

乌兰布和沙漠天然梭梭种群动态及空间分布

张剑挥¹, 马全林¹, 李得禄¹, 袁宏波¹, 张元恺¹, 常 丽²

(1 甘肃省治沙研究所, 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站/甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室培育基地, 兰州 730070; 2 兰州城市学院 城市环境学院, 兰州 730070)

摘 要:为进一步明晰乌兰布和沙漠天然梭梭(*Haloxylon ammodendron*)种群动态和空间分布特征, 该研究以乌兰布和沙漠天然梭梭林为研究对象, 采用静态生命表、存活曲线、生存分析和空间分布格局指数等方法分析种群动态与内在生活史特征和外在干扰之间的互动关系, 探讨梭梭种群波动特征及其存续机制, 以揭示天然梭梭种群动态及空间分布特征, 为梭梭种群的合理保护与种群恢复提供依据。结果表明: (1) 乌兰布和沙漠天然梭梭种群龄级结构呈倒“J”形, 为增长型, 但相邻龄级个体数量波动性较大; 种群年龄结构数量变化动态指数 $V_{pi} = 17.43$, 受随机干扰时种群年龄结构动态指数 $V_{pi}' = 1.02$, 种群年龄结构对随机干扰的敏感性指数 $P_{max} = 5.88$, 说明种群对外界干扰较为敏感。 (2) 研究区天然梭梭种群的存活曲线趋于 Deevey-II 型, 各年龄级种群有相近的死亡率; 生存函数、累积死亡率、死亡密度在第 I ~ X 龄级(基径 ≤ 10 cm)变化较大, 且在第 I ~ IX 龄级危险率较高; 生存函数、累计死亡率、死亡密度在第 XI ~ XIII 龄级(基径 ≥ 10 cm)趋于稳定, 危险率在第 X 龄级后逐渐增加, 种群动态呈现出低龄级间个体数量波动大, 高龄级衰退的特征。 (3) 研究区天然梭梭种群密度在 $328.57 \sim 942.86$ 株/ km^2 之间, 平均为 706.34 株/ km^2 , 种群空间分布大多呈聚集分布。研究表明, 乌兰布和沙漠在现阶段环境气候条件下, 适宜梭梭种群的生长, 而且在不受人干扰的情况下, 梭梭种群能够稳定存续, 可以抵抗一定的气候风险。建议减轻人为干扰对低龄级种群数量的影响, 在局部梭梭林衰退严重区可参考天然梭梭种群密度与空间分布型建植人工梭梭林。

关键词:天然梭梭林; 静态生命表; 存活曲线; 生存分析; 空间分布

中图分类号: Q948

文献标志码: A

Dynamic State and Spatial Distribution of Natural *Haloxylon ammodendron* in Ulan Buhe Desert

ZHANG Jianhui¹, MA Quanlin¹, LI Delu¹, YUAN Hongbo¹, ZHANG Yuankai¹, CHANG Li²

(1 Gansu Minqin National Station of Desertification Pasture Ecology System Research/State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China; 2 College of Urban Environment, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: This study aimed to further clarify the population dynamics and spatial distribution characteristics of the natural *Haloxylon ammodendron* populations in Ulan Buhe deserts. Taking the natural *H. ammodendron* forests in Ulan Buhe deserts as the study object, this study analyzed the interactions between population dynamics and the inherent life history characteristics as well as external disturbance, and explored the fluctuation characteristics and survival mechanism of *H. ammodendron* population. Methods such as static life tables, survival curves, survival analysis, and spatial pattern indices are used. This study would reveal the population dynamics and spatial distribution characteristics of the species, and provide a

收稿日期: 2023-02-03; 修改稿收到日期: 2023-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(31760125, 31960334); 兰州城市学院博士科研启动基金项目(LZCU-BS2020-05)

作者简介: 张剑挥(1984-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事荒漠生态与荒漠化防治研究。E-mail: zhangjh84@163.com

scientific reference for the rational protection and population restoration of the species. The results showed that: (1) The age structure of *Haloxylon ammodendron* population in Ulan Buhe desert was inverted J-shaped, taking an increasing trend. Whereas there was a big fluctuation of individuals quantities among neighboring ages. The dynamic index of population age structure was $V_{pi} = 17.43$, the dynamic index of population age structure under stochastic disturbance was $V_{pi}' = 1.02$, the sensitivity index of population age structure to stochastic disturbance was $P_{max} = 5.88$, which indicated the population was sensitive to external disturbance. (2) The survival curve of *H. ammodendron* in the study area tended to Deevey-II, the mortality of population with different ages were approximate. The survival function, cumulative mortality and mortality density changed significantly in the I-X age class (base diameter < 10 cm), with high risk rate in the I-IX age classes. Whereas the survival function, cumulative mortality, and mortality density tended to be stable in the XI-III age classes (base diameter ≥ 10 cm), and the risk rate gradually increased after the X age class. The population dynamic was characterized by big fluctuation of individuals in the young-age population, and decaying of individuals in old-age population. (3) The population density of *H. ammodendron* in the study area was ranged between 328.57–942.86 individuals/km², with 706.34 km² averagely, and spatially the population was distributed in cluster. The study showed that at present environmental conditions, Ulan Buhe desert was adaptable for the growing of *H. ammodendron* population. Provided there was no human disturbance, *H. ammodendron* population could sustain stably, and resist certain climate risks. It was suggested to eliminate human's disturbance on the young class population, and to construct artificial *Haloxylon ammodendron* forest following above-mentioned population density and spatial distribution pattern in the areas where *Haloxylon ammodendron* severely declined.

Key words: natural *Haloxylon ammodendron* forest; static life table; survival curve; survival analysis; spatial distribution

植物种群动态及空间分布是植物种群生态学研究的核心内容之一^[1-2],主要研究植物种群数量在时间和空间上的变化规律和种群动态调节机理等^[3-4]。研究植物种群结构与动态可以客观反映植物种群历史动态及现状,并对未来演变趋势做出预测与估计^[5-6],进而分析该种群的稳定性及其生境适合度^[7]。特别是针对建群种的种群动态及空间分布特征研究,有助于了解其构建的群落与环境之间的关系及其未来演变趋势。对区域植被恢复及特定植物种群的保护与管理具有重要的指导意义^[8]。

梭梭(*Haloxylon ammodendron*)是藜科灌木或小乔木,具有抗旱、耐高温和耐风蚀等生物学特性,是干旱荒漠区分布最广泛的天然植被类型之一^[9]。应用人工梭梭林进行荒漠区植被恢复在中国被大面积推广,但是由于人工梭梭种群的建设不合理,导致部分人工梭梭种群出现生长缓慢、天然更新困难的瓶颈问题^[10]。

