



塔里木河下游珍稀濒危植物胡杨的 种群生存特征研究

王希义¹, 徐海量^{2*}, 潘存德¹, 凌红波², 苑塏焯¹

(1 新疆农业大学, 乌鲁木齐 830052; 2 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 该研究以种群生命表和生存分析理论为基础, 采用空间代替时间法和分段均滑技术, 编制了塔里木河下游地区胡杨种群特定时间生命表, 绘制了胡杨种群的存活曲线、死亡率曲线, 并分析了种群数量动态变化过程。结果表明: (1) 胡杨种群的存活曲线属于凹型, I ~ III 龄级死亡率在 20% 以下, 从 III 龄级到 VIII 龄级死亡率增加迅速, 并在 VIII 龄级达到高峰, 之后一直保持在 50% 以上。 (2) 胡杨种群累积死亡率从 I ~ VIII 龄级增加了 75.79%, IX ~ XII 龄级累积死亡率仅增加 5.07%, 胡杨幼苗和幼树的死亡率高; 种群危险率在第 VII 龄级已经达到 0.142 3, 至第 XII 龄级达到 0.217 4, 表明随着胡杨年龄的增加, 危险率也增加; 死亡密度在 VII 龄级与 IX 龄级之间减少了 0.018 7, 说明从 VII 龄级到 IX 龄级有大量的胡杨死亡。 (3) 胡杨种群数量动态除了受基波的影响外, 在第 VI 龄级处还有一个明显的小周期波动, 这也许与该龄级胡杨的生理特性或人为干扰有关。

关键词: 胡杨; 种群统计; 生存函数; 谱分析; 塔里木河下游

中图分类号: Q948.15⁺4

文献标志码: A

Population Survival Characteristics of *Populus euphratica* Which Is Rare and Endangered in the Lower Reaches of Tarim River

WANG Xiyi¹, XU Hailiang^{2*}, PAN Cunde¹, LING Hongbo², YUAN Kaiye¹

(1 Xianjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Based on the population life table and survival analysis theory, I used the method that space instead of time and piecewise sliding technology to create the time-specific life table of *Populus euphratica* population in the lower reaches of Tarim River. Then, I drew the survival curve and mortality curve of *P. euphratica* population, and analyzed the dynamic variation process. The results are as follows: (1) the survivorship curve of *P. euphratica* population was a concave; the death rate, which were all below 20% in I – III, increased rapidly from III to VIII and reached the peak at VIII age-class, and maintain above 50% after VIII age-class. (2) Cumulative mortality rate of *P. euphratica* population increased 75.79% from I to VIII age-class; However, the cumulative mortality rate form IX to XII only increased 5.07%, that indicated there was a high death rate of seedling and sapling of *P. euphratica* population; Hazard index, which was 0.142 3 at VII age, was reached 0.217 4 at XII age, which indicated that hazard index was increased along with the increase of age of *P. euphratica*; The mortality density decreased 0.018 7 that was remarkable

收稿日期: 2017-05-23; 修改稿收到日期: 2017-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(31370551, 41471099, 31400466); 中国科学院“西部之光”人才培养计划(XBBS-2014-13); 中国科学院特色研究所主要服务项目 2 课题 2(TSS-2015-014-FW-2-2)

作者简介: 王希义(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事生态需水与恢复生态学研究. E-mail: binzhouwxy@163.com

* 通信作者: 徐海量, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事恢复生态学研究. E-mail: xuhl@ms.xjb.ac.cn

between VII age and IX age, explained that there was amount of *P. euphratica* died from VII to IX .(3) Spectral analysis of the population showed that the natural regeneration of *P. euphratica* population was a minor periodic change in VI age class, that perhaps be connected with the physiological property of *P. euphratica* and human disturbance.

Key words: *Populus euphratica*; demography; survival function; spectrum analysis; lower reaches of Tarim river

植物种群统计是研究种群动态的方法之一^[1-2],而其核心——生命表的结构分析是阐述种群动态变化的前提。通过对生命表进行编制,可以分析生存率、死亡率等参数,从而揭示种群的现状特征^[3-4]。不同振幅和相应谐波组成了复杂的波动周期,而谱分析是探讨种群波动性和更替周期性的工具。因此植物种群生命表编制和谱分析研究对于揭示种群的生存特征、和数量特征具有重要现实意义。

胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)是新疆塔里木河流域的优势树种,对维持当地脆弱的生态平衡具有重要作用。因此,胡杨生态学特性及其在生态环境中的作用越来越受到人们的关注。一些学者曾针对塔里木河上中游胡杨的分布、群落特征或种内竞争^[5-6]等进行了研究,并探讨了胡杨与环境因子间的关系^[7-9]等。针对塔里木河下游胡杨的研究主要集中在胡杨空间分布^[10-11]、胡杨生理特征^[12-13]、胡杨与生态输水的关系^[14-15]等方面,但是针对塔里木河下游胡杨种群生存特征的研究较为少见。

