

长白山阔叶红松林林隙大小结构研究

张春雨 赵秀海 郑景明

(北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室)

摘要:该文应用高斯分布、对数正态分布和二阶对数分布模型对长白山阔叶红松林林隙大小结构进行研究,分析了模型的模拟效果,并对模型的拟合优度进行分析和评价.结果表明:长白山阔叶红松林主要以中小型林隙为主,大林隙极少出现.林冠空隙总面积占调查样地总面积的12.5%,扩展林隙总面积占调查样地总面积的28.8%;冠空隙面积在20~100 m²之间的林隙占林隙总数的80.7%,扩展林隙面积在80~240 m²之间的林隙占林隙总数的81.8%.冠空隙和扩展林隙的大小结构都呈峰值左偏的偏山状分布.冠空隙大小结构服从高斯分布,扩展林隙大小结构可以用高斯分布、对数正态分布和二阶对数分布进行理论描述;根据复相关系数、决定系数、校正决定系数、回归标准误、预测残差平方以及模型拟合度($\alpha=0.05$)对模型拟合优度进行评价的结果一致,模型拟合优度顺序为:对数正态分布>二阶对数分布>高斯分布.该文所采用的单峰分布模型能够从数学及生态学上对长白山阔叶红松林林隙大小结构进行较好的解释.

关键词:林隙, 阔叶红松林, 分布模型

中图分类号:S718.5 文献标识码:A 文章编号:1000-1522(2006)04-0034-05

ZHANG Chun-yu; ZHAO Xiu-hai; ZHENG Jing-ming. **Size structure of canopy gaps in broadleaved Korean pine forests in the Changbai Mountains.** *Journal of Beijing Forestry University* (2006)28(4) 34-38 [Ch, 21 ref.]. Key Laboratory for Silviculture and Conservation, Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China.

Three kinds of models, which were used to simulate the size distribution of forest gaps of broadleaved Korean pine forests in the Changbai Mountains, were discussed in this paper. The effect of fitting was analyzed and goodness of fit of the models was evaluated. The results showed that most of the gaps consisted of small and medium-sized gaps with the occasional occurrence of large-sized gaps. According to our field survey data, areas of canopy gaps and expanded gaps in broadleaved Korean pine forests in Changbai Mountains accounted for 12.5% and 28.8% of total survey areas, among which gaps with canopy gap area of 20-100 m² and expanded gap area of 80-240 m² made up of 80.7% and 81.8% of the totals respectively. The size structure of canopy gaps and expanded canopy gaps could be fitted by different unimodal functions with a peak skewed to the left. For the category of the canopy gap area distribution, only the Gaussian Model could be fitted, while for the expanded gap area distribution, all three models, *ie* the Log Normal Model, the 2nd Order Logarithmic Model and the Gaussian Model could be fitted. In order to evaluate goodness of fit of the models, R , R^2 , R_{adj}^2 , the standard error of the estimate, PRESS, the power of the performed test at $\alpha=0.05$ and goodness of fit were calculated. The entire evaluation process reached the same conclusion, *ie* the order of fitting the best model in descending order was the Log Normal Model, the 2nd Order Logarithmic Model and the Gaussian Model. The models fitted were all unimodal functions with a peak skewed to the left. Both Mathematically and ecologically, this skewness was explained by the fact that small and medium-sized gaps predominate in the broadleaved Korean pine forests.

Key words forest gap, broad leaved Korean pine forest, distribution model

收稿日期:2005-06-21

http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(30270222)、教育部高校青年教师奖励计划项目(2000103)、“十五”国家科技攻关项目(2001BA510B0704).

第一作者:张春雨,硕士生.主要研究方向:森林生态系统管理. Email:zcy_0520@163.com 地址:100083 北京林业大学资源与环境学院.

责任作者:赵秀海,教授,博士生导师.主要研究方向:森林生态学与森林经营学. 电话:010-62336082 Email:zhaohx@bjfu.edu.cn 地址:同上.

