

长白山森林不同演替阶段 采伐林隙幼苗更新特征

宋新章¹, 张智婷², 张慧玲¹, 肖文发^{3*}, 杨建国⁴

(1. 浙江林学院 国际生态研究中心, 浙江 杭州 311300; 2. 河北北方学院, 河北 张家口 075000; 3. 中国林业科学研究院 森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 4. 山东省鱼台县鹿洼煤矿, 山东 鱼台 272300)

摘要:对长白山地区不同恢复演替阶段的杨桦次生林、次生阔叶林和阔叶红松林采伐林隙内的更新幼苗进行研究。结果表明:处于不同恢复演替阶段的3种林型采伐林隙内更新幼苗的平均高、平均基径、物种多样性和均匀度均大于非林隙林分,生态优势度低于非林隙林分。处于过渡阶段的次生阔叶林非林隙林分内更新幼苗的组成更接近于先锋群落杨桦次生林,采伐林隙内更新幼苗的组成更接近于顶极群落阔叶红松林,这表明采伐林隙干扰促进次生阔叶林向阔叶红松林的演替。红松幼苗在阔叶红松林非林隙林分中占绝对优势。

关键词:采伐林隙; 幼苗更新; 演替; 长白山

中图分类号: S718.54⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2286(2010)03-0504-06

Characteristics of Seedlings in Logging Gaps of Forests at Different Succession Stages in Changbai Mountain

SONG Xin-zhang¹, ZHANG Zhi-ting², ZHANG Hui-ling¹,
XIAO Wen-fa^{3*}, YANG Jian-guo⁴

(1. International Research Center of Ecology, Zhejiang Forestry University, Hangzhou 311300, China; 2. Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China; 3. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF, Beijing 100091, China; 4. Luwa Colliery of Yutai County, Shandong Province, Yutai 272300, China)

Abstract: The seedlings in logging gaps were studied at following different forest succession stages in Changbai Mountain: *Populus davidiana* - *Betula platyphylla* secondary forest at the early succession stage, secondary broad-leaved forest at the transitional stage and broad-leaved Korean pine mixed forest at the late succession stage. The result showed that the mean height, mean basal diameter, diversity and uniformity of seedlings in the logging gaps were bigger than those in the non-logging gaps in all the three types of forests, while the dominance of seedlings in the logging gaps was lower. The composition of seedlings in the non-logging gaps in the secondary broad-leaved forest was similar to that in the *Populus davidiana* - *Betula platyphylla* secondary forest, but the composition of seedlings in the logging gaps in the secondary broad-leaved forest was similar to that in the broad-leaved Korean pine mixed forest. This result suggests that logging gaps accelerated the succession of secondary broad-leaved forest to broad-leaved Korean pine mixed forest. The Korean pine seedlings were the dominant species in the non-logging gaps of broad-leaved Korean pine mixed forest.

Key words: logging gap; seedlings regeneration; succession; Changbai Mountain

收稿日期: 2009-11-24 修回日期: 2010-04-20

基金项目: 国家“十五”科技支撑计划项目(2004BA510B05)

作者简介: 宋新章(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事森林生态学和全球生态学研究, E-mail: xzsong@126.com;