本研究在对塔里木河下游胡杨种群进行详细调查的基础上,采用空间代替时间的方法,以种群生命表和生存函数分析法探讨了区域内胡杨种群的结构、动态、生存状况,同时应用谱分析方法揭示了胡杨种群动态变化特征,以期探讨塔里木河下游胡杨衰退机制、分析胡杨种群恢复方式、制定抑制荒漠化过程的措施提供科学依据。

1 研究区概况

塔里木河位于新疆南部,塔克拉玛干沙漠北缘,是中国最长的内陆河^[16]。塔里木河下游是指从大西海子水库到台特玛湖之间的区域(图 1),西依塔克拉玛干沙漠,东连库鲁克沙漠,属温带大陆性干旱荒漠气候,年降水量仅为 17.4~42.0 mm,而潜在年均蒸发量却高达 2 500~3 000 mm^[17],是中国典型的干旱荒漠区。乔木主要是胡杨,灌木包括怪柳(*Tamarix chinensis*)、黑刺(*Lycium ruthenicum*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)等,草本植物主要有芦苇(*Phragmites communis*)、胀果甘草

(*Glycyrrhiza inflata* Batalin)、鹿角草(*Glossogyne tenuifolia*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、花花柴(*Karelinia caspica*)、盐生草(*Halogeton glomeratus*)等。自 2000 年开展生态输水以来,大量死亡或濒临死亡的植被又开始复苏,盖度和多样性有所回升,在河漫滩以及河道两侧的低阶地内形成了大面积的乔灌木带^[18]。

2 研究方法

2.1 外业调查

根据塔里木河下游胡杨的分布范围,选取塔里木河下游所设立的英苏、喀尔达依、阿拉干、依干不及麻 4 个断面为研究地点。对于每一个断面,选择具有代表性、未受人类破坏的地段,垂直于河道设置一个长 2 000 m、宽 100 m 的样带。然后将监测样带平均分成 20 个 100 m×100 m 的大样方,首先统计各个大样方内胡杨的数量,对每个大样方内的胡杨(*DBH*≥4 cm),记录其胸径、树高等;对于 *DBH*≤4 cm 的幼苗及幼树,记录其数量、高度,同时记录整个样方的生境条件。

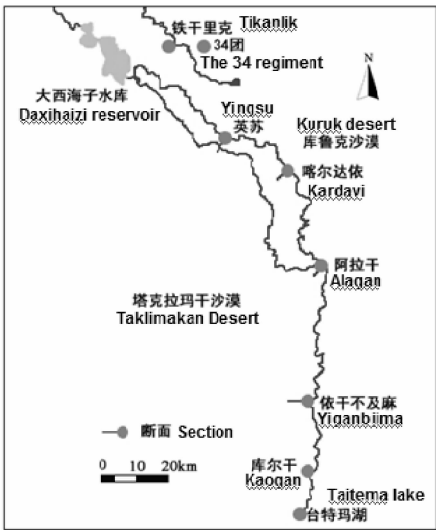


图 1 塔里木河下游监测断面分布示意图
Fig. 1 The schematic diagram of each section in the lower reaches of Tarim River

2.2 静态生命表编制与生存函数分析

本研究采用空间代替时间的方法,推测种群时间上的动态变化过程。首先将胡杨依据胸径的大小进行分级。由于胡杨胸径与树龄之间存在显著正相关($R^2 > 0.96$)^[19],因此,可以用立木级结构代替年龄结构。本研究按照 1960 年森林专业调查办法草案中的规定并结合胡杨的生活史特点,将种群划分为 12 个胸径级,第 1 径级胸径为 0~4 cm,之后每径级间隔 4 cm;第 1 径级对应 I 龄级,第 2 径级对应 II 龄级,以此类推,统计各龄级株数,编制胡杨种群静态生命表,进而分析其动态变化。

由于本研究所调查的胡杨种群为天然林,并且所收集的数据为同一时期内胡杨种群所有个体的径级数据,因此所得数据反映的是一个特定时间内多个世代重叠的年龄动态过程,并非对该种群全部生活史的追踪^[20]。因此,调查所得数据并不完全满足编制生命表的 3 个假设,如死亡率可能为负值等。本研究采取均滑技术进行处理^[21],采用方程拟合的方法进行匀滑。

静态生命表一般包括以下几个指标或参数: a_0 为第 I 龄级的现存个体数; x 为单位时间内年龄等级的中值; a_x 为 x 龄级内现存个体数; l_x 为在 x 龄级开始时标准化存活个体数(一般转化为 1 000); d_x 为从 x 到 $(x+1)$ 龄级间隔期内标准化死亡数; q_x 为从 x 到 $(x+1)$ 龄级间隔期间死亡率; L_x 为从 x 到 $x+1$ 龄级间隔期还存活的个体数; T_x 为从 x 龄级到超过 x 龄级的个体总数; e_x 为进入 x 龄级个体的生命期望或平均期望寿命^[22]。表中各项可通过以下公式计算:

$$\begin{aligned} l_x &= a_x/a_0 \times 1\,000; d_x = l_x - l_{x+1}; \\ q_x &= d_x/l_x \times 100\%; I_x = (l_x + l_{x+1})/2; \\ e_x &= T_x/l_x; T_x = \sum_x^{\infty} I_x \end{aligned}$$

