

近自然经营对马尾松种群结构及分布格局的影响²

申鹏¹, 柴宗政^{1*}, 周雯²

(1 贵州大学林学院, 贵州 贵阳 550025; 2 贵阳市林业局, 贵州 贵阳 550004)

摘要:【目的】探究近自然经营对马尾松种群结构及分布格局的影响, 可以为种群调控及可持续发展提供实践基础和科学依据。【方法】本研究实施近自然经营 10 余年后的马尾松林为研究对象, 通过典型样地调查, 并基于种群统计方法来探讨近自然经营对马尾松种群结构及分布格局的影响。【结果】(1) 在研究区, 马尾松种群在对照和经营两种林分中, 幼龄林 (I、II 龄级) 个体数量都很少、龄级分布不合理、种群结构不稳定。虽然近自然经营能够提升幼龄个体总体数量, 但效果仍不理想。(2) 马尾松种群的个体数量优势可能会减弱, 种群呈现衰退趋势。种群经过 6 个龄级的发展后, 其结构逐渐呈稳定增长态势。(3) 马尾松种群总体呈现聚集分布的特点, 且对照林分中马尾松种群的聚集程度明显高于经营林分。随着龄级增大, 种群分布格局呈现聚集-均匀-随机分布的趋势; 近自然经营能够加快种群分布格局向更为稳定的随机分布状态演替进程。【结论】综上, 研究区马尾松种群结构不合理的主要原因是幼龄个体数量不足。近自然经营可以在一定程度上改善种群结构和分布格局。因此, 建议在近自然经营的基础上结合人工促进天然更新的方式, 提高幼龄个体数量, 加快实现种群稳定可持续发展。

关键词: 马尾松; 近自然经营; 种群结构; 时间序列预测;

Effects on the Close-to-nature management on structure and distribution pattern of *Pinus massoniana* population

Shen Peng¹, Chai Zongzheng^{1*}, Zhou Wen²

(¹College of Forestry, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025 China

²Guiyang Forestry Bureau, Guiyang, Guizhou 550004, China)

Abstract: 【Objective】 To explore the impact of near natural management on the population structure and distribution pattern of *Pinus massoniana*, which can provide practical and scientific basis for population regulation and sustainable development. 【Method】 This study focuses on the *Pinus massoniana* forest after more than 10 years of near natural management. Typical sample plots were surveyed and population statistical methods were used to explore the impact of near natural management on the population structure and distribution pattern of *Pinus massoniana*. 【Result】 (1) In the study area, the population of *Pinus massoniana* in both the control and management stands showed a small number of individuals in the young forests (I and II age levels), unreasonable age level distribution, and unstable population structure. Although near natural management can increase the overall number of young individuals, the effect is still not ideal. (2) The individual quantity advantage of the Masson pine population may weaken, and the population shows a declining trend. After 6 age classes of development, the population structure gradually shows a stable growth trend. (3) The overall

作者简介: 申鹏 (1997-), 男, 硕士研究生。研究方向: 林业生态研究。Email: 2586684011@qq.com;

通讯作者: 柴宗政 (1986-), 男, 博士, 副教授。研究方向: 森林经营与生态建模。Email: chaizz@126.com。

收稿日期:

基金: 国家自然科学基金项目 (32001314)

population of *Pinus massoniana* shows a characteristic of aggregation distribution, and the aggregation degree of *Pinus massoniana* population in the control forest is significantly higher than that in the management forest. As the age class increases, the population distribution pattern shows a trend of aggregation uniform random distribution; Near natural management can accelerate the succession process of population distribution patterns towards a more stable random distribution state. 【Conclusion】In summary, the main reason for the unreasonable population structure of *Pinus massoniana* in the study area is the insufficient number of young individuals. Near natural management can improve population structure and distribution pattern to a certain extent. Therefore, it is recommended to combine artificial promotion of natural regeneration on the basis of near natural management, increase the number of young individuals, and accelerate the realization of stable and sustainable population development.

Key words: *Pinus massoniana*; Close-to-nature management; Population structure; Time series prediction;

森林种群结构和分布格局是指森林种群数量在时间和空间上的变化规律,能够客观地反映出森林种群的演化趋势以及树木个体在水平空间上的相互关系(徐俏等, 2022),对于阐明种群的形成、动态变化和维持机制具有重要意义(何斌等, 2022)。近年来,对森林种群的结构和分布格局的研究及报道越来越多,其研究成果能够应用于森林种群生态学中,以指导具体的种群保护和森林经营工作(田莹等, 2022; 杨跃文等, 2014; 张悦等, 2015)。

马尾松 (*Pinus massoniana*) 是我国南方地区分布最广且资源最丰富的乡土树种,在木材生产和生态效益的发挥中具有重要作用。然而,长期大规模采伐导致现存的马尾松主要以人工纯林形式存在,这种情况引发了树种单一、中幼林比例高、林分密度大、抗病虫害能力弱和生产力低下等问题,导致马尾松难以满足市场需求,尤其是优质大径材的需求(MEI, L *et al.*, 2021; MO, R *et al.*, 2023; 崔宁洁等, 2014)。近年来,近自然经营理论和技术已成功应用于马尾松林的经营管理中,以提高质量和效益(陈绍栓等, 2017; 陆元昌等, 2009)。研究马尾松人工林种群结构与分布格局变化规律,可以为马尾松人工林科学培育和可持续经营提供重要参考。如何斌等(何斌等, 2020)对贵州省西北部马尾松人工林种群数量特征与动态进行了研究,并指出针对不同阶段的种群生长发育特点应采取不同的抚育措施,以保证马尾松种群正常更新。曾素庭(曾素庭, 1999)也强调了马尾松种群的分布格局对于马尾松幼龄林密度管理具有较高的借鉴价值。目前,已有一些研究关注到了马尾松种群的结构、数量动态和分布格局(董鸣, 1987; 王永琪等, 2020; 杨贤宇等, 2018),但是对于近自然经营对马尾松种群结构和分布格局的影响研究相对较少。

本研究以 2009 年开始实施的中德财政合作贵州森林可持续经营项目中的马尾松近自然经营试验示范区为研究区域,选取近自然经营已有 10 余年(11-13 年)后的马尾松林为研究对象。通过径级结构、动态变化指数、时间序列预测、方差比率等方法系统分析近自然经营对马尾松种群结构、数量动态和分布格局的影响,有助于预测研究区马尾松种群未来发展态势和掌握森林群落演替机理与过程,为研究区马尾松林结构调控及质量精准提升提供科学参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

