主体, 在森林生态系统物

收稿日期: 2010-01-14; 修回日期: 2010-03-10

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2009BADBZB03)

作者简介: 成向荣, 博士, 从事林业生态工程等研究。E-mail: chxrd@sohu.com

质能量转化中发挥着重要作用^[4]。不同的冠层结构的光合作用和林下光环境状况存在差异，进而影响森林生产力和林下植物生长发育和分布^[5]。因此，冠层结构分析不仅是研究森林生产力的基础，同时也对深入研究冠层结构与防护林生态效益的关系具有重要意义。由于冠层结构空间分布的异质性，一些冠层参数难以直接获取，同时直接测定费时、费力，且具有破坏性；目前，多采用间接方法来测定冠层结构参数^[6]。小尺度间接测量主要是通过光学仪器观测林内辐射透过率来计算冠层参数，现有的观测仪器有跟踪辐射与冠层结构测量仪(tracing radiation and canopy, TRAC)，叶面积指数 LAI 2000, Sunfleck Ceptometer 和半球冠层摄影仪等。除 TRAC 外，其他的仪器都假设叶片在空间的分布是随机的，无法计算出丛生指数，而丛生指数对实际叶面积指数的准确计算具有重要意义。此外，利用 TRAC 还可以计算冠层间隙大小的空间分布。本研究利用 TRAC，比较杭州湾北岸 6 种沿海防护林冠层间隙分数、叶面积指数和叶丛生指数以及林下光环境的差异，为今后这一地区沿海防护林林分结构调控、森林水文过程以及防护林生态效益等方面的研究奠定基础。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于上海市浦东新区书院镇滨海森林公园(30°58'N, 121°55'E)，东临东海，南靠杭州湾，距海 2~3 km，平均海拔为 2~3 m。年平均气温为 15.6℃。年平均降水量为 1 137.1 mm，6~9 月降水较多。年日照时数为 1 993.4 h，无霜期为 223 d，属北亚热带海洋性季风气候。2006 年在已围垦多年的滩涂上栽植红叶椿 *Ailanthus altissima* ‘Hongye’，洋白蜡 *Fraxinus pennsylvanica*，美国皂荚 *Gleditsia triacanthos*，乌桕 *Sapium sebiferum*，女贞 *Ligustrum lucidum*，中山杉 *Taxodium ascendens* × *mucronatum* 等树木，苗木为 2~3 年生的实生苗。

1.2 研究方法

2009 年 7 月中旬，在浦东新区滨海森林公园内的红叶椿、洋白蜡、美国皂荚、乌桕、女贞和中山杉林分共建立 6 块 10 m × 100 m 的临时样地，调查各样地林木的胸径、树高和密度。各林分概况见表 1。

在上述各种林分临时样地内，沿样带中部 10 m 确定一个标志，采用 TRAC(Canada)冠层分析仪以 1 m/3 s 的步速，10 m 一个片段记录林分冠层特征，1 个片段约 1 000 个数据。测定时间为 7 月 18 日(天气晴朗)的上午 9:00–10:00 和下午 15:00–16:00。冠层参数包括叶面积指数(leaf area index, LAI)，林分间隙分数(gap fraction，即空隙度)和丛生指数(clumping index，反映林分叶片集聚效应的指标)。

1.3 数据处理

试验数据使用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 进行分析和处理，不同林分间冠层叶面积指数、间隙分数、叶丛生指数和林下光量子通量密度(photosynthetic photon flux density, PPF)的差异采用 SPSS 16.0 的单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan 多重比较进行检验。

2 结果与分析

2.1 冠层间隙分布特征

冠层间隙分数是指林地未被树冠垂直投影所覆盖的比例，是评价林分冠层结构特征的重要参数。林隙的大小和空间分布不仅影响林下光环境、温度和湿度等环境因子的变化，同时也对林下植物分布、生长和更新具有重要的生态意义^[7-9]。对杭州湾北岸南汇段沿海防护林 6 种林分 100 m 连续冠层