为了更好地分析胡杨种群结构形式并阐明其生存规律,本研究引入生存分析中的 4 个函数^[23]:生存率函数 $S(t)$ 、累积死亡率函数 $F(t)$ 、危险率函数 $\lambda(t)$ 、死亡密度函数 $f(t)$ 。4 个函数的计算公式如下:

$$\begin{aligned} S(t) &= S_i = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdots p_n \\ F(t) &= F_i = 1 - S_i \\ \lambda(t) &= \lambda(t_i) = \frac{2q_i}{h_i(1+p_i)} \\ f(t) &= f(t_i) = \frac{S_{i-1} - q_i}{h_i} \end{aligned}$$

式中, S 、 p_i 和 q_i 分别表示 I 龄级生存率、存活频率和死亡频率; h_i 表示第 i 龄级间隔。

2.3 谱分析方法

谱分析是 Fourier 级数的展开,它可以揭示种群数量的周期性波动,是探讨林分分布波动性和年龄更替过程周期性的数学工具^[24]。胡杨种群的天然更新过程可以通过不同龄级株数分布波动而表现,复杂的周期现象可以由不同振幅和相应的谐波组成,最终以正弦波形式表示:

$$N_t = A_0 + \sum_{i=1}^n A_k \sin(\omega_k t + \theta_k)$$

式中: A_0 为周期变化的平均值; A_k ($k=1,2,3,\cdots,k$) 为各谐波的振幅,标志其所起作用的大小,其值的差异反映了各周期作用的大小差别; ω_k 及 θ_k 分别为谐波频率及相角; N_t 为 t 时刻种群的大小。

将种群各年龄个体分布视为一个时间系列 t ,以 X_t 表示 t 年龄序列时的个体数; n 为系列总长度; $p=n/2$ 为谐波总个数; T 为正弦波的基本周期,即时间序列 t 的最长周期,即资料的总长度($T=n$)。Fourier 分解中各个参数评估公式^[25]如下:

$$\begin{aligned} \theta_k &= \arctg(a_k/b_k); A_k^2 = a_k^2 + b_k^2; \omega_k = 2\pi k/T; \\ A_0 &= 1/n \sum_{i=1}^n x; \\ a_k &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n X_i \cos \frac{2\pi k(t-1)}{n}, b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n X_i \sin \frac{2\pi k(t-1)}{n} \end{aligned}$$

本研究各龄级胡杨个体数量相差较大,在计算时需进行对数化处理,即以 $X'_t = \ln(X_t + 1)$ 代换公式中的 X_t (X_t 值即为表 1 存活数栏中所对应的数值)。利用谱分析公式可计算出各个波形的振幅 A_k 值($k=1,2,3,\cdots,p$, $p=n/2$),其中 n 为数据总长度。 A_1 为基波, $A_2 - A_6$ 为各个谐波。每个谐波的周期分别是基本周期的 $1/2, 1/3, \cdots, 1/p$ 。

3 结果与分析

3.1 生命表编制

本研究中,首先采取匀滑技术进行处理。各龄级为自变量,存活数为因变量,拟合方程为: $y = 95.96e^{-0.1685x}$, $R^2 = 0.876\,8$;而后利用方程求出各龄级的存活数,经匀滑修正后得 a'_x ,然后再编制出胡杨种群的静态生命表。

由表 1 可知,塔里木河下游胡杨种群存活数随着年龄增加呈现下降的趋势;Ⅰ~Ⅲ级死亡率较低,均在 20% 以下;Ⅳ~Ⅷ级死亡率较高,均在 50% 以上。因此不同龄级胡杨的死亡率差异较大。平均生

表 1 胡杨种群静态生命表

Table 1 Static life table of *P. euphratica* population

龄级 Age class	径级 DBH class/cm	组中值 Midvalue of class	存活数 Survival number	a'_x	l_x	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	$\ln(l_x)$
I	0~4	2	105	81	1000	190	0.190	926	5 119	5.119	6.908
II	4~8	6	39	69	852	125	0.147	784	4 193	4.921	6.748
III	8~12	10	60	58	716	131	0.183	661	3 409	4.761	6.574
IV	12~16	14	55	49	605	124	0.205	556	2 748	4.542	6.405
V	16~20	18	37	41	506	123	0.243	469	2 192	4.332	6.227
VI	20~24	22	42	35	432	131	0.303	401	1 723	3.988	6.068
VII	24~28	26	40	30	370	164	0.443	340	1 322	3.573	5.914
VIII	28~32	30	25	25	309	187	0.605	284	982	3.178	5.733
IX	32~36	34	21	21	259	149	0.575	241	698	2.695	5.557
X	36~40	38	15	18	222	132	0.595	204	457	2.059	5.403
XI	40~44	42	15	15	185	110	0.595	173	253	1.368	5.220
XII	>44	46	12	13	160	97	0.606	80	80	0.500	5.075