依托 2009 年开始实施的中德财政合作贵州森林可持续经营项目，以马尾松近自然经营试验示范区为研究区域。该区域位于贵阳市开阳县龙岗镇（106°59′~107°9′E,26°46′~26°59′N），地理位置属于黔中高原区，地貌以山地为主，地势起伏较大，平均海拔为 1 200 m，平均气温为 15.3 °C，无霜期年平均超过 30 0 天，年均降水量约为 1 200 mm，雨热同季，雨水充沛。土壤母质主要包括砂页岩、石灰岩和白云岩，主要土壤类型有黄壤和石灰土，其中以酸性黄壤为主。该区域马尾松林以人工纯林为主，面积大且分布集中，且覆盖了不同年龄阶段，在黔中地区马尾松林中具有较强的代表性，也是中德财政合作贵州森林可持续经营项目中马尾松近自然经营主要试验示范区。

1.2 近自然经营措施

基于目标树单株作业法，以林分平均胸径（d）划分不同生长阶段马尾松林分，制定相应的经营措施（表 1）。

表 1 马尾松林不同生长阶段的近自然经营措施

Tab. 1 Close-to-nature management measures at different growth stages of Masson pine forest

生长阶段	经营目的	经营措施
幼龄林 (d<5 cm)	提升林木质量, 调整混交结构	目标密度约 2500 株·hm ⁻² , 伐除霸王木和干形弯曲、质量差的林木, 严格保护幼苗幼树的生长, 用低强度干扰方式调整物种混交结构。
中龄林 (5 cm≤d≤14 cm)	降低立木密度, 促进保留木生长	目标密度控制在 1200-1700 株·hm ⁻² , 通过目标树与间伐密度控制两种方式相结合; 在经营过程中“采劣留优”促进优质木生长、“采密留疏”合理分配林木空间格局、“采针留阔”增加阔叶树种混交比例, 同时保护林下天然更新。
近熟林 (15 cm≤d≤34 cm)	收获少量中小径材, 同时促进保留木生长	目标密度控制在 300-850 株·hm ⁻² , 平均胸径为 17 cm 时第 1 次间伐, 目标树密度约 150 株·hm ⁻² ; 对每株目标树, 伐除 2 株干扰木, 促进保留木生长。

1.3 样地布设及植被调查

参考研究区马尾松林分布及近自然经营实施情况，按年龄梯度共计设置 24 组成对样地（1 个经营样地和 1 个对对照样地，选择人为干扰相对较小且未实施任何经营的林分为对对照样地，两个样地具有相同的林分年龄和相近的立地条件），包含 5 组幼龄林、11 组中龄林和 8 组近熟林，共计 48 个样地。中心样圆法在抚育采伐实施合理的小班中具有相对较高的精度(宋曰钦等, 2002)，因此本研究布设圆形样地进行调查，样地半径为 14.57 m，面积为 667 m²（约 1 亩）。每个圆形样地内均匀布设 9 个同心样圆，圆心间距离为 5 m，圆心用 PVC 管固定，其中大的样圆（4 m²）调查灌木和更新，小的样圆（2 m²）调查草本植物，另外布设 4 个面积为 1 m² 的样圆调查土壤。对样地内所有胸径（DBH）≥ 5 cm 的立木使用全站仪（TOPCON-GTS-602AF）每木定位，实测胸径、树高、冠高、枝下高、冠幅、林木质量、病虫害状况、生活力并进行林木分级。在 4 m² 样圆内对更新（幼树：1 cm≤DBH≤5 cm；幼苗：DBH≤1 cm）的种类、株高、株

数、盖度和病虫害状况等进行调查。

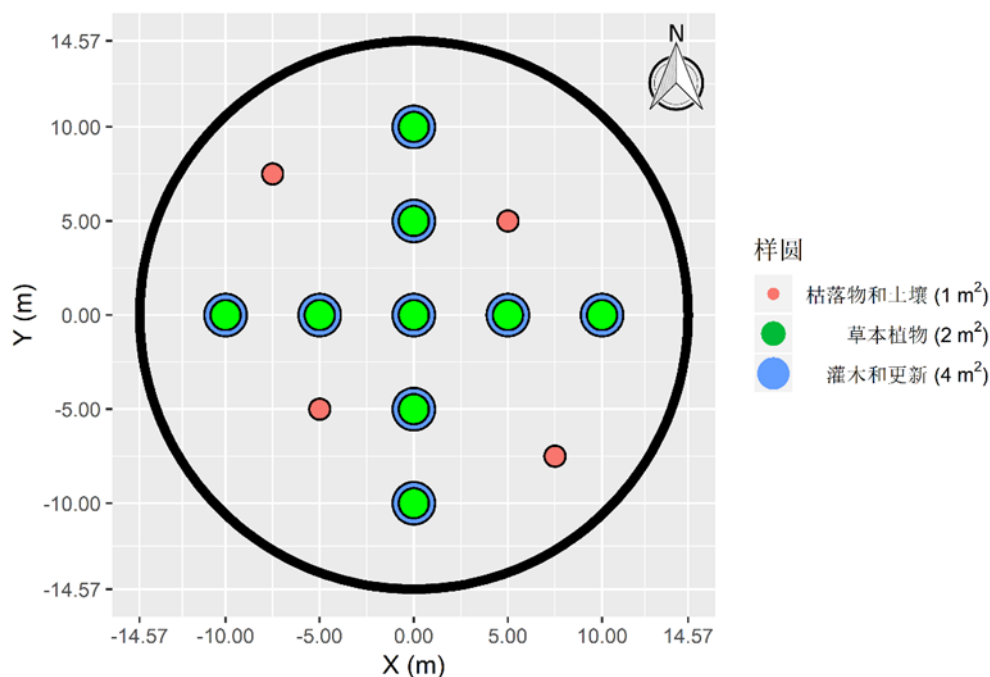


图 1 野外实验样地布设示意图

Fig. 1 Schematic diagram of field experimental plots

1.4 数据分析

1.4.1 马尾松种群年龄结构的确定和划分

由于马尾松个体平均寿命较长,研究其种群生物学特征相对较为困难。依据董鸣(董鸣, 1987)相关研究表明,马尾松的龄级和径级在相同环境下具有大致相同的反应规律,故采用径级结构代替年龄结构的分析方法研究种群结构特征。结合马尾松的生长规律和样地调查实际情况,采用上限排外法,将 DBH < 1 cm 的植株定义 I 龄级, $1 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 5 \text{ cm}$ 定义 II 龄级,其后以 4 cm 为步长增加 1 龄级,即 $5 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 9 \text{ cm}$ 定义为 III 龄级,依此类推,将研究区的马尾松种群共划分为 15 个龄级。通常将 DBH < 1 cm 的植株定义为幼苗, $1 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 5 \text{ cm}$ 的植株定义为幼树(池森等, 2020),因此本文中 I、II 龄级个体统称为幼龄个体。

