

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 17 期 Vol.33 No.17 **2013**

中国生态学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 17 期 2013 年 9 月 (半月刊)

## 目次

### 前沿理论与学科综述

- 植物角质层蜡质的化学组成研究综述 ..... 曾 琼, 刘德春, 刘 勇 (5133)
- 中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展 ..... 曹 磊, 宋金明, 李学刚, 等 (5141)

### 个体与基础生态

- 秸秆隔层对盐碱土水盐运移及食葵光合特性的影响 ..... 赵永敢, 逢焕成, 李玉义, 等 (5153)
- 盐地碱蓬二型性种子及其幼苗对盐渍环境的适应性 ..... 刘 艳, 周家超, 张晓东, 等 (5162)
- 不同抗旱性花生品种的根系形态发育及其对干旱胁迫的响应 ..... 丁 红, 张智猛, 戴良香, 等 (5169)
- 夏季苹果新梢生理指标与抗苹果绵蚜的关系 ..... 王西存, 周洪旭, 于 毅, 等 (5177)
- 花期海蓬子对盐胁迫的生理响应 ..... 刘伟成, 郑春芳, 陈 琛, 等 (5184)
- 白蜡多年卧孔菌生物学特性及驯化栽培 ..... 鲁 铁, 图力古尔 (5194)
- 重度火烧迹地微地形对土壤微生物特性的影响——以坡度和坡向为例 .....  
..... 白爱芹, 傅伯杰, 曲来叶, 等 (5201)
- 秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物生物量及固氮菌群落结构的影响 ..... 刘骁蓓, 涂仕华, 孙锡发, 等 (5210)
- 大穗型小麦叶片性状、养分含量及氮素分配特征 ..... 王丽芳, 王德轩, 上官周平 (5219)
- 复合不育剂 EP-1 对小鼠空间记忆与焦虑行为的影响 ..... 王晓佳, 秦婷婷, 胡 霞, 等 (5228)

### 种群、群落和生态系统

- 小兴安岭阔叶红松混交林林隙特征 ..... 刘少冲, 王敬华, 段文标, 等 (5234)
- 高寒矮嵩草群落退化演替系列氮、磷生态化学计量学特征 ..... 林 丽, 李以康, 张法伟, 等 (5245)
- 中亚热带人工针叶林生态系统碳通量拆分差异分析 ..... 黄 昆, 王绍强, 王辉民, 等 (5252)
- 高寒山区一年生混播牧草生态位对密度的响应 ..... 赵成章, 张 静, 盛亚萍 (5266)
- 乳山近海大型底栖动物功能摄食类群 ..... 彭松耀, 李新正 (5274)

### 景观、区域和全球生态

- 采伐干扰对大兴安岭落叶松-苔草沼泽植被碳储量的影响 ..... 牟长城, 卢慧翠, 包 旭, 等 (5286)
- 西南喀斯特地区轮作旱地土壤 CO<sub>2</sub> 通量 ..... 房 彬, 李心清, 程建中, 等 (5299)
- 干湿季节下基于遥感和电磁感应技术的塔里木盆地北缘绿洲土壤盐分的空间变异性 .....  
..... 姚 远, 丁建丽, 雷 磊, 等 (5308)
- 东北温带次生林和落叶松人工林土壤 CH<sub>4</sub> 吸收和 N<sub>2</sub>O 排放通量 ..... 孙海龙, 张彦东, 吴世义 (5320)
- 新疆东部天山蝶类多样性及其垂直分布 ..... 张 鑫, 胡红英, 吕昭智 (5329)
- 玉米农田空气动力学参数动态及其与影响因子的关系 ..... 蔡 福, 周广胜, 明惠青, 等 (5339)

天山北坡家庭牧场复合系统对极端气候的响应过程..... 李西良,侯向阳,丁 勇,等 (5353)

大城市边缘区景观破碎化空间异质性——以北京市顺义区为例..... 李 灿,张凤荣,朱泰峰,等 (5363)

资源与产业生态

基于 GLBM 模型的中国大陆阿根廷滑柔鱼鱿钓渔业 CPUE 标准化 ..... 陆化杰,陈新军,曹 杰 (5375)

三峡库区古夫河水质时空分异特征..... 冉桂花,葛继稳,苗文杰,等 (5385)

城乡与社会生态

汉、藏、回族地区农户的环境影响——以甘肃省张掖市、甘南藏族自治州、临夏回族自治州为例.....

..... 赵雪雁,毛笑文 (5397)

研究简报

中国近海浮游动物群落结构及季节变化..... 杜明敏,刘镇盛,王春生,等 (5407)

海洋污染物对菲律宾蛤仔的免疫毒性..... 丁鉴锋,闫喜武,赵力强,等 (5419)

衰亡期沉水植物对水和沉积物磷迁移的影响..... 王立志,王国祥 (5426)

伊洛河流域外来草本植物分布格局..... 郭屹立,丁圣彦,苏 思,等 (5438)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 316 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 32 \* 2013-09



**封面图说:** 帽儿山次生林林相——帽儿山属于长白山山脉的张广才岭西坡,松花江南岸支流阿什河的上游,最高海拔 805m,由侏罗纪中酸性火山岩构成,是哈尔滨市附近的最高峰,因其貌似冠状而得名。东北林业大学于 1958 年在此建立了实验林场。山上生长着松树、榆树、杨树及各种灌木等,栖息着山鸡、野兔等野生动物,在茂密的草地上还生长有各种蘑菇。其地带性植被为温带针阔混交林,目前状况为天然次生林。部分地方次生林转变为落叶松人工林后,落叶松林地的凋落物层影响了林地土壤水分的格局。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com



DOI: 10.5846/stxb201206180872

刘少冲,王敬华,段文标,陈立新,王丽霞,杜珊,赵健慧. 小兴安岭阔叶红松混交林林隙特征. 生态学报, 2013, 33(17): 5234-5244.

Liu S C, Wang J H, Duan W B, Chen L X, Wang L X, Du S, Zhao J H. Gap characteristics in the mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5234-5244.

## 小兴安岭阔叶红松混交林林隙特征

刘少冲<sup>1</sup>, 王敬华<sup>2</sup>, 段文标<sup>1,\*</sup>, 陈立新<sup>1</sup>, 王丽霞<sup>1</sup>, 杜珊<sup>1</sup>, 赵健慧<sup>1</sup>

(1. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 2. 中国农村技术开发中心, 北京 100045)

**摘要:** 对小兴安岭阔叶红松混交林林隙基本特征进行了研究。结果表明: 林隙的线状密度为 31.78 个/km, 冠空隙和扩展林隙所占的面积比例分别为 15.71% 和 30.78%; 冠空隙的年干扰频率为 0.46%, 干扰轮回期约为 434.8a。冠空隙的大小变化在 42.12—372.52m<sup>2</sup> 之间, 平均为 153.37m<sup>2</sup>; 扩展林隙的大小变化在 98.65m<sup>2</sup>—633.10m<sup>2</sup> 之间, 平均为 300.44m<sup>2</sup>。冠空隙和扩展林隙面积分布格局均符合 Weibull 分布。林隙形成方式主要为干基折断, 占总形成木总数的 35.29%, 其次为掘根风倒, 占 28.43%。平均每个林隙的形成木为 4.98 株, 由红松、白桦、枫桦、冷杉形成, 径级在 20—30 cm 之间, 高度在 15—30 m 之间。冠空隙的直径与高度比值的相对频率的分布呈单峰型曲线, 当比值为 0.30—0.45 时, 出现峰值; 而扩展林隙的直径与高度比值的相对频率的分布呈双峰型曲线, 当比值分别为 0.75—0.90 和 1.05—1.15 时, 出现峰值。林隙边缘木胸径级的多度分布和高度级多度分布符合 Weibull 分布, 但不符合正态分布。约 13.41% 的边缘木未出现偏冠现象, 偏冠率在 0.5—0.7 之间的边缘木占 70.49%。

**关键词:** 小兴安岭; 阔叶红松混交林; 林隙特征

## Gap characteristics in the mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains

LIU Shaochong<sup>1</sup>, WANG Jinghua<sup>2</sup>, DUAN Wenbiao<sup>1,\*</sup>, CHEN Lixin<sup>1</sup>, WANG Lixia<sup>1</sup>, DU Shan<sup>1</sup>, ZHAO Jianhui<sup>1</sup>