另外,乌兰布和沙漠是中国第八大沙漠,是中国西北地区沙尘暴的策源地之一。天然梭梭林是乌兰布和沙漠最主要的防风固沙林^[11],对区域生态安全起着重要的生态屏障功能。然而由于人为过度放牧、樵采等干扰对乌兰布和沙漠梭梭种群的生存与发展产生了一定的威胁^[12],导致局部地区天然梭梭

林面积萎缩与衰退^[10,13]。

那么乌兰布和沙漠天然梭梭种群在现有环境条件下能否可持续发展?且大面积人工梭梭林建设在考虑生境适合度的同时如何参考天然梭梭种群合理建植?鉴于此,有必要对乌兰布和沙漠天然梭梭种群动态及空间分布特征进行研究,从而明晰乌兰布和沙漠天然梭梭种群的生存现状与发展趋势,同时为人工梭梭种群建设提供参考。目前有关梭梭的研究主要集中在种子萌发^[14-15]、生理生态特性^[16-17]、光合特性^[18-19]、生态功能^[20]及群落多样性^[21-22]等方面。其中蔡新斌等^[23]、闫涵等^[24]对甘家湖自然保护区内的梭梭、白梭梭种群年龄结构动态与空间分布做了相关研究,但是梭梭种群的存活曲线类型相关结论不一致,且针对乌兰布和沙漠天然梭梭林种群动态及空间分布特征的研究相对较少。

因此,为进一步明晰天然梭梭种群动态和空间分布特征,文章以乌兰布和沙漠天然梭梭林为对象,采用静态生命表、存活曲线、生存分析和空间分布格局指数等方法研究了乌兰布和沙漠天然梭梭种群动态及空间分布特征,旨在揭示天然梭梭种群特征,分析种群动态与内在的生活史特征和外在的干扰之间的互动关系,探讨梭梭种群波动特征及其存续机制,以为梭梭种群的合理保护与种群恢复提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠天然梭梭林区,地理坐标(39°16′—40°57′N,106°09′—106°57′E)。海拔1 030~1 474 m,年降水量 107.9 mm,年潜在蒸发量 2 141.7 mm,年平均气温 8.6 °C,属于温带大陆性干旱气候类型。地下水埋深一般为 1.5~3 m,局部区域因地形或超采地下水埋深较,最深达 18 m^[10]。

地带性土壤类型有风沙土、灰漠土、灰棕漠土、漠境盐土。地带性植被有梭梭、白刺(*Nitraria tangutorum* Bobrov)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、盐爪爪 [*Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.]、黑沙蒿(*Artemisia ordosica* Krasch)、沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng. Syst. Veg.)等。

1.2 样地设置与调查方法

在对乌兰布和沙漠天然梭梭林踏查的基础上,选择典型区域设置 A1、A2、…、A9 共 9 块样地(图 1)。每块样地沿垂直主风向布设 1 条 70 m 样线,在样线两侧间隔 10 m 交替布设 7 块 10 m×10 m 的调查样方,记录样方内每种灌木个体数、盖度、基径、高度、冠幅等指标。在每个样方内随机设置 3 个 1 m×1 m 的草本样方,调查草本植物种类、数量、盖度、高度等指标。

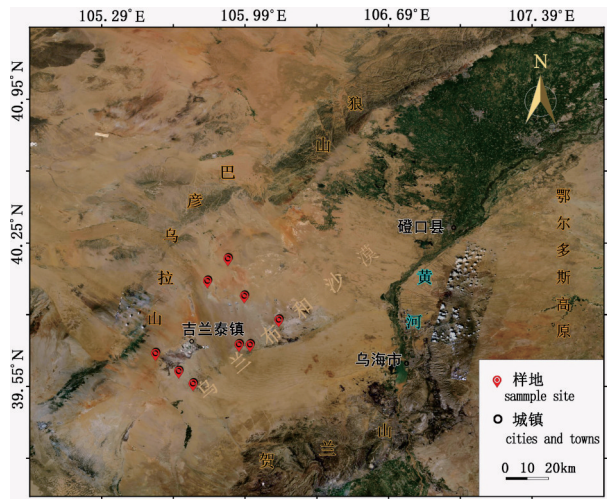


图 1 研究区位置示意图
Fig. 1 Location of study area

1.3 龄级划分及种群动态量化方法

虽然梭梭种群的龄级和径级有所不同^[25],但在同一环境条件下,同一树种的径级在时间上对环境的反应规律具有一致性^[26],因此大多数学者还是采用径级结构代替年龄结构^[7]。

本文根据王伟等^[27]、李钢铁等^[28]对乌兰布和沙漠梭梭径级与龄级关系的研究成果,结合实际调查情况,采用基径(BD)结构代替年龄结构。按照每间隔 1 cm 为 1 级划分,即 BD<1.0 cm,为第 I 龄级;1.0 cm≤BD<2.0 cm,为第 II 龄级;以此类推,17.0 cm≤BD,为第 VIII 龄级,共 18 级。以龄级作为横坐标,以各龄级的株数作为纵坐标,绘制天然梭梭种群龄级结构图。

为定量描述乌兰布和沙漠天然梭梭种群动态特征,种群动态量化方法采用陈晓德^[29]的方法。公式如下:

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

$$V_{pi} = \frac{1}{\sum_{n=1}^{K-1} S_n} \sum_{n=1}^{K-1} (S_n \times V_n) \tag{2}$$

$$V_{pi}' = \frac{\sum_{n=1}^{K-1} (S_n \times V_n)}{K_{\min}(S_1, S_2, S_3, \dots, S_k) \sum_{n=1}^{K-1} S_n} \tag{3}$$

$$P_{\max} = \frac{1}{K_{\min}(S_1, S_2, S_3, \dots, S_k)} \tag{4}$$

式中: V_n 表示从其 n 到 $n+1$ 龄级间的个体数量变化动态, $-1 \leq V_n \leq 1$, V_n 取正、负、0 值时分别反映出种群两相邻年龄级个体数量的增长、衰退、稳定的结构动态关系; V_{pi} 为整个种群年龄结构的数量变化动态指数; V_{pi}' 为考虑未来外部环境干扰的整个种群年龄结构的数量变化动态指数, V_{pi} 、 V_{pi}' 取正、负、0 值意义与 V_n 一致。 $P_{\max}$ 为种群在外部环境干扰下承担的风险概率。

1.4 静态生命表的编制及种群生存分析方法

静态生命表的编制参考吴承祯等^[30]的方法,龄级划分同 1.3 节。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^[31]对种群个体的存活数据进行处理, x 龄级现有存活数 a_x 经过匀滑修正处理后可以得到 a_x^* 值。以标准存活量的对数值 $\ln l_x$ 为纵坐标,以龄级为横坐标绘制梭梭种群存活曲线。

