

DOI: 10.20103/j.stxb.202205291510

何熙祥, 玉米提·哈力克, 董宗炜, 艾萨迪拉·玉苏甫, 艾里西尔·库尔班. 水分梯度下胡杨荒漠河岸林种内竞争及空间格局变化特征. 生态学报, 2023, 43(18): 7497-7506.

He X X, ÜMÜT Halik, Dong Z W, ASADILLA Yusup, ALISHIR Kurban. Spatial distribution pattern and intraspecific competition of *Populus euphratica* riparian forests under different water gradients. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18): 7497-7506.

水分梯度下胡杨荒漠河岸林种内竞争及空间格局变化特征

何熙祥¹, 玉米提·哈力克^{1,*}, 董宗炜², 艾萨迪拉·玉苏甫¹, 艾里西尔·库尔班³

1 新疆大学生态与环境学院/绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830017

2 新疆塔里木河流域干流管理局, 库尔勒 841000

3 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

摘要:为查明塔里木河下游不同水分梯度下胡杨种内竞争以及空间分布格局的变化规律,在塔里木河下游阿拉干断面选取 3 条样带,每条样带内依照水分梯度布设 3 个样方,采用 Hegyi 单木竞争模型与点格局等分析方法,探究了水分梯度下胡杨林种内竞争及空间格局变化特征。结果表明:1) 塔里木河下游胡杨的最适竞争范围为 10m;2) 胡杨竞争指数与胸径服从幂函数关系 ($P < 0.001$), 胡杨竞争指数随对象木胸径的增加而逐渐减小,当对象木胸径达到 20cm 以上时,其竞争指数逐渐稳定,且维持在较低水平;3) 随水分梯度的降低,胡杨林分竞争指数呈下降趋势;4) 在塔里木河下游,胡杨空间格局主要为聚集分布,随空间尺度的增加,胡杨逐渐趋向于随机分布;5) 随水分梯度的降低,胡杨空间格局由聚集分布逐渐转变为随机分布。水分是决定极端干旱区荒漠植被空间分布与结构的主要因子;在胡杨林分管理中,应充分考虑胡杨的种内竞争、空间格局及其与水分梯度之间关系,为塔里木河下游胡杨林的保护与更新提供科学依据。

关键词:胡杨;水分梯度;竞争指标;点格局分析;塔里木河

Spatial distribution pattern and intraspecific competition of *Populus euphratica* riparian forests under different water gradients

HE Xixiang¹, ÜMÜT Halik^{1,*}, DONG Zongwei², ASADILLA Yusup¹, ALISHIR Kurban³

1 College of Ecology and Environment, MoE Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China

2 Management Bureau of the Main Stream of Xinjiang Tarim River Basin, Korla 841000, China

3 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

Abstract: Euphrates Poplar (*Populus euphratica* Oliv.) is a construction deciduous tree species in desert riparian forest and plays a vital role in ecological protection and sustainable floodplain management in arid regions. During a long period of time, the population growth structure has changed under the extreme drought environment under the water resources stress in the lower reaches of the Tarim River, and the forest stands spatial structure change is one of the obvious manifestations. Under the background of ecological water conveyance projects in this region over the past 20 years, it is necessary to find out the forest structure changes at present stage. Therefore, systematic study of the adaptability of *P. euphratica* population spatial distribution pattern and intraspecific competition under different water gradient conditions need to perform, which can deepen the understanding of the riparian forest adaptation mechanism to arid environment. In the present study, to

基金项目:国家自然科学基金项目(32260285, 31860134);新疆塔里木河流域干流管理局横向课题(TGJGLJJG2021ZXF0007)

收稿日期:2022-05-29; **网络出版日期:**2023-05-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: halik@xju.edu.cn

investigate the intraspecific competition dynamics and spatial distribution patterns of *P. euphratica* under different water gradient conditions, three transects were selected at the Arghan area in the lower reaches of the Tarim River, NW China. Each transect was divided three research sites according to the water gradient. The results showed that: 1) the optimum competition range of *P. euphratica* in the lower Tarim River was 10 m; 2) The competition index and diameter at breast height (DBH) obtained the power function model ($P < 0.001$). The competition index of *P. euphratica* decreased with the increase of the DBH, the competition index of the target tree gradually stabilized and remained at a low level, when the diameter at breast height of the target tree reached 20 cm or more; 3) The competition index of *P. euphratica* stands decreased with the decrease of the water gradient; 4) In the lower reaches of the Tarim River, the spatial distribution pattern of *P. euphratica* was mainly aggregated pattern, and with the increase of spatial scale, the distribution pattern gradually tended to random pattern; 5) With the decrease of water gradient, the spatial pattern of *P. euphratica* gradually changed from the aggregated to random distribution pattern. Water was the main factor determining the spatial distribution and structure of desert vegetation in extreme arid zones; In *P. euphratica* stand management, the relationship between interspecific competition, the spatial pattern and water gradient should be fully considered to provide an important scientific basis for the conservation and regeneration of the riparian forests in the lower reaches of the Tarim River.

