西北植物学报,2021,41(8):1401－1408
Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.

doi:10.7606/j.issn.1000-4025.2021.08.1401 http://xbzwxb.alljournal.net

克里雅河尾闾绿洲胡杨种群年龄结构对地下水埋深的响应

史浩伯[1,2],师庆东[1,2,3*],戴　岳[1,2,3],周小龙[1,2,3],万彦博[1,2],彭　磊[1,2]

(1 新疆大学 资源与环境科学学院,乌鲁木齐 830046;2 绿洲生态教育部重点实验室,乌鲁木齐 830046;3 新疆大学干旱生态环境研究所,乌鲁木齐 830046)

摘　要:为阐明沙漠腹地绿洲胡杨种群的生存状况与发展动态,探讨地下水埋深差异对胡杨年龄结构组成与种群更新演替的影响。该研究以塔克拉玛干沙漠腹地克里雅河尾闾达里雅布依绿洲胡杨林为研究对象,通过划分胡杨龄级与地下水埋深梯度等级,量化个体竞争能力等主要手段,对胡杨种群年龄结构特征进行了分析,并对时间序列上的更新动态进行了预测。结果表明:(1)达里雅布依绿洲胡杨林的年龄结构在整体上存在微弱的增长趋势,但不同生境之间的差异较大,多数区域的胡杨种群更新乏力。(2)胡杨个体的竞争能力与龄级之间存在幂函数关系,同时随着地下水埋深的增加,所能维持的竞争关系愈发简单,而竞争能力较低的幼龄林比例也随之降低。(3)当地下水埋深小于 6 m 的情况下能够保障胡杨种群正常的更新演替,而大于 6 m 后的地下水埋深则会使胡杨种群丧失幼龄林这一组分,呈现出明显的衰退趋势。

关键词:地下水埋深;年龄结构;种内竞争;种群动态

中图分类号:Q948.112^{+}3　　**文献标志码**:A

Response of Age Structure of *Populus euphratica* Population to Groundwater Depth in the Oasis at the End of Keriya River

SHI Haobo[1,2], SHI Qingdong[1,2,3*], DAI Yue[1,2,3], ZHOU Xiaolong[1,2,3], WAN Yanbo[1,2], PENG Lei[1,2]

(1 Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2 College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3 Institute of Arid Ecological Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: To clarify the living conditions and development trend of the *Populus euphratica* population in the desert hinterland natural oasis, we analyzed the influence of the difference in groundwater depth condition on the age structure and renewal succession of the *P. euphratica* population. We selected the *P. euphratica* forest in the Daliyabuyi Oasis, lower reaches of the Keriya River, as the research site. The age structure characteristics were analyzed and the update dynamics on the sequence were predicted by classifying the age structure and groundwater depth gradient as well as quantifying the individual competitiveness. The results show that: (1) the age structure of the *P. euphratica* population in Daliyabuyi Oasis has a weak growth trend as a whole, but there are great differences among different habitats, and the up-

收稿日期:2021-04-18;**修改稿收到日期**:2021-06-14
基金项目:国家自然科学基金联合重点支持项目(U1703237)
作者简介:史浩伯(1995－),男,博士研究生,研究方向为干旱区群落构建与物种共存。E-mail:shi_haobo@163.com
* 通信作者:师庆东,男,教授,博士生导师,主要从事景观生态学与生态修复方面研究。E-mail:shiqd@xju.edu.cn

dating capability of *P. euphratica* in most areas is relatively weak. (2) There is a power function relationship between individual competitiveness and age structure, the competitive relationship that can be maintained becomes more simple and the proportion of young stands with lower competitiveness decreases with the increase of groundwater depth. (3) The normal renewal succession of the *P. euphratica* population can be ensured when the water depth is less than 6 m, while the groundwater depth more thant 6 m will make the *P. euphratica* population lose the component of young forest, and showing an obvious declining trend.

Key words: groundwater depth; age structure; intraspecific competition; population dynamics

植物种群的年龄特征是数量特征中的重要指标之一[1],对研究种群的未来发展动态与群落的更新演替均能起到良好的分析预测作用[2-4],在探讨某一生境内的植物在生长发育过程中所呈现出的特征时,往往可以根据现阶段的年龄结构给出其在现状方面的良好解释[5],有助于深化在种群尺度上对植株生长特性的认知,了解植被格局的形成机制,这对于受不良环境条件胁迫以及处在濒危阶段的植物保护工作有着重要的指导意义[6]。同时,在植物格局的形成过程中并不仅受生存环境的影响,生物学特性也是植物群落在构建过程中不可忽视的因素[7],同样可能影响种群的结构动态和繁殖过程,而竞争关系作为自然界同种或异种个体之间争夺共同资源的常见现象,在植物功能性状的形成、多样性格局的演变以及共存机制方面均具有一定的驱动意义[8-9]。