1 College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 China's Rural Technology Development Center, Beijing 100045, China

**Abstract:** Gap characteristics were studied in the mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains. The results showed that the linear gap density in the forest was 31.78 gaps/km. The canopy gaps and expanded gaps occupied 15.71%, and 30.78% of total investigated area, respectively. The yearly gap disturbance frequency was 0.46% and the disturbance rotation was 434.8 years. Canopy gaps varied from 42.12 to 372.52 m<sup>2</sup> and average area of canopy gaps was 153.37m<sup>2</sup>. Expanded gaps varied from 98.65m<sup>2</sup> to 633.10m<sup>2</sup> and average area of expanded gaps was 300.44m<sup>2</sup>. The distribution pattern in both canopy gap area and expanded gap area followed Weibull model. The major means of gap formation was breakage at base (35.29% of the total), and the second was uprooting (28.43%). The average number of gap makers was 4.98 per gap. Major gap makers were *Pinus koraiensis*, *Betula platyphylla*, *Abies nephrolepis*, *Betula costata*, of which the diameter at breast height (DBH) were between 20—30 cm and the height ranged from 15 to 30 m. For canopy gaps, their distribution in relative frequency of the ratio of their diameter to the height of forest gap ( $d_{cc}/H$ ) presented single peak curve, the peak value occurred when the ratio of  $d_{cc}/H$  was between 0.30—0.45, but for expanded gap, their distribution exhibited double peak curves, the peak value came when the ratio of  $d_{cc}/H$  was between 0.75—

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金 (DL13BA05); 国家自然科学基金项目 (31270666); 哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目 (RC2012LX002018); 黑龙江省自然科学基金项目 (C201231)

收稿日期: 2012-06-18; 修订日期: 2012-11-19

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dwbiao88@163.com

0.90 and between 1.05—1.15, respectively, in the mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains. The distribution of DBH classes and tree height classes of gap border trees followed Weibull distribution model but they did not follow the normal distribution model. About 13.41% of GBT had regular crowns, the GBT, of which the ratios of crown inclination (RCI) ranged from 0.5 to 0.7, comprised about 70.49% of total GBT.

**Key Words:** Xiaoxing'an Mountains; mixed broad-leaved Korean pine forest; gap characteristics

林隙是指森林群落中老龄树死亡或因偶然因素(如干旱、台风、火灾等)导致成熟阶段优势树种的死亡,从而在林冠层造成空隙的现象<sup>[1]</sup>。美国森林生态学家 Runkle 把林隙分为两类:(1)冠空隙或者实际林隙:是指直接处于林冠层隙下的土地面积或空间。(2)扩展林隙指由冠空隙周围树木的树干所围成的土地面积或空间,包括实际林隙和其边缘到周围树木树干基部所围成的面积或空间两部分<sup>[2]</sup>。

林隙形成直接影响着森林的结构,林隙内的生态环境,显著改变了资源的可利用程度,为植物种子萌发、苗木定居、幼树生长等自然更新过程提供了有利条件<sup>[3]</sup>。对林隙特征的研究已成为探讨森林群落结构动态、物种多样性的维持以及进行森林可持续经营管理的重要理论基础,对其研究成为生态研究的热点和重点之一<sup>[4-5]</sup>。国外对林隙的特征、干扰和生物多样性维持等方面进行了深入研究<sup>[6-9]</sup>。我国一些学者对温带、亚热带和热带不同森林生态系统的林隙特征、干扰状况、树种更新等<sup>[10-14]</sup>进行了相关的探索,对林隙边缘木的偏冠现象、边缘木的数量等特征<sup>[15-16]</sup>进行了探讨,但是应用模型进行边缘木结构分布拟合的研究还为数不多<sup>[17-20]</sup>。总的看来,对林隙时空格局及干扰规律进行了较为广泛的探索。但是,迄今对小兴安岭阔叶红松混交林林隙特征的系统研究并不多见。为此,本文采用样线调查法,对小兴安岭凉水国家级自然保护区原始阔叶红松混交林林隙基本特征进行了调查和分析,主要探讨以下几个问题:(1)林隙的干扰频率和大小结构;(2)林隙的形成方式;(3)林隙形成木的种类组成和结构特征;(4)林隙边缘木的结构及偏冠率特征。通过这几项调查,了解阔叶红松混交林的变化规律,为小兴安岭凉水国家级自然保护区可持续经营提供理论参考和数据支持。

## 1 研究地区自然概况与研究方法

### 1.1 研究地区自然概况

研究地点设在黑龙江省伊春市带岭区凉水国家级自然保护区(47°7'39"—47°14'22"N, 128°48'30"—128°55'50"E)。试验地位于该保护区的第12号林班的阔叶红松混交林内,海拔约400m,坡度4°—18°,土壤为暗棕壤,年平均气温-0.3℃,年平均最高气温7.5℃,年平均最低气温-6.6℃。年平均降水量676.0mm,全年降水日数120—150d,积雪期130—150d,年平均相对湿度78%—96%,年平均蒸发量805.4mm。年日照时数1850h。年平均地温1.2℃,冻土约2.0m。河流结冰期长达6个月,无霜期100—120d。地带性植被是以红松(*Pinus koraiensis*)为主的针阔混交林,属温带针阔叶混交林地带北部亚地带植被。其组成以红松为主,伴生着紫椴(*Tilia amurensis*)、枫桦(*Betula costata*)、大青杨(*Populus ussuriensis*)、裂叶榆(*Ulmus laciniata* Mayr.)、五角槭(*Acer mono*)和花楷槭(*Acer ukurunduense*)等20余种阔叶树种,主要下木有刺五加(*Acanthopanax senticosus*)、毛榛子(*Corylus mandshurica*)、珍珠梅(*Sorbaria sorbifolia*)、东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)等,草本植物主要有苔草(*Carex* spp.)、猴腿蹄盖蕨(*Athyrium brevifrons* Nakai ex Kitag.)和小叶芹(*Aegopodium alpestris* Ledeb.)等。藤本植物有山葡萄(*Vitis amurensis* Rupr.)、五味子(*Schisandra chinensis* (Turez.) Baill.)、狗枣猕猴桃(*Actinidia kolomikta*)等。

### 1.2 研究方法

在阔叶红松混交林试验地内,采用样线调查法,随机设置2条相隔100m的样线。根据罗盘仪所指的方向,由西北向东南方向穿行,第1条样线为490m,第2条样线为800m,对样线中出现的每个林隙进行调查。用测绳实际测量走过的距离,测定始终由同一人完成。在每个林隙中心按照罗盘所指的北、东北、东、东南、

南、西南、西、西北 8 个方向记录林隙的长度(分别按冠空隙和扩展林隙记载),确定林隙形成木(GM)的种类、数量、状态(分干中折断、干基折断、掘根风倒和枯立 4 类)、直径、树高、腐烂程度以及林隙边缘木的种类、胸径和高度。林隙年龄的确定采用查取轮枝法、生长锥法和估测法相结合的方法进行。对于有腐朽倒木且其上存在更新的幼苗、幼树和大树时,采用查取轮枝法、生长锥法确定林隙的年龄。对于已彻底分解且无法辨认倒木的林隙,采用估测法确定其年龄,即根据文献记载凉水自然保护区的开发年份和本地有经验的林业调查者综合判断。

### 1.3 数据处理

#### 1.3.1 林隙面积及形状指数的计算

林隙大小的测定方法可归纳为:椭圆法、等角多边形法、三角形法、平面相片法、航片法、树冠投影的估算法以及把研究样地划分成一定大小的样方后,判断小样方是不是林隙的网格方法<sup>[6,8-9]</sup>。但由于各自的缺陷,没有一种方法被广泛采用。目前,等角八边形法仍然是估计林隙面积的主要方法。计算冠空隙(简称 CG)和扩展林隙(简称 EG)的面积采用等角多边形计算公式:  $A = 0.5 \sum_{i=1}^n l_{i+1} \cdot l_i \sin(2\pi/n)$ , 式中  $l_{n+1}$  等于  $l_1$  ( $i=n+1$  也是第一个点,  $i=1$ )<sup>[21]</sup>。A 为林隙面积( $m^2$ )。林隙周长的计算采用等角八边形的方法,得到其近似值。林隙形状指数计算公式<sup>[21]</sup>:  $SI = P/(2\sqrt{\pi A})$ , 式中 SI 为林隙形状指数;P 为林隙周长(m);A 为林隙面积( $m^2$ )。偏冠现象用偏冠率(简称 RCI)来度量。它是指在林隙中心与边缘木的连线上,林隙内的最大枝条长度与该连线上树冠宽度的比值<sup>[15]</sup>。