Key Words: *Populus euphratica*; water gradient; competition index; point pattern analysis; Tarim River

树木之间的竞争是一种重要的生态学过程,其对种群和群落的稳定性和发展趋势具有重要的生态学意义^[1]。在同一生境中,两株或两株以上的树木对资源争夺而产生的相互作用关系称为林木竞争^[2]。单木竞争指标反应林分内每个单木平均占有的空间和资源等因素,随着树木的生长发育,其对空间以及资源的需求逐渐增大,树木之间开始竞争,竞争的结果导致一些树木死亡,一些树木得到更大的生存空间^[3]。竞争指标反映树木生长与其生存环境之间的关系,实质是反映树木对资源的需求以及争取资源所承受的压力。树木竞争强度取决于树木本身生长状态(如胸径、树高、冠幅等),和树木所处的立地环境以及相邻木状态^[4]。

空间格局是指在某种程度上可预测的生物个体在空间上的位置布局,可用来描述生物在一定空间范围内的分布型^[5]。林木空间分布格局作为种群分布的外在表现形式,其反映初始数据、微环境差异、气候和光照、植物竞争以及单株树木生长等综合作用的结果,分析树木空间分布格局有助于理解森林的建立、生长、死亡以及更新等生态过程^[4]。

胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)是杨柳科杨属的古老物种^[6],其主要分布于新疆南部塔里木河流域,是荒漠河岸植被主要优势种。胡杨林提供了广泛的生态系统服务,如生物多样性的保护,调节绿洲气候,减少沙尘等^[7-8]。胡杨种群的分布格局决定着塔里木河流域整个植物群落的结构^[9]。由于高强度的水资源开发导致塔里木和下游胡杨林面积逐渐减少,因此胡杨被列入为渐危三级保护植物^[7]。以往对胡杨种内竞争、空间格局等方面进行了较多研究。韩路等^[10]分析了塔里木河中游灰胡杨空间格局,得出灰叶胡杨种群呈集群分布,随着发育阶段的推进,其空间格局由随机分布向集群分布转变。赵正帅等^[11]在耶尔羌河下游研究发现,集群分布是胡杨以及灰叶胡杨克隆分株种群空间分布的基本属性。另外韩路等^[12]研究表明,塔里木河上游胡杨的最适竞争距离为 6m,且胡杨胸径达到 30cm 以上时,竞争强度变化趋于平缓。尽管诸多学者对胡杨空间格局已有较为深入的研究,但胡杨空间格局随水分梯度变化却鲜见报道。另外胡杨竞争研究主要集中在塔里木河上游,中、下游胡杨种内竞争研究较为罕见。为此,本文以塔里木河下游胡杨为研究对象,分析比较水分梯度下胡杨种内竞争以及分布格局,旨在揭示胡杨林种内竞争以及空间结构变化规律,为塔里木河下游胡杨种群的保护和恢复提供理论参考。

1 研究区概况

研究区位于塔里木河下游阿拉干断面(40°08'50"N, 88°21'28"E)(图 1),在大西海子水库至台特玛湖之

间。气候类型属于典型的温带大陆性干旱荒漠气候,年平均气温为 10.8℃,年降水量为 17—40mm,年蒸发量高达 3000mm,是我国极端干旱地区之一^[13]。塔里木河河岸植被以胡杨为优势种,伴生植物主要有多种怪柳(*Tamarix* sp.)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、芦苇(*Phragmites communis*)等,地表流沙活动频繁,植被盖度低于 20%^[14—16]。

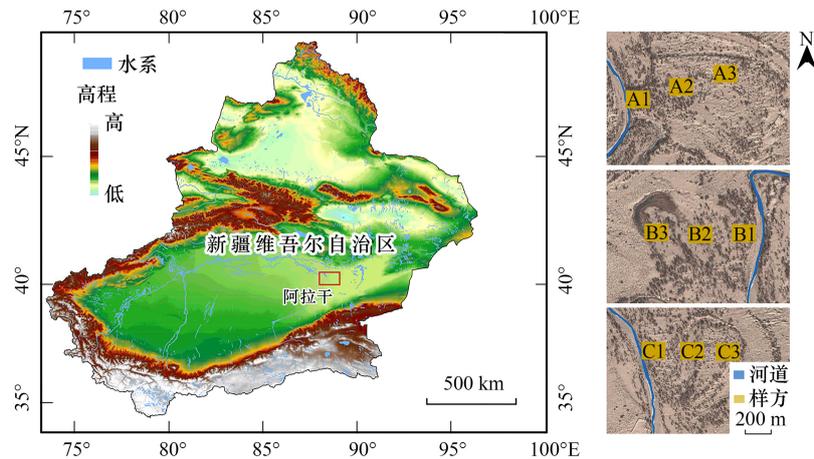


图 1 研究区及样地布设图

Fig.1 Study area and sample plot layout

2 研究方法

2.1 数据获取

2021 年 6 月,在塔里木河下游阿拉干断面平行河道选取 A、B、C3 条样带,每条样带内依据水分梯度划分 3 块 100m×100m 样方(表 1),离河道由近到远将样方分为样方 1、样方 2 和样方 3(图 1)。对样方内所有胡杨进行编号并测定其胸径、树高、枝下高、冠幅等参数,并人工建立坐标系,测定所有林木的空间位置坐标。为了消除边缘效应,每块样方内建立 10m 缓冲区,选取缓冲区内胡杨作为对象木进行单木竞争分析。样地土壤水盐信息见表 1。

