DOI: 10.20103/j.stxb.202204281181

韩路,王海珍.塔里木荒漠河岸林物种多样性沿地下水埋深梯度的分布格局.生态学报,2024,44(2):832-843. Han L, Wang H Z.Species diversity distribution pattern of desert riparian forest along a groundwater depth gradient in the Tarim Basin. Acta Ecologica Sinica,2024,44(2):832-843.

塔里木荒漠河岸林物种多样性沿地下水埋深梯度的分 布格局

韩 路1,王海珍2,*

1 塔里木大学农学院,阿拉尔 843300
2 塔里木大学园艺与林学学院,阿拉尔 843300

摘要:探讨荒漠河岸林土壤水分、物种多样性的空间变异性及其相互关系,可为干旱区天然林保护、可持续经营和生态恢复提供 科学依据。以塔里木荒漠河岸林为研究对象,基于野外样带调查和采样测定,系统分析了地下水埋深(GWD)梯度下林地土壤 水分与物种多样性的空间变异及其权衡关系。结果表明:随 GWD 增加和土壤水分减少,荒漠河岸林群落物种数减少、结构简 化、群落发生退化,退化顺序为浅根系的中生草本植物和灌木,最后留存的是抗旱性较强的乔灌木或灌木;同时土壤水分和物种 丰富度、物种多样性指数均呈显著的线性递减趋势,而物种均匀度指数降幅较小。GWD 与土壤水分、物种多样性之间均呈极显 著的相关(P<0.01),土壤水分与物种多样性的相对收益随 GWD 增加而逐渐降低,表明 GWD 是控制荒漠河岸林土壤水分和物 种多样性空间变异的关键因素。荒漠河岸林土壤水分与物种多样性权衡关系的转折点为 GWD 4.5m 左右,转折点以下(GWD< 4.5m)二者沿 GWD 以相同速率变化,呈协同关系;转折点以上(GWD>4.5m)土壤水分与物种多样性的权衡明显增大,土壤水分 相对收益剧降,即维持当前相应的物种多样性以消耗土壤水分为代价,系统通过反馈调节使物种多样性降低。综上表明,维持 塔里木荒漠河岸林物种多样性和生态系统功能的合理 GWD 在 4.5m 左右,这为塔里木河流域荒漠河岸林保育与生态输水工程 实施提供科学依据。

关键词:荒漠河岸林;土壤水分;物种多样性;相对收益;地下水埋深;权衡

Species diversity distribution pattern of desert riparian forest along a groundwater depth gradient in the Tarim Basin

HAN Lu¹, WANG Haizhen^{2,*}

1 College of Agronomy, Tarim University, Alar 843300, China

2 College of Horticulture and Forestry, Tarim University, Alar 843300, China

Abstract: Groundwater is the most important water source for plant growth and vegetation survival in arid desert area, which directly affects the composition, distribution and development of desert vegetation. Desert riparian forest is a valuable natural forest resource in extreme arid region, and also a distinctive ecosystem with the most active life phenomena, high biodiversity and primary productivity. The largest area of desert riparian forest is distributed in the Tarim Basin, northwest China. It protects biodiversity and desert ecosystem stability, and serves as a natural barrier to safeguard the ecological security of oasis. Since the 1950s, a large deal of land has been reclaimed and the water resources have been excessively utilized in the area. It has resulted in a reduction in the groundwater level, weak vegetation growth, and high desert plant mortality, which has affected the sustainable development of agriculture and the economy of oasis. So, it is urgent to restore

收稿日期:2022-04-28; 网络出版日期:2023-10-18

基金项目:兵团财政科技计划项目(2023CB006);国家自然科学基金项目(31860165,31560182)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: whzzky@163.com

the degraded desert riparian forest ecosystem. To establish a scientific basis for protection, sustainable management and ecological restoration of natural forest in arid areas, understanding the spatial variations of soil water availability and biodiversity in desert riparian forests, as well as their interrelationships, is critical for protecting, managing and/or restoring the natural forests on drylands. We surveyed 22 riparian forest sites in the Tarim Basin to examine how soil moisture and species diversity covary along a groundwater depth gradient (GWD) from 1.2m to 5.6m. Results showed that the number of species significantly decreased, community structure became simplified and vegetation degraded as soil moisture reduced and GWD increased. The vegetation degraded in the following sequence; herb and shrub species with shallow roots were early losers in face of water shortage at greater GWD sites, and only tree and shrub species with high drought-tolerance persisted at the extreme of the GWD gradient. There was a significant linear correlation between soil moisture and GWD, and the strength of correlation between GWD and soil moisture was significantly higher than that between GWD and species diversity. Soil moisture and species richness, species diversity index showed a significant linear declining tendency with increasing GWD, while species evenness index decreased at a relatively low rate (i.e., gentle slope). In the meantime, the net negative effect of GWD increases on soil moisture was higher than on species diversity, suggesting a key of GWD in determining the spatial variability of species diversity and soil moisture. Linear piece-wise quantile regression was employed to determine the inflection points of trade-off between species diversity and soil moisture along the GWD gradient. It revealed an obvious trend of trade-off along the GWD gradient. The inflection point of trade-off was detected at a GWD of about 4.5m. Where GWD was less than 4.5m, the soil moisture and species diversity changed at the same rate and exhibited a synergistic relationship. Alternatively, with GWD>4.5m, the trade-off was strengthened obviously and the relative returns of soil moisture decreased sharply. So, species diversity was maintained at the cost of soil water consumption, and the species diversity reduced through a feedback regulation. To sum up, the critical GWD for maintaining species diversity and ecosystem functions of desert riparian forests is about 4.5m, which provides a scientific guideline for the conservation of desert riparian forests and the implementation of ecological water conveyance project in the Tarim Basin.

