

韩路, 陈家力, 王家强, 王海珍, 吕瑞恒, 康佳鹏. 塔河源荒漠河岸林群落物种组成、结构与植物区系特征[J]. 植物科学学报, 2019, 37(3): 324~336

Han L, Chen JL, Wang JQ, Wang HZ, Lü RH, Kang JP. Species composition, community structure, and floristic characteristics of desert riparian forest community along the mainstream of Tarim River[J]. *Plant Science Journal*, 2019, 37(3): 324~336

塔河源荒漠河岸林群落物种组成、结构与植物区系特征

韩路*, 陈家力, 王家强, 王海珍, 吕瑞恒, 康佳鹏

(塔里木大学植物科学院, 新疆生产建设兵团塔里木盆地生物资源保护利用重点实验室, 新疆阿拉尔 843300)

摘要:为了更好地了解荒漠河岸植被动态与生物多样性维持机制,于塔里木河干流源头荒漠河岸林内建立6个 1 hm^2 样地,对群落物种组成、数量特征和空间格局等进行综合分析。结果表明,塔河源荒漠河岸林群落结构简单、物种多样性低,共有物种12科15属16种,杨柳科重要值最大(28.97%),是群落优势建群科。取样面积在 0.04 hm^2 时,包括了87.5%的物种;样地内稀有种和偶见种均占所有物种的12.5%。植物区系贫乏,单种科、属多,温带成分占绝对优势,古地中海成分也占有重要地位,具典型温带区系性质。样地内 $DBH \geq 1\text{ cm}$ 的活木本个体有2497株,灰胡杨多度占92.95%,胸高断面和重要值最大,在群落中占绝对优势地位。群落内科、属、种的数量随植株高度级的增加而减少,垂直结构层次分明,由乔木层、灌木层和草本层构成。样地内所有树种平均胸径15.57 cm,径级与高度级结构均呈偏正态分布,缺乏高度 $\leq 2\text{ m}$ 的个体,群落更新不良。优势种灰胡杨、胡杨径级结构均呈单峰型,其中胡杨幼树出现断层,灰胡杨幼苗向幼树发展过程中死亡率极高(92.56%),均为衰退型种群。两个优势种空间格局呈聚集分布,不同生境下随径级增大空间分布格局变化不同;且两个优势种在空间上相互排斥而占据不同生境,暗示着种间竞争与生境异质性是影响荒漠河岸林物种空间分布格局和物种共存的重要因素。

关键词:荒漠河岸林;群落结构;区系组成;物种多样性;径级结构;空间分布

中图分类号: Q948.15

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2019)03-0324-13

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2019.30324

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Species composition, community structure, and floristic characteristics of desert riparian forest community along the mainstream of Tarim River

Han Lu*, Chen Jia-Li, Wang Jia-Qiang, Wang Hai-Zhen, Lü Rui-Heng, Kang Jia-Peng

(Key Laboratory of Protection and Utilization of Biological Resource in Tarim Basin, Xinjiang Production & Construction Groups, College of Plant Science, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China)

Abstract: Desert riparian forest is a typical temperate deciduous broad-leaved secondary forest and is mainly distributed in the Tarim Basin. To better understand the mechanisms of community dynamics and species coexistence of this forest type, six 1-hm^2 plots were established and divided into 150 subplots. We analyzed species composition (e.g., importance value, abundance), community structure (e.g., vertical structure, size-class structure), spatial distribution of woody plants, and floristic composition. Results indicated that community structure of the desert riparian forest was simple and species diversity was low, with 16 species, belonging to 15 genera and 12 families identified. Salicaceae had the highest

收稿日期: 2018-10-29, 退修日期: 2018-12-12。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860165, 31560182, 31060066)。

This work was supported by grants from the National Natural Science Foundation of China (31860165, 31560182, 31060066).

作者简介: 韩路(1971-), 男, 博士, 教授, 主要从事干旱区生态学研究(E-mail: hlzky@163.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: hlzky@163.com)。

importance value (28.97%) and was the dominant family in the community. When the sampling area was larger than 0.04 hm^2 , 87.5% of species were counted. Rare and occasional species accounted for 12.5% of all species, respectively. Floristic composition was poor, with single species, genus, and temperate components being dominant, although ancient Mediterranean components also occupied an important position, with typical temperate flora. We counted 2497 living free-standing trees in the plots. Species abundance, basal area, and importance values showed that *Populus pruinosa* was the obviously dominant species. The number of families, genera, and species decreased with increasing height class, and the vertical structure was composed of canopy, shrub, and herb layers, indicating apparent vertical stratification in this forest. The average DBH of all trees was 15.57 cm, and DBH size and height classes showed skewed normal distributions, with few individuals with a height lower than 2 m, indicating weak regeneration across the community. The DBH structures of *P. pruinosa* and *P. euphratica* generally were unimodal; in particular, *P. euphratica* lacked small DBH trees and *P. pruinosa* had extremely high mortality during development from seedling to young tree, thus suggesting declining populations for these two species. The spatial distribution patterns of the two dominant species were clustered and varied with diameter in different habitats. In addition, the two dominant species were spatially mutually exclusive and occupied different habitats, suggesting that interspecific competition and habitat heterogeneity may be responsible for the species coexistence and spatial distribution of dominant species.

Key words: Desert riparian forest; Community structure; Floristic composition; Species diversity; DBH structure; Spatial distribution

植物群落组成与结构是生态系统功能和过程的基础, 可为揭示群落物种共存、群落演替及生物多样性维持机制等提供重要的信息^[1]。由于不同植物群落组成和结构存在较大的差异, 因此与其对应的生态系统功能和过程也不尽相同^[2]。前人已对诸多群落类型生态特征进行了研究, 主要集中在物种组成、区系成分、外貌、垂直结构、径级结构及物种空间格局等方面^[2-6]。在植物群落中, 物种组成是形成群落结构的基础, 年龄结构是判断种群动态和群落演替的重要依据, 物种空间格局及物种间的相互关系则有助于认识群落构建机制。关于群落地理成分分析均是在吴征镒等^[7, 8]对中国种子植物科、属、种地理成分的研究框架下进行的, 但植物群落作为特定时空下多种植物有规律的组合, 具有一定的数量和结构组成特征, 基于群落植物名录的地理成分分析缺乏对地理成分在群落结构上数量特征(密度、重要值、空间格局)的考虑^[5], 因而群落区系分析应考虑群落地理成分的数量特征, 这对深入了解植物群落或植被类型的特点、性质、起源和分布有着重要意义^[5]。因此, 植物群落结构组成、空间分布格局与区系特征研究有助于揭示植物

群落演替动态、生物多样性维持机制^[1, 3, 6], 为区域生物多样性保护提供科学依据。

塔里木荒漠河岸林作为西北干旱荒漠区宝贵的天然林资源, 是荒漠区生命现象最活跃、生物多样性和初级生产力较高的独特生态系统, 在抵御风沙、遏制荒漠化、维护区域生态安全、保护生物多样性和保障绿洲农牧业生产等方面发挥着极其重要的作用。但由于长期人为干扰, 尤其是近50年来大规模的水土资源开发致使荒漠植被生态过程与自然景观格局被改变、植被衰败、生物多样性锐减^[9], 如今荒漠河岸林分布区缩窄、面积大幅减小且主要以次生林的形式存在。前人已对塔里木荒漠河岸林开展了群落结构组成、空间格局、演替、生物多样性、生态水文及环境方面的研究^[9-12], 指出群落动态受物理环境支配明显强于群落生物环境因素。但这些调查样地面积均较小($900 \sim 5000 \text{ m}^2$)、时间短且空间尺度依赖性研究较少, 难以客观地反映荒漠河岸林群落结构特征、不同尺度上的生物多样性格局和过程, 无法较全面解释群落结构动态与物种组成的关系、物种共存和群落构建机制^[3, 4, 6]。因此, 区域设置更大面积的长期森

