

东北地区不同区域野生刺五加种群结构及动态分析

魏洪玲^{1,2}, 解胜男^{1,2}, 田叙辰^{1,2}, 唐中华^{1,2}, 刘英^{1,2}, 李德文^{1,2}

(1. 东北林业大学 化学化工与资源利用学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 东北林业大学 森林植物生态学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 【目的】分析中国东北地区野生刺五加 *Acanthopanax senticosus* 种群结构特征, 明确刺五加种群生存现状, 预测种群未来的演替趋势, 为东北地区野生刺五加种群的保护、利用及可持续发展提供理论依据。【方法】在小兴安岭、张广才岭和长白山具有代表性的生境设立调查样地, 并对样地内植物进行调查。通过样地调查和数据统计, 绘制刺五加种群的年龄结构图, 编制种群静态生命表, 拟合其存活曲线、死亡曲线及生存曲线, 运用生存分析与数量化动态参数预测种群发展趋势。【结果】① 3 个区域野生刺五加种群的年龄结构均近似于“金字塔”型, 幼龄期和成龄期株数占该区域刺五加总株数的 68.58%~83.04%, 种群年龄结构稳定。② 3 个区域野生刺五加种群结构的数量变化动态指数 (V_{pn}) 和考虑未来外部干扰的种群年龄结构指数 (V'_{pn}) 均大于 0, 存活曲线均趋于 Deevy-II 型, 为增长型种群, 且对外界干扰敏感性较强。③ 3 个区域 1 龄级的株数显著低于 2、3 龄级的株数, 表明野生刺五加种子发芽率低, 是目前该种群更新和发展的瓶颈。3 个区域种群均在前期逐渐减少, 后期趋于稳定, 但危险率逐渐上升, 预示种群后期有衰退的趋势。【结论】目前 3 个区域野生刺五加种群结构均为增长型, 但幼龄级植株数量少, 种群老龄个体数量发展潜力较小, 种群整体的长期稳定性难以维持。建议加强对 1 龄级植株的精准抚育管理, 通过人为辅助措施提高幼苗的保存率, 促进野生刺五加种群的可持续发展。图 3 表 5 参 35

关键词: 东北地区; 野生刺五加; 年龄结构; 数量动态; 生存分析

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2024)02-0333-10

Population structure and dynamics of wild *Acanthopanax senticosus* in different regions of Northeast China

WEI Hongling^{1,2}, XIE Shengnan^{1,2}, TIAN Xuchen^{1,2}, TANG Zhonghua^{1,2}, LIU Ying^{1,2}, LI Dewen^{1,2}

(1. College of Chemistry, Chemical Engineering and Resource Utilization, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China; 2. Key Laboratory of Forest Plant Ecology, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: [Objective] This study aims to analyze the structural characteristics of wild *Acanthopanax senticosus* population in Northeast China, clarify its survival status and predict the future succession trend, so as to provide scientific basis for conservation, utilization and sustainable development of *A. senticosus* population in Northeast China. [Method] Survey sample plots were set up in representative habitats in Xiaoxinganling, Zhangguangcailing and Changbai Mountain and the plants in the sample plots were surveyed. Based on sample survey and data statistics, the age structure of wild *A. senticosus* was mapped, its static life table was compiled, survival and mortality curves and survival function curves were fitted, and survival analysis and quantitative

收稿日期: 2023-06-25; 修回日期: 2023-10-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1300503); 国家科技基础资源调查专项 (2019FY1005003); 黑龙江省重点研发计划项目 (JD22A008); 东北林业大学中央高校预研及培育项目 (2572023CT11)

作者简介: 魏洪玲 (ORCID: 0009-0008-5192-1850), 从事植物资源保护与利用研究。E-mail: weily9033@126.com。

通信作者: 李德文 (ORCID: 0009-0005-2225-2932), 副教授, 博士, 从事植物资源保护与利用研究。

E-mail: lidewen1@126.com

dynamic parameters were used to predict population development trend. [Result] (1) The age structure of wild *A. senticosus* population in the three regions was similar to a “pyramid” type, and the number of young and mature plants accounted for 68.58% – 83.04% of the total number of the species and the age structure of the population was stable. (2) In the three regions, the dynamic indices of quantitative changes in the population structure (V_{pm}) and the population age structure index considering future external interference (V'_{pm}) were greater than 0, and the survival curves tended to be Deevey- II type, indicating a growth type with high sensitivity to external interference. (3) In the three regions, the number of plants at the 1st age level was significantly lower than that at the 2nd and 3rd age levels, indicating that the low rate of seed germination was currently a bottleneck for the population renewal and development. The population in all the three regions gradually decreased in the early stage and stabilized in the later stage, but the risk rate gradually increased, indicating a decline trend in the population in the later stage. [Conclusion] At present, the population structure of wild *A. senticosus* in the three regions is of a growth type, but the number of young plants is small and the development potential of the number of old individuals in the population is small. It is difficult to maintain an overall long-term stability of wild *A. senticosus* population. It is recommended to strengthen the precise nurturing and management of 1-year-old individuals, improve the seedling preservation rate through artificial measures, and promote the sustainable development of wild *A. senticosus* population. [Ch, 3 fig. 5 tab. 35 ref.]