Key Words: desert riparian forest; soil moisture; species diversity; relative return; groundwater depth; trade-off analysis

植物群落是植物在长期环境变化中自我调节和适应而形成的集合体,作为生态系统物质和能量的主要提供者,是维持生态系统稳定和持续生产的物质基础^[1]。在植物群落多样性研究中,物种多样性分布格局及其成因是群落生态学研究的中心议题之一^[2-3]。作为生物多样性的重要组成部分,物种多样性是物种演化的空间范围和对特定环境的生态适应,其是决定植物群落主要生态功能和过程的关键因素^[4]。植物多样性格局和过程受诸多环境因子的影响,其中土壤环境是最重要、直接的因素之一,尤其在极端干旱生态脆弱区,年降水量少、蒸发强烈且地表水日益减少,地下水成为维系荒漠植被生长发育、分布与生存唯一的水分来源^[5-6]。地下水埋深的时空分布直接影响荒漠植被发生、生物多样性维持、群落演替与生态系统功能^[2-3,5-9],决定了该区域植物多样性格局及其土壤环境影响的复杂性和特殊性^[3]。目前,关于生物多样性格局及其影响机制亦积累了丰富成果,但是关于特定生态系统中影响物种多样性分布格局的因素存在较多争议。对不同区域的研究表明,二者关系存在正相关、不相关和单峰曲线等类型^[3,7-13],植被短期或长期对地下水埋深变化的响应仍然存在不确定性^[14]。由于研究区域、研究尺度等因素的不同,植物群落物种多样性与水分梯度间的关系较为复杂,通常尺度越大,越减弱而不是增强在特定地区物种多样性和水分存在的关系^[8,15]。因此,剖析极端干旱区荒漠植物多样性格局及其与水分相互作用关系,有助于阐明荒漠植物群落多样性格局形成机制及相互作用过程,对促进荒漠植被恢复、生物多样性保护和发挥其生态功能具有重要意义。

塔里木河流域作为我国西北干旱区第一大内陆河流域,横跨山地、绿洲和荒漠,形成独特生态-水文过程。 沿塔里木河两岸分布着经长期自然演替形成的荒漠河岸林,是荒漠区宝贵的天然林资源,也是生命现象最活 跃、生物多样性和初级生产力高的独特生态系统。多年来,随流域水土资源开发利用,河流径流量日益减少, 沿河道远近(地下水位变化)形成明显的水分梯度,使其成为研究水分梯度下植物群落结构、功能和多样性格局的理想场所。众多研究针对森林、草原等植被类型,从海拔高度、纬度以及尺度等视角对不同植被类型的多样性格局响应机制展开了广泛分析,不同植被类型的多样性格局对各种环境梯度的响应不尽相同^[3]。现有研究发现不同荒漠生态系统植物组成、分布格局、丰富度和多样性特征均会随水分梯度的变化而变化^[2-3,5-8,10,16-17]。目前在干旱区,荒漠植物群落的研究主要集中在降水梯度/生态输水前后植物群落结构组成与物种多样性变化、植被生理响应与适应机理、植被合理生态水位等方面^[5-8,16-20],而植被和土壤要素相互作用关系往往在环境梯度上具有时空分异规律,且各要素间互动过程存在非线性、反馈调节、滞后效应等诸多关系^[21],使得该系统异常复杂,二者之间究竟如何相互影响与权衡,使生态系统保持稳定或退化,尚不明确。同时,大多研究在区域或全球尺度上探讨气候变化对物种分布的影响,在生态脆弱区从局域尺度探讨物种多样性与土壤因子的相互作用及权衡关系报道不多。因此,本文以塔里木河干流上游荒漠河岸林为研究对象,以野外群落调查与采样测定为研究手段,结合经典统计和生态系统权衡分析方法,研究群落物种多样性和土壤水分沿地下水埋深梯度上的变异格局,探索二者在局域尺度上的相互影响与权衡关系,以期为极端干旱区荒漠植被变化预测、植被合理布局、生物多样性保护及植被恢复、生态管理等提供理论依据。

1 研究区自然概况

塔里木河干流上游指从阿克苏河、叶尔羌河、和田河三河交汇的肖夹克至轮台县的英巴扎,全长 495km (图1)。该区(40°28'N,80°56'E 至 41°10'N,84°36'E)属典型暖温带大陆性干旱气候,区内光热资源丰富,年 均日照时数 2729.0h,太阳总辐射能 5796MJ m⁻² a⁻¹;年均气温 10.4℃,平均气温≥10℃的持续日数为 201d, ≥10℃年积温 4340℃;极端最高温度 39.4℃,极端最低温度-25.0℃。年均降水量 50.4mm,年均蒸发量> 2500mm,干燥度 12—19。经实地考察,该区植物群落结构简单、乔灌草三层结构明显,物种多样性低,植被稀 疏。优势种为胡杨(Populus euphratica)、灰胡杨(Populus pruinosa),林下主要分布多枝柽柳(Tamarix ramosissima)、铃铛刺(Halimodendron halodendron)、黑果枸杞(Lycium ruthenicum)、骆驼刺(Alhagi sparsifolia)、 芦苇(Phragmites australis)、甘草(Glycyrrhiza uralensis)等植物。土壤类型为胡杨林土(吐喀依土)。