表 1 样地土壤水盐信息

Table 1 Soil salt and water content of sampling sites

样带 Transect	样方 Site (100m×100m)	土壤含盐量 Soil salt content /(g/kg)				土壤含水量 Soil water content/%			
		0—30cm	30—60cm	60—90cm	90—120cm	0—30cm	30—60cm	60—90cm	90—120cm
A	A1	2.48±0.18c	2.34±0.12c	2.18±0.07b	1.4±0.15b	7.42±0.1a	14.14±0.34a	23.38±0.3b	29.95±0.22a
	A2	4.41±0.18a	2.48±0.24bc	1.73±0.15c	1.23±0.12b	6.25±0.07b	12.16±0.26b	24.43±0.26a	27.23±0.37b
	A3	1.58±0.05d	0.71±0.04d	0.49±0.04e	0.21±0.04d	2.35±0.06f	6.61±0.37e	9.27±0.43e	10.07±0.52f
B	B1	2.31±0.27c	0.73±0.1d	0.56±0.07de	0.76±0.18c	5.21±0.14d	9.21±0.52c	13.64±0.49c	14.48±0.28d
	B2	4.59±0.3a	2.69±0.17ab	1.69±0.14c	1.47±0.13b	3.80±0.14e	8.68±0.03c	11.79±0.03d	12.72±0.03e
	B3	1.48±0.35d	0.82±0.19d	0.8±0.12d	1.77±0.23a	1.37±0.04h	5.38±0.26f	7.47±0.17f	9.49±0.39f
C	C1	3.11±0.22b	2.76±0.29ab	2.59±0.39a	1.73±0.18a	6.03±0.04c	11.61±0.38b	23.58±0.33b	23.19±0.5c
	C2	1.75±0.19d	0.77±0.12d	0.68±0.16de	0.22±0.04d	2.51±0.18f	7.28±0.62d	11.76±0.52d	12.29±0.51e
	C3	3.29±0.27b	2.86±0.09a	2.59±0.23a	1.95±0.16a	1.57±0.02g	2.53±0.13g	7.55±0.21f	8.00±0.12g

A、B、C 分别为选取的 3 条样带,A1—A3 表示样带 A 中在离河道 50m、250m、450m 距离处 3 个样方;B1—B3 表示样带 B 中在离河道 50m、250m、450m 距离处 3 个样方;C1—C3 表示样带 C 在离河道 50m、250m、450m 距离处 3 个样方;不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

2.2 竞争分析

目前对于单木竞争的研究较多,至今已提出了多种不同形式的单木竞争指标,包括与距离相关的和与距

离无关的竞争指数,其中以与距离相关的 Hegyi^[17]的竞争模型不仅可以反映种群个体生长与生存空间的关系,而且也反映植株对环境质量要求与真实生境下树木对环境资源占有量之间的关系,并且 Hegyi 的单木竞争模型野外调查简单易行,所获得的数据准确性高,已经被大量用于在树木种内以及种间的竞争关系研究^[18-21]。因此,本文采取 Hegyi 竞争指数,其公式为:

$$CI = \sum_{i=1}^N \frac{D_j}{D_i} \times \frac{1}{L_{ij}} \quad (1)$$

$$\overline{CI} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{D_j}{D_i} \times \frac{1}{L_{ij}} \quad (2)$$

$$CIA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n CI \quad (3)$$

式中, CI 为竞争指数, \overline{CI} 为平均竞争指数, CIA 为林分平均竞争指数,其值越大竞争越强烈,表明对象木承受的竞争压力越大; D_i 表示对象木 i 的胸径; D_j 表示竞争木 j 的胸径; L_{ij} 表示对象木 i 与竞争木 j 之间的距离, N 表示竞争木的株数, n 为对象木株数。

当树木树冠或者根系发生重叠时,即生态位发生重叠,树木才会对有限的资源和生长空间的争夺从而发生竞争,所以对象木所受到的竞争压力主要来自其周围树木,并且随着距离增加,竞争木对对象木的竞争强度可能会先增加后逐渐减弱或消失。因此本研究采取固定样圆半径法,以 2m 为半径,2m 为半径梯增量,分别计算 2—20m 范围内对象木的平均竞争指数。随着半径增加,当竞争强度变化不显著时确定胡杨的竞争范围 L_{ij} 。

2.3 点格局分析

基于塔里木河下游胡杨空间点坐标信息,本研究运用以 Ripley's K ^[22] 函数为基础的 $g(r)$ 函数方法对 3 条样带 9 个样方胡杨种群在 0—25m 尺度上的空间分布格局进行分析。 $g(r)$ 能够很好的排除 $K(r)$ 函数引起的累积效应,具有广泛的适用性^[23-24]。其中,Ripley's K 函数计算公式如下:

$$K(r) = \frac{A}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n W_{ij}^{-1} I_r(u_{ij}) \quad (4)$$

式中, A 是研究区(样地)的面积, u_{ij} 为 2 个点 i 和 j 之间的距离; $I_r(u_{ij})$ 为指示函数,当 $u_{ij} \leq r$ 时, $I_r(u_{ij}) = 1$, 当 $u_{ij} > r$ 时, $I_r(u_{ij}) = 0$; W_{ij} 为权重值,用于边缘校正。

$g(r)$ 函数与 $K(r)$ 函数的关系为:

$$g(r) = (2\pi r)^{-1} dK(r)/dr \quad (5)$$

式中, $dK(r)$ 为函数 $K(r)$ 的微分, dr 是半径 r 的微分。

$g(r)$ 值在包迹线之间为随机分布,在上包迹线之上为显著聚集分布,在下包迹线之下为显著均匀分布。

2.4 统计分析

竞争指数与点格局通过软件 R4.1.2 的 spatstat 包完成,其中点格局分析尺度为 0—25m,经 199 次 Monte-Carlo 模拟得到 99% 的置信区间,其他数据分析采用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 完成。

3 结果与分析

3.1 竞争强度分析

3.1.1 竞争范围的确定

如图 2 所示, A、B、C3 条样带各样方内胡杨平均竞争指数随半径的增加而减小或波动。根据竞争强度变化量可以发现,随着竞争范围的增加,竞争强度变化量整体呈减小的趋势,样方 A3 中胡杨竞争指数随竞争范围的增加而增加, B3 中胡杨竞争指数随竞争范围的增加先增大后减小。当竞争半径为 10m 时,竞争指数与竞争指数变化量基本保持稳定。这表明,竞争指数变化量随竞争半径的变化而变化,距离越近,竞争木对对象