命周期 e_x 反映了各龄级内个体的平均生存能力^[26]。随着龄级的增加,塔里木河下游胡杨的生命周期呈单调下降趋势,与死亡率曲线相反,表明胡杨幼苗数量增加,幼树的数量也较多,这可能与生态输水导致的地下水位升高和漫溢作用有关。另外,随着胡杨个体的长大或衰老,对资源的需求量加大,种内竞争加剧,并且与怪柳、骆驼刺等种间竞争也逐渐增强,胡杨种群的死亡率增加,这反映胡杨生理功能的衰退。

3.2 胡杨种群存活与死亡率曲线

以胡杨种群的生命表为基础,以胡杨龄级为横坐标,以标准化存活量 l_x 、死亡率 q_x 为纵坐标,绘制图 2。本研究依据 Deevey^[27]的研究结果,将存活曲线分为凸形、直线型、凹型 3 种类型。由图 2 而得,塔里木河下游胡杨种群的存活曲线属于凹型。

从图 2 中可以看出,胡杨种群的存活数随着龄级的增加呈现下降趋势,前期下降相对较快,后期逐渐变缓,变化趋势不明显。胡杨死亡率曲线在第 II 龄级出现一个低谷,主要原因可能是生态输水的增加导致地下水量增加,漫溢干扰强度也相应加大,使胡杨幼苗的存活率增大,死亡率降低。胡杨的死亡率曲线在前期增加迅速,到 VIII 龄级达到高峰,后期波动不大;VIII 龄级以后的胡杨树体生理功能衰退,构建更新困难,与周围植株的竞争十分激烈,这导致了 VIII 龄级以后的胡杨种群死亡率处于较高水平。

3.3 胡杨种群生存函数分析

首先对胡杨种群的 4 个生存函数进行了估算

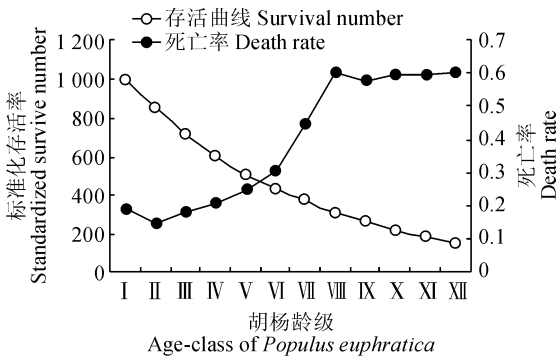


图 2 胡杨种群存活曲线与死亡率曲线
Fig. 2 The survival curve and mortality curve of *P. euphratica* population

(表 2)。由表 2 得知,胡杨种群生存率逐渐下降,而累积死亡率函数单调上升,并且 2 个函数的变化幅度均是前期大于后期。这表明胡杨幼龄到近熟林株数较多,变化幅度较大,到成年后株数减少,种群趋于稳定。

另外,从表 2 中还可以看出,胡杨种群的累积死亡率从 I ~ VIII 龄级增加了 75.79%,而 IX ~ XII 龄级累积死亡率仅增加 5.07%,这表明胡杨种群的死亡树木主要集中在 I ~ VIII 龄级之间,造成幼龄到近熟树木大量死亡的原因主要是对环境恶化的适应能力较差,并且个体生长能力较弱。危险率在第 VII 龄级已经达到 0.142 3,其后处于波动增加状态,至第 XII 龄级达到最高(0.217 4),表明随着胡杨年龄的增加,树木的生存能力和生理功能逐渐衰退,危险率增加。胡杨种群在 VII 龄级的死亡密度为 0.026 2,到第

表 2 胡杨种群不同龄级的 4 个生存函数估算值

Table 2 Estimated values of 4 survival functions to different age classes of *P. euphratica* population

项目 Item	龄级 Ageclass											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
DBH/cm	0~4	4~8	8~12	12~16	16~20	20~24	24~28	28~32	32~36	36~40	40~44	>44
生存率 Survival rate S(t)	0.81	0.690 9	0.564 5	0.448 8	0.339 7	0.236 8	0.131 9	0.052 1	0.022 1	0.008 9	0.003 6	0.0014
累积死亡率 Cumulative mortality F(t)	0.19	0.309 1	0.435 5	0.551 2	0.660 3	0.763 2	0.868 1	0.947 9	0.977 9	0.991 1	0.996 4	0.998 6
危险率 Hazard rate λ(t)	0.052 5	0.039 7	0.050 4	0.057 1	0.069 2	0.089 3	0.142 3	0.216 8	0.201 8	0.211 7	0.211 7	0.2174
死亡密度 Death density f(t)	0.038 5	0.029 8	0.031 6	0.028 9	0.027 3	0.025 7	0.026 2	0.019 9	0.007 5	0.003 3	0.001 3	0.000 5