*通讯作者: 肖文发, 博士, 研究员, E-mail: xiaowenf@caf.ac.cn

林隙是森林演替的一个重要阶段,对更新幼苗的定居和存活以及森林的结构、功能和多样性维持有着重要影响^[1-2]。随着人类对自然生态系统干扰频度和强度的增加,森林经营过程中形成的采伐林隙(logging gap)对森林生态系统的健康发展起着越来越重要的作用,引起了生态学家的普遍关注^[3-5]。在退化森林生态系统的恢复演替大面积发生的背景下,将采伐林隙更新同群落恢复演替结合起来的研究还不多见^[6]。采伐林隙内的幼苗动态是森林群落动态和森林更新的一个重要环节^[7],了解林隙内更新幼苗的数量和分布,将有助于深入认识林隙在森林群落更新演替过程中的重要作用,具有重要的理论意义。国内学者虽然对温带阔叶红松林^[8-12]、亚热带常绿阔叶林^[13-15]、西南亚高山针叶林^[16-17]、海南岛热带雨林^[18-19]中的林隙做了一些研究,但主要集中在天然林受到自然干扰(如火灾、风倒、树倒)后形成的林隙及其更新状况的基本描述,鲜见对人为干扰(如经营采伐)造成的林隙及其更新的研究^[14,20-24],而将采伐林隙内幼苗更新与森林群落的恢复演替结合起来的研究尚未见报道。

东北国有林区是我国面积最大的天然林区,经过长期的过度采伐利用,大部分退化为次生林。近年来,随着国家重点林业生态保护工程的实施,该林区的森林生态系统正处于不同的恢复发展阶段。其中,杨桦次生林、次生阔叶林和阔叶红松林是东北林区 3 个主要的恢复演替阶段^[25]。因此,开展 3 种林型采伐林隙内更新幼苗的特征与动态的研究,将有助于深入认识经营采伐性干扰对植被恢复演替的影响,对于促进东北林区的植被恢复和可持续经营具有重要意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地自然概况

样地调查选在位于长白山北坡的吉林省白河林业局经营采伐迹地进行,地理坐标为 420 01' ~ 420° 48' N, 127 53' ~ 128 134' E,海拔 670 ~ 770 m。该区属温带季风影响下的大陆性季风气候,年平均气温 7.3 ~ 4.9 °C,年降水量 600 ~ 900 mm,全年日照时数为 2 271 ~ 2 503 h,全年无霜期 109 ~ 141 d。杨桦次生林和次生阔叶林样地位于较平缓的平地与较浅的沟谷相交错的地带,阔叶红松林样地处于东坡阴缓坡的中下部,坡度 15°。土壤为火山灰形成的典型暗棕壤,土层厚在 100 cm 以上。植被类型:杨桦次生林中,优势种有山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、色木槭(*Acer mono*)和胡桃楸(*Juglans mandshurica*);次生阔叶林中,以紫椴(*Tilia amurensis*)、色木槭(*Quercus mongolica*)和山槐(*Maackia amurensis*)为优势种;阔叶红松林则以红松(*Pinus koraiensis*)、紫椴、臭松(*Abies nephrolepis*)和水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)为优势种;林下灌木均以忍冬(*Lonicera japonica*)、卫矛(*Euonymus alatus*)、暴马丁香(*Syringa reticulata*)和榛子(*Corylus mandshurica*)等为主(表 1)。

表 1 不同森林类型的群落学特征

Tab 1 Community characteristics of different types of forests

样地类型 Forest types	林龄 Age	密度 / (No · hm ⁻²) Density	蓄积 / (m ³ · hm ⁻²) Volume	胸径 / cm DBH	树高 / m Height	郁闭度 Coverage	凋落物层厚度 / cm Litter layer thickness
	50	556	110	16	15	0.6	3.0
	57	750	112	16	14	0.5	4.5
	85	430	200	24	20	0.6	7.0

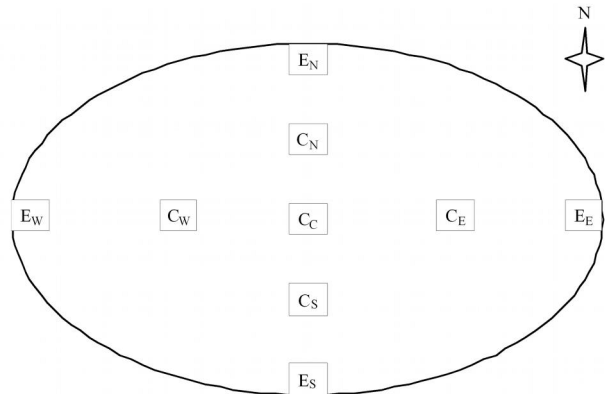
:杨桦次生林; :次生阔叶林; :阔叶红松林。

: *Populus davidiana* - *Betula platyphylla* secondary forests; : Secondary broad-leaved forests; : Broadleaved - Korean pine mixed forest

