

DOI: 10.5846/stxb201410091980

徐梦辰, 陈永金, 刘加珍, 王丹, 刘亚琦. 塔里木河中游水文影响下的胡杨种群格局动态研究. 生态学报, 2016, 36(9): - .

Xu M C, Chen Y J, Liu J Z, Wang D, Liu Y Q. The distribution pattern dynamics of *Populus euphratica* are influenced by hydrology in the middle reaches of Tarim River. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): - .

塔里木河中游水文影响下的胡杨种群格局动态研究^{*}

徐梦辰, 陈永金^{*}, 刘加珍, 王 丹, 刘亚琦

聊城大学环境与规划学院, 聊城 252059

摘要:在利用环境同位素技术与多年径流量数据分析塔里木河中游的水文过程基础上, 采用聚集度指标与种群结构动态量化法, 研究了水文条件变化下胡杨种群结构特征与时空格局动态, 预测了胡杨种群未来发展趋势。结果表明: (1) 自 1998 年以来, 中游年径流耗损量逐年减少, 依靠地表水补给的地下水日益匮乏, 具体表现为地下水埋深呈直线下滑趋势, 这导致堤防外植被生长所需的生态用水日益紧缺。(2) 在分布格局上, 胡杨种群借助集群分布的格局抵抗恶劣的生态环境, 其聚集强度随个体发育不断减弱, 并有向随机分布发展的趋势; 在种群结构上, 胡杨种群除 2003 年为稳定型, 其他年份下均属衰退型, 表现出结构老龄化且长期衰退的特征。(3) 2002 年中游水量最为充沛, 由于生态对环境变化的迟滞性特征使 2003 年地下水位抬升, 导致胡杨种群变为稳定型, 且聚集强度最大, 种群增长趋势最强。种群动态指数与地下水埋深的回归模型显示, 随地下水埋深的下降, 种群增长趋势降低, 验证了胡杨种群对水文变化的响应。(4) 种群动态预测表明, 未来 2 年, 仅幼树数量呈增加趋势, 其余径级均为减少趋势; 未来 5 年, 大树(或老树)数量将大幅减少。可见, 地表水与地下水的逐年减少影响了胡杨种群的分布格局, 阻碍了种群的更新发育, 水文条件是影响中游胡杨生态特征的直接因素。

关键词: 胡杨; 水文条件; 分布格局; 径级结构; 塔里木河中游

The distribution pattern dynamics of *Populus euphratica* are influenced by hydrology in the middle reaches of Tarim River

XU Mengchen, CHEN Yongjin^{*}, LIU Jiazhen, WANG Dan, LIU Yaqi

College of Environmental and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China

Abstract: *Populus euphratica* is a member of the Salicaceae family, and is an important tree species of the desert riparian forest. *P. euphratica* has some unique abilities such as withstanding sandstorms, curbing desertification, maintaining ecological balance, protecting biodiversity in arid areas, and safeguarding the production of oasis agriculture. The population distribution pattern refers to the level of the population and the distribution status of individuals of the same population within a certain range of a horizontal area. The population distribution pattern is systematically affected by biological characteristics, interspecies relationships, and environmental conditions. Ascertaining the population distribution pattern and its dynamic changes contributes to elucidating the ecological characteristics of a species for further studies. Thirty natural *P. euphratica* plots were established on the outer side of water conveyance embankments in the middle reaches of Tarim River, and field data were obtained with a typical sampling method. With the use of environmental isotope technology in combination with the monitoring data of annual runoff in Yingbazha and the Kala hydrometric station, we analyzed the hydrological changes in the middle reaches of Tarim River. We divided the samples into a size-class structure to apply aggregation intensity indices and conducted a quantitative analysis for plant population structural dynamics. The dynamics of

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2014BAC15B02); 中国博士后特别资助项目(2013T60905); 中国博士后基金(2012M512058); 国家自然科学基金(40901276, 40871239)

收稿日期: 2014-10-09; 修订日期: 2015-05-20

^{*} 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chen Yongjin@luc.edu.cn

the distribution pattern and characteristics of population structure influenced by hydrological conditions were analyzed, and then time-series analysis was used to predict the population development trend in the future. This analysis is important to provide a theoretical basis for ecological restoration of the natural *P. euphratica* forest. Since 1998, the runoff consumption in the middle reaches has decreased and groundwater supplied by the surface water has become increasingly scarce. Groundwater depth showed a linear downward trend, indicating that ecological water for vegetation growth out of the embankment was deficient. With regard to the distribution pattern, *P. euphratica* showed a clumped pattern in each size-class structure to resist the harsh ecological environment, and the aggregate intensity index was reduced with individual development. The height class size showed a tendency to change from a clumped to a random pattern. With regard to the population structure, *P. euphratica* showed a stable population type in 2003, and a declining population pattern for the other years. These results showed that the population characteristics were structured by ageing and showed a long-term pattern of decline. The runoff of the middle reach was the most abundant in 2002. Because of the hysteretic characteristic of ecology to environmental change, the groundwater level was promoted in 2003. These changes led to the largest aggregate intensity and the best population growth of *P. euphratica* in 2003. The regression model between the population dynamics index and groundwater depth showed that population growth had a decreasing trend with a reduction in groundwater depth. Therefore, the response of the *P. euphratica* population to hydrological changes was verified. Finally, population dynamics prediction indicated that the number of saplings of *P. euphratica* is expected to increase, whereas the number of trees in other size classes is expected to decrease in the next two years and the number of large (or old) trees will likely be rapidly reduced in the next five years. The decline in surface water and groundwater influenced the distribution pattern and hindered population development. We conclude that hydrological conditions directly influence the ecological characteristics of *P. euphratica* in the middle reaches of Tarim River.