#### 1.3.2 Weibull 分布模型

Weibull 分布的概率函数为:  $f(x) = \frac{c}{b}(x-a)^{c-1} \exp\left(-\frac{(x-a)^c}{b}\right)$  ( $x \geq a$ )

Weibull 分布有 3 个参数,  $b > 0$  为尺度参数,  $c > 0$  为形状参数,  $a$  为位置参数。当  $c < 1.0$ , Weibull 分布呈倒 J 形;当  $1.0 < c < 3.6$ , 呈正偏山状分布;  $c = 3.6$ , 近似于正态分布;  $c > 3.6$ , 转向负偏山状分布。因此, 形状参数能较好地反映分布情况, 是一个具有生态学意义的 Weibull 分布参数。Weibull 分布参数求解方法很多, 有最大似然估计、矩法、回归法、改进单纯形法<sup>[22-25]</sup>。本文采用三参数最大似然估计法, 并用柯尔莫哥洛夫检验法评价威布尔分布模型对林隙冠空隙和扩展林隙面积以及边缘木径级和高度级拟合的适应程度。计算过程为: 首先求出各组的理论频数, 计算出累积概率  $F(x_i)$ , 同时求出各组的实际频数  $n_i$ , 及其相应的实际累积频率  $F_n(x_i)$ , 将  $F(x_i)$  与  $F_n(x_i)$  进行比较, 以  $\Delta = |F(x_i) - F_n(x_i)|$  及  $|F(x_i) - F_n(x_{i-1})|$  反映理论分布与实际分布的差异程度, 求算  $D_n = \sup \Delta = \sup \{|F(x_i) - F_n(x_i)|, |F(x_i) - F_n(x_{i-1})|\}$ , 再找出  $D_n$  的临界值, 通过理论分布函数  $F(x)$  与样本累积频率分布函数  $F_n(x)$  的比较作出结论<sup>[17]</sup>。

#### 1.3.3 正态分布

正态分布的概率密度函数为:  $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$

式中,  $\bar{x}$  为随机变量  $x$  的数学期望;  $\sigma$  为随机变量  $x$  的标准差。

## 2 结果分析

### 2.1 林隙的干扰频率

运用样线调查法, 沿 2 条样线穿行的总距离为 1290m, 线路上出现的林隙数总计 41 个, 即平均每穿行 100m, 会遇到 3.18 个林隙, 林隙的线状密度为 31.78 个/km。在调查样线上, 处于扩展林隙中的线段总计 397m, 也就是说扩展林隙在整个林分中所占的比例平均为  $397/1290 = 30.78\%$ , 这个比例可以近似地理解为扩展林隙面积在林分面积中所占的百分比<sup>[5]</sup>。在所调查的 41 个林隙中, 冠空隙的平均面积  $ACG = 153.37m^2$ , 而扩展林隙的平均面积  $AEG = 300.44m^2$ , 冠空隙和扩展林隙的相对比例平均为  $ACG/AEG = 51.05\%$ 。所以, 冠空隙在整个林分中所占的平均比例为  $30.78\% \times 51.05\% = 15.71\%$ 。

在 1290m 的样线上,遇到的 41 个林隙中最老的林隙是 70a,最年轻的林隙是 1a,林隙的形成速率平均为  $41/1.290/(70-1)=0.46 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中,冠空隙的形成速率为  $4.46 \times 51.05\% = 2.28 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,扩展林隙的形成速率为  $397/1.290/(70-1)=4.46 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。以上分析表明:在阔叶红松混交林中,平均每年约有  $397/1290/(70-1) \times 100\% = 0.45\%$  的面积转化为扩展林隙,约有  $0.45 \times 51.05\% \times 100\% = 0.23\%$  的林冠面积转化为冠空隙,平均每年每公里上约有 0.46 个林隙出现,其中每年处于冠空隙中的线段长度平均每公里约有 2.28m,而处于扩展林隙中的线段长度平均每公里有 4.46m。照此计算,林隙干扰的周期为  $1/0.23\% = 434.8 \text{ a}$ 。

## 2.2 林隙的大小结构

林隙的大小不仅可反映林隙内微环境因子的变动,而且还可提供林隙内更新所能利用的空间资源。根据林隙的两种不同定义,以  $50 \text{ m}^2$  为级别,采用上限排外法,统计各级内出现的林隙数和相对百分比以及各级面积总和所占百分比(表 1,表 2)。由表 1 可知,小兴安岭阔叶红松混交林冠空隙的面积以  $<200 \text{ m}^2$  的居多,占总冠空隙数量的 82.93%, $>300 \text{ m}^2$  的冠空隙很少,占总林隙数量的 4.88%。从面积百分比来看,100—200  $\text{m}^2$  的冠空隙面积最大,占 57.19%, $<50 \text{ m}^2$  的所占面积最小,仅占 0.67%。扩展林隙面积大多数在 200—400  $\text{m}^2$  之间,占扩展林隙数量的 73.17%,小于 100  $\text{m}^2$  和大于 500  $\text{m}^2$  的扩展林隙较少,仅占扩展林隙数量的 7.32%(表 2)。

表 1 小兴安岭阔叶红松混交林林冠空隙(CG)大小结构

Table 1 Size structure of CG in the mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains

CG 级 Size/ $\text{m}^2$	冠空隙数 Numbers of CG	冠空隙总面积 Total area of CG / $\text{m}^2$	个数百分比 CG number/%	面积百分比 Area/%
<50	1	42.12	2.44	0.67
50—100	10	838.36	24.39	13.33
100—150	11	1447.93	26.83	23.03
150—200	12	2147.74	29.27	34.16
200—250	5	1119.33	12.20	17.80
>300	2	692.65	4.88	11.02
合计 Total	41	6288.13	100	100.00

在所调查的 41 个林隙中,冠空隙的最小面积为  $42.12 \text{ m}^2$ ,最大为  $372.52 \text{ m}^2$ ,平均为  $153.37 \text{ m}^2$ ,而扩展林隙的最小面积为  $98.65 \text{ m}^2$ ,最大面积为  $633.10 \text{ m}^2$ ,平均为  $300.44 \text{ m}^2$ 。冠空隙平均面积约为扩展林隙平均面积的 51.05%。根据冠空隙划分的 6 个级别来计算,每级平均林隙数为 6.8333 个,每  $\text{m}^2$  有冠林隙 0.0446 个,即每 100  $\text{m}^2$  有 4.5 个林隙,平均每个冠空隙占据  $22.44 \text{ m}^2$ ;根据扩展林隙划分的 9 个级别来计算,每级平均林隙数为 4.5556 个,每  $\text{m}^2$  有 0.0152 个扩展林隙,即每 100  $\text{m}^2$  有 1.5 个扩展林隙,平均每个扩展林隙占据  $65.95 \text{ m}^2$ 。综上所述,小兴安岭阔叶红松混交林林隙属中小林隙型,是森林更新演替的必要过程,进一步说明了小兴安岭阔叶红松混交林是比较稳定的森林群落。

表 2 小兴安岭阔叶红松混交林扩展林隙(EG)大小结构

Table 2 Size structure of EG in the mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains

EG 级 Size/ $\text{m}^2$	扩展林隙数 Numbers of EG	扩展林隙总面积 EG area/ $\text{m}^2$	个数百分比 EG number/%	面积百分比 Area/%
50—100	1	98.65	2.44	0.80
100—150	1	125.16	2.44	1.02
150—200	4	701.19	9.76	5.69
200—250	7	1545.81	17.07	12.55
250—300	11	3157.34	26.83	25.63
300—350	5	1576.47	12.20	12.80
350—400	7	2674.63	17.07	21.71
400—450	3	1271.68	7.32	10.32
>500	2	1167.31	4.88	9.48
合计 Total	41	12318.24	100	100.00