1.2 研究方法

1.2.1 样地调查 调查于 2005 年 7 月进行。在大面积踏查的基础上,采用样线调查法^[11,9-10],在 3 种林型内某一随机点作为调查起点,沿罗盘仪所指方向,由北向南穿行,遇到林隙则停下来,调查冠林隙(CG)和扩展林隙(EG)的长和宽、形状、年龄、方向,记录林隙内伐根的数量和种类,记录林隙边缘立木的种类、树高、胸径、年龄等。在每个扩展林隙内设 9 个 2 m × 2 m 的样方,第 1 个样方设在林隙中心(用 CC 表示,下同),其余 8 个分别沿长短轴方向设在距离扩展林隙边缘的 1/2 处和扩展林隙边缘处(分别用 EN、ES、EE、EW 表示林隙北部、南部、东部和西部边缘的样方,用 CN、CS、CE、CW 表示林隙中心

至林隙北、南、东、西缘 1/2 处的样方,下同),具体样方设置如图 1 所示(以椭圆形为例)。在每个 2 m × 2 m 的小样方内进行更新幼苗调查。同时,在距林隙边缘 10 m 处的非林隙林分中相应设置 1 个 10 m × 10 m 的对照样地,对照样地郁闭度为 0.8 左右,在每个对照样地内沿对角线方向机械设 9 个 2 m × 2 m 的小样方进行幼苗调查。共调查 59 个椭圆形典型林隙,其中杨桦次生林内调查 28 个、次生阔叶林内 21 个、阔叶红松林内 10 个;共调查对照样地 35 个(同一林型内林隙间相距较近时,则共用一个对照样地),其中杨桦次生林内调查 15 个、次生阔叶林内 13 个、阔叶红松林内 7 个。



C_C 为林隙中心; E_N、E_S、E_E、E_W 分别表示扩展林隙北、南、东和西部林缘处; C_N、C_S、C_E、C_W 分别表示林隙中心至林隙北、南、东、西部林缘距离的 1/2 处。

C_C: Gap center; E_N: Northern edge of expanded canopy, E_S: Southern edge of expanded canopy, E_E: Eastern edge of expanded canopy, E_W: Western edge of expanded canopy; C_N: Center of gap center to northern edge, C_S: Center of gap center to southern edge, C_E: Center of gap center to eastern edge, C_W: Center of gap center to western edge

图 1 林隙内样方设置

Fig 1 Schematic diagram of the locations of nine sample plots in forest gap

1.2.2 分析方法 林隙内更新幼苗的物种多样性采用目前普遍应用的多样性指数计算公式^[19, 21-25]:

$$\text{物种多样性指数 } H = - \sum P_i \ln P_i \tag{1}$$

$$\text{群落均匀度用 Pielou 指数 } J_s = - \sum P_i \ln P_i / \ln S \tag{2}$$

$$\text{生态优势度用 Simpson 指数 } = n_i(n_i - 1) / (N - 1)N \tag{3}$$

$$\text{Cody 指数 } c = [g(H) + l(H)] / 2 \tag{4}$$

$$\text{相似性系数 Jaccard 指数 } C_j = j / (a + b - j) \tag{5}$$

(1) ~ (5) 式中: P_i 为第 i 种的个体数 n_i 占总个体数 N 的比例; S 为物种总数; n_i 为第 i 种的个体数; N 为总个体数; g(H) 是沿生境梯度 H 增加的物种数目; l(H) 是沿生境梯度 H 失去的物种数目, 即在上一个梯度中存在而在下一个梯度中消失的物种数目; j 为 2 个群落或样地共有种数; a 和 b 分别为样地 A 和样地 B 的物种数。

$$\text{重要值 } (N) = (\text{相对密度} + \text{相对频度} + \text{相对盖度}) / 3 \tag{6}$$

1.2.3 数据处理 采用 SPSS13.0 软件对数据进行分析处理。林隙的特征值用林隙内 9 个小样方更新幼苗的平均值表示, 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 比较不同演替阶段采伐林隙内外更新幼苗的密度和多样性的差异。