分别采用指数函数 $N_x = N_0 e^{-bx}$ 和幂函数 $N_x = N_0 x^{-b}$ 模型检验天然梭梭种群的存活曲线类型^[30]。

生存分析参考杨凤翔等^[32]的方法,计算乌兰布和沙漠梭梭种群生存率 $S(i)$ 、累计死亡率 $F(i)$ 、死亡密度 $f(t_i)$ 、危险率 $\lambda(t_i)$ 并绘制生存率、累计死亡率、死亡密度和危险率曲线。公式如下:

$$S(i) = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_i \tag{5}$$

$$F(i) = 1 - S(i) \tag{6}$$

$$f(t_i)=[S(i-1)-S(i)]/h_i \tag{7}$$

$$\lambda(t_i)=2(1-S_i)/[h_i(1+S_i)] \tag{8}$$

式中: S_i 为存活率; h_i 为龄级宽度; t_i 为第 i 龄级。

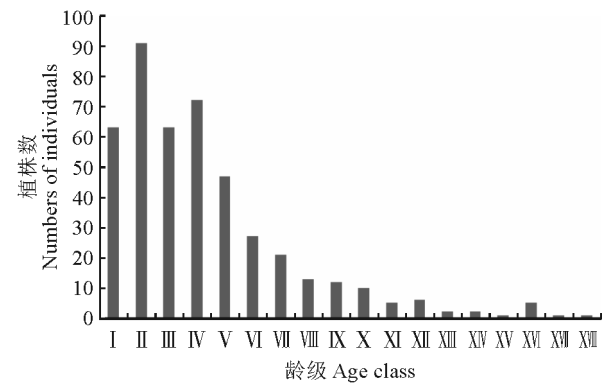
1.5 种群空间分布分析方法

结合梭梭种群的自身特点与研究目的,对天然梭梭种群空间分布类型与格局强度进行了多指数分析。分布类型的判定采用方差/均值比率法,即在 Poisson 分布的预期假设上,根据偏离 Poisson 分布的大小确定分布类型。为了检验分布格局偏离泊松分布的显著性,采用 t 进行显著性检验。在格局强度上,采用了丛生指数(I)、负二项式参数(K)、平均拥挤度指数(m)、聚块性指标(m')、Cassie 指数进行测定^[33],通过指数大小判定聚集强度大小。

2 结果与分析

2.1 梭梭种群年龄结构及动态

乌兰布和沙漠天然梭梭林年龄结构为增长型(倒 J 形)(图 2)。



I ~ XVIII 分别表示梭梭基径, I . 基径<1.0 cm; II . 1 cm≤基径<2 cm; III . 2 cm≤基径<3 cm; IV . 3 cm≤基径<4 cm; V . 4 cm≤基径<5 cm; VI . 5 cm≤基径<6 cm; VII . 6 cm≤基径<7 cm; VIII . 7 cm≤基径<8 cm; IX . 8 cm≤基径<9 cm; X . 9 cm≤基径<10 cm; XI . 10 cm≤基径<11 cm; XII . 11 cm≤基径<12 cm; XIII . 12 cm≤基径<13 cm; XIV . 13 cm≤基径<14 cm; XV . 14 cm≤基径<15 cm; XVI . 15 cm≤基径<16 cm; XVII . 16 cm≤基径<17 cm; XVIII . 17.0 cm≤基径。

图 2 梭梭种群年龄结构

I - XVIII denotes the base diameters(BD) of *H. ammodendron*, respectively, I . BD<1 cm; II . 1 cm≤BD<2 cm; III . 2 cm≤BD<3 cm; IV . 3 cm≤BD<4 cm; V . 4 cm≤BD<5 cm; VI . 5 cm≤BD<6 cm; VII . 6 cm≤BD<7 cm; VIII . 7 cm≤BD<8 cm; IX . 8 cm≤BD<9 cm; X . 9 cm≤BD<10 cm; XI . 10 cm≤BD<11 cm; XII . 11 cm≤BD<12 cm; XIII . 12 cm≤BD<13 cm; XIV . 13 cm≤BD<14 cm; XV . 14 cm≤BD<15 cm; XVI . 15 cm≤BD<16 cm; XVII . 16 cm≤BD<17 cm; XVIII . 17.0 cm≤BD.

Fig. 2 Size class structure of *H. ammodendron* population

其中 I ~ VII 龄级个体数量占种群总个体数量的 86.88%; VIII ~ X 为 7.92%; XI ~ XVIII 龄级仅占 5.20%。I、III 龄级个体数量分别少于 II、IV 龄级的个体数量。根据种群动态量化方法分析天然梭梭种群相邻龄级个体数量变化,以对种群动态进行更加客观的精确评价。种群数量动态变化(表 1)显示,相邻龄级间个体数量变化动态指数变化较大,特别是第 I ~ IV 龄级、第 X ~ XVIII 龄级,说明相邻龄级个体数量波动性较大。在不考虑外界环境干扰时,天然梭梭种群结构动态指数 $V_{pi}=17.43>0$,受随机干扰时的种群年龄结构动态指数 $V_{pi}'=1.02>0$,下降明显。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 $P_{max}=5.88$ 。说明乌兰布和沙漠天然梭梭种群为增长型,考虑随机干扰时,种群结构增长性低,对外界干扰较为敏感。

表 1 梭梭种群动态变化指数

Table 1 Dynamic indices of <i>H. ammodendron</i> population		
龄级 Age class	种群动态指数 Dynamic index	动态指数值 Dynamic index value/%
I	V_1	-44.44
II	V_2	44.44
III	V_3	-12.50
IV	V_4	34.72
V	V_5	42.55
VI	V_6	22.22
VII	V_7	38.10
VIII	V_8	7.69
IX	V_9	16.67
X	V_{10}	50.00
XI	V_{11}	-16.67
XII	V_{12}	66.67
XIII	V_{13}	0
XIV	V_{14}	-33.33
XV	V_{15}	-40.00
XVI	V_{16}	80.00
XVII	V_{17}	0
	V_{pi}	17.43
	V_{pi}'	1.02
	P_{max}	5.88

注: V_1 - V_{17} . 相邻龄级数量动态变化指数; V_{pi} . 种群数量动态变化指数; V_{pi}' . 受外界干扰时种群数量动态变化指数; P_{max} . 随机干扰风险概率极大值。

Note: V_1 - V_{17} . Quantitative dynamics index of adjacent age class; V_{pi} . Quantitative dynamics index of population; V_{pi}' . Quantitative dynamics index of population by external interference; P_{max} . The maximum of probability in random disturbance