林监测样地，对于进一步阐明荒漠河岸林群落结构特征、空间格局、物种共存机制、气候变化对其影响及其长期动态变化等具有重要意义。塔里木河干流源头荒漠河岸林群落结构相对复杂，物种多样性相对较高，是塔里木河流域内受人类影响较小、保护较完好，且最具特色、最具研究价值的典型断面。因此，本研究在塔河源建立了6个 1 hm^2 样地，通过研究荒漠河岸林群落结构组成、个体多度格局、优势种径级结构和空间分布格局、种间空间关联性和区系特征，分析荒漠河岸林群落结构动态、物种共存机制及影响因素，以期揭示荒漠河岸林物种分布、群落结构形成、演替与生物多样性维持机制，为今后荒漠河岸林的长期动态监测、科学经营管理和生物多样性保护提供理论依据。

1 研究区自然概况

塔里木河干流源头(简称：塔河源)处于阿克苏河、叶尔羌河、和田河3条河交汇处($40^{\circ}27'N$, $80^{\circ}56'E$)，位于新疆阿拉尔市境内。塔河源荒漠河岸林核心区面积约 300 hm^2 ，地势较低，地下水位埋深<2.0 m，每年7—9月洪水季常受洪水漫溢干扰。该区属暖温带极端大陆性干旱荒漠气候，四季分明，年均温 10.7°C ，极端最高温 40.6°C ，极端最低温 -28°C 。年均降水量 50.4 mm ，年均蒸发量 1880.0 mm ，干燥度 $12\sim19$ 。该区植被组成简单，乔灌草3层结构明显。乔木层主要有灰胡杨(*Populus pruinosa* Schrenk.)、胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)，林下植物主要有枝柽柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb.)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum* Murr.)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron* (Pall.) Voss.)、芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.)、硬枝碱蓬(*Suaeda salsa* (L.) Pall.)等。土壤类型为胡杨林土(吐喀依土)，1 m土壤平均含水量、总盐分别为25.46%和 2.201 ms/cm ， $0\sim20\text{ cm}$ 土壤总盐为 5.923 ms/cm (18.75 g/kg)。

2 研究方法

2.1 样地设置与群落调查

在充分踏查的基础上，于塔河源荒漠河岸林内选择具代表性、人为干扰较少的地段垂直河岸设置2条样带，间隔500 m。按林相整齐的要求于每条

样带上间隔 $300\sim500\text{ m}$ 设置1块 1 hm^2 调查样地，6块样地面积共 6 hm^2 。每块样地以 20 m 为间隔分成25个 $20\text{ m}\times20\text{ m}$ 的调查样方，采用相邻格子法以 $5\text{ m}\times5\text{ m}$ 为基本单元标定并调查样方内所有胸径(*DBH*) $\geq1.0\text{ cm}$ 的木本植物。调查指标包括：植物种类、胸径、树高、冠幅、活立木、枯立木和坐标等，并测量乔木幼苗的种类、高度、地径与坐标。在每个调查样方($20\text{ m}\times20\text{ m}$)中心分别以 $4\text{ m}\times4\text{ m}$ 、 $1\text{ m}\times1\text{ m}$ 单元对灌木层和草本层的植物种类、灌木地径、高度、盖度、多度等进行详细调查。种-面积关系采用巢式样方法调查。各样地用GPS定位，记录其经纬度、海拔、郁闭度等生态因子。

2.2 地理成分分析

对样地物种进行野外调查，并参照《中国植物志》进行分类。参考吴征镒等^[7, 8]的区系分析方法对该区物种的科属种地理成分进行分析。通过查阅《中国植物志》和《新疆植物志》确定各植物种的地理分布范围，同时考虑种的生态习性、可能的迁移线路以及物种分布的主要影响因素等对各种的分布区类型进行划分。

2.3 物种多样性测度

运用重要值计算Shannon-Weiner (*H*)与Simpson (*D*)多样性指数、Margalef (*M_a*)丰富度指数、Simpson (*C*)优势度指数和Pielou均匀度指数(*E*)^[13, 14]。参考张金屯^[15]构建的各种重要值公式并考虑到荒漠植物群落的特殊性，本文重要值计算公式为：重要值(*I/V*)=(相对密度+相对盖度+相对频度+相对高度)/4；科(或种)分布型的重要值为：*FIV(A/V)*=(相对多样性+相对密度+相对盖度+相对高度+相对频度)/5。相对多样性指一个科或某一分布型的物种数占总物种数的百分比。

2.4 高度级和径级的划分

为反映群落在垂直和水平方向上的结构特征，将垂直结构按物种高度和生长型划分为4层： $H\geq5\text{ m}$ (第1层)、 $3\text{ m}\leq H < 5\text{ m}$ (第2层)、 $1\text{ m} < H < 3\text{ m}$ (第3层)、 $H\leq1\text{ m}$ (第4层)。将胸径划分为14个径级：第1径级为 $1\text{ cm}\leq DBH < 4\text{ cm}$ ，第2径级 $4\text{ cm}\leq DBH < 8\text{ cm}$ ，每级间隔 4 cm ，以此类推，将胸径大于 52 cm 的都归为第14径级，依次以4、8、12、16、20、24、28、32、36、40、44、48、52、56表示；同时，

将乔木树高(TH)以2 m为级阶(上线排外法)划分为7个高度级, 即第1高度级为 $TH < 2\text{ m}$, 第2高度级 $2\text{ m} \leq DBH < 4\text{ m}$, 以此类推, 将高度大于12 m的都归为第7高度级, 分别用2、4、6、8、10、12、14表示; 统计各径级与高度级株数, 以径级或高度级为横轴, 个体数为纵轴, 绘制群落径级与高度级结构图。

2.5 优势种群空间分布格局

采用点格局分析方法对胡杨、灰胡杨两个优势种群进行空间格局分析, 具体步骤参考文献[16]。物种个体落在半径为 r 的圆内的期望值表示为 $L(t)$ 、2个物种落在半径为 r 的圆内的期望值表示为 $L_{12}(t)$, 当 $L(t)$ 或($L_{12}(t)$)位于上包迹线之上时分别为聚集分布、空间正关联, 位于上下包迹线之间时分别为随机分布、相互独立, 位于下包迹线之下时分别为均匀分布、空间负关联^[16]。空间格局分析的尺度为0~50 m, 步长为1 m, 利用生态学软件包ADE-4完成。

所有数据统计分析和作图用Excel 2007和Origin 8.0软件完成。

3 结果与分析

3.1 群落物种组成与多样性

3.1.1 物种组成与优势科、种分析

经样地调查, 共发现16种植植物, 隶属于12科15属。其中, 双子叶植物10科11属12种, 单子叶植物2科4属4种。按照Whittaker生长型系统标准划分, 草本种类在该群落比例最高(50.0%), 灌木和藤本种类居中(各占18.75%), 乔木种类最少(12.50%)。6 hm²样地中 $DBH \geq 1\text{ cm}$ 的乔木共2497株, 其中胡杨176株, 占样

地调查总个体数的7.05%, 密度为29.3株/hm²; 灰胡杨2321株, 占样地调查总个体数的92.95%, 密度为386.8株/hm²。 $DBH < 1\text{ cm}$ 的乔木共242株, 枯立木341株。

科级水平重要值可反映群落组成的优势成分和区系表征成分。从塔河源荒漠河岸林重要值 ≥ 3 的群落科可见(表1), 杨柳科的重要值最大(28.97%), 在群落中占绝对优势; 禾本科的相对多样性、密度最高, 盖度、频度和重要值均较高, 其在草本层中占绝对优势。科内物种数 ≥ 2 的共3科(占总科数的25.0%), 其他科(单科)含有较多植物种类, 说明优势科在荒漠河岸林群落形成与区系组成中起着重要作用。重要值、盖度和频度较高的科共有4科, 这些科在群落各层次中均为优势组成部分。

