

DOI: 10.5846/stxb202204040866

赵鹏, 徐先英, 张裕年, 段晓峰, 邱晓娜, 张雯, 张俊年. 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭种群年龄结构及动态. 生态学报, 2023, 43(14): 6069-6079.  
Zhao P, Xu X Y, Zhang Y N, Duan X F, Qiu X N, Zhang W, Zhang J N. Age structure and its dynamics of artificial *Haloxylon ammodendron* population in Minqin oasis-desert ecotone. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 6069-6079.

## 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭种群年龄结构及动态

赵 鹏<sup>1,2,3</sup>, 徐先英<sup>1</sup>, 张裕年<sup>1,\*</sup>, 段晓峰<sup>1</sup>, 邱晓娜<sup>1</sup>, 张 雯<sup>1</sup>, 张俊年<sup>4</sup>

1 甘肃省治沙研究所, 干旱区生态和荒漠化防治博士后工作站, 兰州 730070

2 兰州大学, 大气科学博士后流动站, 兰州 730010

3 甘肃临泽荒漠生态系统国家定位观测研究站, 临泽 734200

4 甘肃祁连山国家级自然保护区管护中心, 祁连山自然保护站, 凉州 733000

**摘要:** 基于野外样地调查数据, 通过分析静态生命表、存活曲线、动态指数等参数, 结合时间序列模型, 研究了人工梭梭种群年龄结构动态, 旨在预测人工梭梭种群演替趋势, 为退化人工梭梭种群恢复与重建提供理论依据。结果表明: (1) 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭种群的年龄结构近似于“金字塔”型, 幼龄林个体占总物种数的 90.1%; (2) 人工梭梭种群存活曲线趋近于 Deevey-II 型, 为稳定型种群。不同区域人工梭梭种群的第 I、II、III 龄级个体死亡率和消失率最高; (3) 动态量化结果显示人工梭梭种群总体均表现为增长型, 对外界干扰敏感性较强; (4) 时间序列预测分析表明, 在未来 2、4 个龄级时间后, 种群 II、IV 龄级个体数量大幅度增加, 人工梭梭种群发展趋势较好。民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭种群为稳定增长型种群, 种群具有一定的自然更新能力。针对该种群幼龄个体死亡率较高的问题, 未来建议加强对第 I、II、III 龄级幼株的精准抚育管理, 通过人为辅助措施提高幼苗的保存率, 促进人工梭梭林的可持续发展。

**关键词:** 人工梭梭; 种群结构; 静态生命表; 存活曲线; 时间序列

## Age structure and its dynamics of artificial *Haloxylon ammodendron* population in Minqin oasis-desert ecotone

ZHAO Peng<sup>1,2,3</sup>, XU Xianying<sup>1</sup>, ZHANG Yunian<sup>1,\*</sup>, DUAN Xiaofeng<sup>1</sup>, QIU Xiaona<sup>1</sup>, ZHANG Wen<sup>1</sup>, ZHANG Junnian<sup>4</sup>

1 Arid Zone Ecology and Desertification Control Postdoctoral Research Workstation, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China

2 Atmospheric Sciences Postdoctoral Station, Lanzhou University, Lanzhou 730010, China

3 Gansu Linze National Positioning Observation and Research Station for Desert Ecosystem, Linze 734200, China

4 Qilian Nature Reserve Station, Gansu Qilian Mountain National Nature Reserve Management and Protection Center, Liangzhou 733000, China

**Abstract:** Based on the field survey data, through analysis of static life table, survival curve, dynamic index, and other parameters, combined with time series model, the age structure dynamics of artificial *H. ammodendron* population was studied to predict the succession trend of artificial *H. ammodendron* population and provide theoretical basis for the restoration and reconstruction of degraded artificial *H. ammodendron* population. The results showed that: (1) the age structure of the artificial *H. ammodendron* population in Minqin oasis-desert ecotone was like “pyramid” type, and the young forest individuals accounted for 90.1% of the total species; (2) the survival curve of artificial of *H. ammodendron* population closed to Deevey-II type, which belongs to stable population. The mortality rate and disappearance rate of the first, second and third-age individuals in different regions were the highest. (3) the results of dynamic quantification

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (32060246); 甘肃省科技计划项目 (22JR5RA765); 2022 年度陇原青年创新创业人才项目 (2022LQGR21); 2020 年甘肃省青年科技人才托举工程项目 (甘科协发[2020]104 号)

**收稿日期:** 2022-04-04; **网络出版日期:** 2023-04-12

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zynzl123@126.com

showed that the population of artificial *Haloxylon ammodendron* presented an overall growth pattern and was highly sensitive to the external interference; (4) time series prediction analysis showed that after the next 2 and 4 age classes, the number of individuals of population II and IV increased significantly, and the development trend of artificial *H. ammodendron* population was better. The artificial *H. ammodendron* population in Minqin oasis-desert ecotone was a stable growth population, which had certain natural regeneration ability. In view of the high mortality rate of young individuals in this population, it is suggested to strengthen the precise tending management of the first, second and third age plants, improve the survival rate of seedlings through artificial auxiliary measures, and promote the sustainable development of artificial *H. ammodendron* forest.

**Key Words:** artificial *Haloxylon ammodendron*; population structure; static life table; survival curve; time series

种群是物种存在和进化的基本单位,是生物群落和生态系统的基本组成<sup>[1]</sup>。作为种群生态学的重要内容,种群年龄结构是指种群内不同年龄个体数量的组配情况,反映了种群的数量动态及其发展趋势<sup>[2]</sup>。太白红杉(*Larix chinensis* Beissn)种群能长期适应秦岭亚高山环境条件,中龄级以后个体间的竞争相对平稳,数量减少趋向于稳定<sup>[3]</sup>。随海拔升高,长白山北坡岳桦(*Betula ermanii* Cham)种群密度增大,径级分布范围减小,种群存活曲线由 Deevey II 型过渡到 Deevey I 型,种群由稳定型过渡为增长型<sup>[4]</sup>。塔里木河上段胡杨(*Populus euphratica* Oliv)种群因更新资源不足而趋于衰退,未来保持适当的人工辅助恢复措施和加强保护现有植株及其生境是促进胡杨种群自然更新和恢复的关键<sup>[5]</sup>。临泽荒漠绿洲过渡带沙拐枣(*Calligonum mongolicum* Turcz)种群属于稳定增长型。但在未来 2、4、6、8 个龄级时间后沙拐枣老龄个体逐渐增多,幼龄株数则有所降低,种群稳定性长期维持困难<sup>[6]</sup>。祁连山大野口流域青海云杉(*Picea crassifolia* Kom)种群为稳定增长型,只要未来不遭受强烈干扰,种群数量会保持逐渐增长<sup>[7]</sup>。综上所述,不同生态系统优势种群年龄结构及动态特征关系着植被群落的稳定性与演替方向,对植被生态系统的可持续经营管理具有重要的实践指导意义。