1.4.2 马尾松种群动态分析方法

参考陈晓德(陈晓德, 1998)的种群动态量化分析,描述马尾松种群动态变化。计算公式如下:

$$V_n = \frac{S_n - S_{n+1}}{\max(S_n, S_{n+1})} \times 100\%$$

$$V_{pi} = \frac{1}{\sum_{n=1}^{k-1} S_n} \sum_{n=1}^{k-1} (S_n \cdot V_n)$$

$$V'_{pi} = \frac{\sum_{n=1}^{k-1} (S_n \cdot V_n)}{k \cdot \min(S_1, S_2, S_3, \dots, S_k) \sum_{n=1}^{k-1} S_n}$$

$$P_{max} = \frac{1}{k \cdot \min(S_1, S_2, S_3, \dots, S_k)}$$

式中, V_n 表示相邻两个龄级 n 和 $n+1$ 间个体数量变化动态指数; V_{pi} 表示整个种群年龄结构的数量变化动态; V'_{pi} 表示在综合考虑外界随机环境干扰的情况下整个种群年龄结构的数量变化动态。 S_n 、 S_{n+1} 分别为第 n 和第 $n+1$ 级种群个体数; k 为种群大小级数量。当 V_n 、 V_{pi} 、 V'_{pi} 分别为正、0、负值时, 反映种群个体数量的增长、稳定和衰退。 P_{max} 为随机干扰风险极值; P_{max} 越趋近于 0, 种群对外界干扰敏感性越高。

1.4.3 马尾松种群时间序列模型预测

采用一次移动平均法对马尾松种群的龄级结构动态进行预测, 具体算法如下:

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

式中, t 表示龄级, n 表示所需预测的时间, $M_t^{(1)}$ 表示经过 n 时间后未来 t 龄级的种群大小, X_k 表示第 k 龄级内的个体数。

1.4.4 马尾松种群分布格局研究

种群分布格局研究对定量描述种群格局, 揭示格局形成原因和种群演变规律, 并预测种群未来变化趋势具有重要意义(周资行等, 2011)。本文采用 6 种常用聚集度指标进行马尾松种群分布格局研究(李进军等, 2013; 郑元润, 1997), 其中:

(1) 平均拥挤度 (m^*): $m^* = \bar{X} + (S^2/\bar{X} - 1)$

(2) 聚块性指数 (P): $P = m^*/\bar{X}$ 。当 $P < 1$, 为均匀分布; 若 $P = 1$, 为随机分布; 若 $P > 1$, 为聚集分布。

(3) 丛生指标 (I): $I = S^2/(\bar{X} - 1)$ 。当 $I < 0$, 为均匀分布; $I = 0$, 为随机分布; $I > 0$, 为聚集分布。

(4) 扩散系数 (C): $C = S^2/\bar{X}$ 。当 $C < 1$ 时, 为均匀分布; $C = 1$ 时, 为随机分布; $C > 1$ 时, 为聚集分布。

以 $\sqrt{2/(N-1)}$ 为标准方差进行 t 检验, t 值的计算公式为: $t = (S^2/\bar{X} - 1)/\sqrt{2/(N-1)}$, 然后查自由度为 $N-1$, 置信度为 95% 的 t 分布表, 进行显著性检验。

(5) 负二项式分布参数 (k): $k = \bar{X}^2/(S^2 - \bar{X})$ 。 $k \geq 8$ 时, 为 Poisson 分布; 当 $k < 8$ 时, 为聚集分布。

(6) Cassic.R.M 指标 (R): $R = (S^2 - \bar{X})/\bar{X}^2$ 。当 $R < 0$, 为均匀分布; $R = 0$ 时, 为随机分布; 当 $R > 0$, 为聚集分布。

1.4.5 数据处理

数据处理与制图使用 R4.2.2 完成。

2 结果与分析

2.1 马尾松种群结构特征

共计调查马尾松林木个体 2818 株, 包括 15 个龄级。其中近自然经营林分有马尾松林木个体数 1295 株, 对照林分有马尾松林木个体数 1523 株; 对照和经营林分马尾松种群数量随着龄级增大均呈现先上升

后下降的单峰趋势（图 2）。对照林分马尾松种群龄级分布右偏（偏度系数 $Skew=0.44$ ），峰度低于正态分布（峰度系数 $Kurt=-1.48$ ）；经营林分马尾松种群龄级分布左偏（ $Skew=-0.12$ ），峰度低于正态分布（ $Kurt=-1.55$ ）。I~II 龄级个体数过少，尤其是 I 龄级个体数极低。虽然近自然经营后马尾松种群 I 龄级个体数量较对照林分有所增加，但个体数量依然不足。可见，研究区马尾松种群天然更新不足、幼龄（I、II 龄级）个体数量匮乏、龄级分布不合理、种群结构不稳定。

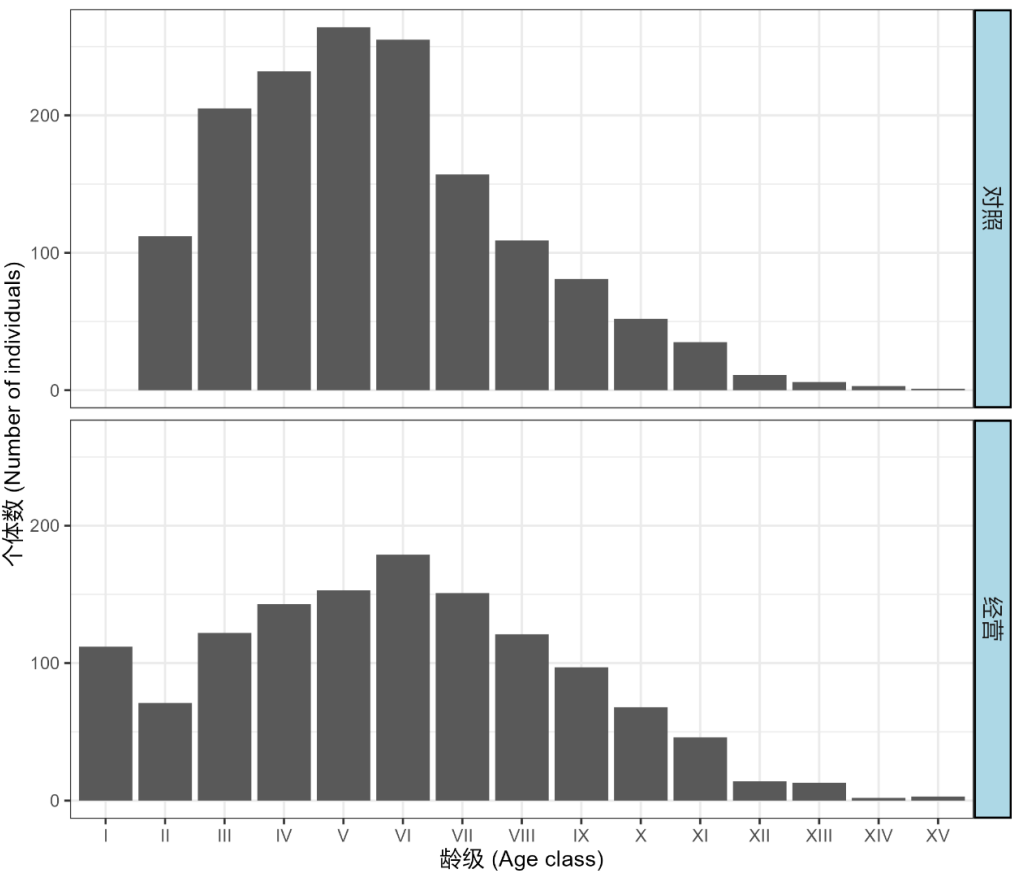


图 2 近自然经营对马尾松种群龄级结构的影响

Fig. 2 Effect of Close-to-nature management on age class structure of Masson pine population