Key Words: *Populus euphratica*; hydrologic conditions; distribution pattern; size-class structure; the middle reaches of Tarim River

胡杨是杨柳科杨属中最古老、最原始的树种之一,是荒漠地区特有的珍贵树种,已成为抵御风沙、遏制沙化、维护干旱区生态平衡、保护生物多样性和保障绿洲农牧业生产的重要屏障。1993年在联合国粮农组织(FAO)林木基因资源专组例会上,胡杨被确定为全世界干旱半干旱地区急需优先保护的林木基因资源^[1]。世界90%的胡杨林分布在中国,我国90%的胡杨林分布在新疆的塔里木河流域,而塔里木河中游地区是世界面积最大的原始胡杨林分布地^[2]。在自然和人为原因作用下,塔里木河下游河道自1972年起开始断流,带来以胡杨为建群种的荒漠河岸林生态系统不断退化,导致区域生态安全受到严重威胁。2000年,国家水利部联合新疆人民政府实施了塔里木河流域综合治理工程,包括下游的生态输水工程和中游的输水堤防工程^[3]。围绕塔里木河流域综合治理,中外学者开展了下游地区植物物种多样性与地下水位的关系^[4]、基于地下水化学特征的合理生态水位^[5]、胡杨种群数量特性与动态变化^[1,6-7]、中游主要植物种群的资源生态位^[8]、以及植物群落与环境因子的关系^[9]等方面的研究,取得了长足进展。但有关塔里木河中游胡杨种群空间格局的研究,尤其是堤防修建后水文变化对种群格局的影响还鲜未报道。本文以堤防修建后(2001至2012年)塔里木河中游胡杨种群监测资料为依据,选取其中最具代表性的4个典型年份(2001年、2003年、2008年、2012年)予以研究,分析了水文影响下建群种胡杨多年来的空间分布格局和种群结构特征,旨在揭示人工调控河道下胡杨空间格局演替规律、种群结构发展趋势及种群与环境间的相互关系,了解胡杨种群的生存机理,预测其未来发展趋势,以期为塔里木河流域天然胡杨林的生态修复提供理论依据。

1 研究区概况

塔里木河中游段指轮台县英巴扎至尉犁县恰拉,全长398Km,河道两侧各有一道防护堤,堤宽1-3km。该

区年均气温 10.5°C ; 年均日照数, 轮台县为 2778h, 尉犁县为 2970h; $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温轮台县为 4039°C , 尉犁县为 4184°C ; 无霜期, 轮台县为 211 天, 尉犁县为 214 天^[10]; 植被组成为杨柳科、柽柳科、豆科、夹竹桃科、乔木科、菊科、藜科等^[11]。该区乔木主要有胡杨(*Populus euphratica* Oliv.), 灌木主要有柽柳(*Tamarix chinensis* Lour.)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum* Murray)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron* (Pall.) Voss) 等, 草本植物主要有芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.)、罗布麻(*Apocynum venetum* Linn.)、花花柴(*Karelinia caspica* (Pall.) Less)、疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia* Schap.)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.) 等。样地内胡杨平均树高 4.56—6.78m, 平均胸径 14.41—20.11cm, 平均冠幅 $13.01\text{—}18.56\text{m}^2$, 个体密度为 47.4—94.9 株/ hm^2 , 郁闭度 0.3 左右^[12], 灌木层盖度 0.92%, 林下伴生植被种类少, 主要有柽柳、铃铛刺、芦苇、甘草等植物^[13]。

2 研究方法

2.1 样地设置与监测

塔里木河中游输水堤防最先完成的河段是从沙子河到阿其河, 2001 至 2003 年分别于中游河段的沙子河口南岸、乌斯满河口北岸、阿其河口北岸布设 3 个监测断面, 每个断面设有 6 个监测井(2001 年阿其河口 7 个)(图 1a), 分别距离堤防 100、300、500、1000、1500、2000m。2005 年堤防完成, 根据实际需要新增沙吉利克和铁依孜两个监测断面, 原沙子河断面交通不便给监测带来困难, 原乌斯满和阿其河断面监测井因设计简陋遭到破坏, 故将监测断面和监测井重新布设^[14]。因此, 2008 至 2012 年为 5 个监测断面, 分别是沙吉利克(MA)、新沙子河(MB)、新乌斯满(MC)、新阿其河(MD)和铁依孜(ME), 每个断面 6 个监测井眼(图 1b)。其中, 新沙子河断面是把原监测断面移到北岸, 新乌斯满和新阿其河断面是在原监测断面基础上分别向西平移了 2000m, 新的监测井分别距离堤防 100、300、500、800、1000、1500m。