梭梭(*Haloxylon ammodendron*)为藜科梭梭属小乔木或灌木,抗旱、耐寒、耐盐碱、耐土壤贫瘠、抗风蚀沙埋,具有极强的生态适应能力,已成为干旱区防风固沙首选造林树种。20 世纪 60 年代初,河西走廊绿洲外围风沙沿线开始建植以梭梭耐旱灌木为主的人工固沙林。截止 2016 年,人工梭梭林总面积达  $8.9 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ ,其中民勤县人工梭梭林发展时间最早、造林规模最大,保存面积达到  $4.35 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ ,在绿洲边缘构筑了 2—5 km 的梭梭防风固沙林带,对改善小气候、改良土壤、保护生物多样性和增加碳汇起到关键性作用。然而,由于人类活动及气候变化的影响,民勤绿洲边缘人工梭梭林普遍衰退。围绕人工梭梭衰退驱动机制以往研究侧重于外界不利因素如初植密度过大、地下水位持续下降、土壤结皮阻碍降雨入渗、鼠害及病虫害等,对人工梭梭生物学及种群特征因素考虑较少。古尔班通古特沙漠边缘不同生长阶段的梭梭人工林空间分布格局在幼苗向幼树和成年树的转变过程中呈现出随机的集群趋势。15 a 梭梭人工林处于上升阶段,22 a 时随着林龄的增加处于稳定退化阶段,36 a 时由于幼苗和成熟植株太多,由于物种对土壤水分的竞争,更新能力很弱,出现退化。在这种情况下,可以采取诸如疏伐的措施,以防止迅速退化,并在林龄超过 20 年时加速更新<sup>[8]</sup>。显然,自然更新受限也是造成人工梭梭种群退化的重要驱动因素。据野外观察,民勤沙区虽然人工梭梭能正常开花结实,但更新苗出苗率、保存率极低,不能实现普遍、有效的自我繁殖。摸清人工梭梭种群林龄组成现状及未来发展方向,有助于退化人工梭梭林的可持续经营。为此,本研究基于野外调查资料,通过静态生命表、存活曲线、死亡曲线等参数分析,结合时间序列模型,旨在厘清人工梭梭种群年龄结构动态,预测种群未来的演替趋势,为退化人工梭梭种群恢复与重建提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

民勤县位于石羊河流域下游,河西走廊东端的北部,属典型的大陆性荒漠气候。据甘肃民勤荒漠草地生

态系统国家野外科学观测研究站观测数据(1959—2020),多年日平均气温 7.6℃,年均日较差 15.2℃;≥10℃积温为 3036.4℃,无霜期 189 d;多年平均降水量为 115.41 mm,主要集中在每年的 7—9 月,占年均总降水量的 60%以上;多年平均水面蒸发量为 2664.00 mm;主导风向为西北风,年平均风速 2.5 m/s,年平均大风日数 25.1 d,年平均沙尘暴日数 25.6 d。年≥8 级大风日数为 27.8 d。石羊河下游位于干草原向荒漠过度区域,有天然种子植物 23 个科,73 个属,123 个种<sup>[9]</sup>。水资源的变化是决定当地植被退化的主导因子,在大面积湖泊、河流背景上是沼泽植被,在干涸湖泊、河床背景上的是盐生草甸植被,沙质荒漠背景上是荒漠植被<sup>[10]</sup>。

## 1.2 野外调查

2021 年 5 月,在民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭林典型分布区,选择代表性生境设立调查样地 6 块(表 1),每块样地设置间隔 50 m 的 25 m×25 m 的样方 3 个,进行种群年龄及更新状况调查(图 1)。对基径大于 2 cm 的人工梭梭进行每木检尺,用胸径尺记录每株梭梭离地面 0.3 m 处基径、高度、冠幅;对基径小于 2 cm 的人工梭梭幼苗,则记录其高度、冠幅与株数;对灌木和草本,记录各物种名和株数。冠幅面积=冠幅长×冠幅宽。

表 1 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭样地概况

Table 1 Basic survey of artificial *Haloxylon ammodendron* plots in Minqin oasis-desert ecotone

调查区域 Survey areas	平均高度 Average height/m	冠幅面积 Crown area/m <sup>2</sup>	种群密度 Population density/(株/hm <sup>2</sup> )	鼠洞密度 Rat hole density/(个/hm <sup>2</sup> )
红崖山	1.28±0.71	2.42±4.01	630±350	730±480
宋和	1.55±0.76	3.92±1.97	450±130	480±290
民昌路	1.88±0.88	5.38±4.73	270±140	300±130
勤锋	1.28±0.46	2.06±1.60	304±50	912±180
老虎口	1.83±0.73	3.09±3.17	340±60	510±150
青土湖	2.39±0.93	6.53±6.90	440±210	570±430

## 1.3 种群年龄结构

梭梭年龄结构的确定,一直是个难题。由于梭梭不形成规整的年轮,使得通过年轮确定其树龄的方法不可行。虽然种群的龄级和径级有所不同,但在同一环境下,同一树种的龄级和径级对环境的反应规律具有一致性<sup>[11]</sup>。国内相关研究均采用径级结构代替年龄结构的方法来研究梭梭种群动态特征<sup>[12-13]</sup>。一般取距离地面 0.3 m 高度处的直径作为基径,以 3 cm 为直径级区间将人工梭梭种群划分为 6 个径级;I 龄级(0<d<3 cm)、II 龄级(3 cm≤d<6 cm)、III 龄级(6 cm≤d<9 cm)、IV 龄级(9 cm≤d<12 cm)、V 龄级(12 cm≤d<15 cm)、VI 龄级(15 cm≤d<18 cm)<sup>[14]</sup>。统计各龄级株数,编制种群静态生命表,分析人工梭梭种群动态变化。

## 1.4 静态生命表

静态生命表各指标之间相互关联,可通过实测值求得。主要指标有  $x$  为龄级,  $\Delta x$  为径级距;  $a_x$  为  $x$  龄级内的树木存活数;  $l_x$  为  $x$  龄级开始时的标准化存活数,  $l_x = N_x / N_0 \times 1000$ ;  $dx$  为从  $x$  到  $x+1$  龄级间隔期内标准化死亡数,  $d_x = l_x - l_{x+1}$ ;  $q_x$  为  $x$  到  $x+1$  龄级间隔期的死亡率,  $q_x = d_x / l_x \times 100\%$ ;  $L_x$  为从  $x$  到  $x+1$  龄级间隔期还存活的个体数,  $l_x = (l_x / l_{x+1}) / 2$ ;  $T_x$  是从龄级到超过  $x$  龄级的个体总数,  $T_x = \sum l_x$ ;  $E_x$  为进入  $x$  龄级个体的生命期望,  $E_x = T_x / l_x$ ;  $K_x$  为消失率,  $K_x = \ln l_x - \ln l_{x+1}$ 。

为了检验种群存活状况是符合 Deevey-II 型还是 Deevey-III 型曲线,本文采用 Hett 和 Loucks 提出的数学模型对不同样地人工梭梭种群存活曲线进行检验。即用指数方程  $N_x = N_0 e^{-bx}$  和幂函数方程  $N_x = N_0 x^{-b}$  分别描述 Deevey-II、Deevey-III 型存活曲线<sup>[15]</sup>。式中  $N_x$ 、 $N_0$  分别代表  $x$  龄级内存活数和种群形成初期的个体数,  $b$  为死亡率。