优势种对群落的构建作用显著, 样地中重要值 ≥ 1 的物种有11种(表2), 重要值之和达96.53%。重要值较大的前4个物种是灰胡杨、芦苇、硬枝碱蓬和胡杨, 其中灰胡杨的盖度、频度、高度和重要值均最大, 且其胸高断面积最大, 为47.065 m², 占总胸高断面积的87.59%, 在群落中占绝对优势; 胡杨胸高断面积为6.670 m², 占总胸高断面积的12.41%, 重要值为10.35%, 是乔木层中的次优势种。多枝柽柳、芦苇的特征值分别在灌木层、草本层中均最大, 分别为灌木层、草本层中的优势种类; 硬枝碱蓬为草本层的次优势种类, 小獐毛、假苇拂子茅等为伴生种。

3.1.2 物种多度格局

物种多度研究结果显示, 个体多度较多的前2个物种占群落个体多度的93.51%, 个体多度最多的前5个物种占群落个体多度的99.45%(图1)。样

表1 荒漠河岸林群落重要值 ≥ 3 的群落科
Table 1 Families with importance values ≥ 3 in desert riparian forest community

科 Family	相对多样性 Relative diversity	相对盖度 Relative coverage	相对密度 Relative density	相对频度 Relative frequency	相对高度 Relative height	重要值(%) Importance value
杨柳科 Salicaceae	12.500	59.050	0.2480	25.296	47.750	28.97
禾本科 Gramineae	18.750	24.270	55.6620	38.188	2.779	27.93
藜科 Chenopodiaceae	6.250	7.740	42.5980	7.854	1.081	13.10
柽柳科 Tamaricaceae	6.250	7.318	0.0310	13.049	10.867	7.50
豆科 Leguminosae	6.250	0.888	0.1770	5.596	9.443	4.47
毛茛科 Ranunculaceae	6.250	0.151	0.0020	0.455	11.841	3.74
菊科 Compositae	12.500	0.359	1.1960	1.906	1.640	3.52
茄科 Solanaceae	6.250	0.213	0.0510	6.260	2.982	3.15

表2 荒漠河岸林样地重要值 ≥ 1 的植物种类特征值
Table 2 Eigenvalues of species with importance value ≥ 1 in desert riparian forest plots

种名 Species	相对密度 Relative density	相对盖度 Relative coverage	相对频度 Relative frequency	相对高度 Relative height	重要值 Importance value	垂直结构 Vertical structure
灰胡杨 <i>Populus pruinosa</i> Schrenk	0.230	50.885	24.952	31.774	26.96	乔木层 Tree layer
胡杨 <i>Populus euphratica</i> Oliv.	0.017	8.166	3.343	29.859	10.35	
多枝柽柳 <i>Tamarix ramosissima</i> Ldb.	0.177	7.318	13.687	7.014	7.05	
铃铛刺 <i>Halimodendron halodendron</i> (Pall.) Vass	0.031	0.888	6.848	6.094	3.47	灌木层 Shrub layer
黑果枸杞 <i>Lycium ruthenicum</i> Murr.	0.051	0.213	6.566	1.924	2.19	
东方铁线莲 <i>Clematis orientalis</i> L.	0.002	0.151	0.478	7.642	2.07	层间 Interlayer
芦苇 <i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	50.922	21.321	21.251	2.065	23.89	
硬枝碱蓬 <i>Suaeda rigida</i> Kung et G. L. Chu.	42.598	7.740	7.163	0.698	14.55	
小獐毛 <i>Aeluropus pungens</i> (M. Bieb.) C. Koch.	4.116	2.399	5.999	0.310	3.21	草本层 Herb layer
假苇拂子茅 <i>Calamagrostis pseudophragmites</i> (Hall. f.) Koel.	0.624	0.549	2.089	3.006	1.57	
柳叶旋覆花 <i>Inula salicina</i> L.	1.188	0.355	2.656	0.675	1.22	

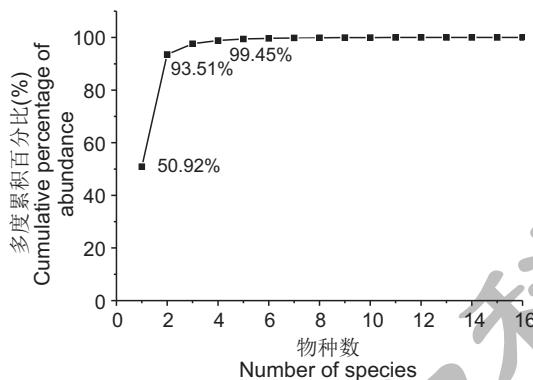


图1 物种多度的累计分布

Fig. 1 Cumulative distribution curve of species abundance

地内个体多度大于10 000的物种有4个，其中芦苇、硬枝碱蓬个体多度最大；个体多度大于5000的物种有1个；个体多度大于1000的物种有2个。其中，灰胡杨个体多度最大，达到2321株，占群落个体多度的0.23%；柽柳个体多度为1790株，占群落个体多度的0.18%。

将每 hm^2 个体数少于1株的物种定义为稀有种，1~10株的为偶见种，大于10株的为常见种^[17]。样地调查发现，稀有种2个，偶见种2个，均占群落总物种数的12.5%。

3.1.3 种-面积曲线

研究结果显示(图2)，在取样面积较小的初始阶段物种数迅速上升，当取样面积仅为 0.04 hm^2 时(占样地面积的4.0%)，就包括7个物种(占样地总物种数的87.5%)。当取样面积达到 0.36 hm^2

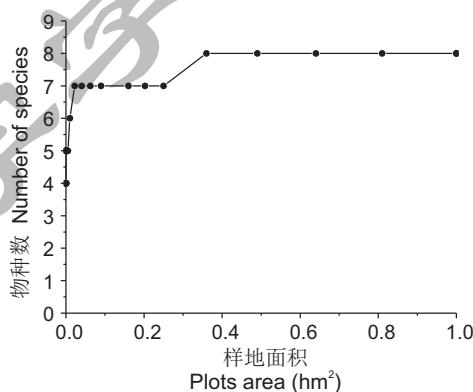


图2 样地物种的种-面积曲线

Fig. 2 Species-area curve of survey plots

时(占样地面积的36.0%)，则涵盖了样地中的全部物种；之后物种数不再随取样面积扩大而增大。

3.1.4 物种多样性

塔河源荒漠河岸林群落 Margalef 丰富度指数(M_a)、Shannon-Weiner 多样性指数(H)、Simpson 多样性指数(D)、Simpson 优势度指数(C)和 Pielou 均匀度指数(E)分别为：1.2466、2.0754、0.8296、0.1704、0.7485(表3)，物种多样性明显低于长白山次生杨桦林^[4]。群落垂直结构各层的物种多样性差异明显， M_a 值表现为：草本层>灌木、层间>乔木层， H 和 E 值表现为：草本层>乔木层>灌木层>层间， C 值表现为：乔木层>草本层>灌木层>层间。多样性指数(H)的变化趋势与丰富度、优势度指数不同，而与均匀度指数相同。

表 3 荒漠河岸林群落物种多样性
Table 3 Species diversity of community in desert riparian forest plots

层次 Layer		丰富度指数 M_a Margalef richness index	多样性指数 H Shannon-Weiner diversity index	多样性指数 D Simpson diversity index	均匀度指数 E Pielou evenness index	优势度指数 C Simpson dominance index
乔木层	Tree layer	0.0831	0.5881	0.9166	0.2121	0.0834
灌木层	Shrub layer	0.1662	0.3871	0.9934	0.1396	0.0066
层间	Interlayer	0.1662	0.1669	0.9994	0.0602	0.0006
草本层	Herb layer	0.5817	0.9333	0.9202	0.3366	0.0798
群落	Community	1.2466	2.0754	0.8296	0.7485	0.1704

