

黄土丘陵区天然侧柏种群结构特征及生存状况

孙婷¹, 李钢铁¹, 麻云霞¹, 宋佳佳², 郭靖捷², 谷忠厚³, 刘坤³, 李治龙⁴, 李敏⁵

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.鄂尔多斯市造林总场, 内蒙古 鄂尔多斯 014399; 3.鄂尔多斯市林业和草原事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017299; 4.鄂尔多斯市林业和草原调查勘测中心, 内蒙古 鄂尔多斯 014399; 5.伊金霍洛旗农畜产品质量安全中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017200)

摘要: [目的] 探究黄土丘陵区天然侧柏种群结构特征及生存状况, 为该区森林草地高质量可持续发展提供科学依据。[方法] 基于遥感影像选择 10 000 m² 典型样地为研究区, 利用每木检尺法调查采集数据; 采用时间代替空间、匀滑技术等方法在静态生命表的基础上利用动态变化指数量化分析数量特征, 结合时间尺度上的谱分析及时间序列模拟预测, 对侧柏种群进行综合生存分析。[结果] ①侧柏种群的高度、冠幅和径级结构均表明幼树丰富。②侧柏种群存活曲线近 Deevey-II 型, 种群对外界干扰有敏感度。③种群动态表现为前期生存能力强, 中期生长稳定, 后期生命衰退的特点。时间序列模拟和预测分析说明侧柏种群个体呈不同程度的增加趋势且具较强生长恢复能力。[结论] 黄土丘陵区天然侧柏种群结构稳定且呈增长趋势, 存活曲线接近 Deevey-II 型。

关键词: 侧柏; 种群结构; 静态生命表; 量化动态分析; 生存分析; 黄土丘陵区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)06-0025-06

中图分类号: Q948.15

文献参数: 孙婷, 李钢铁, 麻云霞, 等. 黄土丘陵区天然侧柏种群结构特征及生存状况[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 25-30. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.004; Sun Ting, Li Gangtie, Ma Yunxia, et al. Population structure characteristics and survival status of natural *Platycladus orientalis* in loess hilly region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 25-30.

Population Structure Characteristics and Survival Status of Natural *Platycladus Orientalis* in Loess Hilly Region

Sun Ting¹, Li Gangtie¹, Ma Yunxia¹, Song Jiajia²,

Guo Jingjie², Gu Zhonghou³, Liu Kun³, Li Zhilong⁴, Li Min⁵

(1.College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University,

Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2.Ordos City Afforestation Farm, Ordos, Inner

Mongolia 014399, China; 3.Ordos Forestry and Grassland Development Center, Ordos, Inner

Mongolia 017299, China; 4.Ordos Forestry and Grassland Survey Center, Ordos, Inner Mongolia 014399, China;

5.Ijin Holo Banner Agricultural and Livestock Product Quality and Safety Center, Ordos, Inner Mongolia 017200, China)

Abstract: [Objective] Population structure characteristics and survival status of natural *Platycladus orientalis* in the loess hilly region were determined in order to provide a scientific basis for high-quality and sustainable development of forest grassland in this area. [Methods] Characteristics were quantitatively analyzed by using a dynamic change index based on a static life table combined with spectral analysis on the time scale and time series simulation prediction to carry out a comprehensive survival analysis of this cypress species. [Results] ① The height, crown width, and diameter structure of the *P. orientalis* population indicated that young trees were abundant. ② The survival curve of the *P. orientalis* population was close to Deevey-II type, and the population was sensitive to external interference. ③ Population dynamics were characterized by strong viability in the early stage, stable growth in the middle stage, and decline in viability

收稿日期: 2023-04-11

修回日期: 2023-05-18

资助项目: 鄂尔多斯市科技重大专项“露天矿排土场高效植被建设关键技术研究与示范”(2022EEDSKJZDZX012)

第一作者: 孙婷(1997—), 女(汉族), 内蒙古自治区丰镇市人, 硕士研究生, 研究方向为沙区植物资源保护与利用。Email: 15174984210@163.com。

通信作者: 李钢铁(1963—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 教授, 博士生导师, 主要从事沙区植物资源保护与利用方面的研究。

Email: 13848817183@163.com。

in the later stage. Time series simulation and prediction analysis showed that the population of *P. orientalis* showed different degrees of increasing trend and strong growth recovery ability. [Conclusion] The natural population structure of *P. orientalis* in the loess hilly region was stable and growing, and the survival curve was close to that of Deevey-II type.

