

塔里木河下游荒漠植物群落物种多样性及其结构特征分析

白元^{1,2}, 徐海量^{2,3①}, 张鹏², 赵新风², 傅萇仪^{1,2} (1. 中国科学院研究生院, 北京 100043; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院绿洲生态与荒漠环境重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 以29块植物群落调查样地资料为基础, 采用物种多样性指数、丰富度和均匀度由高到低指数对塔里木河下游植物群落的物种多样性及群落结构进行分析。结果表明, 研究区共有植物10科14属, 出现频率居于前3位的植物依次为柽柳、黑果枸杞和胡杨; 重要值以胡杨为最大(0.384), 其次为柽柳(0.230), 盐生草为最小(0.002); 优势建群植物胡杨主要分布在与河道垂直距离500 m范围内。沿河道从英苏至阿拉干断面, 地下水位逐渐下降, 物种多样性总体呈下降趋势, 群落结构由乔木-灌木-草本转为以乔木-灌木为主; 随与河道垂直距离增加, 群落密度和盖度均呈现先增加后减少的变化趋势, 植物群落结构由乔木-灌木、乔木-灌木-草本逐渐演变为灌木-草本或单一的灌木结构。

关键词: 群落结构; 物种多样性; 地下水; 塔里木河下游

中图分类号: Q948.15 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2012)05-0486-07

Species Diversity and Structural Characters of Desert Plant Communities in Lower Reaches of Tarim River. BAI Yuan^{1,2}, XU Hai-liang^{2,3}, ZHANG Peng², ZHAO Xin-feng², FU Jin-yi^{1,2} (1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100043, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 3. Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Based on the data of plant communities collected from 29 sampling sites, species diversities and structures of the natural plant communities in the lower reaches of the Tarim River were analyzed from the angle of different environmental gradients, using species diversity, richness and evenness indices. Results show that (1) the study area had a total of 14 genera of plants, belonging to 10 families, with *Tamarix ramosissima*, *Lycium ruthenicum* and *Populus euphratica* being the first three in frequency of occurrence and *P. euphratica* being the highest (0.384), *T. ramosissima* the next highest (0.230) and *Halogeton arachnoideus* the lowest (0.002) in the importance value, and *P. euphratica* being dominant species was mainly distributed in areas less than 500 m from the river. (2) Groundwater tables along the river lowered from the upper reaches to the lower reaches, except for the Yiganbujima Section, and so did the species diversity on the whole and arbor-shrub-herb-dominated communities were gradually changed into arbor-shrub-dominated one; while getting farther away from the river, the communities first increased and then decreased in density and coverage, and the plant community structures gradually shifted from arbor-shrub and arbor-shrub-herb to shrub-herb or shrub.

Key words: community structure; species diversity; groundwater table; the lower reaches of the Tarim River

物种多样性是生物多样性在物种水平上的表现形式, 生态学层面上物种分布的均匀程度常常从群落组织水平进行研究, 因此也称为生态多样性或群落多样性^[1]。群落在组成和结构上表现出的多样性是认识群落的组织水平以及功能状态的基础, 也是生物多样性研究中至关重要的方面^[2]。因此, 研究群落物种多样性有助于了解物种的空间分布规律, 揭示群落与环境的相互作用过程。

塔里木河流域地处我国西北内陆极端干旱区, 20世纪50年代以来, 塔里木河源流区和中上游大规模引水和截流, 导致下游地区来水量日趋减少,

大西海子水库以下长达321 km河段基本断流。为改善塔里木河流域的生态环境, 恢复严重受损的塔里木河下游生态系统, 国务院批准对塔里木河流域实施近期综合治理, 自2000年开始向塔里木河下游断流30 a的河道实施应急输水工程^[3]。以生态恢复和环境保护为根本目标的塔里木河下游生态输水工程已经实施了11 a, 向下游生态输水总计

收稿日期: 2012-02-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2009CB421308); 水利部公益性行业科研专项(201101049)