木的影响越明显。因此,研究认为,在塔里木河下游,10m 是研究胡杨种内竞争的最适范围,最能反映胡杨个体之间真实竞争情况。

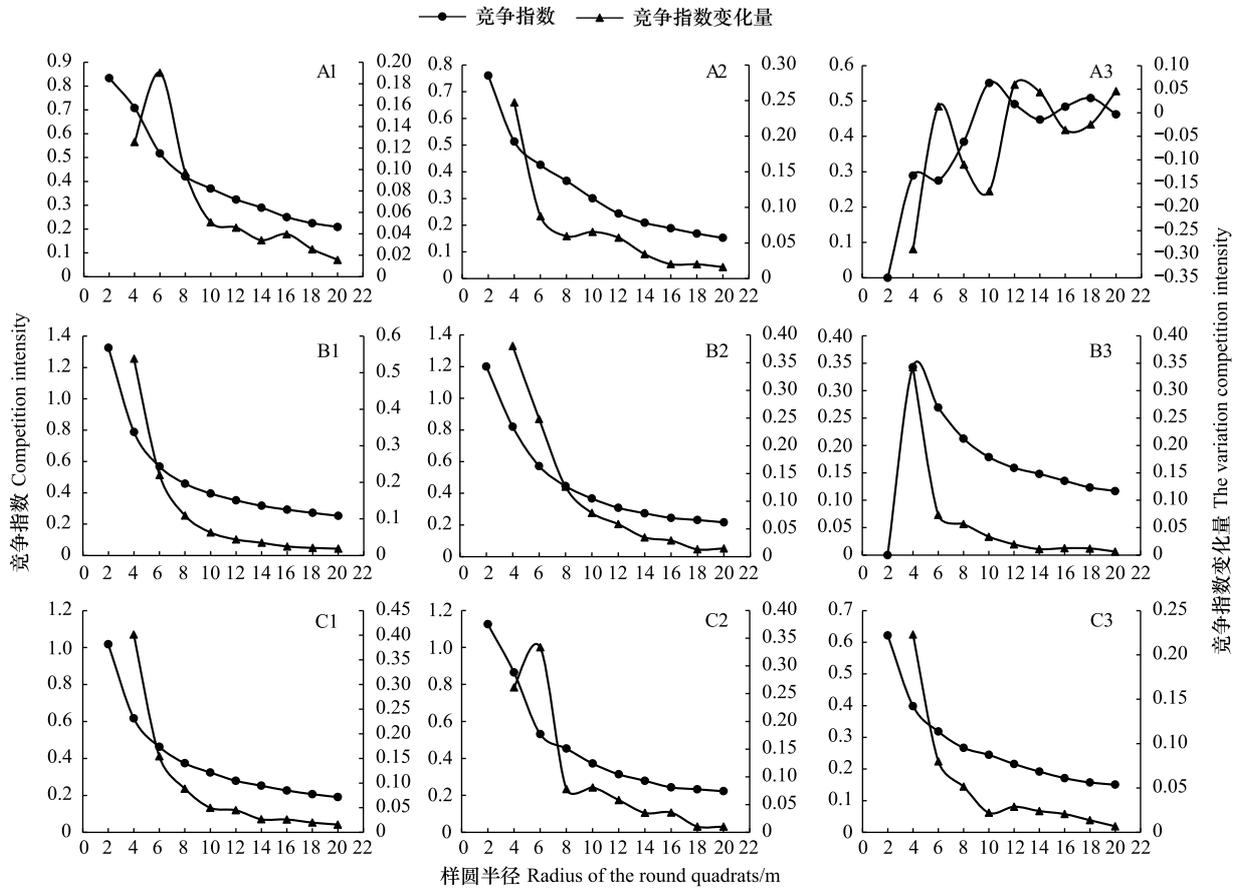


图 2 三个样带不同样方内胡杨竞争强度与样圆半径的关系

Fig.2 Relationship between competition index and sample circle radius of *P. euphratica* object trees in each plots of different transects

3.1.2 竞争强度与胸径的关系

如表 2,通过对比 3 条样带内不同样方胡杨胸径与竞争指数相关分析发现,胡杨胸径与竞争指数呈负相关关系,即树木的胸径越小,其竞争指数越高,受到的竞争压力越大。在样方 A3 中,胡杨竞争指数与胸径相关性最低,没有达到显著水平,在其他样方中,尤其是高水分环境下,其相关性均达到显著水平。

表 2 竞争指数 10m 与胸径相关性分析

Table 2 Correlation coefficients between competition index (sample circle 10m) and DBH

样带 Transect	样方 Site(100m×100m)	株数 Number of trees	相关系数 Correlation coefficient	P
A	A1	97	-0.640 **	P<0.001
	A2	63	-0.267 *	P<0.05
	A3	19	-0.455	P=0.05
B	B1	130	-0.650 **	P<0.001
	B2	99	-0.517 **	P<0.001
	B3	42	-0.575 **	P<0.001
C	C1	129	-0.489 **	P<0.001
	C2	60	-0.547 **	P<0.001
	C3	40	-0.350 *	P<0.05

单木尺度上,胡杨竞争指数与胸径很好的服从幂函数关系,样带 A 的关系为: $CI = 5.5813D^{-0.562}$ ($R^2 = 0.203, P < 0.001$) (图 3), 样带 B 胡杨竞争指数与胸径的关系为: $CI = 21.24D^{-0.948}$ ($R^2 = 0.574, P < 0.001$) (图 3), 样带 C 的关系为: $CI = 16.156D^{-0.827}$ ($R^2 = 0.3406, P < 0.001$) (图 3), A、B、C3 条样带均达到极显著水平。由图 3 可知,胡杨胸径越大,其受到的竞争压力越小,当胡杨胸径达到 20cm 以上时,对象木的竞争指数逐渐稳定,且维持在较低水平。