2 结果与分析

2.1 不同林型采伐林隙内更新幼苗基本特征的差异

由表 2 可见, 在 3 种林型采伐林隙内更新的幼苗特征差异较大。次生阔叶林采伐林隙内更新幼苗的个体密度和平均高均最大, 杨桦次生林林隙内更新幼苗的个体密度最小; 但幼苗的平均基径在 3 种林型中最大; 阔叶红松林林隙内幼苗的平均高和平均基径最小。非林隙林分内幼苗的更新状况与林隙内基本一致, 但杨桦次生林内幼苗的平均基径最大; 幼苗个体密度的最大值由次生阔叶林转移到阔叶红松林。比较各林型林隙内外的更新状况可知, 林隙内更新幼苗的平均高和平均基径均高于非林隙林分, 说明林隙干扰形成的微生境更有利于幼苗的生长。

2.2 不同林型采伐林隙内主要更新树种的比较

由表 3 可见, 3 种林型林隙内外更新幼苗中的优势树种不尽相同。杨桦次生林林隙内外更新幼苗中均是色木槭、椴木、水曲柳、山荆和山槐占优势, 这 5 类树种的重要值在林隙内外分别达 59.3% 和 83.0%,

表 2 不同林型采伐林隙内外更新幼苗基本特征的差异

Tab 2 The character of seedlings in logging gaps and non - logging gap stands of different types of forest

项目 Item				
林隙	个体密度 / (Ind · m ⁻²) Individual density	2.44 (0.15) a	4.76 (0.22) b	3.09 (0.14) c
Gap	平均高 /m Mean high	1.10 (0.04) a	1.13 (0.05) a	0.74 (0.03) b
	平均基径 /cm Mean basilar diameter	0.88 (0.03) a	0.75 (0.03) b	0.68 (0.02) b
非林隙	个体密度 / (Ind · m ⁻²) Individual density	2.50 (0.29) a	3.28 (0.18) a	5.53 (0.57) b
Non - gap	平均高 /m Mean high	0.92 (0.05) a	0.96 (0.03) a	0.47 (0.06) b
	平均基径 /cm Mean basilar diameter	0.71 (0.04) a	0.59 (0.02) b	0.49 (0.04) b

同行不同字母表示差异显著 (P = 0.05)。 : 杨桦次生林; : 次生阔叶林; : 阔叶红松林。

The same letter in the same row indicates no significant difference at P = 0.05 level; : *Populus davidiana* - *Betula platyphylla* secondary forests; : Secondary broad - leaved forests; : Broadleaved - Korean pine mixed forest

可见杨桦次生林非林隙林分内更新幼苗优势种的优势地位比林隙内更加突出。次生阔叶林林隙内的更新幼苗中红松、色木槭、山槐、椴木和假色槭占优势,这 5 类树种的重要值达 55.9%;非林隙林分中水曲柳、色木槭、假色槭和青楷槭占优势,这 4 类树种的重要值达 52.1%。阔叶红松林采伐林隙内假色槭、红松、椴木、云杉和春榆 (*Ulmus japonica*) 占优势,这 5 类树种的重要值达 47%;非林隙林分内红松、云杉和假色槭占优势,这 3 类树种的重要值达 60.9%。可见阔叶红松林非林隙林分内更新幼苗优势种的优势地位比林隙内更加突出,尤其是红松幼苗在非林隙林分中占绝对优势,表明在阔叶红松林内郁闭林下更有利于红松幼苗的更新。