Key words: Northeast China; wild *Acanthopanax senticosus*; age structure; quantitative dynamics; survival analysis

刺五加 *Acanthopanax senticosus* 为五加科 Araliaceae 五加属 *Eleutherococcus* 多年生落叶小灌木, 是第三纪孑遗植物, 在《中国植物红皮书——稀有濒危植物》中被列为濒危植物, 其体内含有苷类、黄酮类、有机酸类、香豆素类、多糖类、挥发油、微量元素和氨基酸等多种化学成分^[1-2], 全株均可入药, 具有治疗心血管疾病和抗衰老等保健功能^[3], 在《野生药材资源保护管理条例》中被列为国家三级保护物种。野生刺五加是森林资源的重要组成部分, 对于维持生态平衡有重要的作用。刺五加分布区主要在中国黑龙江省(小兴安岭、张广才岭等)、吉林省(汪清、长白山等)、辽宁省(新宾、本溪等), 其中小兴安岭及长白山北部蕴藏量尤为丰富^[4]。目前, 关于野生刺五加的研究主要在药理药效^[5-6]、生殖生态^[7-8]、资源保护^[9]及栽培利用^[10]等方面, 关于野生刺五加资源的分布规律和种群结构鲜有报道。

植物种群结构是种群最基本的特征^[11]。本研究以中国东北地区3个区域内野生刺五加种群为研究对象, 采用静态生命表、存活曲线、死亡曲线和生存分析等方法研究野生刺五加种群年龄结构与动态特征, 旨在揭示野生刺五加种群的生存现状, 预测种群未来的演替趋势, 以期为东北地区野生刺五加种群的可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

2021年4—9月, 在查阅相关文献和野外踏查的基础上, 选择小兴安岭、张广才岭和长白山区域内野生刺五加分布相对密集的地段进行野外调查。各地区概况如下。

小兴安岭位于黑龙江省北部(46°22'~50°10'N, 126°04'~129°13'E), 山脉呈西北—东南走向, 海拔为500~1000 m, 山势和缓, 属低山丘陵地形。年平均气温为-2.0~2.0 °C, 无霜期为100.0~130.0 d, 最冷为1月, 平均气温为-20.0~-25.0 °C, 最热为7月, 平均气温为19.0~21.0 °C, 年平均降水量为500.0~700.0 mm, 多集中在6—8月, 年均相对湿度为70%, 属于北温带大陆性季风气候。土壤以暗棕色森林土为主, 有机质丰富。小兴安岭地区森林植被丰富, 是中国重点的林木基地, 森林覆盖率达到了72.6%, 红松 *Pinus koraiensis* 蓄积量达4300多万m³, 中国一半以上的红松都生长在此。植被类型以红松-落叶阔叶混交林为主, 与刺五加种群伴生的主要乔灌木树种有红松、水曲柳 *Fraxinus mandshurica*、

臭冷杉 *Abies nephrolepis*、色木槭 *Acer mono*、白桦 *Betula platyphylla*、暴马丁香 *Syringa reticulata* var. *amurensis*、东北山梅花 *Philadelphus schrenkii*、忍冬 *Lonicera japonica*、舞鹤草 *Maianthemum bifolium* 等。

张广才岭位于黑龙江省东南部 (45°20'~46°25'N, 127°36'~128°39'E), 山势高峻, 地形复杂, 属于流水侵蚀山地, 平均海拔为 800 m。年平均气温为 2.3~3.7 °C, 年平均冻结期为 160.0~229.0 d, 季节冻土深度为 1.8~2.5 m。年平均降水量为 440.0~640.0 mm, 多集中在 6—9 月, 占全年降水量的 50%~70%, 年平均蒸发量为 1100~2500 mm, 属于中温带大陆性季风气候。土壤以黑钙土为主, pH 为 7.0~7.5。植被类型主要为红松、云杉 *Picea asperata*、冷杉 *Abies fabri* 及各种阔叶树的针阔混交林和灌丛等, 与刺五加种群伴生的主要乔灌木树种有落叶松 *Larix gmelinii*、蒙古栎 *Quercus mongolica*、胡桃楸 *Juglans mandshurica*、黄檗 *Phellodendron amurense*、五味子 *Schisandra chinensi*、疣枝卫矛 *Euonymus pauciflorus*、胡枝子 *Lespedeza bicolor* 等^[12]。

长白山位于吉林省东南部 (41°41'~42°25'N, 127°42'~128°16'E), 山脉呈东北—西南走向, 海拔高度多为 1000 m 以上。属于温带大陆性山地气候, 具有明显的垂直气候变化带谱特征, 年平均气温为 3.0~7.0 °C, 最低气温为 -44.0 °C, 年日照时数不足 2300.0 h, 无霜期为 100 d, 年平均积雪深度为 50 cm, 年降水量为 700.0~1400.0 mm^[13], 多集中在 6—9 月, 冰雪覆盖期长达 9 个月。土壤主要为腐殖质暗棕壤, 土壤肥沃, pH 为 5.5~6.5。长白山地区地形复杂, 地貌组合差异大, 长白山植被从低海拔到高海拔依次形成阔叶林、针阔混交林、针叶林、岳桦矮曲林、高山苔原 5 个分布带, 与刺五加种群伴生的主要乔灌木树种有胡桃楸、色木槭、蒙古栎、紫椴 *Tilia amurensis*、东北山梅花、五味子、金银忍冬 *Lonicera maackii*、白花碎米荠 *Cardamine leucantha*、白屈菜 *Chelidonium majus* 等。

1.2 样地设置及刺五加分布调查

在 3 个区域按地形设置样地。小兴安岭区域设置了 14 个样地, 张广才岭区域设置了 30 个样地, 长白山区域设置了 77 个样地。每个样地内布设 1 个 10 m×10 m 的乔木样方, 在每个乔木样方内设置 1 个 5 m×5 m 的灌木样方, 再于灌木样方的 4 个角分别设置 1 个 1 m×1 m 的草本样方^[14]。对样地内刺五加进行逐木调查, 测量其基径、株高、郁闭度等, 并对样地内的其他乔木、灌木和草本植物进行全面调查。同时记录各样地地理位置、经纬度、海拔、坡位、坡度、坡向等环境因子, 并对各样地种群龄级与环境因子进行相关性分析, 其中坡度 (上限排除法): 0°~0.5°为平原, 0.5°~2.0°为微斜坡, 2.0°~5.0°为缓斜坡, 5.0°~15.0°为斜坡, 15.0°~35.0°为陡坡, 35.0°~55.0°为峭坡, 55.0°~90.0°为垂直壁; 坡向: 北坡、东北坡、东坡、东南坡、南坡、西南坡、西坡、西北坡分别赋值为 1、2、3、4、5、6、7、8; 坡位: 上坡位赋值为 1、下坡位赋值为 2。各样地信息见表 1。

