

北京山区油松林光辐射特征及冠层结构参数

宋子炜，郭小平，赵廷宁，代巍

(北京林业大学 水土保持学院 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083)

摘要：为了揭示不同径阶油松 *Pinus tabulaeformis* 林群落内光辐射状况，以北京市妙峰山实验林场内人工油松林为研究对象，运用 WinSCANOPY For Canopy Analysis 冠层分析仪采集数据，并结合实地调查，实测了 5 种不同径阶的油松林群落内光辐射特征及冠层结构参数。结果表明：立地条件相同的情况下，油松林内光辐射随胸径增加呈下降趋势，为 $14.64 \sim 22.43 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ，平均约占冠上总辐射的 64.59%。林分开阔度为 24.91% ~ 43.77%，并且不同径阶群落之间有明显差别。叶面积指数为 2.23 ~ 4.50，平均约为 3.67。冠层消光系数小于 0.20，较小的消光系数对林内灌木层和草本层生长更新具有重要意义。图 4 表 1 参 30

关键词：森林生态学；油松林；光辐射；叶面积指数；消光系数

中图分类号：S718.5 文献标志码：A 文章编号：1000-5692(2009)01-0038-06

Light environment and canopy structure of a *Pinus tabulaeformis* community in the mountainous area of Beijing

SONG Zi-wei, GUO Xiao-ping, ZHAO Ting-ning, DAI Wei

(College of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Combating

Desertification of The Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Light is a dynamic factor that affects the course of community succession and plant survival strategies. To reveal the light environment and provide reference for improving plantation structure, five *Pinus tabulaeformis* communities of different diameter classes in Beijing's Miao-feng Hill Forest Farm were studied. Photos were produced with WinSCANOPY, and light characteristic indexes, along with canopy structure parameters, such as photosynthetic photon flux density (PPFD), canopy openness, leaf area index (LAI), and the light extinction coefficient (k), were analyzed by using standard plots method. Results showed that in the same habitat, total PPFD under the canopy ranging from 14.64 to $22.43 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ or about 64.59% of the PPFD above the canopy, decreased with increasing diameter at breast height (DBH). Canopy openness was between 24.91% and 43.77%, whereas LAI ranged from 2.23 to 4.50 with an average of 3.67. Also, light extinction coefficients of all five communities were less than 0.20. Therefore, the light environment under these *P. tabulaeformis* communities was sufficient for growth and regeneration, to some degree, of the shrub and herb layers. [Ch, 4 fig. 1 tab. 30 ref.]

Key words: forest ecology; *Pinus tabulaeformis* community; light radiation; leaf area index; light extinction coefficient

植物群落演替过程中，光是一个非常动态化的环境因子，也是许多植物生长和生存的限制因子^[1]。国内学者对不同群落林冠辐射能的分布、变化以及不同光照条件下光合作用强度作了较多研究^[2-4]，但对不同演替阶段人工林群落内部光辐射以及冠层结构参数的研究尚不多见。林内光环境、叶面积

收稿日期：2008-03-10；修回日期：2008-07-10

基金项目：“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD03A1201)