胡杨(*Populus euphratica*)是大陆性干旱气候条件下的常见树种,广泛分布于中国西北以及中亚等干旱地区,耐寒耐涝,对恶劣环境的抗性极强,是荒漠区特有的森林资源与关键种,在遏制荒漠化进程与风沙防治方面具有重要作用[10]。目前针对胡杨的研究以塔里木河流域与黑河流域居多,在宏观尺度上的研究主要集中于胡杨的生活史特征、空间分布格局与动态等方面[11-13],同时在生理特征与遗传分化等微观尺度上也取得了丰硕的成果[14-15],多元化的研究方向与研究成果的叠加足以说明胡杨对于荒漠生态系统的重要性,因此在对干旱生境演变与荒漠植物种群演替的研究过程中,胡杨往往具有较强的指示作用。

克里雅河是中国新疆南部的第四大水系,其尾闾达里雅布依深入塔里木盆地腹地 300 km,是极具科学研究价值的"原始绿洲"[16],当地种群结构简单,自我更新与繁殖能力均受到了干旱条件的制约[17],而胡杨作为当地的主体树种,在维持绿洲生态系统稳定,减缓沙漠腹地荒漠化对绿洲侵占进程方面具有决定性意义。本研究为阐明地下水埋深制约条件下沙漠腹地胡杨种群的生长状况及演替动态,通过小尺度试验拟解决两个科学问题:(1)当前环境条件下的胡杨种群呈现出怎样的更新特征?(2)不同地下水埋深条件下的胡杨种群年龄结构有何差异?通过上述分析旨在说明地下水因子对胡杨年龄结构与更新特征的影响,为宏观尺度上的绿洲胡杨林保护及生态修复等方面提供参考依据。

1 研究区概况

达里雅布依位于世界第二大沙漠塔克拉玛干沙漠腹地,是中国塔里木盆地南缘第二大河流克里雅河的尾闾绿洲,该绿洲因其与世隔绝、交通不便而受到干扰因素较少,基本保持了自然条件下的状态,具有相对"原始"特征。达里雅布依地理位置为 38°16′～38°37′ N,81°05′～81°46′ E,海拔为 1 100～1 300 m,总面积约 342 km^2。该区域为暖温带干旱沙漠气候,年降水量不超过 20 mm,潜在蒸发量达 2 480 mm,年均温 12.1 ℃,昼夜温差大,气候极端干旱。绿洲内部具有网状河相沉积特征,干枯河道分布于绿洲内部,土壤以沙土为主,天然植物群落则主要由胡杨、柽柳(*Tamarix chinensis*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、芦苇(*Phragmites communis*)等物种组成[18]。

2 研究方法

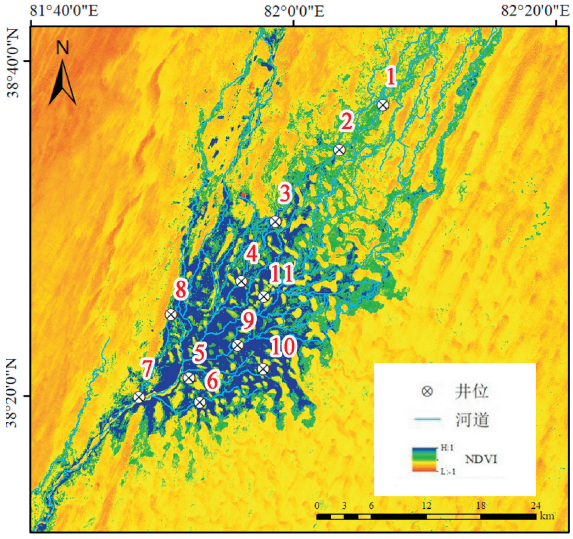
2.1 野外试验

课题组于 2018 年结合生境异质性在绿洲内布设了 19 口地下水观测井,并于 2019、2020 年 7 月前往达里雅布依绿洲进行野外实地踏查,通过典型样地法选取胡杨种群分布集中且林分保持良好的地段,以所选择的观测井为中心布设 11 个 20 m×20 m 的植被样方,样地设置如图 1 所示。在运用手持 GPS 对样方进行定位后开展胡杨种群逐木测量工作,利用卷尺、游标卡尺等工具对胡杨的胸径、株高、冠幅等基本数据进行测量,并统计种群的个体数量,同时基于地下水观测井内的 HOBO 水位自动记录仪获取地下水埋深数据。

2.2　数据处理与分析

2.2.1　地下水埋深梯度划分　采用 K-均值聚类方法划分地下水埋深梯度，将其梯度分为三个等级（图 2）：0～3 m 的地下水埋深为第一梯度等级（A）；3～6 m 的地下水埋深为第二梯度等级（B）；6～9 m 的地下水埋深为第三梯度等级（C）。

2.2.2　龄级划分　结合胡杨的生活史特点可将其划分为 12 个龄级[19]，分别是 Ⅰ 龄级：0 cm＜胸径≤4 cm；Ⅱ 龄级：4 cm＜胸径≤8 cm；Ⅲ 龄级：8 cm＜胸径≤12 cm；Ⅳ 龄级：12 cm＜胸径≤16 cm；Ⅴ 龄级：16 cm＜胸径≤20 cm；Ⅵ 龄级：20 cm＜胸径≤24 cm；Ⅶ 龄级：24 cm＜胸径≤28 cm；Ⅷ 龄级：28 cm＜胸径≤32 cm；Ⅸ 龄级：32 cm＜胸径≤36 cm；Ⅹ 龄级：36 cm＜胸径≤40 cm；Ⅺ 龄级：40 cm＜胸径≤44 cm；Ⅻ 龄级：胸径＞44 cm。同时结合胡杨生活史特点，可将胡杨的年龄等级进行汇总，进一步分为幼龄林（Ⅰ～Ⅲ）、中龄林（Ⅳ～Ⅶ）、成熟林（Ⅷ～Ⅺ）和老龄林（Ⅻ）4 个等级，以便降低年龄结构划分的复杂程度。