3.2 群落结构

3.2.1 垂直结构

样地内群落结构层次清晰, 群落中科、属、种的数量随高度级增加而减少(图3)。在垂直方向上按物种高度和生长型可划分为4层: 第1层(主林层, $H \geq 5$ m)有1科2种, 共2457株木本植物; 第2层(次林层, $3 \leq H < 5$ m)有1科2种, 共40株木本植物; 第3层(灌木层, $1 \leq H < 3$ m)有3科3种, 共2127株植物, 包括1种藤本植物; 第4层(草本层, $H \leq 1$ m)有8科11种植物, 包括藤本2种、灌木1种。主、次林层(第1层、第2层)由灰胡杨、胡杨占据, 林下第3层柽柳个体数量最多(1790株), 占第3层植物总个体数的84.13%, 株高最高达2.80 m; 第4层植物个体小、数量多, 个体数超过10 000株的常见种有芦苇、硬枝碱蓬2种, 为草本层中的优势成分。

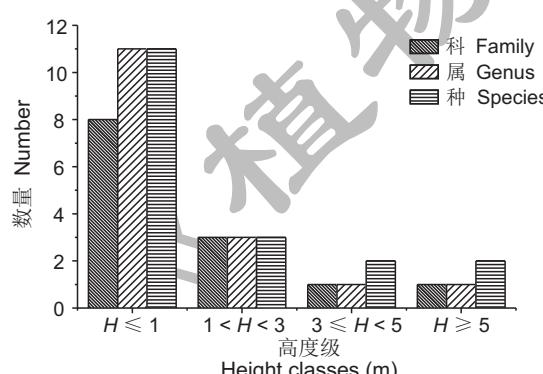


图3 样地物种各高度级别的科、属、种组成

Fig. 3 Composition of family, genus, and species at different height classes in survey plots

3.2.2 径级与高度结构

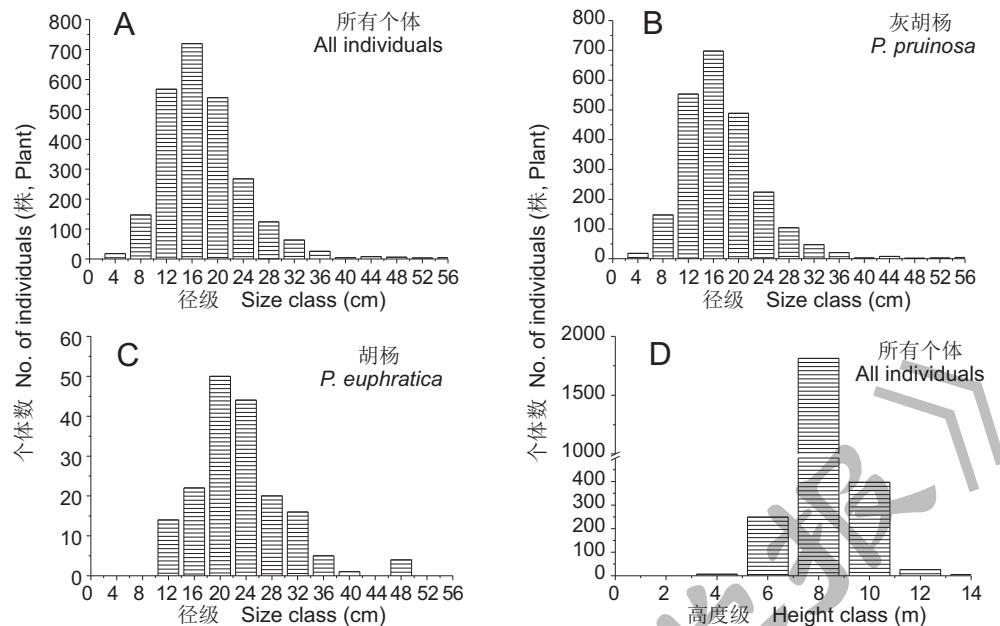
样地中 $DBH \geq 1$ cm 的独立活个体数有2497株, 物种最大胸径为93.0 cm, 平均胸径15.57 cm。主林层和次林层平均胸径分别为15.46 cm 和 4.46 cm, 主林层、次林层物种胸径

主要分布在5.0 ~ 93.0 cm 和 1.8 ~ 10.0 cm。样地中枯立木有341株, 最大胸径86.0 cm, 最小胸径4.4 cm, 平均胸径13.64 cm, 65.10%的枯立木个体 DBH 集中在8 ~ 16 cm。

样地中所有物种个体的总径级分布呈单峰型, 峰值出现在 $12 \text{ cm} \leq DBH < 16 \text{ cm}$ 处并向两边递减(图4: A)。中等径级($8 \text{ cm} \leq DBH < 28 \text{ cm}$)个体数最多, 为2218株, 占总株数的88.83%, 集中分布在8 ~ 20 cm(占73.13%); 大径级($DBH \geq 28 \text{ cm}$)个体数最少, 仅114株, 占总株数的4.57%; 小径级($DBH < 8 \text{ cm}$)个体数有165株, 占总株数的6.61%, 其中 $DBH < 4 \text{ cm}$ 的个体数仅18株, 占总株数的0.72%, 表明群落更新不良。

群落中灰胡杨、胡杨两个优势树种的径级结构均呈偏正态分布(中径级个体储备型)(图4: B、C)。灰胡杨的峰值出现在 $12 \text{ cm} \leq DBH < 16 \text{ cm}$ 处并向两边递减, 74.97%的个体 DBH 集中在8 ~ 20 cm(图4: B)。胡杨的峰值出现在 $16 \text{ cm} \leq DBH < 20 \text{ cm}$ 处并向两边递减, 84.26%的个体 DBH 集中在8 ~ 32 cm, $DBH \geq 32 \text{ cm}$ 的个体占总个体数的5.08%, 而 $DBH < 8 \text{ cm}$ 的个体缺失(图4: C)。样地调查发现, $DBH < 1 \text{ cm}$ 的乔木个体有242株, 均为灰胡杨幼苗, 但灰胡杨 $1 \text{ cm} \leq DBH < 4 \text{ cm}$ 的个体数仅有18株, 表明灰胡杨幼苗向幼树发展过程中受到严酷环境的筛选导致其死亡率极高。从对群落组成和结构具有决定性影响的优势树种径级结构来看, 灰胡杨、胡杨缺乏更新层或幼树形成严重受阻, 种群处于衰退阶段。

样地中所有乔木物种个体的高度级分布呈偏正态分布, 峰值出现 $6 \text{ m} \leq TH < 8 \text{ m}$ 处并向两边递减(图4: D)。树高(TH)集中分布在4 ~ 10 m, 占总株数的98.48%; $TH \geq 10 \text{ m}$ 个体有31株, 占



图A~C中, 4、8、12、16、20、24、28、32、36、40、44、48、52、56为14个径级, 依次表示 $1\text{ cm} \leq DBH < 4\text{ cm}$ 、 $4\text{ cm} \leq DBH < 8\text{ cm}$ 、 $8\text{ cm} \leq DBH < 12\text{ cm}$, ..., 每级间隔4 cm, 以此类推, 胸径大于52 cm的都归为第14径级。图D中, 2、4、6、8、10、12、14为乔木7个高度级, 依次表示为 $TH < 2\text{ m}$, $2\text{ m} \leq TH < 4\text{ m}$, ..., $TH \geq 12\text{ m}$ 。Diameter at breast height (DBH) of trees was divided into 14 size classes, i.e., $1\text{ cm} \leq DBH < 4\text{ cm}$, $4\text{ cm} \leq DBH < 8\text{ cm}$, and so on, with intervals of 4 cm for each size class, with $DBH \geq 52\text{ cm}$ attributed to the fourteenth level, shown as 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, 48, 52, and 56 on figure A, B and C. Tree height (TH) was divided into seven height classes, with intervals of 2 m for each height class and $TH \geq 12\text{ m}$ being the seventh level, shown as 2, 4, 6, 8, 10, 12, and 14 on figure D.