作者简介：宋子炜，从事工程绿化、水土保持与荒漠化等研究。E-mail: songzwei365@sina.com

指数和开阔度等指标的动态变化对于指导人工林生产经营具有重要意义^[5]。油松 *Pinus tabulaeformis* 林是北京山区重要的针叶林类型, 面积为 54 万 hm², 约占山区公益林面积的 20%。目前, 对于油松林叶面积指数及其变化的研究较多, 而对其林内光辐射特性与冠层结构参数的研究尚少, 并且很多研究依赖于离体的破坏性测定^[6-7]。半球面影像技术对于解释林下植物的生长和分布模式有良好的适用性^[8-10], 在造林设计或林分改造中, 用半球面影像技术获得的信息可用于科学的植物种类配置^[11], 并且在对同一种林分的生长和生态评价中, 该技术也显示出旺盛的潜力^[12-14]。WinSCANOPY For Canopy Analysis 冠层分析仪属于半球面影像技术的一种, 可以方便、准确地测定群落光辐射与冠层结构参数, 并且具有良好的稳定性。笔者利用 WinSCANOPY For Canopy Analysis 冠层分析仪采集数据, 结合实地调查, 对北京山区油松林内部光辐射、叶面积指数和开阔度等冠层结构参数进行了研究, 并揭示它们随径阶的变化规律, 对于了解不同径阶油松林群落的光环境和冠层特性有一定参考意义, 并有助于全面认识其群落特点, 可为科学指导油松林林分改造以及引导和加速人工群落演替提供依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

研究区域位于在北京林业大学妙峰山实验林场, 地理坐标为 39°54'N, 116°28'E, 林带属于温带大陆性气候, 夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥, 春季雨量少, 蒸发量大。全年平均气温为 12.2 °C, 绝对最低气温 -21.0 °C, 绝对最高气温 41.3 °C, 降水量接近 700 mm。林木生长期从 3 月末至 11 月初, 共计 210 d 左右。试验林地土壤厚度为 50 ~ 60 cm, 黏重, 透水性较差。所选油松人工纯林林相整齐。

1.2 样地设置

根据相关文献资料, 初步确定研究样地的地点、类型以及数量, 确保研究样地的土壤性质、坡度和坡向一致, 并且样地内树木胸径均匀, 以减小立地条件异质性产生的误差。在 2007 年 7 月期间, 按照样地选取原则, 通过实地调查, 结合林场造林资料, 完成样地选择工作。样地面积设置为 20 m × 20 m, 均属于低山阴坡厚土立地类型, 坡度为 12° ~ 15°, 基本特征见表 1。

表 1 油松样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of *Pinus tabulaeformis* communities stand plots

树种	样地编号	平均胸径/cm	胸径变异系数/%	平均树高/m	树高变异系数/%	现有密度/(株·hm ⁻²)	坡度/(°)	立地类型
油松	1	8.75	3	4.05	3	950 ~ 1 100	15	低山阴坡厚土
	2	9.60	4	4.01	5	950 ~ 1 100	12	低山阴坡厚土
	3	11.50	3	4.59	5	800 ~ 1 000	15	低山阴坡厚土
	4	14.30	6	6.05	12	800 ~ 1 000	18	低山阴坡厚土
	5	22.45	4	11.51	3	800 ~ 1 000	15	低山阴坡厚土

1.3 数据采集

运用加拿大 WinSCANOPY2004a For Canopy Analysis 在各样地内对冠层进行拍照。数据采集时间在 2007 年 8 月。为了消除太阳直射产生的巨大光斑, 拍照选择在天气晴朗的 9 : 00 ~ 10 : 00 和 14 : 00 ~ 15 : 00。调查样地属于乔灌草群落结构, 灌木层高度约 1.5 m, 所以拍摄高度设置为 1.8 m, 避免灌木层进入拍照视野。将每个样地内部具有代表性的地点作为拍照地点, 例如林木生长状况一致、郁闭度均匀等处, 每个样地选取 10 个拍照点, 每个拍照点拍 3 张照片, 同一样点重复拍照时尽量不要挪动位置, 从而减少位置移动带来的误差, 并尽可能减少不同拍照地点获取的照片视野交叉, 以保证调查结果能够反映整个样地的实际情况。拍照时保持相机平稳, 镜头朝上, 可得到一张半球面林冠影像。拍照同时, 需要记录树高、胸径和冠幅等指标, 并详细调查地被植物生长状况。