① 通信作者 E-mail: xuhl@ms.xjb.ac.cn

26.96 亿 m³。塔里木河下游荒漠生态系统的恢复状况受到国内外密切关注^[4-6],许多学者从不同角度对塔里木河下游的生态与环境问题进行研究,分析了土壤理化性质、地下水埋深、地下水矿化度和天然植被生理生态等对生态输水的响应情况^[7-9],探讨了生态输水工程取得的生态效益和社会效益^[10-12],还研究了塔里木河下游水文过程完整性的恢复状况^[13-14],分析了植物群落对其生境梯度的指示性^[15-16]。众多研究论证了对塔里木河下游断流河道输水的积极效应,同时为塔里木河流域的水资源保护和生态建设提供了许多有益的建议。但以往有关塔里木河下游荒漠河岸林植被多样性的定量研究较少^[17-19],特别是对于塔里木河下游不同断面、与河道不同距离处的物种多样性和群落结构缺乏详尽的研究^[20]。为此,笔者分析塔里木河下游植物群落的种类组成、数量分布及随环境梯度的变化情况,旨在从生态学角度评价和分折天然植被的空间分布特征及其机制,以期为恢复和重建塔里木河下游受损的生态环境提供科学依据。

1 研究区概况

塔里木河全长 1 321 km,其中塔里木河下游段系指从恰拉至台特玛湖段,全长 428 km,西依塔克拉玛干沙漠,东连库鲁克沙漠,地理坐标为北纬 39°30'01"~40°35'13",东经 88°27'29"~87°33'48"。该区属大陆性暖温带极端干旱气候区,生态环境极为脆弱,多年平均降水量仅 20~50 mm,年平均蒸发量(潜势)却高达 2 500~3 000 mm,地带性植被为温性灌木和半灌木。由于有河水和地下水补给,河漫滩及两岸的低阶地发育着大面积以胡杨(*Populus euphratica*)为主要建群种的荒漠河岸林^[8]。近 50 a 来,不合理的水土资源开发造成塔里木河下游的生态环境退化极其严重^[21],植被群落结构单一,形成由胡杨、灌木和草本植物组成的乔木-灌木-草本结构,主要有怪柳(*Tamarix ramosissima*)和铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)等灌木,以及芦苇(*Phragmites communis*)、罗布麻(*Poacynum henderson-*

nii)、疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)和胀果甘草(*Glycyrrhiza inflata*)等耐盐草本植物。

2 研究方法

2.1 资料来源

样地设置主要依据已有地下水观测井的位置确定,目的是充分利用已有的地下水及土壤资料,为数据的综合分析奠定基础。选择位于塔里木河下游英苏、喀尔达依、阿拉干和依干不及麻的 4 个典型断面开展调查,分别记为 C、E、G、H。各相邻断面间距约 30~50 km,并与塔里木河河道垂直,在每一调查断面上选取若干间隔为 100~300 m、具有代表性的典型样地,样地数依地下水位观测井数目而异。C 断面长 3 500 m,设置 11 个样地,E、G 和 H 断面长度均为 1 050 m,各设置 6 个样地,共计 29 个植被监测样地。各断面的地理位置示意图 1,环境特征见表 1。

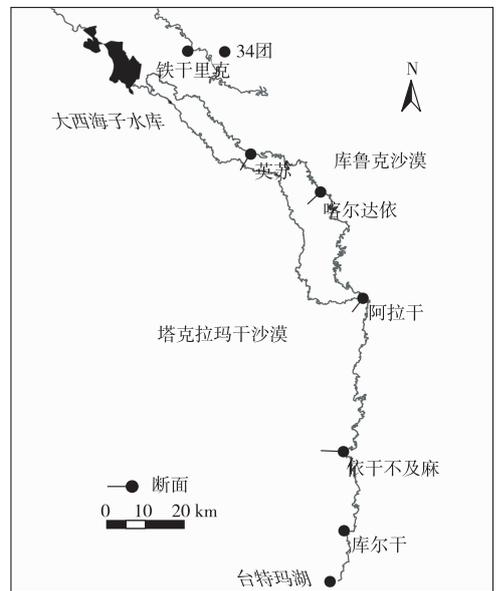


图 1 塔里木河下游样带布设示意
Fig. 1 Distribution of sample lots in the lower reaches of the Tarim River

表 1 塔里木河下游 4 个典型断面的环境特征

Table 1 Environmental characteristics of the four transects typical of the lower reaches of the Tarim River