表 1 不同林分基本特征

Table 1 Basic characteristics of different stands

林分	胸径/cm	树高/m	密度/(株·hm ⁻²)
红叶椿	4.5 ± 1.8	4.6 ± 0.8	2 325
洋白蜡	4.6 ± 0.7	4.1 ± 0.5	2 325
美国皂荚	4.5 ± 0.8	4.2 ± 0.6	2 300
乌桕	8.9 ± 1.1	5.0 ± 0.4	2 100
女贞	5.1 ± 0.8	3.3 ± 0.2	2 500
中山杉	5.5 ± 1.0	3.5 ± 0.5	2 300

的分析发现,不同树种之间林隙分数的大小及其空间分布具有一定差异(表2)。中山杉平均间隙分数最大,为66%,显著高于其他林分;红叶椿、洋白蜡和美国皂荚的平均间隙分数没有显著差异,为48.9%~58.5%;乌柏和女贞的平均间隙分数相对较小,分别为41.3%和28.8%,其中女贞间隙分数显著低于其他林分。冠层间隙分数的空间变异系数随间隙分数的增大有逐渐降低的趋势。

除冠层间隙分数外,间隙大小的空间分布也对林下环境产生重要影响。由图1可知,中山杉林分冠层大间隙分布较多,最大间隙为4320mm;红叶椿、洋白蜡、美国皂荚和乌柏也有较大间隙分布,女贞冠层最大间隙仅为1770mm。美国皂荚累积间隙分数比乌柏高17.3%,2种林分大于500mm的间隙大小分布类似,可见2种林分间隙分数的差异主要来自小于500mm的间隙分布。虽然美国皂荚与红叶椿累积间隙分数接近,但小于1220mm的冠层间隙分布红叶椿大于美国皂荚,大于1220mm的间隙大小分布类似。这表明冠层间隙分数接近的林分,其间隙大小的空间分布可能不同。

2.2 叶面积指数分布特征

叶面积指数是研究植被群落冠层结构最重要的参数之一,是估算植物群落生产力和生态过程及其功能的重要变量,其大小、变化与生态环境、群落结构等条件密切相关^[6,10-11]。对6种林分100m连续冠层的分析显示,各林分叶面积指数在空间的分布具有较大的不均一性,叶面积指数的变异系数在32.6%~42.2%(表3)。女贞平均叶面积指数为2.324,显著高于其他5种林分;红叶椿、洋白蜡、美国皂荚和中山杉的叶面积指数分别为1.277,1.421,1.065和0.911,各树种间叶面积指数没有显著差异。乌柏平均叶面积指数为1.741,显著高于中山杉,但与红叶椿、洋白蜡和美国皂荚之间没有显著差异。

2.3 不同林分叶丛生指数

由于叶的空间分布并不完全是随机的,林分冠层间隙大小分布包含许多非随机因素产生的间隙,如树叶和枝条间的间隙,这种由林木叶子非随机分布产生的叶丛生效应对冠层间隙和叶面积指数的准确计算具有重要影响^[12]。由表4可知,除红叶椿外,其他5种林分叶丛生指数之间没有显著差异。红叶椿叶丛生指数最低,为0.565,显著低于洋白蜡和女贞,而与美国皂荚、乌柏和中山杉之间没有显著差异。这表明红叶椿叶丛生效应较低,比其他林分低

表2 不同林分冠层间隙分数统计

Table 2 Characteristics of canopy gap fraction in different stands

林分	平均间隙分数/%	标准差/%	变异系数/%
红叶椿	52.2 ab	15.1	28.9
洋白蜡	48.9 ab	10.5	21.6
美国皂荚	58.5 ac	12.8	21.9
乌柏	41.3 b	13.5	32.8
女贞	28.8 d	19.6	68.1
中山杉	66.0 c	9.5	14.4