1.4 研究方法

对所获得的半球面影像进行分析，在参数设置中输入样地经、纬度坐标和海拔高度，其他则采用软件默认设置，由此获得一系列光辐射和林冠结构指标。本研究使用的指标包括光合光量子通量密度(PPFD)、林冠开闊度(openness)和叶面积指数(LAI)等内容。WinSCANOPY2004a 提供了 LAI(Bonhom)-Lin 和 LAI(2000)-Log 等 10 种叶面积指数形式，通过预备实验，发现传统方法与 LAI(2000)-Log 数据相关性最高，故分析叶面积指数时采用 LAI(2000)-Log 数据。

2 结果分析

2.1 不同径阶群落林下辐射变化

在森林群落中，太阳辐射可以穿透整个群落，供给各层植物进行光合作用，但是由于树种组成、冠层结构以及枝叶分布状况等因素的差异，太阳辐射透过林冠层后会发生很大变化，使群落不同空间位置接受的有效光照产生明显差别^[15-17]。由于油松林群落结构较简单，生物多样性低，所以群落中太阳辐射变化受其他因素影响较小。不同径阶油松群落冠上总辐射值为 $27.94 \sim 28.91 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ，平均值 $28.38 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ，群落间标准差 0.50，可以看出冠上总辐射水平基本相同(图 1)，差异不明显，因此，透过冠层到达林下的各种辐射在一定程度上可以反应冠层的光截获能力。油松林林下总辐射情况见图 2。可以看出，随胸径增加林下辐射略有波动，但总体呈下降趋势。林下总辐射值为 $14.64 \sim 22.43 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ，平均 $18.33 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ，群落间标准差 3.40，林下辐射约占林上辐射的 64.59%。虽然林下总辐射明显降低，但是微弱的光环境对植物生长更新具有重要生态意义。特别是在生长季，林下有效光照极其有限，甚至光照的微弱改变，可直接引起林下植物对有效养分资源环境的利用效率及光合作用发生变化^[18-19]。

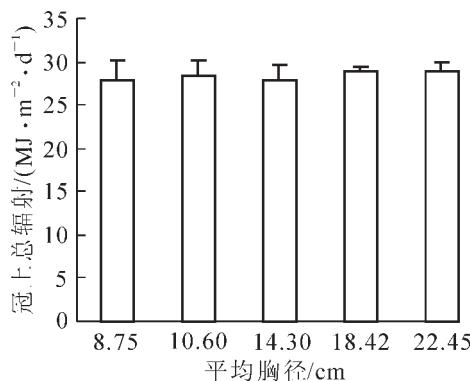


图 1 不同径阶油松群落冠上总辐射比较

Figure 1 Comparison of PPFD over *Pinus tabulaeformis* communities canopy in different diameter classes

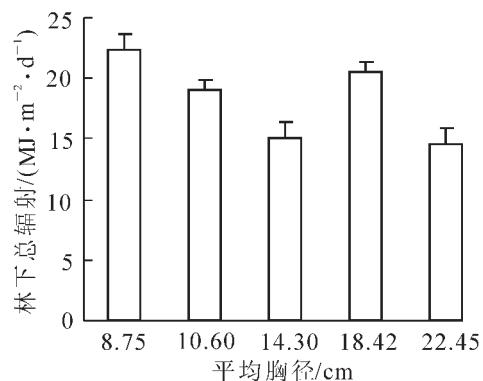


图 2 不同径阶油松群落林下总辐射比较

Figure 2 Comparison of PPFD under *Pinus tabulaeformis* communities canopy in different diameter classes

通过以上分析可以看出，林下各种辐射随胸径增加而变化，与冠层结构有关。油松属于北京地区适生树种，胸径较小的群落，郁闭度较低，透过光较多。随着树木的生长和群落演替，冠层逐渐繁茂，郁闭度逐渐增加，特别是在生长旺盛期，物质积累迅速，并迅速占据空间，导致林下光辐射减弱。可以预测，随着群落垂直结构的分化，群落冠层结构和冠形最终将逐渐趋于稳定，光环境也随之趋于稳定。