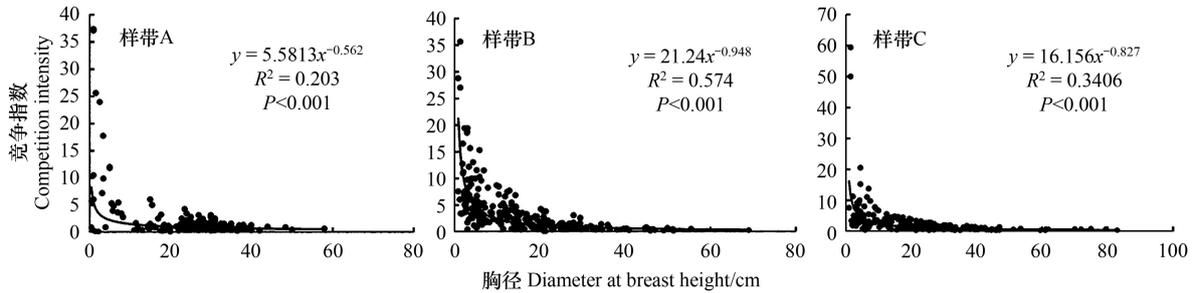


图 3 对象木竞争指数与其胸径的散点图

Fig.3 Scatter of competition index of object trees and its DBH

3.1.3 水分梯度与胡杨竞争强度关系

3 条样带中胡杨林分竞争指数变化趋势基本一致(图 4),即随着水分梯度的降低,胡杨竞争强度表现出下降的趋势。样带 A 中,胡杨竞争强度随水分梯度降低而下降,但无显著性差异($P > 0.05$);样带 B 中胡杨竞争强度在 3 种水分梯度下差异显著($P < 0.05$);样带 C 中,从 C1 到 C2,胡杨竞争强度下降,但无明显差异($P > 0.05$),至 C3,胡杨竞争强度出现显著下降($P < 0.05$)。以上结果表明,水分是控制胡杨种间竞争的重要因子,在塔里木河下游,水分良好的生境下,胡杨种内竞争强烈,随水分梯度降低,胡杨种内的竞争强度逐渐减弱。

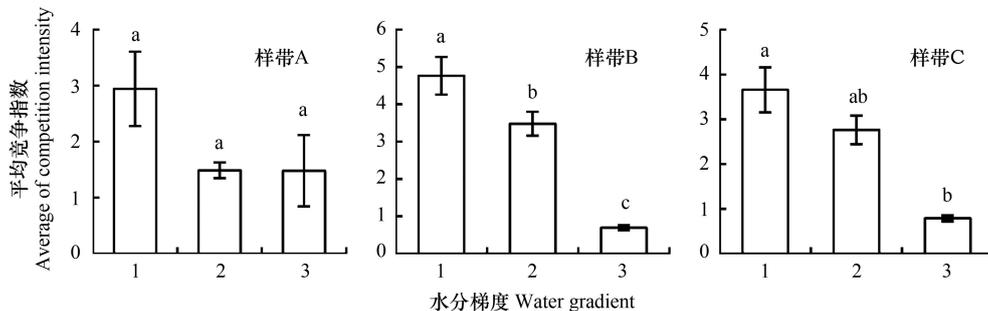


图 4 水分梯度与竞争指数条形图

Fig.4 Bar graph of water gradient and competition index

横坐标 1,2,3 分别代表在离河道 50m、250m、450m 距离处的不同水分梯度样点;不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

3.2 胡杨空间格局分析

3.2.1 塔里木河下游胡杨空间格局

如图 5 所示,塔里木河下游胡杨在 0—25m 尺度上或某些特定尺度上表现出显著的空间聚集分布,随空间尺度的增加,胡杨的空间分布逐渐由聚集分布转变为随机分布。

例如样带 A 三个样方中,胡杨在 0—25m 尺度上,胡杨空间格局显示为聚集分布和均匀分布交替出现,且随着空间尺度(距离)增加,胡杨由聚集分布逐渐趋向于随机分布。样带 B 和样带 C 中样方 B1、B2 和 C1、C2 在研究尺度上全部为聚集分布;B3、C3 在研究范围内,较小尺度上呈聚集分布,随尺度增加逐渐趋向于随机分布。这表明,在塔里木河下游,聚集分布为胡杨主要空间分布方式,随空间尺度(距离)的增加,胡杨逐渐趋向