2.2 梭梭种群静态生命表及存活曲线

静态生命表是用特定时间段抽样调查种群个体数量编制而成。利用特定时间断面上异龄林个体数量分析种群年龄结构及动态,存在系统抽样误差,在编制静态生命表时通常会采用匀滑技术^[31]。

从静态生命表(表 2)可以看出:乌兰布和沙漠天然梭梭种群随年龄增加,梭梭匀滑处理后的存活数(a_x^*)和标准化存活数(l_x)逐渐减少;个体的生命期望值 e_x 在 I 级最大,随后逐渐降低,在Ⅷ~Ⅹ出现增加趋势,Ⅹ级达到第二个高峰,又逐渐降低。

以标准存活量的对数值 $\ln l_x$ 为纵坐标,以龄级为横坐标作图(图 3)。根据 Hett 和 Loucks 的检验估算模型,指数方程式 $N_x = N_0 e^{-bx}$ 描述 Deevey-Ⅱ型存活曲线,幂函数式 $N_x = N_0 x^{-b}$ 描述 Deevey-Ⅲ型存活曲线,检验乌兰布和沙漠梭梭种群的存活曲线类型。

存活曲线模型拟合结果显示,指数函数的 F 值及相关系数均大于幂函数的 F 值及相关系数(表 3)。因此,乌兰布和沙漠天然梭梭种群存活曲线更趋向于 Deevey-Ⅱ型(对角线型),各年龄级种群有相近的死亡率。

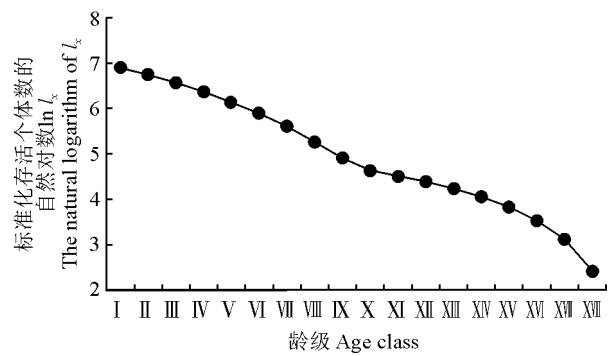


图 3 梭梭种群存活曲线

Fig. 3 Survival curve of *H. ammodendron* population

表 2 乌兰布和沙漠天然梭梭林种群静态生命表

Table 2 Static life table of *Haloxylon ammodendron* population

龄级 Age class	基径 Basal diameter /mm	a_x	a_x^*	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	K_x	S_x
I	0~10	63	87	1 000	6.908	149	0.149	925	4 609	4.609	0.162	0.851
II	10~20	91	74	851	6.746	138	0.162	782	3 684	4.331	0.177	0.838
III	20~30	63	62	713	6.569	126	0.177	649	2 902	4.073	0.195	0.823
IV	30~40	72	51	586	6.374	115	0.196	529	2 253	3.843	0.218	0.804
V	40~50	47	41	471	6.155	103	0.220	420	1 724	3.659	0.248	0.780
VI	50~60	27	32	368	5.908	92	0.250	322	1 305	3.547	0.288	0.750
VII	60~70	21	24	276	5.620	80	0.292	236	983	3.563	0.345	0.708
VIII	70~80	13	17	195	5.275	57	0.294	167	747	3.824	0.348	0.706
IX	80~90	12	12	138	4.927	34	0.250	121	580	4.208	0.288	0.750
X	90~100	10	9	103	4.639	11	0.111	98	460	4.444	0.118	0.889
XI	100~110	5	8	92	4.521	11	0.125	86	362	3.938	0.134	0.875
XII	110~120	6	7	80	4.388	11	0.143	75	276	3.429	0.154	0.857
XIII	120~130	2	6	69	4.234	11	0.167	63	201	2.917	0.182	0.833
XIV	130~140	2	5	57	4.051	11	0.200	52	138	2.400	0.223	0.800
XV	140~50	1	4	46	3.828	11	0.250	40	86	1.875	0.288	0.750
XVI	150~160	5	3	34	3.540	11	0.333	29	46	1.333	0.405	0.667
XVII	160~170	1	2	23	3.135	11	0.500	17	17	0.750	0.693	0.500
XVIII	>170	1	1	11	2.442	11	1.000	6	6	0.500	2.442	—

注: a_x . x 龄级内树木现存个体数; a_x^* . 匀滑处理后的存活数; l_x . 标准化存活个体数; $\ln l_x$. 标准化存活个体数的自然对数; d_x . 相邻龄级间隔期内树木标准化死亡数; q_x . 相邻龄级间隔期内树木死亡率; L_x . 从 x 进入 $x+1$ 龄级间隔期间还存活的树木个体数; T_x . x 龄级到超过 x 龄级的树木个体总数; e_x . 进入 x 龄级后树木个体的生命期望; K_x . 消失率; S_x . 存活率。

Note: a_x . Individual number of age class x ; a_x^* . The correction value of a_x ; l_x . Standardized survivors number; $\ln l_x$. The natural logarithm of l_x ; d_x . The standardized number of death individuals from age class x to age class $x+1$; q_x . Mortality from age class x to age class $x+1$; L_x . The number of surviving individuals from age class x to age class $x+1$; T_x . The total individuals number of age class x and age class elder than x ; e_x . Life expectancy of individuals in the age class x ; K_x . Vanish rate; S_x . Survival rate.

表 3 存活曲线拟合模型
Table 3 Survival curve fitting model

存活曲线 Survival curve	拟合模型 Fitting model	拟合结果 Fitting result	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>R</i> ²
Deevey-II	$N_x = N_0 e^{-bx}$	$N_x = 7.856e^{-0.052x}$	262.590	<0.01	0.943
Deevey-III	$N_x = N_0 x^{-b}$	$N_x = 8.921x^{-0.309}$	45.681	<0.01	0.741

2.3 梭梭种群生存分析

乌兰布和沙漠天然梭梭种群的生存率随龄级增大而逐渐降低(图 4),在 I ~ X 龄级种群生存率和累计死亡率变化较大,XI ~ XIII 龄级生存率和累计死亡率趋于稳定(图 5)。

乌兰布和沙漠天然梭梭死亡密度在 I ~ X 龄级变化较大(图 5),之后趋于稳定。危险率出现一定的波动,在 I ~ VIII 龄级递增,IX 龄级有所下降,但是在 I ~ IX 龄级危险率较高,到 X 级最低点后随龄级增加逐渐递增。