一些学者应用正态分布、对数正态分布、指数分布及 Weibull 分布模型对不同地域、不同林型的林隙进行了探讨,普遍认为 Weibull 分布在研究森林林隙面积大小分布规律时适用性更广,是一个理想的理论模型<sup>[17-19]</sup>。本文在数据预处理中采用了 Weibull 模型,高斯分布、对数正态和二阶对数拟合林隙大小结构,结果表明高斯分布、对数正态分布和二阶对数分布都无法对其进行模拟,因此予以剔除。应用 Weibull 分布模型对阔叶红松混交林林隙面积大小结构进行拟合与检验。结果表明,无论是林隙的冠空隙还是扩展林隙,面积分布均符合 Weibull 分布(表 3)。

表 3 林隙面积的 Weibull 分布拟合结果

Table 3 The simulated results of gap area by Weibull distribution

参数 Parameter	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	$D_n = \text{Max}  F(u) - F_n $	<i>D</i> <sub>0.05</sub>	结果 Result
冠空隙 CG	1.0000	195.6653	1.8005	0.5752	0.8846	符合
扩展林隙 EG	51.0000	279.9499	1.7934	0.5752	0.8952	符合

### 2.3 林隙的形成方式

林隙是树冠干扰的产物,林冠层在空间上形成不连续就表现为一定尺度的空隙。在调查的 41 个林隙中,最常见的林隙形成方式有以下 4 种:(1)主林层干中折断(即折断的高度在离开树基 1.5m 以上),大多是由于强风引起的,部分是由胸径较大的掘根倒木压断引起;(2)干基折断,一方面由风力产生,另一方面是因为树木衰老,基部强度减弱,风或重力等外力引起;(3)掘根风倒,是由于风力作用而使树木连根拔起,形成丘和坑,并且连根拔起的树木还会导致沿倾倒方向的树木大枝折断,这种林隙形成方式产生的林隙面积较大;(4)枯立,指树木已死亡,树枝全部或部分折断,枝叶完全脱落,主干直立于林中,产生的林隙面积较小。在调查的 204 株形成木中,干中折断的为 43 株(占 21.08%),干基折断的为 72 株(占 35.29%),掘根风倒的为 58 株(占 28.43%),枯立的有 31 株(占 15.20%)。从表 4 可以看出,小兴安岭阔叶红松混交林林隙是一种或几种方式共同形成的,主要方式是树干(干基和干中)折断,其次为掘根风倒,再次为枯立。

表 4 阔叶红松混交林林隙的形成方式

Table 4 The manners of gap formation in the mixed broad-leaved Korean pine forest

形成方式 Manners of formation	林隙数 Numbers of gaps	百分比 Percentage/%	形成方式 Manners of formation	林隙数 Numbers of gaps	百分比 Percentage/%
BT+BB	3	7.32	BB+U	9	21.95
S	2	4.88	BB+S	2	4.88
BB+U+S	2	4.88	BT+U+S	5	12.20
U	3	7.32	BT+U+S+BB	3	7.32
BT+U	3	7.32	BB	1	2.44
U+S	5	12.20	BT+BB+S	2	4.88
BT+BB+U	1	2.44	合计 Total	41	100.00

BT:干中折断 Breakage at trunk, BB: 干基折断 Breakage at base, U: 掘根风倒 Uprooting, S: 枯立 Standing death

### 2.4 单个林隙形成木的数量特征

森林中的林隙,有时由一株形成木形成,有时由多株形成木共同形成。对小兴安岭阔叶红松混交林林隙形成木的数量特征进行了统计(表 5)。结果表明:有 5 株形成木形成的林隙最多,占 24.39%;由 3 株、4 株和 6 株形成的林隙共占 51.21%;其它株数形成的林隙数量较少,占 24.40%。可见,在小兴安岭阔叶红松混交林中,绝大多数的林隙是由 3—6 株形成木所形成的。在所调查的 41 个林隙中,共有 204 株形成木,平均每个林隙形成木为 4.98 株,每株形成木所能形成的冠空隙面积(CG)为 30.82 m<sup>2</sup>,形成的扩展林隙面积(EG)为 60.38 m<sup>2</sup>。



2.5 林隙形成木的特征

林隙形成木的特征是指林隙形成木的组成结构、径级结构和高度结构,其直接或间接地影响着林隙的环境特征及树种的更新。所以进行阔叶红松混交林林隙形成木特征的研究对全面认识阔叶红松混交林生态系统动态过程具有重要意义。

2.5.1 林隙形成木的组成结构

林隙形成木的组成结构是指形成林隙的树种及其比例。林隙形成木的组成与林隙优势树种的组成密切相关,一般林分中较大的优势木构形成木的比例大。把在小兴安岭阔叶红松混交林林隙中所调查的 41 个林隙作为一个总体,林隙形成木的组成统计结果见表 6。从表 6 可以看出,构成林隙形成木的主要树种是红松、白桦、冷杉、枫桦,腐烂程度较严重的,无法判别其树种组成,在表 6 树种一栏里将其列为“无法确定的树种”。

2.5.2 林隙形成木的径级结构

林隙形成木的径级结构是指形成林隙的各树种在不同径级上的株数分配比例。形成木的大小直接影响着林隙的大小,树木只有达到一定的径级并到达主林层后,才有可能在死亡后形成林隙。以 10cm 作为一个径级单位(上限排外法),各树种在不同的径级内的株数统计结果见表 7。从表 7 可以看出,各林隙形成木在不同径级中的株数分配比例不同,但它们都以 50cm 以下居多,占 75.98%。调查发现,在小兴安岭阔叶红松混交林林隙内,主林层的主要树种在胸径达到 20cm 以上(占 59.80%)才开始倾倒,20cm 以下(占 28.92%)的林隙形成木是由于主林层树木倒下时的受害者。由大径级(胸径 50cm 以上)的树木形成的林隙占(占 7.84%)。

表 5 单个林隙形成木的数量及其百分比

Table 5 Numbers of gap makers in each individual gap and the percentage

形成木数 Numbers of gap makers	林隙数 Numbers of gaps	百分比/% Percentage
2	3	7.32
3	7	17.07
4	8	19.51
5	10	24.39
6	6	14.63
7	4	9.76
9	1	2.44
10	1	2.44
12	1	2.44
合计 Total	41	100.00

表 6 阔叶红松混交林林隙形成木的组成结构

Table 6 Species composition structure of gap makers in the mixed broad-leaved Korean pine forest

树种 Species	株数 Number of individuals	百分比/% Percentage
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	58	28.43
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	31	15.20
五角槭 <i>Acer mono</i>	19	9.31
冷杉 <i>Abies nephrolepis</i>	32	15.69
枫桦 <i>Betula costata</i>	21	10.29
青楷槭 <i>Acer tegmentosum</i>	9	4.41
紫椴 <i>Tilia amurense</i>	11	5.39
无法确定的树种	23	11.27
合计 Total	204	100.00

表 7 林隙形成木的径级结构

Table 7 Diameter class structure of gap makers

树种 Species	胸径级 DBH class/cm								Σ	%
	?	<20	20—30	30—40	40—50	50—60	60—70	≥70		
红松 <i>Pinus koraiensis</i>		2	9	17	14	8	3	5	58	28.43
白桦 <i>Betula platyphylla</i>		9	13	9					31	15.20
五角槭 <i>Acer mono</i>		14	5						19	9.31
冷杉 <i>Abies nephrolepis</i>		12	11	6	3				32	15.69
枫桦 <i>Betula costata</i>		11	8	1	1				21	10.29
青楷槭 <i>Acer tegmentosum</i>		5	3	1					9	4.41
紫椴 <i>Tilia amurense</i>		6	5						11	5.39
无法确定的树种	23								23	11.27
合计 Total	23	49	54	34	18	8	3	5	204	100.00

### 2.5.3 林隙形成木的高度结构

林隙形成木的高度结构是指形成林隙的各树种在不同高度级内的株数分布情况。将所调查的 41 个林隙作为总体,统计各树种在各高度级内的株数(表 8)。从表 8 可以看出,树种形成林隙时高度在 15—30m 以上的占 80.39%。一般来说,上层的林隙形成木是林隙的真正制造者,下层部分林隙形成木是由于上层形成木折倒时受机械损伤或小气候的剧烈改变以及竞争中的自然淘汰而引起的。