表 3 不同林型林隙内外主要更新树种重要值的比较

Tab 3 The important value of main species seedlings in logging gaps and non - logging gap stands of different types of forest

树种 Species	林隙内 Gap			非林隙林分 Non - gap		
山槐 <i>Maackia amurensis</i>	10.71	8.68	3.42	10.38	7.23	2.97
椴木 <i>Tilia amurensis</i>	9.05	7.64	8.00	22.65	6.13	2.14
假色槭 <i>Acer pseudo-sieboldianum</i>	5.64	7.63	13.42	4.27	10.99	18.61
拧筋槭 <i>Acer triflorum</i>	2.25	6.85	1.30		10.5	
青楷槭 <i>Acer tegmentosum</i>		3.93	4.80		10.12	6.11
蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	5.83	1.55	4.94	7.31	7.22	5.18
色木槭 <i>Acer mono</i>	17.29	10.62	5.48	31.35	15.17	8.19
水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	9.26	7.94	1.41	12.19	15.86	
红松 <i>Pinus koraiensis</i>		21.36	10.50		1.42	32.34
春榆 <i>Ulmus japonica</i>	4.33	3.21	7.55	4.14	1.09	3.51
黄檗 <i>Phellodendron amurense</i>		1.52	0.60		2.4	
山荆 <i>Malus baccata</i>	12.96	3.62		6.43	4.61	
山杨 <i>Populus davidiana</i>	8.61	1.65	2.4	1.28	0.84	
云杉 <i>Picea koraiensis</i>		1.15	7.76		1.33	9.91

: 杨桦次生林; : 次生阔叶林; : 阔叶红松林。

: *Populus davidiana* - *Betula platyphylla* secondary forests; : Secondary broad - leaved forests; : Broadleaved - Korean pine mixed forest

2.3 不同林型采伐林隙内更新幼苗多样性的比较

由表 4 可见,随着杨桦次生林向次生阔叶林再向阔叶红松林的演替,林隙内更新幼苗的物种多样性逐渐增加,而生态优势度则逐步降低。非林隙林分中,次生阔叶林内更新幼苗的物种多样性最高,杨桦

次生林内幼苗的优势度和均匀度最高,阔叶红松林内的优势度、均匀度和物种多样性都最低。比较各林型林隙内外更新幼苗的多样性可知,林隙内更新幼苗的均匀度和物种多样性均高于非林隙林分,生态优势度则低于非林隙林分,说明采伐林隙干扰造成多样化的生境和空间,从而为更多幼苗的萌发和生长提供机会和多样化的生境。

表 4 不同林型采伐林隙内外更新幼苗的多样性

Tab 4 The diversity of seedlings in logging gaps and non - logging gap stands of different types of forest

多样性指数 Diversity index	林隙内 Gap			非林隙林分 Non - gap		
	<i>H</i>	1.97	2.44	2.57	1.93	2.21
<i>J_s</i>	0.78	0.82	0.81	0.83	0.78	0.63
	0.19	0.11	0.10	0.19	0.16	0.13

— :杨桦次生林; — :次生阔叶林; — :阔叶红松林。

— : *Populus davidiana - Betula platyphylla* secondary forests; — : Secondary broad - leaved forests; — : Broadleaved - korean pine mixed forest

