

DOI: 10.20103/j.stxb.202405141088

张岗岗, 刘巧, 屈洋洁, 王洋, 廉亚桥, 江玉鑫, 姜依雯. 黄河滩涂怪柳群落种间亲和性和多样性. 生态学报, 2025, 45(24): 12113-12121.

Zhang G G, Liu Q, Qu Y J, Wang Y, Lian Y Q, Jiang Y X, Jiang Y W. Interspecific affinity and diversity of *Tamarix chinensis* community in the Yellow River Floodplain Wetland. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(24): 12113-12121.

黄河滩涂怪柳群落种间亲和性和多样性

张岗岗^{1,2,*}, 刘巧¹, 屈洋洁¹, 王洋^{1,2}, 廉亚桥¹, 江玉鑫¹, 姜依雯¹

1 河南师范大学生命科学学院, 河南省黄河流域生态工程技术研究中心, 黄河流域生态治理与保护研究中心, 新乡 453007

2 河南师范大学河南省濮阳黄河湿地生态系统野外科学观测研究站, 濮阳 457000

摘要: 怪柳 (*Tamarix chinensis*) 是黄河流域的特有种, 也是维持黄河流域脆弱生境的关键种, 探讨其群落种间亲和性和结构多样性是阐释黄河过渡型植被带群落环境互作机制的前提和关键。对黄河下游过渡型滩涂怪柳幼苗群落进行每木定位和调查, 采用 R 语言分别计算种间关联指数、生态位宽度、 α 多样性指数和林分空间结构参数等分别量化描述群落种间亲和性、生态位特征、物种多样性和结构多样性。研究表明: 群落总体为不显著正关联 ($VR=1.25$), 怪柳与碎米莎草 (*Cyperus iria*)、朝天委陵菜 (*Potentilla supina*) 和鳢肠 (*Eclipta prostrata*) 之间关联性较强; 群落中正负相关比为 0.5, 怪柳仅与朝天委陵菜表现为正相关 ($r=0.30$); 怪柳 Levins 生态位宽度最大 (23.32), 但与碎米莎草 (0.696) 和朝天委陵菜 (0.675) 生态位重叠程度较大, 其余 66.7% 种对之间仅存在微弱竞争; 物种多样性和均匀度较低, 林木大小变异程度和分化程度较低; 群落整体处于轻微聚集分布、中庸、混交较差且比较稀疏, 林分空间异质性和多样性较差 ($FSS=0.301$, $FSD=0.352$)。因此, 黄河滩涂怪柳群落总体不稳定, 多数种对之间亲和性较弱, 处于弱协同、低竞争态势, 林分结构多样性较差, 建群种怪柳适应性强, 但与碎米莎草和朝天委陵菜竞争激烈。这将有助于深入了解过渡型黄河滩涂怪柳群落种间互作效应和结构特征, 以为黄河滩涂湿地植被群落多样性保护和生态恢复提供理论基础和技术参考。

关键词: 怪柳; 生态位; 多样性; 种间关系; 空间结构

Interspecific affinity and diversity of *Tamarix chinensis* community in the Yellow River Floodplain Wetland

ZHANG Ganggang^{1,2,*}, LIU Qiao¹, QU Yangjie¹, WANG Yang^{1,2}, LIAN Yaqiao¹, JIANG Yuxin¹, JIANG Yiwen¹

1 College of Life Sciences, Engineering Technology Research Center of Yellow River Basin Ecology in Henan Province, Research Center for Ecological Management and Protection of the Yellow River Basin, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China

2 Puyang Field Scientific Observation and Research Station for Yellow River Wetland Ecosystem, Henan Normal University, Puyang 457000, China

Abstract: *Tamarix chinensis* is an endemic species in the Yellow River Basin, and a key species in maintaining fragile habitats in this region. The quantification of the interspecific affinity and structural diversity of *T. chinensis* community was the premise and critical to explaining the interaction mechanism between the community and environment for the transitional vegetation zones of the Yellow River Basin. Each individual of the *T. tamarix* community was located and surveyed in the transitional floodplain wetland of the lower Yellow River. Using R, the interspecies association index, niche width, α diversity index, spatial structure parameters, etc., were calculated to analyze the interspecific affinity, niche characteristics, species and structure diversity. The results showed that the overall community showed a non-significantly positive association ($VR=1.25$), with *T. chinensis* exhibiting strong associations with *Cyperus iria*, *Potentilla supina*, and *Eclipta prostrata*. The ratio of positive to negative correlations was 0.5, with *T. chinensis* showing positive correlation with

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (32101504); 河南省高等学校重点科研项目 (26A180014); 博士人才科研启动课题 (校 20210034)

收稿日期: 2024-05-14; **网络出版日期:** 2025-09-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zg201394@163.com

P. supina ($r=0.30$). *T. chinensis* had the largest niche width (23.32), but owned the higher niche overlap with *C. iria* (0.696) and *P. supina* (0.675), while only weak competition existed among the remaining 66.7% of species pairs. Species diversity and evenness were low, with limited size variation and differentiation among seedlings. The community exhibited slightly aggregated distribution, moderate advantage state, poor mixing, and low crowding, indicating weak spatial heterogeneity (FSS=0.301) and diversity (FSD=0.352). These findings suggest that the overall community was unstable. The interspecific associations among most species pairs were weak, showing a trend of weak collaboration and low competition, and the diversity of stand structure was poor. As a constructive species, *T. chinensis* demonstrated strong adaptability but faced intense competition from *C. iria* and *P. supina*. This study provides important insights into interspecific interactions and structural characteristics of *T. chinensis* seedling communities in transitional Yellow River floodplain wetland, offering a valuable theoretical basis and technical references for vegetation biodiversity conservation and ecology restoration in the lower Yellow River wetlands.