图4 荒漠河岸林样地优势树种的径级、高度结构

Fig. 4 Size- and height-class distributions of dominant species in desert riparian forest plots

总株数的1.24%; $TH < 4\text{ m}$ 的个体仅7株, 占总株数的0.28%, 但 $TH < 2\text{ m}$ 的个体出现断层现象, 表明群落更新不良。

3.2.3 空间分布格局

塔河源荒漠河岸林两个优势种的空间格局总体呈聚集分布, 样地1(混交林)中的胡杨、灰胡杨空间格局随尺度增大其聚集强度逐渐增强, 分别在距离36 m和41 m处达到最大, 随后降低(图5: D、E); 样地2(纯林)中的灰胡杨在 $< 44\text{ m}$ 尺度上呈聚集分布, $\geq 44\text{ m}$ 转变为随机分布(图5: F)。样地1(混交林)中的胡杨分布在东边(图5: B), 灰胡杨分布在西边(图5: A), 两者空间上发生明显分离; 两个树种在 $\leq 50\text{ m}$ 空间尺度上呈显著空间负关联(图6: H), 表明两树种间存在激烈的种间竞争。

两个优势种空间格局随径级变化在不同样地表现出各自的特点(图5、图6)。样地2(纯林)中灰胡杨 $DBH < 10\text{ cm}$ 的个体呈聚集分布(图6: A); $10\text{ cm} \leq DBH < 25\text{ cm}$ 的个体在 $< 35\text{ m}$ 尺度上

呈聚集分布, 随后转为随机分布(图6: B); $DBH \geq 25\text{ cm}$ 的个体在 $< 17\text{ m}$ 尺度上呈聚集分布, $\geq 17\text{ m}$ 转变为随机分布(图6: C), 表明随生长发育进程其空间格局从聚集逐渐过渡为随机分布, 这是种内自疏作用的结果。样地1(混交林)中的胡杨、灰胡杨小径级个体极少($DBH < 10\text{ cm}$), $10\text{ cm} \leq DBH < 25\text{ cm}$ 的个体在 $\leq 50\text{ m}$ 尺度上均呈聚集分布, 胡杨聚集强度大于灰胡杨(图6: D、F); $DBH \geq 25\text{ cm}$ 的胡杨、灰胡杨个体分别在 $\leq 4\text{ m}$ 和 $\leq 5\text{ m}$ 尺度上呈随机分布, 其他尺度上均呈聚集分布(图6: E、G)。随生长发育进程两个树种的聚集强度均增大, 暗示着生境异质性影响种群空间格局。

3.3 植物区系特征

3.3.1 科、属的地理成分

塔河源荒漠河岸林植物区系组成贫乏, 种子植物多为单科单属单种。该群落中科的地理成分有4个分布型1个亚型(表4), 其中世界广布科有8科, 占总科数的66.67%, 如豆科、菊科、茄科、毛

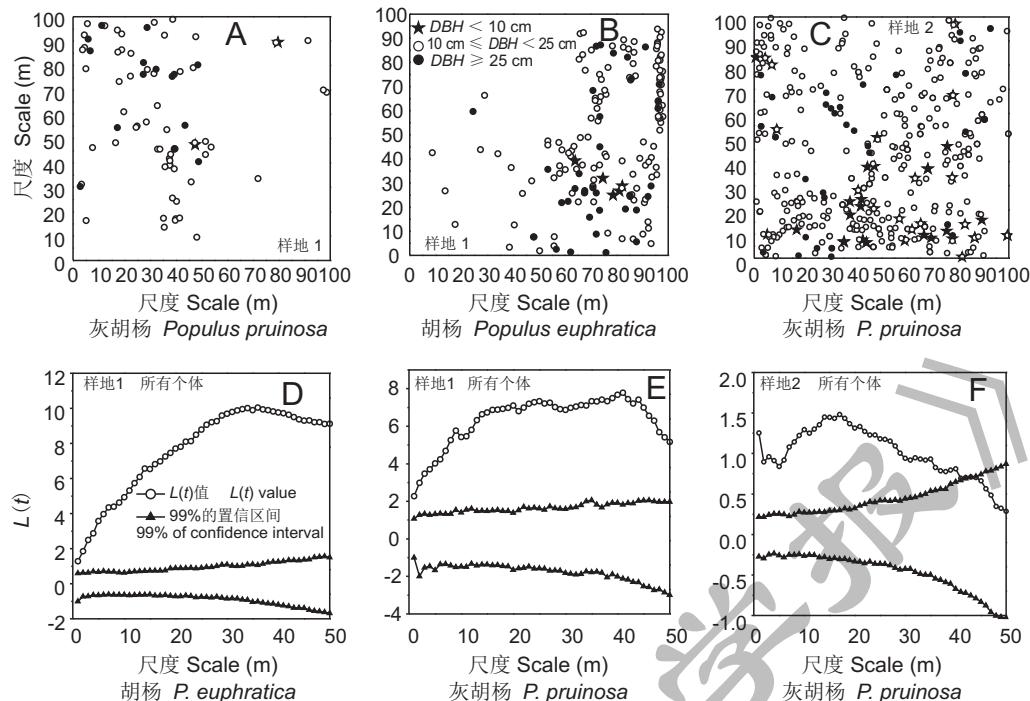


图 5 荒漠河岸林样地 2 个优势种及其 3 个不同径级的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of two dominant species at three DBH classes in desert riparian forest plots