自1947年英国生态学家A.S. WATT提出“林隙”概念^[1]以来,国外学者对不同类型森林生态系统内林隙动态干扰体系进行了大量研究^[2-6]。我国林隙研究起步较晚,已经引起众多学者的广泛关注,并取得了大量卓越的成果,特别是近20年来,林隙研究已成为当前森林生态学研究热点之一。长白山林区阔叶红松林林隙研究主要集中在林隙结构特征、林隙内小环境状况、林隙更新规律以及林隙结构与物种更新之间的关系等几个方面^[7-10]。林隙大小是林隙的重要特征,直接影响着林隙内的小气候状况和微环境特征,对林隙内物种更新的种类、数量及分布产生重要影响^[11]。应用数学理论模型对林隙大小结构进行定量描述,在此基础上进一步探讨格局的形成和维持机制,对林隙分布格局及森林循环理论研究具有重要意义。本文根据以往研究结果^[12-14],结合林隙面积结构分布,应用高斯(Gaussian)分布、对数正态(Log Normal)分布和二阶对数分布(Logarithm 2nd Order)模型对长白山阔叶红松林的林隙大小结构进行研究,分析了模型的模拟效果,并对模型的拟合优度进行分析和评价,为进一步探讨林隙结构与林隙内物种更新的关系提供了理论基础。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

调查地设在中国科学院长白山森林生态系统定位站附近的阔叶红松林内,该区位于长白山自然保护区北坡,属温带大陆性山地气候,其气候特点是春季干燥多风,夏季温暖多雨,冬季漫长寒冷。年平均气温为3.3℃,8月份平均温度20.5℃,1月份平均温度-16.5℃,极端最高温度32.3℃,极端最低气温-37.6℃。年平均降水量在600~900 mm之间。土壤为山地暗棕色森林土,土层厚度20~100 cm,缓坡排水良好。

阔叶红松林是长白山西部地区的地带性顶级植被类型。乔木层主要有红松(*Pinus koraiensis*)、沙松(*Abies holophylla*)、鱼鳞松(*Picea jezoensis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、春榆(*Ulmus japonica*)、色木槭(*Acer mono*)、枫桦(*Betula costata*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、黄菠萝(*Phellodendron amurense*)、白桦(*Betula platyphylla*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、白牛槭(*Acer mandshurica*)、千金榆(*Carpinus cordata*)、花楷槭(*Acer ukurunduense*)、假色槭(*Acer pseudo-sieboldianum*)、糠椴(*Tilia mandshurica*)、春榆(*Ulmus japonica*)等,以红松、椴树、色木槭三者共同占据优势。中小乔木以槭

属为主,生长繁茂。灌木层主要有东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)、东北溲疏(*Deutzia amurensis*)、毛榛(*Corylus mandshurica*)、忍冬(*Lonicera japonica*)等。草本植物有山茄子(*Brachybotrys paridiformis*)、舞鹤草(*Maianthemum bifolium*)、透骨草(*Phryma leptostachya*)、苔草(*Carex spp.*)、水金凤(*Impatiens nolitangere*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 数据收集及分组

于2004年7月,在长白山北坡阔叶红松林林内,采用网格调查法,共调查88个林隙,记录林隙长轴和短轴长度,按椭圆形计算林隙面积。把冠空隙面积分成1(0~20 m²)、2(20~40 m²)、3(40~60 m²)、4(60~80 m²)、5(80~100 m²)、6(100~120 m²)、7(120~140 m²)、8(140~160 m²)、9(160~180 m²)、10(180~200 m²)、11(>200 m²)共11组,把扩展林隙面积分成1(40~80 m²)、2(80~120 m²)、3(120~160 m²)、4(160~200 m²)、5(200~240 m²)、6(240~280 m²)、7(280~320 m²)、8(>320 m²)共8个组,用上限排外法统计各组中林隙个数。