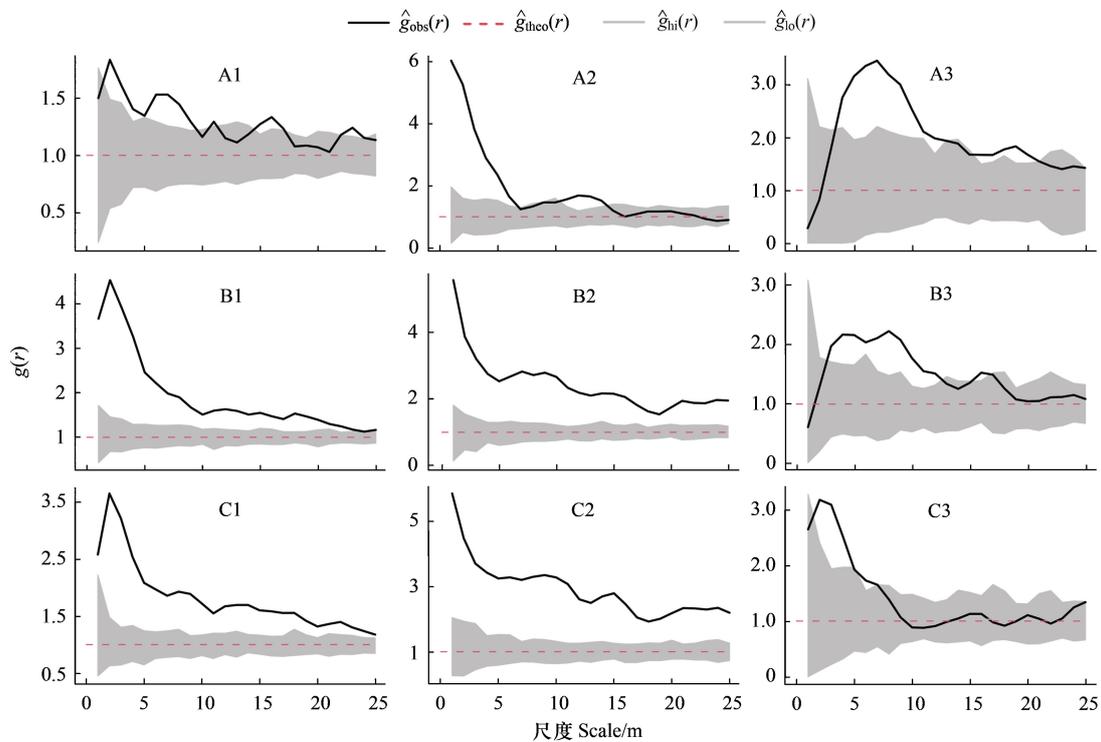


图 5 胡杨点格局

Fig.5 Spatial patterns of *P. euphratica*

于随机分布。

3.2.2 水分梯度下胡杨空间格局变化

如图 5 所示,样方 A1 中,胡杨在 2—8m, 11m, 15—17m, 24—25m 尺度上为聚集分布,其他尺度为随机分布;A2 胡杨在 0—8m, 11—14m 尺度下呈聚集分布,其他尺度为随机分布;A3 中,胡杨在 4—12m, 16—21m 呈聚集分布,其余尺度为随机分布。样方 B1 中,在 24m 呈随机分布,其余尺度为聚集分布;B2 中,胡杨在 0—25m 尺度上呈聚集分布;在 B3 中,胡杨在 3—12m 和 16m 尺度下呈聚集分布,其余尺度为随机分布。样带 C 中,样方 C1、C2 胡杨在 0—25m 尺度上呈聚集分布;C3 中胡杨在 2—5m, 6—7m 尺度下呈聚集分布,其余尺度为随机分布。总体而言,胡杨空间分布格局在各样带中表现为,随水分梯度的降低,胡杨空间分布由聚集分布向随机分布转变。

4 讨论

4.1 胡杨种内竞争

在林分内,由于树木个体的空间生态位多是重叠的,所以树木间的竞争经常存在,其个体间为其生长而竞争有限的空间与资源,但林木之间竞争存在一定的范围,主要发生在临近个体之间^[25]。为了确定胡杨竞争范围,采取固定样圆法确定塔里木河下游胡杨竞争半径^[26]。基于此方法,本文采用固定样圆法发现,当竞争范围介于 2—10m 时,竞争指数整体呈下降趋势,当超过 10m 时,胡杨竞争指数保持在稳定范围内,这与韩路等人^[12]研究结果有所不同,韩路等人认为 6m 是研究胡杨林种群竞争最佳临体范围,出现差异的原因可能与研究地胡杨所处生境有关。

Hegy 单木竞争指数是测度植物个体间竞争强度常用的指标,能够间接的反应植物个体对资源和环境的现实分配^[27]。林木个体大小对其竞争强弱有着较大的影响,本文通过拟合胸径与其竞争指数的关系,发现竞争强度与其胸径较好的服从幂函数关系,即对象木竞争指数随其胸径的增加而减小,这与前人研究结果基本

一致^[28]。研究发现,胡杨胸径低于 20cm 时,其竞争强度随胸径变化显著,当胸径大于 20cm 时,对象木竞争强度趋于稳定。这与前人研究结果有所差异,韩路等人^[12]认为当胡杨胸径达到 30cm 以上,胡杨竞争强度趋于稳定。

竞争是影响树木生长的重要因素,其主要发生在相邻木之间,包括对地上部分的光资源以及地下部分土壤资源竞争^[25],植物种群内个体间的竞争,主要表现为个体间的密度效应^[29]。树木种内竞争意味着在有限的资源条件下不足以维持两株或多株树木在同一空间范围内充分生长。同一树种具有相似的生态习性,竞争尤为激烈,其竞争压力主要来源于种群密度制约和个体间的大小差异。由于极端气候事件等自然因素和区域水胁迫(地下水埋深下降),导致胡杨种群衰退和个体死亡,树木间距增大,竞争木数量减少,使得胡杨个体以及样地内种群的竞争强度减小。本文通过划分水分梯度,分析不同水分梯度下胡杨竞争指数的变化,研究发现胡杨林平均竞争指数随着水分梯度降低而逐渐减小,这可能是由于随土壤水分降低,胡杨林幼龄比例逐渐减小,林分径级结构变大,在自然稀疏规律的作用下,导致部分胡杨死亡,林分密度逐渐降低^[30],从而导致胡杨林平均竞争指数降低。

4.2 胡杨空间格局

自然群落中,大部分种群表现为聚集分布,这是种群个体生长和竞争过程中适应环境异质性的结果^[31]。本研究中,在 0—25m 尺度上,胡杨种群主要呈现出聚集分布方式,这表明塔里木河下游胡杨种群主要分布形式为聚集分布,符合种群分布的一般规律,这与该地区研究结果一致^[32]。