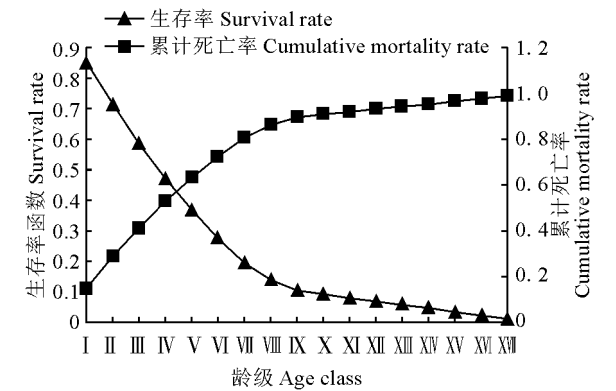


图 4 梭梭种群生存率函数 $S(i)$ 和累计死亡率 $F(i)$ 函数曲线
Fig. 4 Survival rate $S(i)$ and cumulative mortality rate $F(i)$ functional curve of *H. ammodendron* population

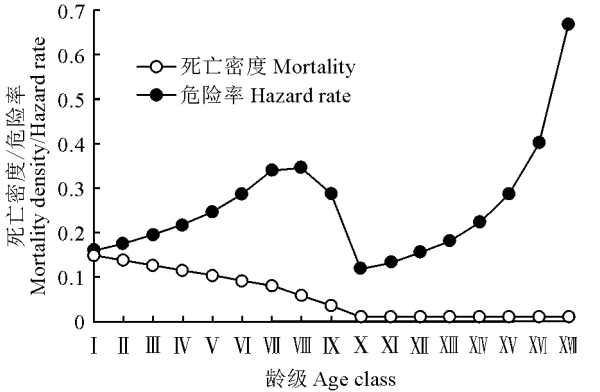


图 5 梭梭种群死亡密度 $f(t_i)$ 和危险率 $\lambda(t_i)$ 曲线
Fig. 5 Mortality density $f(t_i)$ and hazard rate $\lambda(t_i)$ functional curves of *H. ammodendron* population

2.4 梭梭种群密度及分布格局

对各样地梭梭种群进行统计分析(表 4),梭梭密度在 328.57 ~ 942.86 株/km² 之间。达到 800 株/km² 以上的样地占了 5 个,接近全部调查样地的 67%。采用方差/均值比率法对乌兰布和沙漠天然梭梭种群分布类型进行判定(表 4)。9 块调查样地中,有 6 块样地方差/均值的比率大于 1,3 块样地方差/均值的比率小于 1。再通过丛生指数(I)、负二项式参数(K)、平均拥挤度指数(m)、聚块性指标(m')、Cassie 指数等指标进行分析,各指标结论一致。

表 4 各样地梭梭种群密度与分布格局
Table 4 Population density & spatial distribution of *Haloxylon ammodendron* in sample plots

样地号 Plot number	密度 Density /(株数/km ²)	方差/均值 Standard variance average ratio	<i>t</i> 检验 <i>t</i> test	负二项式参数 Negative binomial parameter	平均 拥挤度 Mean crowding	聚块性 指标 Patch index	丛生指数 Clumping index	Cassie 指数 Cassie index	分布格局 Distribution pattern
A1	557.14	10.656 6	16.725 7	0.488 2	14.370 9	3.048 4	9.656 6	2.048 4	C
A2	857.14	0.694 4	-0.529 2	-28.051 9	8.265 9	0.964 4	-0.305 6	-0.035 6	U
A3	857.14	1.511 1	0.885 3	16.770 2	9.082 5	1.059 6	0.511 1	0.059 6	C
A4	328.57	0.681 2	-0.552 2	-10.305 2	2.966 9	0.903 0	-0.318 8	-0.097 0	U
A5	928.57	0.779 5	-0.381 9	-42.109 6	9.065 2	0.976 3	-0.220 5	-0.023 7	U
A6	614.28	1.162 8	0.282 0	37.734 7	6.305 6	1.026 5	0.162 8	0.026 5	C
A7	800.00	1.666 7	1.154 7	12.000 0	8.666 7	1.083 3	0.666 7	0.083 3	C
A8	942.86	4.520 2	6.097 2	2.678 4	12.948 8	1.373 4	3.520 2	0.373 4	C
A9	471.43	10.656 6	16.725 7	0.488 2	14.370 9	3.048 4	9.656 6	2.048 4	C

注:C. 聚集分布;U. 均匀分布。
Note:C. Clump; U. Uniform.

即 67% 的样地梭梭种群呈聚集分布, 33% 的样地呈均匀分布。格局强度是表征种群斑块与斑块间隙的密度差异程度。通过对丛生指数 (I)、负二项式参数 (K)、聚块性指标 (m')、Cassie 指数等指标分析, 从聚集强度来看, 样地 A1、A8、A9 负二项参数 K 值小于 8, 聚集强度相对较高, A3、A6、A7 负二项参数 K 值大于 8, 梭梭种群接近 Poisson 分布, 聚集强度相对较低。其他指数也印证了这一结论。

对 9 块样地的种群密度与方差/均值确定的空间分布型之间进行相关性分析, 相关系数 $r = -0.050$, P 值 ($\text{Sig.} = 0.898$) > 0.05 , 表明没有明显的相关关系。

3 讨 论

3.1 天然梭梭种群的结构特征

植物种群径级结构能很好地反映种群动态变化和发展趋势^[34-35], 而且也反映了种群与环境之间的适合度^[7]。一般认为年龄结构呈倒 J 形的种群更新良好^[36], 即种群幼龄林个体数量较多。本研究中乌兰布和沙漠天然梭梭种群年龄结构呈倒 J 形, 且梭梭种群数量动态指数 V_{pi} 和 V_{pi}' 均大于 0, 因此该梭梭种群属于增长型种群, 这与孙利鹏等^[37]的研究结果一致。说明乌兰布和沙漠的生境条件适合梭梭种群的生存, 并且在当前环境条件下种群有扩张潜力。乌兰布和沙漠地下水位较浅^[11], 使得梭梭种群具备数量相对丰富的低龄级个体, 但是不容忽视的是不同龄级梭梭个体数量有较大幅度波动, 这与干旱荒漠区气候特点有关, 赵文智等^[38]研究认为干旱荒漠区降水事件通常以脉动形式发生, 降水发生时间、持续时间以及降水强度均不稳定。降水的间断性和不可预知性导致土壤水分、养分等关键资源的获得也不稳定。关键资源的脉动对个体、种群都有较大影响, 主要表现在对梭梭幼苗个体数量有较大的影响^[10], 导致不同龄级梭梭个体数量出现一定的波动。因此, 只有减轻人为干扰(过度放牧、樵采)对不同龄级梭梭个体数量的影响, 才能保证不同龄级有足够个体数量进入下一龄级, 从而降低梭梭种群因抵抗不稳定环境维持种群存续的生存风险。