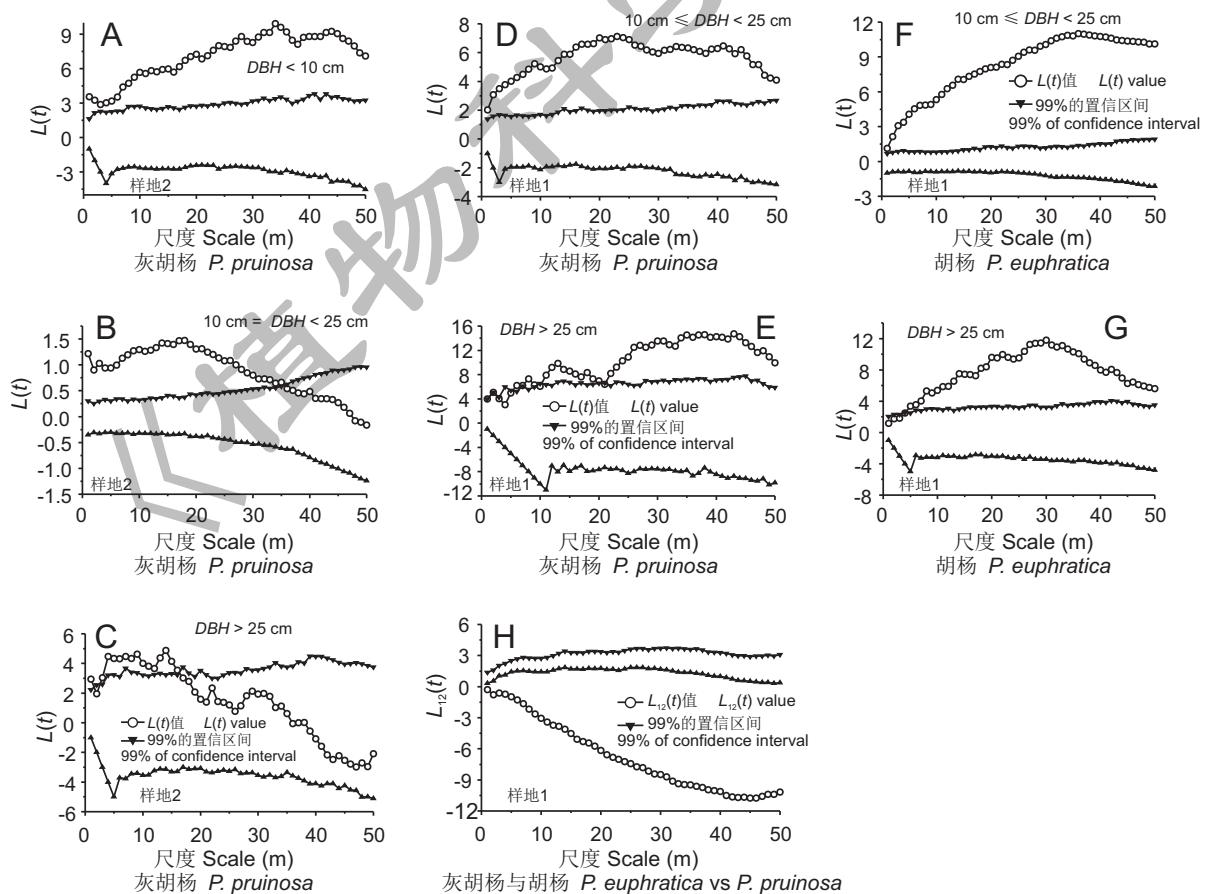


图 6 荒漠河岸林样地 2 个优势种的空间分布格局(A~G)及空间关联性(H)

Fig. 6 Spatial distribution (A-G) and association (H) of two dominant species in the desert riparian forest plots

表4 塔河源荒漠河岸林群落科、属、种的分布型
Table 4 Areal-type of families, genera, and species in desert riparian forest community

分布区类型 Areal type	科 Family	属 Genus	种 Species	种的重要值 Importance value of species
1. 世界广布 Cosmopolitan	8(66.67%)	4(26.67%)	1(6.25%)	20.36
2. 泛热带分布 Pantropic	1(8.33%)	1(6.67%)	-	-
4. 旧世界热带分布 Old world tropics	-	1(6.67%)	-	-
热带成分 Element of Tropics (2~4)	1(8.33%)	2(13.33%)	-	-
8. 北温带分布 North Temperate	1(8.33%)	4(26.67%)	3(18.75%)	5.90
8~4. 北温带和南温带间断分布 North Temperate and South Temperate disjuncted	1(8.33%)	1(6.67%)	-	-
10. 旧世界温带分布 Old World Temp.	1(8.33%)	2(13.33%)	5(31.25%)	21.61
10~1. 地中海区、西亚和东亚间断分布 Medit., W. Asia and E. Asia disjuncted	-	-	1(6.25%)	-
温带成分 Element of Temperate (8~10)	3(25.0%)	7(46.67%)	9(56.25%)	27.51
12. 地中海区、西亚至中亚分布 Medit., W. to C. Asia	-	2(13.33%)	3(18.75%)	35.25
古地中海成分 Element of Tethys (12)	-	2(13.33%)	3(18.75%)	35.25
13. 中亚分布 C. Asia	-	-	1(6.25%)	1.86
15. 中国特有分布 Endemic to China	-	-	2(12.5%)	15.02

茛科等，他们的数量少、重要值较低，在群落中处于从属和伴生地位。热带分布科仅有1科（萝藦科），占8.33%。温带分布科共3科（包括1个亚型），占25.0%，其中杨柳科是群落冠层的优势种，柽柳科是灌木层中的优势种，他们都是新疆植物区系的表征科^[18]。

属的地理成分有6个分布型1个亚型，以北温带分布属最多（表4）。世界广布共4属，占总属数的26.67%，其中碱蓬属、芦苇属植物数量多、分布广、频度高，是草本层的重要成分。热带成分共2属，占13.33%，天门冬属和鹅绒藤属均是群落中的层间植物，数量较少。温带成分共7属（包括1个亚型），占46.67%，其中杨属、柽柳属、枸杞属为乔灌木，是该区温带分布类型的表征属^[19]，对荒漠河岸林发生发展起着决定性作用；苦苣菜属、拂子茅属则是群落内常见成分。古地中海成分有2属，占总属数的13.33%，铃铛刺属和獐毛属均属伴生常见种，广泛分布于河岸带。总体来看，塔河源样地以世界广布科为主（66.67%），温带分布科高于热带分布科（3/1）；温带分布属远高于热带分布属（7/2），古地中海成分也占一定比例，表明温带成分是塔里木荒漠河岸林植物区系的主体，在区系组成中起着极其重要的作用。

3.3.2 种的地理成分

种是植物分类最基本的单位，对种的区系分析能更加准确、具体地反映植物区系的特点。参照吴征镒^[7]对属的分布类型的定义、范围并结合《中国植物志》、《新疆植物志》中的产地分布，可将塔河源16种种子植物划归为6个分布型1个亚型（表4）。以旧世界温带分布种最多，其次为北温带和地中海区、西亚至中亚分布种。温带成分有9种，占非世界种总种数的60.0%，重要值较高（27.51%），他们在群落中多为林下植物，草本植物个体小、盖度低；而灌木如多枝柽柳、黑果枸杞等，生长良好，尤其多枝柽柳数量多、盖度大，成为灌木层中的优势种。古地中海成分有3种，占非世界种总种数的20.0%，重要值最高（35.25%），这些种在群落中个体高大，尤其是胡杨、灰胡杨适应性强，占据着群落上层空间，是该区系占绝对优势的物种，表明古地中海遗迹上发生的本土成分在本植物区系组成中起重要作用。中国特有成分有2种，占非世界种总种数的13.33%，重要值15.02%；其中羊角子草（*Cynanchum cathayense* Tsang et Zhang）主要分布在西北干旱荒漠区，硬枝碱蓬仅分布在塔里木盆地，尤其在塔河源荒漠河岸林内广泛分布，密度大、盖度高，在草本层中占有一定优势。中亚成分仅1种，占非世界种总种数的

6.67%，在群落中数量少、地位最低。

4 讨论

群落结构和物种组成不仅反映群落中物种间的关系，也反映环境对物种生存和生长的影响，他们是群落最基本的特征，也是群落生态学研究的基础^[1]。塔河源位于和田河、叶尔羌河和阿克苏河的交汇处，洪漫积滩上生长着大面积长势良好且保存完好的荒漠河岸林，是极端干旱区研究森林植被动态和生物多样性维持机制的典型样区。该群落有16种植物，隶属于12科15属，乔灌木种类少，草本种类多，反映出新疆干旱、冬季寒冷的气候特征；物种组成以双子叶植物为主，占总物种数的75.0%，其中胡杨、灰胡杨是构成荒漠河岸林群落仅有的两种渐危乔木树种，占据着群落的上层空间（林冠层），二者重要值之和为37.31%，为典型的温带河岸落叶阔叶林优势树种。样地中 $DBH \geq 1\text{ cm}$ 的个体共2497株，物种多度、胸高断面积/盖度和频度在物种之间存在较大差异，其中灰胡杨多度占总多度的92.95%，胸高断面积、密度、频度和重要值远高于胡杨，在群落中占绝对优势地位。从个体密度来看，塔河源样地密度为416株/ hm^2 ，远低于东灵山落叶阔叶次生林（5264株/ hm^2 ）^[2]、长白山次生杨桦林（4020株/ hm^2 ）^[4]，反映出塔里木荒漠河岸林个体密度低、林分稀疏这一特性。另外，灰胡杨个体密度（387株/ hm^2 ）远高于胡杨（29株/ hm^2 ），且二者空间分布上发生明显分离（图6），表明群落正处于演替阶段，灰胡杨通过拓宽生态位等方式不断确立其优势地位，致使竞争力和更新能力弱的物种逐渐退出群落^[20]或在种间排斥作用下向外扩散。