2.2 马尾松种群数量动态

由种群动态变化指数显示（表 2），对照林分动态指数级 $V_1 \sim V_4$ 为负，表明 I~IV 龄级呈现衰退的结构动态关系，；其余龄级均为正，表明 V~ XV 龄级呈现增长的结构动态关系；经营林分动态指数级 $V_2 \sim V_5$ 和 V_{14} 为负，表明 II~V 和 XIV 龄级呈现衰退的结构动态关系；其余龄级均为正，表明呈现增长的结构动态关系； V_{pi} 和 V'_{pi} 均为正，表明研究区马尾松种群总体属于增长型种群；马尾松种群在对照林分中的 P_{max} 值（0.07）>经营林分中的 P_{max} 值（0.03），表明马尾松种群在经营林分中具有较好的稳定性，更适宜马尾松种群的长期生存，但幼龄（I、II 龄级）个体较少是研究区马尾松种群长期稳定发展的限制性因素。

表 2 近自然经营下马尾松种群龄级结构动态变化指数

Tab. 2 Dynamic change index of age class structure of *Masson pine* population under Close-to-nature management

龄级	动态级数	动态指数值%	
		对照	经营
I~ II	V_1	-100.00	36.61
II~ III	V_2	-45.37	-41.80
III~ IV	V_3	-11.64	-14.69
IV~ V	V_4	-12.12	-6.54
V~ VI	V_5	3.41	-14.53
VI~ VII	V_6	38.43	15.64
VII~ VIII	V_7	30.57	19.87
VIII~ IX	V_8	25.69	19.83
IX~ X	V_9	35.80	29.90
X~ XI	V_{10}	32.69	32.35
XI~ XII	V_{11}	68.57	69.57
XII~ XIII	V_{12}	45.45	7.14
XIII~ XIV	V_{13}	50.00	84.62
XIV~ XV	V_{14}	66.67	-33.33
~	V_{pi}	10.53	10.69
~	V'_{pi}	0.70	0.36
~	P_{max}	0.07	0.03

2.3 马尾松种群时间序列模型预测分析

时间序列预测结果（图 3）显示，对照林分中马尾松种群经过 2 和 4 个龄级后，VII ~XV 龄级个体数呈上升趋势；经过 6 和 8 个龄级后，X~XV 龄级个体数呈上升趋势。而经营林分中马尾松种群经过 2 个龄级后，VIII~XV 龄级个体数呈上升趋势；经过 6 和 8 个龄级后，X~XV 龄级个体数呈上升趋势。表明随着时间推移，两个马尾松种群中老龄个体数量会逐渐增多。然而，经过 4 个龄级后，两个种群的 III~V 龄级数量均呈下降趋势，对照林分马尾松种群 III、IV 和 V 龄级个体数分别下降 22.7%、40.8%和 23.0%，经营林分马尾松种群 III、IV 和 V 龄级个体数分别下降 20.9%、21.7%和 20.1%，这表明两种群中幼龄个体数量均不能得到有效补充，种群呈衰退趋势，但近自然经营能在一定程度上提升中幼龄级个体的续存量。

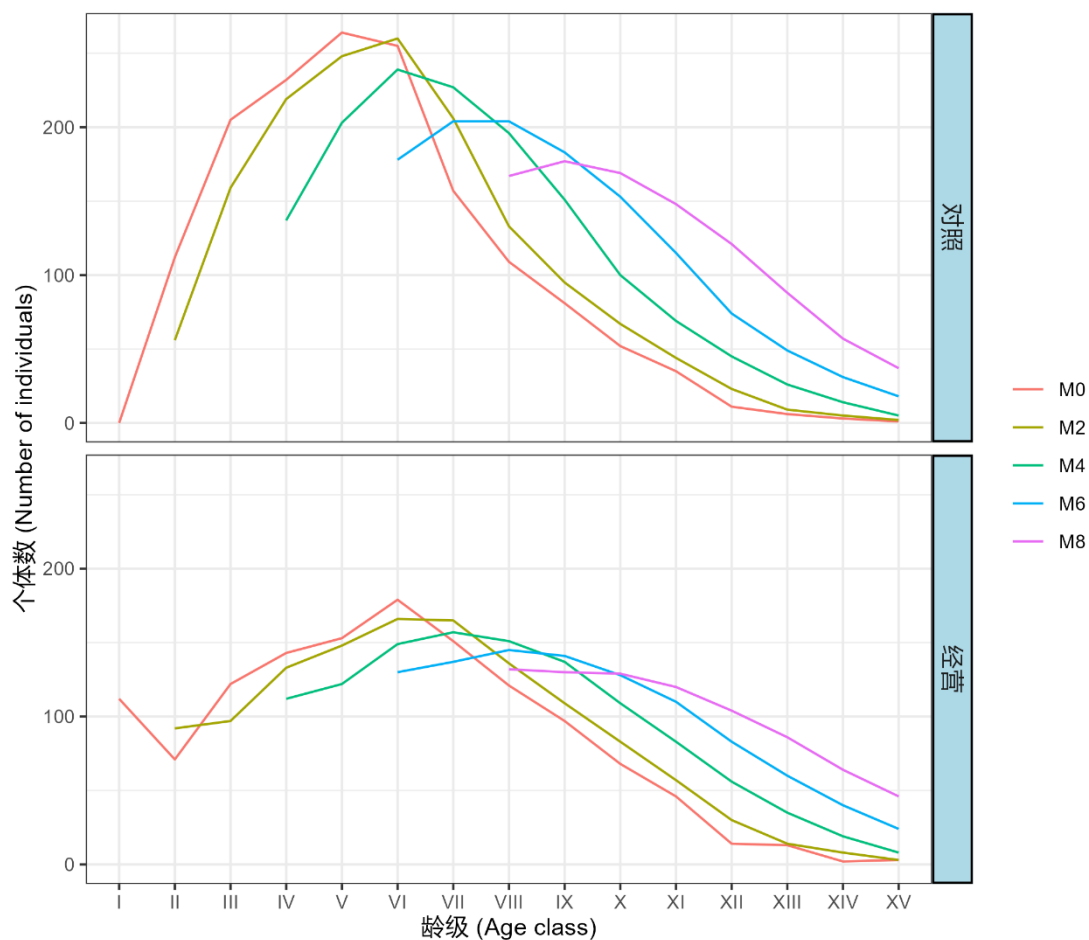


图 3 近自然经营下马尾松种群数量动态时间序列预测

Fig. 3 Time series prediction of population dynamics of Masson pine population under Close-to-nature management