## 1.5 种群动态分析

采用种群动态数量化方法,定量描述种群动态:

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

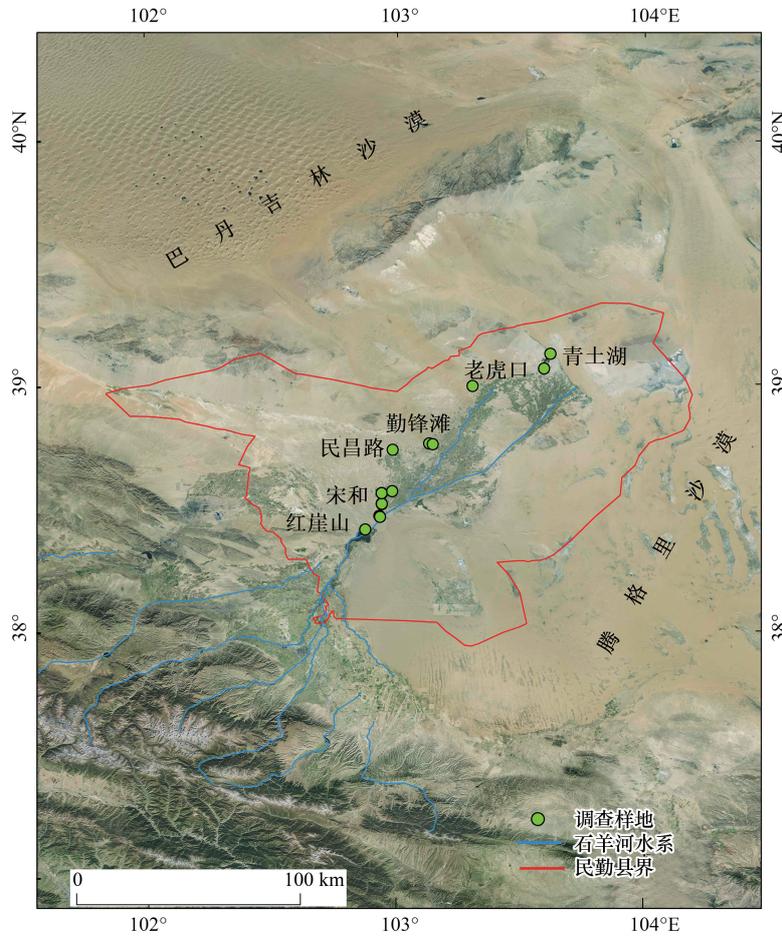


图 1 人工梭梭林调查样地空间分布

Fig.1 Spatial distribution of the survey plots of the artificial *Haloxylon ammodendron* forest

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

式中,  $V_n$  为种群  $n$  到  $n+1$  级的个体数量变化;  $V_{pi}$  整个种群结构的数量变化动态指数;  $S_n, S_{n+1}$  分别为第  $n$  和  $n+1$  级种群个体数;  $k$  为种群大小级数量。式 2 仅适用于不考虑外部环境干扰的种群结构动态的比较。当考虑未来外部干扰时, 则种群结构动态还与大小数量级 ( $k$ ) 及各大小级个体数 ( $S$ ) 两因素相关, 因此将式 2 修正为:

$$V'_{pi} = \frac{\sum_{n=1}^{k-1} S_n V_n}{\min(S_1, S_2, S_3, \dots, S_k) k \sum_{n=1}^{k-1} S_n} \tag{3}$$

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

式中,  $V_n, V_{pi}, V'_{pi}$  取正、负、零时分别反映种群个体数量增长、衰退和稳定的关系。仅当种群对外界干扰所承担的风险概率  $P$  取值为最大时才会对种群动态  $V_{pi}$  产生最大影响。

### 1.6 时间序列分析

本文采用时间序列分析的一次移动平均法对人工梭梭种群龄级结构进行模拟和预测。

$$M_t^{(1)} = \frac{1}{n} \sum_{k=t-n+1}^t X_k \tag{5}$$

式中,(1)代表一次移动平均, $n$ 表示需要预测的未来时间年限, $t$ 为龄级, $M_t$ 是近期 $n$ 个观测值在 $t$ 时刻的平均值,称为第 $n$ 周期的移动平均,即表示未来 $n$ 年时 $t$ 龄级的种群大小, $X_k$ 为当前 $k$ 龄级的种群大小。

## 2 结果与分析

### 2.1 人工梭梭年龄结构

由于生境条件及人类干扰活动的空间异质性,民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭年龄结构差异明显(图2)。人工梭梭种群结构呈底部宽顶部窄的金字塔型,属增长型种群。红崖山 I、II、III 龄级人工梭梭种群密度分别为 617 株/hm<sup>2</sup>、150 株/hm<sup>2</sup>、183 株/hm<sup>2</sup>,占种群个体总数的比例达 87.69%。红崖山 IV、V、VI 龄级人工梭梭的种群密度分别为 50 株/hm<sup>2</sup>、33 株/hm<sup>2</sup>、33 株/hm<sup>2</sup>,分别占种群个体总数的 4.62%、3.08%和 3.08%。宋和 I、II、III 龄级人工梭梭密度分别为 375 株/hm<sup>2</sup>、142 株/hm<sup>2</sup>、125 株/hm<sup>2</sup>,占种群个体总数的比例达 93.90%。宋和 IV、V、VI 龄级人工梭梭种群密度分别为 25 株/hm<sup>2</sup>、8 株/hm<sup>2</sup>、8 株/hm<sup>2</sup>,分别占种群个体总数的 3.66%、1.22%和 1.22%。民昌路 I、II、III 龄级人工梭梭种群密度分别为 212 株/hm<sup>2</sup>、85 株/hm<sup>2</sup>、79 株/hm<sup>2</sup>,占种群个体总数的比例达 84.93%。民昌路 IV、V、VI 龄级人工梭梭的种群密度分别为 7 株/hm<sup>2</sup>、4 株/hm<sup>2</sup>、4 株/hm<sup>2</sup>,分别占种群个体总数的 6.85%、4.11%和 4.11%。勤锋 I、II、III 龄级人工梭梭种群密度分别为 376 株/hm<sup>2</sup>、176 株/hm<sup>2</sup>、56 株/hm<sup>2</sup>,占种群个体总数的比例达 93.33%。勤锋 V、VI 龄级人工梭梭的种群密度分别为 8 株/hm<sup>2</sup>、8 株/hm<sup>2</sup>,分别占种群个体总数的 4.0%、1.33%。老虎口 I、II、III 龄级人工梭梭种群密度分别为 376 株/hm<sup>2</sup>、128 株/hm<sup>2</sup>、56 株/hm<sup>2</sup>,占种群个体总数的比例达 97.44%。老虎口 IV、V、VI 龄级人工梭梭种群密度分别为 8 株/hm<sup>2</sup>、24 株/hm<sup>2</sup>、8 株/hm<sup>2</sup>,分别占种群个体总数的 1.33%、4%、1.33%。青土湖 I、II、III 龄级人工梭梭密度分别为 259 株/hm<sup>2</sup>、230 株/hm<sup>2</sup>、111 株/hm<sup>2</sup>,占种群个体总数的比例达 82.65%。青土湖 IV、V 龄级人工梭梭的种群密度分别为 4 株/hm<sup>2</sup>、2 株/hm<sup>2</sup>,分别占种群个体总数的 4.08%、2.04%。