Key Words: *Tamarix chinensis*; niche; diversity; interspecific relationship; spatial structure

黄河干流流量季节性和小浪底调水调沙周期性变化形成了黄河下游特殊的滩涂生态系统^[1]。依据河床演变特点划分为游荡型河段、弯曲型河段及其过渡型河段 3 类^[2]。其中,过渡型河段主流趋于稳定,兼有二者特点。其河岸植被带是水陆生态系统的交错区域,具有较高的多样性^[3]、复杂的种间关系、较长的食物链^[4]以及突出的四维结构(纵向、横向、垂直和时间变化)^[5],能维持较高的生产力和稳定性^[3,6],但常遭受自然和人为等因素的干扰,致使生境破碎^[7-8]、群落总体不稳定^[1]和季节性更替频繁。种间亲和性是指不同植物物种之间在长期共存过程中形成的协同进化关系,常用种间关联性和相关性分别进行定性和定量分析^[9]。生态位反映种群在生态系统中的地位和作用^[10],可从时空尺度上统筹了解物种对资源的利用特征以及群落的稳定性^[11]。林分结构多样性是不同结构属性相对丰富程度和均匀度的基本度量,提高林分结构多样性和复杂性,被认为是实现植被生物多样性维持和增加的基础^[12]。全面系统地阐释黄河流域过渡型河岸植被的数量特征将有助于深入理解其植被群落建成的独特性^[1],结构和功能动态以及物种—环境关系^[13-14],从而为黄河流域植被恢复重建和生物多样性保护提供借鉴。

柽柳是黄河流域的特有种,具有高度耐盐碱、耐干旱、耐水淹、耐瘠薄等特性^[15],从而成为维持黄河流域脆弱生境的关键种^[16-17],入选“2020 黄河流域生态治理十大推介树种”,可有效遏制区域退化、改善生态环境和维护湿地健康^[15, 17]。长花期、大种子量、高萌发率等是柽柳应对环境干扰的有效措施^[18],季节性洪水漫溢后低盐湿润的河漫滩环境适宜柽柳通过种子更新^[19],只要花期或种子传播期与地表水漫溢过程有适度交叠,种子的萌发率可达 19%—51%^[18],但其幼苗期仍是柽柳生活史周期中最脆弱和最敏感的,其存活和生长与各种生物和非生物因素密切相关^[20]。土壤是直接影响柽柳存活率和生理特性的主要环境因子,水文因子和地形因子间接影响柽柳幼苗的分布格局和生长共存^[17, 19, 21-22]。此外,植物邻体、食草动物等也是影响幼苗存活的关键生物因子^[20, 23]。例如,柽柳幼苗服从集群分布,有很高的衰退速率^[15-16, 24],林分密度对林木分化作用较小^[24],其与胡杨表现出较强的种间正联结^[25],但在高盐环境中二者表现为负关联,胡杨幼苗生长还会受多枝柽柳伴生抑制^[26-27]。因此,探讨柽柳幼苗种群数量特征及其影响因素是评判黄河滩涂柽柳群落种群间关系和影响的前提和关键。以往研究主要针对黄河三角洲柽柳水盐适应规律^[28]、有性生殖过程^[18]、土壤碳驱动因素^[29]开展了卓有成效的研究,而忽略了过渡型黄河滩涂柽柳幼苗种群数量和结构特征。有鉴于此,本研究以黄河下游过渡型河段柽柳幼苗群落为研究对象,量化分析其种间关系、生态位以及多样性,以为黄河流域植被生态恢复提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于河南省濮阳黄河滩涂湿地生态系统野外科学观测研究站(35°20'0"—36°12'23"N, 114°52'0"—

116°5'4"E),属暖温带半湿润季风型大陆性气候,四季分明,春季干旱多风沙、夏季炎热雨量大、秋季晴和日照长、冬季干旱少雨雪。年平均气温为 13.3℃,无霜期为 205 d,年平均日照时数 2454.5 h,年平均降水量 502.3—601.3 mm。该区域人工植被群落为主,乔木主要有柽柳、毛白杨 (*Populus tomentosa*) 等,灌木主要有枸杞 (*Lycium chinense*)、沙地柏 (*Sabina vulgaris*) 等,草本主要有狗牙根 (*Cynodon dactylon*)、芦苇 (*Phragmites australis*) 等。由于人为活动和农业生产的影响,黄河下游(河南段)柽柳多以片状化零散分布幼苗和幼树为主。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

在全面踏查的基础上,2023 年 9 月在黄河下游过渡型滩地(河南濮阳段)选择典型地段设置 5 m×5 m 标准地(图 1),共划分为 25 个 1 m×1 m 样方,对每个样方中的柽柳幼苗和灌草进行调查,测量并记录高度、冠幅、基径等(表 1),同时采用相邻网格法测量每株植株坐标(X,Y),样方边缘设置 10 cm 缓冲区。