2 研究方法

2.1 植物群落调查

经野外实地踏查于叶尔羌河下游、塔里木河干流上游(肖夹克—英巴扎)荒漠河岸林内选择林分具有代 表性、人为干扰较小的阿瓦提县丰收三场,干流源头肖夹克,上段南口镇、中段沙雅县与下段轮南镇设置研究 断面(图1),分别垂直河岸设置3条样带(50m宽),样带间隔100m,依据植被长势与地下水位在每条样带上 每隔100—500m设置50m×50m样地1块(表1),每块样地以25m为间隔分成4个25m×25m的小样方,采用 相邻格子法以5m×5m为基本单元进行每木检尺,记录胸径(DBH)≥1.0cm的全部乔木胸径、树高、冠幅、树冠 疏失度、活立木和枯立木等指标;乔木幼苗测量其高度、地径、冠幅。灌木与草本层采用"米"字型分别以4m× 4m、1m×1m小样方对植物种类、高度、盖度、多度等进行详细调查。同时,各样方采用全球定位系统(GPS)定 位,记录其经度、纬度、海拔高度、林分郁闭度等生态因子。

2.2 地下水埋深与土壤质量含水量测定

在5个调查断面一条样带上每块样地附近打一口地下水位观测井(聚氯乙烯(PVC)管,10m),用于长期 监测样地地下水埋深变化。地下水埋深(GWD)采用电导法测定^[22]。同时,每块样地采用对角线法(5点)采 集土样,深度为1.0m,分5层用土钻每隔20cm取土样,用铝盒封装带回实验室,采用烘干法(80℃)测定土壤 质量含水量(SWC)。

2.3 数据处理与分析

2.3.1 物种多样性计算

在统计各个样方每种植物多度、高度、盖度和频度等基础上,分别计算样方内各物种的重要值,公式为:重要值(*IV*)=(相对频度+相对高度+相对盖度)/3^[8]

采用物种丰富度指数(SP)、物种多样性指数(H、D)和物种均匀度指数(J)来表征荒漠河岸林群落的物种 多样性^[2-3,7-8]。

Margalef 丰富度指数(SP) $SP=(S-1)/\ln N$

Shannon-Wiener 多样性指数(H)

Simpson 多样性指数(D)

Pielou 均匀度指数(J)

 $H = -\sum_{i=1}^{n} P_i \ln P_i$ $D = 1 - \sum_{i=1}^{n} P_i^2$

式中,N为调查样方群落物种总个体数;S为样方中的物种数;P_i为第*i*个种的重要值。

权衡分析方法采用均方根偏差法(RMSD)量化物种多样性与土壤水分的权衡关系,具体分析方法见参考 文献^[13,23-24]。

2.3.2 回归分析

利用线性回归拟合 0—1m 土壤水分和物种多样性沿地下水埋深梯度的变化规律。采用分位数回归定量 判别物种多样性和土壤水分权衡关系(均方根偏差)在地下水埋深梯度的转折点,具体原理和计算方法见参 考文献^[25],分位数设置为 90%(高分位水平>60%下,分位数回归分析的模拟效果较好^[25]),采用 R 语言 quantreg 软件包进行分析^[26]。

3 结果与分析

3.1 荒漠河岸林物种组成与分布

塔里木河干流上游荒漠河岸林共调查植物 14 科 32 属 34 种,其中藜科(Chenopodiaceae)7 属 7 种、菊科(Compositae)6 属 7 种、豆科(Leguminosae)6 属 6 种、禾本科(Poaceae)3 属 3 种,杨柳科(Salicaceae)1 属 2 种, 其余均为单科单属单种(表 1)。藜科、菊科、豆科、禾本科、杨柳科种数分别占总种数的 20.59%、20.59%、 17.65%、8.82%、5.88%,前 4 科物种绝大多数均为草本植物,主要生长在近河岸带洪水漫溢区。杨柳科 (5.88%)、柽柳科(2.94%)占比较低,但在荒漠河岸林群落中具有重要的地位。按照 Whittaker 生长型系统标 准划分,乔木仅有 3 种,占群落物种数的 8.82%,其中胡杨(Populus euphratica)、灰胡杨(Populus pruinosa)在群 落中占绝对优势(表 1)。灌木有 4 种,占群落物种数的 11.76%,其中柽柳(Tamarix ramosissima)在灌木层中 占绝对优势,黑果枸杞(Lycium ruthenicum)和铃铛刺(Halimodendron halodendron)在群落中也占一定地位。草 本有 27 种,占群落物种数的 79.41%,其中以甘草(Glycyrrhiza uralensis)、骆驼刺(Alhagi sparsifolia)、芦苇(Phragmites australis)和花花柴(Karelinia caspia)为主,分布较广,其他草本植物均是区域常见种。从物种组成来看,荒漠河岸林呈现乔木稀少与单一,群落结构简单、物种多样性低的荒漠植被特点,这是植物长期适应 干旱气候的结果。从水分生态型来看,仅骆驼刺为旱生植物,其余物种均为中生植物,具有依水而生,无水而 亡的明显特征。