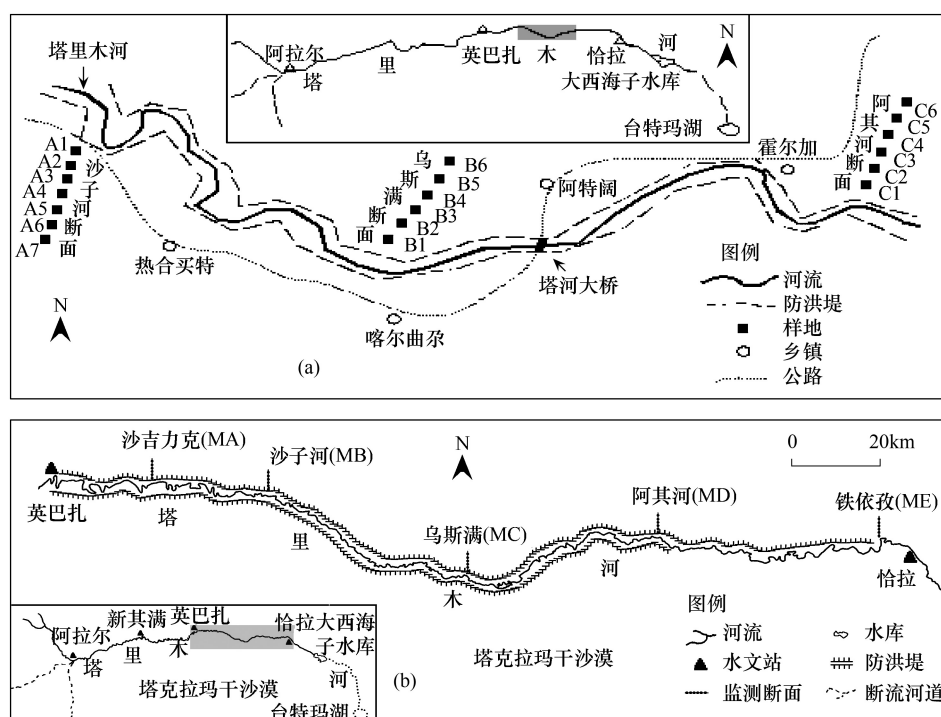


图 1 塔里木河中游地区原监测断面(a)和新断面(b)分布图

Fig. 1 The original (a) and new (b) distribution of investigation sections in the middle reaches of Tarim River in China

在每个监测井附近都选择具有代表性的典型样地, 其中 2001 年 19 个, 2003 年 18 个, 2008 与 2012 年均 为 30 个。采样时间为: 2001 年 12 月、2003 年 6 月、2008 年 8 月与 2012 年 8 月。样地大小为 $50\text{m}\times 50\text{m}$, 间隔

为 200 或 300m,距河道最远的样地为 2km(胡杨分布的最远距离)。每个样地被分为 4 个 25m×25m 的乔、灌木样方,分别测定样方中乔木胡杨的株数、高度、胸径、冠幅等指标,样地中没有胡杨的即为“0”。采样时对每个监测井进行地下水埋深测量。

2011 年 2 月 23 日—3 月 2 日,采集塔里木河中游地表水、地下水样,其中地下水采样 30 个,集中在主河道附近布设样井采集,地表水沿河道延伸方向采样 5 个,取样尽量避免人为因素干扰,远离渠道和人工堰渠。 δD 、 $\delta^{18}O$ 在中国科学院新疆生态与地理研究所采用同位素质谱仪测定,并用相对于国际标准样(SMOW)的千分之偏差表示,其测试误差分别为 2‰和 0.2‰。

2.2 数据处理

2.2.1 胡杨径级划分与分布格局

本文采用径级结构代替年龄结构的方法。将胡杨划分为 5 个径级^[15]: I 级苗木,苗木高度(HD)<33cm,胸径(DBH)<2.5cm。II 级苗木,苗木高度(HD)≥33cm,胸径(DBH)<2.5cm。III 级幼树,2.5cm≤立木胸径(DBH)<7.5cm。IV 级成长树木,7.5cm≤立木胸径(DBH)<22.5cm。V 级大树(或老树),立木胸径(DBH)≥22.5cm。并按上述标准统计典型年份不同径级胡杨个数,以径级为纵轴,胡杨株数为横轴,做出胡杨种群径级结构分布图。运用泊松分布拟合的卡方(χ^2)检验、扩散系数法(Cx)、负二项参数(K)、聚块性指数(m^*/m)、平均拥挤度(m^*)、丛生指数(I)、Cassie 指标(Ca)和 Kershaw 格局强度值等 8 个指标,判定典型年份(2001 年、2003 年、2008 年、2012 年)塔里木河中游胡杨种群总体与不同径级的空间格局类型,分析格局强度变化,具体方法见文献^[16-19]。

2.2.2 种群结构动态与趋势预测

采用种群结构动态量化分析方法对研究区内胡杨种群动态进行定量描述,若 $0 < X \leq 1$,则数值越大,增长性越强;若 $-1 \leq X < 0$,则数值越小,衰退性越强,具体方法见文献^[20]。借助一次移动平均法预测模型^[21-22],以 2012 年胡杨各径级个体数为基年数据,预测 2 年和 5 年后的各径级胡杨个数。其预测模型如下:

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

式中 n 表示需要预测的未来时间年限, M_t 表示未来 n 年时 t 径级的胡杨数量, X_k 为当前 k 径级的胡杨数量。

3 结果与分析

3.1 塔里木河中游水文变化

3.1.1 年径流耗损量变化

英巴扎水文站位于塔里木河上中游交界处,是上游水流量进入中游的控制点;卡拉站位于干流中下游交界处,是中游水量进入下游的控制站^[23]。英巴扎、卡拉水文站 1998 至 2009 年监测资料表明,输水堤防修建前中游年径流耗损量在 $25 \times 10^8 m^3$ 以上,其中相当部分以漫溢形式补充给河道外的胡杨林。输水堤防修建后,河水无法漫溢,中游耗损量逐渐减少,时间序列与年径流耗损量的回归方程为 $y = -1.9615x + 27.792$ ($R^2 = 0.6798, P < 0.01$),回归曲线表明中游年耗损量呈直线下降态势(图 2)。

3.1.2 地下水埋深变化

图 3 是 2001 至 2012 年塔里木河中游地区地下水埋深的变化情况,从图上可以看出,2001 至 2005 年,中游地下水埋深保持在 3m 左右;2006 至 2012 年,地下水埋深增至 4m 以上,并随时间推移继续增加。时间序列与地下水埋深的拟合方程为: $y = 0.3104x + 2.3627$ ($R^2 = 0.9015, P < 0.01$)。由模型可见,随着年度的变化,塔里木河中游地区堤防外地下水埋深呈线性增加,与中游耗水量变化趋势一致。