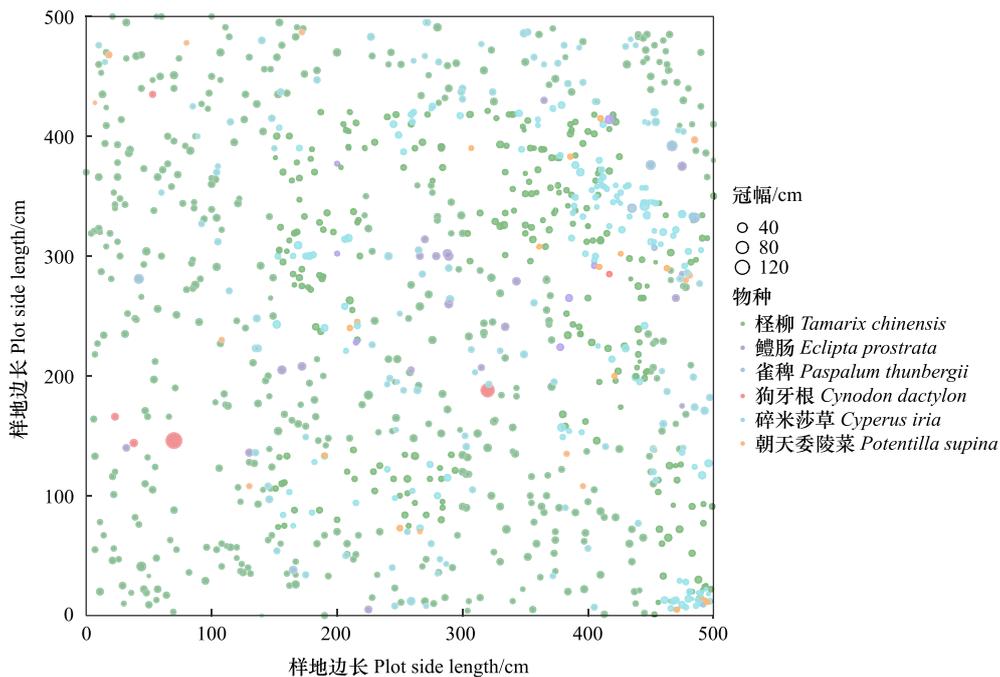


图 1 主要种群分布图

Fig.1 Main species populations distribution

圆圈大小代表冠幅相对大小

表 1 群落概况

Table 1 Overview of community

缩写 Abbreviation	物种 Species	基径 Ground diameter/mm	株高 Height/cm	冠幅 Crown/cm
Ps	朝天委陵菜 <i>Potentilla supina</i>	1.71	3.14	4.90
Tc	柽柳 <i>Tamarix chinensis</i>	2.10	4.47	8.06
Cd	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	3.54	9.70	50.75
Ep	鳢肠 <i>Eclipta prostrata</i>	2.66	4.93	13.84
Pt	雀稗 <i>Paspalum thunbergii</i>	4.78	17.89	28.29
Ci	碎米莎草 <i>Cyperus iria</i>	2.95	5.58	8.04

2.2 种间亲和性

2.2.1 种间关联

种间联结指数(VR)反映群落的总体关联性,若 $VR=1$,表示物种间彼此独立,否则为正关联($VR>1$)或负关联($VR<1$)。采用 Yates 连续校正公式对其进行显著性检验,若统计量 $\chi^2_{0.95(N)} < W (W = N \times VR) < \chi^2_{0.05(N)}$,则说明物种间不显著关联,否则为显著关联。采用 Ochiai 指数(OI)量化种对的联结性程度大小, OI 值域为 $[0, 1]$,其值越大,种对的正关联性越强。采用 R 4.5.0 语言 spaa 包中“sp.assoc”和“sp.pair”函数分别进行计算。

2.2.2 种间相关

Pearson 相关系数量化物种间的相关程度,可对 χ^2 检验进行有效地补充和完善,其参数检验及显著性检验分别由 R 4.5.0 语言 spaa 和 psych 包中的“sp.pair”和“corr.test”函数完成。

2.3 种间生态位

Levins 生态位宽度反映物种对资源利用的程度,其值越大,对环境的适应能力越强。Pianka 生态位重叠反映物种之间利用资源或对环境适应能力的相似程度,其值越大,物种间竞争越大。采用 R 4.5.0 语言 spaa 包中的“niche.width”和“niche.overlap”函数分别计算。

2.4 林分结构多样性

林分结构多样性是不同结构属性相对丰富程度和均匀性的基本度量^[12],本研究主要从 3 个方面进行量化,即:

(1) 林分结构组成多样性

采用 Patrick 物种丰富度指数(S)、Simpson 优势度指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Pielou 均匀度指数(J)量化描述怪柳幼苗群落的物种多样性,并用 R 4.5.0 语言 vegan 包中“diversity”函数进行计算。

(2) 林木大小分化多样性

林木大小多样性直接反映群落内林木大小分化的差异程度^[30]。相比基于直径分布的直径变异系数(CV_d)等与距离无关的指数,基于直径大小分化度的 Simpson 大小分化度指数(DT)、Shannon 大小分化度指数(HT)、大小分化度均值指数(\bar{T})对直径大小多样性变化更敏感,且其值越大,大小多样性差异程度越大,具体生物学意义和计算公式详见文献^[30-31]。因此,本文以基径代替直径分析群落植株大小变异和分化程度。

(3) 林木空间分布多样性

基于最近相邻木空间关系的林分空间结构参数可以详细地描述林分空间分布格局、树种混交状况以及林木大小分化程度和拥挤状况,本研究利用林分状态经营软件计算角尺度(W_i)、混交度(M_i)、大小比数(U_i)和密集度(C_i),并采用其均值(\bar{W} 、 \bar{U} 、 \bar{M} 、 \bar{C})和一元分布分别描述群落整体和单方面结构特征^[32],最后采用林分空间结构评价指数(FSS)和林分空间结构多样性指数(FSD)综合量化结构多样性^[33-34],二者取值范围为 $[0, 1]$,其值越大,林分空间结构多样性越高,结构异质性就越大。

3 结果与分析

3.1 种间关联

黄河滩涂怪柳群落总体 VR 为 1.25, W 为 31.30, 落在区间 (14.61, 37.65) 之内,说明群落总体呈不显著正关联。群落中 OI 值小于 0.16 的优势种对 2 个,为雀稗与狗牙根和鳢肠,而 OI 值大于或等于 0.63 的优势种对 5 个,占到 33.3%,其余种对 OI 值介于二者之间。其中,怪柳与碎米莎草之间的 OI 值最大(0.938),说明怪柳与碎米莎草之间关联程度最高,其次是怪柳与朝天委陵菜和鳢肠(0.721、0.721)。因此,群落中 66.7% 的优势种对间关联程度较弱,怪柳更倾向与碎米莎草、朝天委陵菜和鳢肠伴生。