2.2 不同径阶群落开闊度变化

林冠开闊度指从林地一点向上仰视，未被树木枝体所遮挡的天空球面的比例，是总空隙度经过补偿计算剔除了植被阻隔的影响得出的实际冠层总空隙度^[20]。在数值上，林冠开闊度 = 1 - 林冠郁闭度(指林地被树冠垂直投影所覆盖的比例，与生态学中的植被覆盖度相似)。林冠开闊度经常用于生态学研究中^[21]。研究资料发现，林冠开闊度大的林内，垂直温度的变化与林冠开闊度小的林内垂直温度变化相反，即随高度增加温度降低^[22]。从 WinSCANOPY For Canopy Analysis 软件中可以直接分析得出

林冠开阔度。从图 3 可以得出, 所调查油松林的林冠开阔度随胸径增加明显降低, 为 24.91% ~ 43.77%, 平均 32.65%, 群落间标准差 7.71, 表明不同径阶油松林的林冠开阔度有明显变化。林冠开阔度与林内辐射密切相关, 在一定程度上决定着其空间分布, 这对林下幼苗的更新过程具有重要影响。林冠开阔度较大的林内光环境较好, 将更有利于林下植物生长更新, 随着油松的生长, 枝冠伸展, 冠层郁闭, 林下开阔度逐渐降低。

2.3 群落叶面积指数与冠层消光系数变化

叶面积指数是表征植被冠层结构和植物群落生产力的重要指标, 并影响冠层内的许多生物化学过程, 其大小与变化取决于生态环境、群落结构等条件。将实地获得的林冠影像照片用 WinScanopy 软件分析, 可直接获得叶面积指数值(图 4)。可以看出, 随着群落演替进行和胸径增加, 叶面积指数逐渐增加, 并趋于稳定, 其数值为 2.23 ~ 4.50, 平均值 3.67, 标准差 0.91。叶面积指数增加意味着地上生物量提高, 群落的透光率下降, 冠层以下光照减少, 如果超过了许多物种的耐荫能力, 可能会导致物种多样性的减少^[23-24]。

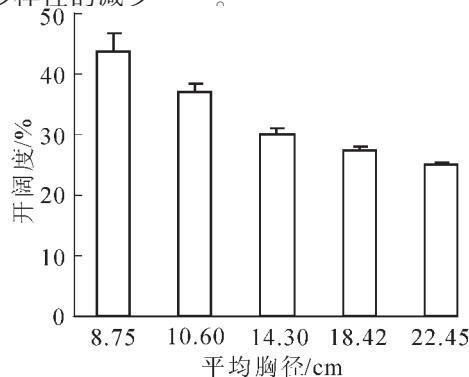


图 3 不同径阶油松群落林冠开阔度比较

Figure 3 Comparison of canopy openness of *Pinus tabulaeformis* communities in different diameter classes

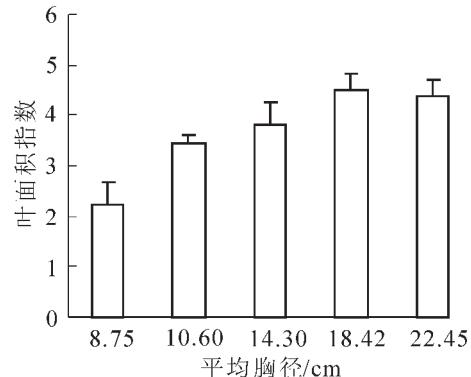


图 4 不同径阶油松群落叶面积指数比较

Figure 4 Comparison of LAI of *Pinus tabulaeformis* communities in different diameter classes