Keywords: *Platycladus orientalis*; population structure; static life table; quantified dynamic analysis; survival analysis; loess hilly region

黄土丘陵区沟壑分布广泛,土质疏松,水土流失严重^[1]。侧柏(*Platycladus orientalis*)耐旱能力强,寿命长,应用广^[2],是黄土丘陵区重要的造林树种,对防风固沙、涵养水源、绿化荒山等发挥重要作用。随着社会发展和人口增长,对森林植被生态系统产品和服务的需求增加,导致越来越多的天然林变成农田、人工林,造成严重的土壤侵蚀^[3-4]。目前,侧柏的研究集中体现在叶的开发利用^[5-6],人工林经营^[7-8]以及培育技术的研究^[9-10]。对黄土丘陵区天然侧柏的种群结构和数量动态研究报道极少,探究山地^[11]天然侧柏林对进行水土保持任务十分有利^[12]。种群的结构以及动态是种群生态学研究热点^[13]。种群年龄结构分析种群数量动态及其发展趋势^[14-15],种群的径级结构揭示种群的发展趋势,为保护苗木以径级结构代替年龄结构,通过水平结构和垂直结构综合分析种群配置情况^[16],并通过基础数据编制指标静态生命表^[17]。基于静态生命表所构建的存活曲线、数量动态指数等是研究植物种群结构与动态的重要方法^[13,18-20]。以上方法在研究植物种群数量动态方面得到了广泛应用^[21-22],其揭示种群的数量特征,并且在一定程度上预测种群演变趋势,体现种群对环境的响应,揭示种群的数量特征,对植物资源的保护和利用具有重要意义^[23]。因此,本研究以黄土丘陵区的天然侧柏为研究对象,通过对径级、高度、冠幅的处理,利用匀滑技术以静态生命表为基础,在侧柏种群的存活率曲线、死亡率曲线、谱分析、时间序列模拟和预测等方面探讨,并通过标准化处理及拟合曲线双向验证,阐明侧柏的种群结构及动态特征,为丘陵区森林草地高质量发展提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

内蒙古自治区鄂尔多斯市东部准格尔旗沙圪堵镇地区(110°05′—111°27′E,39°16′—40°20′N),样地位于晋、陕黄土高原与鄂尔多斯高原的接连处,海拔在 1 200~1 400 m。地貌结构为典型的丘陵沟壑区,自西向东,纵横密布,呈支离破碎状,沟壑面积为 5 588 km²,占总面积的 74%。年平均气温为 6.2~8.7 °C,≥10.0 °C 积温 2 900~3 500 °C,无霜期

148 d;历年平均降水量在 379~420 mm,主要集中在 7—9 月,其中 6—8 月的降雨量占总降水量的 61%,年蒸发量 2 093 mm,属于典型的中温带大陆性气候。受季节风影响,夏季多偏南或偏东风,晚秋至初春多西北风。该区土壤多为栗钙土。研究区内有天然的有侧柏,人工栽培的有油松(*Pinus tabulaeformis*)。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2022 年 8—9 月,黄土丘陵区天然疏林地的侧柏为研究对象,采用样地调查法,选取研究区典型地段,方向自南向北和自西南向东北沿海拔至高海拔设置两条样带,均为 500 m×50 m,每样带以海拔梯度 10 m 分别设置 5 个 20 m×50 m 的样方^[24],样方面积总计 10 000 m²;基于无人机的遥感影像通过 ArcMap 10.2a 选取研究样地,用手持 GPS 导航至样地,以罗盘仪确定误差±0.5 m 以内的闭合样方,采用每木检尺法,记录每株乔木的基径(<2 cm 用游标卡尺测量,>2 cm 用胸径尺测量)、高度(用塔尺测量)等。

1.2.2 种群结构的划分 依据圆柏^[25]的径级划分情况,结合侧柏的生活特征,本研究采用“空间代替时间法”,以径级代替年龄^[21],侧柏种群径级(X)划分如下:Ⅰ: X<2 cm,Ⅱ: 2≤X<5,Ⅲ: 5≤X<10 为幼龄级;Ⅳ: 10≤X<15,Ⅴ: 15≤X<20,Ⅵ: 20≤X<25,Ⅶ: 25≤X<30 为中龄级;Ⅷ: 30≤X 为老龄级。根据高山松林^[26]的高度级和冠幅级划分情况,将侧柏的高度级和冠幅级均划分为 10 级(表 1)。