3.2 种间相关

黄河滩涂怪柳群落中碎米莎草与雀稗极显著正相关(0.767),而与朝天委陵菜显著正相关(0.381)(图 2)。怪柳与朝天委陵菜为正相关(0.302),而与狗牙根和鳢肠呈较强负相关(-0.322、-0.248),并与雀稗

和碎米莎草呈较弱的负相关(-0.081、-0.018)。因此,群落中柽柳与朝天委陵菜常同域出现,而与其它物种之间表现出微弱的竞争关系。

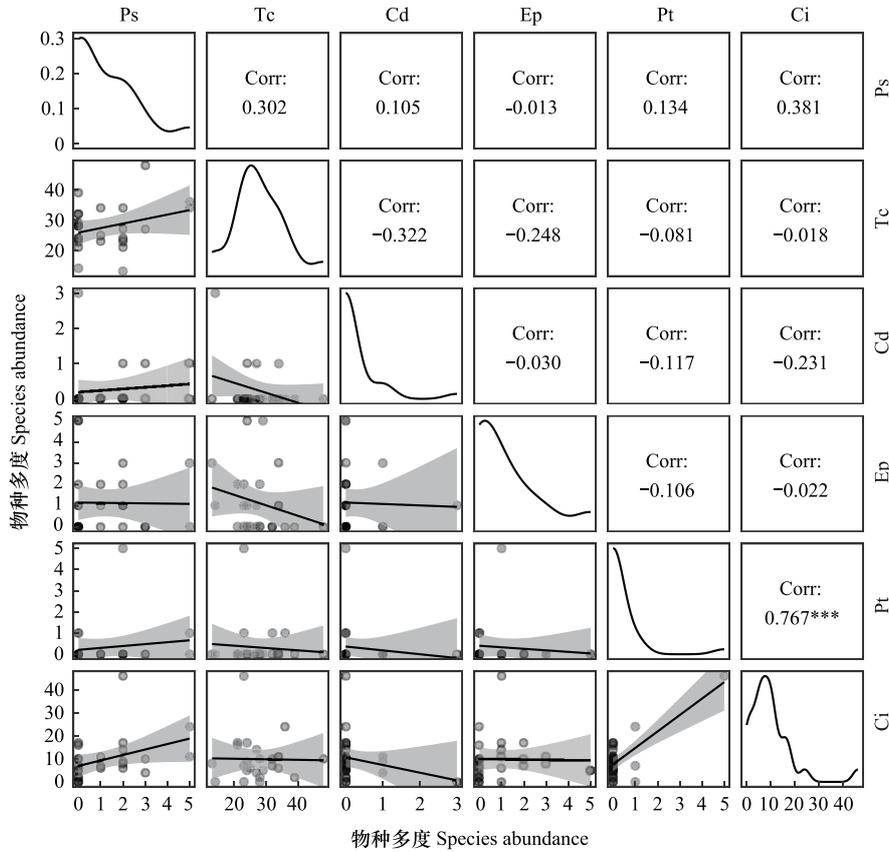


图 2 主要种群间相关性散点图

Fig.2 Scatter plot of interspecific correlations of main species

Ps: 朝天委陵菜 *Potentilla supina*; Tc: 柽柳 *Tamarix chinensis*; Cd: 狗牙根 *Cynodon dactylon*; Ep: 鳢肠 *Eclipta prostrata*; Pt: 雀稗 *Paspalum thunbergii*; Ci: 碎米莎草 *Cyperus iria*; 下半矩阵阴影区域表示拟合线的 95%置信区间; *** 表示显著性水平为 $P < 0.001$

3.3 生态位

黄河滩涂柽柳群落中柽柳种群重要值和生态位宽度均最大分别为 0.34、23.32(表 2),其次是碎米莎草和朝天委陵菜,雀稗和狗牙根的生态位宽度较小(2.29、3.00)。因此,柽柳、朝天委陵菜和鳢肠在群落中占优势,而其余物种对环境适应与资源利用较差。

表 2 主要种群生态位宽度

Table 2 Niche width of main species

物种 Species	相对多度 Relative abundance/%	相对频度 Relative frequency/%	相对盖度 Relative coverage/%	重要值 Importance value	生态位宽度 Niche width
Ps	3.07	16.05	0.06	0.06	10.12
Tc	68.35	30.86	4.13	0.34	23.32
Cd	0.59	4.94	2.81	0.03	3.00
Ep	2.77	16.05	0.53	0.06	9.12
Pt	0.79	4.94	0.52	0.02	2.29
Ci	24.43	27.16	1.67	0.18	13.11

黄河滩涂柽柳群落中狗牙根和雀稗生态位重叠值为 0,二者不存在资源竞争;生态位重叠值在[0,0.12)、

[0.12, 0.24)、[0.24, 0.36)和[0.36, 0.48)的种对数分别占总种对数的 20.0%、0.00%、26.7%和 13.3%; 怪柳与鳢肠生态位重叠值为 0.530, 生态位重叠值大于 0.6 的种对占 26.7%, 分别为怪柳与碎米莎草(0.696)和朝天委陵菜(0.675), 以及碎米莎草与朝天委陵菜(0.663)和雀稗(0.723), 说明怪柳、碎米莎草和朝天委陵菜之间对资源和空间竞争激烈, 其余种对之间竞争较小。