3.2 天然梭梭种群动态趋势

生命表是判断植物种群发展趋势的重要指标之一, 对植物种群的生命表和存活曲线的分析可以反映种群现实状况, 展现植物种群与环境的互作关系, 对植物种群的保护和利用具有重要意义^[39]。静态生命表分析表明乌兰布和沙漠天然梭梭种群随年龄

增加, 个体的生命期望值 e_x 在 I 级最大, 随后逐渐降低, 在 X 级达到第二个高峰。这主要是由于不同龄级种群数量波动造成的。种群存活曲线为 Devey- II 型, 即种群死亡率在各个发育阶段大致相等, 这与解婷婷等^[7]对荒漠灌木沙拐枣种群死亡率研究结果一致。分析原因可能是与梭梭个体受到环境阻力和人为干扰有关。梭梭种群低龄期 I ~ VII 个体数量较为丰富, 但个体比较脆弱, 环境阻力(不稳定的降水、土壤养分等)与过度放牧叠加造成个体死亡率较高。只有一部分进入到 VIII ~ X 龄期, 此阶段由于过度放牧、樵采、鼠害等等因素综合影响^[11], 从而导致死亡率较高。而在 XI ~ XIII 龄期, 随着梭梭年龄的增长, 个体进入衰老阶段, 抗性及其适应环境的能力随之减弱, 且与人为樵采叠加, 从而导致种群死亡率较高。生存函数、累计死亡率、死亡密度、危险率也基本印证了这一点。在第 I ~ X 龄级(基径 < 10 cm)变化较大, 且在第 I ~ IX 龄级危险率较高。生存函数、累计死亡率、死亡密度在第 XI 龄级(基径 ≥ 10 cm)以后趋于稳定, 危险率在第 X 龄级后逐渐增加。

3.3 天然梭梭种群密度及分布格局

种群密度、种群空间分布是种群生物学特性与环境相互作用的结果^[40], 是对种群个体在水平空间上的配置和分布状态做出的定量描述^[41]。不同分布型指数反映的种群分布特征侧重点不同, 几种指数综合分析能从多侧面反映种群空间格局的相关信息。自然界中聚集分布格局比较普遍, 聚集分布是植物种群最普遍的分布形式, 这是植物种群生长、存活以及竞争等适应环境异质性的结果, 由于植物种子散布不充分、环境因素的异质性和种群生殖过程特性等, 使得种群个体最终形成不同程度的聚集分布。一定程度的群居有利于种群生存和发展, 过疏和过密则对种群有限制作用^[42]。乌兰布和沙漠天然梭梭种群密度在 $328.57 \sim 942.86$ 株/ km^2 之间, 平均为 706.34 株/ km^2 。种群空间分布多数样地呈聚集分布。这与许多学者对荒漠灌木林的分布格局研究结论^[43-44]相一致, 即种群在生长、存活以及竞争过程中受环境异质性影响而导致个体趋向于聚集分布。但是少量样地呈均匀分布。这与乌兰布和沙漠土壤质地、局部环境的异质性以及梭梭种群的繁殖特性有关。乌兰布和沙漠天然梭梭林地大多为风沙土, 地表风活动较强烈, 梭梭种子掉落地表后会受到地表风沙活动的影响。种群密度与空间分布型之间没有明显的相关关系。明确天然梭梭种群密度与

种群空间分布型可为天然梭梭林的保护和人工梭梭林的建设提供参考。

3.4 乌兰布和沙漠梭梭种群的保护策略

整体来看,乌兰布和沙漠现阶段环境气候条件适宜梭梭种群的生长,在不受人为严重干扰情况下梭梭种群能够稳定存续,且可以抵抗一定的气候风险。但是如果放牧、樵采等人为活动加强,这会与环境风险叠加,对梭梭幼龄个体数量产生较大影响。最终导致不同龄级的梭梭个体数量波动加剧甚至部分龄级断层,增加梭梭种群衰退风险。因此,应科学制定管护措施,减轻人为活动对低龄级梭梭种群个体数量的影响,对于基径大于 17 cm 的老龄林梭梭植株也可以适度樵采。同时,在局部梭梭林衰退严重地区可以适当建植人工梭梭林,人工梭梭林密度与空间分布可参考天然梭梭种群密度与空间分布特征。

4 结 论

(1)乌兰布和沙漠天然梭梭林为增长型种群,且

更新良好,但是对外界干扰较为敏感。乌兰布和沙漠在现阶段环境气候条件下,适宜梭梭种群的生长。在不受人为干扰的情况下,梭梭种群能够稳定存续,且可以抵抗一定的气候风险。

(2)乌兰布和沙漠天然梭梭种群的生存函数、累计死亡率、死亡密度,在第Ⅰ~Ⅹ龄级(基径<10 cm)变化较大,且在第Ⅰ~Ⅸ龄级危险率较高。生存函数、累计死亡率、死亡密度在第Ⅺ~Ⅳ龄级(基径≥10 cm)趋于稳定,危险率在第Ⅹ龄级后逐渐增加。种群动态呈现出低龄级间个体数量波动大,高龄级衰退的特点。种群存活曲线为 Deevey-Ⅱ型,种群密度在 328.57~942.86 株/km² 之间,平均为 706.34 株/km²。种群空间分布大多呈聚集分布。

(3)建议科学制定管护措施,减轻人为活动对不同龄级梭梭个体数量的影响,特别是对低龄级梭梭个体数量的影响,对于老龄林可以适度樵采抚育。在局部梭梭林衰退严重地区可参考天然梭梭种群密度与空间分布型建植人工梭梭林。

参考文献:

[1] 赵家豪,叶钰倩,孙晓丹,等. 江西武夷山珍稀濒危植物南方铁杉种群动态与空间分布[J]. 生态学报, 2022, **42**(10): 4 032-4 040.
ZHAO J H, YE Y Q, SUN X D, *et al.* Population dynamics and spatial distribution of the rare and endangered plant *Tsuga chinensis* var. *tchekiangensis* in Wuyishan, Jiangxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(10): 4 032-4 040.

[2] 袁刚毅,郭其强,杨 瑞. 草海国家级自然保护区森林群落优势种群数量动态及物种多样性研究[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(7): 1 229-1 239.
YUAN G Y, GUO Q Q, YANG R. Study on the quantitative dynamics and species diversity of dominant species in forest communities in Caohai national nature reserve[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(7): 1 229-1 239.

[3] 马少薇,刘果厚,胥 晓,等. 浑善达克沙地黄柳雌雄群体年龄结构及动态特征[J]. 西北植物学报, 2020, **40**(6): 1 052-1 060.
MA S W, LIU G H, XU X, *et al.* Age structure and dynamic characteristics of male and female *Salix gordejewii* population in hunshandake sandy land[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, **40**(6): 1 052-1 060.