1.2.2 假设检验方法

回归要求总体符合以下3个假设前提:①总体在回归线周围呈正态分布;②残差之间彼此相互独立;③无论自变量如何变化,该总体的应变量的方差保持恒定^[15-16]。

1.2.2.1 正态分布假设检验

采用拟合优度Kolmogorov-Smirnov检验法(简称k-s检验法),进行正态分布假设检验。计算k-s检验的显著性概率,当 $p > 0.05$ 时,认为差异不显著,即该总体在回归线周围服从正态分布。

1.2.2.2 残差序列相关性假设检验

采用Durbin-Watson检验法,对残差进行序列相关性检验。DW统计量用来对残差之间的相关性进行量度,当 $1.5 \leq DW \leq 2.5$ 时,认为残差之间不存在自相关性; $DW > 2.5$ 或 $DW < 1.5$ 时,认为残差之间彼此相关。

1.2.2.3 方差恒性假设检验

采用Levene Median检验法,进行方差为常数性检验。计算出该检验的显著性概率,当 $p > 0.05$ 时,认为方差为常数。

1.2.3 拟合优度检验

应用t检验对回归系数进行显著异于零的假设检验,用方差分析对模型总体回归效果进行检验。计算复相关系数(R)、决定系数(R²)、校正决定系数(R_{adj}²)、回归标准误、预测残差平方和以及模型拟合能力,对模型进行优度评价^[15-17]。

本文根据林隙分布的实际情况选用高斯分布、对数正态分布和二阶对数分布模型对林隙大小结构分布规律进行拟合,这3种模型对极大和极小个体数目较少,中等状态个体数目较多的分布格局具有较好的拟合效果.

文中数据处理、图形生成以及模型拟合均采用SPSS公司的SPSS11.0和SigmaPlot8.0实现.

2 结果与分析

2.1 林隙大小结构

调查地区主要以中小型林隙为主,大林隙极少出现.冠空隙面积主要集中在 $20\sim 100\text{ m}^2$ 之间,平均面积为 71 m^2 ,冠空隙总面积占调查样地总面积的12.5%;扩展林隙面积主要集中在 $80\sim 240\text{ m}^2$ 之间,平均面积为 164 m^2 ,扩展林隙总面积占调查样地总面积的28.8%.冠空隙面积在 $20\sim 100\text{ m}^2$ 之间的林隙占林隙总数的80.7%,冠空隙面积小于 20 m^2 的林隙占林隙总数的2.3%,冠空隙面积大于 100 m^2 的林隙占林隙总数的17.0%;扩展林隙面积在 $80\sim 240\text{ m}^2$ 之间的林隙占林隙总数的81.8%,扩展林隙面积小于 80 m^2 的林隙占林隙总数的5.7%,扩展林隙面积大于 240 m^2 的林隙占林隙总数的12.5%.冠空隙和扩展林隙的大小结构都呈峰值左偏的偏山状分布(图1、2).

2.2 林隙大小结构模型拟合

2.2.1 林冠空隙大小结构拟合

应用高斯分布、对数正态分布和二阶对数分布模型对冠空隙大小结构分布规律进行研究.高斯分布假设检验结果如下:由 $1.5 < DW = 2.022 < 2.5$ 可知残差序列彼此不相关,由 $k-s$ 检验显著性概率 $p = 0.2476 > 0.05$ 可知总体在高斯曲线周围呈正态分布,由Levene Median检验显著性概率 $p = 0.4 > 0.05$ 可知总体方差为常数,所以应用高斯分布对该样本进行拟合时符合正态、残差序列不相关、方差为常数的假设前提.应用对数正态分布对该样本进行拟合时,由于 $DW = 2.7275 > 2.5$,Levene Median检验显著性概率 $p = 0.0389 < 0.05$,所以该模型不符合残差序列不相关和方差为常数的假设前提.应用二阶对数分布对该样本进行拟合时,由于 $DW = 1.1159 < 1.5$,所以该模型也不符合残差序列彼此不相关的假设前提.因此不能采用对数正态分布模型和二阶对数分布模型对冠空隙大小结构进行拟合(表1).