1.2.3 静态生命表编制 静态生命表是根据某特定时间,对种群年龄结构而编制的生命表^[27]。具体参照张金峰等^[13]人的方法,生命表是多个世代重叠的植物种群在某时的年龄分布,并非某同龄全部生活史,采用匀滑技术处理数据,将调查中存在的系统误差修正,编制黄土丘陵区侧柏种群静态生命表(表 2)。再依据数学模型绘制侧柏种群存活曲线^[13],以径级为横坐标,标准化存活数对数为纵坐标绘制侧柏种群存活曲线(图 2)。本研究描述 Deevey-II 型和 Deevey-III 型存活曲线^[28]分别运用指数方程式 $a^x = a_0 e^{-bx}$ 和幂函数 $a_x = a_0 x^{-b}$ (a_0 为种群初始个体数; b 为死亡率)。为揭示黄土丘陵区侧柏种群变化规律,引

入生存分析法中的种群生存率函数 $S_{(i)}$ 、累计死亡率函数 $F_{(i)}$ 、种群死亡密度函数 $f_{(i)}$ 以及种群危险率函数 $\lambda_{(i)}$, 对侧柏进行种群生存分析^[9]。计算表达式为:

$$S_{(i)} = S_1 \times S_2 \times S_3 \times \dots \times S_i \quad (1)$$

$$F_{(i)} = 1 - S_{(i)} \quad (2)$$

$$f_{(i)} = [S_{(i-1)} - S_{(i)}] / h_i \quad (3)$$

$$\lambda_{(i)} = 2(1 - S_{(i)}) / \{h_i [1 + S_{(i)}]\} \quad (4)$$

式中: $S_{(i)}$ 为 i 径级存活率; h_i 为 i 径级宽度;生存率为生存期 T 大于时间 t 的概率;累计死亡率为生物群体到时间 t 的积累死亡率;死亡密度为在时间 t 附近的死亡概率;危险率为生存期已达到 t 的生物群体在时间 t 的瞬间死亡率。

表 1 黄土丘陵侧柏种群等级划分

Table 1 Division of population structure class of *Platycladus orientalis* in loess hilly region

结构级	生长期	径级指标(X)/cm	高度级指标(H)/cm	冠幅级指标(W)/cm
I		$X < 2$	$H \leq 50$	$W \leq 50$
II	幼树	$2 \leq X < 5$	$50 < H \leq 100$	$50 < W \leq 100$
III		$5 \leq X < 10$	$100 < H \leq 150$	$100 < W \leq 150$
IV		$10 \leq X < 15$	$150 < H \leq 200$	$150 < W \leq 200$
V	中年树	$15 \leq X < 20$	$200 < H \leq 250$	$200 < W \leq 250$
VI		$20 \leq X < 25$	$250 < H \leq 300$	$250 < W \leq 300$
VII		$25 \leq X < 30$	$300 < H \leq 350$	$300 < W \leq 350$
VIII		$30 \leq X$	$350 < H \leq 400$	$350 < W \leq 400$
IX	老年树	—	$400 < H \leq 450$	$400 < W \leq 450$
X		—	$450 < H$	$450 < W$

1.2.4 种群动态量化分析 采用动态量化分析法定量描述侧柏种群结构^[29], 编制黄土丘陵区侧柏种群动态变化指数表(表 3)。计算表达式为:

$$V_n = \frac{S_n - S_{n+1}}{\max(S_n, S_{n+1})} \times 100\% \quad (5)$$

$$V_{pi} = \frac{1}{\sum_{n=1}^{k-1} S_n} \sum_{n=1}^{k-1} (S_n V_n) \quad (6)$$

$$V'_{pi} = \frac{\sum_{n=1}^{k-1} S_n V_n}{\min(S_1, S_2, S_3 \dots S_k) k \sum_{n=1}^{k-1} S_n} \quad (7)$$

$$P_{极大} = \frac{1}{k \min(S_1, S_2, S_3 \dots S_k)} \quad (8)$$

式中: V_n 为种群各径级个体数量的动态变化; V_{pi} 为忽略外界干扰的种群数量变化动态; V'_{pi} 为考虑未来的外界干扰的种群结构数量变化动态; $P_{极大}$ 为对种群动态 V_{pi} 影响最大^[9]; S_n 为各径级的个体数量; k 为总径级数, 分别将参数带入得到各个径级的动态量。

1.2.5 谱分析 谱分析被用于种群天然更新的研究, 更好地解释了对种群树龄更替的周期性和结构波动性, 谱分析通过 Fourier 级数进行估算, 具体估算参数为:

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t \quad (9)$$

$$A_k^2 = a_k^2 + b_k^2 \quad (10)$$

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{t} \quad (11)$$

$$\theta_k = \arctg\left(\frac{a_k^2}{b_k^2}\right) \quad (12)$$

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{t=2}^n X_t \cos \frac{2\pi k(t-1)}{n} \quad (13)$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{t=2}^n X_t \sin \frac{2\pi k(t-1)}{n} \quad (14)$$

式中: A_0 为周期变化平均值; t 为种群各龄分布(径级代替龄级); n 为种群龄级数; X_t 为 t 年龄序列的个体数; A_k 为谐波振幅($k = 1, 2, 3 \dots p, p = n/2$); ω_k 为谐波频; θ_k 为谐波相角; a_k, b_k 为参数估计值。

1.2.6 时间序列预测 采用一次移动平均法预测侧柏种群年龄结构, 本研究预测 2 至 7 个径级时间后的侧柏种群动态变化趋势。

$$M_t^{(1)} = \frac{1}{n} \sum_{k=t-n+1}^t X_k \quad (15)$$

式中: n 为需要预测的时间; t 为径级; X_k 为 k 径级的个体数量; $M_t^{(1)}$ 为经过未来 n 个径级后的数量。本研究预测 2, 3, 4, 5, 6, 7 径级时间内侧柏种群动态变化趋势。

2 结果与分析

2.1 侧柏种群结构特征

黄土丘陵区侧柏种群结构反映现阶段的侧柏种群状态。侧柏种群径级结构(图 1)可知, 侧柏个体所占总数的百分比随径级增加而呈阶梯状减少, I 级所占比例高达 27.79%, 侧柏种群的数量由 VI 级至 VII 级

急剧下降,Ⅷ仅占 0.5%;总体呈现出反 J 形,表现为增长型侧柏种群。高度级结构(图 1)可直观体现种群个体在垂直结构的地位。侧柏种群高度 I 级至 III 级总个体数比例在 45%以上,由图可看出 II 级个体数占 18.23%,该高度级数量占主导的作用,III—IV 级数量开始下降,IV—VI 级逐渐上升,VI—X 级逐渐下降,整体构成“凹”型曲线。由冠幅级结构(图 1)可知,第 VI 级比例最大,为 20.1%,X 级和 III 级占个体数相对较小,分别为 0.95%和 3.35%,冠幅级的整体变化趋势为中间高两边低,呈“凸”形曲线。

2.2 侧柏种群静态生命表

采用匀滑技术对各径级 A_x 修正处理得到 $a_x, a_x = 201.48e^{-0.363x}$ ($R^2 = 0.9262$)。由表 2 可得,侧柏种群的标准个体存活数(l_x)与径级成反比关系,各径级在生长过程中的标准死亡率(q_x)和消失率(K_x)数

表 2 黄土丘陵区侧柏种群静态生命表

Table 2 Static life table of *P. orientalis* populations in loess hilly region

径级	A_x	a_x	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	K_x	S_x
I	121	141	1 000	6.91	312	0.31	844	2493	2.49	0.37	0.69
II	88	97	688	6.55	206	0.30	585	1 649	2.40	0.36	0.48
III	71	70	482	6.18	149	0.31	408	1 064	2.21	0.37	0.33
IV	62	47	333	5.82	106	0.32	280	656	1.97	0.38	0.22
V	36	32	227	5.46	71	0.31	191	376	1.66	0.37	0.17
VI	28	22	156	5.09	50	0.32	131	184	1.18	0.38	0.11
VII	11	15	106	4.73	—	—	53	53	0.50	0.37	—

注: A_x 为存活数; a_x 为匀滑株数; l_x 为标准化存活数; $\ln l_x$ 为标准化存活对数; d_x 为死亡数; q_x 为死亡率; L_x 为平均存活数; T_x 为存活个体总数; e_x 为生命期望; K_x 为消失率; S_x 为存活率。

2.3 种群动态量化分析

黄土丘陵区侧柏种群的量化分析具体表现(表 3) $V_I - V_{VI}$ 范围全部大于 0,均呈现出“增长”的变化趋势,具体表现为: $V_{VI} > V_{IV} > V_I > V_V > V_{II} > V_{III}$ 。侧

值相近且变化趋势一致,期望寿命(e_x)与径级成反比关系,随着径级的增加而减小。

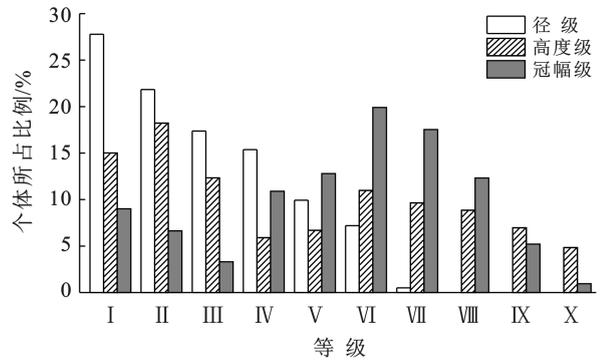


图 1 黄土丘陵侧柏种群等级划分

Fig.1 Division of population structure class of *P. orientalis* in loess hilly region

