

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201612024

引文格式: 巢林, 刘艳艳, 吴承祯, 等. 沼泽交错带白桦—长白落叶松优势种群的年龄结构及其动态 [J]. 广西植物, 2017, 37(11):1406-1417

CHAO L, LIU YY, WU CZ, et al. Age structure and population dynamics of dominant species in a *Betula platyphylla*—*Larix olgensis* forest on swamp ecotone [J]. *Guihaia*, 2017, 37(11):1406-1417

## 沼泽交错带白桦—长白落叶松优势种群的年龄结构及其动态

巢林<sup>1</sup>, 刘艳艳<sup>2</sup>, 吴承祯<sup>1,3,4\*</sup>, 洪滔<sup>1,3</sup>, 林卓<sup>1</sup>, 洪伟<sup>1,3</sup>

(1. 福建农林大学 林学院, 福州 350002; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 3. 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福州 350002; 4. 武夷学院 生态与环境学院, 福建 武夷山 354300)

**摘要:** 采用径级结构替代年龄结构与建立种群年龄结构模型相结合的方法, 研究沼泽交错带白桦—长白落叶松优势种群的年龄结构特征。结果表明: 白桦、长白落叶松和辽东柾木种群的年龄结构呈纺锤型, 龄级一个体数间的关系可用 Lognormal 函数表征; 种群动态量化指数  $V'_m$  为辽东柾木(9.57%) > 白桦(4.02%) > 长白落叶松(1.83%), 均趋近于 0, 说明种群处于稳定型向衰退型过渡阶段; 白桦、长白落叶松及辽东柾木种群幼龄个体严重不足, 白桦和辽东柾木种群的存活曲线趋于 Odum-B<sub>3</sub> 型, 而长白落叶松种群趋于 Deevey-I 型。白桦、长白落叶松及辽东柾木种群具有前期增长、中后期衰退的特征; 白桦、长白落叶松和辽东柾木种群数量受基波影响显著, 种群整个生活史阶段未显现小周期波动, 种群发展较稳定; 随着时间的推移, 在未来 2、4 和 6 个龄级后, 白桦、长白落叶松和辽东柾木种群老龄个体数均有增加, 但由于更新幼苗个体稀少, 未来必然呈衰退趋势。森林—沼泽交错带的白桦、长白落叶松及辽东柾木种群对外界环境变化有强烈的敏感性和脆弱性, 人类活动扰动会影响其发育与演变, 从而提高了森林—沼泽交错带地区沼泽化的风险。因此, 应减少人类活动对森林—沼泽交错带的干扰, 加强对这一地区植被群落的保护与管理。

**关键词:** 白桦, 长白落叶松, 辽东柾木, 种群动态, 生命表, 生存分析, 谱分析, 时间序列预测, 长白山

中图分类号: Q948.12, S718.54 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2017)11-1406-12

## Age structure and population dynamics of dominant species in a *Betula platyphylla*—*Larix olgensis* forest on swamp ecotone

CHAO Lin<sup>1</sup>, LIU Yan-Yan<sup>2</sup>, WU Cheng-Zhen<sup>1,3,4\*</sup>, HONG Tao<sup>1,3</sup>, LIN Zhuo<sup>1</sup>, HONG Wei<sup>1,3</sup>

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Key Laboratory of Fujian Forest Ecological System Process and Management, Fuzhou 350002, China; 4. College of Ecology Resources Engineering, Wuyi University, Wuyishan, 354300, Fujian, China)

收稿日期: 2017-03-30 修回日期: 2017-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(30671664) [Supported by the National Natural Science Foundation of China(30671664)]。

作者简介: 巢林(1988-), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 研究方向为数量森林经理, (E-mail) fjchaolin@126.com。

\*通信作者: 吴承祯, 教授, 博士生导师, 主要从事森林经营学、森林生态学等方面研究, (E-mail) fjwcz@126.com。

**Abstract:** In order to reveal the trend of population development and provide the basis for swamp ecotone population's recovery and management, we studied dominate species in a *Betula platyphylla*—*Larix olgensis* forest on swamp ecotone, elaborated its current situation and quantity dynamic, by adopting space as substitute for time, and taking trunk size structure in place of age structure, study on age structure of the dominate species in a *Betula platyphylla*—*Larix olgensis* forest. Based on the life table of population and the theory of survival analysis, we worked out the life table of *Betula platyphylla*, *Larix olgensis* and *Alnus hirsuta* population and estimated the survival curve, mortality curve, as well as other important parameters. Population dynamics were analyzed by using dynamic quantitative index, spectral analysis and time-sequence model. The results showed that the age structure of *Betula platyphylla* and *Larix olgensis* population were spindle type, Lognormal function can represent the relationship between age and number of individuals. Dynamic index  $V'_{pi}$  with the order of *Alnus hirsuta* (9.57%) > *Betula platyphylla* (4.02%) > *Larix olgensis* (1.83%), the populations tend to be stable, and the populations enter the transition phase of recession. The mortality was high in early stage, the number of saplings was gravely insufficient. The survival curve of the *Betula platyphylla* and *Alnus hirsuta* population indicated that it approached a Odum-B<sub>3</sub> type, however, the survival curve of the *Larix olgensis* revealed that it approached a Deevey-I type; Four survival functions curves suggested that the *Betula platyphylla*, *Larix olgensis* and *Alnus hirsuta* population would have an early increase then recession in mid to late-stage. Spectral analysis of the population demonstrated that the first harmonic have a significant on the dynamic of population, there was not a marked periodic fluctuation in the progress of natural regeneration of *Betula platyphylla*, *Larix olgensis* and *Alnus hirsuta*, the development of whole population trend to stability; The time sequence model predicted that the number of old age individuals would ascent in the coming two, four and six age classes in *Betula platyphylla*, *Larix olgensis* and *Alnus hirsuta* populations, but the regeneration seedling was rare, so the population tend to degenerate are inevitable. Forest-swamp ecotone are more sensitive and vulnerable to environment change, humanactivities have a significant impact on the development and evolution of *Betula platyphylla*, *Larix olgensis* and *Alnus hirsuta* populations, which improve the risk of forest transition into swamp, therefore, we should minimize disturbance and strengthen the protection and management of vegetation communities on forest-swamp ecotone, so as to create favorable conditions for the succession of forest-swamp ecotone communities to forest.