生长型 Growth types	物种 Species	科 Family	属 Genus	重要值 Important value	
	胡杨 Populus euphratica	杨柳科 Salicaceae	杨属 Populus	30.45	
Tree	灰胡杨 Populus pruinosa	杨柳科 Salicaceae	杨属 Populus	23.07	
	沙枣 Elaeagnus angustifolia	胡颓子科 Elaeagnaceae	胡颓子属 Elaeagnus	0.65	
灌木	多枝柽柳 Tamarix ramosissima	柽柳科 Tamaricaceae	柽柳属 Tamarix	10.49	
Shrub	铃铛刺 Halimodendron halodendron	豆科 Leguminosae	铃铛刺属 Halimodendron	3.36	
	黑果枸杞 Lycium ruthenicum	茄科 Solanaceae	枸杞属 Lycium	4.43	
	盐穗木 Halostachys caspica	藜科 Chenopodiaceae	盐穗木属 Halostachys	1.16	
	盐节木 Halocnemum strobilaceum	藜科 Chenopodiaceae	盐节木属 Halocnemum	0.14	
	盐爪爪 Kalidium foliatum	藜科 Chenopodiaceae	盐爪爪属 Kalidium	0.36	
	大叶白麻 Poacynum hendersonii	夹竹桃科 Apocynaceae	白麻属 Poacynum	0.31	
	骆驼刺 Alhagi sparsifolia	豆科 Leguminosae	骆驼刺属 Alhagi	6.63	
草本	花花柴 Karelinia caspia	菊科 Compositae	花花柴属 Karelinia	2.55	
Herb	叉枝雅葱 Scorzonera divaricata	菊科 Compositae	鸦葱属 Scorzonera	0.21	
	千里光 Senecio scandens	菊科 Compositae	千里光属 Senecio	0.24	
	刺儿菜 Cirsium setosum	菊科 Compositae	蓟属 Cirsium	0.28	
	蓼子朴 Inula salsoloides	菊科 Compositae	旋覆花属 Inula	0.15	
	苦苣菜 Sonchus oleraceus	菊科 Compositae	苦苣菜属 Sonchus	0.31	
	苣荬菜 Sonchus arvensis	菊科 Compositae	苦苣菜属 Sonchus	0.26	
	芦苇 Phragmites australis	禾本科 Poaceae	芦苇属 Phragmites	4.14	
	假苇拂子茅 Calamagrostis pseudophragmites	禾本科 Poaceae	拂子茅属 Calamagrostis	0.92	
	小獐毛 Aeluropus pungens	禾本科 Poaceae	獐毛属 Aeluropus	0.16	
	碱蓬 Suaeda glauca	藜科 Chenopodiaceae	碱蓬属 Suaeda	1.11	
	灰绿藜 Chenopodium glaucum	藜科 Chenopodiaceae	藜属 Chenopodium	0.32	
	地肤 Kochia scoparia	藜科 Chenopodiaceae	地肤属 Kochia	0.29	
	盐生草 Halogeton glomeratus	藜科 Chenopodiaceae	盐生草属 Halogeton	0.14	
	胀果甘草 Glycyrrhiza inflata	豆科 Leguminosae	甘草属 Glycyrrhiza	5.81	
	小花棘豆 Oxytropis glabra	豆科 Leguminosae	棘豆属 Oxytropis	0.41	
	苦豆子 Sophora alopecuroides	豆科 Leguminosae	槐属 Sophora	0.32	
	苦马豆 Sphaerophysa salsula	豆科 Leguminosae	苦马豆属 Sphaerophysa	0.28	
	车前 Plantago asiatica	车前科 Plantaginaceae	车前属 Plantago	0.2	
	刺山柑 Capparis spinosa	山柑科 Capparaceae	山柑属 Capparis	0.17	
藤本	东方铁线莲 Clematis orientalis	毛茛科 Ranunculaceae	铁线莲属 Clematis	0.33	
Liana	西北天门冬 Asparagus persicus	百合科 Liliaceae	天门冬属 Asparagus	0.23	
	牛皮消 Cynanchum auriculatum	萝藦科 Asclepiadaceae	鹅绒藤属 Cynanchum	0.12	

表 1 荒漠河岸林物种组成与重要值 Table 1 The composition and important value of species in desert riparian forest

在塔里木河干流上游沿河道距离梯度上,植物群落呈阶梯式分布(表2)。在近河道洪水漫溢区域 (<200m),群落物种组成相对丰富,以浅根系中生、一年生草本植物为主,种类多、个体小;充足土壤水分下种 子萌发、生长形成物种多样性高的幼龄林。随远离河道和GWD 增加(土壤水分降低),一些浅根系中生草本

837

植物逐渐消失,群落主要以深根性多年生草本与乔灌木为主,群落垂直结构分层明显,植物主要依靠浅层地下 水维系生存,形成中龄林与成熟林。远离河道,耐旱性差的灌草植物逐渐退出旱化生境及小径级优势种死亡, 留存深根耐旱的胡杨、柽柳,形成群落结构简单、分布稀疏、物种丰富度低的过熟林。可见,荒漠河岸林沿河道 距离梯度上分布着幼龄林、中龄林、成熟林和成过熟林,物种丰富度随之降低,表明 GWD(土壤水分)直接参 与调整植物群落物种组成与分布。