光辐射在通过群落冠层过程中, 强度随着覆盖度的增加几乎呈指数降低, 衰减程度取决于叶簇密度、叶片排列顺序以及分布角度。不同林冠结构直接决定了净辐射及其光能在林内的分布和传输^[25], 冠层消光特性是衡量人工林分结构合理性的重要依据^[26]。消光系数 k 指光在冠层内部被吸收和散射而降低的程度, 能够真正反映冠层中枝叶本身的受光状况及其光学性质^[27]。由 Beer-Lambert 方程^[28]求出, k 表达式为: $k = -\ln(I_0/I_z)/I_{\text{叶}}$ 。其中: k 为消光系数; I_0 为穿透林冠到达林下的总辐射; I_z 为冠层顶部总辐射; $I_{\text{叶}}$ 为叶面积指数。经计算得出, 不同径阶油松群落消光系数依次为: 0.10, 0.11, 0.16, 0.17, 0.16, 平均值 0.14, 标准差 0.03, 表明该研究中油松群落冠层的消光系数很小, 并随群落演替逐渐增加, 因为生长旺盛时期, 枝叶茂密, 林冠的透光度较小, 消光能力增大。消光系数主要受太阳高度角和林冠结构的影响^[29], 例如在禾谷类农田、草甸、芦苇地等群落中, 消光系数通常为 0.3 ~ 0.5; 而在阔叶林、阔叶草本等群落中消光系数通常大于 0.7^[4]。油松群落的消光系数总体较小, 表明其冠层截获光能力较差, 林下光环境相对较好, 因此利于林下灌木和草本植物生长, 利于群落更新演替。调查中发现油松林下生长有荆条 *Vitex chinensi*, 构树 *Broussonetia papyrifera*, 隐子草 *Cleistogenes han-cei* 等阳性植物, 这为群落更新演替和丰富物种多样性提供了基础条件。

3 结论与讨论

半球面影像技术可以方便、快速和准确地测定林冠结构指标, 运用 WinSCANOPY For Canopy Analysis 冠层分析仪研究人工林光辐射特性及冠层结构参数, 可以为改善人工林林分结构, 科学配置植物种类, 引导和促进人工林演替更新提供依据, 具有广阔的应用前景和重要的生态意义。

立地条件相同的情况下, 山区油松林群落冠上辐射情况基本相同, 林内光辐射随胸径增加呈下降

趋势,为 $14.64 \sim 22.43 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,平均约占冠上总辐射的64.59%。林冠开阔度为 $24.91 \sim 43.77$,并且不同径阶群落之间有明显差别。叶面积指数为 $2.23 \sim 4.50$,平均约为3.67,叶面积指数是影响群落生产力的重要因素,并影响冠层内的许多生物化学过程,油松林的叶面积指数随胸径增加而增加,因此可以预测,顶极群落的叶面积指数将会更高。另外,叶面积指数在群落间较大的标准差在一定程度上反映了该种群落林冠结构具有很大改善空间,并且所测最大胸径群落的叶面积指数为5.60,远没有达到森林最大生产力的通常值($8.0 \sim 10.0$)^[30],因此,该群落仍有进一步发展完善空间。群落冠层消光系数小于0.20,较小的消光性质对林内灌木层和草本层生长具有重要意义,因此,可以在林内适当的配置一些低矮灌木、地被植物或者更新幼苗,从而增加群落稳定性和提高生态服务功能。

对人工林群落光辐射特性及冠层结构参数的研究,在国内尚不多见。本文对不同径阶油松林内光辐射特性及冠层结构参数的变化特点及相互关系做了尝试性研究。实际上,影响群落稳定和演替更新的因素很多,而且各因子密切联系,相互影响。在以后的研究工作中应该考虑到植物生长条件和季节变化对冠层结构的影响,并对其作用机制作进一步的深入探讨。

参考文献:

- [1] ADRIENNE B N, ROBIN L, CHAZDON S V B I. Spatial heterogeneity of light and woody seedling regeneration in tropical wet forests [J]. *Ecology*, 1999, **80** (6): 1908 – 1926.
- [2] 孙雪峰,陈灵芝.暖温带落叶阔叶林辐射能量环境初步研究[J].生态学报,1995, **15** (3): 278 – 286.
SUN Xuefeng, CHEN Lingzhi. A preliminary study on the environment of adiation energy of Decduous broad-leaved forest in the Warm Temperate Zone[J]. *Acta Ecol Sin*, 1995, **15** (3): 278 – 286.
- [3] 王得祥,刘淑明,雷瑞德,等.秦岭华山松群落的能量环境及光能利用率研究[J].西北林学院学报,2003, **18** (4): 528.
WANG Dexiang, LIU Shuming, LEI Ruide, et al. Energy evironment and utilization of solar energy by *Pinus armandi* community in the Qinling Mountains[J]. *J Northwest For Univ*, 2003, **18** (4): 528.
- [4] 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.
- [5] 陈厦,桑卫国.暖温带地区3种森林群落叶面积指数和林冠开阔度的季节动态[J].植物生态学报,2007, **31** (3): 431 – 436.
CHEN Sha, SANG Weiguo. Dynamics of leaf areaindex and canopy openness for three forest communities in the warm temperate zone of China[J]. *J Plant Ecol*, 2007, **31** (3): 431 – 436.
- [6] INGE J, STEFAN F, KRIS N, et al. Review of methods for in situ leaf area index determination (Part I) Theories, sensors and hemispherical photography[J]. *Agric For Meteorol*, 2004, **121**: 19 – 35.
- [7] GORDON W F, RICHARD A F, TROFYMOW J A, et al. A comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission[J]. *Agric For Meteorol*, 2001, **109**: 249 – 263.
- [8] MEGUMI I, ROB P. Effects of potential PAR on shoot extension in juveniles of the main tree species in a Japanese temperate forest [J]. *Ecol Res*, 1998, **13** (2): 171 – 182.
- [9] HEATHER P G, ASHTON1 P M S, GRAEME P B. Seedling survival and growth of native tree species in pastures: Implications for dry tropical forest rehabilitation in central Panama[J]. *For Ecol Manage*, 2005, **218**: 306 – 318.
- [10] NIGEL S, EDMUND V J T. Responses of woody plant seedlings to edge formation in a lowland tropical rainforest[J]. *Amazonia Biol Conserv*, 1999, **91**: 135 – 142.
- [11] 苏志尧,贾小容,解丹丹,等.用半球面影像技术测定城市林分的冠层结构参数[J].华南农业大学学报,2007, **28** (2): 65 – 68.
SU Zhiyao, JIA Xiaorong, XIE Dandan. Determination of canopy structural parameters in an urban forest stand using hemispherical photography[J]. *J South China Agric Univ*, 2007, **28** (2): 65 – 68.
- [12] SOUDANI K. Leaf area index and canopy stratification in scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands[J]. *Int J Remote Sens*