**Key words:** *Betula platyphylla*, *Larix olgensis*, *Alnus hirsuta*, population dynamics, life table, survival analysis, spectral analysis, time sequence analysis, Changbai Mountain

种群数量动态是种群个体生存能力与环境因素交互作用的结果(杨小林等,2007),其年龄结构和更新模式受干扰、林木间竞争等诸多因素的影响(Dang et al,2010),年龄结构能够推测种群对于环境事件的响应以及重建种群发展历史,为森林生态系统的恢复和管理提供参考,因此,分析种群的年龄结构对于了解种群长期的生态学过程至关重要(Wang et al,2004)。生命表以及存活曲线是研究种群数量动态变化和进行种群统计的重要工具(吴承祯等,2000;闫淑君等,2002;洪伟等,2004),生存分析函数是生命表分析最常用的辅助分析方法,可以更好地阐明种群生存规律(卢杰等,2013;张亚芳等,2015)。谱分析方法是探讨种

群波动性的数学工具,能够反映种群数量动态变化的周期性(毕晓丽等,2002;张志祥等,2008),而时间序列分析可以预测种群未来年龄结构及发展趋势(卢杰等,2013)。

白桦(*Betula platyphylla*)和长白落叶松(*Larix olgensis*)为中国东北地区典型的乡土树种(刘忠玲等,2011),是地带性顶极植被类型—阔叶红松林遭到自然或人为干扰破坏后恢复形成的天然次生林(韩营营等,2015)。群落交错区是相邻生态系统之间的过渡地带,在该地段种的数目以及一些种的密度可能会呈现增加趋势,被称为“边缘效应”,同时,群落交错带对气候变化、干扰等也更具敏感性。由于人类活动频率和强度的增加,对群落交

错区生境产生强烈的影响与作用。长白山林区沼泽化面积占林地总面积达 10%~15%, 本文研究地白河地区沼泽地面积为  $5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 大约占该区域总面积 2% 左右 (韩景军, 2010)。开展森林—沼泽交错带的相关研究对于了解森林—沼泽交错带种群的动态变化、揭示种群演替规律、保护过渡地带物种多样性以及防治森林沼泽化等具有重要的理论意义和实践价值。为此, 牟长城 (2003) 和牟长城等 (2001, 2004, 2005) 对沼泽交错区域白桦和落叶松群落演替规律、毛赤杨和白桦生物量以及植物多样性空间分布格局等方面进行了较为系统的研究。目前, 对于白桦和长白落叶松林的研究主要集中在林分空间结构 (夏富才等, 2011)、种群生活史特征与空间分布格局 (杨慧等, 2007; 靳静静等, 2014)、凋落物分解 (李雪峰等, 2007; 周文昌等, 2012)、土壤呼吸速率、生物量以及碳储量的分配规律等方面 (巨文珍等, 2011; 韩营营等, 2015); 然而, 有关森林—沼泽交错带白桦、长白落叶松及辽东桤木 (*Alnus hirsuta*) 种群的年龄结构与动态的研究鲜有见报, 因此, 本研究以分布于森林—沼泽交错带的白桦—长白落叶松林为对象, 从年龄结构、生命表、生存分析、谱分析以及时间序列预测等方面对群落优势种群白桦、长白落叶松和辽东桤木进行研究和探讨, 阐明白桦、长白落叶松和辽东桤木种群的数量动态特征及其种群更新与维持的机制, 以期对森林—沼泽交错带群落的科学保护和管理、防治森林沼泽化等提供科学依据, 同时也为森林沼泽交错带生物多样性、群落演替机制的研究提供参考。

## 1 研究区概况

研究区域位于吉林省安图县二道白河镇,  $128^{\circ}28' \text{ E}$ ,  $42^{\circ}24' \text{ N}$ , 海拔 736 m, 地势较为平坦, 气候类型属温带湿润季风气候, 年平均气温  $3.5^{\circ}\text{C}$ ,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的年活动积温为  $2\ 200^{\circ}\text{C}$ , 降水多集中在 6—9 月, 年均降水量 600~1 000 mm, 全年日照时数为 2 300 h, 无霜期约 140 d, 主导风向为西风。土壤类型为典型的山地暗棕色森林土, 土层平均厚度约 40 cm, 地带性植被为阔叶红松林。

研究样地设于森林—沼泽交错带白桦—长白落叶松天然次生林内, 白桦、长白落叶松和辽东桤木为森林—沼泽交错群落的主要建群种, 长白落叶松和辽东桤木在邻近沼泽生境地段占优势。伴生树种主要有山杨 (*Populus davidiana*)、水曲柳 (*Fraxinus mandschurica*)、蒙古栎 (*Quercus mongolica*)、五角枫 (*Acer pictum* subsp. *mono*)、茶条枫 (*Acer tataricum* subsp. *ginnala*)、稠李 (*Padus avium*)、春榆 (*Ulmus davidiana* var. *japonica*)、紫椴 (*Tilia amurensis*)、红皮云杉 (*Picea koraiensis*) 等, 林下植被较为丰富, 其中灌木层以绣线菊 (*Spiraea salicifolia*)、柴桦 (*Betula fruticosa*) 为优势种, 草本层以猴腿蹄盖蕨 (*Athyrium brevifrons*)、蚊子草 (*Filipendula palmata*)、羊胡子草 (*Eriophorum vaginatum*) 为优势种, 木贼 (*Equisetum hyemale*)、大叶柴胡 (*Bupleurum longiradiatum*)、山尖子 (*Parasenecio hastatus*)、大叶樟 (*Deyeuxia purpurea*)、三穗薹草 (*Carex tristachya*)、半夏 (*Pinellia ternata*)、芦苇 (*Phragmites australis*) 等为伴生种。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置与调查

研究样地位于长白山东亚植物园内, 2014 年 8 月, 在以白桦、长白落叶松以及辽东桤木为优势种群的森林—沼泽交错带群落中设置 4 块  $20 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  的样地, 在每个样地内根据对角线方法选取 2 个  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  的样方调查灌木层, 选取 5 个  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  的小样方调查草本层植物, 记录每种植物的种名、株数/丛数、基径、高度、多度和盖度等。对样地内所有乔木进行每木检尺, 测定胸径、树高等因子, 并记录整个样地的植被状况和生境条件。

### 2.2 年龄结构、生命表编制和生存分析

采用径级结构代替年龄结构的方法分析种群动态 (洪伟等, 2004; 刘贵峰等, 2011)。根据调查数据和已有报道 (胡尔查, 2013), 将胸径小于 2.5 cm 的白桦和辽东桤木幼苗划定为第 1 径级, 其后以 5 cm 为步长增加 1 级, 即  $2.5 \text{ cm} \leq \text{DHB} < 7.5 \text{ cm}$ , 作为第 2 径级, 依次类推, 其中白桦种群划分为 7 个等级, 辽东桤木种群共划分为 5 个等级, 径

级与龄级相对应,第 1 径级对应第 I 龄级,第 2 径级对应第 II 龄级,以此类推。

由于针叶树种长白落叶松的生活史特征与阔叶树种白桦、辽东柞木存在较大差异性,所以不能采用相同的径级划分标准,但同时缺少长白落叶松径级划分的标准和依据,因此运用研究区域内不同林龄长白落叶松林分调查数据,建立长白落叶松种群的年龄结构模型:

$$A = -9.0693 + 3.1434D - 0.0390D^2 \quad (R = 0.9719, F = 110.8585) \quad (1)$$

式中, $A$  为长白落叶松个体年龄(a), $D$  为长白落叶松个体胸径(cm)。

依据调查资料及所建立的长白落叶松种群年龄结构模型,以 10 a 年龄距,将长白落叶松种群划分为 6 个龄级,即龄级  $0 \leq A < 10$  a 为第 I 龄级,  $10 \leq A < 20$  a 为第 II 龄级,以此类推。

统计白桦、长白落叶松和辽东柞木种群各龄级林木个体数,作白桦—长白落叶松优势种群龄级结构图。白桦、长白落叶松和辽东柞木种群生命表的编制和生存规律分析按照 Wratten & Fry (1980) 和吴承祯等 (2000) 的方法进行。