物种 Species	0—2m	2—4m	4—6m	物种 Species	0—2m	2—4m	4—6m
胡杨 Populus euphratica	+	+	+	盐节木 Halocnemum strobilaceum	+		
灰胡杨 Populus pruinosa	+	+	+	碱蓬 Suaeda glauca	+		
沙枣 Elaeagnus angustifolia	+			灰绿藜 Chenopodium glaucum	+		
多枝柽柳 Tamarix ramosissima	+	+	+	盐爪爪 Kalidium foliatum	+		
铃铛刺 Halimodendron halodendron	+	+		盐生草 Halogeton glomeratus	+		
黑果枸杞 Lycium ruthenicum	+	+	+	地肤 Kochia scoparia	+		
盐穗木 Halostachys caspica	+	+		骆驼刺 Alhagi sparsifolia	+	+	+
花花柴 Karelinia caspia	+	+		胀果甘草 Glycyrrhiza inflata	+	+	+
叉枝雅葱 Scorzonera divaricata	+			小花棘豆 Oxytropis glabra	+		
千里光 Senecio scandens	+			苦豆子 Sophora alopecuroides	+		
刺儿菜 Cirsium setosum	+			苦马豆 Sphaerophysa salsula	+		
蓼子朴 Inula salsoloides	+			西北天门冬 Asparagus persicus	+	+	
苦苣菜 Sonchus oleraceus	+			东方铁线莲 Clematis orientalis	+		
苣荬菜 Sonchus arvensis	+			车前 Plantago asiatica	+		
芦苇 Phragmites australis	+	+		牛皮消 Cynanchum auriculatum	+		
假苇拂子茅 Calamagrostis pseudophragmites	+			大叶白麻 Poacynum hendersonii	+	+	
小獐毛 Aeluropus pungens	+			刺山柑 Capparis spinosa	+		

表 2 荒漠河岸林群落物种组成沿地下水埋深梯度的分布

cies composition of desert ringrian forest along the groundy

+表示物种存在,空格表示物种消失

Table 2

The distributio

3.2 荒漠河岸林土壤水分沿地下水埋深梯度的变化

图 2 可见,荒漠河岸林土壤质量含水量随 GWD 增加呈线性递减趋势,浅 GWD 生境土壤含水量高,深 GWD 生境则相反;单位 GWD 变化直接引起土壤含水量降低 5.526%。浅层(0—40m)、深层(60—100cm)土壤含水量均与 GWD 呈极显著负相关(r=-0.8519、-0.9127, P<0.01);随 GWD 增加,二者相关系数逐渐增大。 其中浅层与深层土壤含水量随 GWD 变化的速率不同,单位 GWD 变化造成深层土壤含水量下降速率 (6.007%)高于浅层(4.803%),这是由于浅层土壤含水量主要受干旱气候与强烈蒸发的影响较大及地下水埋 深沿土壤毛管孔隙上升的距离影响^[27]。综合来看,浅层、深层土壤含水量对 GWD 梯度的响应规律基本一致, 0—100cm 土层涵盖的水分特征更全面,因此,选择 0—100cm 土壤水分用于后续权衡分析。

3.3 荒漠河岸林植物多样性沿地下水埋深梯度的变化

Margalef 物种丰富度指数、Shannon-Wiener、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数沿 GWD 梯度的变化 格局一致(图 3),均随 GWD 增加呈现逐渐降低趋势。物种多样性指数与 GWD 均呈显著的负相关关系(r= -0.5166、-0.7270、-0.7662、-0.4502, P<0.05),物种丰富度指数和物种多样性指数均明显降低,其中单位 GWD 变化下 Shannon-Wiener 多样性指数降幅最大(斜率),其次是物种丰富度指数。物种丰富度指数、 Shannon-Wiener 和 Simpson 多样性指数的最大值依次为 2.496、2.176 和 0.830,均位于 GWD 1.5m 附近;最小值 均位于 GWD 5.5m 附近,分别为 0.217、0.236、0.119,降低速率分别为 0.570/m、0.485/m、0.178/m。Pielou 均匀 度指数随 GWD 的降幅相对最小(斜率),其最大值为 0.994,最小值为 0.340,分别位于 GWD 3.0m、5.5m。这表 明,浅 GWD 生境物种分布均匀,随 GWD 增加,物种趋向聚集分布。

3.4 荒漠河岸林土壤水分与物种多样性的相对收益随地下水埋深梯度的变化

荒漠河岸林土壤水分随 GWD 增加而降低(图 2),土壤水分的相对收益也随之逐渐降低(图 4);物种丰富









Fig.3 The relationship between species diversity and groundwater depth

度与 Shannon-Wiener 多样性的相对收益随 GWD 增加均呈逐渐降低趋势,它们相对收益均在浅 GWD 处最大 (1-2m, SWC 21.89%), 于深 GWD 处(5-6m, SWC 1.33%)降至最低(图 5、6), 三者相对收益分别比 1-2m

839

GWD 降低 97.53%、68.76%、71.17%。物种多样性与土壤水分的权衡(RMSD)随 GWD 增加呈逐渐降低的变化 趋势,至 4—5m 处其 RMSD 值在零附近,此处二者权衡最小且土壤水分尚可基本维持相应的物种多样性;随 GWD 继续加深,在 GWD 5—6m 处 RMSD 明显增大(图 7),但 2 个物种多样性指数的平均相对收益处于最小 值,表明此处土壤水分难以维持相应的物种多样性,即维持当前物种多样性是以消耗土壤水分为代价。