由表2可知,应用高斯分布模型拟合冠空隙大小结构时,复相关系数为0.951,决定系数为0.905,校正决定系数为0.882,回归标准误为2.928,预测

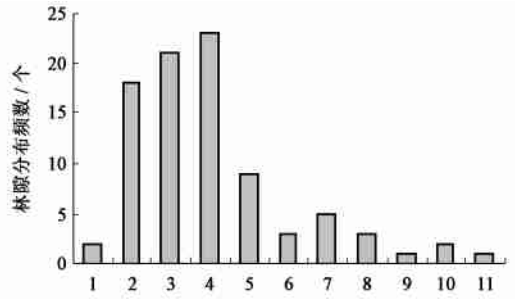


图1 冠空隙大小分布

FIGURE 1 Distribution of canopy gap size

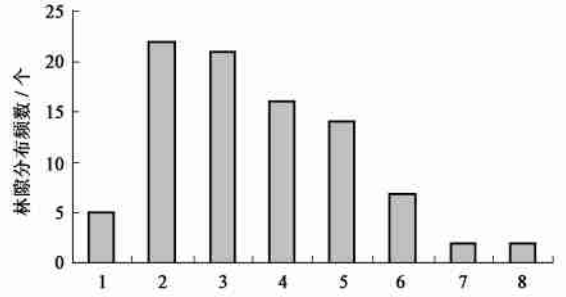


图2 扩展林隙大小分布

FIGURE 2 Distribution of expanded gap size

残差平方和为200.77,模型拟合度($\alpha = 0.05$)为0.9994,说明模型拟合良好.由回归系数 t 检验显著性概率 $p < 0.0001$ 可知,该模型回归系数拟合值显著异于零,都具有统计学意义.采用方差分析对高斯分布模型总体回归效果进行显著性检验,由方差分析显著性概率 $p < 0.0001$ 可知应用高斯分布模型对冠空隙大小结构进行拟合效果较好,整个回归模型具有统计学意义(表3),因此冠空隙大小结构服从高斯分布.冠空隙大小服从高斯分布表明长白山阔叶红松林冠空隙大小分布不均匀,这与冠空隙大小结构分布图(图1)相一致,冠空隙面积主要集中在 $20\sim 100\text{ m}^2$ 之间,占林隙总数的80.7%.

表1 模型假设检验

TABLE 1 Model hypothesis tests

分布模型	D-W	K-S 检验	Levene Median 检	
	统计量	显著性概率	验显著性概率	
冠空隙	高斯分布	2.022 2	0.247 6	0.400 0
	对数正态分布	2.727 5	0.584 7	0.038 9
	二阶对数分布	1.115 9	0.952 7	0.198 7
扩展林隙	高斯分布	2.480 9	0.802 3	0.619 4
	对数正态分布	2.083 9	0.731 8	0.662 0
	二阶对数分布	2.091 0	0.914 9	0.159 7

2.2.2 扩展林隙大小结构拟合

应用高斯分布、对数正态分布和二阶对数分布模型对扩展林隙大小结构进行拟合,由表1~3可知3种模型均有统计学意义(表格内各参数意义同上,由于篇幅所限,这里不再重复说明).结果表明,扩展林隙面积分布可以用高斯分布、对数正态分布和二阶对数分布进行理论描述.高斯分布、对数正态