样地中重要值 ≥ 1 的物种有11种，重要值居前的4个物种是灰胡杨、芦苇、硬枝碱蓬和胡杨，他们具有盖度、高度或多度、频度大的特征，对群落的形成和维持起着重要作用。稀有物种是群落生境异质性的重要反映，稀有物种越多，群落生境异质性越高^[5]。塔河源样地稀有物种和偶见物种各占总物种数的12.5%，其稀有物种比例均低于东灵山落叶阔叶次生林（18.97%）^[2]、长白山次生杨桦林（18.18%）^[4]、中亚热带石栎-青冈群落

（27.4%）^[5]。这可能是由于热带成分难以适应塔里木温带大陆性干旱气候及严酷（高盐）生境，使种群分布和繁衍受限。本研究区群落物种多样性低，各层次物种多样性差异明显；草本层丰富度（ M_a ）、多样性（ H ）和均匀度（ E ）指数均最高，乔木层优势度（ C ）指数最大。这是由于群落中优势乔木树种稀疏、盖度低（43%），林内通风透光较好，有利于林下草本植物的生长；但灌木层中多枝柽柳多度占灌木总多度的70%左右，其占有较多的生态位空间，一定程度上降低了灌木层的多样性指数，而草本层发育良好，种类相对丰富，既有喜光草本也有耐荫草本，并且分布均匀，使其 M_a 、 H 、 E 值在群落内的空间分布达到最高。本研究区群落物种丰富度、多样性与优势种多度低均反映出荒漠河岸林生境的严酷性，只有那些重要值高、抗逆性强的物种能够生存繁衍下来，他们对群落形成起着关键作用。

群落胸径和树高分布是群落结构的主要特征，可预测群落结构的形成与演替趋势^[5]。塔河源群落垂直结构分层明显，按生长型可明显分成乔灌草3层；随垂直高度增加群落物种数、多度呈递减趋势，表明群落内物种间竞争激烈，只有那些生态幅宽、适应性强的少数物种能成为各层的优势种。样地内木本植物的平均胸径为15.57cm，而纬度与之相近的东灵山样地平均胸径为8.75cm^[2]、长白山次生杨桦林样地平均胸径为7.43cm^[4]，表明塔河源河岸落叶阔叶林小径级个体少、更新较差。6个样地所有个体（ $DBH > 1\text{ cm}$ ）的径级与高度级分布均呈偏正态分布，大径级（ $DBH \geq 28\text{ cm}$ ）与小径级（ $DBH < 8\text{ cm}$ ）的个体占11.18%，树高（ TH ） $> 10\text{ m}$ 与 $TH < 4\text{ m}$ 的个体占1.52%； $DBH < 4\text{ cm}$ 的个体仅占0.72%且 $TH < 2\text{ m}$ 的个体出现断层，表明塔河源群落更新不良。从优势树种径级结构来看，灰胡杨、胡杨径级结构均呈单峰型（中径级个体储备型），小径级（ $DBH < 4\text{ cm}$ ）个体占比极低（0.78%），尤其是胡杨 $DBH < 8\text{ cm}$ 的个体出现断层，暗示着生境筛选在荒漠河岸林群落形成中起着重要作用。优势物种径级结构出现衰退和断层现象，表明荒漠河岸林群落尚未达到稳定状态，群落结构组成正在发生变化，洪水漫溢干扰、生境过滤

(土壤盐碱化)和种间竞争可能是驱动群落演替的动力。尽管样地调查发现有242株幼苗,但幼苗在向幼树发育过程中死亡率极高(92.56%),这可能是每年7—9月洪水漫溢(水深0.6 m左右,洼地可达1.2 m)且持续时间长,致使幼苗长期洪水浸泡而大量死亡;同时洪水退去后地面强烈蒸发而积盐,抑制幼苗成活和生长,致使小径级个体少并出现断层。赵振勇等^[12]报道洪水漫溢有效地满足了胡杨等植物种子萌发,降低了漫溢区土壤盐度、促进了实生苗更新和幼株生长。我们的研究结果与之不太一致,因为塔里木河中游河漫滩地势较高,洪水漫溢后滞留时间短,退去后带走了大量土壤盐分,形成高水低盐的生境有利于种子萌发和幼苗生长。有关洪水漫溢强度与持续时间对塔河源荒漠河岸林群落结构和生物多样性的影响机制还有待于更深入的研究并进行长期监测。

塔河源样地两个优势种的空间格局总体呈聚集分布,灰胡杨(纯林)生长发育过程中随树木个体长大其聚集程度逐渐降低,趋向随机分布,这是因为随个体长大其对空间资源竞争增强,自疏效应使种群聚集强度减弱,逐渐趋于随机分布。胡杨与灰胡杨(混交林)空间格局均呈聚集分布,随着个体长大两个树种聚集强度逐渐增大;同时两个树种空间上相互排斥,导致生态位分离而占据不同的生境(图5、图6),表明种间竞争和生境异质性是影响荒漠河岸林物种空间分布和物种共存的重要因素。于军等^[11]报道胡杨与灰胡杨种群随生长发育进程其聚集尺度范围及聚集规模逐渐减弱,大树趋于随机分布。此结果与本研究产生差异的原因在于:两个研究样区植被生长环境不同,阿瓦提样区两个树种的分布主要受地下水位下降与种间资源激烈竞争的作用而淘汰弱势个体,导致聚集强度降低、大树趋于随机分布^[11];而本研究塔河源两个树种分布主要受样区洪水漫溢干扰、地势高低及种间竞争的影响,洪水漫溢与低凹积水区均有利于有性繁殖成功而形成聚集分布,且成群分布有利于减少土壤水分蒸发和盐分表聚而维持良好的生长环境、长成大树,相反凸地盐分表聚抑制个体长大,异质性斑块生境使成树聚集强度增大。此外,同属、生态习性相近的这两个物种共存必然会发生种间激烈竞争,

致使资源竞争能力弱的物种被驱逐而向外扩散,占据不同的生境、发生空间上的分离。这与塔里木河流域胡杨、灰胡杨种群分布区不同及很少混交成林的实际情况相一致。因此,群落结构组成与空间格局研究可为解释物种共存、生物多样性维持与群落演替机理等方面提供理论基础,进而帮助我们制定有效的生物多样性经营、管理与保护策略。

植物群落是特定生境条件下生物种与环境长期相互作用演化而形成的一个自然系统,对群落中科、属、种组成及地理成分分析可为探讨群落区系性质及起源提供科学依据^[21]。塔河源样地植物区系贫乏,单种科、属多,这主要是极端荒漠干旱气候、严酷生境限制了物种的多样化(物种迁入与形成)和生长、分布所致。本植物区系中,温带成分的科、属分别占非世界广布科、属数的75.0%、63.64%,在本区系中占绝对优势,表明科属级水平上该群落种子植物具有典型温带区系的性质。在科、属、种水平上,热带成分与温带成分之比分别为1:3、1:4.5、0:13,说明热带成分逐渐退去,而温带成分则发育并成为植物区系的主体。因为塔里木盆地在二叠纪时期处于亚热带-暖温带半干旱或偏干旱的气候环境,随气候旱化加剧,热带成分在这里找不到生息地而逐渐消亡,显示出该区与热带区系的联系十分微弱。同时,科属种的世界分布型比例迅速降低,表明该植物区系具有强烈的过渡性。种作为植物最基本的分类单位,最能精确反映物种所处的历史气候与地质变化及区系性质、特点。塔河源样地温带成分占比最高(60.0%,除世界广布种),其次为古地中海成分(20.0%),中国特有种占13.33%,中亚成分仅占6.67%,说明该群落是本区所处的气候带、地理位置与地史变迁共同作用的结果,植物区系与温带气候及古地中海地理联系极为紧密,因为新疆属于温带大陆性干旱气候且大部分地区曾是古地中海的一部分^[19]。从物种重要值来看,古地中海成分最高(35.25%),表明研究区域为古地中海区形成的荒漠旱生植物区系的重要地带,由于中生代时特提斯海在中国西北部各地陆续退却,这些成分(如胡杨、灰胡杨)便在转为干旱的古海沿岸或遗迹上发生。其次为温带成分(27.51%),他们主要存在于林下,由于干旱