### 2.3 种群年龄结构数量的动态变化 ( $V_{pi}$ ) 及谱分析

采用陈晓德 (1998) 推导出的衡量种群年龄结构各动态指数来定量描述白桦—长白落叶松优势种群动态特征,计算得出白桦、长白落叶松以辽东柞木种群龄级间动态指数 ( $V_n$ )、种群年龄结构的数量变化动态指数 ( $V_{pi}$ )、考虑到种群年龄级数量 ( $K$ ) 及种群年龄级个体数 ( $S_n$ ) 因素的种群年龄结构动态指数 ( $V'_{pi}$ )。

谱分析是 Fourier 级数的展开,种群数量动态可以通过不同龄级个体数分布波动来展现,复杂的周期现象可以由不同振幅和相应的谐波组成,写成正弦波形式 (洪伟等, 2004; 张志祥等, 2008):

$$N_t = A_0 + \sum_{k=1}^n A_k \sin(\omega_k t + \theta_k) \quad (2)$$

式中, $A_0$  为周期变化的均值,确定周期波动的基线, $A_k$  ( $k=1, 2, 3, \dots, p$ ) 为各谐波的振幅,反映各个周期的作用大小, $\omega_k$  及  $\theta_k$  分别为各谐波的频率及相角, $N_t$  为  $t$  时刻种群的大小。

将种群各年龄个体分布看作为一个时间系列  $t$ ,

以  $X_t$  表示  $t$  年龄序列时的个体数 (本文采用龄级序列作为其年龄序列);  $n$  为系列总长度;  $p = n/2$  是谐波的总个体数是已知的;  $T$  为时间系列  $t$  的最长周期 (正弦波的基本周期), 即资料的总长度,  $T = n$  为已知。因此, Fourier 分解中的各个参数可以利用下式进行估计。

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t, A_k^2 = a_k^2 + b_k^2 \quad (3)$$

$$\omega_k = 2\pi k/T, \theta_k = \arctg(a_k/b_k) \quad (4)$$

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n X_t \cos \frac{2\pi k(t-1)}{n} \quad (5)$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n X_t \sin \frac{2\pi k(t-1)}{n} \quad (6)$$

### 2.4 种群动态的时间序列预测

采用一次移动平均法 (肖宜安等, 2004) 对白桦、长白落叶松以及辽东柞木种群动态进行预测分析, 其模型如下:

$$M_t = \frac{1}{n} \sum_{k=t-n+1}^t X_k \quad (7)$$

式中, $n$  表示需要预测的未来时间年限,  $t$  为龄级,  $M_t$  表示未来  $n$  年时  $t$  龄级的种群数量,  $X_k$  表示当前  $k$  龄级种群大小。应用以上模型预测白桦、长白落叶松和辽东柞木种群未来 2、4 和 6 个龄级的发展趋势。

## 3 结果与分析

### 3.1 白桦—长白落叶松优势种群分布现状及结构特征

3.1.1 白桦—长白落叶松优势种群分布状况及年龄结构 在 2 400 m<sup>2</sup> 样地中共调查到 DHB  $\geq 1$  cm 的林木 373 株, 不同树种林木径级大小分布状况如表 1 所示。主要优势种白桦、长白落叶松和辽东柞木的个体数分别为 125 株、105 株和 61 株, 占个体数整体的 78.02%, 其中, 白桦种群个体主要分布在 8~20 cm 径级, 而长白落叶松和辽东柞木种群个体主要分布在 5~16 cm 径级 (表 1)。由图 1 可知, 主要优势种群白桦、长白落叶松和辽东柞木的个体数随龄级的增加呈现出先增加而后降低的趋势, 白桦、长白落叶松以及辽东柞木种群均在第 III 龄级达到峰值, 分别为 45、38 和 38 株, 分别占

表 1 白桦—长白落叶松林个体径级分布  
Table 1 Diameter distribution of *Betula platyphylla*—*Larix olgensis* forest

树种 Tree species	径级分布 Diameter distribution (cm)								总计 Total
	0~5	5~8	8~12	12~16	16~20	20~24	24~28	28~32	
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	1	13	39	31	21	12	7	1	125
山杨 <i>Populus davidiana</i>	0	0	0	1	5	5	3	0	14
长白落叶松 <i>Larix olgensis</i>	5	27	34	18	12	6	3	0	105
辽东栎木 <i>Alnus hirsuta</i>	0	11	35	13	1	1	0	0	61
蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	8	10	0	0	0	0	0	0	18
茶条枫 <i>Acer tataricum</i> subsp. <i>ginnala</i>	4	3	0	0	0	0	0	0	7
五角枫 <i>Acer pictum</i> subsp. <i>mono</i>	5	7	0	0	0	0	0	0	12
紫花枫 <i>Acer pseudosieboldianum</i>	0	2	0	0	0	0	0	0	2
水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	3	3	3	1	0	1	0	0	11
稠李 <i>Padus racemosa</i>	0	3	3	0	0	0	0	0	6
春榆 <i>Ulmus davidiana</i> var. <i>japonica</i>	0	0	2	0	1	0	0	0	3
紫椴 <i>Tilia amurensis</i>	0	1	0	0	0	1	1	0	3
红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>	2	1	0	0	0	0	0	0	3
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	1
黄槿 <i>Phellodendron amurense</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	1
山荆子 <i>Malus baccata</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	1
总计 Total	30	82	116	64	40	26	14	1	373

种群总体的 36.00%、36.19% 和 62.30%，随后第 III~VI 龄级，种群个体数目呈单调递减趋势，白桦和辽东栎木种群减少至 5 株，仅占其种群总体数量的 0.80% 和 1.64%，长白落叶松种群个体数目逐步减少至 20 株，占种群总体的 3.81%。白桦—长白落叶松优势种群表现出中龄级个体数所占比重较大，老、幼龄级个体数所占比例小，表明白桦、长白落叶松以及辽东栎木种群呈现衰退的趋势。

对不同种群龄级和个体数目之间的关系采用不同数学模型进行回归分析，通过对实验数据的模拟，选择最优曲线模型，研究证明白桦、长白落叶松、辽东栎木种群的年龄结构分布规律可以用 Lognormal 函数表征，显著性检验表明，模型达显著或极显著水平（表 2）。因此，可以用该模型预测

不同种群龄级—株数分布。

3.1.2 白桦—长白落叶松优势种群年龄结构动态分析 由表 3 可以看出，白桦、长白落叶松以及辽东栎木种群相邻龄级间个体数量变化动态指数  $V_1$ 、 $V_2$  均小于 0，表明第 I、II 龄级个体数目小于第 III 龄级；整个种群年龄结构数量变化动态指数 ( $V_{pi}$ ) 显示种群增长潜力为辽东栎木 (47.84%) > 白桦 (28.16%) > 长白落叶松 (22.00%)，在考虑种群受未来外部环境干扰时，整个种群龄级结构动态指数 ( $V'_{pi}$ ) 表明种群增长潜力为辽东栎木 (9.57%) > 白桦 (4.02%) > 长白落叶松 (1.51%)， $V'_{pi}$  均趋近于 0，随机干扰风险极大值即种群结构对随机干扰的敏感性指数  $P$  为辽东栎木 (0.200) > 白桦 (0.143) > 长白落叶松 (0.083)，说明白桦、长

表 2 不同种群龄级与株数之间的回归关系

Table 2 Regression relationship of diameter classes and individuals in different populations

种群 Population	回归模型 Regression model	参数 Parameters			R <sup>2</sup>	P
		a	b	c		
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	$y = \frac{a}{x} \left[ -0.5 \left( \frac{\ln(x/c)}{b} \right)^2 \right]$	157.163 2	0.323 7	3.675 1	0.981 1	0.002 6
长白落叶松 <i>Larix olgensis</i>		112.047 5	0.385 3	3.313 0	0.952 8	0.010 3
辽东桤木 <i>Alnus hirsuta</i>		114.224 6	0.216 5	2.963 3	0.999 9	0.008 8

注：x. 龄级；y. 株数。

Note: x. Age class; y. Number.