3.2 胡杨种群空间分布格局

3.2.1 不同年度种群空间格局与聚集动态

表 1 是塔里木河中游地区典型年份胡杨种群分布格局比较,从表上可以看出,典型年份(2001 年、2003

年、2008 年、2012 年)下胡杨种群分布类型均为集群型,说明集群分布是塔河中游胡杨种群空间分布的基本特征。从胡杨种群格局强度变化看,2003 年胡杨种群格局强度出现明显的波峰,聚集强度最大;2001 年与 2008 年格局强度基本持平;2012 年较 2001 年与 2008 年略有增强(图 4)。

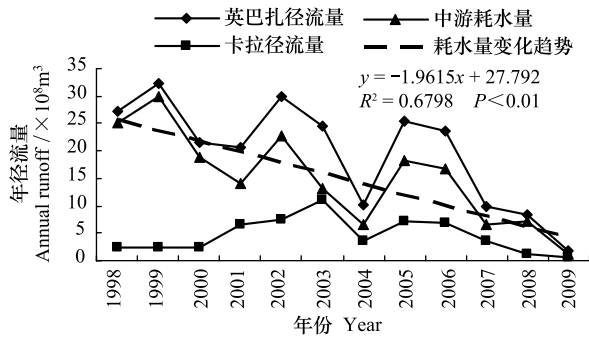


图 2 塔里木河中游年径流耗损量多年变化
Fig. 2 Annual runoff consumption change over years in the middle reaches of Tarim River

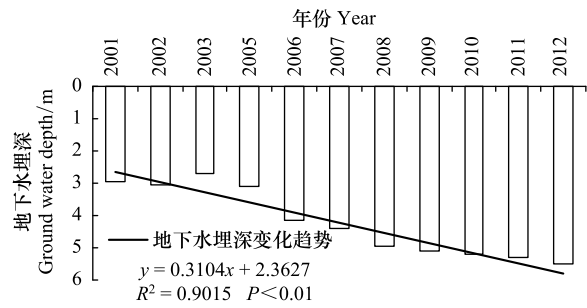


图 3 塔里木河中游地下水埋深变化
Fig. 3 Ground water depth change over years in the middle reaches of Tarim River

表 1 典型年份胡杨种群分布格局比较

Table 1 Comparison of distribution patterns of *Populus euphratica* population on typical years

年份 Year	泊松分布的拟合 X^2 -test of poisson distribution			扩散系数 Dispersal index			聚集强度指标 Clump intensity index			Hill 格局强度值 Pattern intensity values of Hill	Kershaw 格局强度值 Pattern intensity values of Kershaw	分布型 Pattern
	X^2	X^2 (0.05)	X^2 (0.01)	Cx	t	K	$m * /m$	I	$m *$			
2001	11.71	5.99	9.21	31.87	92.60	0.38	3.61	30.87	42.71	2.61	2.31	C
2003	15.83	5.99	9.21	63.26	181.52	0.23	5.41	62.26	76.37	4.41	2.81	C
2008	50.23	9.49	13.28	62.12	232.74	0.39	3.58	61.12	84.85	2.58	1.52	C
2012	51.10	7.81	11.34	68.91	258.59	0.34	3.97	67.91	90.78	2.97	2.09	C

K: 负二项参数 Index of the negative binomial; m^*/m : 聚块性指数 Patchiness index; I : 丛生指数 Cluster index; m^* : 平均拥挤度 Mean crowding; C: 集群分布 Clumped Pattern.

3.2.2 不同发育阶段空间格局与聚集动态

典型年份下,胡杨种群各径级均呈现集群分布的空间格局(表 2)。如图 5 所示,2001 年、2003 年、2012 年径级间聚集动态均为:从第 I 径级向第 V 径级聚集强度逐渐变弱。2008 年第 III 径级至第 IV 径级聚集强度有微弱增强,其余径级间依然呈减弱趋势。总体来看,2008 年格局动态与其它年份基本一致。综上,胡杨种群各径级均为集群分布,且随个体的发育,其聚集强度逐渐降低,幼苗至幼树阶段下降迅速,幼树至成长树木、大树(或老树)阶段下降缓慢。

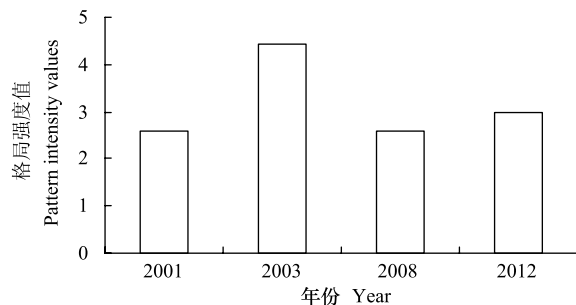


图 4 胡杨种群格局强度变化
Fig. 4 Spatial variations in clustering intensity of *Populus euphratica* population

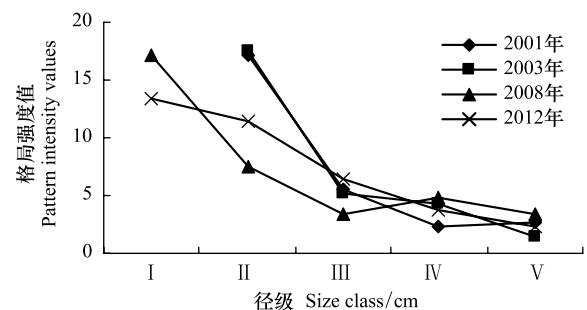


图 5 胡杨种群径级间格局强度变化
Fig. 5 Spatial variations in clustering intensity of *Populus euphratica* population at different size-class