荒漠气候使温带一些成分虽在本区多有分布但却难以形成优势，在群落中处于从属地位。中国特有成分仅两种，这可能是因为较古老的中国特有属均没有延伸至西北干旱荒漠区，且所处的自然地理位置远离中国特有属的分布中心所致。植物分布是对自然生境长期适应和演化的过程，区系地理反映了物种所处的历史气候、地质变化动态。

综上可见，荒漠河岸林是新疆特殊历史气候、地质变化过程中那些幸存下来、经长期适应温带荒漠干旱气候且具有较强抗逆能力的物种相互作用的结果。严酷的生境限制了荒漠物种的生长、分布和群落结构组成并致使种间发生激烈的资源竞争，推动群落动态演化。环境筛选和生物间相互作用对荒漠河岸林群落结构动态和多样性发挥着主导作用。

参考文献：

- [1] Tilman D, Reich PB, Knops JMH. Biodiversity and ecosystem stability in a decade long grassland experiment [J]. *Nature*, 2006, 441(7093) : 629–632.
- [2] 刘海丰, 李亮, 桑卫国. 东灵山暖温带落叶阔叶次生林动态监测样地: 物种组成与群落结构 [J]. 生物多样性, 2011, 19(2) : 232–242.
- Liu HF, Li L, Sang WG. Species composition and community structure of the Donglingshan forest dynamic plot in a warm temperate deciduous broad-leaved secondary forest, China [J]. *Biodiversity Science*, 2011, 19 (2) : 232–242.
- [3] 王家鸣, 许涵, 李意德, 林明献, 周璋, 骆土寿, 陈德祥. 地形异质性对尖峰岭热带山地雨林木本植物群落结构及多样性的影响 [J]. 林业科学, 2018, 54(1) : 1–11.
- Wang JM, Xu H, Li YD, Lin MX, Zhou Z, Luo TS, Chen DX. Effects of topographic heterogeneity on community structure and diversity of woody plants in Jianfengling tropical montane rainforest [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(1) : 1–11.
- [4] 郝占庆, 张健, 李步杭, 叶吉, 王绪高, 姚晓琳. 长白山次生杨桦林样地: 物种组成与群落结构 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(2) : 251–261.
- Hao ZQ, Zhang J, Li BH, Ye J, Wang XG, Yao XL. Natural secondary poplar-birch forest in Changbai Mountain: species composition and community structure [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(2) : 251–261.
- [5] 赵丽娟, 项文化, 李家湘, 邓湘雯, 刘聰. 中亚热带石栎-青冈群落物种组成、结构及区系特征 [J]. 林业科学, 2013, 49(12) : 11–17.
- Zhao LJ, Xiang WH, Li JX, Deny XW, Liu C. Floristic composition, structure and phytogeographic characteristics in a *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* forest community in the subtropical region [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(2) : 11–17.
- [6] 温韩东, 林露湘, 杨洁, 胡跃华, 曹敏, 刘玉洪, 鲁志云, 谢有能. 云南哀牢山中山湿性常绿阔叶林 20 hm² 动态样地的物种组成与群落结构 [J]. 植物生态学报, 2018, 42(4) : 419–429.
- Wen HD, Lin LX, Yang J, Hu YH, Cao M, Liu YH, Lu ZY, Xie YN. Species composition and community structure of a 20 hm² plot of mid-mountain moist evergreen broadleaved forest on the Mts. Ailaoshan, Yunnan Province, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(4) : 419–429.
- [7] 吴征镒. 中国种子植物属的分布区类型 [J]. 云南植物研究, 1991, 13(增刊IV) : 1–139.
- Wu ZY. The areal-types of Chinese genera of seed plants [J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1991, 13(Suppl. IV) : 1–139.
- [8] 吴征镒, 周浙昆, 李德铢, 彭华, 孙航. 世界种子植物科的分布区类型系统 [J]. 云南植物研究, 2003, 25(3) : 245–257.
- Wu ZY, Zhou ZK, Li DZ, Peng H, Sun H. The areal-types of the world families of seed plants [J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 2003, 25(3) : 245–257.
- [9] 韩路, 王海珍, 牛建龙, 王家强, 柳维扬. 荒漠河岸林胡杨群落特征对地下水位梯度的响应 [J]. 生态学报, 2017, 37(20) : 6836–6846.
- Han L, Wang HZ, Niu JL, Wang JQ, Liu WY. Response of *Populus euphratica* communities in a desert riparian forest to the groundwater level gradient in the Tarim Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(20) : 6836–6846.
- [10] 白玉锋, 徐海量, 张沛, 张广朋, 凌红波. 塔里木河下游荒漠植物多样性、地上生物量与地下水埋深的关系 [J]. 中国沙漠, 2017, 37(4) : 724–732.
- Bai YF, Xu HL, Zhang P, Zhang GP, Ling HB. Relation of desert vegetation species diversity and aboveground biomass to groundwater depth in the lower reaches of Tarim River [J]. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(4) : 724–732.
- [11] 于军, 王海珍, 陈加利, 韩路. 塔里木河流域荒漠河岸林胡杨群落的空间格局研究 [J]. 中国沙漠, 2011, 31(4) : 913–918.
- Yu J, Wang HZ, Chen JL, Han L. Spatial pattern of *Populus euphratica* community of desert riparian forest in Tarim River basin [J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(4) : 913–918.
- [12] 赵振勇, 张科, 卢磊, 周生斌, 张慧. 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(2) :

- 3322–3329.
- Zhao ZY, Zhang K, Lu L, Zhou SB, Zhang H. Seedling recruitment in desert riparian forest following river flooding in the middle reaches of the Tarim River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 3322–3329.
- [13] 胡理乐, 闫伯前, 江明喜, 朱教君. 毛柄小勾儿茶伴生群落种类组成及多样性研究[J]. 西北植物学报, 2007, 27(3): 594–600.
Hu LL, Yan BQ, Jiang MX, Zhu JJ. The diversity of plant communities with endangered plant, *Berchemiella wilsonii* var. *pubipetiolata* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2007, 27(3): 594–600.
- [14] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究: II. 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报, 1995, 15(3): 268–277.
Ma KP, Huang JH, Yu SL, Chen LZ. Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China: II. species richness, evenness and species diversities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3): 268–277.
- [15] 张金屯. 植被数量生态学方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [16] 韩路, 王家强, 王海珍, 牛建龙, 于军. 塔里木荒漠绿洲过渡带主要种群生态位与空间格局分析[J]. 植物科学学报, 2016, 34(3): 325–333.
- Han L, Wang JQ, Wang HZ, Niu JL, Yu J. Niche and spatial distribution pattern analysis of main populations at the ecotone of Tarim Desert-Oasis [J]. *Plant Science Journal*, 2016, 34(3): 325–333.
- [17] He FL, Legendre P, LaFrankie JV. Distribution patterns of tree species in a Malaysian tropical rain forest [J]. *J Veg Sci*, 1997, 8(1): 105–114.
- [18] 潘晓玲. 新疆种子植物科的区系地理成分分析[J]. 植物研究, 1997, 17(4): 397–402.
Pan XL. Floristic analysis of seed plant families in Xinjinag [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 1997, 17(4): 397–402.
- [19] 潘晓玲. 新疆种子植物属的区系地理成分分析[J]. 植物研究, 1999, 19(3): 249–259.
Pan XL. Floristic analysis of seed plant genera in Xinjinag [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 1999, 19(3): 249–259.
- [20] Wang DP, Ji SY, Chen FP, Xing FW, Peng SL. Diversity and relationship with succession of naturally regenerated southern subtropical forests in Shenzhen, China and its comparison with the zonal climax of Hong Kong [J]. *Forest Ecol Manag*, 2006, 222(1–3): 384–390.
- [21] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001: 59.

(责任编辑: 张平)