表 3 种群龄级结构动态变化指数

Table 3 Dynamic index of population sizes structure

种群 Population	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V <sub>pi</sub>	V' <sub>pi</sub>
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	-100	-73.33	22.22	37.14	54.55	90.00	28.16	4.02
长白落叶松 <i>Larix olgensis</i>	-91.30	-39.47	44.74	19.05	76.47	—	22.00	1.83
辽东桤木 <i>Alnus hirsuta</i>	-100.00	-71.05	71.05	90.91	—	—	47.84	9.57

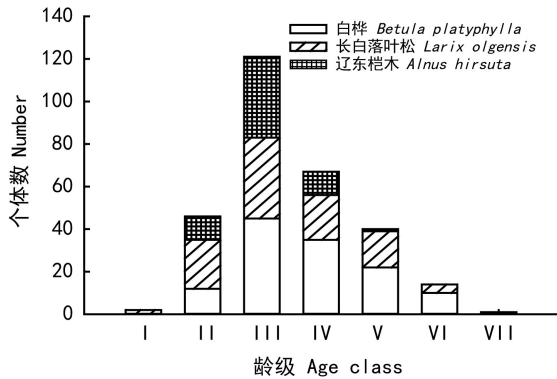


图 1 白桦—长白落叶松优势种群的年龄结构  
Fig. 1 Age structure of the dominant species in a *Betula platyphylla*—*Larix olgensis* forest

白落叶松和辽东桤木种群趋于稳定型,但呈现衰退形势,且对外界干扰较为敏感。

3.2 生命表与存活曲线分析

根据各龄级个体数编制白桦、长白落叶松以及辽东桤木种群生命表(表 4),随龄级的增加,白

桦、长白落叶松和辽东桤木种群标准化存活数  $l_x$  在第 I~III 龄级逐步升高而后逐步降低,白桦和辽东桤木种群的生命期望  $e_x$  均在第 II 龄级达到最大,长白落叶松种群  $e_x$  在第 I 龄级最大,随后逐渐降低。此外,白桦和辽东桤木种群第 II 龄级的死亡率  $q_x$  为负值,长白落叶松种群第 I、II 龄级  $q_x$  均小于 0。

分别以存活量的对数值  $\ln l_x$ 、死亡率  $q_x$  为纵坐标,以龄级为横坐标作白桦、长白落叶松以及辽东桤木种群存活曲线和死亡率曲线(图 2)。由图 2 可知,白桦和辽东桤木种群的存活曲线趋于 Odum-B<sub>3</sub> 型(近似于 S 曲线型),长白落叶松种群的存活曲线基本呈 Deevey-I 型。死亡率曲线显示,白桦、长白落叶松和辽东桤木种群的死亡率  $q_x$  均呈单调增加趋势,死亡率曲线变化趋势大体相同;白桦、长白落叶松以及辽东桤木种群幼龄和老龄阶段个体数稀少,中龄级个体是维持种群稳定性的主要部分。

3.3 生存分析

白桦、长白落叶松和辽东桤木种群的 4 个生

表 4 白桦、长白落叶松和辽东桤木种群生命表  
Table 4 Static life table of *Betula platyphylla*, *Larix olgensis* and *Alnus hirsuta*

种群 Population	龄级 Age class	径级/年龄 Diameter class /Age	$a_x$	$l_x$	$\ln l_x$	$d_x$	$q_x$	$L_x$	$T_x$	$e_x$	$K_x$
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	I	0~2.5 cm	0	0	—	-267	—	133	2 778	—	-2.565
	II	2.5~7.5 cm	12	267	5.586	-733	-2.75	633	2 644	9.917	-1.322
	III	7.5~12.5 cm	45	1 000	6.908	222	0.22	889	2 011	2.011	0.251
	IV	12.5~17.5 cm	35	778	6.656	289	0.37	633	1 122	1.443	0.464
	V	17.5~22.5 cm	22	489	6.192	267	0.55	356	489	1.000	0.788
	VI	22.5~27.5 cm	10	222	5.404	200	0.90	122	133	0.600	2.303
	VII	27.5~32.5 cm	1	22	3.101	22	1.00	11	11	0.500	—
长白落叶松 <i>Larix olgensis</i>	I	0~10 a	2	53	3.963	-553	-10.500	329	2 408	45.750	-2.442
	II	10~20 a	23	605	6.406	-395	-0.652	803	2 355	3.891	-0.502
	III	20~30 a	38	1 000	6.908	447	0.447	776	1 605	1.605	0.593
	IV	30~40 a	21	553	6.315	105	0.190	500	829	1.500	0.211
	V	40~50 a	17	447	6.103	342	0.765	276	329	0.735	1.447
	VI	50~60 a	4	105	4.656	105	1.000	53	53	0.500	—
辽东桤木 <i>Alnus hirsuta</i>	I	0~2.5 cm	0	0	—	-289	—	145	1 605	—	—
	II	2.5~7.5 cm	11	289	5.668	-711	-2.45	645	1 461	5.045	-1.240
	III	7.5~12.5 cm	38	1 000	6.908	711	0.711	645	816	0.816	1.240
	IV	12.5~17.5 cm	11	289	5.668	263	0.909	158	171	0.591	2.398
	V	17.5~22.5 cm	1	26	3.270	26	1.000	13	13	0.500	—

注:  $a_x$ . 在  $x$  龄级内个体存活数;  $l_x$ . 在  $x$  龄级开始时标准化存活数(一般转化为 1000);  $d_x$ . 从  $x$  到  $x+1$  龄级期间标准化死亡数;  $q_x$ . 从  $x$  到  $x+1$  龄级期间死亡率;  $L_x$ . 从  $x$  到  $x+1$  龄级间隔期内尚存活的个体数;  $T_x$ . 从  $x$  龄级到超过  $x$  龄级的个体总数;  $e_x$ . 进入  $x$  龄级个体的生命期望或平均期望生命;  $K_x$ . 种群消失率(损失度)。

Note:  $a_x$ . Number of survival individuals;  $l_x$ . Standardized number of survivors from the beginning to  $x$  age grade;  $q_x$ . Number of mortality from age  $x$  to  $x+1$ ;  $L_x$ . Number of survival individuals from  $x$  to  $x+1$  age grade;  $T_x$ . Total number of survival individuals from  $x$  age grade;  $e_x$ . Life expectation of individual at  $x$  age grade;  $K_x$ . Disappearance rate.