1～11. 代表样地位置

图 1 研究区样地位置示意图

1～11 represent the location of the selected sample plots

Fig. 1　Sketch map of study area

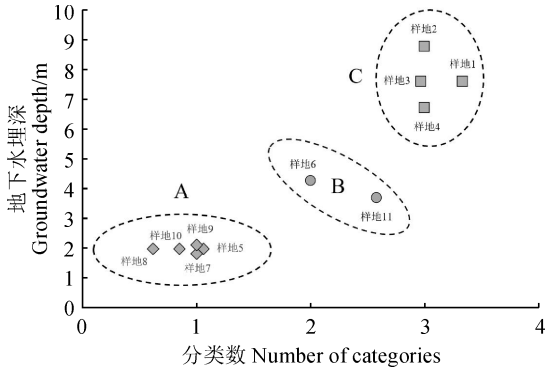


图 2　研究区绿洲地下水埋深梯度聚类结果

Fig. 2　Gradient clustering results of groundwater depth

2.2.3　年龄结构动态变化分析　胡杨种群的年龄结构是一种静态的生态学特征，应通过量化手段将其呈现出时空尺度上的直观动态变化，文中选用相邻龄级个体数量动态变化指数（V_n）与种群整体年龄结构动态系数（V_{pi}）进行种群发育动态分析[20]，方法如下：

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

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

式中，S_n 与 S_{n+1} 分别表示第 n 与第 $n+1$ 龄级种群的个体数量，V_n 存在值域[－1，1]，当 V_n 取值为正、负、零时分别代表该种群在两个相邻龄级的个体数量呈增长、衰退、稳定的结构动态关系。V_{pi} 是由不同年龄级间的动态变化指数对个体数 S_n 加权分配得来的，乘以权重后因为并不存在最大年龄级，所以将 k 这一最大龄级排除，最终 V_{pi} 的结果也存在正、负与零 3 种不同类型的值，且意义与 V_n 一致。

2.2.4　年龄结构动态预测　运用一次移动平均法能对以年龄级为生长周期单位的胡杨种群数量动态进行有效预测[21]，方法如下：

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

式中，n 代表期望预测的时间长度，M_t 代表 n 个生长周期后 t 龄级种群的数量大小，X_k 是当前 k 龄级种群的大小，本研究分别对未来 2 个和 5 个龄级时间后的胡杨种群年龄结构进行预测。

2.2.5　生长空间竞争指数模型　已有研究表明，干旱地区的胡杨冠幅与胸径的生长状况与地下水埋深有显著关系[22-24]，因此如何建立以水资源作为限制条件的竞争关系模型极为重要。本研究基于马履一提出的生长空间竞争指数模型[25]进行推导，以此适应荒漠生态系统胡杨的生长特性。已知生长空间竞争指数（growth space competition index，$GSCI$）公式如下：

$$GSCI = CAS_i / BA_i$$

由于胡杨生长受环境条件的限制导致树冠形状

呈多样化，为更准确地说明其径向生长情况，故选用投影面积（SA）代替原始公式中的树冠表面积（CAS），具体公式为：

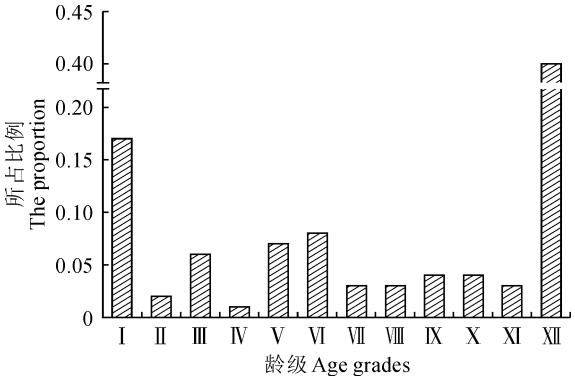
$$SA = CAS = \pi \cdot [(a+b)/4]^2$$

式中，CAS_i 代表竞争木的树冠表面积，BA_i 代表竞争木的胸高断面积，a 为东西方向的冠幅，b 为南北方向的冠幅。$GSCI$ 值越小，反映单位面积需要的树冠面积越小，其竞争能力越强，同时作为树冠覆盖程度的无量纲度量，是一种相比于生态过程更注重竞争结果的度量方法。