已有研究表明,在样地尺度上,随空间尺度(距离)增加,种群分布格局会发生相应变化,种群的空间分布具有尺度依赖性^[33]。有研究认为,在较小尺度上,种群的空间分布格局受种内竞争、种子扩散等方式影响,在较大尺度上,可能受种群分布的异质性和环境异质性决定^[34—35]。本研究结果同样表明,随着空间尺度的增加,胡杨分布格局也在发生变化。在较小尺度上,胡杨种群主要为聚集分布,随着空间尺度(距离)的增加,胡杨分布格局逐渐转变为随机分布。

植物个体的空间格局是指植物在个体水平上的空间分布状况,是植物随林分内空间和其他资源长期竞争的结果^[36]。种群空间分布格局不仅与物种的生物学特性和种群间的竞争排斥相关,而且与物种所处生境也有密切的联系^[37]。本研究表明,随水分梯度的降低,塔里木河下游胡杨种群由聚集分布转变为随机分布。水分是决定极端干旱区荒漠植被空间分布与结构的主要因子^[38]。在塔里木河下游,水分充足条件下,胡杨种群密度较高,且存在一定数量的幼树,胡杨呈现聚集分布格局。随水分梯度下降,胡杨径级结构逐渐增加,个体对资源需求增强,种内竞争加剧,导致胡杨密度下降,胡杨种群也逐渐转变为随机分布。有研究表明,种群空间格局随年龄增长聚集强度逐渐下降是种群自我调节的机理之一^[39],胡杨种群可能存在同样的机理^[40—41]。

5 结论

本文采用 Hegyi 竞争模型以及点格局等分析方法,分析了塔里木河下游胡杨林水分梯度下种内竞争强度以及空间格局,结论如下:1)在塔里木河下游,胡杨种内个体竞争范围为 10m,最能体现恶劣立地条件下胡杨的真实竞争情况;2)塔里木河下游胡杨对象木胸径与竞争指数很好的服从幂函数关系,胡杨竞争指数随其胸径增加而减小;3)随水分梯度的降低,由于胡杨林分密度下降,其竞争强度整体呈降低的趋势;4)塔里木河下游胡杨整体呈聚集分布,随空间尺度(距离)的增加,胡杨空间分布格局由聚集分布逐渐转变为随机分布;5)随水分梯度下降,胡杨的自疏作用明显,其空间格局由聚集分布逐渐趋于随机分布。胡杨作为塔里木河荒漠河岸林的建群种,在保持生态系统稳定、防止荒漠化、保护生物多样性等方面发挥着十分重要的作用。在极端干旱区,胡杨个体间的竞争主要为水分和养分的竞争,今后在胡杨林管理中,应当权衡塔里木河流域“三生水”(即:生产、生活、生态用水)的分配比例,保证生态输水的“量”,满足胡杨生长恢复需求,同时输水工作应从“线状”输水逐渐过渡到“面状”输水,兼顾远离河道分布的胡杨个体,提高生态输水的“质”,降低胡杨种内资源竞争压力,以促进塔里木河流域胡杨的恢复与保护。

植物个体的空间分布格局与其生物学特性以及所处生境息息相关,本文研究并未兼顾胡杨生理学特性,后续研究中考虑结合树木年轮材料以及木质部解剖学材料,并结合样地内其他优势种,进一步剖析胡杨种群格局特征以及发生原因。由于近期新疆地区气候趋于暖湿化发展,未来研究应考虑胡杨空间分布以其种内竞争强度的时空变化,进一步探讨气候变化对胡杨林分结构的影响。

参考文献 (References):