表 5 白桦、长白落叶松和辽东桤木种群的周期性波动  
Table 5 Periodic fluctuation of *Betula platyphylla*,  
*Larix olgensis* and *Alnus hirsuta*

种群 Population	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	1.774 3	0.659 8	0.161 0	0.161 0
长白落叶松 <i>Larix olgensis</i>	1.173 0	0.544 5	0.075 3	—
辽东桤木 <i>Alnus hirsuta</i>	1.834 8	0.269 8	0.269 8	—

存函数曲线如图 3 所示。由图 3 可知,随着龄级增加,白桦和辽东桤木种群  $S_{(t)}$  和  $F_{(t)}$  曲线变化趋势相近,  $S_{(t)}$  单调下降,  $F_{(t)}$  单调上升,二者互补;长白落叶松种群  $S_{(t)}$  第 I ~ II 龄级上升,随后逐渐降低,  $F_{(t)}$  则表现为先下降而后逐步上升的变化规律;白桦、长白落叶松和辽东桤木种群  $S_{(t)}$  和  $F_{(t)}$  升降幅度较大,这与生命表中幼龄个体较少甚至缺失的状况相吻合。

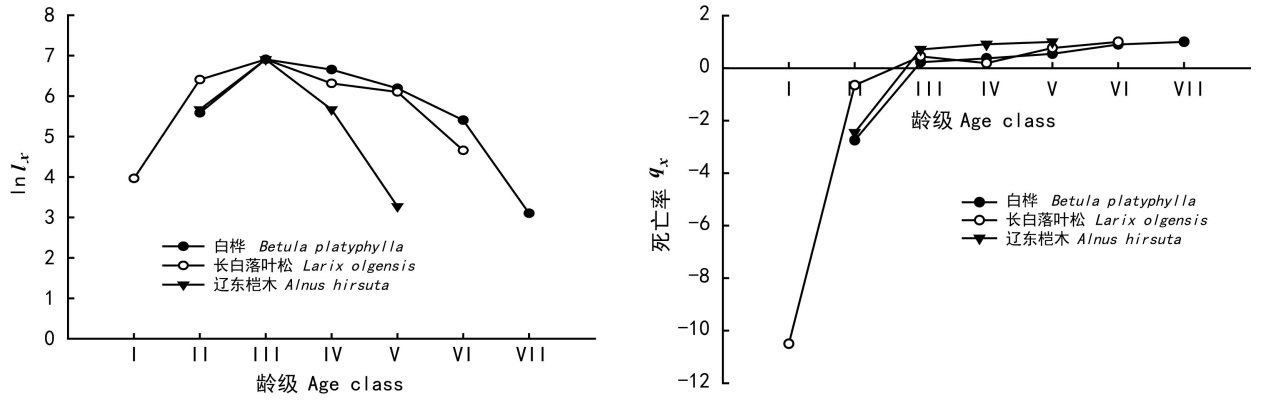


图 2 白桦、长白落叶松和辽东桤木种群存活曲线和死亡率曲线

Fig. 2 Survival curve and mortality rate ( $q_x$ ) curve of *Betula platyphylla*, *Larix olgensis* and *Alnus hirsuta*

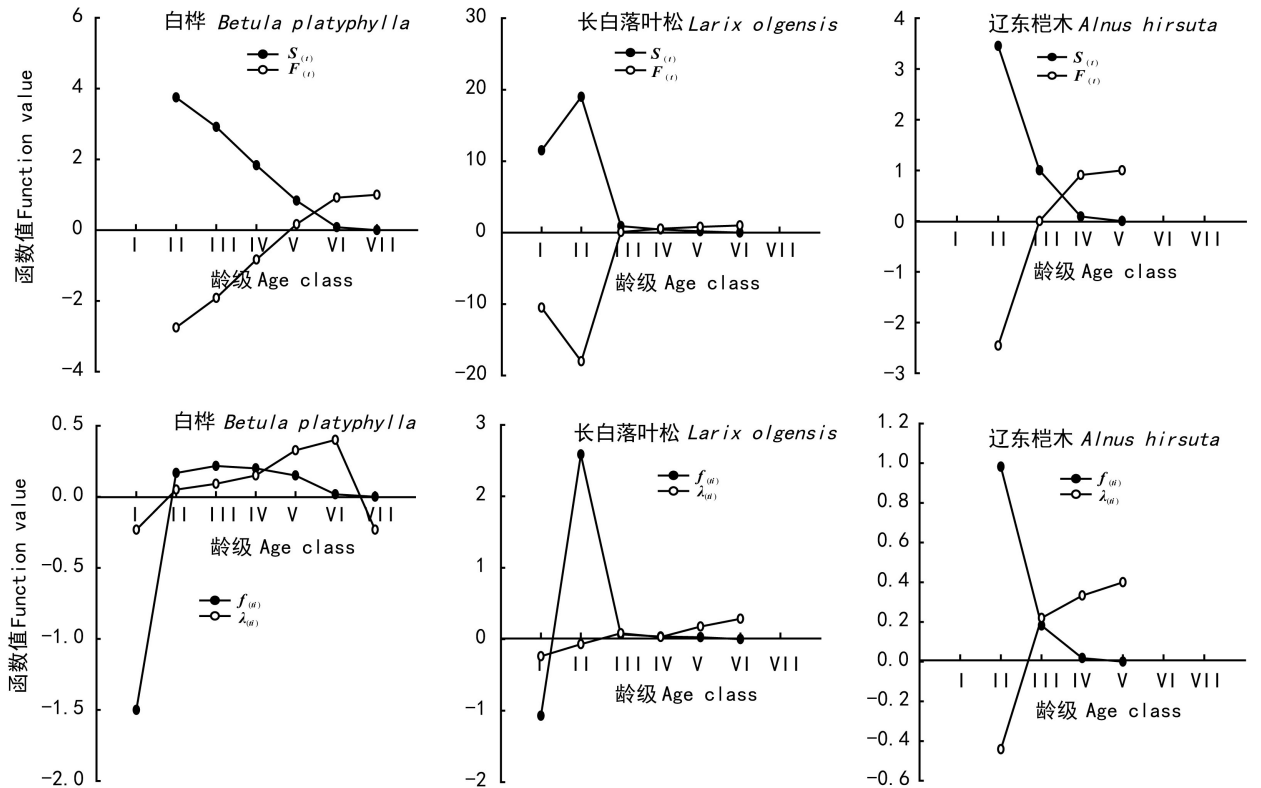


图 3 白桦、长白落叶松和辽东桤木种群生存函数曲线  $S_{(t)}$ ·生存率函数；

$F_{(t)}$ ·积累死亡函数； $f_{(t)}$ ·死亡密度函数； $\lambda_{(t)}$ ·危险率函数。

Fig. 3 Survival function curves of *Betula platyphylla*, *Larix olgensis* and *Alnus hirsuta*  $S_{(t)}$ ·Survival rate function;

$F_{(t)}$ ·Cumulative mortality rate function;  $f_{(t)}$ ·Mortality density function;  $\lambda_{(t)}$ ·Hazard rate function.