图 4 土壤水分的相对收益随地下水埋深的变化

Fig.4 The relative returns of soil moisture along groundwater depth



Fig.6 The relative returns of species diversity along groundwater depth



图 5 物种丰富度的相对收益随地下水埋深的变化

Fig.5 The relative returns of species richness along groundwater depth





3.5 荒漠河岸林物种多样性与土壤水分的权衡关系

荒漠河岸林物种丰富度、物种多样性指数均与0—1m 土壤水分呈显著负相关(图3),对二者进行权衡分 析,采用90%分位数回归拟合均方根偏差(RMSD)沿 GWD 梯度的权衡过程和响应阈值。物种丰富度指数、物 种多样性指数(Shannon-Wiener)与土壤水分的权衡关系表现一致(图8)。随 GWD 增加,二者与土壤水分的 权衡关系基本在1:1 线附近趋于稳定(图8),然后呈降低趋势,至 GWD 4.5m 附近(4.37m、4.43m)出现转折点 (图9)。随 GWD 增加(<4.5m),二者与土壤水分权衡基本处于1:1 线附近,表明物种丰富度、多样性和土壤 水分存在协同关系,即二者基本以相同速度变化,此 GWD 区间土壤水分能够承载、维持相应的物种多样性, 这与物种多样性指数的均方根偏差变化结果一致(图7)。随 GWD 增加(>4.5m),物种多样性与土壤水分的 权衡增大,土壤水分的相对收益减少,即土壤水分降低速度快于物种多样性的降低速度,说明土壤水分难以维 持相应物种多样性,要维持当前物种多样性是以消耗土壤水分为代价。可见,GWD(土壤水分)持续降低是导 致荒漠河岸林物种多样性减少、植被退化的主要原因。











4 讨论

4.1 土壤水分和物种多样性沿地下水埋深(GWD)梯度的空间变异

土壤水分时空异质性是多重尺度上气候、地形、植被、GWD 等各种环境因子共同作用的结果,其主控因子随地域、研究尺度的不同而有所差异^[13]。塔里木盆地远离海洋,气候极端干旱,极低的降水量难以满足荒漠植被的生长生存,地下水则成为干旱荒漠区植被生存所依赖的最为重要的水分来源,其直接调控荒漠植被结构组成、分布与生存^[5-6,16-18]。本研究发现,荒漠河岸林 0—1m 各层土壤水分随 GWD 增加呈递减趋势,各土层水分与 GWD 均呈极显著的负相关(*r*=-0.8519、-0.9127,*P*<0.01),且土壤水分与 GWD 的相关系数随土层深度增加而增大,表明荒漠河岸林 0—1m 土壤水分空间异质性主要受 GWD 格局所主导,这是由于极端干旱区降水稀少、地表水成为地下水/土壤水分的唯一来源^[16]。

近年来,随区域水土资源大规模开发,塔里木河径流量锐减、甚至断流,造成 GWD 持续降低,进一步加剧 土壤干旱。荒漠河岸林 GWD 增大不仅直接降低土壤有效水分,而且抑制凋落物分解、限制根际土壤微生物 的正常活动及加快土壤氮素的挥发损失,进而抑制荒漠植被对水分/养分的吸收与利用^[28],最终改变荒漠植 物群落物种组成、结构与生态功能^[7,16–18]。近河岸洪水漫溢区,GWD 浅,土壤水分充足完全可满足中生植物 生长发育的需求,此生境主要生长着大量的一年生中生草本植物,植物种类多样,因而物种丰富度和多样性指 数最高(表1、2)。随离河岸距离增加,GWD 增大和土壤水分降低,物种对土壤水分与养分资源的竞争加强, 当水分降低到浅根系的中生草本植物及灌木的生理耐受性时,他们逐渐消失,群落物种多样性减少,此生境留 存着抗旱能力强的乔灌木与深根性多年生草本植物,如胡杨、柽柳、黑果枸杞、甘草、骆驼刺等。随远离河岸与 GWD 继续增加,土壤水分大幅降低(<5%),耐旱性差的多年生草本、灌木退出群落,仅留存耐旱深根的胡杨、 柽柳、骆驼刺等,此时尽管物种均匀度降幅较小,但物种丰富度与多样性均同时锐减。

此外,本研究发现,随 GWD 增加与土壤水分减少,群落物种均匀度指数呈逐渐降低趋势。这是因为水分 条件较好生境,生境条件较均一,物种随机分布且物种多样性高,因而物种均匀度指数较高;随土壤水分减少, 种间竞争加剧,淘汰耐旱性差的物种;同时物种聚集分布可更好抵御干旱逆境的伤害^[6],造成物种均匀度指 数较低。可见,随 GWD 增加,荒漠河岸林物种多样性的降低主要是由草本植物的消亡和灌木的显著退化造 成的。因此,GWD(土壤水分)持续降低是引起荒漠河岸林生物多样性锐减与植被退化的主导因子,这与前人 研究结果一致^[11-12,16-20]。

4.2 土壤水分和物种多样性沿地下水埋深梯度的相互关系

植被-土壤水分关系是干旱区生态重建和恢复的核心科学问题。土壤水分(地下水位)作为干旱区最关键的生态因子,直接决定干旱区内陆河流域所能承载的植物种类、数量和植被演替^[29-30]及生态系统格局、过程^[17,31-32]。群落物种多样性不仅可以反映物种在漫长演化过程中对生存环境的响应、适应及群落结构组成、功能等差异,也可反映出自然环境条件及人为干扰与群落的相互关系^[9-10,13]。因此,土壤水分条件和物种多样性水平可以相互预测和指示^[11]。荒漠河岸林土壤水分和物种多样性对 GWD 梯度的响应规律一致,即在较浅 GWD 生境,其土壤含水量与物种多样性均较高;相反,土壤含水量与物种多样性相应较低。通过对物种多样性指数与土壤水分、GWD 进行相关分析发现,物种多样性与 GWD 的相关系数(*r*=-0.6150)明显高于与土壤水分的相关系数(*r*=0.5464);同时 GWD 与土壤水分的拟合优度显著高于物种多样性的拟合优度,主要因为极端干旱区降雨稀少,GWD 则是决定土壤水分空间变化的首要关键因子^[33],而荒漠群落生物多样性的维持除受生境筛选外,还受随机过程及谱系进化历史等影响^[32]。