2.4 马尾松种群分布格局

通过方差均值比检验（表 3）显示，马尾松种群空间格局从演替趋势上逐渐由聚集分布过渡为随机分布；在对照和经营林分中分布格局总体均呈现聚集分布，但是，对照林分中马尾松种群的聚集程度明显高于经营林分；此外，随着龄级的增大，不同龄级的聚集程度存在较大差异，随着马尾松种群龄级的增大，其分布格局呈现聚集-均匀-随机分布的趋势。对照林分中，马尾松种群 I-XII 龄级呈现聚集分布，XIII 和 XIV 龄级呈现均匀分布，而 XV 龄级呈现随机分布。经营林分中，马尾松种群 I-X 龄级呈现聚集分布，XI-XIII 龄级呈现均匀分布，而 XIV 和 XV 龄级呈现随机分布。可见，近自然经营可以在一定程度上改变马尾松种群分布格局，使种群加快达到随机分布的理想分布状态。

表 3 近自然经营对马尾松种群分布格局的影响

Tab. 3 Effects of Close-to-nature management on population distribution pattern of *Pinus massoniana* population

措施	龄级	径级	$\bar{x}$	s^2	m^*	I	P	R	C	T 检验	k	分布格局
对照	I	(0,1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	II	[1,5)	4.67	43.19	12.92	11.77	2.77	1.77	9.25	27.97**	0.57	聚集
	III	[5,9)	8.54	69.04	15.62	9.16	1.83	0.83	8.08	24.02**	1.21	聚集
	IV	[9,13)	9.67	85.28	17.49	9.84	1.81	0.81	8.82	26.52**	1.24	聚集
	V	[13,17)	11.00	62.43	15.68	6.24	1.43	0.43	5.68	15.86**	2.35	聚集
	VI	[17,21)	10.63	40.51	13.44	4.21	1.26	0.26	3.81	9.53**	3.78	聚集
	VII	[21,25)	6.54	11.82	7.35	2.13	1.12	0.12	1.81	2.74**	8.10	聚集
	VIII	[25,29)	4.54	14.00	6.62	3.95	1.46	0.46	3.08	7.07**	2.18	聚集
	IX	[29,33)	3.38	9.98	5.33	4.19	1.58	0.58	2.95	6.62**	1.73	聚集
	X	[33,37)	2.17	4.23	3.12	3.62	1.44	0.44	1.95	3.22**	2.29	聚集
	XI	[37,41)	1.46	3.56	2.90	7.74	1.99	0.99	2.44	4.88**	1.02	聚集
	XII	[41,45)	0.46	0.78	1.16	-1.44	2.51	1.51	1.70	2.36**	0.66	聚集
	XIII	[45,49)	0.25	0.28	0.37	-0.37	1.48	0.48	1.12	0.41	2.08	均匀
	XIV	[49,53)	0.13	0.11	-0.02	-0.13	-0.18	-1.18	0.85	-0.52	-0.85	均匀
	XV	[53,77)	0.00	0.00	-	0.00	-	-	-	-	-	随机
总体		63.42	692.60	73.34	11.10	1.16	0.16	10.92	33.64**	6.39	聚集	
经营	I	(0,1)	4.67	369.02	82.69	100.55	17.71	16.71	79.02	264.58**	0.06	聚集
	II	[1,5)	2.96	17.00	7.70	8.67	2.60	1.60	5.74	16.09**	0.62	聚集
	III	[5,9)	5.08	45.91	13.12	11.25	2.58	1.58	9.04	27.26**	0.63	聚集
	IV	[9,13)	5.96	64.39	15.76	12.98	2.64	1.64	10.80	33.25**	0.61	聚集
	V	[13,17)	6.38	51.46	13.45	9.57	2.11	1.11	8.07	23.96**	0.90	聚集
	VI	[17,21)	7.46	42.61	12.17	6.60	1.63	0.63	5.71	15.98**	1.58	聚集
	VII	[21,25)	6.29	18.65	8.26	3.53	1.31	0.31	2.97	6.66**	3.20	聚集
	VIII	[25,29)	5.04	16.39	7.29	4.06	1.45	0.45	3.25	7.64**	2.24	聚集
	IX	[29,33)	4.04	7.87	4.99	2.59	1.23	0.23	1.95	3.21**	4.26	聚集
	X	[33,37)	2.83	5.45	3.76	2.98	1.33	0.33	1.93	3.14**	3.06	聚集
	XI	[37,41)	1.92	2.78	2.37	3.02	1.23	0.23	1.45	1.52	4.29	均匀
	XII	[41,45)	0.58	0.78	0.92	-1.86	1.59	0.59	1.34	1.17	1.68	均匀
	XIII	[45,49)	0.54	0.78	0.98	-1.70	1.82	0.82	1.44	1.51	1.22	均匀
	XIV	[49,53)	0.08	0.08	0.08	-0.09	1.00	0.00	1.00	0.00	-	随机
	XV	[53,77)	0.04	0.04	0.04	-0.04	1.00	0.00	1.00	0.00	-	随机
总体		53.88	942.20	70.37	17.82	1.31	0.31	17.49	55.91**	3.27	聚集	

注：T 检验中，自由度为 23，置信度为 0.95，T 值为 2.069。

3.讨论

稳定种群的龄级结构应该呈现倒 J 型分布，其中幼龄个体数量占据相对较大比重，而中老龄级个体数量随龄级增大逐渐减少(刁云飞等, 2020; 韩豪等, 2021; 任毅华等, 2021)。本研究中马尾松种群的龄级结构呈现偏正态分布， I~II 龄级个体数量普遍较少，此类龄级结构难以有效补充成年个体的缺失，在种群遭遇强烈环境波动时，极易造成种群数量大规模变动(余潇等, 2023)，龄级分布不合理，种群结构不稳定，