表 1 不同区域野生刺五加种群分布信息表

Table 1 Information on the distribution of wild *A. senticosus* populations in different regions

样地	株数/株	北纬(N)	东经(E)	平均海拔/m	平均郁闭度/%	平均坡度/(°)	平均株高/m	平均基径/cm
小兴安岭	533	46°58'48"	128°39'36"	376.08	76.81	12.20	1.12±2.12 a	1.48±0.09 a
张广才岭	171	45°33'00"	128°19'12"	253.56	57.00	14.71	0.78±0.30 a	0.63±0.02 b
长白山	436	42°28'12"	127°50'24"	825.81	72.00	17.81	0.94±0.76 a	0.74±0.04 b

说明: 平均株高和平均基径为平均值±标准差。同列不同小写字母代表不同种群间差异显著($P < 0.05$)。

1.3 种群年龄结构划分

本研究采用种群的高度级代替龄级进行分析。将野生刺五加茎干高度以 20 cm 为 1 个龄级进行分株统计, 第 1 龄级为 0~20 cm (上限排除法), 第 2 龄级为 20~40 cm, 第 3 龄级为 40~60 cm, 以此类推。小兴安岭区域共划分 11 个龄级, 张广才岭区域共划分 9 个龄级, 长白山区域共划分 10 个龄级, 并以龄级为横坐标, 株数为纵坐标, 绘制不同地区野生刺五加种群年龄结构图。

1.4 种群动态数量化分析及静态生命表编制

为了定量描述不同区域环境下野生刺五加的种群动态, 参考陈晓德^[15]种群与群落结构动态量化分析法^[16-17], 计算种群从 n 到 $n+1$ 龄级的种群个体数量 (V_n)、整个种群结构的数量变化动态指数 (V_{pn})、考虑

未来外部干扰时的种群年龄结构指数 (V'_{pn})、种群对完全随机干扰所承担的最大风险概率 (P_{\max})，定量描述野生刺五加种群动态特征。 V_n 、 V_{pn} 、 V'_{pn} 取正、负、0值时分别反映种群个体数量的增长、衰退和稳定的结构动态关系。

本研究中静态生命表的编制参考韩忠明^[18]的方法，龄级划分与1.3节中的方法相同。在编制静态生命表的过程中，当出现种群的死亡率为负值的情况时采用分段匀滑技术^[19]对种群个体的存活数据进行处理^[20]，再据此编制野生刺五加种群的静态生命表。静态生命表中， n 代表龄级， a_n 为 n 龄级内存活的个体数， a_n^* 为匀滑后 n 龄级内存活的个体数， l_n 为标准化存活个体数， $\ln l_n$ 为 l_n 的自然对数， d_n 为 $n \sim n+1$ 龄级间的标准化死亡数量， q_n 为 $n \sim n+1$ 龄级间的死亡率， L_n 为 $n \sim n+1$ 龄级间存活的个体数， T_n 为从 n 龄级到超过 n 龄级的总个体数， e_n 为进入 n 龄级个体的生命期望寿命， k_n 为各龄级间的消失率。

1.5 种群存活及死亡曲线绘制

以龄级为横坐标，标准化存活数的自然对数 ($\ln l_n$) 为纵坐标，绘制野生刺五加种群的存活曲线，参照 HETT 等^[21]的方法，分别采用指数函数 $y=ae^{bn}$ 和幂函数 $y=an^b$ 模型检验野生刺五加种群的存活曲线类型，得到检验方程。其中： y 、 a 分别代表 n 龄级内存活数和种群形成初期的个体数， b 为死亡率。再以龄级为横坐标，以死亡率为纵坐标，绘制刺五加种群的死亡率曲线。

1.6 种群生存函数分析

为了更好地分析3个区域野生刺五加种群的动态变化规律，引入4个生存函数，即生存率函数 (S_n)、累计死亡率函数 (F_n)、死亡率密度函数 (f_m)、危险率函数 (λ_m)^[22]，并参考毕晓丽等^[23]的计算方法，计算这些生存函数估计值，其中： t 为时间， n 为时间段龄级。

2 结果与分析

2.1 刺五加种群的生长特征及其与环境因子的相关性分析

由于生境条件及人类干扰活动的空间异质性，东北地区不同区域环境下野生刺五加种群分布特征的差异明显 (表1)。本研究调查野生刺五加共计1140株，小兴安岭区域有533株，平均株高为1.12 m，平均基径为1.48 cm；张广才岭区域有171株，平均株高为0.78 m，平均基径为0.63 cm；长白山区域有436株，平均株高为0.94 m，平均基径为0.74 cm。3个区域中刺五加最大基径为14.80 cm，最大株高为2.20 m，均出现在小兴安岭区域，且小兴安岭地区的刺五加基径显著粗于其他两地。

相关性分析 (表2) 显示：小兴安岭地区对刺五加种群龄级影响较大的环境因子是经度、海拔、坡度和坡向，小兴安岭刺五加种群龄级与坡度、坡向和海拔的正相关性较大，与经度的负相关性较大。张广才岭地区对刺五加种群龄级影响较大的环境因子是经纬度，种群龄级与经纬度的负相关性较大。长白山地区对刺五加种群龄级影响较大的环境因子是经纬度和坡度，种群龄级与经纬度的正相关性较大，与坡度的负相关性较大。

表2 不同区域野生刺五加种群龄级与环境因子间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of age class and environmental factors of wild *A. senticosus* populations in different regions

样地	经度	纬度	海拔	坡度	坡向	坡位	郁闭度
小兴安岭	-0.224**	0.098*	0.134**	0.154**	0.159**	-0.053	0.016
张广才岭	-0.191*	-0.190*	0.103	0.108	0.052	-0.129	-0.093
长白山	0.359**	0.298**	-0.006	-0.325**	-0.115*	0.033	-0.117*

说明：**表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)上极显著相关；*表示在 $P<0.05$ 水平(双侧)上显著相关。