3.4 林分结构多样性

黄河滩涂怪柳群落 Patrick 指数为 6, Shannon-Wiener 多样性指数为 0.88, Simpson 优势度指数为 0.47, Pielou 均匀度指数为 0.49, 说明该群落物种组成简单, 多样性和均匀度较低。基于基径分布的 Simpson 大小多样性指数、Shannon 大小多样性指数、断面积 Gini 系数和直径变异系数分别为 0.94、3.03、0.54 和 0.56, 说明该群落基径分布差异和变异程度较小; 而基于基径大小分化度的 Simpson 大小分化度指数、Shannon 大小分化度指数和大小分化度均值指数分别为 0.74、1.42 和 0.37, 说明群落内植株基径大小分化程度较低。

黄河滩涂怪柳群落整体呈轻微聚集分布($\bar{W} = 0.522$)、中庸状态($\bar{U} = 0.490$)、弱度混交($\bar{M} = 0.379$)和比较稀疏($\bar{C} = 0.268$)。55.42%的植株呈随机分布(图 3), 较为均匀($W_i = 0.00, 0.25$)与聚集($W_i = 0.75, 1.00$)植株分别占 20.09%、24.49%; 不同大小比数等级植株比例均接近 20.00%; 群落中 26.75%的植株混交良好($M_i = 0.75, 1.00$), 55.25%的植株混交较差; 群落中比较稀疏植株($C_i = 0.00, 0.25$)占 71.43%, 说明绝大多数植株稀疏生长, 未受到邻体竞争和挤压。群落 FSS 为 0.301, FSD 为 0.352, 说明怪柳群落整体空间结构异质性和多样性较差。

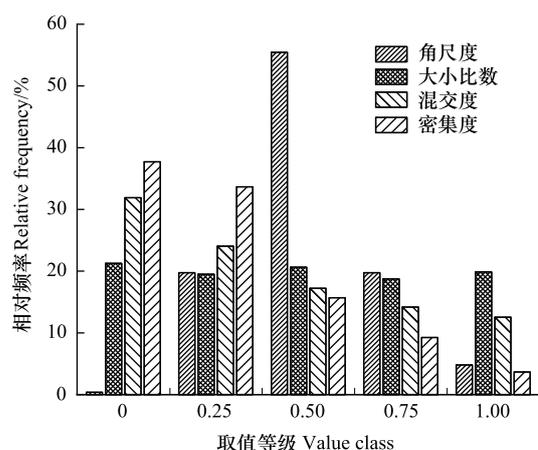


图 3 林分空间结构参数一元分布

Fig.3 Univariate distribution of forest spatial parameter

4 讨论

4.1 黄河滩涂湿地怪柳群落种间关联

黄河中下游河漫滩湿地是华北平原纵横东西的一条绿色廊道^[35], 经常受黄河干流流量季节性变化和小浪底水库调水调沙过程的侵扰^[1-2], 地形复杂多变, 植物群落斑块化, 生境异质性高, 且植物群落更新变化快^[1, 4, 36]。本研究着重研究黄河下游过渡型滩涂湿地怪柳群落, 并证实群落总体呈不显著正关联($VR = 1.25$)。以往研究表明游荡型黄河滩涂湿地(嫩滩、二滩、高滩和大堤)植物群落总体不稳定, 且不同生境类型各物种之间关联性较弱^[1]; 河南黄河中下游湿地优势草本植物群落总体呈显著正联结, 但种对间以负联结为主^[4]。这些研究说明黄河流域滩涂湿地植物群落的种间关联及稳定性呈现区域分异特征。此外, 本研究发现怪柳与碎米莎草、朝天委陵菜和鳢肠关联程度较大, 且仅与朝天委陵菜为正相关, 而与其余种群之间亲和性较弱, 这可能与其生物学和生态学特性及河漫滩湿地土壤种子库密切相关。河漫滩湿地群落物种多样性的维持主要依赖于土壤繁殖库, 尤其是在洪水退去后的裸露滩地斑块上, 其植物群落的构建主要来源于洪水携带的植物繁殖体^[35, 37-38], 这一现象充分印证了水流传播在河漫滩湿地植物繁殖体扩散过程中的关键作用。碎米莎草和朝天委陵菜繁殖力极强, 在有利生境中采取“占据”策略, 控制群落资源, 否则采取积极向外拓展的“忍耐”策略^[39]; 而怪柳具有高度耐盐碱、耐干旱、耐水淹、耐瘠薄等特性^[15], 具有种子和营养两种传播方式, 春季“集中开花模式”和夏季“持续开花模式”等在一定程度上提高了其拓殖成功的可能性^[40]。因此, 这些物种极强的繁殖力和洪水的传播作用, 使得其成功在河漫滩湿地定植和通过环境筛选作用^[35], 并发展成为广布种, 从而对季节性流量变化和上游水利建设及运营中调水调沙等水利措施造成的滩涂水陆交替节律变化表现出良好的适应性^[4], 而鳢肠、雀稗等不能忍耐长时间水淹, 在频繁扰动的高异质性河岸滩湿地中并没有明显竞争优势。