表 3 黄土丘陵区侧柏种群动态变化指数

Table 3 Dynamic indices of *P. orientalis* population in loess hilly region

V_I	V_{II}	V_{III}	V_{IV}	V_V	V_{VI}	V_{pi}	V'_{pi}	$P_{极大}$
27.27	19.32	12.68	41.94	22.22	60.71	27.09	0.35	0.013

注: V_n, V_{pi}, V'_{pi} 的值为正时种群呈增长,为负时呈衰退,为 0 时呈稳定; $P_{极大}$ 为对种群动态 V_{pi} 影响最大。

2.4 种群存活曲线

本研究所作侧柏种群存活曲线以径级为横坐标,以 $\ln l_x$ 为纵坐标(如图 2 所示)。根据 Deevey 的划分,存活曲线分为 3 种类型,I 型为凸曲线,该类型早期死亡率低,达到一定生理年龄时全部死亡;II 型为角线型,该类型的种群各龄级死亡率基本一致;III 型为凹曲线,该类型早期死亡率较高,活到某个年龄时死亡率降低,后期生理性死亡。侧柏种群存活曲线分别采用幂函数和

柏种群 $V_{pi} = 27.09 > V'_{pi} = 0.35, V_{pi} > V'_{pi} > 0$ 的种群结构稳定。

$P_{极大} = 0.013 > 0$ 该种群结构受外界干扰影响具有一定的敏感程度。

指数函数拟合回归曲线模型: $y = 7.4268e^{-0.063x}$ ($R^2 = 0.997$), $y = 7.2631x^{-0.188}$ ($R^2 = 0.8979$),结果表明(图 2),指数函数的 R^2 大于幂函数,表明指数函数拟合效果更佳。因此,可以认为侧柏种群的存活曲线接近于 Deevey-II 型^[9]。

2.5 生存分析

由生存率与死亡累计率曲线可知(图 3),随着黄土丘陵区侧柏种群径级(年龄)的增加生存率单调递

减,累计死亡率单调递增。侧柏种群在径级接近 II 级时出现交点,此时生存率与死亡率持平,呈现平衡状态,交点前生存率大于累计死亡率^[1],交点后生存率小于累计死亡率。由死亡密度与危险率曲线可得(图 4),种群死亡密度随着年龄的增加呈单调递减趋势,在第 V 级时最小为 0.01,整体变化幅度较小,且死亡密度不超过 0.20,侧柏种群的危险率整体呈“上升”趋势,且均低于 35%。结合以上分析,侧柏种群表现为前期具备一定的适应能力,中期稳定,后期衰退。

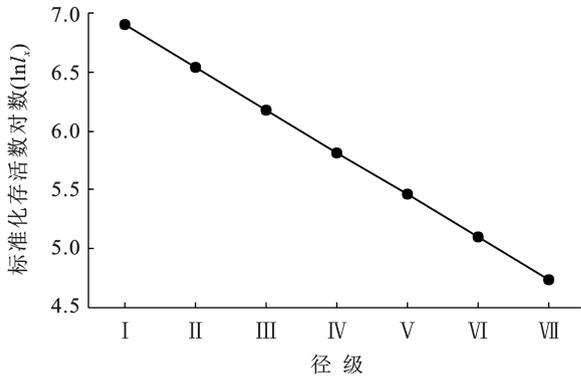


图 2 黄土丘陵区侧柏种群存活曲线

Fig.2 Survival curve of *P. orientalis* population in loess hilly region

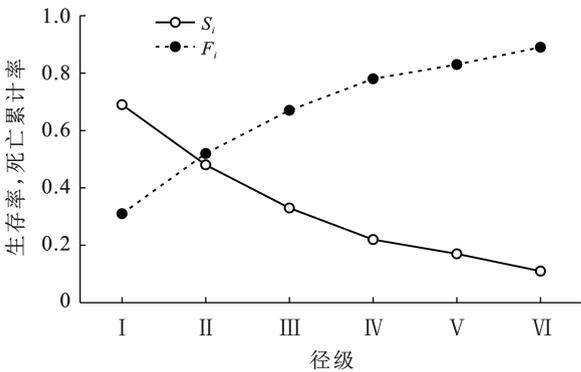


图 3 黄土丘陵区侧柏种群生存率与死亡累计率曲线

Fig.3 Survival rate and cumulative mortality curve of *P. orientalis* population in loess hilly region