2.2 刺五加种群动态数量化分析

图1显示：3个区域的野生刺五加种群数量均随着龄级的增加呈先升后减的趋势，主要集中在第3~6龄级，说明3个区域的野生刺五加种群均以成龄期植株占优势，种群的稳定性都较好。但各区域1龄级的幼苗数量极少，分别占总数的2.25%、2.34%和2.52%。动态数量化分析结果显示 (表3)： V_1 和 V_2 均小于0，也说明了3个区域幼龄级植株数量少，呈负增长的趋势，这极大地限制了成龄期植株的发

展潜力和种群延续。3 个区域野生刺五加种群的总体数量变化动态指数 V'_{pn} 均小于 V_{pn} ，但都大于 0，其中 V'_{pn} 更加趋于 0，表明忽略外部干扰时均为增长型种群；3 个区域受随机干扰所承担的风险概率极大值 (P_{max}) 分别为 0.01、0.03 和 0.01，趋近于 0，说明对外界随机干扰均具有较高的敏感性。

2.3 刺五加种群静态生命表特征

随种群龄级的增加，3 个区域野生刺五加种群的个体标准化存活数 (l_n) 逐渐减少 (表 4)。小兴安岭和长白山区域种群的期望寿命值 (e_n) 也随龄级的增加逐渐降低，而张广才岭区域种群的期望寿命值随龄级增加呈先增后减的变化，在第 5 龄级达到最大值，表明该阶段的种群生存质量最高，生理代谢旺盛，且具有较高的生存环境质量。

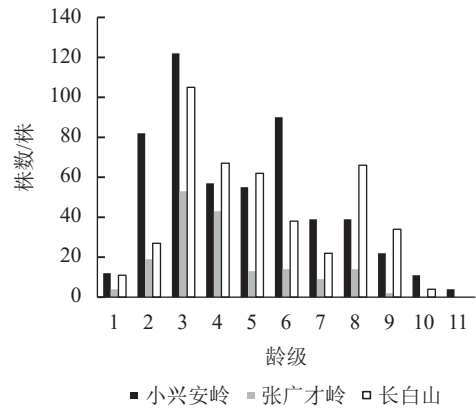


图 1 不同区域野生刺五加种群的龄级结构
Figure 1 Age-class structure of wild *A. senticosus* populations in different regions

表 3 不同区域野生刺五加种群动态变化指数

Table 3 Dynamic change index of wild *A. senticosus* populations in different regions

样地	年龄结构动态变化指数/%												P_{max}	
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{pn}		V'_{pn}
小兴安岭	-85.37	-32.79	53.28	3.51	-38.89	56.67	0.00	43.59	50.00	63.64	-	32.33	0.24	0.01
张广才岭	-78.95	-64.15	18.87	69.77	-7.14	35.71	-35.71	85.71	-	-	-	40.68	0.99	0.03
长白山	-59.26	-74.29	36.19	7.46	38.71	42.11	-66.67	48.48	88.24	-	-	40.87	0.34	0.01

说明： V_n 是种群 $n \sim n+1$ 龄级的种群个体数量， V_{pn} 是整个种群结构的数量变化动态指数， V'_{pn} 是考虑未来外部干扰时的种群年龄结构指数， P_{max} 是种群对完全随机干扰所承担的最大风险概率。-表示无此项。

2.4 刺五加种群存活及死亡曲线特征

由图 2 可知：小兴安岭和长白山种群在 1~8 龄级间的存活曲线变化一致，下降幅度均较张广才岭区域更大，第 8 龄级之后张广才岭和长白山区域种群存活曲线下降趋势加快，而小兴安岭种群存活曲线趋于平稳 (图 2A)。幂函数和指数函数 2 种模型的拟合结果显示：3 个区域野生刺五加种群的拟合结果均达到了显著水平 ($P < 0.05$)，且 3 个区域下指数模型的确定系数 (R^2) 均大于幂函数模型 (表 5)， P 值均小于幂函数模型，因此，认为 3 个区域野生刺五加种群的存活曲线为 Deevy-II 型。小兴安岭和长白山种群只存在 1 个死亡高峰，在第 9 龄级，而张广才岭种群存在 2 个死亡高峰，分别在 3 龄级和 8 龄级，最高峰出现在 8 龄级 (图 2B)。

2.5 刺五加种群生存力分析

如图 3 所示：以龄级为横坐标，4 个生存函数估计值为纵坐标，绘制不同区域野生刺五加种群生存函数曲线。3 个区域种群的死亡密度均在第 1 龄级出现最高峰，危险率曲线总体上保持逐渐上升的趋势 (图 3A~B)。3 个区域种群均在第 3 龄级左右生存率和累积死亡率达到平衡，这反映出第 3 龄级以后野生刺五加种群将进入衰退期 (图 3C~D)。

3 讨论

3.1 野生刺五加种群的生长特征

刺五加喜温暖湿润气候，适宜生长在土壤较为湿润、腐殖质层深厚的混交林、山地阔叶林下及林缘 [18, 24]。本研究通过对小兴安岭、张广才岭和长白山 3 个区域内野生刺五加种群的调查发现：小兴安岭和长白山区域刺五加植株数量多，茎干粗壮，龄级分布范围广，张广才岭区域植株数量少，茎干细矮，龄级分布范围窄，说明小兴安岭和长白山区域气候环境更适宜野生刺五加生长。王书越等 [25] 基于 MaxEnt 模型对野生刺五加在东北地区的空间分布进行评估，也证实了野生刺五加的生态适宜区主要在

表4 不同区域野生刺五加种群的静态生命表

Table 4 Static life tables of wild *A. senticosus* populations in different regions