土壤水分与植被之间是一种相互依赖和制约的关系^[22],即土壤水分和物种多样性在 GWD 梯度上存在权 衡或协同关系。物种多样性不仅与水源涵养、土壤保持、气候调节密切相关,还与养分循环、群落稳定性、系统 生产力紧密相关^[24,34–35],而这些功能均与土壤水分存在明显的相关性^[7,24,31]。土壤水分植被承载力不仅是 确定干旱区调控植物生长-土水关系、林分密度与合理利用水土资源的理论基础,而且是确定森林恢复目标、 可持续经营和优化生态输水方案的科学依据^[31,36]。研究结果显示,荒漠河岸林 GWD 在 4.5m 左右是土壤水 分和物种多样性权衡的转折点。GWD 在 4.5m 以上(<4.5m),物种丰富度、物种多样性和土壤水分的关系基 本维持在零权衡(1:1)附近,即二者与土壤水分存在协同关系,该 GWD(土壤水分)基本能够承载并维持当前 相应的物种多样性水平。随 GWD 增加(>4.5m)与土壤水分减少,物种多样性与土壤水分的权衡增大,土壤水 分的相对收益减少,表明维持当前相应的物种多样性是以消耗土壤水分的相对收益为代价。GWD 增加与土 壤水分的持续降低,系统通过反馈调节将进一步限制群落发展并降低物种多样性,这与荒漠河岸林群落结构 组成、分布实际情况一致。徐海量等^[19]指出既能降低地下水强烈蒸发返盐,又不造成土壤干旱而影响植物生 长的生态水位作为评价标准,确定塔里木河下游合理生态水位为 3.5—5m;陈永金等^[20]认为维持塔里木河下 游较好地下水水质并遏制荒漠化发展的合理生态水位为 5m。陈亚宁等^[5]、Ma等^[12]指出 GWD>4.5m 荒漠河 岸林优势物种生长受胁迫,GWD>4.0m 物种多样性开始受损,植被生存合理生态水位在 4—5m 之间;GWD> 6m 植被盖度小于 20%,物种多样性锐减^[6,17–18],本研究结果与前人研究结果基本一致。

综上所述,土壤水分对塔里木荒漠河岸林物种多样性的限制主要发生在 GWD 4.5m 以下,GWD<4.5m 物种多样性与土壤水分权衡较均衡,土壤水分基本可维持当前的物种多样性;超过此 GWD,土壤水分相对收益受损,土壤水分难以维持荒漠河岸林物种多样性,二者矛盾显著增大,致使物种多样性锐减。因此,从荒漠河岸林保育与生态恢复角度出发,维持塔里木荒漠河岸林物种多样性和生态系统功能的合理 GWD 在 4.5m 左

右,这为区域植被恢复与流域生态输水工程实施提供了科学依据。

5 结论

本研究定量分析了极端干旱区荒漠河岸林物种多样性与土壤水分之间的权衡/协同关系。塔里木荒漠河 岸林地下水埋深(GWD)是控制林地土壤水分和物种多样性空间异质性及制约生态系统功能的关键因素。受 塔里木河径流量持续减少和 GWD 持续加深的影响,荒漠河岸林土壤水分逐渐减少、干旱加剧,群落发生逆向 演替;物种多样性指数、均匀度指数和丰富度指数均随 GWD 增加呈线性递减趋势,同时土壤水分与物种多样 性的相对收益也随之降低。荒漠河岸林土壤水分与物种多样性权衡关系的转折点为 GWD 4.5m 左右,转折点 以下(GWD<4.5m)二者呈协同关系;转折点以上(GWD>4.5m)土壤水分相对收益剧降,以消耗土壤水分为代 价将难以维持群落物种多样性。因此,维持塔里木荒漠河岸林物种多样性和生态系统功能的合理 GWD 在 4.5m左右。

参考文献(References):