3 结果与分析

3.1 绿洲胡杨种群年龄结构与动态分析

达里雅布依绿洲内的胡杨整体年龄结构呈“不规则形”（图 3）。根据本研究拟定的龄级结构划分标准，中龄林、成熟林在现有植株数量中占比最少，分别为 0.19 与 0.14；其次是幼龄林数量，占比 0.25；Ⅻ龄级以上的老龄林数量最多，占比 0.40。总体来看，在绿洲胡杨种群的年龄结构中老龄化现象明显，在中龄林与成熟林两个年龄组分中存在断层现象，但幼龄林组分尚具规模，其补员作用能够在一定程度上缓解种群在更新方面的压力。



Ⅰ～Ⅻ. 龄级；DBH. 胸径；Ⅰ. 0 cm＜DBH≤4 cm；Ⅱ. 4 cm＜DBH≤8 cm；Ⅲ. 8 cm＜DBH≤12 cm；Ⅳ. 12 cm＜DBH≤16 cm；Ⅴ. 16 cm＜DBH≤20 cm；Ⅵ. 20 cm＜DBH≤24 cm；Ⅶ. 24 cm＜DBH≤28 cm；Ⅷ. 28 cm＜DBH≤32 cm；Ⅸ. 32 cm＜DBH≤36 cm；Ⅹ. 36 cm＜DBH≤40 cm；Ⅺ. 40 cm＜DBH≤44 cm；Ⅻ. DBH＞44 cm

图 3 研究区绿洲胡杨种群年龄结构图

Ⅰ－Ⅻ. Age grades；DBH. Diameter at breast height

Fig. 3 Population age structure diagram

将种群动态量化后所得出的相邻年龄级之间的动态变化指数（表 1）表现出较强的随机性：当前绿洲内的Ⅰ龄级的胡杨幼苗数量具备更新基础，与Ⅱ龄级之间呈增长的结构动态关系，与之相似，Ⅲ和Ⅳ、Ⅵ和Ⅶ、Ⅹ和Ⅺ三对相邻龄级之间同样存在增长关系；而在Ⅱ和Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ、Ⅴ和Ⅵ、Ⅷ和Ⅸ、Ⅺ和Ⅻ五对龄级之间的相邻年龄结构动态呈现出衰退趋势；Ⅶ和Ⅷ、Ⅸ和Ⅹ两对相邻龄级的种群动态则呈稳定关系。绿洲胡杨整体种群的年龄结构动态指数 $V_{pi}=29.55\%$，其数值趋近于零，说明种群整体现阶段较为稳定，虽具有一定的增长趋势但并不明显。

3.2 年龄结构与生长空间竞争指数变化关系

胡杨个体的生长空间竞争指数与龄级的线性拟合关系呈现一定的规律性（图 4），拟合方程为 $y=66.79\pm4.28x^{-2.08\pm0.6}$，$R^2=0.69$。这一结果说明胡杨种群的年龄结构与个体竞争能力之间存在幂函数关系，表明依据胸径特征划分出的龄级能够在一定程度上说明物种的个体竞争能力，即随着胡杨的龄级的上升，个体的竞争能力会逐步加强，但加强的幅度持续变低。

3.3 地下水埋深梯度下的种群年龄结构变化

胡杨种群年龄结构与个体竞争能力存在较好的线性关系，因此可以通过不同地下水埋深梯度下的具体生长空间竞争指数来判断生境对种群生长的维

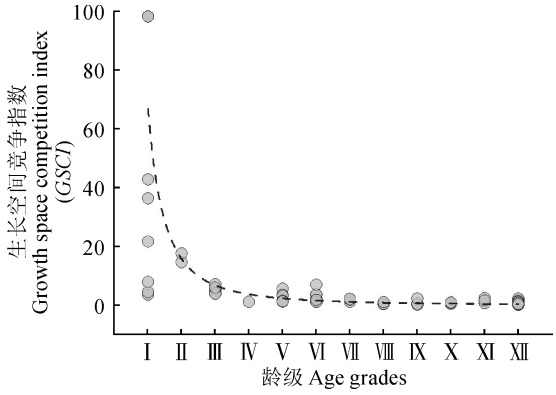


图 4 研究区绿洲胡杨龄级与生长空间竞争指数变化关系

Fig. 4 Relationship between *P. euphratica* age grade and growth space competition index

表 1 胡杨种群龄级结构动态指数

Table 1 Dynamic index of age-class structure of *P. euphratica* population

种群动态指数级 Population dynamics exponential	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{pi}
动态指数值 Dynamic index value/%	86.67	−60.00	80.00	−83.33	−14.29	57.14	0.00	−25.00	0.00	25.00	−91.67	29.55

持情况。如图 5 所示，在地下水埋深处于 0～3 m 的第一梯度(A)时，胡杨种群的生长空间竞争指数的变异系数平均值为 1.09，该梯度下胡杨个体竞争能力的离散程度与其他两个梯度相比处于中等水平，各样地种群具体的年龄结构可归为两种类型，一类是仅存在胸径大于 44 cm 的老龄林群落，另外一类则是年龄结构复杂，不同龄级个体均有出现的多龄级群落；在地下水埋深处于 3～6 m 之间的第二梯度(B)时，竞争指数的变异系数平均值为 2.176，离散程度较高，虽各自样地均仅包括 2 个龄级，但总体的误差值高达 2.167，说明了这一地下水埋深梯度下胡杨个体的竞争能力存在较高的可波动范围；在地下水埋深处于 6～9 m 的第三梯度(C)时，竞争指数的平均变异系数为 0.634，且离散程度极低，原因在于该梯度下各样地的胡杨种群均无幼龄林出现，成熟林与老龄林居多，占个体总数的 84.85%，且现存个体龄级之间次序紧密，在年龄结构方面呈现出典型的老龄化特征。