4.2 黄河滩涂湿地柽柳群落生态位

重要值反映物种在群落中的相对重要性,而生态位宽度着重描述物种对资源或环境梯度的利用范围和适应能力,本研究中群落各优势种重要值和生态位宽度呈线性正相关($R^2=0.92$),这与前人研究结果一致^[4, 11]。此外,本研究发现柽柳、碎米莎草和朝天委陵菜生态位宽度较大(23.32、13.11 和 10.12)。同时,柽柳在黄河三角洲不同土壤 pH 和盐分梯度上的生态位宽度也较大,说明柽柳对环境资源具有较强的利用能力和较广的适应范围,表现为较好的适应性。以往研究表明黄河中下游湿地优势草本植物群落中,生态位宽度较大的物种多隶属于禾本科或菊科,例如,芦苇、小蓬草(*Erigeron canadensis*)、芦苇、稗(*Echinochloa crus-galli*)^[4]。黄河游荡型河段河漫滩湿地土壤种子库的优势科也为禾本科和菊科^[35],说明土壤种子库和养分在一定程度上决定着地上植物物种组成和多样性。以往研究表明生态位重叠程度越高和平均适合度差异越大,物种间越倾向于竞争排斥^[41]。本研究发现 66.7%的种对生态位重叠指数小于 0.48,而柽柳与碎米莎草和朝天委陵菜则分别高达 0.696 和 0.675,说明二者与柽柳幼苗存在激烈的资源和空间竞争。此外,芦苇和翅碱蓬(*Suaeda salsa*)通过改变土壤 pH 和盐分梯度影响黄河三角洲柽柳的分布^[10];而荒漠河岸林群落中,多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)具有排挤胡杨(*Populus euphratica*)并侵占河漫滩生境的能力^[19, 42-44],主要原因是多枝柽柳具有更强的潜在导水能力、干旱下较高的碳同化速率^[19]以及其地上分枝遮蔽效应抑制胡杨地上生物量积累和根系发育^[45]。

4.3 黄河滩涂湿地柽柳群落多样性

量化描述多样性是衡量区域内生物多样性、生态系统功能和稳定的关键^[45],有利于深入了解植被群落建成的独特性^[1],并为其有效保护与修复提供科学依据。本研究表明柽柳群落物种组成简单,多样性和均匀度较低。河漫滩湿地因其环境复杂多变,植物群落多样性的形成与维持机制既受制于种子到达滩地并维持活性的能力,也取决于其周围的环境要素适宜性^[35]。相比陆地生态系统,河漫滩湿地的种子库与环境因素受水文节律的影响显著^[46],始终处于动态变化过程之中。例如,在河漫滩湿地中,频繁发生的洪水所导致的长期水淹环境会显著降低土壤种子库的密度和存活率^[47-48]。进一步研究表明,土壤种子库和理化性质对植物群落 Shannon-Wiener 多样性指数的总解释度较高(44.05%和 40.82%),而洪水干扰强度及其伴随的泥沙淤积深度影响较小^[35]。以往研究证实河漫滩湿地群落的组成以少数物种为主,其物种丰富度和多样性较小^[1, 35],土壤含水量、速效钾及全氮是影响黄河中下游过渡区河岸带植物分布的主要因子^[36],而农业开垦、城市开发、水利工程等人为干扰则是河岸带生态系统良好发展的主要制约因素^[49-50]。植物个体大小多样性反映群落内植物个体大小的差异程度,其值越高表明群落生境更为丰富多样,空间异质性和复杂性更强,可为各种动植物和微生物提供更丰富的小生境与食物资源,进而提升群落总体的生物多样性^[30-31, 51-52]。本研究以基径为变量测量植物个体大小多样性,发现群落内植物个体大小多样性较低,表明个体间变异程度和分化程度不足。该现象直接表现为地上部分对光资源、地下根系对土壤资源的竞争,而基于最近邻个体的种内/种间非对称性竞争^[53]并非驱动群落个体粗细、高矮和生物量分化的主导因素。

4.4 黄河滩涂湿地柽柳群落分布格局

研究植物群落空间分布格局及其潜在机制,对揭示种群与环境互作关系、种群生态适应策略,预测群落空间分布与动态变化,以及阐释种群形成与维持机制具有重要理论意义^[21, 54]。本研究发现黄河滩涂柽柳群落整体呈轻微聚集分布、中庸、混交较差且比较稀疏,林分空间异质性和多样性较差。这可能是因为柽柳的种子小且数量多,以风媒传播为主,繁殖和扩散的空间范围受限,导致幼苗阶段呈聚集分布;黄河干流流量的季节性波动和小浪底水库调水调沙过程^[1-2, 36],促使大量种子同期着床萌发,并通过河漫滩湿地的环境筛选作用定植^[35],进而形成同种个体的聚集分布。此外,幼苗阶段的集群分布可通过群体效应促进种群存活^[15, 54],这与以往研究结果一致^[16-17, 21, 25],并证实土壤水盐含量是影响湿地群落分布格局形成的主导因素^[17, 21],而水文和地形因子通过改变局部生境间接影响湿地植被分布^[21]。此外,柽柳种子多落在母体周围,受灌丛“肥岛”效应影响,冠下萌发优势更易形成以母体为中心的繁殖方式,进一步强化了黄河三角洲潮间带和荒漠内

陆河岸柽柳幼苗群落聚集特征^[16, 25]。这种分布格局有助于柽柳幼苗占据空间资源和改善群落微环境,增强种群抗逆性而存活^[15, 25]。随着群落演替,受繁殖特性、种内竞争、生境异质性与生态适应等因素综合作用,柽柳群落最终趋于随机分布^[15-16, 25]。

5 结论

本研究针对黄河下游过渡型滩涂柽柳群落“多见幼苗不见幼树”现象,通过种间亲和性、生态位和结构多样性角度研究表明:群落总体为不显著正关联($VR=1.25$),柽柳与碎米莎草、朝天委陵菜和鳢肠之间关联程度较大(0.938、0.721 和 0.721),仅与朝天委陵菜表现为正相关(0.302),说明柽柳与碎米莎草等物种在空间上呈现同域出现的趋势,但群落各物种间处于弱协同、低竞争态势。柽柳 Levins 生态位宽度最大(23.32),66.7%种对生态位重叠值小于 0.48,碎米莎草(0.696)和朝天委陵菜(0.675)与其对资源和空间竞争激烈,说明柽柳表现出显著生态优势,多数物种通过生态位分化实现物种共存。群落物种多样性和均匀度较低,基径变异程度和大小分化程度较低,且林分空间异质性和多样性较差($FSS=0.301$, $FSD=0.352$)。未来需优化柽柳与竞争种密度,引入低生态位重叠物种,调整种植布局提升空间异质性,促进群落自然更新,这将为阐释黄河流域过渡型植被带群落环境互作机制以及生态脆弱区植被恢复与生物多样性保护提供借鉴。