断面	与大西海子水库距离/km	地下水埋深/m	沙漠化等级 ^[22]	植被盖度/%	退化程度 ^[23-24]
英苏	61	6.57	2.97	10~15	轻度
喀尔达依	95	7.48	4.14	7~10	中度
阿拉干	188	8.52	5.48	2~7	重度
依干不及麻	284	7.27	3.87	1~3	极度

该研究数据来自2010年的3次野外植被调查,根据李基才^[25]的方法,将样地大小设置为50 m × 50 m,在每个样地中再以25 m为间隔设置4个25 m × 25 m的乔木、灌木样方,每个样方内设置4个5 m × 5 m的草本样方,并以GPS定位。样方调查内容主要包括个体数、胸径、基径、高度、冠幅和长势等指标,据此计算盖度、密度和频度,并记录每个样地的海拔高度、经纬度及地下水埋深。

2.2 分析方法

2.2.1 重要值计算

乔木层和灌木层的重要值计算公式为:重要值 = (相对多度 + 相对盖度 + 相对高度)/3。鉴于部分草本植物个体数统计困难,取其相对盖度作为重要值。

2.2.2 物种多样性

采用物种多样性指数对各断面植物群落的物种多样性水平进行评价。Margalef指数(D)、Alatalo均匀度指数(E)、Shannon-Wiener信息指数(H)和Simpson指数(M)的计算公式分别为

$$D = (S - 1) / \ln N, \quad (1)$$

$$P_i = N_i / N, \quad (2)$$

$$E = \left[1 / \sum_{i=1}^S (P_i^2 - 1) \right] / \left[\exp \left(- \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \right) - 1 \right], \quad (3)$$

$$H = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i), \quad (4)$$

$$M = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2. \quad (5)$$

式(1)~(5)中, S 为样方中总物种数; N 为样方中记录的个体重要值总和; P_i 为第*i*个物种的相对重要值; N_i 为第*i*个物种的重要值。

3 结果与分析

3.1 植物群落组成

塔里木河下游荒漠河岸林植物种类少,群落结构简单,在调查期内所调查的4个断面29个样地中,高等植物约有14种,分别属于10科14属,其中藜科、菊科和蝶形花科共有7种。乔木层有胡杨和沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)2种,灌木层有怪柳、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)、铃铛刺、盐穗木(*Halostachys caspica*)、盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)和疏叶骆驼刺,草本层有大叶白麻(*Poacynum hendersonii*)、胀果甘草、花花柴(*Karelinia caspica*)、廖子朴(*Inula salsoloides*)、芦苇和盐生草(*Halogeton arachnoideus*)6种。

塔里木河下游14种主要植物的特征见表2。在调查的29个样方中出现频次最高的是怪柳,在27个样方中均有出现,占样方总数的93.1%;其次为黑果枸杞,出现于15个样方;再次为胡杨,出现在13个样方;其余多数植物在样方中出现的频次较低。从相对多度来看,以胡杨最大,盐节木和芦苇均低于0.01(盐生草未统计)。从相对盖度来看,以胡杨最大,其次为怪柳,其余物种均较小。从相对高度来看,乔木层以胡杨为最高,灌木层以怪柳为最高、疏叶骆驼刺最低,草本层以大叶白麻为最高、芦苇最低。重要值以胡杨为最高,其次为怪柳,盐节木、芦苇和盐生草较低。可见,胡杨为乔木层优势种,灌木中黑果枸杞和盐穗木处于优势地位,半灌木中骆驼刺居草本植物的优势地位,草本层以大叶白麻为优势种,但大多数草本植物的重要值都低于0.1。

表2 塔里木河下游14种主要植物的特征

Table 2 Characteristics of 14 major species of plants in the lower reaches of the Tarim River