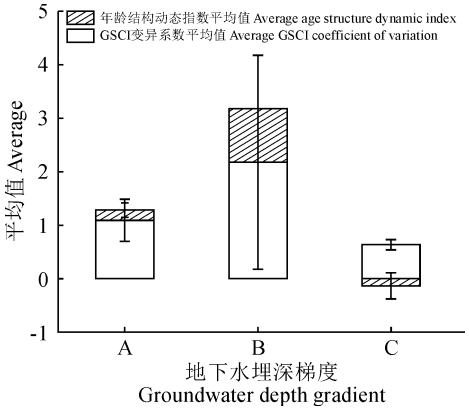


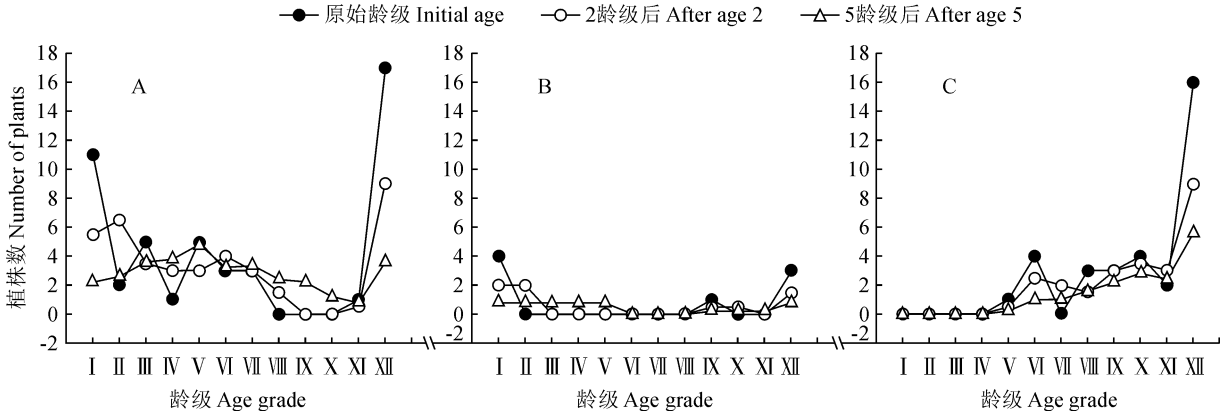
图 5　研究区绿洲不同地下水埋深梯度下胡杨年龄结构动态与个体竞争指数变异特征

Fig. 5　Age structure dynamics and individual competition index variation characteristics under different groundwater depth gradients

而在胡杨种群生长动态变化特征方面，不同地下水埋深梯度下的种群年龄结构动态也呈现出一定的差异(图 5)。当所处环境的地下水埋深位于第一梯度(A)时，动态指数的平均值为 0.194，标准误差为 0.135，不同区域的种群生长动态存在稳定与增长两种不同的水平；而在地下水埋深处于第二梯度(B)时，种群的年龄动态呈现极为明显的增长特征，且不存在误差值；在地下水埋深处于第三梯度(C)时，年龄结构动态指数平均值为－0.134，该梯度下的绝大部分区域均呈现出衰退的种群年龄结构特征，而仅存的具有增长趋势的区域其增长动态也并不明显，但正是这种正负关系的存在导致了该梯度范围内出现了误差值较大的现象。

3.4　时间序列上的种群动态预测

绿洲胡杨种群的年龄结构动态受所处地下水梯度的差别影响而有所不同(图 6)。在地下水埋深 0～3 m 的第一梯度(图 6，A)中，随着时间的推移老龄林与幼龄林均有所降低，中龄林逐渐成为林地中的重要组分，该区域的种群年龄结构逐渐变得稳定，但直至 5 个龄级时间后依然存在增长的趋势；在地下水埋深 3～6 m 的第二梯度(图 6，B)中，2 个龄级时间后其结构依然为增长型，5 个龄级时间后的年龄结构逐渐趋于稳定，且以幼龄林与中龄林为主，但该环境在初始条件下的个体数目较少，对时间序列上预测的波动幅度产生了一定的影响；在地下水埋深 6～9 m 的第三梯度(图 6，C)中，干旱的环境条件下幼龄林的不足导致胡杨年龄结构呈持续性的衰退



A. 0～3 m；B. 3～6 m；C. 6～9m

图 6　研究区绿洲不同地下水埋深梯度下胡杨种群动态预测结果

Fig. 6　Prediction results of population dynamics under different groundwater depth gradients