2.4 不同林型采伐林隙内更新幼苗的多样性

由表 5 可见,随着杨桦次生林向次生阔叶林再到阔叶红松林的演替,3 种林型采伐林隙内更新幼苗间的 Cody 指数 (C_j) 逐渐增大,而相似性系数 Jaccard 指数 (C_j) 先升后降,表明杨桦次生林与阔叶红松林采伐林隙内更新幼苗间的共有种要少于次生阔叶林与阔叶红松林及次生阔叶林与杨桦次生林林隙内更新幼苗间的共有种,而杨桦次生林与次生阔叶林林隙内更新幼苗间的共有种又要少于次生阔叶林与阔叶红松林林隙内更新幼苗间的共有种,说明次生阔叶林采伐林隙内更新幼苗的组成更接近于阔叶红松林而不是杨桦次生林。与林隙内的更新稍有不同的是,3 林型非林隙林分内更新幼苗间的相似性系数 C_j 逐步下降,说明次生阔叶林非林隙林分内更新幼苗的组成更接近于杨桦次生林而不是阔叶红松林。可见,采伐林隙的存在促进次生阔叶林向阔叶红松林的演替。

表 5 不同林型林隙内外更新幼苗的多样性

Tab 5 The diversity of seedlings in logging gaps and non - logging gap stands of different types of forest

多样性指数 diversity	林隙内 Gap			非林隙林分 Non - gap		
	C_j	11.5	12.5	13	8	10.5
C_j	0.48	0.5	0.45	0.52	0.45	0.34

— :表示杨桦次生林—次生阔叶林; — :表示次生阔叶林—阔叶红松林; — :表示杨桦次生林—阔叶红松林。

— : *Populus davidiana - Betula platyphylla* secondary forests - secondary broad - leaved forests; — : Secondary broad - leaved forests - broadleaved - korean pine mixed forest; — : *Populus davidiana - Betula platyphylla* secondary forests - broadleaved - korean pine mixed forest

3 讨 论

林隙是一种经常发生的小规模干扰,在森林的结构、动态和多样性维持中起着重要作用,已成为当前森林生态学研究的最活跃领域之一。间伐作为最重要的营林技术之一,所产生的林隙一般是小尺度和短暂的,但对森林结构的发展和对林地的微生境状况如光照、土壤养分含量、凋落物分解等起到关键性作用^[26-27],进而对更新幼苗的萌发、存活和生长发育有着决定性影响。

森林植被不同恢复演替阶段林隙内的更新幼苗组成是不同的。在本研究中,处于过渡阶段的次生阔叶林非林隙林分内更新幼苗的组成更接近于先锋群落杨桦次生林,采伐林隙内更新幼苗的组成更接近于顶极群落阔叶红松林,这表明采伐林隙干扰促进次生阔叶林向阔叶红松林的演替。这可能是因为干扰引起有效资源的空间异质性,为演替后期种的侵入创造生境条件。笔者也对各典型大小林隙内的光照、温度、湿度、土壤养分和凋落物等生态因子做了初步观测和分析,发现不同林型采伐林隙内上述生

态因子存在着显著差异,并同幼苗的更新状况显著相关 ($P < 0.05$)。

处于不同恢复演替阶段的 3 种林型采伐林隙内更新幼苗的平均高、平均基径、物种多样性和均匀度均大于非林隙林分,生态优势度低于非林隙林分。其原因在于采伐干扰造成立木密度下降,林冠开敞度增加,从而增加林下光照,引起林下湿度和温度的变化,改善林下生境,降低幼苗间对营养资源的争夺,为各类幼苗的生长存活提供机会。大量研究表明,林隙形成后能改变立地资源的有效性^[28-29],从而影响幼苗的存活和生长。例如,随着距林隙边缘距离的增加和光合活性辐射传输的增加,幼苗根径的增长量也增加^[30]。Zhu 等^[5,31]对日本黑松 (*Pinus thunbergii*) 海岸林内间伐林隙的研究也表明林隙内的微生境对幼苗的分布和生长起着决定性影响。

值得注意的是,阔叶红松林非林隙林分内更新幼苗优势种的优势地位比林隙内更加突出,尤其是红松幼苗在非林隙林分中占绝对优势,表明在阔叶红松林内采伐干扰不利于红松幼苗的更新生长,这同红松幼苗喜欢郁闭林下的遮荫环境的特性是一致的。因此,为了阔叶红松林的可持续经营,应注意人为干扰的方式和强度,为红松幼苗的更新生长创造适宜的环境条件。