植物名称	数量/[株·(2 500 m ²) ⁻¹]	相对多度	盖度/%	相对盖度	平均高度/cm	相对高度	重要值
胡杨	9	0.261	9.394	0.596	614	0.295	0.384
怪柳	9	0.244	5.423	0.344	213	0.102	0.230
沙枣	0	0.007	0.220	0.014	556	0.267	0.096
盐穗木	1	0.020	0.223	0.014	139	0.067	0.034
黑果枸杞	4	0.114	0.169	0.011	95	0.046	0.057
疏叶骆驼刺	4	0.117	0.078	0.005	38	0.018	0.047
胀果甘草	3	0.075	0.085	0.005	59	0.028	0.036
铃铛刺	1	0.015	0.120	0.008	155	0.074	0.032
廖子朴	2	0.062	0.010	0.001	32	0.015	0.026
花花柴	2	0.064	0.025	0.002	30	0.014	0.027
大叶白麻	1	0.014	0.017	0.001	125	0.060	0.025
盐节木	0	0.004	0	0	9	0.004	0.003
芦苇	0	0.004	0	0	8	0.004	0.003
盐生草			0	0	10	0.005	0.002

3.2 植物群落结构变化

在极端的生态条件下,50 m × 50 m 的调查样方范围内一般有 2~7 种植物,在垂直空间上层次分化明显,群落垂直结构分为乔木、灌木和草本 3 层。在调查的 29 个样地中,具乔木-灌木-草本结构的有 7 个,具乔木-灌木结构的有 10 个,具乔木-草本结构的有 1 个,具灌木-草本结构的有 5 个,仅具灌木 1 层结构的有 6 个。乔木层主要由胡杨和偶见种沙枣组成,灌木层以怪柳、黑果枸杞、铃铛刺、疏叶骆驼刺、盐节木和盐穗木为主,草本层以花花柴、大叶白麻、芦苇、廖子朴、胀果甘草和盐生草为主。

通过实地调查,对与河道相同垂直距离的样方数据进行统计,确定植物群落的密度、盖度和重要

值随与河道垂直距离的变化情况,结果见图 2。由图 2 可见,与河道垂直距离由 50 增至 1 050 m,乔木层密度由 24 降至 2 株 · (2 500 m²)⁻¹;灌木层密度为 6~12 株 · (2 500 m²)⁻¹,随与河道距离的变化幅度较小;草本层密度在 1~46 株 · (2 500 m²)⁻¹ 之间,呈较大幅度的波动变化趋势。随与河道垂直距离增加,乔木层盖度总体呈下降趋势;灌木层和草本层的盖度较小,且随与河道距离的变化幅度不大。乔木层的重要值变化幅度最大,在 0.34~0.69 之间,随与河道垂直距离的增加呈下降趋势;灌木层和草本层的重要值变化幅度较小。

塔里木河下游 4 个监测断面植物重要值随与河道垂直距离的变化见图 3。

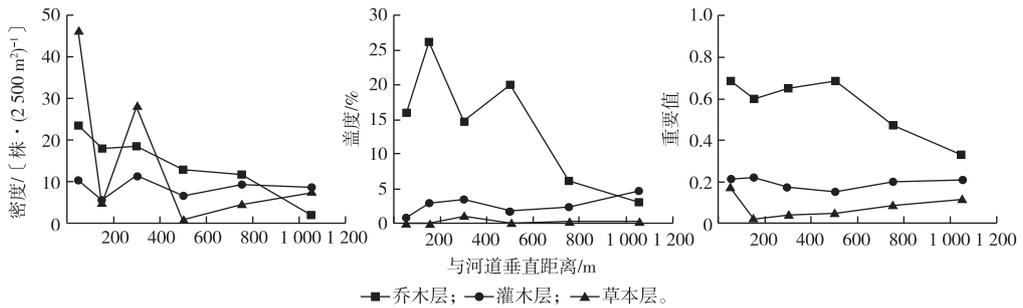


图 2 群落结构特性随与河道垂直距离的变化

Fig. 2 Variation of community structures with the vertical distance from the river