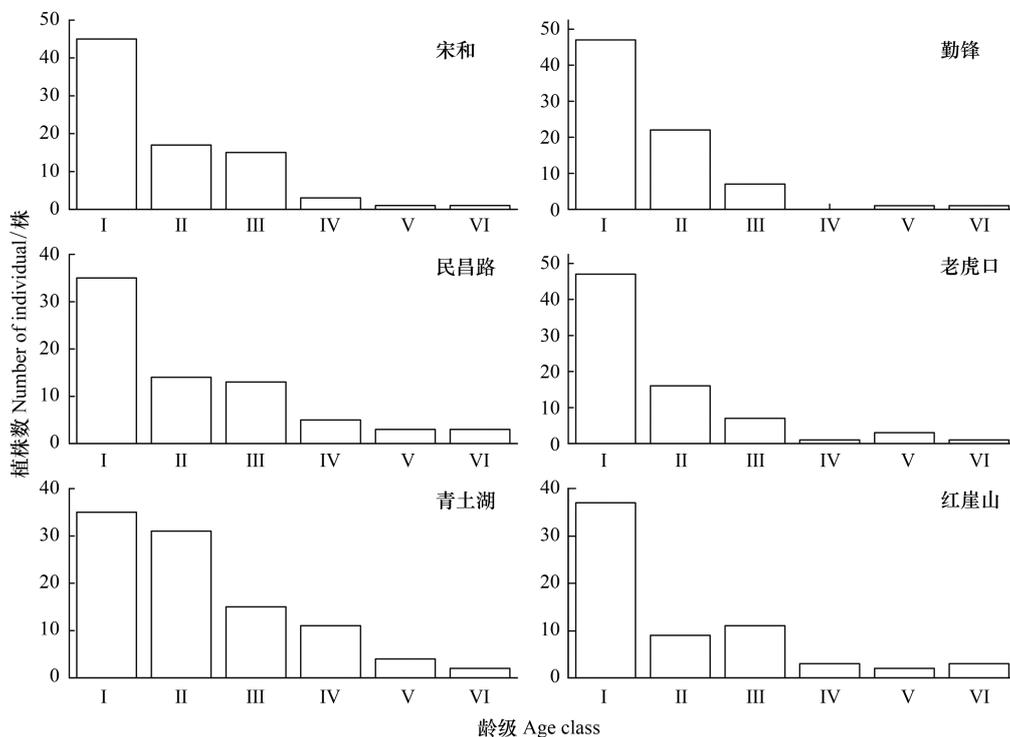


图2 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭林年龄结构

Fig.2 Age class structure of artificial *H. ammodendron* population in Minqin oasis-desert ecotone

I 龄级(0<d<3cm)、II 龄级(3cm≤d<6cm)、III 龄级(6cm≤d<9cm)、IV 龄级(9cm≤d<12cm)、V 龄级(12cm≤d<15cm)、VI 龄级(15cm≤d<18cm)

## 2.2 静态生命表和存活曲线

由静态生命表 2 可知,随年龄的增加,人工梭梭种群个体标准化存活数  $l_x$  逐渐减少,期望寿命  $E_x$  呈增减波动变化。红崖山样地 I 龄级个体死亡率、消失率最大。勤锋样地 II 龄级个体死亡率、消失率最大。宋河、民昌路、老虎口样地 III 龄级个体死亡率、消失率最大。青土湖样地 IV 龄级个体死亡率、消失率最大。总体上,不同区域人工梭梭种群的第 I、II、III 龄级个体死亡率和消失率最高(表 2)。

表 2 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭种群静态生命表

Table 2 Static life table of artificial *H. ammodendron* population in Minqin oasis-desert ecotone

龄级(x) Age class (x)		$a_x$	$l_x$	$\ln l_x$	$d_x$	$q_x$	$L_x$	$T_x$	$E_x$	$K_x$
红崖山	I	37	1000.00	6.91	756.76	0.76	621.62	1256.76	1.26	1.41
	II	9	243.24	5.49	-54.05	-0.22	270.27	635.14	2.61	-0.20
	III	11	297.30	5.69	216.22	0.73	189.19	364.86	1.23	1.30
	IV	3	81.08	4.40	27.03	0.33	67.57	175.68	2.17	0.41
	V	2	54.05	3.99	-	-	54.05	108.11	2.00	-
	VI	2	54.05	3.99	27.03	0.50	40.54	54.05	1.00	0.69
宋和	I	45	1000.00	6.91	622.22	0.62	688.89	1322.22	1.32	0.97
	II	17	377.78	5.93	44.44	0.12	355.56	633.33	1.68	0.13
	III	15	333.33	5.81	266.67	0.80	200.00	277.78	0.83	1.61
	IV	3	66.67	4.20	44.44	0.67	44.44	77.78	1.17	1.10
	V	1	22.22	3.10	-	-	22.22	33.33	1.50	-
	VI	1	22.22	3.10	22.22	-	11.11	11.11	0.50	-
民昌路	I	35	1000.00	6.91	600.00	0.60	700.00	1585.71	1.59	0.92
	II	14	400.00	5.99	28.57	0.07	385.71	885.71	2.21	0.07
	III	13	371.43	5.92	228.57	0.62	257.14	500.00	1.35	0.96
	IV	5	142.86	4.96	57.14	0.40	114.29	242.86	1.70	0.51
	V	3	85.71	4.45	-	-	85.71	128.57	1.50	-
	VI	3	85.71	4.45	85.71	-	42.86	42.86	0.50	-
勤锋	I	47	1000.00	6.91	531.91	0.53	734.04	1159.57	1.16	0.76
	II	22	468.09	6.15	319.15	0.68	308.51	425.53	0.91	1.15
	III	7	148.94	5.00	148.94	-	74.47	117.02	0.79	-
	IV	0	-	-	-21.28	-	10.64	42.55	-	-
	V	1	21.28	3.06	-	-	21.28	31.91	1.50	-
	VI	1	21.28	3.06	21.28	-	10.64	10.64	0.50	-
老虎口	I	47	1000.00	6.91	659.57	0.66	670.21	1095.74	1.10	1.08
	II	16	340.43	5.83	191.49	0.56	244.68	425.53	1.25	0.83
	III	7	148.94	5.00	127.66	0.86	85.11	180.85	1.21	1.95
	IV	1	21.28	3.06	-42.55	-	42.55	95.74	4.50	-1.10
	V	3	63.83	4.16	42.55	0.67	42.55	53.19	0.83	1.10
	VI	1	21.28	3.06	21.28	-	10.64	10.64	0.50	0.00
青土湖	I	35	1000.00	6.91	114.29	0.11	942.86	2300.00	2.30	0.12
	II	31	885.71	6.79	457.14	0.52	657.14	1357.14	1.53	0.73
	III	15	428.57	6.06	114.29	0.27	371.43	700.00	1.63	0.31
	IV	11	314.29	5.75	200.00	0.64	214.29	328.57	1.05	1.01
	V	4	114.29	4.74	57.14	0.50	85.71	114.29	1.00	0.69
	VI	2	57.14	4.05	57.14	-	28.57	28.57	0.50	-