白桦种群的  $f_{(t)}$  曲线和  $\lambda_{(t)}$  曲线变化趋势差异较为明显,第 I ~ II 龄级  $f_{(t)}$  骤增,第 II ~ VII 龄级

$f_{(t)}$  先缓慢升高而后逐步降低,而  $\lambda_{(t)}$  曲线第 I ~ VI 龄级呈单调增加趋势,而后急剧下降;长白落叶



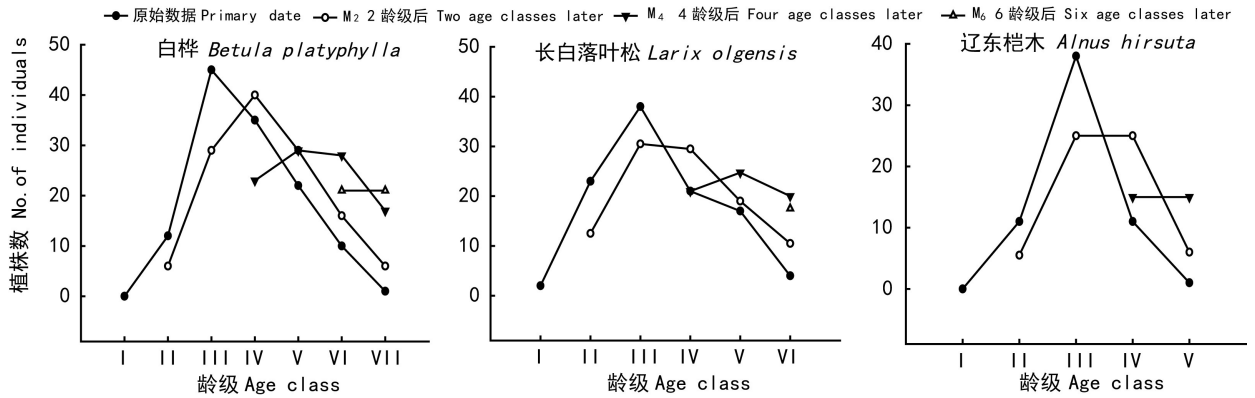


图 4 白桦、长白落叶松和辽东桤木种群动态变化时间序列预测

Fig. 4 Time sequence analysis of age structure of *Betula platyphylla*, *Larix olgensis* and *Alnus hirsuta*

松种群第 I ~ II 龄级  $f_{(ii)}$  急剧上升,而后骤降直至平稳降低,  $\lambda_{(ii)}$  在第 I ~ III 龄级单调递增,第 IV 龄级有所下降,随后又呈现出增加的趋势,这与死亡率曲线变化趋势大致相同;辽东桤木种群  $f_{(ii)}$  单调减少,  $\lambda_{(ii)}$  单调增加。生存函数分析表明,白桦、长白落叶松和辽东桤木种群均呈现出前期增长,后期衰退的特点。

### 3.4 种群数量动态的谱分析

谱分析结果如表 5 所示,由振幅  $A_k$  值可知,基波  $A_1$  最大,表现为辽东桤木 (1.834 8) > 白桦 (1.774 3) > 长白落叶松 (1.173 0)。

### 3.5 时间序列预测

以白桦、长白落叶松和辽东桤木种群各龄级个体数为原始数据,按照一次移动平均法预测各龄级在未来 2、4 和 6 个龄级后个体数目。从图 4 可以看出,在经历未来 2、4 和 6 个龄级后,白桦、长白落叶松以及辽东桤木老龄个体数目均呈现上升趋势,表明白桦、长白落叶松和辽东桤木种群的中龄个体数目占总体的比重较大,能使后期个体得到一定数量的补充。而第 II 和 III 龄级在经历未来 2 个龄级后,白桦、长白落叶松以及辽东桤木种群个体数由原来的 12、45 株下降到 6、29 株,23、38 株下降到 13、31 株,11、38 株下降到 6、25 株,这一结果表明,白桦、长白落叶松以及辽东桤木种群幼苗较少,小树数量会有所下降。

## 4 讨论与结论

白桦、长白落叶松和辽东桤木种群年龄结构及数量动态是其自身生物学特性与环境因子相互作用的结果。研究发现白桦和长白落叶松种群年龄结构呈基部较宽顶部狭窄的非典型金字塔型,略呈纺锤状,白桦、长白落叶松以及辽东桤木种群个体数随龄级增加而呈现的变化规律可以用 Log-normal 函数很好的表征。年龄结构动态指数分析表明,白桦、长白落叶松和辽东桤木种群的  $V_{pi}$  和  $V'_{pi}$  均大于 0,说明种群呈增长趋势,这是由于中龄级个体数目较多,一段时期内可维持种群稳定,但  $V'_{pi}$  均趋近于 0,种群增长潜力非常有限。

从时间序列预测分析结果来看,白桦、长白落叶松以及辽东桤木种群老龄个体数在未来 2、4 和 6 个龄级后均有一定程度的增加,但由于缺少幼龄个体的补充,白桦、长白落叶松以及辽东桤木种群未来必然呈衰退趋势。森林—沼泽交错带水湿环境特殊,虽然白桦、长白落叶松和辽东桤木能够适应沼泽交错带有效养分不足以及土壤通气性差的生境条件(牟长城,2003),但同时也加剧了幼苗成功更新和生长的环境压力,此外,随着种群发展,林下光照不足,丰富的林下植被等都会给白桦、长白落叶松以及辽东桤木等阳性先锋树种幼苗的更

新带来困难,这是引起种群衰退的重要原因。白桦、长白落叶松以及辽东柃木种群年龄结构、年龄结构动态指数及时间序列预测分析显示出较好的一致性,能够较为客观、精确地描述种群的数量动态规律。

本研究采用“空间推时间”、“横向导纵向”的方法,以同一时期采集的白桦和辽东柃木种群所有个体的径级编制生命表,同时,由于缺少长白落叶松径级划分标准,故建立长白落叶松年龄结构模型,在此基础上进行生命表编制及相关分析,从而导致白桦、长白落叶松以及辽东柃木种群生命表中产生死亡率小于零的状况,这与生命表编制的3个假设条件相悖,但仍能提供一些有重要的生态学信息反映种群的发展或衰落(Wratten & Fry, 1980)。因此,本文在编制生命表及生存分析中,不对数据进行匀滑处理,直接使用负值分析(刘影等, 2013; 吕海英等, 2014; 解婷婷等, 2014)。种群生命表及存活曲线分析显示,白桦和辽东柃木种群的存活曲线趋于 Odum-B<sub>3</sub>型,北京东灵地区和山西七里谷白桦种群年龄结构的龄级划分与本文相同,但其存活曲线均为 Deevey-I 型(杨慧等, 2007; 靳静静等, 2014),殷东生等(2009)研究表明小兴安岭白桦种群存活曲线为 Deevey-II 型,本研究结果与前人相关研究存在差异的原因可能是:研究区域不同,受温度、降水等气候因子的影响;本文研究的对象为以白桦、长白落叶松以及辽东柃木种群为优势种的森林群落,与前人所研究的群落类型相差较大;此外,本研究样地位于森林—沼泽交错带,森林—沼泽交错带这一独特生境在一定程度上导致种群存活曲线的差异性。白桦、长白落叶松和辽东柃木种群死亡率曲线呈上升趋势,这主要是由于随着种群的发展,植株对营养和空间的需求持续增加,种内、种间竞争加剧而导致。此外,诸如种子萌发力和散布能力、气候变化、动物啃食、致病菌等因素也是影响死亡率的重要因素(Arseneault & Payette, 1997)。生存分析函数研究结果显示,白桦、长白落叶松和辽东柃木种群具有前期增长、中后期逐步衰退的特征。