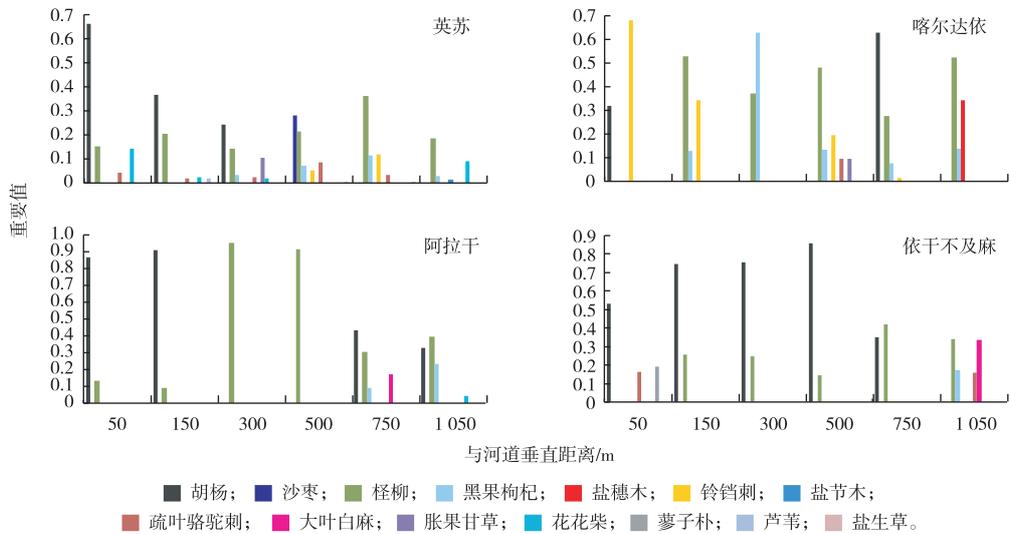


图 3 与河道不同垂直距离处 4 个监测断面主要植物的重要值

Fig. 3 Importance values of the main plants of the four observation sections different in vertical distance from the river

由图 3 可见,不同断面因沙漠化和退化程度不同,植物群落也存在一定差异性。英苏断面的样地有 11 种植物,优势建群种以胡杨和怪柳为主,且胡杨主要分布在距河道 300 m 范围内。与河道垂直距

离由 50 增至 300 m,胡杨重要值由 0.66 下降至 0.24。该断面怪柳分布范围较广,在与河道垂直距离 50~1 050 m 范围均有分布。

喀尔达依断面的样地有 7 种植物。胡杨主要分

布在离河道 50 和 750 m 处,根据实地调查,这主要是因为离河道 750 m 处有支流所致;怪柳主要分布在距河道 150 ~ 1 050 m 范围内,且重要值变化不大,说明分布较均匀;铃铛刺的重要值随与河道垂直距离的增加而呈递减趋势。

阿拉干断面的样地有 5 种植物。胡杨在与河道垂直距离 50 ~ 150 m 处重要值较高,在 750 ~ 1 050 m 处也分布有稀疏的过熟胡杨林;怪柳在与河道垂直距离 50 ~ 1 050 m 范围内均有分布。依干不及麻断面的样地有 6 种植物。胡杨在与河道垂直距离 50 ~ 500 m 处重要值较高,主要为过熟林,长势衰败,分布较为集中,在与河道垂直距离 750 m 处重要值明显下降。

可见,塔里木河下游植物种群和群落的空间分布主要受河道的影响,从河道上游至下游,群落结构趋于单一,胡杨-怪柳群落成为该区域群落结构中的主体^[12]。随与河道垂直距离增加,群落结构由近河道的乔木-灌木、乔木-灌木-草本逐渐演变为远河

道的灌木-草本或单一的灌木结构。

3.3 物种多样性分析

由图 4 可见,从不同断面的物种多样性指数变化来看,Margalef 指数变化幅度最大,在 0.59 ~ 1.36 之间;其次是 Shannon-Weiner 指数,变化幅度在 0.51 ~ 1.16 之间。说明群落或生境的物种结构及组成较复杂,种间异质性较大。反映群落或生境遭受破坏后的修复能力和抗干扰能力强弱的 Simpson 指数变化幅度在 0.52 ~ 0.94 之间,优势度低,表明塔里木河下游绿洲边缘生境脆弱,抗干扰能力较差^[18]。Alatalo 指数变化较小,在 0.68 ~ 1.02 之间,反映各段面物种个体间分布较均匀。沿河道从英苏至阿拉干段,Margalef、Simpson 和 Shannon-Weiner 指数总体表现为下降趋势,在依干不及麻断面处有上升趋势,虽然高于阿拉干断面,但依然小于英苏断面,这反映出研究区域自上游到下游,植物群落在种类和数量上总体呈现减少趋势,植被退化程度加重,物种多样性波动幅度逐渐减小^[26]。