表 8 林隙形成木的高度结构  
Table 8 Height structure of gap makers

树种 Species	高度级 Height class/m							$\Sigma$
	?	<10	10—15	15—20	20—25	25—30	$\geq 30$	
红松 <i>Pinus koraiensis</i>				2	9	42	5	58
白桦 <i>Betula platyphylla</i>			3	9	11	8		31
五角槭 <i>Acer mono</i>		5	5	7	2			19
冷杉 <i>Abies nephrolepis</i>			1	4	12	14	1	32
枫桦 <i>Betula costata</i>			1	6	8	6		21
青楷槭 <i>Acer tegmentosum</i>		1		2	4	2		9
紫椴 <i>Tilia amurense</i>			1		6	4		11
无法确定的树种	23							23
合计 Total	23	6	11	30	52	76	6	204

? 指倒木腐烂较为严重,无法确定其高度

### 2.6 林隙边缘木特征

群落中主林层的乔木死亡形成林隙后,其周围的高度达到林冠层的树木称为林隙边缘木(简称 GBT),它是衡量林隙特征的一个重要指标。林隙边缘木构成了林隙的大小和形状边界,影响着林隙的填充方式、物种传播和环境因子的变化<sup>[15]</sup>。当林隙面积较小时,林隙的填充方式主要以边缘木的侧生长来进行填充,而当林隙面积较大时,林隙内的幼苗能够迅速生长从而可以填充林隙。另外,边缘木高度和林冠厚度或向内冠幅影响着进入到林隙下层的光照,较高的边缘木能维持林隙内部环境的稳定性。

#### 2.6.1 林隙边缘木的径级和高度结构特征

在 41 个林隙中,共调查到 410 株边缘木,其中胸径最大的为 90.7cm,最小的为 10.0cm,平均胸径为 32.92cm。根据胸径的测定结果,把胸径分为 7 个等级(表 9),由表 9 可以看出,各径级所包含的个体数以及占总体的比例从大到小排列为:Ⅱ级>Ⅰ级>Ⅲ级>Ⅳ级>Ⅴ级>Ⅵ级>Ⅶ级。Ⅱ级所占比例最大,为 129 株,占总体 31.46%;胸径>70 cm 的个体数有 18 株,占总体 4.39%。

表 9 林隙边缘木的径级结构  
Table 9 Diameter class structure of gap border trees

径级 DBH class/cm	I 级 <20	Ⅱ级 20—30	Ⅲ级 30—40	Ⅳ级 40—50	Ⅴ级 50—60	Ⅵ级 60—70	Ⅶ级 $\geq 70$
个体数 Number	87	129	74	52	27	23	18
%	21.22	31.46	18.05	12.68	6.59	5.61	4.39

在调查的 410 株边缘木中,最高的为 31.0m,最矮的为 8.0m,平均高度为 19.6m,与该群落乔木层中主要树木的高度相当。把边缘木高度分为 6 级(表 10),由表 10 可以看出,15—20m 之间的树木数量最多,有 148 株,占 36.10%;其次为 20—25m 之间的,有 113 株,占 27.56%, $\geq 30$ m 的最少,有 19 株,占 4.63%。

用威布尔分布模型拟合林隙边缘木的胸径级分布。拟合结果采用柯尔莫哥洛夫临界值检验: $D_n = 0.5834 < D_{0.05,410}$ ,林隙边缘木的胸径级多度分布遵循威布尔分布。用正态分布模型拟合其胸径级分布,拟合结果采用卡方值检验: $\sum X^2 = 70.5827 > X^2_{(0.05)} = 0.0000$ ,林隙边缘木的胸径级多度分布不符合正态分布。对林隙

边缘木的高度级分布拟合结果为:威布尔分布, $D_n = 0.5973 < D_{0.05,410}$ ,林隙高度级符合威布尔分布;用正态分布拟合结果为 $\sum X^2 = 13.0607 > X^2_{(0.05)} = 0.0045$ ,林隙边缘木的高度级多度分布也不符合正态分布(表 11)。

表 10 林隙边缘木的高度结构  
Table10 Height structure of gap border trees

高度级 Height class/m	I 级<10	II 级 10—15	III 级 15—20	IV 级 20—25	V 级 25—30	VI 级≥30
个体数 Number	31	65	148	113	34	19
百分比 Percentage/%	7.56	15.85	36.10	27.56	8.29	4.63

表 11 径级和高度级的 Weibull 分布拟合结果  
Table 11 The simulated results of DBH class and height class by Weibull distribution model

参数 Parameter	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	$D_n = \text{Max}  F(u) - F_n $	$D_{0.05}$	结果 Result
径级 DBH class	10.1000	39.2514	1.8062	0.5834	0.8677	符合
高度级 Height class	5.1000	16.7577	1.8061	0.5973	0.8677	符合

林隙边缘木胸径和高度的平均值与该群落乔木层主要树木的平均值基本一致,这表明林隙形成木死亡时,其周围大多数树木的高度已达到林冠层,少数树木是在林隙形成后到达林冠层的。随着林隙的不断更新和填充,边缘木的状态也处于动态变化中,对林隙边缘木高度、径级分布的研究,有助于揭示林隙结构与动态和更新所处的状态,了解其微生境的异质性特征。

2.6.2 林隙边缘木的偏冠率分布特征

林隙形成后,林隙边缘木朝向林隙内的树枝生长速度比与其相反方向的树枝生长速度快,即出现偏冠现象。对 41 个林隙 410 株边缘木的偏冠率调查结果表明(表 12),有 55 株(占 13.41%)未出现偏冠现象,绝大多数边缘木的偏冠率在 0.5—0.7 之间(共 289 株,占 70.49%),偏冠率在 0.7—0.8 的有 33 株,占 8.05%,偏冠率在 0.4—0.5 的有 17 株,占 4.15%,偏冠率≥0.8 和<0.4 的株数很少,分别占 1.95% 和 1.95%(表 12)。说明林隙的形成导致边缘木出现偏冠,这与对川西亚高山针叶林林隙边缘木和茂兰喀斯特林隙边缘木的研究结果基本一致<sup>[15]</sup>。林隙中出现偏冠率不均情况的原因是树木两侧都是林隙,先形成林隙的方向利于树枝生长,该侧就会出现偏冠现象。

2.7 林隙形状

林隙形状是林隙重要特征因子,在决定资源可利用性方面起着重要作用。林隙的形状是不规则的。从水平面看,林隙有圆形、椭圆形、多边形和浑圆形等;从垂直剖面看,林隙像一个倒圆锥体,越往上开敞度越大,向下则逐渐变小;填充阶段的林隙表现为不规则的分支脉状,立体观测为不规则的分枝脉状凹陷<sup>[21]</sup>。林隙形状越不规则或越复杂,边缘上的环境因子变化越显著,同时由于树木对地上(光)与地下(水)的竞争,林隙内的边缘效应就越明显。从图 1 可知,小兴安岭阔叶红松混交林林隙形状指数变动在 0.98—1.82 之间,1—1.45 之间的分布占 56.09%。林隙形状变异较大,多为不规则的多边形,与对天山云杉林林隙特征的研究结果一致<sup>[26]</sup>。

林冠空隙直径与周围林木算术平均高的比值,表征了林隙相对于周围林分的开敞程度。随着径高比的不同,林隙内的光照、温度、湿度、土壤养分等相应地发生变化。由于林隙径高比对林隙内生境产生影响,从而进

表 12 林隙边缘木的偏冠率分布

Table 12 Distribution of ratio of crow inclination of gap border trees

偏冠率等级 Ratio of crow inclination	边缘木株数/株 Number of gap border trees	%
<0.3	2	0.49
0.3—0.4	6	1.46
0.4—0.5	17	4.15
0.5	55	13.41
0.5—0.6	132	32.20
0.6—0.7	157	38.29
0.7—0.8	33	8.05
≥0.8	8	1.95
合计 Total	410	100.00