$x$ : 龄级 Age class;  $a_x$ : 存活数 Survival number;  $l_x$ : 标准化存活数 Standardized survival number;  $d_x$ : 死亡数;  $q_x$ : 死亡率;  $L_x$ :  $x$  到  $x+1$  龄级的平均存活个体数 the average survival individuals number from  $x$  to  $x+1$  age class;  $T_x$ : 存活总数 total survival number;  $E_x$ : 生命期望 Life expectancy;  $K_x$ : 消失率 Disappearance rate; 破折号(-) 表示最后一个年龄级而无法计算得到的数据; I 龄级 ( $0 < d < 3\text{cm}$ )、II 龄级 ( $3\text{cm} \leq d < 6\text{cm}$ )、III 龄级 ( $6\text{cm} \leq d < 9\text{cm}$ )、IV 龄级 ( $9\text{cm} \leq d < 12\text{cm}$ )、V 龄级 ( $12\text{cm} \leq d < 15\text{cm}$ )、VI 龄级 ( $15\text{cm} \leq d < 18\text{cm}$ )

从民勤绿洲荒漠过渡带不同区域人工梭梭种群的存活曲线可以看出, I 龄级到 II 龄级个体数量显著降低,降低速率红崖山>老虎口>宋和>民昌路>勤锋>青土湖。II 龄级到 III 龄级个体数量降低幅度略小,降低速

率大小排序为勤锋>老虎口>青土湖>民昌路>宋和。Ⅲ龄级到Ⅳ龄级个体数量降低幅度最大,降低速率老虎口>宋和>红崖山>民昌路>老虎口>青土湖。Ⅳ龄级到Ⅵ龄级个体数量降低幅度趋于平缓(图 3)。生存曲线幂函数和指数模型的验证模拟分析表明,两种模型的拟合结果在不同区域均达到极显著水平( $P<0.01$ ),但不同区域指数模型的  $R^2$  值均大于幂函数模型,且  $P$  值更小(表 3)。因此,民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭种群存活曲线更加符合 Deevey-II 型。

2.3 种群动态指数

采用动态量化方法对不同空间分布人工梭梭种群龄级变化特征分析表明(表 4),红崖山人工梭梭种群  $V_1、V_3、V_4、V_6$  大于 0,  $V_2$  小于 0,  $V_5$  等于 0,各龄级呈现增长-衰退-稳定-增长的变化特征;宋和、民昌路人工梭梭种群  $V_1、V_2、V_3、V_4、V_6$  大于 0,  $V_5$  等于 0,各龄级呈现增长-稳定-增长的动态特征;勤锋人工梭梭种群  $V_1、V_2、V_3、V_6$  大于 0,  $V_4$  小于 0、 $V_5$  等于 0,各龄级呈现增长-衰退-稳定-增长的动态特征;老虎口人工梭梭种群  $V_1、V_2、V_3、V_5、V_6$  大于 0,  $V_4$  小于 0,各龄级呈现增长-衰退-增长的动态特征;青土湖人工梭梭种群  $V_1、V_2、V_3、V_4、V_5、V_6$  大于 0,各龄级呈现增长的动态特征。6 个区域人工梭梭种群  $V'_{pi}$  均小于  $V_{pi}$ ,且均大于 0。随机干扰极大值( $P$  极大)分别为 0.14(红崖山)、0.20(宋和)、0.07(民昌路)、0.20(勤锋)、0.25(老虎口)、0.08(青土湖)。民勤绿洲荒漠过渡带 6 个区域人工梭梭种群总体均表现为增长型,对外界干扰敏感性较强。

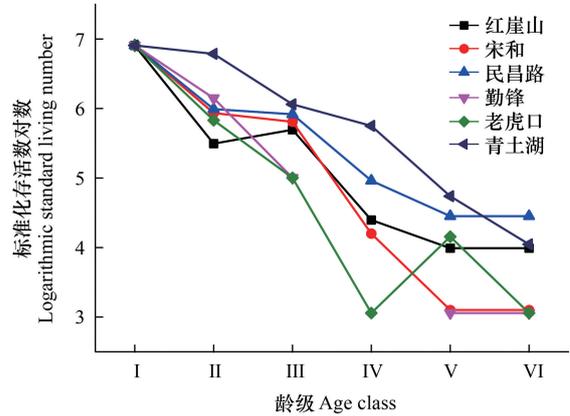


图 3 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭种群存活曲线  
Fig.3 Survival curve of artificial *H. ammodendron* population in Minqin oasis-desert ecotone

表 3 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭种群存活曲线检验模型

Table 3 Test models of survival cures of artificial *H. ammodendron* population in Minqin oasis-desert ecotone

不同区域 Different areas	拟合方程 Fitting equation	$R^2$	$F$	$P$
红崖山	$y = 7.523e^{-0.118x}$	0.8844	516.7082	0.000022
	$y = 6.985x^{-0.307}$	0.8819	505.7191	0.000023
宋和	$y = 8.434e^{-0.17x}$	0.9160	353.0815	0.000047
	$y = 7.329x^{-0.404}$	0.7777	132.1773	0.000327
民昌路	$y = 7.499e^{0.011x}$	0.9368	1484.055	0.000003
	$y = 7.058x^{0.036}$	0.8955	896.5497	0.000007
勤锋	$y = 8.474e^{-0.181x}$	0.9708	714.3462	0.000115
	$y = 7.325x^{-0.436}$	0.8550	142.4026	0.001270
老虎口	$y = 8.081e^{-0.169x}$	0.8299	173.8238	0.000191
	$y = 7.153x^{-0.419}$	0.8130	157.9286	0.000231
青土湖	$y = 8.012e^{-0.101x}$	0.9095	867.6768	0.000008
	$y = 7.373x^{0.067}$	0.7045	264.1972	0.000084

2.4 种群时间序列预测

人工梭梭种群数量动态时间序列预测以各龄级株数为原始数据,按照一次平均推移法预测出各龄级在未来 2、4 个龄级时间后的个体数。由表 5 可知,在未来 2 个龄级后,人工梭梭种群 II 龄级个体数量大幅度增加, III 龄级后的个体数量略为增大,表明人工梭梭林更新幼苗占比较高,对中后期种群数量的补充充足。在未来

4 个龄级后,人工梭梭种群 IV 龄级个体数量大幅度增加。由此可知,人工梭梭种群幼龄个体占比高,未来发展趋势较好。

表 4 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭种群龄级结构动态变化指数

Table 4 Dynamic indices of size structure on artificial *H. ammodendron* population in Minqin oasis-desert ecotone