[4] 史浩伯,师庆东,戴 岳,等. 克里雅河尾间绿洲胡杨种群年龄结构对地下水埋深的响应[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(8): 1 401-1 408.
SHI H B, SHI Q D, DAI Y, *et al.* Response of age structure of *Populus euphratica* population to groundwater depth in the

oasis at the end of Keriya River[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(8): 1 401-1 408.

[5] 姜在民,和子森,宿 昊,等. 濒危植物羽叶丁香种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2018, **38**(7): 2 471-2 480.
JIANG Z M, HE Z S, SU H, *et al.* Population structure and dynamic characteristics of endangered *Syringa pinnatifolia* Hemsl [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(7): 2 471-2 480.

[6] 张文辉,许晓波,周建云,等. 濒危植物秦岭冷杉种群空间分布格局及动态[J]. 西北植物学报, 2005, **25**(9): 1 840-1 847.
ZHANG W H, XU X B, ZHOU J Y, *et al.* Pattern and dynamics of the spatial population distribution of endangered *Abies chensiensis* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, **25**(9): 1 840-1 847.

[7] 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): 4 272-4 279.
XIE T T, SU P X, ZHOU Z J, *et al.* Structure and dynamic characteristics of *Calligonum mongolicum* population in the desert-oasis ecotone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(15): 4 272-4 279.

[8] 杨慧琴,刘圆媛,刘芳黎,等. 西南特有濒危植物大王杜鹃种群结构及动态特征[J]. 西北植物学报, 2020, **40**(12): 2 148-2 156.
YANG H Q, LIU Y H, LIU F L, *et al.* Population structure and dynamic characteristics of an endangered and endemic species *Rhododendron rex* in southwest, China[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, **40**(12): 2 148-2 156.

[9] 郭泉水,郭志华,阎 洪,等. 我国以梭梭属植物为优势的潜

在荒漠植被分布[J]. 生态学报, 2005, **25**(4): 848-853.

GUO Q S, GUO Z H, YAN H, *et al.* Study on potential distribution of *Haloxylon* plants dominated desert vegetation in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(4): 848-853.

[10] 马全林, 王继和, 赵 明, 等. 退化人工梭梭林的恢复技术研究[J]. 林业科学研究, 2006, **19**(2): 151-157.

MA Q L, WANG J H, ZHAO M, *et al.* Research on restoration technology of degenerated artificial *Haloxylon ammodendron* forest[J]. *Forest Research*, 2006, **19**(2): 151-157.

[11] 马全林, 袁宏波, 张锦春. 乌兰布和沙漠植被[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2018.

[12] 李得禄, 马全林, 张剑挥, 等. 乌兰布和沙漠梭梭林不同管护措施效果分析[J]. 草业科学, 2015, **32**(1): 132-137.

LI D L, MA Q L, ZHANG J H, *et al.* Evaluation of different managements in *Haloxylon ammodendron* forest in Ulan Buh Desert [J]. *Pratacultural Science*, 2015, **32**(1): 132-137.

[13] 刘雅莉, 白建华, 熊 伟, 等. 乌兰布和沙漠梭梭(*Haloxylon ammodendron*)夜间液流特征及其环境驱动机制[J]. 中国沙漠, 2022, **42**(5): 195-203.

LIU Y L, BAI J H, XIONG W, *et al.* Characteristics of nocturnal liquid flow of *Haloxylon ammodendron* in Wulanbuhe Desert and its environmental driving mechanism[J]. *Journal of Desert Research*, 2022, **42**(5): 195-203.

[14] 朱淑娟, 王方琳, 刘有军, 等. 土壤水分和种子大小对梭梭种子萌发、出苗和幼苗生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2021, **36**(6): 16-21.

ZHU S J, WANG F L, LIU Y J, *et al.* Effects of soil moisture and seed size on the germination, sprouting and sapling growth of *Haloxylon ammodendron*[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, **36**(6): 16-21.

[15] 王国华, 赵文智. 埋藏深度对梭梭(*Haloxylon ammodendron*)种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国沙漠, 2015, **35**(2): 338-344.

WANG G H, ZHAO W Z. Effects of sand-burying on seed germination and seedling growth of *Haloxylon ammodendron*[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, **35**(2): 338-344.

[16] 张 灵. 梭梭对不同程度模拟干旱胁迫的动态生理响应机制[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.

[17] 王 波, 薛 源, 潘 绒, 等. 梭梭幼苗在高温胁迫适应性建立过程中的细胞死亡特征分析[J]. 分子植物育种, 2021, **19**(15): 5 157-5 163.

WANG B, XUE Y, PAN R, *et al.* Analysis of cell death characteristics of *Haloxylon ammodendron* seedlings during the establishment of adaptability to heat stress[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, **19**(15): 5 157-5 163.

[18] 冯晓龙, 刘 冉, 马 健, 等. 古尔班通古特沙漠白梭梭枝干光合及其影响因素[J]. 生态学报, 2021, **41**(24): 9 784-9 795.

FENG X L, LIU R, MA J, *et al.* Photosynthetic characteristics and influencing factors of *Haloxylon persicum* stems (different diameter classes) in Gurbantonggut Desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(24): 9 784-9 795.

[19] 沈 亮, 陈 君, 刘 赛, 等. 脱水胁迫和光合日变化对梭梭和白梭梭叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(8): 2 321-2 328.

SHEN L, CHEN J, LIU S, *et al.* Influence of dehydration and diurnal variation on characteristics of chlorophyll fluorescence of leaves in *Haloxylon ammodendron* and *H. persicum*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(8): 2 321-2 328.

[20] 厉静文, 包岩峰, 郭 浩, 等. 梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林带防风效果的风洞试验[J]. 中国沙漠, 2020, **40**(3): 77-84.

LI J W, BAO Y F, GUO H, *et al.* Wind tunnel test on the windproof effect of *Haloxylon ammodendron* forest belt[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, **40**(3): 77-84.

[21] 于丹丹, 唐立松, 李 彦, 等. 古尔班通古特沙漠白梭梭群落林下层物种多样性的空间分异[J]. 干旱区研究, 2010, **27**(4): 559-566.

YU D D, TANG L S, LI Y, *et al.* Spatial variation of the diversity characteristics of understory plant species of *Haloxylon persicum* in the Gurbantunggut Desert[J]. *Arid Zone Research*, 2010, **27**(4): 559-566.

[22] 唐 诚, 刘 彤, 刘学录, 等. 古尔班通古特沙漠西南缘梭梭群落多样性和稳定性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, **24**(8): 148-153.