表 2 不同径级胡杨种群分布格局的比较

Table 2 comparison of distribution patterns of <i>Populus euphratica</i> population on typical years at different size-class													
年份 Year	径级 Class sizes	泊松分布的拟合 χ^2 -test of poisson distribution			扩散系数 Dispersal index			聚集强度指标 Clump intensity index			Hill 格局强度值 Pattern intensity values of Hill	Kershaw 格局强度值 Pattern intensity values of Kershaw	分布型 Pattern
		χ^2	χ^2 (0.05)	χ^2 (0.01)	Cx	t	K	m^*/m	I	m^*			
2001	I												
	II	9.99	3.84	6.63	10.00	27.00	0.06	18.10	9.00	9.53	17.1	2.19	C
	III	10.90	3.84	6.63	23.98	68.93	0.18	6.53	22.98	27.14	5.53	5.03	C
	IV	4.95	3.84	6.63	12.79	35.36	0.43	3.33	11.79	16.84	2.33	2.84	C
	V	4.16	5.99	9.21	31.87	92.60	0.38	3.61	30.87	5.27	2.61	1.58	C
2003	I												
	II	29.71	5.99	9.21	118.89	343.73	0.06	18.54	117.89	124.62	17.54	9.44	C
	III	15.94	5.99	9.21	7.27	18.92	0.19	6.13	6.27	7.49	5.13	2.28	C
	IV	11.29	3.84	6.63	18.77	51.80	0.24	5.21	17.77	21.99	4.21	3.36	C
	V	4.45	3.84	6.63	3.66	7.75	0.73	0.65	2.66	4.60	1.37	1.87	C
2008	I	20.67	5.99	9.21	14.18	50.20	0.06	18.20	13.18	13.95	17.20	2.28	C
	II	47.70	7.81	11.34	41.44	153.99	0.31	8.44	40.44	45.87	7.44	4.07	C
	III	20.27	7.81	11.34	12.21	42.68	0.29	4.40	11.21	14.51	3.40	2.68	C
	IV	28.41	7.81	11.34	32.39	119.51	0.21	5.85	31.39	37.85	4.85	2.73	C
	V	32.09	7.81	11.34	27.52	100.97	0.29	4.41	26.52	34.28	3.41	1.81	C
2012	I	18.99	5.99	9.21	13.88	49.03	0.08	14.32	12.88	13.84	13.32	2.10	C
	II	55.76	7.81	11.34	47.64	177.58	0.09	12.47	46.64	50.70	11.47	4.16	C
	III	21.16	7.81	11.34	22.38	81.41	0.16	7.35	21.38	24.75	6.35	2.28	C
	IV	66.84	7.81	11.34	26.42	96.81	0.27	4.74	25.42	32.22	3.74	2.61	C
	V	22.52	7.81	11.34	19.34	69.85	0.42	3.39	18.34	26.01	2.39	1.42	C

K: 负二项参数 Index of the negative binomial; m^*/m : 聚块性指数 Patchiness index; I: 丛生指数 Cluster index; m^* : 平均拥挤度 Mean crowding. C: 集群分布 Clumped Pattern.

3.3 胡杨种群结构与动态

3.3.1 胡杨种群结构

从图 6 可以看出,2001 年塔河中游胡杨种群径级结构呈纺锤形,2008 年与 2012 年呈倒金字塔形,均属于衰退型胡杨种群;2003 年胡杨 II 级幼苗比重大幅增加,呈不规则金字塔形,属稳定型种群。据统计,2001 年 I 径级胡杨苗木缺失(个体数为 0),II 径级苗木极度稀缺(仅 11 株),III、IV、V 径级立木占胡杨总个体数的 95.65%。2003 年 I 径级苗木依然绝迹,但 II 径级苗木个体丰富,占总体 47.67%,成长树木与大树(或老树)分别占 29.92%、13.78%,种群结构不完整。2008 年与 2012 年径级结构所呈倒金字塔形态相似,I 径级个体数量极少,苗木匮乏,IV、V 径级个体数均多于其余径级,立木级胡杨数量较多。综上所述,中游堤防修建后,胡杨种群表现为 I 级幼苗丧失或稀缺、II 级幼苗所占比重过低、立木级占绝对优势,反映出种群结构老化、更新能力低下的特征。

3.3.2 胡杨种群结构动态

V_{pi} 可反映种群结构个体数量增长、稳定、或衰退的变化趋势,而通过观察 V_{pi}' 、 V_{pi}'' 与 V_{pi} 取值的变化,可以分析种群在经受随机与非随机干扰时的稳定程度。由表 3 可知:在无外部干扰的情况下,典型年份(2001 年、2003 年、2008 年、2012 年)塔河中游胡杨径级结构动态指数(V_{pi})分别为 0.18、0.57、-0.08、-0.16,考虑到外部随机干扰和非随机干扰的 V_{pi}' 、 V_{pi}'' 分别为:0.0036、0.0052、-0.0007、-0.0011 与 0.0190、0.0578、-0.0030、-0.0044。由此可见,2001 年与 2003 年塔河中游胡杨种群结构呈增长趋势,2008 年与 2012 年呈衰退趋势。 V_{pi} 、 V_{pi}' 、 V_{pi}'' 的增长性排列为 2003 年>2001 年;衰退性排列为 2012 年>2008 年。生态输水初期,地

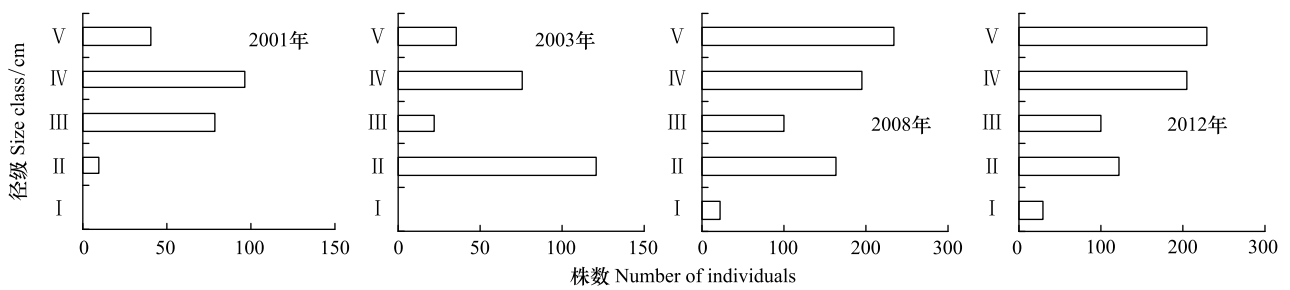


图 6 胡杨种群径级结构(a:2001,b:2003,c:2008,d:2012)

Fig. 6 Size-class structure of *Populus euphratica* population (a: 2001, b: 2003, c: 2008, d: 2012.)