表2 模型总体参数表

TABLE 2 Model summary

分布模型		复相关系数 R	决定系数 R^2	校正决定系数 R_{adj}^2	回归标准误	预测残差平方和	模型拟合度 ($\alpha=0.05$)
冠空隙	高斯分布	0.951	0.905	0.882	2.928	200.77	0.999 4
扩展林隙	高斯分布	0.929	0.863	0.809	3.580	284.22	0.958 6
	对数正态分布	0.981	0.962	0.947	1.890 7	42	0.999 4
	二阶对数分布	0.974	0.950	0.929	2.175 7	221.989	0.998 1

表3 模型分析表

TABLE 3 Model analysis

分布模型		分布概率密度函数	模型系数拟合值	回归系数显著性概率	模型总体回归效果方差分析显著性概率
冠空隙	高斯分布	$f(x) = ae^{-0.5\left(\frac{x-x_0}{b}\right)^2}$	$a=24.221 9$	$b=1.308 2$	$<0.000 1$
				$x_0=3.311 7$	$<0.000 1$
扩展林隙	高斯分布	$f(x) = ae^{-0.5\left(\frac{x-x_0}{b}\right)^2}$	$a=21.405 7$	$b=1.738 3$	$0.000 4$
				$x_0=3.201 2$	$<0.000 1$
	对数正态分布	$f(x) = ae^{-0.5\left(\frac{\ln\left(\frac{x}{x_0}\right)}{b}\right)^2} (x > 0)$	$a=23.302 8$	$b=0.548 0$	$<0.000 1$
				$x_0=2.548 8$	$<0.000 1$
	二阶对数分布	$f(x) = x_0 + a \ln x + b(\ln x)^2 (x > 0)$	$a=32.039 1$	$b=-16.981 1$	$0.000 6$
			$x_0=5.844 6$	$0.000 3$	$0.038 9$

分布和二阶对数分布均呈偏山状分布,说明长白山阔叶红松林扩展林隙大小分布不均匀,这与扩展林隙大小结构分布图(图2)相一致,扩展林隙面积主要集中在 $80 \sim 240 \text{ m}^2$ 之间,占林隙总数的 81.8% 。根据复相关系数、决定系数、校正决定系数比较模型拟合效果,拟合优度顺序分别为:对数正态分布 ($R=0.981, R^2=0.962, R_{adj}^2=0.947$) $>$ 二阶对数分布 ($R=0.974, R^2=0.950, R_{adj}^2=0.929$) $>$ 高斯分布 ($R=0.929, R^2=0.863, R_{adj}^2=0.809$)。根据回归标准误比较模型拟合效果,拟合优度顺序分别为:对数正态分布 ($1.890 7$) $>$ 二阶对数分布 ($2.175 7$) $>$ 高斯分布 (3.580)。根据预测残差平方和比较模型拟合效果,拟合优度顺序为:对数正态分布 (42) $>$ 二阶对数分布 (221.989) $>$ 高斯分布 (284.22)。根据模型拟合能力 ($\alpha=0.05$) 比较模型拟合效果,拟合优度顺序为:对数正态分布 ($0.999 4$) $>$ 二阶对数分布 ($0.998 1$) $>$ 高斯分布 ($0.958 6$)。可见根据复相关系数、决定系数、校正决定系数、回归标准误、预测误差平方和以及模型拟合能力 ($\alpha=0.05$) 对模型拟合优度进行评价时,其结果是一致的,模型拟合优度顺序为:对数正态分布 $>$ 二阶对数分布 $>$ 高斯分布(表2)。从拟合优度看,对数正态分布的拟合优度最高,而且其模型结构相对简单,是较理想的扩展林隙大小结构理论模型。

3 结论与讨论

构建林隙大小理论模型主要包括以下4个步骤:①根据林隙大小分布状况以及以往相关研究结果选择合适的理论模型;②对回归数据进行正态、序列不相关和方差恒定的假设检验;③应用 t 检验对模型参数进行显著异于零的假设检验,通过方差分析检验模型模拟效果;④计算相关系数和回归标准误等指标对模型进行优度评价。保证回归数据符合正态、序列不相关和方差恒定的假设前提,并对模型参数进行 t 检验是十分重要的,在以往研究中常常被忽视。