呈现衰退趋势,难以长期稳定的发展。多项研究均证实了马尾松种群结构普遍存在类似问题(程寅瑞等, 2016; 何斌等, 2020; 谢春平, 2012; 熊能等, 2010)。其中,主要原因在于马尾松是一种对光照要求较高的阳性喜光树种,对光的补偿点较高,幼苗在林下环境缺乏光照时表现出相对较弱的竞争力(戴冬等, 2019; 管铭等, 2015),研究区马尾松林多为人工林,普遍存在着密度过大、郁闭度过高以及林下光照不足的问题。这样的环境限制了林下幼苗和幼树的生长,使它们处于较为不利的竞争地位。这也是本研究中对照林分马尾松种群 I 龄级幼苗数量为 0 的主要原因(图 1)。马尾松种群 V_{pi} 和 V'_{pi} 均为正数,意味着种群整体属于增长型;然而, V'_{pi} 趋近于 0,表明该种群处于不稳定状态,整个生长周期都可能面临死亡风险。与对照林分中马尾松种群 P_{max} 值(0.07)相比,经营林分中的 P_{max} 值(0.03)较低,表明马尾松种群在经营林分中具有相对较好的稳定性,更适宜其长期生存。

从时间序列预测分析来看,在未来 2~8 个龄级时间之后,马尾松种群 II~VI 龄级个体数逐渐减少,这表明幼龄个体很难成功进入中龄阶段。而 VI~XV 龄级个体数将逐渐增加,显示出幼龄个体一旦进入中龄林阶段,则具备较强的生存能力,由此推测,未来的马尾松种群以大树和老树为主要组成,整体趋向高龄级个体集中。另外,尽管本研究中老龄个体数量较少,但它们在自然环境中占有较大空间。因此,从种群整体发展角度来看,少数老龄个体的消亡可以促使幼龄个体进入上层空间,有利于种群更新和繁衍。换言之,随着种群的发展,马尾松的中老龄级个体可能通过自疏现象来减小剧烈的种内竞争,并释放出了更多的生存空间(赵阳等, 2020)。而近自然经营可以通过采伐林木,减小林分密度,减缓种内竞争(林富成等, 2021),从而促使种群快速发展。

马尾松种群总体呈现聚集分布,与前人的研究结果相符(曾素庭, 1999; 刘健等, 1996)。马尾松是喜光植物,其生长前中期必须在充足阳光的环境中生长。因此,在对照和经营林分中,幼龄个体受环境条件限制均呈聚集性分布。聚集分布是自然界森林植物种群最常见的分布格局,它是林木生长、存活及适应环境差异的自然结果(刘沐生等, 2011; 徐俏等, 2022),聚集分布有利于抵御恶劣生态条件,促进林木生长(曾素庭, 1999)。在研究区马尾松人工栽植过程中,株行距基本保持一致,由此导致马尾松种群在初始生长阶段呈现出均匀分布的特征。随着时间的推移,林木不断生长,林分逐渐郁闭,加剧了种内竞争,最终导致了部分马尾松个体生长迅速,占据林冠层位置。而生长较慢或竞争能力较弱的个体则成为被压木,无法在竞争激烈的环境中获得足够的养分和阳光,激烈的种内和种间竞争导致种群个体的死亡率增加,种群密度过低(秦爱丽等, 2020);林下荫蔽环境又使得天然更新受阻,生态位空间被耐阴树种占据,马尾松逐渐被其他耐阴性树种替代,种群分布格局开始变为随机分布,这与杨心兵(杨心兵等, 2001)等研究结果相一致,在对照林分中 XV 龄级时才完成此过程。而在经营林分中,通过采伐等措施,人为降低了马尾松个体初始分布的密集程度,加速了自然淘汰劣势个体的进程,加之马尾松在生长过程中可能遭受病虫害等其他不利环境因素的影响,造成部分个体死亡,使得该林分提前一个龄级过渡到随机分布状态。在一个成熟的顶极森林

群落中, 其优势树种往往呈现镶嵌式随机分布格局, 这种形式, 不仅可以减小种内竞争, 还能减小不同优势种间的相互影响(龚直文等, 2010)。因此, 随机分布格局能够让种群或群落保持更加稳定。由此可见, 对于研究区初植密度过高的马尾松人工林, 通过近自然经营能够减小聚集程度, 加快种群向随机分布格局转变, 使马尾松种群更加稳定。

4 结论

经研究发现, 马尾松种群经过 10 余年近自然经营后, 其龄级结构和分布格局得到明显改善。然而, 经营后的马尾松种群仍无法实现稳定可持续发展, 其中, 幼龄个体数的不足成为制约长期稳定发展的主要因素。这表明森林经营是一个多阶段的过程, 单次经营无法完全优化种群结构和分布格局。因此, 在后期马尾松林经营管理中, 应考虑遵循种群结构和分布格局的规律, 参考近自然经营理论与实践, 并采取适度的抚育间伐措施, 以创造林窗和林隙, 增加林内光照, 从而降低幼苗的竞争压力, 促进幼龄个体生长。同时, 可考虑在林下进行补植和补造马尾松幼苗, 以人工促进天然更新, 提高幼龄个体数量, 从而实现种群的稳定可持续发展。这些措施有望在马尾松林的后期经营管理中扮演重要作用。

参考文献

- MEI L, WEN X, FAN F, *et al.* 2021. Genetic Diversity and Population Structure of Masson Pine (*Pinus Massoniana* Lamb.) Superior Clones in South China as Revealed by Est-Ssr Markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 68: 1987-2002.
- MO R, WANG Y, DONG S, *et al.* Ecosystem Service Evaluation and Multi-Objective Management of *Pinus Massoniana* Lamb. Plantations in Guangxi, China. *Forests*. 14 (2): 213. 2023.
- 曾素庭. 1999. 马尾松人工林空间分布格局的探讨. 福建林业科技(S1): 114-116. (CENG Su ting. 1999. Discussion On the Spatial Distribution Pattern of *Pinus Massoniana* Plantation. *Fujian Forestry Science and Technology*(S1): 114-116.[in Chinese])
- 陈绍栓, 许建伟, 吴载璋, 等. 2017. 不同强度疏伐改造对马尾松林分水源涵养功能时空格局的影响. *生态学报*, 37 (20): 6753-6760. (CHEN Shao shuan, XU Jian wei, WU Zai zhang, *et al.* 2017. Effects of Different Intensities of Thinning and Transformation On the Temporal and Spatial Patterns of Water Conservation Function in Masson Pine Stands. *Journal of Ecology*, 37(20): 6753-6760.[in Chinese])
- 陈晓德. 1998. 植物种群与群落结构动态量化分析方法研究. *生态学报*(02): 104-107. (CHEN Xiao de. 1998. Research On Quantitative Analysis Methods for Plant Population and Community Structure Dynamics. *Journal of Ecology*(02): 104-107.[in Chinese])
- 程寅瑞, 杜丹丹, 张小平. 2016. 南京南郊马尾松种群动态及种内竞争模型的应用. *生态与农村环境学报*, 32(01): 83-89. (CHENG Yin rui, DU Dan dan, ZHANG Xiao ping. 2016. Application of Masson Pine Population Dynamics and Intraspecific Competition Model in the Southern Suburbs of Nanjing. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 32 (01): 83-89.[in Chinese])
- 池森, 王从军, 黎庆菊, 等. 2020. 喀斯特次生林幼树更新空间分布格局及种间关联性. *应用生态学报*, 31(12): 3989-3996. (CHI Sen, WANG Cong jun, LI Qing ju, *et al.* 2020. Spatial Distribution Pattern and Interspecific Correlation of Young Tree Regeneration in Karst Secondary Forests. *Journal of Applied Ecology*, 31(12): 3989-3996.[in Chinese])