样地	龄级	高度级/cm	a_n	a_n^*	l_n	$\ln l_n$	d_n	q_n	L_n	T_n	e_n	k_n
小兴安岭	1	0~20	12	308	1000	6.91	188	0.19	906	3454	3.45	0.21
	2	20~40	82	250	812	6.70	169	0.21	728	2548	3.14	0.23
	3	40~60	122	198	643	6.47	146	0.23	570	1820	2.83	0.26
	4	60~80	57	153	497	6.21	130	0.26	432	1250	2.52	0.30
	5	80~100	55	113	367	5.91	107	0.29	314	818	2.23	0.34
	6	100~120	90	80	260	5.56	88	0.34	216	505	1.94	0.41
	7	120~140	39	53	172	5.15	68	0.40	138	289	1.68	0.50
	8	140~160	39	32	104	4.64	46	0.44	81	151	1.45	0.58
	9	160~180	22	18	58	4.06	29	0.50	44	70	1.21	0.69
	10	180~200	11	9	29	3.37	6	0.21	26	26	0.99	0.23
	11	200~220	4	7	23	3.14	-	-	-	-	-	-
张广才岭	1	0~20	4	143	1000	6.91	358	0.36	821	2678	2.68	0.44
	2	20~40	19	92	642	6.47	248	0.39	518	1678	2.61	0.49
	3	40~60	53	56	394	5.98	160	0.40	314	1036	2.63	0.52
	4	60~80	43	33	235	5.46	92	0.39	189	641	2.73	0.50
	5	80~100	13	20	142	4.96	46	0.32	120	407	2.86	0.39
	6	100~120	14	14	97	4.57	20	0.21	87	264	2.72	0.23
	7	120~140	9	11	77	4.34	16	0.20	69	167	2.17	0.23
	8	140~160	14	9	61	4.12	32	0.52	45	91	1.48	0.74
	9	160~180	2	4	29	3.38	-	-	-	-	-	-
长白山	1	0~20	11	162	1000	6.91	198	0.20	901	3242	3.24	0.22
	2	20~40	27	130	802	6.69	176	0.22	714	2341	2.92	0.25
	3	40~60	105	101	627	6.44	154	0.25	550	1627	2.60	0.28
	4	60~80	67	77	473	6.16	132	0.28	407	1077	2.28	0.33
	5	80~100	62	55	341	5.83	109	0.32	287	670	1.96	0.39
	6	100~120	38	38	232	5.45	87	0.38	188	383	1.65	0.47
	7	120~140	22	23	145	4.97	65	0.45	112	195	1.35	0.60
	8	140~160	66	13	79	4.37	43	0.55	58	83	1.05	0.79
	9	160~180	34	6	36	3.58	21	0.59	25	25	0.69	0.89
	10	180~200	4	2	15	2.70	-	-	-	-	-	-

说明: n : 龄级; a_n : 第 n 龄级内存活的个体数; a_n^* : 匀滑后 n 龄级内存活的个体数; l_n : 标准化存活个体数 (一般以 1000 为基数); $\ln l_n$: l_n 的自然对数; d_n : $n \sim n+1$ 龄级的标准化死亡数量; q_n : $n \sim n+1$ 龄级间的死亡率; L_n : $n \sim n+1$ 龄级之间存活的个体数; T_n : 从 n 龄级到超过 n 龄级的总个体数; e_n : 进入 n 龄级个体的生命期望寿命; k_n : 各龄级间的消失率。-表示无此项。

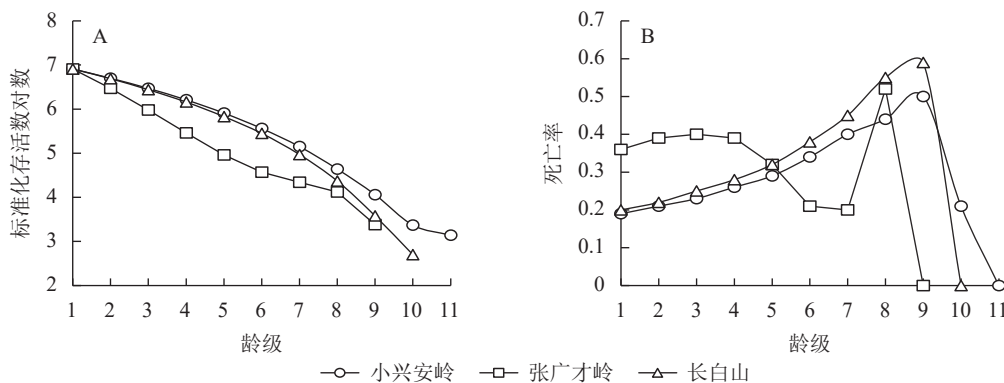


图2 不同区域野生刺五加种群存活(A)及死亡曲线(B)

Figure 2 Survival (A) and killing curves (B) of wild *A. senticosus* populations in different regions

长白山山脉及小兴安岭地区，与本研究结果相符。相关性分析结果显示：影响 3 个区域野生刺五加种群龄级的环境因子主要有海拔、经纬度、坡向和坡度，王书越等^[25]的研究也表明刺五加群落的存活同坡度、坡向、光照条件以及所处林型都有一定联系。小兴安岭和张广才岭区域种群龄级随经度的升高而减小，而长白山区域种群龄级随经度的升高而增加。植物形态特征反映植物对异质环境的响应。在不同生境下，植物采取不同形态特征，调整生存策略，以增加种群的生存适合度和竞争能力^[26]。说明刺五加种群对异质性生境采取了不同的适应政策，也表明野生刺五加种群分布是其与环境长期相互作用、相互适应的结果。

表 5 不同区域野生刺五加种群存活曲线的检验

种群	检验方程	F	R ²	显著性
小兴安岭	$y = 8.405n^{-0.312}$	22.295	0.712	0.001
	$y = 8.272e^{-0.08n}$	119.018	0.930	0.000
张广才岭	$y = 7.700n^{-0.302}$	49.698	0.877	0.000
	$y = 7.626e^{-0.084n}$	390.944	0.982	0.000
长白山	$y = 8.467n^{-0.334}$	14.676	0.647	0.005
	$y = 8.569e^{-0.094n}$	54.898	0.873	0.000