趋势,加强对幼苗的抚育工作是维持种群持续发展的主要手段。

4 讨 论

4.1 水文动态对胡杨种群更新演替的影响

克里雅河在维吾尔语中有“漂移不定”的意思,流域的形成依赖于昆仑山远古冰川与融雪补给,受季节性洪水的影响改道频繁[26],其尾闾达里雅布依绿洲的网状河相也因此不能保证各条河道均有稳定的地表水经过[27]。本研究中第一资源梯度中的样地均处于绿洲东南部,即克里雅河主河道与绿洲网状河道的交汇处,在理论上该区域的多数河道均应依靠季节性洪水存在稳定的地下水埋深补给。第二资源梯度下的样地则主要分布在绿洲南部与中部,最南端的河道属于独立的水系支流,干涸程度较重,而中部地区的河道已与主干河道存在一定距离,季节性洪水对这两处区域的地下水的补给强度远不及第一梯度区域,但其之所以呈现出典型的增长型年龄结构群落,很可能是6～9月的克里雅河丰水期产生的河水漫溢作用影响了胡杨实生苗的更新,提高了幼龄林的个体数量[28-29]。而第三资源梯度的区域主要分布于绿洲北部,即使是洪水期对地下水的补给作用也相对乏力,幼龄林在低水位的情况下无法生长,受此影响导致胡杨林表现为衰退型群落。综上所述,浅层地下水作为荒漠植被生长的重要资源,是促使其更新演替的动力源泉,对胡杨的龄级结构组成有重要影响。

4.2 年龄结构与种内关系的互作机制

本项研究中选取的生长空间竞争指数是基于干旱区胡杨生长属性特征进行量化,在忽略外界干扰情况下最大程度反映不同个体维持自身基本属性所需的地下水埋深阈值。由图4和图5可知,伴随着龄级的增长,植株个体的竞争能力也随之上升,进而使同一区域内的种内竞争现象愈发激烈。而地下水作为荒漠区植被生存所依赖的关键因子,对维持物种的种内竞争关系具有重要作用。在地下水埋深处于0～3 m的情况下能够同时维持单一老龄林的强烈竞争作用与多龄级条件下复杂的竞争机制;在地下水埋深处于3～6 m的情况下,能够维持龄级较少的增长型群落,但这种对竞争关系的维持作用存在一定的波动阈值,不能同时满足多龄级的存在;而在地下水埋深处于6～9 m的情况下,种群年龄结构已处于衰退状态,激烈的竞争关系则会进一步排斥低竞争优势的幼龄林,相关研究表明,随着龄级增长至老龄林,林木已摆脱被压状态,因此低龄级林木成为了竞争关系中的主要被排斥对象[30],在无低龄级与充足地下水补给的情况下,这种衰退情况会持续加剧,直至区域性的种群完全丧失。

4.3 时间序列上的胡杨种群动态

如果以地下水埋深三种不同的梯度条件作为限制因子研究种群动态,能够发现不同区域的种群在面临环境条件差异时,表现出的动态特征也有所不同。地下水埋深第一梯度(A)下的胡杨种群在演替过程中表现出的增长特征极为明显,在5个龄级时间后其年龄结构依旧完整,表现出较强的活力;而地下水埋深第二梯度(B)很可能受到了试验过程中样地数量的影响,导致初始条件下的胡杨个体数量较少,但在时间序列预测上依然表现出了明确的动态特征,即在5个龄级时间后趋于稳定。受地下水埋深的影响下,该种群的演替特征应处于高水位埋深与低水位埋深的过渡阶段,即虽然无法满足年龄结构的完整,但依旧具有一定的更新能力;地下水埋深的第三梯度(C)缺失了幼龄林这一整体组分,同时老龄林所占比例极高,导致在没有补员作用下的胡杨林呈现出明显的衰退趋势。上述分析中所用的时间预测分析手段具有较高的准确性,适用于多种限制条件下的预测[31],同时其弊端也很明显,预测的结果仅基于现状进行研究而往往忽视了生物的扩散与再定殖过程[32],因此在现实的发展动态中很可能受到生物因素的影响,但在胡杨林的保护与可持续发展方面,则可以根据预测的动态结果制定针对性的幼苗抚育、生态修复等工作,这对于促进胡杨林的天然更新,维持种群的稳定性均具有重要意义。

5 结 论

(1)达里雅布依绿洲胡杨老龄林数量居多,其次是幼龄林。整体年龄结构动态存在微弱的增长趋势,但不同生境之间的差异较大,多数区域的龄级更新依旧乏力。

(2)胡杨个体的竞争能力与径级存在幂函数关系,受控于对地下水埋深差异导致维持的种内竞争机制存在一定的差异,即随着地下水埋深的增加,所能维持的竞争关系愈发简单,而个体竞争能力较低的幼龄林比例也随之降低。

(3)随着时间的推移,0～6 m的地下水埋深依旧能够保障胡杨种群正常的更新演替,而大于6 m后的地下水埋深则会使胡杨种群丧失幼龄林这一组分,呈现出明显的衰退趋势。

参考文献：

[1] WATKINSON A R. Plant Population Dynamics[M]//Plant Ecology. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd., 2009: 359-400.

[2] CHU C J, ADLER P B. When should plant population models include age structure? [J]. *Journal of Ecology*, 2014, **102**(2): 531-543.