- 崔宁洁, 刘小兵, 张丹桔, 等. 2014. 不同林龄马尾松(*Pinus Massoniana*)人工林碳氮磷分配格局及化学计量特征. 生态环境学报, 23(02): 188-195.
- 戴冬, 彭楚才, 黄鑫, 等. 2019. 鄂中地区马尾松人工林群落演替特征研究. 林业科学研究, 32(06): 48-55. (DAI Dong, PENG Chu cai, HUANG Xin, *et al.* 2019. Study On the Community Succession Characteristics of *Pinus Massoniana* Plantation in the Central Hubei Region. Forest Research, 32(06): 48-55.[in Chinese])
- 刁云飞, 刘延坤, 刘玉龙, 等. 2020. 穆棱东北红豆杉种群结构特征. 中国科学:生命科学, 50(04): 391-397. (DIAO Yun fei, LIU Yan kun, LIU Yu long, *et al.* 2020. The Population Structure Characteristics of Northeast Chinese Taxus in Muling. Chinese Science: Life Sciences, 50(04): 391-397.[in Chinese])
- 董鸣. 1987. 缙云山马尾松种群年龄结构初步研究. 植物生态学与地植物学学报(01): 50-58. (DONG Ming. 1987. A Preliminary Study On the Age Structure of Masson Pine Population in Jinyun Mountain. Journal of Plant Ecology and Geobotany(01): 50-58.[in Chinese])
- 龚直文, 顾丽, 亢新刚, 等. 2010. 长白山森林次生演替过程中林木空间格局研究. 北京林业大学学报, 32(02): 92-99. (GONG Zhi wen, GU Li, KANG Xin gang, *et al.* 2010. Study On the Spatial Pattern of Forest Trees in the Secondary Succession Process of Changbai Mountain Forest. Journal of Beijing Forestry University, 32(02): 92-99.[in Chinese])
- 管铭, 金则新, 李月灵, 等. 2015. 千岛湖次生林优势种植物光合生理生态特性. 生态学报, 35(07): 2057-2066. (GU AN Ming, JIN Ze xin, LI Yue ling, *et al.* 2015. Photosynthetic Physiological and Ecological Characteristics of Dominant Species of Plants in the Secondary Forest of Qiandao Lake. Journal of Ecology, 35(07): 2057-2066.[in Chinese])
- 韩豪, 骆漫, 李涛, 等. 2021. 贵州闽楠天然种群特征、空间分布格局及空间关联分析. 生态学报, 41(13): 5360-5367. (HAN Hao, LUO Man, LI Tao, *et al.* 2021. Characteristics, Spatial Distribution Pattern, and Spatial Correlation Analysis of the Natural Population of Minnan in Guizhou. Journal of Ecology, 41(13): 5360-5367.[in Chinese])
- 何斌, 李青, 陈群利, 等. 2020. 贵州省西北部马尾松人工林种群数量特征与动态. 中南林业科技大学学报, 40(11): 129-137. (HE Bin, LI Qing, CHEN Qun li, *et al.* 2020. Quantitative Characteristics and Dynamics of Masson Pine Artificial Forest Species in Northwest Guizhou Province. Journal of Central South Forestry University, 40(11): 129-137.[in Chinese])
- 何斌, 张萍, 李青, 等. 2022. 珍稀濒危植物黄杉种群结构与空间分布格局. 热带亚热带植物学报, 30(04): 461-471. (HE Bin, ZHANG Ping, LI Qing, *et al.* 2022. The Population Structure and Spatial Distribution Pattern of the Rare and Endangered Plant *Pseudostellaria Lanceolata*. Journal of Tropical and Subtropical Plants, 30(04): 461-471.[in Chinese])
- 李进军, 薛斌瑞, 柴宗政. 2013. 民勤县荒漠—绿洲交错带梭梭种群的数量动态及分布格局. 东北林业大学学报, 41(08): 27-31. (LI Jin jun, XUE Bin rui, CHAI Zong zheng. 2013. Quantitative Dynamics and Distribution Pattern of *Haloxydon Ammodendron* Population in the Desert Oasis Ecotone of Minqin County. Journal of Northeast Forestry University, 41(08): 27-31.[in Chinese])
- 林富成, 王维芳, 门秀莉, 等. 2021. 兴安落叶松人工林空间结构优化. 北京林业大学学报, 43(04): 68-76. (LIN Fu cheng, WANG Wei fang, MEN Xiu li, *et al.* 2021. Optimization of Spatial Structure of Xing'an Larch Plantation. Journal of Beijing Forestry University, 43(04): 68-76.[in Chinese])
- 刘健, 陈平留, 林银森. 1996. 天然针阔混交林中马尾松种群的空间分布格局. 福建林学院学报(03): 229-233. (LIU Jian, CHEN Ping liu, LIN Yin sen. 1996. Spatial Distribution Pattern of *Pinus Massoniana* Population in Natural Mixed Coniferous and Broad-Leaved Forests. Journal of Fujian College of Forestry(03): 229-233.[in Chinese])
- 刘沐生, 吕爱清. 2011. 江西明月山马尾松种群的空间分布格局. 贵州农业科学, 39(07): 180-182. (LIU Mu sheng, LU Ai qing. 2011. Spatial Distribution Pattern of *Pinus Massoniana* Population in Mingyue Mountain, Jiangxi Province. Guizhou Agricultural Sciences, 39(07): 180-182.[in Chinese])
- 陆元昌, 张守攻, 雷相东, 等. 2009. 人工林近自然化改造的理论基础和实施技术. 世界林业研究, 22(01): 20-27. (LU Yuan chang, ZHANG Shou gong, LEI Xiang dong, *et al.* 2009. Theoretical Basis and Implementation Techniques of

or Near Naturalization Transformation of Artificial Forests. *World Forestry Research*, 22(01): 20-27.[in Chinese])

秦爱丽, 马凡强, 许格希, 等. 2020. 珍稀濒危树种峨眉含笑种群结构与动态特征. *生态学报*, 40(13): 4445-4454. (QIN Ai li, MA Fan qiang, XU Ge xi, *et al.* 2020. The Population Structure and Dynamic Characteristics of Rare and Endangered Tree Species, *Michelia Emei*. *Journal of Ecology*, 40(13): 4445-4454.[in Chinese])