参考文献:

- [1] Runkle J R. Patterns of disturbance in some old-growth mesic forests of eastern north America [J]. *Ecology*, 1982, 63 (5): 1533 - 1546
- [2] 臧润国,安树青,陶建平,等. 海南岛热带林生物多样性维持机制 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 59 - 60
- [3] Gray A N, Spies T A. Gap size, within-gap position and canopy structure effects on conifer seedling establishment [J]. *Journal of Ecology*, 1996, 84: 635 - 645.
- [4] Jennings S B, Brown N D, Shell D. A assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures [J]. *Forestry*, 1999, 72: 59 - 74.
- [5] Zhu J J, Matsuzaki T, Lee F Q, et al. Effect of gap size created by thinning on seedling emergency, survival and establishment in a coastal pine forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 182: 339 - 354.
- [6] 宋新章,江洪,余树全,等. 中亚热带不同演替阶段植被优势种凋落物分解试验 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20 (3): 537 - 542
- [7] 班勇,徐化成. 大兴安岭北部原始老龄林内兴安落叶松幼苗种群的生命统计研究 [J]. *应用生态学报*, 1995, 6 (2): 113 - 118
- [8] 吴刚. 长白山红松阔叶混交林林冠空隙树种更新动态规律的研究 [J]. *应用生态学报*, 1998, 9 (5): 449 - 452
- [9] 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
- [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: 90 - 98
- [11] 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.
- [12] 张春雨,赵秀海,郑景明. 长白山阔叶红松林林隙与林下土壤性质对比研究 [J]. *林业科学研究*, 2006, 19 (3): 347 - 352
- [13] 熊小刚,熊高明,谢宗强. 神农架地区常绿落叶阔叶混交林树种更新研究 [J]. *生态学报*, 2002, 22 (11): 2001 - 2005.
- [14] 安树青,洪必恭,李朝阳,等. 紫金山次生林林窗植被和环境的研究 [J]. *应用生态学报*, 1997, 8 (3): 245 - 249.
- [15] 贺金生,刘峰,陈伟烈,等. 神农架地区米心水青冈林和锐齿槲栎林群落干扰历史及更新策略 [J]. *植物学报*, 1999, 41 (8): 887 - 892
- [16] 刘庆. 林窗对长苞冷杉自然更新幼苗存活和生长的影响 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28 (2): 204 - 209.
- [17] 吴宁. 贡嘎山东坡亚高山针叶林的林窗动态研究 [J]. *植物生态学报*, 1999, 23 (3): 228 - 237.
- [18] 臧润国,蒋有绪,杨彦承. 海南岛霸王岭热带山地雨林林隙更新生态位的研究 [J]. *林业科学研究*, 2001, 14 (1): 17 - 22
- [19] 臧润国,蒋有绪,余世孝. 海南霸王岭热带山地雨林森林循环与树种多样性动态 [J]. *生态学报*, 2002, 22 (1): 24 - 32
- [20] 朱教君. 次生林经营基础研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2002, 13 (12): 1689 - 1694.
- [21] 宋新章,李冬生,肖文发,等. 长白山区次生阔叶林采伐林隙更新研究 [J]. *林业科学研究*, 2007, 20 (3): 302 - 306
- [22] 宋新章,张慧玲,肖文发,等. 长白山区阔叶红松林采伐林隙种子库研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31 (2): 17 - 24
- [23] 宋新章,张智婷,肖文发,等. 长白山杨桦次生林采伐林隙幼苗更新动态 [J]. *林业科学*, 2008, 44 (3): 13 - 20.
- [24] 宋新章,张智婷,肖文发,等. 长白山杨桦次生林采伐林隙乔灌木幼苗更新比较研究 [J]. *林业科学研究*, 2008, 21 (3): 289 - 294.
- [25] 张智婷,宋新章,肖文发,等. 长白山森林不同演替阶段采伐林隙土壤种子库特征 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20 (6): 1293 - 1298