- [1] Begon M, Harper J L, Townsend C R. Ecology: individuals, populations, and communities. Sunderland, Mass.: Sinauer Associates, 1986
- [2] Weigelt A, Jolliffe P. Indices of plant competition. *Journal of Ecology*, 2003, 91(5): 707-720.
- [3] 孟宪宇. 测树学. 3 版. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [4] 汤孟平, 陈永刚, 徐文兵. 森林空间结构分析. 北京: 科学出版社, 2013.
- [5] Dale M R T. Spatial Pattern Analysis in Plant Ecology. Cambridge University Press, 2000.
- [6] 王世绩. 全球胡杨林现状及保护和恢复对策. *世界林业研究*, 1996, 9(6): 37-44.
- [7] Aishan T, Halik Ü, Betz F, Gärtner P, Cyffka B. Modeling height-diameter relationship for *Populus euphratica* in the Tarim riparian forest ecosystem, Northwest China. *Journal of Forestry Research*, 2016, 27(4): 889-900.
- [8] Wang D D, Yu Z T, Peng G, Zhao C Y, Ding J L, Zhang X L. Water use strategies of *Populus euphratica* seedlings under groundwater fluctuation in the Tarim River Basin of Central Asia. *CATENA*, 2018, 166: 89-97.
- [9] 赵峰侠, 尹林克. 荒漠内陆河岸胡杨和多枝桤柳幼苗种群空间分布格局及种间关联性. *生态学杂志*, 2007, 26(7): 972-977.
- [10] 韩路, 王海珍, 彭杰, 马春晖. 塔里木河中游灰杨种群的径级结构与格局动态. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(11): 182-185.
- [11] 赵正帅, 郑亚琼, 梁继业, 韩占江, 李志军. 塔里木河流域胡杨和灰叶胡杨克隆分株空间分布格局. *应用生态学报*, 2016, 27(2): 403-411.
- [12] 韩路, 王海珍, 周正立, 李志军. 塔里木荒漠优势植物——胡杨种内、种间竞争研究. *西北植物学报*, 2006, 26(12): 2547-2552.
- [13] 塔依尔江·艾山, 玉米提·哈力克, 艾尔肯·艾白不拉, Bernd Cyffka, Christian Opp. 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. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(12): 156-160.
- [14] 周孝明, 陈亚宁, 李卫红, 何斌, 郝兴明. 塔里木河下游胡杨树干液流特征研究. *中国沙漠*, 2008, 28(4): 673-678.
- [15] 陈永金, 刘加珍, 陈亚宁, 李新功, 朱海勇. 输水前后塔里木河下游物种多样性与水因子的关系. *生态学报*, 2013, 33(7): 2212-2224.
- [16] 玉米提·哈力克, 柴政, 艾里西尔·库尔班, Bernd Cyffka, 任伟. 胡杨部分生态指标对塔里木河下游应急输水的响应. *资源科学*, 2009, 31(8): 1309-1314.
- [17] Hegyi F. A simulation model for managing jack-pine stands//Fries J, ed. *Growth Models for Tree and Stand Simulation*. Stockholm: Royal College of Forestry, 1974: 74-90.
- [18] 蒋国梅, 孙国, 张光富, 王剑伟. 濒危植物宝华玉兰种内与种间竞争. *生态学杂志*, 2010, 29(2): 201-206.
- [19] 项小燕, 吴甘霖, 段仁燕, 闫玉梅, 张小平. 大别山五针松种内和种间竞争强度. *生态学报*, 2015, 35(2): 389-395.
- [20] 张莉, 陆畅, 李晓红, 王磊, 张小平. 皇藏峪自然保护区青檀种群年龄结构及种内、种间竞争. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 2012, 30(1): 34-40.
- [21] Fraver S, D'Amato A W, Bradford J B, Jonsson B G, Jönsson M, Esseen P A. Tree growth and competition in an old-growth *Picea abies* forest of boreal Sweden: influence of tree spatial patterning. *Journal of Vegetation Science*, 2014, 25(2): 374-385.
- [22] Lister A J, Leites L P. Modeling and simulation of tree spatial patterns in an oak-hickory forest with a modular, hierarchical spatial point process framework. *Ecological Modelling*, 2018, 378: 37-45.
- [23] Condit R, Ashton P S, Baker P, Bunyavejchewin S, Gunatilleke S, Gunatilleke N, Hubbell S P, Foster R B, Itoh A, LaFrankie J V, Lee H S, Losos E, Manokaran N, Sukumar R, Yamakura T. Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. *Science*, 2000, 288(5470): 1414-1418.
- [24] Ripley B D. The second-order analysis of stationary point processes. *Journal of Applied Probability*, 1976, 13(2): 255-266.
- [25] 王政权, 吴巩固, 王军邦. 利用竞争指数评价水曲柳落叶松种内种间空间竞争关系. *应用生态学报*, 2000, 11(5): 641-645.
- [26] 姚慧芳, 王超, 卢杰. 单木竞争的研究概述. *广西农学报*, 2021, 36(4): 77-81.

- [27] 喻泓, 杨晓晖, 慈龙骏. 内蒙古呼伦贝尔沙地不同樟子松林竞争强度的比较. 应用生态学报, 2009, 20(2): 250-255.
- [28] 权世明. 沙地樟子松天然林分结构及气候对其生长的影响[D]. 北京林业大学, 2019.
- [29] 牛翠娟. 基础生态学. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [30] 杜伟宏, 管文轲, 霍艾迪, 易秀, 韦红. 塔里木河干流胡杨林下土壤的水盐特征研究. 西南林业大学学报: 自然科学, 2019, 39(5): 92-99.
- [31] 侯红亚, 王立海. 小兴安岭阔叶红松林物种组成及主要种群的空间分布格局. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3043-3049.
- [32] 李吉玖, 徐海量, 张青青, 杨红梅, 牛俊勇, 赵新风, 库尔班·克依木. 塔里木河下游荒漠河岸林不同退化区胡杨种群结构和空间分布格局研究. 中国沙漠, 2009, 29(5): 897-904.
- [33] He F L, Duncan R P. Density-dependent effects on tree survival in an old-growth Douglas fir forest. Journal of Ecology, 2000, 88(4): 676-688.
- [34] Harms K E, Condit R, Hubbell S P, Foster R B. Habitat associations of trees and shrubs in a 50-ha neotropical forest plot. Journal of Ecology, 2001, 89(6): 947-959.
- [35] Zhang Z H, Hu G, Zhu J D, Luo D H, Ni J. Spatial patterns and interspecific associations of dominant tree species in two old-growth Karst forests, SW China. Ecological Research, 2010, 25(6): 1151-1160.
- [36] 宋永昌. 植被生态学. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [37] 孙书存, 刘照光. 岷江上游刺旋花种群格局研究. 应用与环境生物学报, 1997, 3(3): 193-198.
- [38] 白玉锋, 陈超群, 徐海量, 张广朋, 张沛, 凌红波. 塔里木河下游荒漠植被地上生物量空间分布与地下水埋深关系. 林业科学, 2016, 52(11): 1-10.
- [39] 侯向阳, 韩进轩. 长白山红松林主要树种空间格局的模拟分析. 植物生态学报, 1997, 21(3): 242-249.
- [40] Yusup A, Halik Ü, Abliz A, Aishan T, Keyimu M, Wei J X. Population structure and spatial distribution pattern of *Populus euphratica* riparian forest under environmental heterogeneity along the Tarim River, northwest China. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 844819.
- [41] 艾萨迪拉·玉苏甫, 玉米提·哈力克, 阿不都拉·阿不力孜, 买尔当·克依木. 基于地面 LiDAR 数据的塔里木河下游胡杨林结构参数反演. 生态学报, 2020, 40(13): 4555-4565.