一步影响林隙的更新,因此,研究林隙径高比( $D/H$ )具有实际意义<sup>[27]</sup>。由图2可以看出,冠空隙的直径与高度的比值(用 $D_{CG}/H$ 表示)呈单峰型变化,比值在0.30—0.45的分布最多,占36.59%;扩展林隙的直径与高度的比值(用 $D_{EG}/H$ 表示)呈双峰型变化,比值在0.75—0.90和1.05—1.15的分布较多,分别占21.95%和24.39%(图3)。根据臧润国等的研究结果,林冠空隙内的光照随 $D/H$ 比值的增大而增加。当 $D/H$ 的值大约为2时,光照达到最大<sup>[10]</sup>。由此可见,该研究区林冠空隙内的光照都没有到达潜在的最大光照值。

### 3 结论与讨论

(1)对小兴安岭阔叶红松混交林林隙的干扰频率进行了计算。结果表明,冠空隙的形成速率为 $2.28\text{m}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ,扩展林隙的形成速率为 $4.46\text{m}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。林隙干扰的周期为434.8a。长白山红松阔叶林林冠空隙干扰的周转期为751a<sup>[12]</sup>,长白山暗针叶林林隙干扰周期为416.7a<sup>[5]</sup>,天山云杉林干扰返回间隔为763a<sup>[26]</sup>,在中亚热带常绿阔叶林林隙干扰返回间隔期为357a<sup>[13]</sup>,在塔里木荒漠河岸林林隙的周转率为164a<sup>[28]</sup>,海南岛热带山地雨林林隙干扰的返回间隔期为159a<sup>[11]</sup>。从以往研究结果来看,从温带到热带林隙干扰间隔期逐步减少,森林循环速率不断增加。

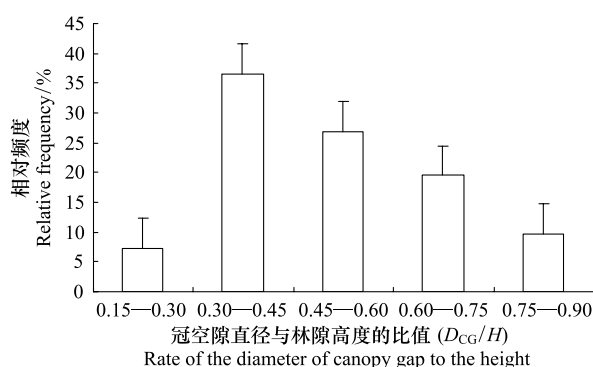


图2 林冠空隙直径与林隙高度比值( $D_{CG}/H$ )的分布

Fig. 2 Distribution of  $D_{CG}/H$  in the mixed broad-leaved Korean pine forest

$D_{CG}$ : 为冠空隙直径, the diameter of canopy Gap;  $H$  为林隙高度, the height of forest gap

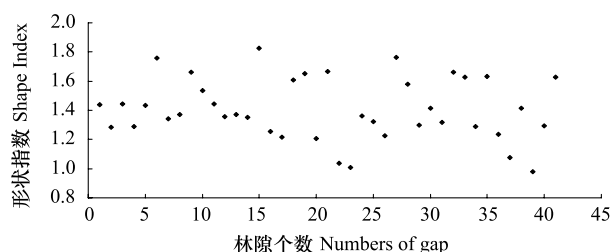


图1 小兴安岭阔叶红松混交林林隙形状指数

Fig. 1 Shape index of gap in the mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains

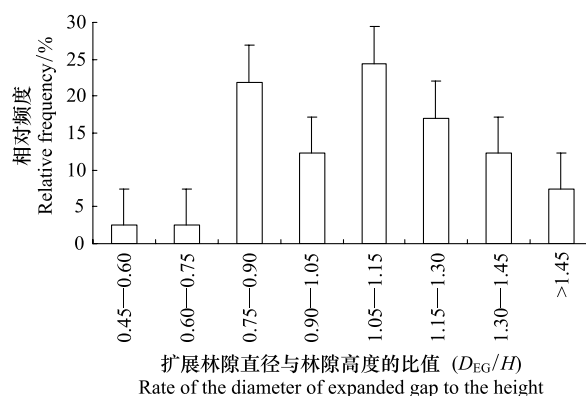


图3 扩展林隙直径与林隙高度的比值( $D_{EG}/H$ )的分布

Fig. 3 Distribution of  $D_{EG}/H$  in the mixed broad-leaved Korean pine forest

$D_{EG}$ : 为扩展林隙直径 the diameter of expanded gap;  $H$  为林隙高度 the height of forest gap

(2)在所调查的41个林隙中,冠空隙的平均面积为 $153.37\text{m}^2$ ,而扩展林隙的平均面积为 $300.44\text{m}^2$ ,冠空隙和扩展林隙的相对比例为51.05%。平均每个冠空隙占据 $22.44\text{m}^2$ ,平均每个扩展林隙占据 $65.95\text{m}^2$ 。反映出小兴安岭阔叶红松混交林林隙属中小林隙型,是森林更新演替的必要过程,进一步说明了阔叶红松混交林是比较稳定的森林群落,也反映出林隙的形成速率和林隙填充速率相对平衡。应用Weibull分布模型拟合了阔叶红松混交林林隙大小分布特征。结果表明,冠空隙和扩展林隙面积的大小分布均符合Weibull分布。闫淑君等<sup>[17]</sup>对中亚热带常绿阔叶林林隙面积进行的Weibull模型拟合结果,与本文的研究结果相一致。赵秀海等<sup>[19]</sup>采用几种模型对长白山阔叶红松混交林林隙大小结构进行了研究,符利勇等<sup>[18]</sup>对关帝山天然次生针叶林林隙大小利用3种模型进行了拟合,结果均为对数正态分布模型,与本研究结论不太一致。产生差异的原因可能是不同地域的气候条件、植被组成和结构、林隙干扰类型以及林隙微生境条件等不同,从而使分布模型对林隙大小的拟合精度不同。

(3)小兴安岭阔叶红松混交林林隙是由一种或几种方式共同形成的。主要方式是树干(干中和干基)折断(占 56.37%)。在调查中发现,干基折断和掘根风倒的林隙形成木几乎都已发生心腐,以这两种方式形成的林隙处于坡度较大、土壤潮湿或立地条件较差的地段,易受强风影响,与暗针叶林研究结果一致<sup>[14]</sup>。本研究还发现一些林隙形成木是因为主林层林隙形成木折断时受到机械损伤及自然淘汰产生的。一般树高和胸径较小的林隙形成木对林隙的生境改善作用较小。这与对长白山暗针叶林林隙干扰的研究结果一致。因此,在以后的调查中,应区分真正的林隙形成木和受害木,使林隙干扰状况的研究更为准确<sup>[5]</sup>。此外,病虫害、雪压、雷击等因素也有可能形成林隙,其相关性有待于进一步研究。

(4)在小兴安岭阔叶红松混交林中,由 5 株形成木形成的林隙最多,占 24.39%;由 3 株、4 株和 6 株形成木形成的林隙共占 51.21%。可见,绝大多数的林隙是由 3—6 株形成木所形成的,其他林隙形成木多是上层倒木的受害者。在所调查的 41 个林隙中,共有 204 株形成木,平均每个林隙的形成木为 4.98 株,每株形成木所能形成的冠空隙面积(CG)和扩展林隙面积(EG)分别为 30.82 m<sup>2</sup> 和 60.38 m<sup>2</sup>。本文研究结果与其他学者对热带山地雨林<sup>[11]</sup>、长白山暗针叶林<sup>[5]</sup>、中亚热带常绿阔叶林<sup>[13]</sup>、亚高山暗针叶林<sup>[14]</sup>、天山云杉<sup>[26]</sup>和荒漠河岸林<sup>[28]</sup>等林隙研究结果相似之处在于林隙是由多株形成木产生,同时也反映出小兴安岭阔叶红松混交林树种间关系较紧密,一旦有树木发生倾倒,周围树木就会产生倾倒现象,从而形成多株形成木的林隙。