长白山阔叶红松林林隙主要是由树木的自然死亡和风倒而引起的,林隙形成木径级主要分布在 $50 \sim 70 \text{ cm}$,绝大多数林隙由 $1 \sim 4$ 株形成木形成,以2株林隙形成木者居多,平均每个林隙拥有 $1.92 \sim 2.65$ 株^[18-21]。因此,林木死亡后形成的林隙面积不会很大,调查地区主要以中小型林隙为主,极大和极小林隙均很少出现。本文所采用的分布模型均为偏山状分布,与上述长白山阔叶红松林林隙大小结构分布趋势相符。Runkle 在美国田纳西州温带森林中研究表明,林冠空隙面积符合对数正态分布^[13],与我们研究中所采用的模型分布相似,都呈偏山状分布。这可能与二者纬度相近,同属温带气候,森林类型及林隙自然干扰体系等接近有关。不同地区林隙

面积分布模型的研究结果不同, Lertman 在加拿大温哥华亚高山过龄林中的研究表明, 北温带森林林冠空隙大小分布呈负指数分布^[14], 而福建中亚热带常绿阔叶林林隙大小分布符合韦布尔分布, 呈倒 J 形^[8], 这种差异可能是由气候条件、植被组成以及林隙自然干扰体系等不同而引起的。

林隙大小结构模型拟合时面积区组的划分并无固定标准, 本研究中所采用的划分标准是从林隙大小分布的实际情况出发, 将区组个数控制在一定范围内, 结果表明这种划分对本研究较适用。试采用福建中亚热带常绿阔叶林林隙大小结构研究时区组划分方法(冠空隙以 60 m² 区段划分, 扩展林隙以 100 m² 区段划分)^[14], 对长白山阔叶红松林进行研究, 结果表明高斯分布、对数正态分布、二阶对数分布和韦布尔分布都无法对其进行模拟。这可能与区组划分尺度过大, 区组个数较少有关, 也可能与林隙结构特征有关, 福建中亚热带常绿阔叶林冠空隙与扩展林隙平均面积均大于长白山阔叶红松林^[14, 18-21]。因此在林隙大小结构拟合时应根据林隙大小的实际情况, 选用恰当的区组划分标准。