表 3 胡杨种群的周期性波动

Table 3 Cyclical fluctuation of *P. euphratica* population

项目 Item	基波 Fundamental			谐波 Harmonic		
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
振幅 Amplitude	0.619 9	0.311 5	0.146 5	0.289 6	0.290 5	0.319 8

Ⅸ龄级的死亡密度为 0.007 5,因此可以判断在Ⅶ龄级~Ⅸ龄级中间有相当数量的胡杨树木死亡。综合以上函数值,说明塔里木河下游胡杨种群具有前期数量大波动大,后期趋于稳定的特点。

3.4 胡杨种群数量动态的谱分析

表 3 中阐述了塔里木河下游胡杨种群的周期性波动特征。由表 3 得出,胡杨种群天然更新波动明显,A_k 值中基波最大(A₁=0.619 9),说明胡杨种群数量动态变化过程受基波的影响明显。

表 3 未能反映出明显波动的固有周期,这也许受到所调查胡杨种群年龄结构不够长的影响。另外,胡杨种群数量动态除了受基波的影响外,还有一个明显的小周期波动,如 A₃,其波动周期在空间序列的胸径 22 cm 处,与第Ⅵ龄级相对应,这也许与该龄级胡杨的生理特性或人为破坏有关。小周期的波动受到胡杨林分更新和人为干扰的影响,并且也与种群的生长周期存在一定关系。总体而言,胡杨种群数量动态存在周期性波动,在大周期内有小周期波动,胡杨种群天然更新动态特征需要通过胡杨不同龄级的株数分布来实现。

4 讨 论

种群生命表和存活曲线是研究种群动态和进行种群统计的重要工具,通过编制生命表和分析存活曲线可以为种群数量的统计提供更多信息^[28-29]。因此,生命表和存活曲线在种群分析中具有很高的应用价值。本研究利用空间序列代替时间序列,即以径级代替龄级的方法进行生命表编制。随着龄级的增加,胡杨种群的数量逐渐越少,整体表现为增长

型种群;胡杨种群死亡率呈上升趋势,这与胡杨的生理生态学特性及环境因素有关,如干旱、水资源、土壤成分等^[30-31]。塔里木河下游胡杨幼苗和幼树死亡率高,与韩路等^[32]的研究得出塔里木河上游胡杨幼苗的死亡率较高结果相似。但是塔里木河下游胡杨幼苗与幼树数量依然很多,这可能与塔里木河下游地下水抬升、河水漫溢有关。随着树木的生长发育,胡杨个体对周围资源的需求增加,种内和种间的竞争加剧,导致种群密度下降,死亡率增加,这与吴俊侠等^[33]、王夏楠^[34]的研究结果相一致。

塔里木河下游胡杨种群的危险率呈波浪状,生存率函数与存活曲线变化形式基本一致,种群生存率和累积死亡率的变化幅度呈现前期大后期小的特征,这与宋萍等^[35]研究相一致。胡杨种群的死亡树木主要集中在Ⅰ~Ⅷ龄级之间,因为此区间内胡杨基数大,死亡数量相应增多,并且此区间内的胡杨对环境恶化的适应能力较差,个体生长能力较弱^[36-37]。另外,胡杨种群危险率在第Ⅶ龄级已经达到 0.142 3,其后处于波动增加状态,至第Ⅻ龄级达到最高,表明随着胡杨年龄的增加,树木的生存能力和生理功能逐渐衰退,危险率增加,这与萨如拉^[38]对额济纳胡杨林的研究成果相同。胡杨种群Ⅶ龄级~Ⅸ龄级中间有相当数量的胡杨树木死亡,因此Ⅶ龄级~Ⅸ龄级的胡杨可能是胡杨个体生长过程中生理生态功能衰退的转折点,具体的原因需要进一步讨论。

种群的周期性波动是其维持稳定性的一个机制,而谱分析法可用于表明这种机制^[39]。基波表现了种群最基本的周期性波动,其波动周期是该种群

本身所固有的特性^[40-41]。本研究经谱分析后得出胡杨种群呈基波周期内的小周期波动,表明胡杨种群的个体生长和个体数量都呈周期波浪式发展,并且胡杨幼苗对各个龄级的补充不稳定,也不连续,这与王思奇^[42]的研究结果相一致,因此需要针对不同龄级胡杨种群的实际情况补充相应数量的幼苗,以保证胡杨种群的持续发展。胡杨个体的周期性波动与种群的生长模式、生存环境密切相关,也与树种的生理生态学特性存在一定关系,以后需针对这些方面开展研究,以便了解胡杨种群的生长和天然更新周期性波动的影响因素和影响方式,试图为塔里木河下游胡杨林的持续经营提供理论依据,对于促进林木生长和维持生态系统稳定具有重要意义。