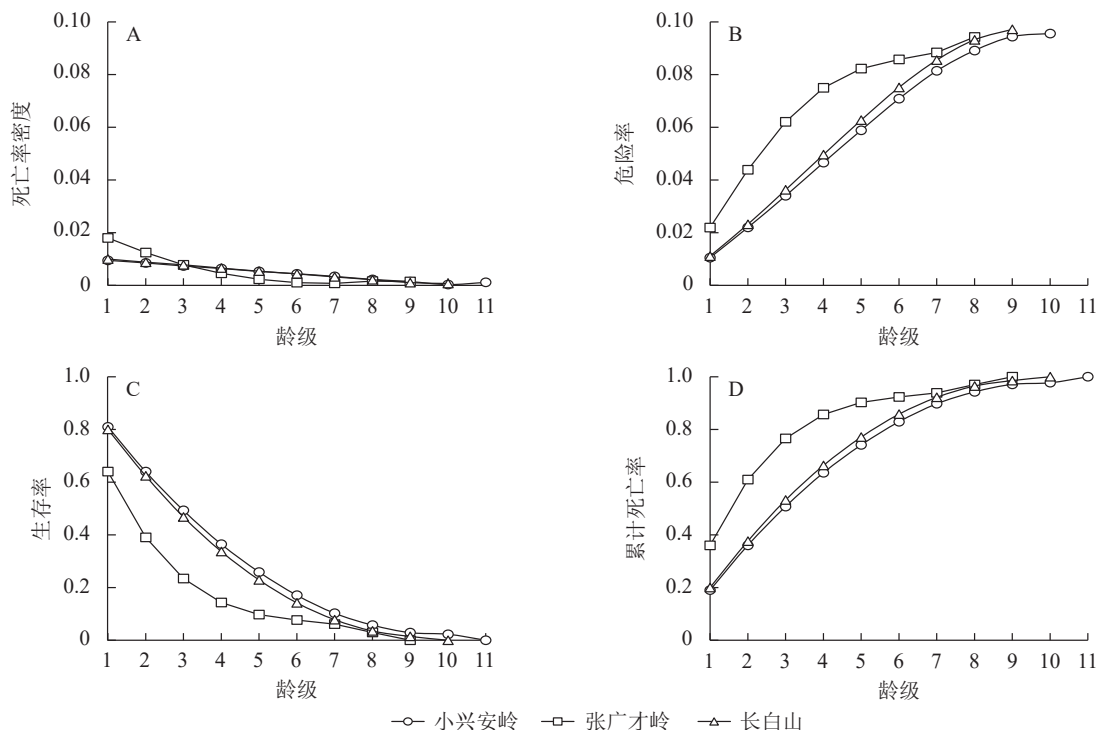


图 3 不同地区野生刺五加种群生存函数曲线

Figure 3 Survival function curves of wild *A. senticosus* population in different regions

3.2 野生刺五加种群年龄结构及发展趋势的分析

植物种群结构反映植物对自然环境的适应性^[27-28]，比较不同区域环境下的野生刺五加种群结构特征有助于了解该物种与其生存环境之间的适合度^[29]。本研究发现：3 个区域野生刺五加种群的年龄结构均呈非典型金字塔型，种群呈现增长型，但 1~3 龄级呈衰退趋势，如果没有幼龄植株补充，野生刺五加种群整体的长期稳定性将难以维持，这与其他一些濒危植物情况相似^[30]。野生刺五加种子萌发的实生苗很少，现在生存的刺五加种群多为无性植株产生，主要通过根茎上的潜伏芽转化植株^[31]，这样基因多样性减少，导致出现绝种的风险，在一定程度上也限制了野生刺五加种群的自然更新。3 个区域种群出现死亡高峰的频率不同，小兴安岭和长白山区域种群都只有 1 次死亡高峰，均在第 9 龄级，这是因为当植物进入老龄级后，生理机能衰退，种群更容易受到外界干扰。张广才岭区域种群出现 2 次死亡高峰，第 1 次在第 3 龄级，是从幼龄期向成龄期过渡阶段。韩忠明^[18]研究表明：刺五加幼苗在第 3 龄级开始脱离母株，并且由营养生长转向生殖生长，此时植株对营养空间的需求增大，种群自疏和他疏作用增强，导致了较高的死亡率。第 2 次死亡高峰在第 8 龄级，其原因与其他 2 个地区相同，即植株的生长发育到达

了生理衰退期。

3.3 野生刺五加种群的适应性保护和恢复策略

植物种群的发展是复杂且漫长的过程,不仅有物种内和物种间的竞争,同时还伴有物种和环境的适应过程^[32]。长期野外定位观测发现:造成野生刺五加种群急速减少的主要外在因素是人们过度采伐^[33]。野生刺五加的活性成分在落叶后至萌发前后最高^[34]。对于张广才岭区域野生刺五加种群来说,首先要保护好现有的成年植株,并提高成年植株的种子生产能力,然后建立一定规模的刺五加苗圃,规模化生产优质种苗,并将达到出圃标准的幼苗经野外驯化后进行回归种植^[35]。其次,要保证野生刺五加无性繁殖个体的成活率,加大就地保护力度。可以利用规定采收期和采收方式,防止人类对野生刺五加资源的破坏,应在秋季落叶后至春季萌发前采收,其他时期不允许采收。根茎是野生刺五加种群扩增的主要繁殖方式,应禁止采挖。

4 结论

3个区域野生刺五加种群第1龄级和第2龄级的植株数量均少于第3龄级,说明幼龄级植株数量少。虽然种群总体呈现增长型,但1~3龄级呈衰退趋势。如果没有幼龄个体的补充,野生刺五加种群整体的长期稳定性将难以维持。4个生存函数分析显示:3个区域野生刺五加种群的生存率曲线和累计死亡率曲线总体表现为逐渐下降或逐渐上升的趋势,且各生存函数曲线斜率均表现为前期、中期高于后期,表明3个区域野生刺五加种群数量均具有幼龄期和成龄期种群结构波动较大,而老龄期稳定的特点。