TANG C, LIU T, LIU X L, *et al.* Study on species diversity and stability of *Haloxylon ammodendron* community in the southwestern edge of Gurbantonggut Desert[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, **24**(8): 148-153.

[23] 蔡新斌, 吴俊侠. 甘家湖自然保护区白梭梭种群特征与动态分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, **30**(7): 90-94.

CAI X B, WU J X. Characteristics and dynamics analysis of *Haloxylon persicum* populations in the Nature Reserve of Gan Jia Lake[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, **30**(7): 90-94.

[24] 闫 涵, 孙芳芳, 马松梅, 等. 梭梭和白梭梭的种群结构与空间分布格局[J]. 西南农业学报, 2021, **34**(8): 1 781-1 787.

YAN H, SUN F F, MA S M, *et al.* Population structure and spatial distribution pattern of *Haloxylon ammodendron* and *H. persicum*[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, **34**(8): 1 781-1 787.

[25] 肖生春, 肖洪浪, 彭小梅. 梭梭(*Haloxylon ammodendron*)不宜用于树木年轮学研究[J]. 中国沙漠, 2013, **33**(6): 1 692-1 698.

XIAO S C, XIAO H L, PENG X M. Tree rings of *Saxoul* (*Haloxylon ammodendron*) are not suitable for the dendrochronological studies[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, **33**(6): 1 692-1 698.

[26] FROST I, RYDIN H. Spatial pattern and size distribution of the animal-dispersed tree *Quercus robur* in two spruce-domi-

- nated forests[J]. *Écoscience*, 2000, **7**(1): 38-44.
- [27] 王 炜, 梁存柱, 朱宗元, 等. 梭梭年轮测定方法及生长动态的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2001, **15**(2): 67-75.
WANG W, LIANG C Z, ZHU Z Y, *et al.* Studies on the measuring method of growth rings of *Haloxylon ammodendron* and its growing dynamics[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2001, **15**(2): 67-75.
- [28] 李钢铁, 史 晴, 任改莲, 等. 确定梭梭年龄的初步探讨[J]. 内蒙古林学院学报, 1995(2): 52-55.
LI G T, SHI Q, REN G L, *et al.* An approach to age determination for cackcayr[J]. *Journal of Neimenggu Forestry College*, 1995(2): 52-55.
- [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): 214-217.
CHEN X D. Study on dynamic quantitative analysis method of plant population and community structure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(2): 214-217.
- [30] 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.
WU C Z, HONG W, XIE J S, *et al.* Life table analysis of *Tsuga longibracteata* population[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(3): 333-336.
- [31] 江 洪. 云杉种群生态学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- [32] 杨凤翔, 王顺庆, 徐海根, 等. 生存分析理论及其在研究生生命表中的应用[J]. 生态学报, 1991, **11**(2): 153-158.
YANG F X, WANG S Q, XU H G, *et al.* The theory of survival analysis and its application to life table[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1991, **11**(2): 153-158.
- [33] 刘贵峰, 刘玉平, 程伟燕, 等. 大青沟自然保护区主要森林群落优势种的种群分布格局[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(8): 2 082-2 087.
LIU G F, LIU Y P, CHENG W Y, *et al.* Population distribution patterns of dominant species in major forest communities in Daqinggou Nature Reserve[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(8): 2 082-2 087.
- [34] ARISTA M. The structure and dynamics of an *Abies pinsapo* forest in southern Spain[J]. *Forest Ecology and Management*, 1995, **74**(1/2/3): 81-89.
- [35] 胡尔查, 王晓江, 张文军, 等. 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, 2013, **33**(9): 2 867-2 876.
HU E C, WANG X J, ZHANG W J, *et al.* Age structure and point pattern of *Butula platyphylla* in Wulashan Natural Reserve of Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(9): 2 867-2 876.
- [36] 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): 9 091-9 099.
ZHANG J T, PAN Z L, TIAN Y H, *et al.* Age structure and dynamic analysis of *Pinus yunnanensis* population in Yunlong Tianchi National Nature Reserve[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(22): 9 091-9 099.
- [37] 孙利鹏, 王继和, 王 辉, 等. 乌兰布和沙漠天然梭梭种群径级结构及种群动态分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2012, **47**(2): 110-114.
SUN L P, WANG J H, WANG H, *et al.* Diameter class structure and population dynamic analysis of natural *Haloxylon ammodendron* in Ulan Buh Desert[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2012, **47**(2): 110-114.
- [38] 赵文智, 刘 鹄. 干旱、半干旱环境降水脉动对生态系统的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(1): 243-249.
ZHAO W Z, LIU H. Precipitation pulses and ecosystem responses in arid and semiarid regions: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(1): 243-249.
- [39] 杨小林, 王秋菊, 兰小中, 等. 濒危植物大花黄牡丹(*Paeonia ludlowii*)种群数量动态[J]. 生态学报, 2007, **27**(3): 1 242-1 247.
YANG X L, WANG Q J, LAN X Z, *et al.* Numeric dynamics of the endangered plant population of *Paeonia ludlowii* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(3): 1 242-1 247.
- [40] 王 鹏, 陈丽华, 卞西陈, 等. 北沟林场天然次生林群落结构与种群分布格局[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(7): 1 668-1 674.
WANG P, CHEN L H, BIAN X C, *et al.* Community structure and distribution pattern of a natural secondary forest in Beigou forest farm[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(7): 1 668-1 674.
- [41] CONDIT R, ASHTON P S, BAKER P, *et al.* Spatial patterns in the distribution of tropical tree species[J]. *Science*, 2000, **288**(5 470): 1 414-1 418.
- [42] 刘贵峰, 丁 易, 臧润国, 等. 天山云杉种群分布格局[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(1): 9-13.
LIU G F, DING Y, ZANG R G, *et al.* Distribution patterns of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* population in Tianshan Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(1): 9-13.
- [43] 李 荣, 周朝彬, 宋于洋. 古尔班通古特沙漠南缘怪柳种群分布格局及年龄结构的研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2013, **31**(2): 154-158.
LI R, ZHOU C B, SONG Y Y. Spatial distribution and age structure of *Tamarix hispida* population in southern edge of Gurbantunggut Desert[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science Edition)*, 2013, **31**(2): 154-158.
- [44] 周启龙, 王 立, 廖空太, 等. 北碚山沙冬青种群分布格局与群落特征[J]. 水土保持通报, 2015, **35**(2): 302-305.
ZHOU Q L, WANG L, LIAO K T, *et al.* Distribution pattern and characteristics of *Ammopiptanthus mongolicus* population in beiza mountain[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, **35**(2): 302-305.

(编辑:潘新社)