[3] ISHIKAWA Y, ITO K. The regeneration process in a mixed forest in central Hokkaido, Japan[J]. *Vegetatio*, 1988, **79**(1-2): 75-84.

[4] STEWART G H. The dynamics of old-growth *Pseudotsuga* forests in the western Cascade Range, Oregon, USA[J]. *Vegetatio*, 1989, **82**(1): 79-94.

[5] ZHANG Y, DROBYSHEV I, GAO L S, *et al*. Disturbance and regeneration dynamics of a mixed Korean pine dominated forest on Changbai Mountain, North-Eastern China[J]. *Dendrochronologia*, 2014, **32**(1): 21-31.

[6] 许再富，黄加元，胡华斌，等. 我国近 30 年来植物迁地保护及其研究的综述[J]. 广西植物，2008，**28**(6)：764-774.
XU Z F, HUANG J Y, HU H B, *et al*. A commentary on plant *ex situ* conservation and its researches in China nearly thirty years[J]. *Guihaia*, 2008, **28**(6): 764-774.

[7] 杨姗霖，施　翔，董金鑫，等. 沙生短命植物角茴香群落特征及生物学特性[J]. 西北植物学报，2015，**35**(11)：2 299-2 306.
YANG S L, SHI X, DONG J X, *et al*. Community characteristics and biological characteristics of psammophytes ephemeral plant *Hypecoum erectum*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, **35**(11): 2 299-2 306.

[8] VALLADARES F, SANCHEZ-GOMEZ D, ZAVALA M A. Quantitative estimation of phenotypic plasticity: Bridging the gap between the evolutionary concept and its ecological applications[J]. *Journal of Ecology*, 2006, **94**(6): 1 103-1 116.

[9] BELFRAGE K, BJÖRKLUND J, SALOMONSSON L. Effects of farm size and on-farm landscape heterogeneity on biodiversity—case study of twelve farms in a Swedish landscape[J]. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 2015, **39**(2): 170-188.

[10] 邓潮洲，张希明，吴俊侠，等. 输水堤坝对塔里木河中游胡杨群落及种群的影响[J]. 生态学报，2010，**30**(5)：1 356-1 366.
DENG C Z, ZHANG X M, WU J X, *et al*. The influence of water conveyance embankments on the *Populus euphratica's* communities and populations in the middle reaches of Tarim River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(5): 1 356-1 366.

[11] 韩　路，王海珍，彭　杰，等. 塔里木河上游天然胡杨林种群空间分布格局与动态研究[J]. 西北植物学报，2007，**27**(8)：1 668-1 673.
HAN L, WANG H Z, PENG J, *et al*. Spatial distribution patterns and dynamics of major population in *Populus euphratica* forest in upper reaches of Tarim River[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, **27**(8): 1 668-1 673.

[12] 曾　勇，赵成义，李传金，等. 塔里木河沿岸不同生境下胡杨(*Populus euphratica*)群落的空间分布格局及关联性[J]. 生态学杂志，2019，**38**(11)：3 273-3 282.
ZENG Y, ZHAO C Y, LI C J, *et al*. Spatial distribution pattern and association of *Populus euphratica* community in different habitats along the Tarim River[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(11): 3 273-3 282.

[13] 马玉祥，张永利，李玉灵，等. 不同时间尺度环境因子对黑河下游胡杨(*Populus euphratica*)径向生长的影响[J]. 干旱区研究，2019，**36**(6)：1 502-1 511.
MA Y X, ZHANG Y L, LI Y L, *et al*. Effects of environmental factors on radial growth of *Populus euphratica* at different time scales in the lower reaches of the Heihe River[J]. *Arid Zone Research*, 2019, **36**(6): 1 502-1 511.

[14] 生　光，阿不都外力·阿不都热依木，马相汝，等. RAPD 标记研究新疆胡杨五个地理种群的遗传分化(英文)[J]. 生物技术，2008，(5)：18-21.
SHENG G, ABUDU A, MA X R, *et al*. RAPD markers to study the genetic differentiation of five geographic populations of *Populus euphratica* in Xinjiang (English)[J]. *Biotechnology*, 2008, (5): 18-21.

[15] 王海珍，韩　路，徐雅丽，等. 胡杨异形叶光合系统Ⅱ叶绿素荧光特性[J]. 西北植物学报，2019，**39**(10)：1 795-1 804.
WANG H Z, HAN L, XU Y L, *et al*. Chlorophyll fluorescence characteristics of photosystem Ⅱ of *Populus euphratica* heteromorphic leaves[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(10): 1 795-1 804.

[16] 师庆东，郭玉川，周小龙，等. 塔克拉玛干沙漠克里雅河尾闾达理雅博依绿洲地表水、地下水对植被格局的影响机制[J]. 新疆大学学报(自然科学版)，2019，**36**(3)：253-259.
SHI Q D, GUO Y C, ZHOU X L, *et al*. Mechanism of the influence of surface water and groundwater on vegetation pattern in Daliyaboyi Oasis at the tail of Keriya River in Taklamakan Desert[J]. *Journal of Xinjiang University* (Natural Science Edition), 2019, **36**(3): 253-259.