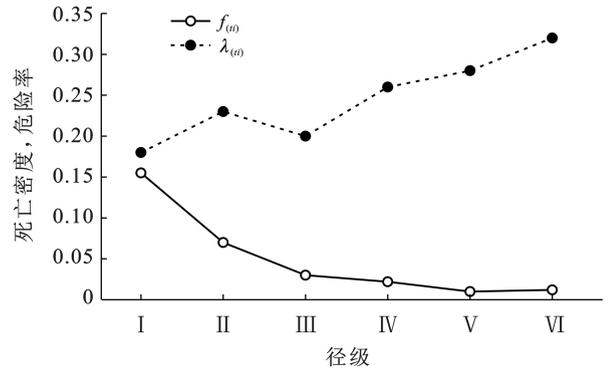


图 4 黄土丘陵区侧柏种群死亡密度与危险率曲线

Fig.4 Mortality density and risk rate curve of *P. orientalis* population in loess hilly region

2.6 谱分析

通过黄土丘陵区侧柏种群的谱分析(表 4)发现,基波 $A_1(0.5)$ 小于谐波 $A_2(1.29)$,说明种群的数量动态变化受到基波的影响。这种小周期的波动通常与种群的生长阶段有关,个体对资源的需求不同,发生他疏与自疏作用,从而导致死亡。谐波 A_2 是所有 A_k 数值中最大的,说明侧柏种群生长过程会受到该小周期波动的影响。

表 4 黄土丘陵区侧柏种群周期性波动

Table 4 Periodic fluctuation of *P. orientalis* population in loess hilly region

谐波	A_0	A_1	A_2	A_3
振幅值	3.91	0.5	1.29	1.28

2.7 时间序列模拟和预测

利用平均法预测侧柏种群在各径级的个体数。结果显示(表 5),在未来 2,3,4,5,6,7 龄级后,侧柏个体数整体趋于稳定,各个龄级均有不同幅度的增加趋势,其中第 VII 龄级的个体数在未来 7 个龄级时间显著增加,可达 49 株。侧柏种群的幼树丰富,使其具备良好的更新能力,随着时间的推移,未来的侧柏种群结构稳定增长。

表 5 黄土丘陵区侧柏种群数量动态时间序列预测

Table 5 The prediction number of *P. orientalis* population by using time sequence analysis in loess hilly region

径级	原始数据	$M_2^{(1)}$	$M_3^{(1)}$	$M_4^{(1)}$	$M_5^{(1)}$	$M_6^{(1)}$	$M_7^{(1)}$
I	121						
II	88	105					
III	71	80	93				
IV	62	67	74	86			
V	36	49	56	64	76		
VI	28	32	42	49	57	68	
VII	11	20	25	34	42	49	60

注: $M_n^{(1)}$ 为经过未来 n 个径级后的数量。

3 讨论

3.1 侧柏种群结构特征及生存分析

黄土丘陵区天然疏林侧柏种群结构能够反映其量化特征和发展趋势^[15,23]。径级和高度级表明种群的幼树数量丰富,使侧柏种群具备良好的更新能力。从野外调查可得知,侧柏种子喜沟谷、阴坡、半阴坡等湿润排水较好的环境生长,种子的萌发绝大多数取决于生境,生境的水、热、光是限制种子萌发的关键因素,从而限制幼树数量,黄土丘陵区侧柏种子质量大,多数脱落在母株附近,母株冠幅的遮挡作用,在一定程度上减少水分的蒸发,有利于种子的萌发,进而促进幼树的生长机会。侧柏种群数量呈金字塔形,且在种群量化分析的 $V_{pi} > 0$,两者均表明该种群属于增长型种群。该调查样地是典型的纯林特征,无其他树种竞争,侧柏在生长发育占据绝对的优势。种群结构稳定,但也存在对外界干扰的敏感度,同张金峰对种群量化分析一致^[10]。