下水埋深在 3m 左右(2001 至 2005 年),可在一定程度上满足胡杨生长发育的水分需求,2001 年胡杨种群虽属衰退型,但在结构动态上呈增长趋势。2002 至 2003 年丰水期来临,充沛的河水大量补给堤外,地下水埋深抬升至 2.68m,因此,2003 年胡杨种群变为稳定型,种群结构的增长趋势增强。随后,中游耗水量逐年减少导致地下水埋深不断增加,堤防外生态用水紧缺,胡杨种群转入衰退型(2008 年、2012 年),且衰退趋势逐步加深,应对外界干扰的抵抗能力持续降低(表 3)。

表 3 胡杨种群径级结构动态分析

Table 3 Dynamic analysis of size-class structure of *Populus euphratica* population

年份 Year	地下水埋深/m Groundwater depth	V1	V2	V3	V4	Vpi	P	Vpi'	P'	Vpi''
2001	2.97	-1.00	-0.87	-0.18	0.58	0.18	0.0200	0.0036	0.1056	0.0190
2003	2.68	-1.00	0.82	-0.71	0.54	0.57	0.0091	0.0052	0.1017	0.0578
2008	4.95	-0.86	0.39	-0.49	-0.17	-0.08	0.0087	-0.0007	0.0386	-0.0030
2012	5.51	-0.76	0.17	-0.50	-0.11	-0.16	0.0069	-0.0011	0.0264	-0.0044

V1: I - II 径级变化动态指数 Dynamic index value of I - II class sizes; V2: II - III 径级变化动态指数 Dynamic index value of II - III class sizes; V3: III - IV 径级变化动态指数 Dynamic index value of III - IV class sizes; V4: IV - V 径级变化动态指数 Dynamic index value of IV - V class sizes; Vpi: 无外部干扰变化动态指数 Dynamic index value under no external disturbance; Vpi': 完全随机干扰变化动态指数 Dynamic index value under completely random disturbance; Vpi'': 非随机干扰下变化动态指数 Dynamic index value of non-random disturbance; P: 完全随机干扰下的风险极大值 Maximum risk value under completely random disturbance; P': 非随机干扰下的风险极大值 Maximum risk value under non-random disturbance.

3.3.3 种群结构动态与地下水埋深的关系

地下水是维系干旱区胡杨种群生长发育的主要水分资源, Vpi' 表示胡杨种群在随机干扰下的结构动态。如图 7 所示, Vpi' 与地下水埋深具有较好的拟合关系, 其回归方程为 $y = -0.0086\ln(x) + 0.0134$ ($R^2 = 0.9867$, $P < 0.01$)。该模型显示, 随地下水埋深的增加, 胡杨种群的生长指数不断下滑, 当地下水埋深降至 4.7m 时, 增长指数变为负值, 种群出现负增长现象, 这表明地下水资源的减少严重阻碍了胡杨种群的更新发展, 地下水埋深的增加是导致种群衰退的直接原因。

中游生态堤防阻断了洪水漫溢, 导致堤外湿地土壤干裂, 同时, 土壤盐分无法得到漫溢径流的冲洗与下压, 致使表层盐分富集。这些环境变化使胡杨种子萌发无法实现, 林木更新困难。更为重要的是, 洪水漫溢消失后, 地下水失去了其重要补给来源, 而河水侧渗受到年径流耗损量逐年减少的影响, 对地下水的补给也不断减弱, 这导致了地下水埋深逐渐增加, 直接限制了胡杨种群的生长发育。

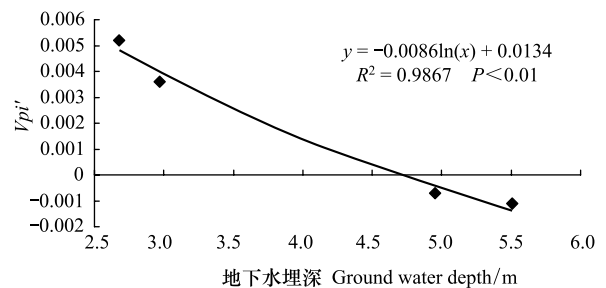


图 7 塔里木河中游胡杨种群结构动态与地下水埋深关系

Fig. 7 Relationship between structure dynamic of *Populus euphratica* population and groundwater depth in the middle reaches of the Tarim River

3.3.4 种群变动预测

以 2012 年调查数据为基年数据,运用时间序列分析中的移动平均法对塔里木河中游胡杨种群数量进行预测分析。如表 4 所示,在未来 2 年,幼苗、成长树木、大树(或老树)的个体数量呈减少趋势,幼树数量呈增加趋势;未来 5 年,大树(或老树)的数量将大幅减少,胡杨种群或面对死亡高峰。由此推测,水文条件变化导致中游生态环境逐渐恶化,严重阻碍了胡杨种群的更新发展。