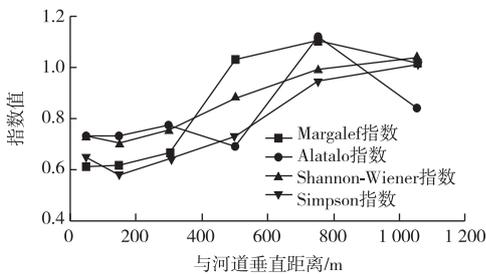


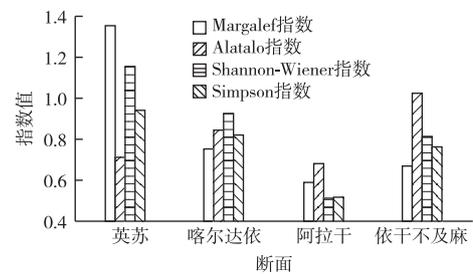
图 4 塔里木河下游物种多样性指数变化

Fig. 4 Variation of the species diversity index in the lower reaches of the Tarim River

从与河道不同垂直距离处的物种多样性变化来看,Margalef、Simpson、Alatalo 和 Shannon-Weiner 指数变化幅度分别在 0.61 ~ 1.11、0.58 ~ 1.01、0.69 ~ 1.12 和 0.70 ~ 1.04 之间。与河道垂直距离在 50 ~ 300 m 范围内时,Margalef、Simpson、Alatalo 和 Shannon-Weiner 指数波动幅度均较小,说明距离河道较远处物种多样性较稳定;与河道垂直距离在 300 ~ 1 050 m 范围内时,各物种多样性指数波动幅度均较大,反映物种数量的 Shannon-Weiner 指数较高,表明物种多样性较高,组成结构趋于复杂,种间异质性也较大,但主要生长的是耐旱的灌木植物,群落结构逐渐趋于单一。

4 讨论

塔里木河下游沙漠化和退化程度严重,沿河道英苏至阿拉干断面物种多样性总体呈下降趋势;随



与河道垂直距离增加,物种多样性指数总体表现为增加趋势。已有研究表明,环境因素对于植物群落的组成、结构、功能、成因和动态均有一定影响^[27]。由图 5 可见,2010 年研究区地下水埋深波动范围较大,为 3.32 ~ 9.25 m,英苏、喀尔达依、阿拉干和依干不及麻断面地下水埋深分别为 3.32 ~ 7.40、7.24 ~ 7.91、8.33 ~ 9.25、6.49 ~ 7.98 m,仅英苏断面与河道垂直距离 50 m 处地下水埋深较浅,其他地点地下水埋深均超出地下水潜水蒸发极限。随与河道垂直距离增加,仅英苏断面地下水埋深表现出明显下降趋势,其他断面变化不明显。反映出塔里木河下游沿河一定范围内地下水对生态输水有明显响应,其抬升和回落存在明显的时空差异。

综合分析塔里木河下游 4 个断面的群落分布,胡杨主要分布在与河道垂直距离 500 m 内,说明天然胡杨林分布区域主要集中在河道及古河道两

侧^[28]。李霞等^[29]研究认为,这种分布范围取决于河道的摆动幅度,与目前的地下水水位无关。调查中发现,与河道垂直距离 50 ~ 150 m 范围内物种数并不是最多的,只有零星的胡杨和怪柳等分布;而与河道垂直距离 300 ~ 500 m 段物种数较多,在胡杨林间隙出现了耐旱性较强的灌木和耐盐草本;在与河道垂直距离 500 ~ 1 050 m 段,乔木层重要值呈降低趋势,草本植物逐渐消失,形成以灌木类怪柳为主的群落结构。总体而言,随与河道垂直距离增加,群落密度和盖度均呈现先增加后减少的变化趋势,植物群落结构由乔木-灌木、乔木-灌木-草本组成逐渐演变为灌木-草本或单一的灌木群落,这与陈亚宁等^[30]的分析结果一致。