(5)林隙边缘木生长发育过程中高度、冠长和冠形的变化使林隙面积和形状发生变化,增加了林隙微环境的时空异质性。研究结果得出,林隙的边缘木径级分布和高度分布符合 Weibull 分布,但不符合正态分布。这与杨晓伟等对中亚热带台湾相思次生林林隙边缘木高径分布特征研究结果不一致<sup>[20]</sup>,与闫淑君等在中亚热带常绿阔叶林林隙边缘木高径分布特征的研究结果不尽一致<sup>[16]</sup>。产生这种差异的原因可能是与区组划分尺度及区组个数有关,也可能与气候条件、植被组成、林隙结构和林隙干扰类型等因子有关,具体原因有待探究。林隙形状指数变动在 0.98—1.82 之间,1—1.45 之间的分布较多。对林隙径高比( $D/H$ )的研究得出,冠空隙的直径与高度的比值呈单峰型变化,比值在 0.30—0.45 的分布最多;扩展林隙的直径与高度的比值呈双峰型变化,比值在 0.75—0.90 和 1.05—1.15 的分布较多,说明此研究区林冠空隙内的光照都没有到达潜在的最大光照值。

(6)林隙形成是推动植被更新替代的重要驱动力,林隙干扰增加了森林环境的异质性,在群落动态和结构维持等方面起着重要的作用。本文对小兴安岭阔叶红松混交林林隙特征及一般干扰状况进行了研究,目的在于为未来深入研究林隙干扰与植被响应关系及森林群落动态奠定基础 and 积累数据。

## References:

- [1] Watt A S. Pattern and process in the plant community. *Journal of Ecology*, 1947, 35(1/2): 1-22.
- [2] Runkle J R. Gap regeneration in some old-growth forests of the eastern United States. *Ecology*, 1981, 62(4): 1041-1051.
- [3] Liang X D, Ye W H. Advances in study on forest gaps. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2001, 9(4): 355-364.
- [4] Jiang G H, Wu Z M, Shen H H, Zhang L. Formation and characteristics of gaps in *Castanopsis eyrei* stands in Zhawan Natural Reserve of Anhui Province. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2008, 35(3): 385-389.
- [5] Yang X. Gap characteristics and disturbance regime in a dark coniferous forest in Changbai mountain areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11): 1825-1831.
- [6] Gagnon T L, Jokela E J, Moser W K, Huber D A. Characteristics of gaps and natural regeneration in mature longleaf pine flatwoods ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 2004, 187(2/3): 373-380.
- [7] de Lima R A F, de Moura L C. Gap disturbance regime and composition in the Atlantic Montane rain forest: the influence of topography. *Plant Ecology*, 2008, 197(2): 239-253.
- [8] Kakamess R, Zobel Z. The role of the seed bank in gap regeneration in a calcareous grassland community. *Ecology*, 2002, 83(4): 1017-1025.
- [9] Jin G Z, Tian Y Y, Zhao F X, Kim J H. The Pattern of natural regeneration by canopy gap size in the mixed broadleaved-korean pine forest of Xiaoxing'an mountains, China. *Journal of Korean Forestry Society*, 2007, 96(2): 227-234.
- [10] Zang R G, Liu T, Guo Z L, Gao W T. Gap disturbance regime in a broadleaved Korean pine forest in the Changbai Mountain Natural Reserve. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(2): 135-142.
- [11] Zang R G, Yang Y C, Liu J Y, Yu S X, Yang X S. Gaps and their natural disturbance regimes in the tropical mountain rain forest of Hainan Island. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35(1): 1-8.
- [12] Wu G. Characteristics of gap in Korean pine broad-leaved forests in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(4):

360-364.

- [13] Yan S J, Hong W, Wu C Z, Bi X L, Wang X G, Feng L. Gaps and their natural disturbance characteristics in mid-subtropical evergreen broad-leaved forest in Wanmulin. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(7): 1126-1130.
- [14] Wang W, Tao J P, Li Z F, Zhang W Y, Ding Y. Gap features of subalpine dark coniferous forest in Wolong Nature Reserve. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 1989-1993.
- [15] Xian J R, Hu T X, Wang K Y, Zhang Y B, Zhu X M, Xu J W. Studies on the characteristics of gap border trees in the Subalpine coniferous forest in Western Sichuan. *Forest Research*, 2004, 17(5): 636-640.
- [16] Yan S J, Hong W, Wu C Z. Distribution characteristic of DBH and tree height for gap edge-trees in mid-subtropical evergreen broad-leaved forest in Wanmulin. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2003, 23(1): 5-8.
- [17] Yan S J, Hong W, Wu C Z. A study on Weibull model for GAP area in mid-subtropical evergreen broad-leaved forest in Wanmulin. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis: Natural Sciences Edition*, 2002, 24(6): 802-805.
- [18] Fu L Y, He Z, Liu Y A. Study of the gap size model in a secondary coniferous forest of Guandi Mountain. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2010, 34(5): 51-54.
- [19] Zhang C Y, Zhao X H, Zheng J M. Size structure of canopy gaps in broadleaved Korean pine forests in the Changbai Mountains. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(4): 34-38.
- [20] Yang X W, Hong W, Wu C Z. Distribution characteristic of DBH and tree height for gap edge trees of acacia confuse in Mid-subtropical Zone. *Journal of Southwest Forestry College*, 2010, 30(6): 25-28.
- [21] Zhu J J, Liu S R. *Ecological Research on Forest Disturbances*. Beijing: Forestry Press of China, 2007: 166-182.
- [22] Wu C Z, Hong W. Study on Weibull Model for species abundance distribution of *Tsoongiodendron odorum* forest. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1997, 17(1): 20-24.
- [23] Bi X L, Hong W, Wu C Z, Yan S J. The application of modified simplex method in the study on stand structure. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2002, 24(1): 95-99.
- [24] Ding S T. The Weibull distribution and fitting. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 1985, 24(3): 45-52.
- [25] Wu C Z, Hong W. A Study on Weibull D. B. H. distribution of Chinese fir plantation and its optimal fitting. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 1998, 20(1): 86-90.
- [26] Liu C L, Pan C D, Shi R F. Characteristics of gap in *Picea schrenkiana*-*Dryopteris filix-mas* stand. *Arid Land Geography*, 2007, 30(2): 209-216.
- [27] Fu L Y, Tang S Z, Liu Y A. The forest gap diameter height ratio in a secondary coniferous forest of Guan Di Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(5): 1260-1268.
- [28] Han L, Wang H Z, Chen J L, Yu J. Disturbance regimes and gaps characteristics of the desert riparian forest at the middle reaches of Tarim River. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4699-4708.