4 讨论

4.1 水文补给与胡杨格局

从年际变化来看,塔里木河中游年径流量、耗损量均呈直线下滑的趋势,同时地下水埋深不断增加。借助稳定同位素技术分析水文补给关系,如图 8 所示,地表水线与地下水线基本平行,表明中游地表水与地下水稳定同位素关系特征相近;而地下水样点逼近于地表水线下方,这说明地下水主要依靠地表水补给。中游河道曲折蜿蜒,多分岔散流,洪水期大量河水溢出河道形成地表径流。2000 年堤防修建阻碍了洪水漫溢,地下水失去其重要水源,只能依靠河道径流侧渗与生态闸输水补给。这种方式受到年径流量与耗损量逐年减少的影响,地下水补给持续受损、地下水埋深不断增加。漫溢消失后,堤外不具备萌发条件,胡杨种子苗绝迹。河岸林只能依靠根蘖繁殖来维系林木更新。根蘖苗形成后分布在母株周围,依靠母体抵抗不良环境,这使胡杨幼苗聚集强度达到最强。至立木时期,个体对环境的要求日益增强,特别是对地下水的需求,但堤防外地下水位不断下降,种内竞争与排斥加剧,导致个体逐渐稀疏,聚集强度持续降低。至大树(或老树)阶段,个体为积累大量资源以维持生存,对水分、光照、空间及营养的争夺达到顶峰,此时聚集强度降至最低,并有向随机分布发展的趋势。胡杨种群所表现出的格局动态是由水文影响与生物竞争共同作用的结果,反映了种群在生长发育过程中的生存策略以及对水文变化的适应机制。

4.2 水位变化与胡杨格局

干旱区降水稀少,几乎没有有效降水供胡杨消耗,胡杨的生长发育主要依靠地下水资源维系^[24-25],因此,维持胡杨生长所需水分的地下水埋深被称为生态地下水位^[26]。种群结构动态与地下水埋深的回归模型显示,随地下水埋深的增加,种群结构增长指数不断降低,当地下水埋深达到 4.7m 时,胡杨种群的生长转入衰退趋势。洪水漫溢消失后地下水只能依靠河水侧渗与生态闸输水补给,这种方式无论从影响范围还是补给效果方面都无法取代自然漫溢。在中游耗水量逐年减少的影响下,堤外地下水埋深不断降低,胡杨生长所需的生态用水日益匮乏,直接制约了种群的更新发育。天然胡杨利用集群分布的格局与径级间聚集强度持续降低的生存策略来适应恶劣环境、维持生存发展,这种格局动态反映了胡杨种群对水文变化的响应机制。2003 年胡杨种群结构趋于稳定,且聚集强度最大、增长趋势最强,这是由于 2002 年中游河段耗水量剧增,堤外地下水得到充分补给,但生态对环境变化的迟滞性特征,使 2003 年地下水位抬升(2.68m),充足的生态用水促进了河岸林的生长发育。这表明胡杨种群的生长状况对地下水埋深变化极为敏感,佐证了河岸林对水文变化的

表 4 塔里木河中游胡杨种群结构时间序列预测

Table 4 Time sequence of population structure of *populus euphratica* population in the middle reaches of Tarim River

径级 Class sizes	原始数据 Primary data	M ₂₍₁₎	M ₅₍₁₎
I	29		
II	122	76	
III	101	112	
IV	204	153	
V	230	217	137

M₂:未来 2 年时胡杨个体数量 Individual numbers of *populus euphratica* in next two years; M₅:未来 5 年时胡杨个体数量 Individual numbers of *populus euphratica* in next five years.

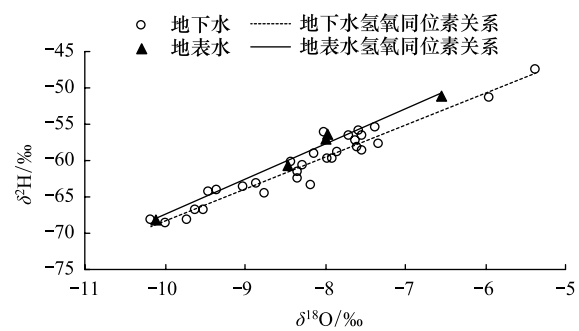


图 8 塔里木河中游 $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ 关系

Fig. 8 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ of groundwater in the middle reaches of Tarim River

响应。

生态输水后,中游耗水量逐年减少,地下水埋深不断下降,导致堤防外干旱胁迫加剧。生态恶化使胡杨幼苗更新困难,种群结构老化,除丰水期呈稳定型(2003 年)外,其余各年均表现为衰退型(2001 年、2008 年、2012 年)。这表明在水文条件变化的影响下,河岸胡杨林已出现了长期的种群退化现象。时间序列预测显示,未来 2 年,除幼树呈小幅增长趋势外,其余径级个体都将大幅减少;今后 5 年胡杨种群将持续衰退,5 年后将面临一次死亡高峰。可以推断,由于林木结构失调、更新困难,若不采取适当的保育措施,胡杨种群将走向灭亡。

不可否认,生态输水工程使塔河下游“生态走廊”得以修复,生态环境日渐好转;但这也改变了中游河段的水文过程,随着地表水与地下水的逐年减少,堤防外生态用水紧缺、盐碱胁迫加剧,环境日益恶化。胡杨种群各径级均以集群分布的格局来应对恶劣环境,种群的自我更新与生态演替存在问题,出现长期的种群衰退现象,长此以往,中游河岸林将走向衰亡。因此,这种以牺牲中游生态换取下游生态修复的方法是否利大于弊,有待权衡,但对于中游堤防的改进刻不容缓。

5 结论

地下水作为维系干旱区胡杨更新发育的生态水源,它主要依靠地表水补给。2000 年中游生态堤防修建阻断了由洪水漫溢带来的地表径流,致使水文过程发生改变。地下水只能依靠河道径流的侧渗与生态闸输水补给,这无论从影响范围还是补给水量上都无法取代自然漫溢的效果。同时,受中游河段年径流量与耗损量逐渐减少的影响,地下水补给受损、埋深不断增加。