动态指数 Dynamic indices	红崖山	宋和	民昌路	勤锋	老虎口	青土湖
$V_1$	0.76	0.62	0.60	0.53	0.66	0.11
$V_2$	-0.18	0.12	0.07	0.68	0.56	0.52
$V_3$	0.73	0.80	0.62	1.00	0.86	0.27
$V_4$	0.33	0.67	0.40	-1.00	-0.67	0.64
$V_5$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	0.50
$V_6$	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$V_{pi}$	56.82	54.88	47.95	61.54	64.44	35.71
$V'_{pi}$	8.12	10.98	3.20	12.31	16.11	2.98
$P$ 极大	0.14	0.20	0.07	0.20	0.25	0.08

$V_n$  为种群  $n$  到  $n+1$  级的个体数量变化;  $V_{pi}$  为整个种群结构的数量变化动态指数;  $V'_{pi}$  为考虑外部干扰时的整个种群结构的数量变化动态指数

表 5 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭种群动态变化的时间序列预测

Table 5 Time sequence analysis of age structure of artificial *H. ammodendron* population in Minqin oasis-desert ecotone

龄级 Age class/ $x$	红崖山			宋和			民昌路			勤锋			老虎口			青土湖		
	原数据	$M_2^{(1)}$	$M_4^{(1)}$															
I	37			45			35			47			47			35		
II	9	23		17	31		14	25		22	35		16	32		31	33	
III	11	10		15	16		13	14		7	15		7	12		15	23	
IV	3	7	15	3	9	20	5	9	17	0	4	19	1	4	18	11	13	23
V	2	3	6	1	2	9	3	4	9	1	1	8	3	2	7	4	8	15
VI	2	2	5	1	1	5	3	3	6	1	1	2	1	2	3	2	3	8

$M_2^{(1)}$ 、 $M_4^{(1)}$ 表示未来 2、4 年时  $t$  龄级的种群大小。

### 3 讨论

#### 3.1 人工梭梭种群结构特征

种群年龄结构受生物因素与非生物因素的综合影响,分析年龄结构可掌握种群的生存现状、生态特征及演替驱动机制<sup>[16-18]</sup>。库姆塔格沙漠天然梭梭种群年龄结构呈反“J”型曲线,属于稳定增长型种群,但因其幼苗数量相对较少,使其增长受限<sup>[19]</sup>。新疆甘家湖自然保护区白梭梭(*Haloxylon persicum* Bunge ex Boiss. et Buhse)种群年龄结构呈金字塔型,I—III 龄级个体数占总数的 79.8%<sup>[14]</sup>。准噶尔盆地山前戈壁梭梭种群 I、II、III 径级个体数占有径级个体总数的 96.2%,大径级个体缺失,该种群发育时间较短,种群处于增长阶段;干涸湖底梭梭种群 I、II、III 径级个体数占有径级个体总数的 63.4%,存在一定数量的大径级个体。该种群发育历史较长,处于稳定阶段<sup>[13]</sup>。本研究调查发现民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭年龄结构呈“金字塔”型分布,I、II、III 龄级的个体数量丰富,占总数的 90.1%。人工梭梭通过种子繁殖实现种群的更新。由于种子分布受风力影响较大,野外调查发现民勤人工梭梭 1 年生更新苗在林下枯落物下、下风向林缘、路堑及灌丛沙堆迎风坡大量分布。但由于沙质生境水分、养分条件限制和鼠害等外界干扰,其更新苗的聚集性特征明显,幼苗的生长与存活受到了抑制,保苗率极低<sup>[20]</sup>,造成对中、老龄人工梭梭个体补充不足。

#### 3.2 人工梭梭种群生存状况

种群生命表和存活曲线揭示了种群生存现状及其对环境的适应机制。古尔班通古特沙漠固沙灌木的存

活个体数呈逐级递减的趋势,幼龄个体占有很高的比例;固定沙丘上梭梭呈现 I 型存活曲线,种群退化;白梭梭呈现 II 型存活曲线,种群稳定;半固定沙丘上白梭梭呈 II 型存活曲线,种群相对稳定<sup>[21]</sup>;当土壤含水率低至 0.82% 时,无论大气干旱程度如何,古尔班通古特沙漠南缘沙漠梭梭幼苗死亡率都急剧升高。而当土壤含水率高于 1.25% 时,幼苗可以耐受大气干旱,幼苗死亡只与土壤表层含水率显著相关。当土壤含水率在 0.82—1.25% 之间时,幼苗死亡率与大气干旱程度(空气饱和差)显著相关<sup>[22]</sup>。古尔班通古特沙漠南缘生长初期的梭梭幼苗与短命植物的水分竞争中处于劣势,直接的降水增加并不能提高其存活率<sup>[23]</sup>。高的土壤盐分导致梭梭植株密度严重降低、抑制种子萌发和限制梭梭幼苗存活,进而使得梭梭林自然更新不良<sup>[24]</sup>。准噶尔盆地东南缘天然梭梭幼苗早期生长阶段的高死亡率,是由动物咬食和不利气候因素所致;而后一阶段是由于浅层土壤水分下降,造成死亡率较高<sup>[25]</sup>。本研究民勤绿洲边缘人工梭梭种群第 I、II、III 龄级人工梭梭个体死亡率和消失率最高,平均死亡率和消失率达 0.60 和 0.88。人工梭梭更新苗对沙区干旱、高温以及风蚀沙埋等逆境复合胁迫的适应能力差,造成部分个体在幼苗早期死亡。尤其在春夏季,沙面温度达 40℃ 以上,地表蒸发强烈,降水稀少,风沙活动频繁,由于根系所在土壤的持续旱化造成人工梭梭幼苗脱水死亡<sup>[26]</sup>。在野外经常可碰到干枯的更新苗个体。不同径级梭梭竞争指数大小依次为幼苗、幼年树和成年树<sup>[27]</sup>。人工梭梭幼龄个体对水分和养分的竞争能力较中老龄人工梭梭差,由于他疏作用同样也会出现干枯死亡的现象。由于气候生境条件的不同,古尔班通古特沙漠天然梭梭与民勤绿洲边缘人工梭梭种群退化的原因既有相似的地方,也有不同的地方。虽然土壤水分不足是天然和人工梭梭种群种子萌发阶段的决定性因素,但天然梭梭林土壤水分亏缺主要由气候干旱引起,而人工梭梭林土壤旱化的原因是栽植密度过大和土壤结皮阻碍降水入渗<sup>[28]</sup>。幼苗建成阶段天然和人工梭梭种群死亡消失的原因大致相似,高温、干旱、风沙胁迫及鼠害均是梭梭种群幼苗建成主要胁迫因子,但盐胁迫对人工梭梭的影响不大。