(下转第 516 页)

- [3] 汪芳,喻理飞. 水分胁迫对掌叶木幼苗生长的影响 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(20): 8436 - 8437, 8457.
- [4] 张英普,何武权,韩健. 水分胁迫对玉米生理生态特性的影响 [J]. 西北水资源与水工程, 1999, 10(3): 18 - 21.
- [5] 汪森,代力民,姬兰柱,等. 长白山阔叶红松林主要树种对干旱胁迫的生态反应及生物量分配的初步研究 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 496 - 450.
- [6] 唐罗忠,黄选瑞,李彦慧. 水分胁迫对白杨杂种无性系生理和生长的影响 [J]. 河北林果研究, 1998, 22(2): 99 - 102.
- [7] 杨敏生,裴保华,张树常. 树木抗旱性研究进展 [J]. 河北林果研究, 1997, 12(1): 87 - 93.
- [8] 韦莉莉,张小全,侯振宏,等. 杉木苗木光合作用及其产物分配对水分胁迫的响应 [J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 394 - 402.
- [9] Millin J D, Wagner M R. Effects of water stress on biomass partitioning of ponderosa pine seedlings during primary root growth and shoot growth periods [J]. Forest Science, 1995, 41(3): 594 - 610.
- [10] Hsiao T C. Plant responses to water stress [J]. Ann Rev Plant Physiol, 1973, 24: 519 - 570.
- [11] 宇万太,于永强. 植物地下生物量研究进展 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(6): 927 - 932.
- [12] Virginia S, Pilar C, Richard J. Seasonal carbon storage and growth in Mediterranean tree seedlings under different water conditions [J]. Tree Physiology, 29: 1105 - 1116.
- [13] 肖冬梅,王森,姬兰柱. 水分胁迫对长白山阔叶红松林主要树种生长及生物量分配的影响 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 93 - 97.
- [14] 李林锋,刘新田. 干旱胁迫对桉树幼苗的生长和某些生理生态特性的影响 [J]. 西北林学院学报, 2003, 19(1): 14 - 17.
- [15] 谢会成,朱西存. 水分胁迫对栓皮栎幼苗生理特性及生长的影响 [J]. 山东林业科技, 2004(2): 6 - 7.
- [16] 肖春旺,周广胜,马风云. 施水量变化对毛乌素沙地优势植物形态与生长的影响 [J]. 植物生态学报, 2002, 26(1): 69 - 76.

(上接第 509 页)

- [26] Lertzman K P, Sutherland G D, Inselberg A. Canopy gaps and the landscape mosaic in a coastal temperate rain forest [J]. Ecology, 1996, 77: 1254 - 1270.
- [27] Myers G P, Newton A C, Melgarejo O. The influence of canopy gap size on natural regeneration of Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) in Bolivia [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 127: 119 - 128.
- [28] Brown N. A gradient of seedling growth from the centre of a tropical rain forest canopy gap [J]. Forest Ecology and Management, 1996, 82: 239 - 244.
- [29] Gray A N, Spies T A. Microsite controls on tree seedling establishment in conifer forest canopy gaps [J]. Ecology, 1997, 78: 2458 - 2473.
- [30] Gagnon J L, Jokela E J, Moser W K, et al. Dynamics of artificial regeneration in gaps within a longleaf pine flatwoods ecosystem [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 172: 133 - 144.
- [31] Zhu J J, Kang H Z, Tan H, et al. Regeneration characteristics of natural Mongolia pine (*Pinus sibirica* var. *mongolica*) forests on sandy land in Honghuaerji [J]. Journal of Forestry Research, 2005, 16(4): 253 - 259.