中游水文变化导致地下水资源日益匮乏,堤防外生态用水骤减,土壤表层盐分富集,干旱、盐碱胁迫加剧。为应对环境恶化,天然胡杨在时空格局与种群结构上均做出了生态响应。时空格局上,胡杨种群受资源胁迫而呈现集群分布的格局,并借助集聚优势维系生存发展;聚集动态上,幼苗聚集强度最强,但随个体发育集聚度逐渐降低,大树(或老树)阶段聚集强度降至最低并有向随机分布发展的趋势。种群结构上,地下水埋深的增加使胡杨种群增长指数不断降低并转入衰退趋势,种群出现结构老龄化、更新困难的现象,除 2003 年外,其余各年胡杨均为衰退型种群。2002 年的丰水期改善了堤外生境,但生态对环境变化具有迟滞性特征,使 2003 年地下水埋深抬升,胡杨种群变为稳定型,且聚集强度最大、增长趋势最强,这验证了胡杨种群对水文变化的响应。

致谢:感谢中科院新疆生态与地理研究所陈亚宁研究员、李卫红研究员以及华东师范大学陈忠升博士在野外实验与数据搜集过程中给予的大力帮助。

参考文献(References):

- [1] 吴俊侠,张希明,李利,邓潮州,刘国军,武广洋. 塔里木河干流中游胡杨种群特征与动态分析. 干旱区研究, 2010, 27(2): 242-248.
- [2] 邓潮州,张希明,吴俊侠,朱军涛,魏疆,吕朝燕. 输水堤坝对塔里木河中游胡杨群落及种群的影响. 生态学报, 2010, 30(5): 1356-1366.
- [3] 张绘芳,李霞. 塔里木河下游胡杨种群空间分布格局分析. 西北植物学报, 2006, 26(10): 2125-2130.
- [4] 陈亚宁,张宏峰,李卫红,陈亚鹏. 新疆塔里木河下游物种多样性变化与地下水位的关系. 地球科学进展, 2005, 20(2): 158-165.
- [5] 陈永金,陈亚宁,李卫红,刘加珍. 塔里木河下游输水条件下浅层地下水化学特征变化与合理生态水位探讨. 自然科学进展, 2006, 16(9): 1130-1137.
- [6] 吴俊侠,张希明,邓潮州,刘国军. 塔里木河上游胡杨种群特征与动态分析. 干旱区地理, 2010, 33(6): 923-929.
- [7] 吴俊侠,张希明,邓潮州,刘国军,阎海龙. 塔里木河下游胡杨种群特征与动态分析. 干旱区资源与环境, 2010, 24(8): 164-169.
- [8] 刘加珍,陈亚宁,张元明. 塔里木河中游主要植物种群的生态特征分析. 地理研究, 2003, 22(5): 663-670.
- [9] 张元明,陈亚宁,张道远. 塔里木河中游植物群落与环境因子的关系. 地理学报, 2003, 58(1): 109-118.
- [10] 刘晏良. 塔里木河中下游实地踏勘报告. 北京: 中国统计出版社, 2000.

- [11] 黄培佑. 干旱生态学. 乌鲁木齐: 新疆大学出版社, 1993.
- [12] 韩路, 王海珍, 周正立, 李志军. 塔里木河上、中游胡杨种群结构与统计分析. 生态学报, 2007, 27(4): 1315-1322.
- [13] 于军, 白冠章, 梁继业, 李志军. 塔里木河上、中、下游胡杨种群高度结构特征. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 103-109.
- [14] 陈永金, 李卫红, 刘加珍, 张二勋, 陈诗越. 输水堤防工程对塔里木河中游荒漠河岸林生态系统的影响. 自然科学进展, 2009, 19(5): 505-512.
- [15] 曲仲湘, 文振旺. 南京栖霞山林木现况的观察. 复旦学报, 1955, (1): 123-144.
- [16] 张金屯. 数量生态学 (第二版). 北京: 科学出版社, 2011.
- [17] 李军, 张秋良, 高润宏, 陆平. 额济纳绿洲胡杨种群结构与分布格局研究. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 187-190.
- [18] 兰国玉, 雷瑞德. 植物种群空间分布格局研究方法概述. 西北林学院学报, 2003, 18(2): 17-21.
- [19] 李海涛. 植物种群分布格局研究概况. 植物学通报, 1995, 12(2): 19-26.
- [20] 陈晓德. 植物种群与群落结构动态量化分析方法研究. 生态学报, 1998, 18(2): 214-217.
- [21] 傅立国. 中国珍稀濒危植物. 上海: 上海教育出版社, 1989: 158-159.
- [22] 肖宜安, 何平, 李晓红, 邓洪平. 濒危植物长柄双花木自然种群数量动态. 植物生态学报, 2004, 28(2): 252-257.
- [23] 陈忠升, 陈亚宁, 徐长春. 近 50a 来塔里木河干流年径流量变化趋势及预测. 干旱区地理, 2011, 34(1): 43-51.
- [24] 白元, 徐海量, 刘新华, 凌红波. 塔里木河干流荒漠河岸林的空间分布与生态保护. 自然资源学报, 2013, 28(5): 776-785.
- [25] 徐海量, 宋郁东, 王强, 艾合买提. 塔里木河中下游地区不同地下水位对植被的影响. 植物生态学报, 2004, 28(3): 400-405.
- [26] 韩路, 席琳乔, 王家强, 王海珍, 宇振荣. 塔里木河上游灰胡杨种群生活史特征与空间分布格局. 生态学报, 2013, 33(19): 6181-6189.