种群的数量动态是生态学研究的核心内容^[2,4-5]。侧柏种群的静态生命表显示,侧柏种群的死亡率和消失率的变化趋势一致,波动小,同祁连圆柏研究相似^[25],说明受一定程度外界环境干扰种群仍相对稳定,这与研究区重视和保护得当有关。4个生存函数综合表明种群动态的前期生存能力强、中期生长稳定、后期生命枯竭导致衰退,与杨小平等人研究的野生樱桃李结果相似^[14],幼树经过环境的筛选进入下一阶段,其数量相对稳定,随后进入生理死亡年龄,说明幼树是种群发展的基础,幼树阶段是种群发展的重要阶段^[29-30]。由时间序列模拟和预测分析可知,侧柏种群个体同长白山红松林研究相似,均呈不同程度的增加趋势,时间序列模拟和预测种群未来呈增长型^[13]。

3.2 侧柏种群的适应性和保护

结合研究区环境条件来分析侧柏生物学特征,发现侧柏天然林结构稳定,天然侧柏种群生存适应能力强,既满足当前的自然更新也具有一定抗干扰作用,该侧柏种群的幼树数量相对较多,加强对天然林的保护和抚育是可持续发展的重要内容。在原地保护的基础上对苗木适当地疏伐,开展育苗繁育工作,降低幼树的死亡率,提高种群的生存率,结合原地保护工作,选取相近气候地点并人为种植,扩大种群的分布,缓解其生存空间及资源,以维持侧柏种群的发展和稳定。

4 结论

(1) 黄土丘陵区的天然侧柏种群结构稳定,幼树

资源丰富,存活曲线接近 Deevey- II 型,受外界干扰影响具有一定的敏感程度。

(2) 侧柏种群动态变化表现为前期幼树生存能力强,中期稳定生长,后期生命衰退,并在未来时间种群属于稳定增长趋势。

(3) 科学保护幼树,有助于侧柏种群的更新,实现森林草地高质量和可持续发展。

[参 考 文 献]

- [1] 王改兰,段建南,贾宁凤,等.长期施肥对黄土丘陵区土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2006,20(4):82-85.
- [2] 中科院中国植物志编委会.中国植物志(第7卷)[M].北京:科学出版社,2004.
- [3] Guo Zhongsheng. Forest restoration, resources sustainable use and high-quality sustainable management [J]. Global Journal OF Ecology 2023,8(1):7-10.
- [4] Guo Zhongsheng. Soil hydrology process and sustainable use of soil water resources in desert regions [J]. Water, 2021,13(17):2377.
- [5] 蒋涛,郑文革,余新晓,等.北京山区干旱胁迫下侧柏叶片水分吸收策略[J].生态学报,2022,42(4):1429-1440.
- [6] 李颖,董武,陈复兴,等.侧柏酮对人 $\gamma\delta T$ 细胞功能的影响[J].中国试验方剂学杂志,2014,20(23):107-110.
- [7] 聂泽旭,齐实,马曦瑶,等.华蓥市山区侧柏人工林土壤特性及水源涵养能力对林分密度的响应[J].地球与环境,2020,48(3):318-326.
- [8] 马丰丰,贾黎明.FVS 关键词解析及在侧柏人工林经营技术决策中的应用[J].中南林业科技大学学报,2011,31(1):18-26.
- [9] 杨喜田,董娜琳,闫东锋,等.不同培育时间侧柏种基盘苗根系生长和分布[J].生态学报,2011,31(19):5818-5823.
- [10] 章亮,谢祥琛,王奕然,等.侧柏茎段培养快速繁殖技术研究和黄帝手植柏克隆[J].西北林学院学报,2022,37(1):112-118.
- [11] 钟祥浩.中国山地生态安全屏障保护与建设[J].山地学报,2008,26(1):2-11.
- [12] 刘士余,左长清.水土保持与国家生态安全[J].中国水土保持科学,2004(1):102-105.
- [13] 张金峰,葛树森,梁金花,等.长白山阔叶红松林紫椴种群结构与动态特征[J].生态学报,2022,42(13):5381-5390.
- [14] 杨小平,周龙,蒋丽丽,等.野生樱桃李的种群统计与生存分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(2):154-160.
- [15] Mooney H A. Plant ecology: matters of numbers [J]. Science, 1978,199(4329):675-676.
- [16] 谢春平,邱靖,伊贤贵,等.南京城市近郊构树种群结构分析[J].云南农业大学学报(自然科学),2018,33(4):696-704.