- ing, 2002, **23**: 3605 – 3618.
- [13] SCHNITZLERA C. Forest dynamics in unexploited birch (*Betula pendula*) stands in the Vosges (France): structure, architecture and light patterns [J]. *For Ecol Manage*, 2003, **183**: 205 – 220.
- [14] YOSHIDA T, YANAGISAWA Y, KAMITANI T. An empirical model for predicting the gap light index in an evenaged oak stand [J]. *For Ecol Manage*, 1998, **109**: 85 – 89.
- [15] BROWN M J, PARKER G C. Canopy light transmittance in a chronosequence of mixed species deciduous forests [J]. *Can J For Res*, 1994, **24**: 1694 – 1703.
- [16] WATLING J R, PRESS M C. Light heterogeneity in tropical rain forests: photosynthetic responses and their ecological consequences [M]/HUTCHINGS M J, JOHN E A, STEWARDEDS A J A. *The Ecological Consequences of Environmental Heterogeneity*. London: Blackwell Science, 2000: 131 – 154.
- [17] SOPHIE E H. Light regime beneath Sitka spruce plantations in northern Britain: preliminary results [J]. *For Ecol Manage*, 2001, **151**: 61 – 66.
- [18] AGYEMAN V K, SWAINE M D, THOMPSON J. Responses of tropical forest tree seedlings to irradiance and the derivation of a light response index [J]. *J Ecol*, 1999, **87** (5): 815 – 827.
- [19] TANG Y H, NAOKI K, AKIO F, et al. Heterogeneity of light availability and its effects on simulated carbon gain of tree leaves in a small gap and the understory in a tropical rain forest [J]. *Biotropica*, 1999, **31** (2): 268 – 278.
- [20] 高登涛, 韩明玉, 李丙智, 等. 冠层分析仪在苹果树冠结构光学特性方面的研究 [J]. 西北农业学报, 2006, **15** (3): 166 – 170.
GAO Dengtao, HAN Mingyu, LI Binzh, et al. The characteristic of light distribution in apple tree canopy using wins canopy [J]. *Acta Agric Boreali-Occident Sin*, 2006, **15** (3): 166 – 170.
- [21] 朱教君. 透光分层疏透度测定及其在次生林结构研究中的应用 [J]. 应用生态学报, 2003, **14** (8): 1229 – 1233.
ZHU Jiaojun. Method for measurement of optical stratification porosity (OSP) and its application in studies of management for secondary forests [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2003, **14** (8): 1229 – 1233.
- [22] 张一平, 马友鑫, 刘玉洪, 等. 云南哀牢山常绿阔叶林林缘不同热力作用面热力特征 [J]. 生态学杂志, 2003, **22** (2): 74 – 79.
ZHANG Yiping, MA Youxin, LIU Yuhong, et al. Thermodynamic characteristics on different thermal active surfaces near edge of ever-green broad-leaved forest of Ailao Mountain [J]. *Chin J Ecol*, 2003, **22** (2): 74 – 79.
- [23] CHAPIN F S, GAIUS R S, ANNE E G, et al. Responses of arctic tundra to experimental and observed changes in climate [J]. *Ecology*, 1995, **76** (3): 694 – 711.
- [24] ANDREW R D, KEVIN J R. Effects of competition on resource availability and growth of a California bunchgrass [J]. *Ecology*, 1999, **80** (8): 2697 – 2710.
- [25] 李德志, 藏润国. 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.
- [26] 王克勤, 陈奇伯. 金沙江干热河谷人工生态林的林分环境分析 [J]. 中国水土保持科学, 2003, **1** (1): 74 – 79.
WANG Keqin, CHEN Qib. Forest environment of artificial eco-forest of Jinshajiang Dry-hot Valley [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2003, **1** (1): 74 – 79.
- [27] 刘晓东, 朱春全, 雷晶品, 等. 杨树人工林冠层光合辐射分布的研究 [J]. 林业科学, 2000, **36** (3): 2 – 7.
LIU Xiaodong, ZHU Chunquan, LEI Jingpin, et al. The distribution of photosynthetic radiation in the canopy of polar plantation [J]. *Sci Silvae Sin*, 2000, **36** (3): 2 – 7.
- [28] 刘志刚, 马钦彦, 潘向丽, 等. 华北落叶松人工林放叶过程中的辐射特征 [J]. 生态学报, 1997, **17** (5): 519 – 524.
LIU Zhigang, MA Qinyan, PAN Xiangli, et al. Radiational characteristics of a *Larix principis rupprechtii* plantation during the course of leaf growth [J]. *Acta Ecol Sin*, 1997, **17** (5): 519 – 524.
- [29] 陈婷婷, 贺康宁. 黄土半干旱区不同密度人工白榆林消光特性研究 [J]. 水土保持研究, 2007, **14** (4): 340 – 342.
CHEN Tingting, HE Kangning. Canopy extinction characteristics of elm in different density in semi-arid region on loess plateau [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2007, **14** (4): 340 – 342.
- [30] 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.