说明:表中不同字母表示差异显著,相同字母差异不显著($P < 0.05$)。

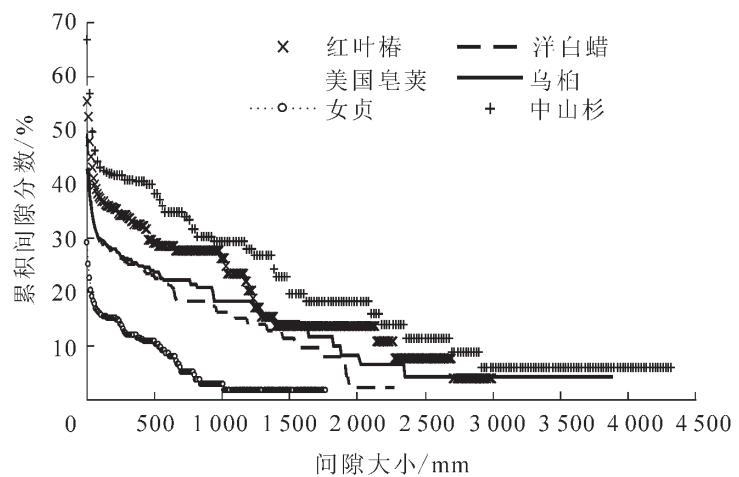


图1 不同林分冠层累积间隙分数与间隙大小分布特征

Figure 1 Characteristics between accumulated gap fraction and gap size in different stands

表3 不同林分叶面积指数的统计

Table 3 The characteristics of LAI in different stands

林分	平均叶面积指数	标准差	变异系数/%
红叶椿	1.277 ab	0.534	41.8
洋白蜡	1.421 ab	0.463	32.6
美国皂荚	1.065 ab	0.463	37.9
乌柏	1.741 b	0.625	35.9
女贞	2.324 c	0.971	41.8
中山杉	0.911 a	0.384	42.2

说明:表中不同字母表示差异显著,相同字母差异不显著($P < 0.05$)。

15.2% ~ 29.7%，而美国皂荚、乌桕、中山杉、洋白蜡和女贞具有类似的丛生效应。

2.4 不同林分内光环境特征

太阳辐射可以穿透植被冠层，供给林下植物进行光合作用，但是由于树种组成以及枝叶分布状况等因素的差异，森林冠层结构的分布格局强烈地影响林下的总有效光^[13]。从图 2 可以看出，6 种林分内光量子通量密度 (PPFD) 的大小依次为中山杉 > 美国皂荚 > 红叶椿，洋白蜡 > 乌桕 > 女贞。尽管红叶椿、洋白蜡、美国皂荚林分之间的冠层间隙分数和叶面积指数均没有显著差异，但只有红叶椿和洋白蜡林内光照条件较为接近，平均 PPFD 分别为 $980.6 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $946.9 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，均显著低于美国皂荚。美国皂荚、乌桕、女贞和中山杉林分之间 PPFD 的差异也达到显著水平。中山杉林分内 PPFD 是女贞的 2.3 倍。这表明不同林分之间林下光照条件差异明显，研究区开展林农复合经营或复层异龄林的构建可根据林下光环境差异选择适宜物种。

3 结论与讨论

对杭州湾北岸南汇段 6 种沿海防护林冠层结构分析表明，中山杉间隙分数最大，红叶椿、洋白蜡和美国皂荚的平均间隙分数接近，乌桕和女贞的平均间隙分数相对较小。冠层间隙分数空间变异系数随间隙分数的增大有逐渐降低的趋势。目前，多数研究集中在林分平均间隙分数上，对完整冠层下连续林隙环境的研究较少。各林分叶面积指数特征与间隙分数变化相反，女贞和乌桕平均叶面积指数较高，红叶椿、洋白蜡、美国皂荚和中山杉的叶面积指数接近。各林分叶面积指数的变异系数差异不大，为 32.6% ~ 42.2%。红叶椿叶丛生效应较低，而美国皂荚、乌桕、中山杉、洋白蜡和女贞具有类似的丛生效应。Nilson^[14]指出，丛生效应是由冠层间隙度反演叶面积指数值最主要误差之一。针叶林如不考虑丛生效应，其观测值较实际叶面积指数低 30% ~ 70%，而叶片均匀分布的冠层，其观测值高于实际叶面积指数^[15-16]。6 种林分内光量子通量密度 (PPFD) 的大小依次为中山杉 > 美国皂荚 > 红叶椿，洋白蜡 > 乌桕 > 女贞。其中红叶椿和洋白蜡林内光照条件较为接近，其他林分之间林内 PPFD 的分布具有显著差异，各林分 PPFD 的空间变异系数为 45%~94%。有研究表明，林分光照分布与林冠层间隙大小密切相关，在间隙度中等的林分中，林分光照空间分布的变异性最大^[17]。对热带湿地森林的研究也证实，林冠层结构类型的差异是形成林分光照空间分布格局变异的主要原因^[18]。