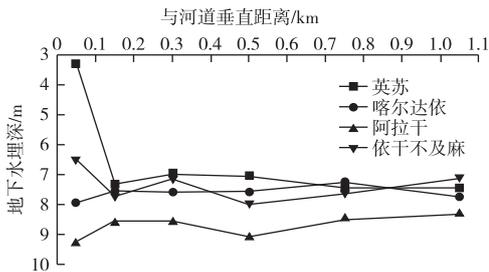


图5 2010年研究区各断面地下水埋深随与河道垂直距离的变化

Fig. 5 Variation of the groundwater table with its vertical distance from the river of the study region in 2010

以上分析数据收集于2010年,当时塔里木河下游生态输水已开展10a,水流系统得到了恢复,从河道上游至下游,浅层地下水对河道输水的响应程度呈明显的减弱态势^[31]。研究中观察发现,塔里木河下游以荒漠河岸林为主体的植物具有伴河生长的特征,胡杨主要分布在距河道500m范围内。同时怪柳受河道水补给,生长良好(没有怪柳沙包),主要分布在距河道500m范围内,呈现聚集分布;在距河道750~1050m范围内,随着沙漠化程度的加剧,怪柳灌丛形成怪柳沙包,怪柳无有性更新繁殖。目前主要采取线性输水的方式打通下游河道,以廊道状补偿水分,导致输水后主要是近河道地下水位发生变化,远离水源地的区域地下水位仍然无法得到抬升。线性生态输水对下游地区植被的影响主要表现在对以根萌为主的无性繁殖的恢复上,而有性繁殖——种子萌发多出现在有地表水和微地形影响的区域。在植被已极度退化的区域,无论是有性还是无性繁殖,输水对其都没有明显改善^[8]。因此,为扩大输水的生态效应,加速天然植被的恢复,

塔里木河下游生态输水应结合一定的工程措施,分段逐步实施河道漫溢的面上放水方案。

5 结论

(1)塔里木河下游共有植物14种,分别隶属于10科14属,胡杨和怪柳出现频率最高,盖度最大,重要值分别为0.384和0.230,是该区域的优势建群种。

(2)群落垂直结构中,具乔木-灌木-草本、乔木-灌木、乔木-草本、灌木-草本和灌木结构分别占样方数的24%、34%、3%、17%和21%。随与河道垂直距离的增加,乔木层的密度、盖度和重要值波动幅度最大,分别为2~24株·(2500m²)⁻¹、3.1%~26.2%和0.34~0.69。

(3)塔里木河下游沿河道英苏至阿拉干断面,物种多样性总体呈下降趋势;近河道物种多样性指数较稳定,距河道300m外物种多样性波动较大,随与河道垂直距离增加,植物群落结构由乔木-灌木、乔木-灌木-草本组成逐渐演变为灌木-草本或单一的灌木群落。

参考文献:

- [1] 汪殿蓓,暨淑仪,陈飞鹏. 植物群落物种多样性研究综述[J]. 生态学杂志,2001,20(4):55-60.
- [2] 马克平,黄建辉,于顺利,等. 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.
- [3] CHEN Y N, ZHANG X L, ZHU X M, *et al.* Analysis on the Ecological Benefits of the Stream Water Conveyance to the Dried-up River of the Lower Reaches of Tarim River, China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2004, 47(11):1053-1064.
- [4] BISSELS S, HOLZEL N, DONATH T W, *et al.* Evaluation of Restoration Success in Alluvial Grasslands Under Contrasting Flooding Regimes[J]. Biological Conservation, 2004, 118(5):641-650.
- [5] 周斌,杨红梅,胡顺军,等. 河水漫溢对塔里木河下游土壤及植被的影响[J]. 干旱区地理,2010,33(3):442-448.
- [6] RENISON D, HENSEN I, CINGOLANI A M. Anthropogenic Soil Degradation Affects Seed Viability in *Polylepis Australis* Mountain Forests of Central Argentina[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 196(2/3):327-333.
- [7] CHEN Y N, CHEN Y P, XU C C, *et al.* Effects of Ecological Water Conveyance on Groundwater Dynamics and Riparian Vegetation in the Lower Reaches of Tarim River, China[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(2):170-177.
- [8] 徐海量,叶茂,李吉玫. 塔里木河下游输水后地下水动态变化及天然植被的生态响应[J]. 自然科学进展,2007,17(4):460-470.
- [9] 李卫红,陈亚鹏,张宏峰,等. 塔里木河下游断流河道应急输水与地表植被响应[J]. 中国沙漠,2004,24(3):301-305.