- [1] Lieth H. Modeling the primary productivity of the world//Lieth H, Whittaker R, eds. Primary Productivity of the Biosphere. New York: Springer-Verlag, 1975: 237-263.
- [2] 王继丰,韩大勇,王建波,付晓玲,朱道光,刘赢男,曹宏杰,黄庆阳,谢立红,钟海秀,隋心,倪红伟.三江平原湿地小叶章群落沿土壤 水分梯度物种组成及多样性变化.生态学报,2017,37(10):3515-3524.
- [3] 张雪妮,杨晓东,吕光辉.水盐梯度下荒漠植物多样性格局及其与土壤环境的关系.生态学报,2016,36(11):3206-3215.
- [4] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime J P, Hector A, Hooper D U, Huston M A, Raffaelli D, Schmid B, Tilman D, Wardle D A. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. Science, 2001, 294(5543): 804-808.
- [5] 陈亚宁,张宏锋,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.
- [6] 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. 生态学报, 2017, 37(20): 6836-6846.
- [7] 胡冬, 吕光辉, 王恒方, 杨启, 蔡艳. 水分梯度下荒漠植物多样性与稳定性对土壤因子的响应. 生态学报, 2021, 41(17): 6738-6748.
- [8] 张晓龙,周继华,蔡文涛,管天玉,高楠楠,杜会,姜联合,来利明,杨大文,丛振涛,郑元润.水分梯度下黑河流域荒漠植物群落多样 性特征. 生态学报, 2017, 37(14): 4627-4635.
- [9] 张洁,吕光辉,王恒方,蒋腊梅,蔡艳.艾比湖流域不同水盐环境植物多样性对生态系统多功能性的影响.植物资源与环境学报,2021, 30(4):22-30.
- [10] 濮阳雪华, 王春春, 苟清平, 赵志杰, 黄娟. 陕北黄土区植被群落特征与土壤水分关系研究. 草业学报, 2019, 28(11): 184-191.
- [11] 马晓东,李卫红,朱成刚,陈亚宁.塔里木河下游土壤水分与植被时空变化特征.生态学报,2010,30(15):4035-4045.
- [12] Ma X D, Chen Y N, Zhu C G, Li W H. The variation in soil moisture and the appropriate groundwater table for desert riparian forest along the Lower Tarim River. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(1): 150-162.
- [13] 张钦弟, 卫伟, 陈利顶, 杨磊. 黄土高原草地土壤水分和物种多样性沿降水梯度的分布格局. 自然资源学报, 2018, 33(8): 1351-1362.
- [14] 刘深思,徐贵青,李彦,吴雪,刘杰,米晓军.5种沙地灌木对地下水埋深变化的响应.生态学报,2021,41(2):615-625.
- [15] Wu G L, Zhang Z N, Wang D, Shi Z H, Zhu Y J. Interactions of soil water content heterogeneity and species diversity patterns in semi-arid steppes on the Loess Plateau of China. Journal of Hydrology, 2014, 519(Part B): 1362-1367.
- [16] 郝兴明,李卫红,陈亚宁.新疆塔里木河下游荒漠河岸(林)植被合理生态水位.植物生态学报, 2008, 32(4): 838-847.
- [17] 郝兴明, 陈亚宁, 李卫红. 新疆塔里木河下游物种多样性与地下水位的关系. 生态学报, 2007, 27(10): 4106-4112.
- [18] 王希义,徐海量,凌红波,白元.塔里木河中游荒漠河岸林物种多样性对地下水埋深变化的响应.西北植物学报,2013,33(10): 2071-2076.
- [19] 徐海量,宋郁东,陈亚宁.生态输水后塔里木河下游合理水位探讨.水土保持通报,2003,23(5):22-25.
- [20] 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.
- [21] Ruiz-Sinoga J D, Gabarrón Galeote M A, Martinez Murillo J F, Garcia Marín R. Vegetation strategies for soil water consumption along a pluviometric gradient in southern Spain. Catena, 2011, 84(1/2): 12-20.
- [22] 魏圆慧,梁文召,韩路,王海珍.胡杨叶功能性状特征及其对地下水埋深的响应.生态学报,2021,41(13):5368-5376.
- [23] 傅伯杰,于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. 资源科学, 2016, 38(1): 1-9.

- [24] 郭茹茹,杨磊,李宗善,卫伟,张钦弟.黄土高原半干旱区苜蓿草地撂荒过程生态功能的权衡分析.草业科学,2020,37(9):1698-1709.
- [25] 杨丽红,周正朝.最小二乘与分位数回归方法在河流水沙研究中的应用——以陕北延河流域为例.中国水土保持科学,2014,12(5): 45-51.
- [26] The R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: The R Foundation for Statistical Computing, 2015.
- [27] 贺军奇,赵同强,陈云飞,尚晓伟,刘树平,李安林,刘秀花,马延东,郑策.毛乌素沙区地下水对植被盖度空间格局影响分析.水土保持学报,2023,37(2):90-99.
- [28] Zhang B, Zeng F J, Gao X P, Shareef M, Zhang Z H, Yu Q, Gao Y J, Li C J, Yin H, Lu Y, Huang C B, Tang G L. Groundwater depth alters soil nutrient concentrations in different environments in an arid desert. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 939382.
- [29] Dong S G, Liu B W, Ma M Y, Xia M H, Wang C. Effects of groundwater level decline to soil and vegetation in arid grassland: a case study of Hulunbuir open pit coal mine. Environmental Geochemistry and Health, 2023,45(5): 1793-1806.
- [30] Deng W, Chen M J, Zhao Y, Yan L, Wang Y, Zhou F. The role of groundwater depth in semiarid grassland restoration to increase the resilience to drought events: A lesson from Horqin Grassland, China. Ecological indicators, 2022, 141(6488): 109122.
- [31] 王宁,毕华兴,郭孟霞,孔凌霄,侯贵荣,常译方.晋西黄土残塬沟壑区刺槐人工林土壤水分植被承载力研究.水土保持学报,2019,33 (6):213-219.
- [32] 王寅,王健铭,曲梦君,李景文.干旱内陆河流域植物群落构建过程及其关键驱动因素.生物多样性,2022,30(2):1-16.
- [33] Zhang X L, Guan T Y, Zhou J H, Cai W T, Gao N N, Du H, Jiang L H, Lai L M, Zheng Y R. Groundwater depth and soil properties are associated with variation in vegetation of a desert riparian ecosystem in an arid area of China. Forests, 2018, 9(1): 34.
- [34] 司瑞,刘冰,赵文智,朱钊岑,赵颖.黑河下游尾闾区植物群落物种多样性与稳定性格局.中国沙漠,2021,41(3):174-184.
- [35] 兰洁, 雷相东, 何潇, 高文强, 李玉堂. 吉林省天然阔叶混交林生态系统多功能性及驱动因素. 生态学报, 2021, 41(13): 5128-5141.
- [36] 郭忠升,邵明安. 土壤水分植被承载力研究成果在实践中的应用. 自然资源学报, 2009, 24(12): 2187-2193.