#### 参考文献:

- [3] 梁晓东, 叶万辉. 林窗研究进展(综述). *热带亚热带植物学报*, 2001, 9(4): 355-364.
- [4] 江国华, 吴泽民, 沈后海, 张磊. 安徽查湾自然保护区甜槠林林隙形成及特征研究. *安徽农业大学学报*, 2008, 35(3): 385-389.
- [5] 杨修. 长白山暗针叶林林隙一般特征及干扰状况. *生态学报*, 2002, 22(11): 1825-1831.
- [10] 臧润国, 刘涛, 郭忠凌, 高文韬. 长白山自然保护区阔叶红松混交林林隙干扰状况的研究. *植物生态学报*, 1998, 22(2): 135-142.
- [11] 臧润国, 杨彦承, 刘静艳, 余世孝, 杨秀森. 海南岛热带山地雨林林隙及其自然干扰特征. *林业科学*, 1999, 35(1): 1-8.
- [12] 吴刚. 长白山红松阔叶林林冠空隙特征的研究. *应用生态学报*, 1997, 8(4): 360-364.
- [13] 闫淑君, 洪伟, 吴承祯, 毕晓丽, 王新功, 封磊. 中亚热带常绿阔叶林林隙及其自然干扰特征的研究. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1126-1130.
- [14] 王微, 陶建平, 李宗峰, 张伟银, 丁易. 卧龙自然保护区亚高山暗针叶林林隙特征研究. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 1989-1993.
- [15] 鲜骏仁, 胡庭兴, 王开运, 张远彬, 朱雪梅, 徐精文. 川西亚高山针叶林林窗边界木特征的研究. *林业科学研究*, 2004, 17(5): 636-640.
- [16] 闫淑君, 洪伟, 吴承祯. 中亚热带常绿阔叶林林隙边缘木高径分布特征. *福建林学院学报*, 2003, 23(1): 5-8.
- [17] 闫淑君, 洪伟, 吴承祯. 中亚热带常绿阔叶林林隙面积的 Weibull 分布模型研究. *江西农业大学学报: 自然科学版*, 2002, 24(6): 802-805.
- [18] 符利勇, 何铮, 刘应安. 关帝山天然次生针叶林林隙大小模型研究. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(5): 51-54.
- [19] 张春雨, 赵秀海, 郑景明. 长白山阔叶红松混交林林隙大小结构研究. *北京林业大学学报*, 2006, 28(4): 34-38.
- [20] 杨晓伟, 洪伟, 吴承祯. 中亚热带台湾相思次生林林隙边缘木高径分布特征. *西南林学院学报*, 2010, 30(6): 25-28.
- [21] 朱教君, 刘世荣. *森林干扰生态研究*. 北京: 中国林业出版社, 2007: 166-182.
- [22] 吴承祯, 洪伟. 观光木群落物种多度分布的 Weibull 模型研究. *福建林学院学报*, 1997, 17(1): 20-24.
- [23] 毕晓丽, 洪伟, 吴承祯, 闫淑君. 改进单纯形法在林分结构规律研究中的应用. *江西农业大学学报*, 2002, 24(1): 95-99.
- [24] 丁思统. 威布尔(Weibull)分布及其拟合. *江西农业大学学报*, 1985, 24(3): 45-52.
- [25] 吴承祯, 洪伟. 杉木人工林胸径的 Weibull 分布及其最优拟合研究. *江西农业大学学报*, 1998, 20(1): 86-90.
- [26] 刘翠玲, 潘存德, 师瑞峰. 鳞毛蕨天山云杉林林冠空隙特征. *干旱区地理*, 2007, 30(2): 209-216.
- [27] 符利勇, 唐守正, 刘应安. 关帝山天然次生针叶林林隙径高比. *生态学报*, 2011, 31(5): 1260-1268.
- [28] 韩路, 王海珍, 陈加利, 于军. 塔里木荒漠河岸林干扰状况与林隙特征. *生态学报*, 2011, 31(16): 4699-4708.



# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 17 Sep. ,2013 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

- The overview and prospect of chemical composition of plant cuticular wax ..... ZENG Qiong, LIU Dechun, LIU Yong (5133)
- Research progresses in carbon budget and carbon cycle of the coastal salt marshes in China .....  
..... CAO Lei, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (5141)

### Autecology & Fundamentals

- Effects of straw interlayer on soil water and salt movement and sunflower photosynthetic characteristics in saline-alkali soils .....  
..... ZHAO Yonggan, PANG Huancheng, LI Yuyi, et al (5153)
- Adaptations of dimorphic seeds and seedlings of *Suaeda salsa* to saline environments .....  
..... LIU Yan, ZHOU Jiachao, ZHANG Xiaodong, et al (5162)
- Responses of root morphology of peanut varieties differing in drought tolerance to water-deficient stress .....  
..... DING Hong, ZHANG Zhimeng, DAI Liangxiang, et al (5169)
- The relationship between physiological indexes of apple cultivars and resistance to *Eriosoma lanigerum* in summer .....  
..... WANG Xicun, ZHOU Hongxu, YU Yi, et al (5177)
- Physiological responses of *Salicornia bigelovii* to salt stress during the flowering stage .....  
..... LIU Weicheng, ZHENG Chunfang, CHEN Chen, et al (5184)
- Biological characteristics and cultivation of fruit body of wild medicinal mushroom *Perenniporia fraxinea* .....  
..... LU Tie, BAU Tolgor (5194)
- The study of characteristics of soil microbial communities at high severity burned forest sites for the Great Xingan Mountains: an  
example of slope and aspect ..... BAI Aiqin, FU Bojie, QU Laiye, et al (5201)
- Effect of different fertilizer combinations and straw return on microbial biomass and nitrogen-fixing bacteria community in a paddy  
soil ..... LIU Xiaoqian, TU Shihua, SUN Xifa, et al (5210)
- Structural characters and nutrient contents of leaves as well as nitrogen distribution among different organs of big-headed wheat .....  
..... WANG Lifang, WANG Dexuan, SHANGGUAN Zhouping (5219)
- Effects of EP-1 on spatial memory and anxiety in *Mus musculus* ..... WANG Xiaojia, QIN Tingting, HU Xia, et al (5228)

### Population, Community and Ecosystem

- Gap characteristics in the mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains .....  
..... LIU Shaochong, WANG Jinghua, DUAN Wenbiao, et al (5234)
- Soil nitrogen and phosphorus stoichiometry in a degradation series of *Kobresia humilis* meadows in the Tibetan Plateau .....  
..... LIN Li, LI Yikang, ZHANG Fawei, DU Yangong, et al (5245)
- An analysis of carbon flux partition differences of a mid-subtropical planted coniferous forest in southeastern China .....  
..... HUANG Kun, WANG Shaoqiang, WANG Huimin, et al (5252)
- The niche of annual mixed-seeding meadow in response to density in alpine region of the Qilian Mountain, China .....  
..... ZHAO Chengzhang, ZHANG Jing, SHENG Yaping (5266)
- Functional feeding groups of macrozoobenthos from coastal water off Rushan ..... PENG Songyao, LI Xinzhen (5274)

### Landscape, Regional and Global Ecology

- Effects of selective cutting on vegetation carbon storage of boreal *Larix gmelinii*-*Carex schmidtii* forested wetlands in Daxing'anling,  
China ..... MU Changcheng, LU Huicui, BAO Xu, et al (5286)
- CO<sub>2</sub> flux in the upland field with corn-rape seed rotation in the karst area of southwest China .....  
..... FANG Bin, LI Xinqing, CHENG Jianzhong, et al (5299)
- Monitoring spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the North Tarim Basin using remote sensing and electromagn-  
etic induction instruments ..... YAO Yuan, DING Jianli, LEI Lei, et al (5308)
- Methane and nitrous oxide fluxes in temperate secondary forest and larch plantation in Northeastern China .....  
..... SUN Hailong, ZHANG Yandong, WU Shiyi (5320)
- Butterfly diversity and vertical distribution in eastern Tianshan Mountain in Xinjiang .....  
..... ZHANG Xin, HU Hongying, LÜ Zhaozhi (5329)

- Dynamics of aerodynamic parameters over a rainfed maize agroecosystem and their relationships with controlling factors ..... CAI Fu, ZHOU Guangsheng, MING Huiqing, et al (5339)
- The response process to extreme climate events of the household compound system in the northern slope of Tianshan Mountain ..... LI Xiliang, HOU Xiangyang, DING Yong, et al (5353)
- Analysis on spatial-temporal heterogeneities of landscape fragmentation in urban fringe area; a case study in Shunyi district of Beijing ..... LI Can, ZHANG Fengrong, ZHU Taifeng, et al (5363)
- Resource and Industrial Ecology**
- CPUE Standardization of *Illex argentinus* for Chinese Mainland squid-jigging fishery based on generalized linear Bayesian models ..... LU Huajie, CHEN Xinjun, CAO Jie (5375)
- Spatial-temporal differentiation of water quality in Gufu River of Three Gorges Reservoir ..... RAN Guihua, GE Jiwen, MIAO Wenjie, et al (5385)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Comparison environmental impact of the peasant household in han, zang and hui nationality region; case of zhangye, Gannan and Linxia in Gansu Province ..... ZHAO Xueyan, MAO Xiaowen (5397)
- Research Notes**
- The seasonal variation and community structure of zooplankton in China sea ..... DU Mingmin, LIU Zhensheng, WANG Chunsheng, et al (5407)
- Immunotoxicity of marine pollutants on the clam *Ruditapes philippinarum* ..... DING Jianfeng, YAN Xiwu, ZHAO Liqiang, et al (5419)
- Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in decomposition period ..... WANG Lizhi, WANG Guoxiang (5426)
- Distribution patterns of alien herbs in the Yiluo River basin ..... GUO Yili, DING Shengyan, SU Si, et al (5438)

# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 张利权

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

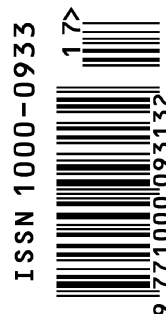
第 33 卷 第 17 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 17 (September, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元