生命表编制和种群谱分析的前提是对种群个体胸径的划分,若采取不同的径级划分方法是否对种群动态存在影响,影响方式或程度如何?采用何种径级划分更能表现种群的数量动态?这些问题还都有待于进一步研究。另外,本研究中设定的胡杨最大径级为44 cm,时间序列长度不足以表现出基本的周期,但其肯定存在。因此,塔里木河下游胡杨生长

动态周期性波动特征以及因果关系有待进一步研究。

5 结 论

(1)塔里木河下游胡杨种群存活数随着年龄增加呈现下降的趋势;Ⅰ~Ⅲ级死亡率在20%以下;Ⅷ~Ⅻ级死亡率在50%以上;随着龄级的增加,胡杨的生命周期呈单调下降趋势;种群的存活曲线属于凹型;胡杨的死亡率曲线在前期增加迅速,到Ⅷ龄级达到高峰。

(2)塔里木河下游胡杨种群累积死亡率从Ⅰ~Ⅷ龄级增加了75.79%,Ⅸ~Ⅻ龄级累积死亡率仅增加5.07%;危险率在第Ⅶ龄级已经达到0.142 3,至第Ⅻ龄级达到0.217 4;种群在Ⅶ龄级的死亡密度为0.026 2,到第Ⅸ龄级的死亡密度为0.007 5。

(3)本研究时间序列长度不足以表现出基本周期,林分未达到成熟阶段;胡杨种群数量动态除了受基波的影响外,在第Ⅵ龄级处,还有一个明显的小周期波动,这也许与该龄级胡杨的生理特性或人为干扰有关。

参考文献:

[1] 程治国. 南京老城区残存山体植被特征研究[D]. 南京:南京林业大学,2012.

[2] 韩 路. 塔里木河上游荒漠河岸林植物群落动态与优势种群生态特征研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.

[3] 苏建荣,张志钧,邓 疆,等. 云南红豆杉种群结构与生命表分析[J]. 林业科学研究,2005,18(6):651-656.

SU J R, ZHANG Z J, DENG J, *et al.* Population structure and life table of the endangered population of *Taxus yunnanensis*[J]. *Forest Research*, 2005, 18(6):651-656.

[4] 吴明开,沈志君,刘 海,等. 梵净山自然保护区珙桐天然种群生命表与生存分析[J]. 生态学杂志,2012,31(6):1 419-1 424.

WU M K, SHEN Z J, LIU H, *et al.* Life table and survival analysis of natural *Davidia involucrata* population in Fanjing Mountain Nature Reserve, Guizhou Province of Southwest China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(6):1 419-1 424.

[5] 李志军,刘建平,于 军,等. 胡杨、灰叶胡杨生物生态学特性调查[J]. 西北植物学报,2003,23(7):1 292-1 296.

LI Z J, LIU J P, YU J, *et al.* Investigation on the characteristics of biology and ecology of *Populus euphratica* and *Populus pruinosa* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(7):1 292-1 296.

[6] 韩 路,王海珍,周正立,等. 塔里木河流域灰叶胡杨种内竞争研究[J]. 塔里木大学学报,2006,18(2):1-4.

HAN L, WANG H Z, ZHOU Z L, *et al.* Study on intraspecific competition in *P. pruinosa* schrenk forest in Tarim River Basin[J]. *Journal of Tarim University*, 2006, 18(2):1-4.

[7] 王海珍,韩 路,李志军,等. 塔里木河上游胡杨与灰杨光合水分生理特性[J]. 生态学报,2009,29(11):5 843-5 850.

WANG H Z, HAN L, LI Z J, *et al.* The photosynthetic and water physiological characteristics of *Populus euphratica* and *Populus pruinosa* in the upper reaches of Tarim River[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2009, 29(11):5 843-5 850.

[8] 王家强,伍维模,李志军,等. 基于高光谱指数的塔里木河上游胡杨和灰叶胡杨叶片氮素含量估测[J]. 生态学杂志,2014,33(10):2 858-2 864.

WANG J Q, WU W M, LI Z J, *et al.* Estimating leaf nitrogen content of *Populus euphratica* and *P. pruinosa* in the upper reaches of Tarim River using hyperspectral index[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(10):2 858-2 864.

[9] 赵正帅,郑亚琼,梁继业,等. 塔里木河流域胡杨和灰叶胡杨克隆分株空间分布格局[J]. 应用生态学报,2016,27(2):403-411.

ZHAO Z S, ZHENG Y Q, LIANG J Y, *et al.* Spatial distri-

bution pattern of *Populus euphratica* and *P. pruinosa* clonal ramets in Tarim River Basin, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(2):403-411.

[10] 张绘芳,李 霞.塔里木河下游胡杨种群空间分布格局分析[J].西北植物学报,2006,**26**(10):2 125-2 130.