波动出现于所有植物群落中,周期性波动是种群维持自身稳定性的一个重要机制,谱分析方

法可以表达这种机制。种群基本周期的波动通过基波来体现,其周期长度由种群波动特性所决定,为种群本身所固有。这说明白桦、长白落叶松以及辽东柃木种群整个生命周期生物学特征对种群数量动态变化有显著的控制作用。此外,种内和种间竞争也是影响种群动态的重要因素,今后,可以在森林—沼泽交错带开展白桦—长白落叶松优势种群的种内和种间竞争规律以及种群空间分布格局等相关研究,以期深入了解森林—沼泽交错带白桦—长白落叶松优势种群的发展规律。

白桦、长白落叶松、辽东柃木等树种具有各自独特的生存策略和生长对策(牟长城等, 2003),能够适应森林—沼泽交错带水湿、低有效养分、透气性差的生境条件,成为先锋树种,这也是森林—沼泽交错带群落进一步发育、发展及演变的前提及基础。森林—沼泽交错带群落演替的同时,也对群落生境产生显著影响,白桦、长白落叶松、辽东柃木等先锋阳性树种能够改造生境,促使沼泽湿地生境旱化,研究显示,长白山落叶松和白桦沼泽生态交错带经过 50~60 a 的发展会演替为森林群落(牟长城, 2003)。森林—沼泽交错带具有较大的空间异质性,物种资源丰富,对气候变化以及人为干扰具有强烈的敏感性和脆弱性。如果人为破坏森林—沼泽交错带的植被,会使群落蒸腾作用减弱,降低森林群落改造沼泽生境作用的能力,增加森林沼泽化的风险。因此,长白山东北亚植物园在建设过程中要注重林中廊道规划的科学性,最大限度地减少对森林—沼泽交错带的扰动与破坏。此外,植物园在对社会开放过程中,也要加强对园区的管理,避免人类活动对森林—沼泽交错带生境的污染与毁坏,防治森林—沼泽交错带地区进一步沼泽化。

## 参考文献:

- ARSENEAULT D, PAYETTE S, 1997. Reconstruction of millennial forest dynamics from tree remains in a subarctic tree linepeat land [J]. *Ecology*, 78(6): 1873–1883.
- BI XL, HONG W, WU CZ, et al, 2002. Population statistic analysis of *Pinus taiwanensis* [J]. *Sci Silv Sin*, 38(1): 61–67. [毕晓丽, 洪伟, 吴承祯, 等, 2002. 黄山松种群统计分

- 析 [J]. 林业科学, 38(1): 61-67.]
- CHEN XD, 1998. A study on the method of quantitative analysis for plant population and community structure dynamic [J]. Acta Ecol Sin, 18(2): 104-107. [陈晓德, 1998. 植物种群与群落结构动态量化分析方法研究 [J]. 生态学报, 18(2): 104-107.]
- DANG HS, ZHANG YJ, ZHANG KR, et al, 2010. Age structure and regeneration of subalpine fir (*Abies fargesii*) forests across an altitudinal range in the Qinling Mountains, China [J]. For Ecol Manag, 259(3): 547-554.
- HAN YY, HUANG W, SUN T, et al, 2015. Soil organic carbon stocks and fluxes in different age stands of secondary *Betula platyphylla* in Xiaoxing'an Mountain, China [J]. Acta Ecol Sin, 35(5): 1-12. [韩莹莹, 黄唯, 孙涛, 等, 2015. 不同林龄白桦天然次生林土壤碳通量和有机碳储量 [J]. 生态学报, 35(5): 1-12.]
- HANG JJ, 2010. On ecotones between forest and swamp in Baihe region of Changbai Mountain [J]. J Beihuan Univ (Nat Sci Ed), 1(3): 246-253. [韩景军, 2010. 长白山白河地区森林/沼泽交错群落的研究. 北华大学学报(自然科学版), 1(3): 246-253.]
- HONG W, WANG XG, WU CZ, et al, 2004. Life table and spectral analysis of endangered plant *Taxus chinensis* var. *mairei* population [J]. Chin J Appl Ecol, 16(6): 1109-1112. [洪伟, 王新功, 吴承祯, 等, 2004. 濒危植物南方红豆杉种群生命表及谱分析 [J]. 应用生态学报, 16(6): 1109-1112.]
- HU EZ, WANG XJ, ZHANG WJ, et al, 2013. Age structure and point pattern of *Betula platyphylla* in Wulashan Reserve Inner Mongolia [J]. Acta Ecol Sin, 33(9): 2867-2876. [胡尔查, 王晓江, 张文军, 等, 2013. 乌拉山自然保护区白桦种群的年龄结构和点格局分析 [J]. 生态学报, 33(9): 2867-2876.]
- JIN JJ, ZHANG QD, BI RC, 2014. Life history characteristics and point pattern of *Betula platyphylla* population in Qiliyu region, Shanxi, China [J]. Chin J Ecol, 33(9): 2316-2321. [靳静静, 张钦弟, 毕润成, 2014. 山西七里峪白桦种群生活史特征与点格局分析 [J]. 生态学杂志, 33(9): 2316-2321.]
- JU WZ, WANG XJ, SUN YJ, 2011. Age structure effects on stand biomass and carbon storage distribution of *Larix olgensis* plantation [J]. Acta Ecol Sin, 31(4): 1139-1148. [巨文珍, 王新杰, 孙玉军, 2011. 长白落叶松林龄序列上的生物量及碳储量分配规律 [J]. 生态学报, 31(4): 1139-1148.]
- LI XF, ZHANG Y, NIU LQ, et al, 2007. Litter decomposition processes in the *Betula platyphylla* forest and the birch and poplar (*Populus davidiana*) mixed forest [J]. Acta Ecol Sin, 27(5): 1782-1790. [李雪峰, 张岩, 牛丽君, 等, 2007. 长白山白桦 (*Betula platyphylla*) 纯林和白桦山杨 (*Populus davidiana*) 混交林凋落物的分解 [J]. 生态学报, 27(5): 1782-1790.]
- LIU GF, ZANG RG, CHENG KW, et al, 2011. Population dynamics of *Picea-schrenkiana* var. *tianshanica* in the Tianshan Mountains, China [J]. Chin J Appl Environ Biol, 17(5): 20-25. [刘贵峰, 臧润国, 成克武, 等, 2011. 天山云杉的种群动态 [J]. 应用与环境生物学报, 17(5): 20-25.]
- LIU Y, ZHANG XF, ZHAO Y, et al, 2013. Population structure and its dynamics of wild *Prunus divaricata* in Xinjiang, Northwest China [J]. Chin J Ecol, 32(7): 1762-1769. [刘影, 张相锋, 赵玉, 等, 2013. 新疆濒危野生櫻桃李的种群结构与动态 [J]. 生态学杂志, 32(7): 1762-1769.]
- LIU ZL, WANG QC, SUN XX, 2011. Soil nutrient status of *Pure birch* and *Larch* plantations based on their seedling bioassay [J]. Chin J Appl Ecol, 28(2): 1999-2004. [刘忠玲, 王庆成, 孙欣欣, 2011. 白桦和落叶松苗木对其纯林土壤养分的生物检测 [J]. 应用生态学报, 28(2): 1999-2004.]
- LU J, GUO QQ, ZHENG WL, et al, 2013. Population structure and dynamic characteristics of *Pinus densata* in southeast Tibet [J]. Sci Silv Sin, 49(8): 154-160. [卢杰, 郭其强, 郑维列, 等, 2013. 藏东南高山松种群结构及动态特征 [J]. 林业科学, 49(8): 154-160.]
- LÜ HY, WANG XA, LI J, et al, 2014. Structure and dynamics of China rare plant *Ammodendron bifolium* (Pall.) Yakovl natural population [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 34(1): 177-183. [吕海英, 王孝安, 李进, 等, 2014. 珍稀植物银砂槐中国分布区的种群结构与动态分析 [J]. 西北植物学报, 34(1): 177-183.]
- MU CC, HAN SJ, LUO JC, et al, 2001. Succession of communities on ecotones between forests and swamps in Changbai Mountain (I) Succession of communities on *Betula platyphylla*-swamp ecotones [J]. J Beijing For Univ, 23(1): 1-6. [牟长城, 韩士杰, 罗菊春, 等, 2001. 长白山森林沼泽生态交错带群落演替规律研究—白桦沼泽群落演替规律研究 [J]. 北京林业大学学报, 23(1): 1-6.]
- MU CC, SONG HW, SU P, et al, 2005. Distribution patterns of plant biodiversity on the *Alnus hirsuta* and *Betula platyphlla*-swamps [J]. J Nat Resourc, 20(2): 258-265. [牟长城, 宋洪文, 苏平, 等, 2005. 长白山毛赤杨和白桦—沼泽交错带植物多样性分布格局 [J]. 自然资源学报, 20(2): 258-265.]
- MU CC, WAN SC, SU P, et al, 2004. Biomass distribution patterns of *Alnus hirsute* and *Betula platyphylla*—swamp ecotone communities in Changbai Mountains [J]. Chin J Appl Ecol, 12(12): 2211-2216. [牟长城, 万书成, 苏平, 等, 2004. 长白山毛赤杨和白桦—沼泽生态交错带群落生物量分布格局 [J]. 应用生态学报, 12(12): 2211-2216.]
- MU CC. 2003. Succession of *Larix olgensis* and *Betula platyphlla*—marsh ecotone communities in Changbai Mountain [J]. Chin J Appl Ecol, 14(11): 1813-1819. [牟长城, 2003. 长白山落叶松和白桦—沼泽生态交错带群落演替规律研究 [J]. 应用生态学报, 14(11): 1813-1819.]
- SUN YJ, MA W, LIU YH, 2015. Biomass of *Larix olgensis* plantations based on species diversity analyses in Heilongjiang, China [J]. Acta Ecol Sin, 35(10): 3329-3338. [孙玉军, 马