### 3.3 人工梭梭种群数量动态

种群数量动态是个体生存能力与环境因素相互作用的结果。时间序列预测分析表明,在未来 2、4 个龄级时间后,种群 II、IV 龄级个体数量大幅度增加,人工梭梭种群发展趋势较好。民勤人工梭梭林土壤种子库密度为 122.3 粒/m<sup>2</sup>, 0—2 cm 土层占 87.8%, 水平分布背风坡>丘间滩地>沙丘迎风坡>沙滩地,具备自然更新能力<sup>[29]</sup>。人工梭梭对降水下限要求不严,但对降水上限有较为严格的要求,180 mm 降水量是建立人工梭梭林的上限<sup>[28]</sup>;梭梭的根系分布范围 0—250 cm,单株平均总吸收根面积 12847.30 cm<sup>2</sup>,对降水响应显著。未来气候变化背景下,具有明显的竞争优势<sup>[30]</sup>。降水量 200 mm 以下的干旱荒漠区,绿洲边缘雨养或者降水和地下水共同维系的沙丘人工植被也会发生自组织过程,原来基本均匀栽植的植被出现斑块化,最大斑块面积、斑块密度、斑块聚集度在 20—30 a 出现,但种群自疏过程并未遵循随植被发育年龄变化的规律,而与生境与绿洲的距离及地下水埋深显著相关<sup>[31—32]</sup>。幼龄梭梭地上同化枝水力性状与光合能力和地下根系形态指标存在协同性。在地下水埋深增加条件下,幼龄梭梭采取降低黎明前同化枝水势和饱和膨压渗透势,增大根系直径和长度的生态策略,以增强水分缺失的耐受性和扩大水分吸收的面积来维持其生存<sup>[33]</sup>。幼龄人工梭梭的主要水分来源是降水补给的土壤水分。然而,当根系到达足够深度,干季水分来源为深层土壤水。20 a 和 40 a 林龄人工梭梭主要依靠深层可靠水源<sup>[34]</sup>。沙丘梭梭在降水事件发生时能够及时响应,而丘间低地梭梭对降水的利用不显著,夏季的严重干旱胁迫致使沙丘和丘间低地梭梭都增加了对地下水的利用,人工梭梭对地下水具有很强的依赖性,但是可以根据环境条件调节自身水分利用模式以适应荒漠环境<sup>[35]</sup>。最大熵模型模拟结果表明,对梭梭分布贡献率较高的环境因子有最湿季降水(39%)、温度(14.8%)、土壤类型(22.7%)、温度季节性(9.1%)。两种温室气体排放情景(RCP4.5 与 RCP8.5)下未来两个时期(2041—2060 年与 2061—2080 年)总适宜分布区的增加,主要来源于塔里木盆地,增加 127%—669%,而柴达木盆地的高适宜分布区减少了 4%—9%<sup>[36]</sup>。

### 3.4 人工梭梭种群经营管理

20 世纪 60 年代以来,甘肃民勤从新疆引种梭梭成功,进行大面积固沙造林,获得良好的固沙效果。但自

70年代中后期以来,人工栽植梭梭林普遍衰退,并发生大面积死亡,亟需进行恢复与重建<sup>[37]</sup>。王继和等提出控制密度、人工集雨、布设粘土或新型材料沙障、引进与培育抗旱新品种、特殊区域应用喷灌技术补水、地下水位恢复等退化人工梭梭林修复措施<sup>[38]</sup>。滴灌灌溉对退化梭梭的恢复具有重要作用,能够增大生长量,提高植被盖度<sup>[39]</sup>。以往退化人工梭梭林的恢复以生境土壤水分条件的改善为主,对退化人工梭梭种群自身的生物调控措施相对较少。人工梭梭全平茬处理明显促进了梭梭枝条生长和萌发,梭梭林地结皮的穴状破坏加速了降水水分入渗过程,降水入渗深度可达 70 cm,促进退化人工梭梭种群恢复<sup>[40]</sup>。奇台县西北湾乡荒漠人工梭梭林区,冬季处理的梭梭复壮效果要优于春季,100%平茬强度和 60 cm 平茬高度对梭梭更新复壮的综合效果最好<sup>[41]</sup>。适量水平的钠硅复合肥的施用能有效地促进梭梭的生长并提高其抗旱能力<sup>[42]</sup>。1961 年以来西北干旱区呈现明显暖湿化趋势,其中冬季增温最快,夏季降水增加速率最大<sup>[43]</sup>。在气候暖湿化背景下,民勤人工梭梭林的抚育管理应立足种群年龄结构现状,以种群结构优化为中心,重点解决幼龄个体死亡率较高的问题。根据林地土壤水分动态特征,在春季对 1 年生更新苗采取套聚氯乙烷(PVC)管的措施,防止风沙流、鼠害对更新苗的破坏。辅助人工梭梭更新苗渡过幼苗建成的脆弱阶段,为种群演替提供充足幼龄植株;对密度过大的中林龄采取平茬、间伐措施,维持林地土壤水分合理的植被承载力;对过熟梭梭人工林,应根据林地沙面结皮情况,适当予以人工栽植梭梭或种子撒播等辅助措施,以保证人工梭梭林自然更新的种子来源。在降雨增多的背景下,也可通过集雨沙障、集雨布、集雨板等各种集雨措施对退化中老林龄梭梭人工林进行集雨恢复。

#### 4 结论

民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭种群的年龄结构近似于“金字塔”型,存活曲线趋近于 Deevey-II 型,为稳定增长型种群,具有一定的自然更新能力,发展趋势较好。但人工梭梭种群第 I、II、III 龄级个体死亡率和消失率高的问题应予以关注,加强对幼龄级个体的精准抚育管理。充分利用降雨资源,通过人为辅助措施优化人工梭梭的年龄结构,促进人工梭梭林的可持续发展。