[17] 陈荷生. 水在克里雅河流域生态地理环境中的作用[J]. 中国沙漠，1988，**8**(2)：41-56.
CHEN H S. Effect of water in eco-geographic environment of the Keriya River valley[J]. *Journal of Desert Research*, 1988, **8**(2): 41-56.

[18] LI H, SHI Q D, IMIN B, *et al*. Methodology for optimizing quadrat size in sparse vegetation surveys: A desert case study from the Tarim Basin [J]. *PLoS One*, 2020, **15**(8): e0235469.

[19] 韩　路，王家强，王海珍，等. 塔里木河上游胡杨种群结构与动态[J]. 生态学报，2014，**34**(16)：4 640-4 651.
HAN L, WANG J Q, WANG H Z, *et al*. The population structure and dynamics of *Populus euphratica* at the upper reaches of the Tarim River [J]. *Acta Ecologica Sinica*,

2014,**34**(16): 4 640-4 651.

[20] 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 the dynamic quantitative analysis method of plant population and community structure [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998,**18**(2): 214-217.

[21] 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 gordejevii* population in Hunshandake sandy land[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020,**40**(6): 1 052-1 060.

[22] 万红梅, 李 霞, 董道瑞, 等. 干旱胁迫输水后胡杨测树因子特征及相关分析[J]. 北京林业大学学报, 2012,**34**(2): 34-38.
WAN H M, LI X, DONG D R, *et al*. Correlation analysis and characteristics of measuring factors for *Populus euphratica* after drought stress water delivery[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012,**34**(2): 34-38.

[23] 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 艾里西尔·库尔班, 等. 胡杨冠幅对塔里木河下游应急生态输水的响应[J]. 东北林业大学学报, 2011, **39**(9): 82-84.
YUMITI H, TAYIERJIANG A, AILIXIER K, *et al*. Response of *Populus euphratica* canopy to emergency ecological water transport in the lower reaches of the Tarim River[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, **39**(9): 82-84.

[24] 叶 茂, 徐海量, 龚君君, 等. 不同胸径胡杨径向生长的合理生态水位研究[J]. 地理科学, 2011,**31**(2): 172-177.
YE M, XU H L, GONG J J, *et al*. Rational ecological groundwater level of *Populus euphratica* with different diameter in lower reaches of Tarim River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011,**31**(2): 172-177.

[25] 马履一,王希群.生长空间竞争指数及其在油松侧柏种内竞争中的应用研究[J].生态科学,2006,**25**(5): 385-389.
MA L Y, WANG X Q. Grouth space competition index and its application in the intraspecific competition of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* [J]. *Ecological Sciences*, 2006,**25**(5): 385-389.

[26] 李小妹, 严 平. 中国北方典型流域河道与沙丘空间格局及其动态变化[J]. 干旱区研究, 2017,**34**(6): 1 436-1 447.
LI X M, YAN P. Spatial pattern and dynamic changes of channel and sand dune in the typical drainage basins in North China[J]. *Arid Zone Research*, 2017,**34**(6): 1 436-1 447.

[27] 张文奇, 周小龙, 尼加提·卡斯木, 等. 沙漠腹地达理雅博依天然绿洲植物群落特征分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2019,**36**(3): 276-286.
ZHANG W Q, ZHOU X L, NIJIATI KASIMU, *et al*. Study of plant community characteristics in Daliyaboyi natural oasis in desert hinterland[J]. *Journal of Xinjiang University* (Natural Science Edition), 2019,**36**(3): 276-286.

[28] 赵振勇, 张 科, 卢 磊, 等. 塔里木河中游洪水漫溢区荒漠河岸林实生苗更新[J]. 生态学报, 2011,**31**(12): 3 322-3 329.
ZHAO Z Y, ZHANG K, LU L, *et al*. Seedling recruitment in desert riparian forest following river flooding in the middle reaches of the Tarim River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011,**31**(12): 3 322-3 329.

[29] 兰文军. 克里雅河洪水类型及成因分析[J]. 水利科技与经济, 2010,**16**(8): 921-922.
LAN W J. Flood types and causes analysis of Keriya River [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2010,**16**(8): 921-922.

[30] 李克志. 红松生长过程的研究[J]. 林业科学, 1983,**19**(2): 126-136.
LI K Z. Studies on the process of growth of Korean pine (*Pinus koraiensis*)[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1983,**19**(2): 126-136.

[31] 田润炜, 蔡新斌, 刘丽燕, 等. 新疆野苹果种群年龄结构特征与动态分析[J]. 西北植物学报, 2016,**36**(4): 811-817.
TIAN R W, CAI X B, LIU L Y, *et al*. Characteristics of the age structure and dynamics of *Malus sieversii* population[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, **36**(4): 811-817.

[32] 张玉波, 李景文, 张 昊, 等. 胡杨种子散布的时空分布格局[J]. 生态学报, 2005,**25**(8): 1 994-2 000.
ZHANG Y B, LI J W, ZHANG H, *et al*. Spatiotemporal patterns of seed dispersal in *Populus euphratica*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005,**25**(8): 1 994-2 000.

(编辑:潘新社)