本研究仅对杭州湾北岸 6 种沿海防护林冠层结构及其林内光环境作了初步研究，不同林分冠层结构与防护效益的相互关系，根据林内光环境配置适宜的林下树种或作物，提高林分综合效益等方面的内容还有待进一步深入研究。

参考文献：

- [1] 胡海波, 张金池, 鲁小珍. 我国沿海防护林体系环境效应的研究[J]. 世界林业研究, 2001, 14 (5): 37 - 43.
 HU Haibo, ZHANG Jinchi, LU Xiaozhe. Study on environmental benefits of coastal windbreak system in China [J]. World For Res, 2001, 14 (5): 37 - 43.

表 4 不同林分丛生指数的统计

Table 4 The characteristics of clumping index in different stands

林分	丛生指数	标准差	变异系数/%
红叶椿	0.565 a	0.160	28.3
洋白蜡	0.703 b	0.099	14.1
美国皂荚	0.651 ab	0.099	15.2
乌桕	0.679 ab	0.172	26.4
女贞	0.733 b	0.097	13.2
中山杉	0.654 ab	0.142	21.7

说明：表中不同字母表示差异显著，相同字母差异不显著 ($P < 0.05$)。

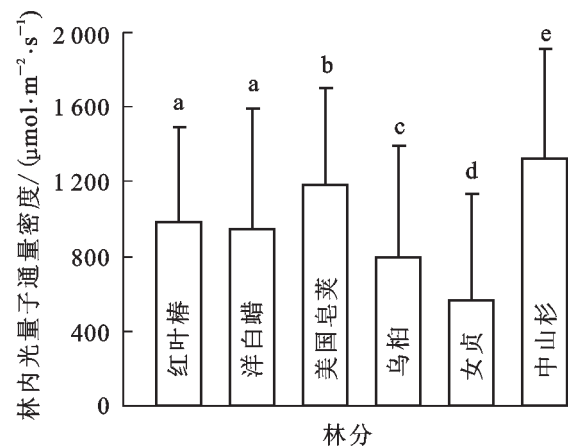


图 2 不同林分内光量子通量密度的比较

Figure 2 Comparison of understory PPFD in different stands

- [2] 贺芳芳. 上海市郊林带的防风效应分析[J]. 中国农业气象, 2007, **28** (4): 399 - 402.
HE Fangfang. Analysis of effects of shelterbelt in Shanghai suburb [J]. *Chin J Agrometeorol*, 2007, **28** (4): 399 - 402.
- [3] 成向荣, 虞木奎, 张建锋, 等. 沿海防护林工程营建技术研究综述[J]. 世界林业研究, 2009, **22** (1): 63 - 67.
CHENG Xiangrong, YU Mukui, ZHANG Jianfeng, *et al.* Review on construction technology of coastal shelterbelt project [J]. *World For Res*, 2009, **22** (1): 63 - 67.
- [4] 李德志, 臧润国. 森林冠层结构与功能及其时空变化研究进展[J]. 世界林业研究, 2004, **17** (3): 12 - 16.
LI Dezhi, ZANG Runguo. The research advances on the structure and function of forest canopy, as well as their temporal and spatial changes [J]. *World For Res*, 2004, **17** (3): 12 - 16.
- [5] 陈圣宾, 宋爱琴, 李振基. 森林幼苗更新对光环境异质性的响应研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, **16** (2): 365 - 370.
CHEN Shengbin, SONGAi qin, LI Zhenji. Research advance in response of forest seedling regeneration to light environmental heterogeneity [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, **16** (2): 365 - 370.
- [6] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 等. 叶面积指数的研究和应用进展[J]. 生态学杂志, 2005, **24** (5): 537 - 541.
WANG Xiqun, MA Lüyi, JIA Zhongkui, *et al.* Research and application advances in leaf area index (LAI) [J]. *Chin J Ecol*, 2005, **24** (5): 537 - 541.
- [7] LERTZMAN K P, SUTHERLAND G D, INSELBERG A, *et al.* Canopy gaps and the landscape mosaic in a coastal temperate rain forest [J]. *Ecology*, **77** (4): 1254 - 1270.
- [8] 闫淑君, 洪伟, 吴承祯, 等. 中亚热带常绿阔叶林林隙及其自然干扰特征的研究[J]. 应用生态学报, 2004, **15** (7): 1126 - 1130.
YAN Shujun, HONG Wei, WU Chengzhen, *et al.* Gaps and their natural disturbance characteristics in mid-subtropical evergreen broad-leaved forest in Wanmulin [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15** (7): 1126 - 1130.