- [10] 徐海量,王小平,叶茂,等.塔里木河下游生态输水效益的民意调查[J].地理研究,2007,26(2):346-354.
- [11] 陈亚宁,李卫红,陈亚鹏,等.新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复[J].生态学报,2007,27(2):538-545.
- [12] 徐海量,叶茂,李吉玫,等.河水漫溢对荒漠河岸林植物群落生态特征的影响[J].生态学报,2007,27(12):4990-4998.
- [13] 闫正龙,黄强,牛宝茹,等.应急输水工程对塔里木河下游地区植被覆盖度的影响[J].应用生态学报,2008,19(3):621-626.
- [14] 杨戈,郭永平.塔里木河下游末端实施生态输水后植被变化与展望[J].中国沙漠,2004,24(2):167-172.
- [15] 贾亚敏,刘彤,骆彬,等.新疆莫索湾南缘沙漠四种灌木空间异质性的对比[J].干旱区研究,2008,25(2):225-230.
- [16] 刘加珍,陈亚宁,张元明.塔里木河中游主要植物种群的生态特征分析[J].地理研究,2003,22(5):663-670.
- [17] 周洪华,陈亚宁,李卫红.塔里木河下游绿洲-荒漠过渡带植物多样性特征及优势种群分布格局[J].中国沙漠,2009,29(4):688-696.
- [18] 刘新华,徐海量,赵新风,等.塔里木河下游典型绿洲边缘物种多样性特征和种群分布格局[J].生态与农村环境学报,2011,27(3):53-57.
- [19] 张绘芳,李霞,王建刚,等.塔里木河下游植物群落结构特征分析[J].生态环境,2007,16(4):1219-1224.
- [20] 陈亚宁,张小雷,祝向民,等.新疆塔里木河下游断流河道输水的生态效应分析[J].中国科学:D辑:地球科学,2004,34(5):475-482.
- [21] 徐海量,陈亚宁,杨戈.塔里木河下游生态输水对植被和地下水位的影响[J].环境科学,2003,24(4):18-22.
- [22] 宋郁东,樊自立,雷志栋.中国塔里木河水资源与生态问题研究[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,2000:241-250.
- [23] 李吉玫,徐海量.塔里木河下游土壤种子库分布格局及其与环境因子的关系[J].水土保持通报,2009,29(3):88-93.
- [24] 孙木强,王德忠,尹林克,等.塔里木河下游环境退化的因子分析[J].中国水土保持科学,2005,3(3):22-26.
- [25] 李基才.塔里木河下游荒漠植物群落物种多样性数量分析[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2007.
- [26] 郑田,李卫红,李建贵,等.塔里木河下游绿洲荒漠过渡带群落多样性特征分析[J].中国沙漠,2009,29(2):241-247.
- [27] 宋永昌,生态学.植被生态学[M].上海:华东师范大学出版社,2001:21-30.
- [28] 邓潮洲,李利,吴俊侠,等.塔里木河上游胡杨群落及种群特征分析[J].中国沙漠,2010,30(6):1381-1388.
- [29] 李霞,侯平,董新光,等.塔里木河下游断流区胡杨密度调查与分析[J].新疆农业大学学报,2003,26(4):41-44.
- [30] 陈亚宁,张宏锋,李卫红,等.新疆塔里木河下游物种多样性变化与地下水位的关系[J].地球科学进展,2005,20(2):158-165.
- [31] 吐尔逊,哈斯木,石丽,等.塔里木河下游植被和沙漠化对输水前后地下水变化的响应分析[J].中国沙漠,2008,28(6):1033-1038.

作者简介:白元(1986—),男,新疆乌鲁木齐人,硕士生,主要从事恢复生态学研究。E-mail: baiyuan1215@sina.com