参 考 文 献

- [1] WATT A S. Pattern and process in the plant communities [J]. *Ecology*, 1947, 35: 1-22.
- [2] RUNKLE J R. Gap regeneration in some old-growth forests of the eastern United States [J]. *Ecology*, 1981, 62: 1 041-1 051.
- [3] RUNKLE J R. Patterns of disturbance in some old-growth mesic forests of eastern North America [J]. *Ecology*, 1982, 63: 1 533-1 546.
- [4] ANDREW N G, THOMAS A S. Microsite controls on tree seedling establishment in conifer forest canopy gaps [J]. *Ecology*, 1997, 78: 2 458-2 473.
- [5] DENSILOW J S, ELLISON A M, SANFORD R E. Tree-fall gap size effects on above- and below- ground processes in a tropical wet forest [J]. *Journal of Ecology*, 1998, 86: 597-609.
- [6] ARUNCHALAM A, ARUNACHALAM K. Influence of gap size and soil properties on microbial biomass in a subtropical humid forest of north-east India [J]. *Plant and Soil*, 2000, 223: 185-193.
- [7] 臧润国, 刘涛, 郭忠凌, 等. 长白山自然保护区阔叶红松林林隙干扰状况的研究 [J]. *植物生态学报*, 1998, 22(2): 135-142.
ZANG R G, LIU T, GUO Z L, et al. Gap disturbance regime in a broadleaved Korean pine forest in the Changbai Mountain Natural Reserve [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(2): 135-142.
- [8] 臧润国, 郭忠凌, 高文韬. 长白山自然保护区阔叶红松林林隙更新的研究 [J]. *应用生态学报*, 1998, 9(4): 349-353.
ZANG R G, GUO Z L, GAO W T. Gap regeneration in a broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountain Natural Reserve [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(4): 349-353.
- [9] 臧润国, 刘静芳, 董大方. 林隙动态与森林多样性 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
ZANG R G, LIU J F, DONG D F. *Gap dynamics and forest diversity* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999.
- [10] 臧润国, 徐化成, 高文韬. 红松阔叶林主要树种对林隙大小及其发育阶段更新反应规律的研究 [J]. *林业科学*, 1999, 35(3): 2-9.
ZANG R G, XU H C, GAO W T. Regeneration response of main tree species to gap size and gap development phase in the Korean pine broadleaved forest in Jiaohe, Northeast China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35(3): 2-9.
- [11] 刘庆, 吴彦. 滇西北亚高山针叶林林窗大小与更新的初步分析 [J]. *应用与环境生物学报*, 2002, 8(5): 453-459.
LIU Q, WU Y. Effects of gap size on regeneration of subalpine coniferous forests in northwest Yunnan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2002, 8(5): 453-459.
- [12] RUNKLE J R. Disturbance regimes in temperate forest [M]// PICKETT S T A, WHITE P S. *The ecology natural disturbance and patch dynamics*. New York: Academic Press, 1985.
- [13] LERTEMAN K P, KREBS C J. Gap-phase structure of a subalpine old-growth forest [J]. *Can J For Res*, 1991, 21: 1 730-1 741.
- [14] 闫淑君, 洪伟, 吴承桢. 中亚热带常绿阔叶林林隙面积的 Weibull 分布模型研究 [J]. *江西农业大学学报(自然科学版)*, 2002, 24(6): 802-805.
YAN S J, HONG W, WU C Z. A study on Weibull model for gap area in mid-subtropical evergreen broad-leaved forest in Wannulin [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2002, 24(6): 802-805.
- [15] 马庆国. 管理统计 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
MA Q G. *Management statistic* [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [16] 李冻菊. 统计学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
LI D J. *Statistics* [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003.
- [17] 张文彤. SPSS11.0 统计分析(高级篇) [M]. 北京: 北京希望电子出版社, 2002.
ZHANG W T. *SPSS11.0 statistics analysis (Advanced)* [M]. Beijing: Beijing Hope Electronic Press, 2002.
- [18] 于振良, 于贵瑞, 王秋凤, 等. 长白山阔叶红松林林隙特征及对树种更新的影响 [J]. *资源科学*, 2001, 23(6): 64-68.
YU Z L, YU G R, WANG Q F, et al. Canopy gap characteristics and their influences on the regeneration of broad leaved *Pinus koraiensis* forests in Changbai Mountain [J]. *Resources Science*, 2001, 23(6): 64-68.
- [19] 国庆喜, 葛剑平, 马承慧, 等. 长白山红松混交林林隙状况与更新研究 [J]. *东北林业大学学报*, 1998, 26(1): 4-7.
GUO Q X, GE J P, MA C H, et al. Gap regime and regeneration of *Pinus koraiensis* in Korean pine-mixed forest at Mt. Changbai [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1998, 26(1): 4-7.
- [20] 吴刚. 长白山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.
WU G. Characteristics of gap in Korean pine broad-leaved forests in Changbai mountain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(4): 360-364.
- [21] 付士磊, 刘兴双, 宋晓东, 等. 长白山自然保护区阔叶红松林林隙更新状况 [J]. *辽宁林业科技*, 2003(6): 1-3.
FU S L, LIU X S, SONG X D, et al. Gap regeneration in a broadleaved Korean pine forest in the Changbai Mountain Natural Reserve [J]. *Journal of Liaoning Forestry Science & Technology*, 2003(6): 1-3.

(责任编辑 赵 勃)