ZHANG H F, LI X. Spatial distribution pattern of *Populus euphratica* populations in the Lower Reaches of Tarim River [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, **26** (10):2 125-2 130.

[11] 塔依尔江·艾山,玉米提·哈力克,艾尔肯·艾白不拉,等.塔里木河下游阿拉干断面胡杨林空间分布特征及其影响因素[J].干旱区资源与环境,2011,**25**(12):156-160.

TAYIERJIANG A, UMUT H, ARKIN H, *et al.* Spatial distribution of *Populus euphratica* forests on Argan section in the lower reaches of Tarim River and its influencing factors [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, **25**(12):156-160.

[12] 苏里坦,关东海,王兴勇,等.塔里木河下游胡杨林耗水数值模型[J].水科学进展,2014,**25**(4):511-517.

SU L T, GUAN D H, WANG X Y, *et al.* Numerical model of water consumption of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River[J]. *Advances in Water Science*, 2014, **25** (4):511-517.

[13] 徐海量,宋郁东,王 强.胡杨生理指标对塔里木河下游生态输水的响应[J].环境科学研究,2003,**16**(4):24-27.

XU H L, SONG Y D, WANG Q. Response of physiological indexes of *Populus euphratica* to ecological water transport in the lower reaches of the Tarim River[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2003, **16**(4):24-27.

[14] 赵万羽,陈亚宁,周洪华,等.塔里木河下游生态输水后衰败胡杨林更新能力与条件分析[J].中国沙漠,2009,**29**(1):108-113.

ZHAO W Y, CHEN Y N, ZHOU H H, *et al.* Reproductive ability and relative environment factors of degraded *Populus euphratica* forest in ecological water delivery project at lower reaches of Tarim River[J]. *Journal of Desert Research*, 2009, **29**(1):108-113.

[15] 安红燕,叶 茂,徐海量,等.塔里木河下游胡杨径向生长量对生态输水的响应[J].中国沙漠,2011,**31**(4):957-962.

AN H Y, YE M, XU H L, *et al.* Response of radial increment of *Populus euphratica* to ecological water conveyance in lower reaches of the Tarim River[J]. *Journal of Desert Research*, 2011, **31**(4):957-962.

[16] 陈亚宁,郝兴明,李卫红,等.干旱区内陆河流域的生态安全与生态需水量研究——兼谈塔里木河生态需水量问题[J].地球科学进展,2008,**23**(7):732-738.

CHEN Y N, HAO X M, LI W H, *et al.* An analysis of the ecological security and ecological water requirements in the inland river of arid region[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, **23**(7):732-738.

[17] 徐海量,宋郁东,王 强,等.塔里木河中下游地区不同地下水位对植被的影响[J].植物生态学报,2004,**28**(3):400-405.

XU H L, SONG Y D, WANG Q, *et al.* The effect of groundwater level on vegetation in the middle and lower reaches of the Tarim river, Xinjiang, China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, **28**(3):400-405.

[18] 顾亚亚,张世卿,李先勇,等.濒危物种胡杨胸径与树龄关系研究[J].塔里木大学学报,2013,**25**(2):66-69.

GU Y Y, ZHANG S Q, LI X Y, *et al.* Relationship between diameter at breast height and age of endangered species *Populus euphratica* Oliv [J]. *Journal of Tarim University*, 2013, **25**(2):66-69.

[19] 徐海量,李吉玫,张占江,等.塔里木河下游退化荒漠河岸林地上植被与土壤种子库关系初探[J].中国沙漠,2008,**28**(4):657-664.

XU H L, LI J M, ZHANG Z J, *et al.* Study on relation between soil seed bank and standing vegetation along different degradation levels of desert riverside forest in lower reaches of Tarim River[J]. *Journal of Desert Research*, 2008, **28**(4):657-664.

[20] 程 伟,吴 宁,罗 鹏.岷江上游林线附近岷江冷杉种群的生存分析[J].植物生态学报,2005,**29**(3):349-353.

CHENG W, WU N, LUO P. Survival analysis of *Abies faxoniana* populations near timberline on the upper Minjiang River [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, **29** (3):349-353.

[21] 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.

[22] 江 洪.云杉种群生态学[M].北京:中国林业出版社,1992,8-26.

[23] 毕晓丽,洪 伟,吴承祯,等.黄山松种群统计分析[J].林业科学,2002,**38**(1):61-67.

BI X L, HONG W, WU C Z, *et al.* Population statistics analysis of *Pinus taiwanensis* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, **38**(1):61-67.

[24] 伍业钢,韩进轩.阔叶红松林红松种群动态的谱分析[J].生态学杂志,1998,**7**(1):10-22.

WU Y G, HAN J X. A Spectral analysis of the population dynamics of Korean pine in the mixed broad-leaved *Pinus koraiensis* forest[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, **7**(1):10-22.

[25] 陈远征,马祥庆,冯丽贞,等.濒危植物沉水樟的种群生命表和谱分析[J].生态学报,2006,**26**(12):4 267-4 272.