5 参考文献

- [1] OBLUCHINSKAYA E D, POZHARITSKAYA O N, ZAKHAROV D V, *et al.* The biochemical composition and antioxidant properties of *Fucus vesiculosus* from the Arctic Region [J/OL]. *Marine Drugs*, 2022, **20**(3): 193 [2023-05-23]. doi: 10.3390/md20030193.
- [2] KIM Y, JUNG Y J, YOON H J, *et al.* Simultaneous quantification method for eleutheroside B, eleutheroside E, chiisanoside, and sesamin using reverse-phase high-performance liquid chromatography coupled with ultraviolet detection and integrated pulsed amperometric detection [J/OL]. *Heliyon*, 2023, **9**(1): e12684 [2023-05-23]. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12684.
- [3] 韩忠明, 王云贺, 张永刚, 等. 不同生境刺五加生长发育及光合特性研究[J]. *西北植物学报*, 2011, **31**(9): 1852 – 1859. HAN Zhongming, WANG Yunhe, ZHANG Yonggang, *et al.* Growth and photosynthetic characteristics of *Acanthopanax senticosus* in different habitats [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, **31**(9): 1852 – 1859.
- [4] 魏东. 东北地区刺五加(*Eleutherococcus senticosus*)内生细菌/真菌微生物群落组成及分布研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017. WEI Dong. *Research on the Composition and Distribution of Endophytic Bacteria and Fungi in Acanthopanax senticosus of Northeast China* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [5] SONG Chen, YIN Yishu, QIN Yue, *et al.* *Acanthopanax senticosus* extract alleviates radiation-induced learning and memory impairment based on neurotransmitter-gut microbiota communication [J]. *CNS Neuroscience & Therapeutics*, 2023, **29**(S1): 129 – 145.
- [6] WAN Chunlei, WANG Xijun, LIU Hongda, *et al.* Characterization of effective constituents in *Acanthopanax senticosus* fruit for blood deficiency syndrome based on the chinmedomics strategy [J/OL]. *Open Chemistry*, 2023, **21**(1): 20220280 [2023-05-23]. doi: 10.1515/chem-2022-0280.
- [7] 叶强, 马明磊, 张玉姣, 等. 不同产地刺五加资源遗传多样性差异分析[J/OL]. *分子植物育种*, 2023-03-03 [2023-05-23]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230302.1656.022.html>. YE Qiang, MA Minglei, ZHANG Yujiao, *et al.* Analysis of genetic diversity differences of *Acanthopanax* resources from different origins [J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 2023-03-03 [2023-05-23]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230302.1656.022.html>.
- [8] JUNG J Y, GWON J, SONG H, *et al.* Vegetation structure and ecological properties of *Eleutherococcus senticosus* population [J/OL]. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 2013, **16**(5): 27 – 38.
- [9] 孟祥才, 宋琦, 曹伍林, 等. 从生物学角度探讨刺五加资源破坏原因及保护对策[J]. *世界科学技术(中医药现代化)*,

- 2013, **15**(4): 634 – 637.
- MENG Xiangcai, SONG Qi, CAO Wulin, *et al.* Inquiry into reasons of *Acanthopanax senticosus* resource being damaged from biological standpoint and strategies for protection [J]. *Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica-World Science and Technology*, 2013, **15**(4): 634 – 637.
- [10] 金司阳, 刘寒, 杨立学, 等. 植物-土壤反馈对刺五加幼苗抗氧化酶系统的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2020, **26**(4): 162 – 166.
- JIN Siyang, LIU Han, YANG Lixue, *et al.* Effect of plant and soil feedback on antioxidant system of *Acanthopanax senticosus* [J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2020, **26**(4): 162 – 166.
- [11] 张孟文, 钟才荣, 吕晓波, 等. 3种海桑属濒危红树植物的种群结构与动态特征[J]. 植物研究, 2023, **43**(2): 231 – 241.
- ZHANG Mengwen, ZHONG Cairong, LÜ Xiaobo, *et al.* Population structure and dynamic characteristics of three endangered mangrove species from genus *Sonneratia* [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2023, **43**(2): 231 – 241.
- [12] 徐立清, 崔东海, 王庆成, 等. 张广才岭西坡次生林不同生境胡桃楸幼树根系构型及细根特征[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(2): 373 – 380.
- XU Liqing, CUI Donghai, WANG Qingcheng, *et al.* Root architecture and fine root characteristics of *Juglans mandshurica* saplings in different habitats in the secondary forest on the west slope of Zhangguangcailing, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(2): 373 – 380.
- [13] 何潇, 李海奎, 张逸如, 等. 天然次生林碳储量生长模型与固碳能力驱动力研究[J]. 北京林业大学学报, 2023, **45**(1): 1 – 10.
- HE Xiao, LI Haikui, ZHANG Yiru, *et al.* Growth model of carbon storage and driving force of carbon sequestration capacity of natural secondary forests [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, **45**(1): 1 – 10.
- [14] 万猛, 田大伦, 樊巍. 太行山南麓栓皮栎群落结构特征分析[J]. 河南农业大学学报, 2009, **43**(2): 139 – 144, 150.
- WAN Meng, TIAN Dalun, FAN Wei. Structural characteristics of the *Quercus variabilis* forest community in south area of Taihang Mountains [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2009, **43**(2): 139 – 144, 150.
- [15] 陈晓德. 植物种群与群落结构动态量化分析方法研究[J]. 生态学报, 1999, **18**(2): 214 – 217.
- CHEN Xiaode. A study on the method of quantitative analysis for plant population and community structural dynamics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **18**(2): 214 – 217.
- [16] 赵艳丽, 郭春秀, 安富博, 等. 石羊河下游不同立地类型黑果枸杞种群结构及数量动态研究[J]. 甘肃农业科技, 2022, **53**(7): 35 – 43.
- ZHAO Yanli, GUO Chunxiu, AN Fubo, *et al.* Population structure and quantitative dynamics of *Lycium barbarum* in different site types in the lower reaches of Shiyang River [J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2022, **53**(7): 35 – 43.
- [17] 吉也, 曹孟岩, 白楚锋, 等. 峨眉山桫欏种群结构与动态特征[J]. 西北植物学报, 2019, **39**(3): 543 – 551.
- JI Ye, CAO Mengyan, BAI Chufeng, *et al.* Population structure and dynamics of *Alsophila spinulosa* in Mount Emei [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(3): 543 – 551.
- [18] 韩忠明. 刺五加种群可持续更新机制的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2006.
- HAN Zhongming. *Study on Sustainable Regeneration Mechanism of Acanthopanax senticosus Population* [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2006.
- [19] 江洪. 云杉种群生态学. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- JIANG Hong. *Population Ecology of Spruce* [M]. Beijing: China Forestry Press, 1992.
- [20] 张锦堂, 潘志立, 田云海, 等. 云龙天池国家级保护区云南松种群年龄结构及动态分析[J]. 生态学报, 2022, **42**(22): 9091 – 9099.
- ZHANG Jintang, PAN Zhili, TIAN Yunhai, *et al.* Age structure and dynamics of *Pinus yunnanensis* population in Yunlong Tianchi Nature Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(22): 9091 – 9099.
- [21] HETT J M, LOUCKS O L. Age structure models of Balsam fir and eastern hemlock [J]. *Journal of Ecology*, 1976, **64**(3): 1029 – 1044.
- [22] 于大炮, 周莉, 董百丽, 等. 长白山北坡岳桦种群结构及动态分析[J]. 生态学杂志, 2004, **23**(5): 30 – 34.
- YU Dapao, ZHOU Li, DONG Baili, *et al.* Structure and dynamics of *Betula ermanii* population on the northern slope of

- Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, **23**(5): 30 – 34.
- [23] 毕晓丽, 洪伟, 吴承祯, 等. 黄山松种群统计分析[J]. 林业科学, 2002, **38**(1): 61 – 67.
BI Xiaoli, HONG Wei, WU Chengzhen, *et al.* Population statistics analysis of *Pinus taiwanensis* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, **38**(1): 61 – 67.
- [24] 宋丽萍. 环境因子对刺五加幼苗光合特性和生长的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.
SONG Liping. *Effect of Environmental Factors on the Photosynthetic Characteristic and Growth of Acanthopanax senticosus Seedlings* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2007.
- [25] 王书越, 潘少安, 王明睿, 等. 基于MaxEnt模型评估刺五加在东北地区的空间分布[J]. 生态学报, 2019, **39**(9): 3277 – 3286.
WANG Shuyue, PAN Shaoan, WANG Mingrui, *et al.* Assessing the geographic distribution of *Acanthopanax senticosus* in northeastern China based on the MaxEnt model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(9): 3277 – 3286.
- [26] 刘丽杰, 金慧, 赵莹, 等. 长白山野生植物垂直分布规律探究[J]. 现代园艺, 2018(6): 135.
LIU Lijie, JIN Hui, ZHAO Ying, *et al.* Exploring the vertical distribution pattern of wild plants in Changbai Mountain [J]. *Modern Horticulture*, 2018(6): 135.
- [27] 秦爱丽, 马凡强, 许格希, 等. 珍稀濒危树种峨眉含笑种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2020, **40**(13): 4445 – 4454.
QIN Aili, MA Fanqiang, XU Gexi, *et al.* Population structure and dynamic characteristics of a rare and endangered tree species *Michelia wilsonii* Finet et Gagn [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(13): 4445 – 4454.
- [28] DAS D S, DASH S S, MAITY D, *et al.* Population structure and regeneration status of tree species in old growth *Abies pindrow* dominant forest: a case study from western Himalaya, India [J/OL]. *Trees, Forests and People*, 2021, **5**: 100101 [2023-05-23]. doi: 10.1016/j.tfp. 2021.100101.
- [29] 解婷婷, 苏培玺, 周紫鹃, 等. 荒漠绿洲过渡带沙拐枣种群结构及动态特征[J]. 生态学报, 2014, **34**(15): 4272 – 4279.
XIE Tingting, SU Peixi, ZHOU Zijuan, *et al.* Structure and dynamic characteristics of *Calligonum mongolicum* population in the desert-oasis ecotone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(15): 4272 – 4279.
- [30] 何斌, 李青, 陈群利, 等. 贵州省西北部马尾松人工林种群数量特征与动态[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, **40**(11): 129 – 137, 155.
HE Bin, LI Qing, CHEN Qunli, *et al.* Quantitative characteristics and population dynamics of *Pinus massoniana* plantation in northwest Guizhou Province [J]. *Journal of Central South University of Forestry Science and Technology*, 2020, **40**(11): 129 – 137, 155.
- [31] 曹建国. 刺五加生活史型特征及其形成机制的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004.
CAO Jianguo. *Study on the Characteristics and Mechanisms about Plant Life Cycle Forms of Acanthopanax senticosus* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2004.
- [32] 谢立红, 黄庆阳, 曹宏杰, 等. 五大连池火山蒙古栎种群结构及动态特征[J]. 浙江农林大学学报, 2022, **39**(5): 960 – 970.
XIE Lihong, HUANG Qingyang, CAO Hongjie, *et al.* Population structure and dynamic characteristics of *Quercus mongolica* in Wudalianchi Volcanoes, China [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, **39**(5): 960 – 970.
- [33] 金鑫. 山西刺五加生存群落特征研究[D]. 太原: 山西师范大学, 2018.
JIN Xin. *Analysis on Characteristics of Acanthopanax senticosus Communities in Shanxi* [D]. Taiyuan: Shanxi Normal University, 2018.
- [34] 孟祥才, 颜丙鹏, 孙晖, 等. 不同性别类型刺五加根茎和茎有效成分季节积累规律的研究[J]. 时珍国医国药, 2012, **23**(3): 601 – 603.
MENG Xiangcai, YAN Bingpeng, SUN Hui, *et al.* The seasonal accumulating study on effective constituent contents in different sexual types of rhizome and stem of *Acanthopanax senticosus* [J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2012, **23**(3): 601 – 603.
- [35] 张孟文, 钟才荣, 吕晓波, 等. 3种海桑属濒危红树植物的资源分布与濒危现状[J]. 植物科学学报, 2022, **40**(4): 484 – 491.
ZHANG Mengwen, ZHONG Cairong, LÜ Xiaobo, *et al.* Distribution and status of three endangered mangrove plants of the genus *Sonneratia* [J]. *Plant Science Journal*, 2022, **40**(4): 484 – 491.