- [9] ST-DENIS A, KNEESHAW D, BERGERON Y. The role of gaps and tree regeneration in the transition from dense to open black spruce stands [J]. *For Ecol Manage*, 2010, **259**: 469 - 476.
- [10] 向洪波, 郭志华, 赵占轻, 等. 不同空间尺度森林叶面积指数的估算方法[J]. 林业科学, 2009, **45** (6): 139 - 144.
XIANG Hongbo, GUO Zhihua, ZHAO Zhanqing, *et al.* Estimating method of forest leaf area index on different space scales [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45** (6): 139 - 144.
- [11] 宋子炜, 郭小平, 赵廷宁, 等. 北京山区油松林光辐射特征及冠层结构参数[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26** (1): 38 - 43.
SONG Ziwei, GUO Xiaoping, ZHAO Tingning, *et al.* Light environment and canopy structure of a *Pinus tabulaeformis* community in the mountainous area of Beijing [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26** (1): 38 - 43.
- [12] CHEN J M, MENGES C H, LEBLANC S G. Global mapping of foliage clumping index using multi-angular satellite data [J]. *Remote Sens Environ*, 2005, **97** (4): 447 - 457.
- [13] 丁圣彦, 卢训令, 李昊民. 天童国家森林公园常绿阔叶林不同演替阶段群落光环境特征比较[J]. 生态学报, 2005, **25** (11): 2862 - 2867.
DING Shenyan, LU Xunling, LI Haomin. A comparison of light environmental characteristics for evergreen broad-leaved forest communities from different successional stages in Tiantong National Forest Park [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25** (11): 2862 - 2867.
- [14] NILSON T. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands [J]. *Agric Meteorol*, 1971, **8** (1): 25 - 38.
- [15] STENBERG P. Correcting LAI-2000 estimates for the clumping of needles in shoots of conifers [J]. *Agric For Meteorol*, 1996, **79** (1/2): 1 - 8.
- [16] NACKAERTS K, STERCKX S, COPPIN P. Fractal dimension as correction factor for stand-level indirect leaf area index measurements [M] // EDWIN T E, EUGENEI O Z. *Proceedings of the EOS/SPIE Symposium on Remote Sensing*. Firenze: [s. n.], 1999: 80 - 89.
- [17] MARTENS S N, BRESHEARS D D, MEYER C W. Spatial distributions of understory light along the grassland/forest continuum: effects of cover, height, and spatial pattern of tree canopies [J]. *Ecol Model*, 2000, **126**: 79 - 93.
- [18] NICOTRA A B, CHAZDON R L, IRIARTE S V B. Spatial heterogeneity of light and woody seedling regeneration in tropical wet forests [J]. *Ecology*, 1999, **80** (6): 1908 - 1926.