(下转第 39 页)

- [3] 姚孝友,刘霞,张光灿.淮河流域坡耕地水土流失特点与综合整治模式[J].中国水土保持科学,2012,10(1):94-97.
- [4] Dotterweich M. The history of human-induced soil erosion: geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation: a global synopsis [J]. *Geomorphology*, 2013,201:1-34.
- [5] 乔冰洁,杨勤科,王春梅,等.梯田对侵蚀地形指标的影响:以黄土丘陵第2副区为例[J].水土保持研究,2023,30(4):184-193.
- [6] Chen Die, Wei Wei, Chen Liding. Effects of terracing practices on water erosion control in China: a meta-analysis [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017,173:109-121.
- [7] 李亚龙,张平仓,程冬兵,等.坡改梯对水源区坡面产汇流过程的影响研究综述[J].灌溉排水学报,2012,31(4):111-114.
- [8] 郭振勇.三峡库区不同类型梯田对降雨产流特征和垂直水文连通性的影响[D].湖北武汉:华中农业大学,2022.
- [9] 吴发启,张玉斌,宋娟丽,等.水平梯田环境效应的研究现状及其发展趋势[J].水土保持学报,2003,17(5):28-31.
- [10] 马正锐,孟祥江,何邦亮,等.三峡库区坡地果园生态治理措施研究进展[J].四川林业科技,2020(41):127-132.
- [11] Basic F, Kisic I, Mesic M, et al. Tillage and crop management effects on soil erosion in Central Croatia [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004,78:197-206.
- [12] 李进林,韦杰.三峡库区坡耕地埂坎类型、结构与利用状况[J].水土保持通报,2017,37(1):229-233,240.
- [13] Meng Xianmeng, Zhu Yan, Yin Maosheng, et al. The impact of land use and rainfall patterns on the soil loss of the hillslope [J]. *Scientific Reports*, 2021,11:16341.
- [14] 程冬兵.三峡库区等高绿篱坡地农业系统紫色土水分特性研究[D].湖北武汉:华中农业大学,2008.
- [15] 王棣,李永生,刘捷,等.太行山石灰岩区隔坡复式梯田及稳定性研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(4):66-70.
- [16] 杜旭,李顺彩,彭业轩.植物篱与石坎梯田改良坡耕地效益研究[J].亚热带水土保持,2012,24(3):26-28,35.
- [17] 于文堂.边坡岩土工程[M].辽宁沈阳:辽宁科学技术出版社,1996.1164.
- [18] 冯国栋.土力学[M].北京:中国水利水电出版社,1998.
- [19] 李国新.岩土的工程性质:岩土工程勘察设计手册[M].辽宁沈阳:辽宁科学技术出版社,1996.
- [20] 王贻荪.地基承载力:岩土工程勘察设计手册[M].辽宁沈阳:辽宁科学技术出版社,1996.
- [21] 广州铁路局工务处,柳州铁路局工务处.路基[M].北京:人民铁道出版社,1979.
- [22] 杨文渊.实用土木工程手册[M].北京:人民交通出版社,1985.

(上接第30页)

- [17] 范繁荣,潘标志,马祥庆,等.白桂木的种群结构和空间分布格局研究[J].林业科学研究,2008,21(2):176-181.
- [18] 董灵波,马榕,田栋元,等.大兴安岭天然林不同演替阶段共优势种种群结构与动态[J].应用生态学报,2022,33(8):2077-2087.
- [19] 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.
- [20] 张金峰,葛树森,梁金花,等.长白山阔叶红松林红松种群年龄结构与数量动态特征[J].植物生态学报,2022,46(6):667-677.
- [21] 王泳腾,黄治昊,王俊,等.燕山山脉黄檗种群结构与动态特征[J].生态学报,2021,41(7):2826-2834.
- [22] 张鲜花,朱进忠,吴咏梅.天山北坡羊茅草原群落结构与数量特征的动态变化[J].草地学报,2012,20(5):819-824.
- [23] 杨彪,张全建,龚旭,等.雅砻江冬麻豆(*Salweenia bouffordiana*)种群结构与动态特征[J].生态学报,2020,40(4):1184-1194.
- [24] 方精云,王襄平,沈泽昊,等.植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J].生物多样性,2009,17(6):533-548.
- [25] 刘建泉,杨建红.祁连圆柏种群结构和生活史分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(7):140-144.
- [26] 卢杰,郭其强,郑维列,等.藏东南高山松种群结构及动态特征[J].林业科学,2013,49(8):154-160.
- [27] 吴承祯,洪伟,谢金寿,等.珍稀濒危植物长苞铁杉种群生命表分析[J].应用生态学报,2000,11(3):333-336.
- [28] Deevey E S. Life tables for natural populations of animals [J]. *The Quarterly Review of Biology*, 1947,22(4):283-314.
- [29] 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,1998,18(2):104-107.
- [30] 张晓鹏,于立忠,杨晓燕,等.辽东山区天然更新红松幼苗种群结构与动态[J].应用生态学报,2022,33(2):289-296.