参考文献 (References):

- [1] 于飞,王洋,张岗岗,马剑敏. 游荡型黄河滩涂植物群落多样性及种间联结性. 生态学报, 2023, 43(6): 2429-2439.
- [2] 张敏,黄河清,张晓华. 黄河下游漫滩洪水冲淤规律. 水科学进展, 2016, 27(2): 165-175.
- [3] 郭春秀,刘世增,杨自辉,刘虎俊,李银科,刘淑娟,张莹花,韩富贵. 石羊河中下游河岸植被的结构及其功能研究. 中国农学通报, 2011, 27(28): 115-120.
- [4] 黄明忍,苏晓,郭晟乾,田祥宇,刘凤琴,邵毅贞,袁志良,陈云,李海霞. 河南黄河中游、下游湿地优势草本植物生态位与种间联结性研究. 植物科学学报, 2024, 42(2): 181-190.
- [5] 王科. 黄河下游防洪工程区植被现状调查与评价[D]. 新乡: 河南师范大学, 2012.
- [6] 王奕淇,孙学莹. 黄河流域生态系统服务权衡协同关系及其时空异质性. 环境科学, 2025, 46(2): 972-989.
- [7] Fang L L, Wang L C, Chen W X, Sun J, Cao Q, Wang S Q, Wang L Z. Identifying the impacts of natural and human factors on ecosystem service in the Yangtze and Yellow River Basins. Journal of Cleaner Production, 2021, 314: 127995.
- [8] Xu J L, Ling Y, Sun Y Y, Jiang Y H, Shen R, Wang Y. How do different processes of habitat fragmentation affect habitat quality? -Evidence from China. Ecological Indicators, 2024, 160: 111880.
- [9] 张金屯. 数量生态学. 3 版. 北京: 科学出版社, 2018.
- [10] 马宗文,谢磊磊,段晓峰,周鑫, Timothy R. ROSEN, 许学工. 黄河三角洲自然保护区植物与土壤因子关系及生态位分析. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(5): 801-811.
- [11] 张乐满,兰波,张东升,刘英杰,张丽红,许文锋,段晨辉,敦静怡,刘正学. 三峡水库涪陵—奉节段消落带优势草本植物生态位与种间联结性研究. 生态学报, 2022, 42(8): 3228-3240.
- [12] 赵中华,惠刚盈. 林分结构多样性研究进展. 林业科学, 2020, 56(9): 143-152.
- [13] 张金屯,范丽宏. 物种功能多样性及其研究方法. 山地学报, 2011, 29(5): 513-519.
- [14] 徐满厚,刘敏,翟大彤,刘彤. 植物种间联结研究内容与方法评述. 生态学报, 2016, 36(24): 8224-8233.
- [15] 康佳鹏,马盈盈,马淑琴,薛正伟,杨丽丽,韩路,柳维扬. 荒漠绿洲过渡带柽柳种群结构与空间格局动态. 生态学报, 2019, 39(1): 265-276.
- [16] 刘亚琦,刘加珍,陈永金,靖淑慧,冯若昂,毛甘霖. 黄河三角洲潮间带柽柳灌丛的格局及结构动态研究. 生态科学, 2017, 36(1): 153-158.
- [17] 夏江宝,赵西梅,刘俊华,赵自国,刘庆,陈印平. 黄河三角洲莱州湾湿地柽柳种群分布特征及其影响因素. 生态学报, 2016, 36(15): 4801-4808.
- [18] Natale E, Zalba S M, Oggero A, Reinoso H. Establishment of *Tamarix ramosissima* under different conditions of salinity and water availability: Implications for its management as an invasive species. Journal of Arid Environments, 2010, 74(11): 1399-1407.
- [19] 雷善清,王文娟,王雨辰,陈利俊,吴鑫磊,邓宗文,张天汉,杜志强,李景文. 不同土壤水盐条件下多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)对胡杨(*Populus euphratica*)幼苗的影响. 生态学报, 2020, 40(21): 7638-7647.
- [20] 刘倩雯. 额济纳绿洲胡杨种子萌发及幼苗生长影响因子[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [21] 赵连春,赵成章,王小鹏,文军. 秦王川湿地柽柳分布与环境因子的关系. 生态学报, 2018, 38(10): 3422-3431.
- [22] 朱金方,刘京涛,陆兆华,夏江宝,柳海宁,金悦. 盐胁迫对中国柽柳幼苗生理特性的影响. 生态学报, 2015, 35(15): 5140-5146.