#### 参考文献(References):

- [1] 钟章成. 我国植物种群生态研究的成就与展望. 生态学杂志, 1992, 11(1): 6-10.
- [2] 谢宗强, 陈伟烈, 路鹏, 胡东. 濒危植物银杉的种群统计与年龄结构. 生态学报, 1999, 19(4): 523-528.
- [3] 闫桂琴, 赵桂仿, 胡正海, 岳明. 秦岭太白红杉种群结构与动态的研究. 应用生态学报, 2001, 12(6): 824-828.
- [4] 于大炮, 周莉, 董百丽, 代力民, 王庆礼. 长白山北坡岳桦种群结构及动态分析. 生态学杂志, 2004, 23(5): 30-34.
- [5] 韩路, 王家强, 王海珍, 宇振荣. 塔里木河上游胡杨种群结构与动态. 生态学报, 2014, 34(16): 4640-4651.
- [6] 解婷婷, 苏培玺, 周紫鹃, 张海娜, 李善家. 荒漠绿洲过渡带沙拐枣种群结构及动态特征. 生态学报, 2014, 34(15): 4272-4279.
- [7] 拓锋, 刘贤德, 黄冬柳, 王立, 刘润红, 赵维俊, 敬文茂. 祁连山大野口流域青海云杉种群数量动态. 生态学报, 2021, 41(17): 6871-6882.
- [8] Song C W, Li C J, Halik Ü, Xu X W, Lei J Q, Zhou Z B, Fan J L. Spatial distribution and structural characteristics for *Haloxylon ammodendron* plantation on the southwestern edge of the Gurbantünggüt desert. Forests, 2021, 12(5): 633.
- [9] 刘虎俊, 王继和, 常兆丰, 马全林, 杨自辉, 詹科杰. 石羊河下游荒漠植物区系及其植被特征. 生态学杂志, 2006, 25(2): 113-118.
- [10] 常兆丰, 刘虎俊, 赵明, 韩福贵, 仲生年, 唐进年. 民勤荒漠植被的形成与演替过程及其发展趋势. 干旱区资源与环境, 2007, 21(7): 116-124.
- [11] Frost I, Rydin H. Spatial pattern and size distribution of the animal-dispersed tree *Quercus robur* in two spruce-dominated forests. Ecoscience, 2000, 7(1): 38-44.
- [12] 宋于洋, 楚光明, 胡晓静. 古尔班通古特沙漠梭梭种群径级与龄级关系的研究. 西北植物学报, 2011, 31(4): 808-814.
- [13] 吕朝燕, 张希明, 刘国军, 吴俊侠, 闫海龙, 邓潮洲. 准噶尔盆地西北缘梭梭种群结构和空间格局特征. 中国沙漠, 2012, 32(2): 380-387.
- [14] 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. 干旱区资源与环境, 2016, 30(7): 90-94.
- [15] Hett J M, Loucks O L. Age structure models of balsam fir and eastern hemlock. Journal of Ecology, 1976, 64(3): 1029-1044.

- [16] 刘鑫, 焦健, 王婷, 张玲豫, 李朝周. 巴丹吉林沙漠南缘沙地芦苇种群生态特征. 干旱区研究, 2022, 39(1): 220-229.
- [17] 史浩伯, 师庆东, 戴岳, 周小龙, 万彦博, 彭磊. 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. 西北植物学报, 2021, 41(8): 1401-1408.
- [18] 王立龙, 王亮, 张丽芳, 刘玉洋, 徐世健. 不同生境下濒危植物裸木种群结构及动态特征. 植物生态学报, 2015, 39(10): 980-989.
- [19] 袁宏波, 张锦春, 褚建民, 刘淑娟, 唐进年, 丁峰. 库姆塔格沙漠典型植物种群年龄结构特征. 西北植物学报, 2011, 31(11): 2304-2309.
- [20] 丁峰, 纪永福, 陈芳, 张锦春, 刘有军, 王芳琳. 民勤梭梭林自然更新苗的空间分布特征. 甘肃林业科技, 2011, 36(3): 7-11.
- [21] 李功麟, 张定海, 张志山, 胡宜刚, 黄磊, 路丽宁. 古尔班通古特沙漠沙丘主要灌木的种群数量动态. 中国沙漠, 2021, 41(2): 129-137.
- [22] 田媛, 李建贵, 赵岩. 梭梭幼苗死亡与土壤和大气干旱的关系研究. 中国沙漠, 2010, 30(4): 878-884.
- [23] 田媛, 李建贵, 潘丽萍, 赵岩. 梭梭萌生与初期存活的关键影响因素. 生态学报, 2010, 30(18): 4898-4904.
- [24] 司朗明, 刘彤, 信誉. 古尔班通古特沙漠土壤因素对退化梭梭更新局限的影响. 生态学杂志, 2010, 29(10): 1925-1930.
- [25] 刘国军, 张希明, 李建贵, 吴俊侠, 魏疆, 李剑凌, 王学文. 准噶尔盆地东南缘天然更新梭梭苗期动态生命表及生存分析. 干旱区研究, 2010, 27(1): 83-87.
- [26] 陈芳, 纪永福, 张锦春, 丁峰, 刘有军, 刘虎俊, 王芳琳. 民勤梭梭人工林天然更新的生态条件. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1691-1695.
- [27] 郑颖, 赵文智, 张格非. 基于 V-Hegyi 竞争指数的绿洲边缘人工固沙植被梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 的种群竞争. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1127-1134.
- [28] 马全林, 王继和, 李淑娟. 降水、土壤水分和结皮对人工梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 林的影响. 生态学报, 2007, 27(12): 5057-5067.
- [29] 柴尔武. 民勤绿洲外围人工梭梭林种子库研究. 甘肃林业科技, 2009, 34(3): 12-14.
- [30] 徐贵青, 李彦. 共生条件下三种荒漠灌木的根系分布特征及其对降水的响应. 生态学报, 2009, 29(1): 130-137.
- [31] 赵文智, 郑颖, 张格非. 绿洲边缘人工固沙植被自组织过程. 中国沙漠, 2018, 38(1): 1-7.
- [32] 赵鹏, 徐先英, 屈建军, 张进虎, 马全林, 张慧文, 徐高兴, 马俊梅, 吴永梅. 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭群落与水土因子的关系. 生态学报, 2017, 37(5): 1496-1505.
- [33] 刘深思, 徐贵青, 陈图强, 米晓军, 刘燕, 马健, 李彦. 地下水埋深对幼龄梭梭功能性状的影响. 应用生态学报, 2022, 33(3): 733-741.
- [34] Zhou H, Zhao W Z, Zhang G F. Varying water utilization of *Haloxylon ammodendron* plantations in a desert-oasis ecotone. Hydrological Processes, 2017, 31(4): 825-835.
- [35] 李宁, 周海, 任珩, 种培芳, 陈国鹏. 不同地下水水位处梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 水分来源特征. 中国沙漠, 2021, 41(4): 79-86.
- [36] 常红, 刘彤, 王大伟, 纪孝儒. 气候变化下中国西北干旱区梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 潜在分布. 中国沙漠, 2019, 39(1): 110-118.
- [37] 刘家琼, 黄子琛, 鲁作民, 丁声怀, 王继和. 对甘肃民勤人工梭梭林衰亡原因的几点意见. 中国沙漠, 1982, 2(2): 44-46.
- [38] 王继和, 马全林. 民勤绿洲人工梭梭林退化现状、特征与恢复对策. 西北植物学报, 2003, 23(12): 2107-2112.
- [39] 郭树江, 方峨天, 杨自辉, 王强强, 王多泽, 张剑挥. 民勤荒漠绿洲过渡带退化梭梭滴灌恢复试验研究. 防护林科技, 2015, (2): 4-6.
- [40] 张锦春, 纪永福, 王芳林, 陈芳, 王基金, 王功时, 曹虎. 民勤退化人工梭梭种群雨养恢复试验研究. 西北林学院学报, 2010, 25(1): 77-81.
- [41] 吉小敏, 宁虎森, 梁继业, 罗青红, 雷春英. 典型荒漠与绿洲过渡带人工梭梭林平茬复壮试验研究. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(12): 37-43.
- [42] 康建军, 王锁民, 杨自辉. 钠、硅及钠硅互作提高梭梭抗旱性的研究. 中国沙漠, 2012, 32(3): 793-800.
- [43] 王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述. 气候变化研究进展, 2017, 13(5): 483-493.