任毅华, 周尧治, 侯磊, 等. 2021. 色季拉山急尖长苞冷杉种群不同龄级立木的空间分布格局. *生态学报*, 41(13): 5417-5424. (REN Yi hua, ZHOU Yao zhi, HOU Lei, *et al.* 2021. The Spatial Distribution Pattern of Different Age Groups of Standing Trees in the Sharp Pointed Long Bracted Fir Population of Sejila Mountain. *Journal of Ecology*, 41(13): 5417-5424.[in Chinese])

宋曰钦, 高长宝. 2002. 南方人工林小班蓄积量调查方法比较研究. *江苏林业科技*(04): 14-15. (SONG Yue qin, GAO Zhang bao. 2002. Comparative Study On Investigation Methods of Small Class Volume of Southern Artificial Forests. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*(04): 14-15.[in Chinese])

田莹, 卢杰. 2022. 植物种群结构与数量动态分析方法探讨. *绿色科技*, 24(03): 89-94. (TIAN Ying, LU Jie. 2022. Discussion On Methods for Analyzing Plant Population Structure and Quantitative Dynamics. *Green Technology*, 24(03): 89-94.[in Chinese])

王永琪, 颜培栋, 马姜明, 等. 2020. 广西马尾松人工种群径级和树高级结构特征研究. *广西林业科学*, 49(04): 480-491. (WANG Yong qi, YAN Pei dong, MA Jiang ming, *et al.* 2020. Study On the Characteristics of Diameter Class and Tree Height Structure of Artificial Population of *Pinus Massoniana* in Guangxi. *Guangxi Forestry Science*, 49(04): 480-491.[in Chinese])

谢春平. 2012. 南京仙林地区次生林马尾松种群结构分析. *四川农业大学学报*, 30(02): 156-160. (XIE Chun ping. 2012. Analysis On the Population Structure of *Pinus Massoniana* in the Secondary Forest of Xianlin District, Nanjing. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 30(02): 156-160.[in Chinese])

熊能, 金则新, 陈琢. 2010. 千岛湖姥山马尾松种群结构和分布格局研究. *植物研究*, 30(05): 537-542. (XIONG Neng, JIN Ze xin, CHEN Zhuo. 2010. Study On the Population Structure and Distribution Pattern of *Pinus Massoniana* in Laoshan, Qiandao Lake. *Plant Research*, 30(05): 537-542.[in Chinese])

徐俏, 赵万羽, 魏岩, 等. 2022. 阿尔泰山东部林区森林种群结构和空间分布格局. *干旱区研究*, 39(06): 1885-1895. (XU Qiao, ZHAO Wan yu, WEI Yan, *et al.* 2022. Forest Population Structure and Spatial Distribution Pattern in Eastern Altay Forest Region. *Arid Zone Research*, 39(06): 1885-1895.[in Chinese])

徐俏, 赵万羽, 魏岩, 等. 2022. 阿尔泰山东部林区森林种群结构和空间分布格局. *干旱区研究*, 39(06): 1885-1895. (XU Qiao, ZHAO Wan yu, WEI Yan, *et al.* 2022. Forest Population Structure and Spatial Distribution Pattern in Eastern Altay Forest Region. *干旱区研究*, 39(06): 1885-1895.[in Chinese])

杨贤宇, 李守中, 宋铁燕, 等. 2018. 长汀侵蚀退化区砍伐迹地马尾松种群动态. *生态学报*, 38(09): 3175-3182. (YANG Xian yu, LI Shou zhong, SONG Tie yan, *et al.* 2018. Population Dynamics of *Pinus Massoniana* in the Deforested Land of Changting Erosion and Degradation Zone. *Journal of Ecology*, 38(09): 3175-3182.[in Chinese])

杨心兵, 覃逸明, 刘胜祥. 2001. 武汉市马鞍山森林公园马尾松年龄种群结构与分布格局. *华中师范大学学报(自然科学版)*(02): 209-213. (YANG Xin bing, TAN Yi ming, LIU Sheng xiang. 2001. Age Population Structure and Distribution Pattern of *Pinus Massoniana* in Ma'anshan Forest Park, Wuhan City. *Journal of Central China Normal University (Natural Science Edition)*(02): 209-213.[in Chinese])

杨跃文, 段玉玺, 季蒙, 等. 2014. 贺兰山林区油松种群结构与空间分布特征研究. *林业资源管理*(02): 87-92. (YANG Yue wen, DUAN Yu xi, JI Meng, *et al.* 2014. Study On the Population Structure and Spatial Distribution Characteristics of *Pinus Tabulaeformis* in the Helan Mountain Forest Region. *Forest Resource Management*(02): 87-92.[in Chinese])

余潇, 代嫚婷, 普甜, 等. 2023. 珍稀濒危植物蒜头果种群结构及动态特征研究. *西部林业科学*, 52(03): 8-16. (YU Xiao, DAI Man ting, PU Tian, *et al.* 2023. Study On the Population Structure and Dynamic Characteristics of Rare and Endangered Plant Garlic Fruit. *Western Forestry Science*, 52(03): 8-16.[in Chinese])

- 张悦, 易雪梅, 王远遐, 等. 2015. 采伐对红松种群结构与动态的影响. 生态学报, 35(01): 38-45. (ZHANG Yue, YI Xue mei, WANG Yuan xia, *et al.* 2015. The Impact of Logging On the Population Structure and Dynamics of *Pinus Koraiensis*. Journal of Ecology, 35(01): 38-45.[in Chinese])
- 赵阳, 刘锦乾, 陈学龙, 等. 2020. 洮河上游紫果云杉种群结构特征. 植物生态学报, 44(03): 266-276. (ZHAO Yang, LIU Jin qian, CHEN Xue long, *et al.* 2020. The Population Structure Characteristics of Purple Fruit Spruce in the Upper Reaches of Taohe River. Journal of Plant Ecology, 44(03): 266-276.[in Chinese])
- 郑元润. 1997. 不同方法在沙地云杉种群分布格局分析中的适用性研究. 植物生态学报(05): 89-93. (ZHENG Yuan run. 1997. Study On the Applicability of Different Methods in Analyzing the Distribution Pattern of Spruce Population in Sandy Areas. Journal of Plant Ecology(05): 89-93.[in Chinese])
- 周资行, 李毅, 焦健. 2011. 兰州市郊红砂种群数量动态与分布格局. 生态与农村环境学报, 27(05): 24-31. (ZHOU Zi xing, LI Yi, JIAO Jian. 2011. Quantitative Dynamics and Distribution Pattern of Red Sand Population in the Suburbs of Lanzhou City. Journal of Ecology and Rural Environment, 27(05): 24-31.[in Chinese])