- 炜,刘艳红, 2015. 与物种多样性有关的长白落叶松人工林生物量 [J]. 生态学报, 35(10):3329-3338.]
- WANG T, LIANG Y, REN H, et al, 2004. Age structure of *Picea schrenkiana* forest along an altitudinal gradient in the central Tianshan Mountains, northwestern China [J]. For Ecol Manag, 196(2-3): 267-274.
- WRATTEN SD, FRY GLA, 1980. Field and laboratory Exercises in Ecology [M]. London: Edward and Arnold Publishers.
- WU CZ, HONG W, XIE JS, et al, 2000. Life table analysis of *Tsuga longibracteata* population [J]. Chin J Appl Ecol, 11(3): 333-336. [吴承祯,洪伟,谢金寿,等, 2000. 珍稀濒危植物长苞铁杉种群生命表分析 [J]. 应用生态学报, 11(3): 333-336.]
- XIA FC, ZHAO XH, PAN CF, et al, 2011. Stand spatial structure of secondary *Birch* forest in Changbaishan Mountain [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 31(2): 407-412. [夏富才,赵秀海,潘春芳,等, 2011. 长白山白桦林空间结构研究 [J]. 西北植物学报, 31(2): 407-412.]
- XIAO YA, HE P, LI XH, et al, 2004. Study on numerous dynamics of natural populations of the endangered species *Disanthus Cercidifolius* var. *Longipes* [J]. Chin J Plant Ecol, 28(2): 252-257. [肖宜安,何平,李晓红,等, 2004. 濒危植物长柄双花木自然种群数量动态 [J]. 植物生态学报, 28(2): 252-257.]
- XIE TT, SU PX, ZHOU ZJ, et al, 2014. Structure and dynamic characteristics of *Calligonum mongolicum* population in the desertoasis ecotone [J]. Acta Ecol Sin, 34(15): 252-257. [解婷婷,苏培玺,周紫鹃,等, 2014. 荒漠绿洲过渡带沙拐枣种群结构及动态特征 [J]. 生态学报, 34(15): 252-257.]
- YAN SJ, HONG W, WU CZ, et al, 2002. Life progress and spectral analysis of *Castanopsis fargesii* population [J]. Chin J Appl Environ Biol, 8(4): 351-355. [闫淑君,洪伟,吴承祯,等, 2002. 丝栗栲种群生命过程及谱分析 [J]. 应用与环境生物学报, 8(4): 351-355.]
- YANG H, LOU AR, GAO YJ, et al, 2007. Life history characteristics and spatial distribution of the *Betula platyphylla* population in the Dongling Mountain region, Beijing, China [J]. Chin J Plant Ecol, 31(2): 272-282. [杨慧,娄安如,高益军,等, 2007. 北京东灵山地区白桦种群生活史特征与空间分布格局 [J]. 植物生态学报, 31(2): 272-282.]
- YANG XL, WANG QJ, LAN XZ, et al, 2007. Numeric dynamics of the endangered plant population of *Paeonia ludlowii* [J]. Acta Ecol Sin, 27(3): 1241-1247. [杨小林,王秋菊,兰小中,等, 2007. 濒危植物大花黄牡丹 (*Paeonia ludlowii*) 种群数量动态 [J]. 生态学报, 27(3): 1241-1247.]
- YING DS, ZHANG HF, WANG FD, et al, 2009. Diameter structure and life table of *Betula platyphylla* population in Xiaoxing'an Mountain [J]. Chin For Sci Technol, 23(6): 40-43. [殷东生,张海峰,王福德,等, 2009. 小兴安岭白桦种群径级结构与生命表分析 [J]. 林业科技开发, 23(6):40-43.]
- ZHANG YF, LI DW, WANG M, et al, 2015. Population structure and dynamics of *Juniperus rigida* in different regions of Loess Plateau [J]. Sci Silv Sin, 51(1): 1-10. [张亚芳,李登武,王梅,等, 2015. 黄土高原不同地区杜松种群结构与动态 [J]. 林业科学, 51(2): 1-10.]
- ZHANG ZX, LIU P, CAI MZ, et al, 2008. Population quantitative characteristics and dynamic of rare and endangered *Tsuga tchekiangensis* in Jiulongshan Natural Reserve of China [J]. Chin J Plant Ecol, 32(5): 175-185. [张志祥,刘鹏,蔡妙珍,等, 2008. 九龙山珍稀濒危植物南方铁杉种群数量动态 [J]. 植物生态学报, 32(5): 175-185.]
- ZHOU WC, MU CC, LIU X, et al, 2012. Effects of disturbance on litter mass and soil carbon storage of *Betula platyphylla* and *Larix gmelinii-Carex schmidtii* swamps in the Xiaoxing'an Mountains of Northeast China [J]. Acta Ecol Sin, 32(20): 6387-6395. [周文昌,牟长城,刘夏,等, 2012. 火干扰对小兴安岭白桦沼泽和落叶松—苔草沼泽凋落物和土壤碳储量的影响 [J]. 生态学报, 32(20): 6387-6395.]