CHEN Y Z, MA X Q, FENG L Z, *et al.* The population life table and periodic fluctuation of *Cinnamomum micranthum*, an

- endangered plant[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(12): 4 267-4 272.
- [26] 龙 成,杨小波,龙文兴,等. 铜鼓岭热带常绿季雨矮林 5 种蒲桃属植物的种群结构及空间格局[J]. *林业科学*, 2015, **51**(2): 18-27.
- LONG C, YANG X B, LONG W X, *et al.* Population structure and spatial patterns of five *Syzygium* species in tropical evergreen monsoon elfin forest, Tongguling[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, **51**(2):18-27.
- [27] DEEVEY E. Life tables for natural populations of animals [J]. *Quart RevDiol*, 1947, **22**:283 -314.
- [28] GAIL M H, WARE J H. Comparing observed life table data with a known survival curve in the presence of random censorship[J]. *Biometrics*, 1979, **35**(2):385-391.
- [29] PAPANIKOLAOU N E, MILONAS P G, KONTODIMAS D C, *et al.* Life table analysis of *Propylea quatuordecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae) at constant temperatures[J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 2014, **107**(1):158-162.
- [30] CHEN Y N, XIAO W Q, LI W H, *et al.* Physiological response of *Populus euphratica* to artificial water-recharge of the lower reaches of Tarim River[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2004, **46**(12):1 393-1 400.
- [31] ZHOU H H, CHEN Y N, LI W H, *et al.* Photosynthesis of *Populus euphratica* in relation to groundwater depths and high temperature in arid environment, northwest China[J]. *Photosynthetica*, 2010, **48**(2):257-268.
- [32] 韩 路,王海珍,彭 杰,等. 塔里木河上游灰胡杨种群生存分析[J]. *林业科学*, 2010, **46**(1):131-135.
- HAN L, WANG H Z, PENG J, *et al.* Survival analysis of *Populus pruinosa* population in the upper reaches of Tarim River[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, **46**(1):131-135.
- [33] 吴俊侠,张希明,邓潮洲,等. 塔里木河上游胡杨种群特征与动态分析[J]. *干旱区地理*, 2010, **33**(6):923-929.
- WU J X, ZHANG X M, DENG C Z, *et al.* Characteristic and dynamics analysis of *Populus euphratica* populations at upper reaches of Tarim River[J]. *Arid Land Geography*, 2010, **33**(6):923-929.
- [34] 王夏楠. 植物群落对土壤水分变化的响应机理研究[D]. 新疆阿拉尔:塔里木大学, 2015.
- [35] 宋 萍,洪 伟,吴承祯,等. 珍稀濒危植物桫欏种群生命过程及谱分析[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(12):2 577-2 582.
- SONG P, HONG W, WU C Z, *et al.* Population life process and spectral analysis of rare and endangered plant *Alsophila spinulosa* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(12):2 577-2 582.
- [36] 张 楠. 土壤条件对胡杨幼苗生长的影响研究[D]. 北京:北京林业大学, 2013.
- [37] 吕 爽,张现慧,张 楠,等. 胡杨幼苗根系生长与构型对土壤水分的响应[J]. *西北植物学报*, 2015, **35**(5):1 005-1 012.
- LÜ S, ZHANG X H, ZHANG N, *et al.* Response of root growth and architecture of *Populus euphratica* seedling on soil water[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, **35**(5):1 005-1 012.
- [38] 萨如拉. 额济纳天然胡杨林生态用水机理研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2010.
- [39] 李清河,高婷婷,李慧卿,等. 荒漠珍稀灌木半日花种群数量动态的谱分析[J]. *武汉植物学研究*, 2009, **27**(2):171-175.
- LI Q H, GAO T T, LI H Q, *et al.* Spectral analysis of dynamics of rare eremophyte *Helianthemum ordosicum* population[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2009, **27**(2):171-175.
- [40] 宋于洋,李明艳,张文辉. 生境对古尔班通古特沙漠梭梭种群波动及谱分析推绎的影响[J]. *林业科学*, 2010, **46**(12):8-14.
- SONG Y Y, LI M Y, ZHANG W H. Effect of habitat on population dynamics and upscaling spectrograph of *Haloxylon ammodendron* population in Gurbantunggut desert[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, **46**(12):8-14.
- [41] 张 维,焦子伟,任艳利,等. 新疆野核桃自然保护区不同坡向野核桃种群生命表与波动周期[J]. *西北植物学报*, 2015, **35**(6):1 229-1 237.
- ZHANG W, JIAO Z W, REN Y L, *et al.* Life tables and fluctuation cycle of *Juglans cathayensis* populations on different slope aspects in wild walnut natural conservation area of Xinjiang, China[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, **35**(6):1 229-1 237.
- [42] 王思奇. 绿洲荒漠过渡带胡杨种群结构特征与动态研究[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学, 2013.

(编辑:潘新社)