- [23] Seiwa K, Masaka K, Konno M, Iwamoto S. Role of seed size and relative abundance in conspecific negative distance-dependent seedling mortality for eight tree species in a temperate forest. *Forest Ecology and Management*, 2019, 453: 117537.
- [24] 夏江宝, 陆兆华, 孔雪华, 刘京涛, 韩瑞东, 朱金方. 黄河三角洲湿地柽柳林生长动态对密度结构的响应特征. *湿地科学*, 2012, 10(3): 332-338.
- [25] 曾勇, 赵成义, 李传金, 郑金强, 吕光辉, 李彦. 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. *生态学杂志*, 2019, 38(11): 3273-3282.
- [26] 张伊莹, 邹旭阁, 王寅, 王健铭, 李景文. 额济纳绿洲不同土壤水盐条件多枝柽柳对胡杨种群分布的影响. *北京林业大学学报*, 2023, 45(3): 11-20.
- [27] 康佳鹏, 韩路. 塔河源荒漠河岸林灰胡杨与多枝柽柳种群空间格局与空间关联性. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(2): 123-132.
- [28] 孙佳. 黄河三角洲滨海滩涂柽柳根系形态及生长的水盐适应规律[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [29] 段代祥, 王美琦, 赵丽莹, 邵鹏帅, 韩红艳, 房颖. 黄河三角洲退化柽柳湿地土壤无机碳库的变化及其驱动因素. *土壤通报*, 2023, 54(6): 1308-1315.
- [30] 娄明华, 白超, 惠刚盈, 汤孟平. 7个林木大小多样性指数表达能力比较. *生物多样性*, 2019, 27(4): 449-456.
- [31] 白超, 惠刚盈. 林木直径大小多样性量化测度指数的比较研究. *林业科学研究*, 2016, 29(3): 340-347.
- [32] 张岗岗, 刘瑞红, 惠刚盈, 张弓乔, 赵中华, 胡艳波. 林分空间结构参数N元分布及其诠释——以小陇山锐齿栎天然混交林为例. *北京林业大学学报*, 2019, 41(4): 21-31.
- [33] 惠刚盈, 赵中华, 胡艳波, 张岗岗, 张弓乔, 程世平, 卢彦磊. 基于4株相邻木关系的林分空间结构多样性测度方法研究. *北京林业大学学报*, 2023, 45(7): 18-26.
- [34] 惠刚盈, 赵中华, 胡艳波, 张弓乔, 程世平, 徐雪飞. 基于结构参数均值的林分空间结构综合评价研究. *林业科学研究*, 2023, 36(2): 12-21.
- [35] 王建. 季节性洪水对黄河游荡性河段滩涂植物群落物种多样性的影响[D]. 开封: 河南大学, 2022.
- [36] 梁少民, 吕宇豪, 李雅, 吕金岭. 黄河中下游过渡区河岸植物多样性与土壤因子的关系. *西北植物学报*, 2024, 44(6): 968-976.
- [37] Catford J A, Jansson R. Drowned, buried and carried away: effects of plant traits on the distribution of native and alien species in riparian ecosystems. *New Phytologist*, 2014, 204(1): 19-36.
- [38] Kikuchi S, Suzuki W, Sashimura N. Gene flow in an endangered willow *Salix hukaoana* (Salicaceae) in natural and fragmented riparian landscapes. *Conservation Genetics*, 2011, 12(1): 79-89.
- [39] 李雪萍. 沼泽湿地不同恢复年限下朝天委陵菜克隆构件和根系的适应性[D]. 兰州: 西北师范大学, 2019.
- [40] 刘家书, 周永萍, 施翔, 李荣, 杨姗霖, 孟凡翔. 多枝柽柳春夏两季开花物候特征与生殖特性. *西北植物学报*, 2017, 37(9): 1839-1846.
- [41] [41] 储诚进, 王西石, 刘宇, 蒋林, 何芳良. 物种共存理论研究进展. *生物多样性*, 2017, 25(4): 345-354.
- [42] Li J, Yu B, Zhao C, Nowak R S, Zhao Z, Sheng Y, Li J. Physiological and morphological responses of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* to altered groundwater availability. *Tree Physiology*, 2013, 33(1): 57-68.
- [43] Wu G L, Jiang S W, Liu W Y, Zhao C Y, Li J. Competition between *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* seedlings under simulated high groundwater availability. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(2): 293-303.
- [44] Merritt D M, Poff N L R. Shifting dominance of riparian *Populus* and *Tamarix* along gradients of flow alteration in western North American rivers. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 135-152.
- [45] Heydari M, Omidipour R, Greenlee J. Biodiversity, a review of the concept, measurement, opportunities, and challenges. *Journal of Wildlife and Biodiversity*, 2020, 4(4): 26-39.
- [46] 王梦丽, 余海波, 高禾苗, 袁龙义, 任爱天. 水位变化对沮漳河河漫滩湿地土壤种子库的影响. *应用生态学报*, 2024, 35(4): 1044-1054.
- [47] Willems J H, Bik L P M. Restoration of high species density in calcareous grassland; the role of seed rain and soil seed bank. *Applied Vegetation Science*, 1998, 1(1): 91-100.
- [48] Osunkoya O O, Ali S, Nguyen T, Perrett C, Shabbir A, Navie S, Belgeri A, Dhileepan K, Adkins S. Soil seed bank dynamics in response to an extreme flood event in a riparian habitat. *Ecological Research*, 2014, 29(6): 1115-1129.
- [49] 田美荣, 冯朝阳, 王世曦, 田雨欣, 牛茜彤. 近70年来黄河流域生态修复历程及系统性修复思考. *环境工程技术学报*, 2023, 13(5): 1787-1797.
- [50] 黄超. 人为干扰对黄河中下游河岸带植物多样性和土壤物理性质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2020.
- [51] Ali A. Forest stand structure and functioning: Current knowledge and future challenges. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 665-677.
- [52] Hui G Y, Pommerening A. Analysing tree species and size diversity patterns in multi-species uneven-aged forests of Northern China. *Forest Ecology and Management*, 2014, 316: 125-138.
- [53] Fichtner A, Härdtle W, Bruelheide H, Kunz M, Li Y, Von Oheimb G. Neighbourhood interactions drive overyielding in mixed-species tree communities. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1144.
- [54] 祝燕, 白帆, 刘海丰, 李文超, 李亮, 李广起, 王顺忠, 桑卫国. 北京暖温带次生林种群分布格局与种间空间关联性. *生物多样性*, 2011, 19(2): 252-259.