



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

王希义^{1,2},徐海量^{1*},凌红波^{1,2},白元^{1,2}

(1 中国科学院新疆生态与地理研究所,乌鲁木齐 830011;2 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:于塔里木河中游地区选取 30 个样地,并采集相应地区 30 眼地下水位监测井的数据。根据监测井的地下水位检测数据,将地下水位按不同埋藏深度划分为 0~2 m、2~4 m、4~6 m、6~8 m、8~10 m、>10 m 共 6 个梯度,对不同地下水埋深下的样地群落盖度、物种多样性进行分析,以探讨主要植物分布频率与地下水埋深的关系,明确塔里木河中游地区荒漠河岸林植被的合理生态水位,为塔里木河中游地区乃至全流域的生态系统恢复提供依据。结果显示:(1)塔里木河中游地区共出现植物 15 种,其优势种植物为胡杨。(2)随着地下水位的降低,植被的盖度逐渐减小;当地下水位介于 2~4 m 时,植被的盖度平均为 39.14%,当地下水埋深介于 6~8 m 时,植被的覆盖度小于 20%;当地下水位低于 10 m 时,植被的平均覆盖度仅为 7.65%。(3)随着地下水位的降低,研究区内的各类物种多样性指数均呈先增加后降低的趋势,一般在地下水埋深 2~4 m 时物种的多样性最高,其次为 4~6 m 和 0~2 m;当地下水位在 6 m 以下时,物种的多样性锐减,地下水位低于 10 m 时,物种仅存柽柳和胡杨,多样性降至很小。(4)塔里木河中游地区植物所要求的地下水平均深度为:胡杨 4.58 m、柽柳 3.53 m、芦苇 2.34 m、骆驼刺 4.10 m、花花柴 3.18 m、黑刺 2.98 m,只有芦苇适宜较浅的地下水埋深($\leqslant 2.5$ m),其余的均宜在 3~4 m 左右。研究表明,在塔里木河中游地区,最适宜植物生长的地下水位为 2~4 m,能够保证植物正常生长的合理地下水埋深区间为 2~6 m。因此,要使塔里木河中游地区的植被得到恢复并确保其正常生长,区域内的地下水位应确保在 6 m 以上。

关键词:高斯回归模型;物种多样性;地下水埋深;荒漠河岸林;塔里木河中游

中图分类号:Q948.112⁺³ 文献标志码:A

Response of the Species Diversity of Desert Riparian Forest to the Changes of Groundwater Depth in Middle Reaches of Tarim River

WANG Xiyi^{1,2}, XU Hailiang^{1*}, LING Hongbo^{1,2}, BAI Yuan^{1,2}

(1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this study, we collected the data from 30 plots and 30 groundwater level monitoring wells in the middle reaches of Tarim River. According to the data from monitoring wells, we divided the groundwater levels into 6 gradients: 0~2 m, 2~4 m, 4~6 m, 6~8 m, 8~10 m, >10 m. Then we analyse the coverage of vegetation and biodiversity at different groundwater levels, in order to investigate the relationship between the frequency of plants distribution and groundwater level, as well as to determine the reasonable ecological water level of the desert riparian forest in middle reaches of Tarim basin, and to provide a basis to ecosystem restoration in middle reaches even the whole basin-wide of Tarim basin. The result shows that: (1) There are 15 species in middle reaches of Tarim basin and the dominant species is *Populus euphratica*. (2) With the reduction of groundwater depth, the coverage of vegetation decreases gradually; As the groundwa-

收稿日期:2013-05-30;修改稿收到日期:2013-08-15

基金项目:国家自然科学基金(41171427,30970549)

作者简介:王希义(1987—),男,在读硕士研究生,主要从事干旱区生态需水与恢复生态学研究。E-mail:binzhouwxy@163.com

*通信作者:徐海量,博士,研究员,硕士生导师,主要从事恢复生态学研究。E-mail:xuhl@ms.xjb.ac.cn

ter level between 2~4 m, the average coverage is 39.14%; When the groundwater level between 6~8 m, the coverage of vegetation is less than 20%; The coverage is only 7.65% when groundwater level less than 10 m. (3) Along with the lowering of groundwater level, the changing trend of species diversity is increased firstly, and then decreased; The species diversity is maximum when groundwater level between 2~4 m, followed by 4~6 m and 0~2 m; When groundwater depth under 6 m, the species diversity decreases rapidly. The species diversity is precious little when groundwater level under 10 m, only *P. euphratica* and *Tamarix chinensis* still remaining. (4) Average depth of groundwater level for the species in middle reaches of Tarim river are: *P. euphratica* 4.58 m, *T. chinensis* 3.53 m, *P. communis* 2.34 m, *Alhagi sparsifolia* 4.10 m, *Karelinia caspica* 3.18 m, *Lycium ruthenicum* 2.98 m; *P. communis* can be suitable for the shallow level of groundwater only, the suitable water level of the rest is about 3~4 m. In summary, in the middle reaches of Tarim River, the most suitable groundwater level to the growth of plants is 2~4 m and the reasonable groundwater level to ensure the normal growth of plants is 2~6 m. It indicates that the groundwater level should be above 6 m in order to ensure the restoration of vegetation and the normal growth as well.

Key words: Gaussian regression model; species diversity; groundwater depth; desert riparian forest; the middle reaches of Tarim River

植被是生态系统最基本的组成部分,是自然环境最直观的反映,在抑制荒漠化过程和保护生物多样性等方面有着重要的生态意义。长期以来,植被和生态环境相互关系一直是生态系统研究的重点^[1-3]。在中国西北干旱地区,植被的分布、长势、演替以及覆盖度与地下水的关系极为密切^[4-8]。在确定合理的地下生态水位过程中,要综合考虑地下水、土壤、植被等多个方面之间的动态平衡,这将会更好地阐明干旱区植物群落和地下水位之间的关系。

目前,国内外针对荒漠河岸林植被系统与地下水的关系的研究较多,主要表现在植被特征对地下水变化的生理响应和适应机理方面^[9]。郭玉川等^[10]、Horton^[11]研究了塔里木河下游植被覆盖度与地下水埋深之间的关系;徐海量等^[12]结合塔里木河中游12个监测断面的监测成果,建立了地下水位与植被覆盖度间的回归方程;其他研究也说明了植被特征与地下水埋深有密切的关系^[13-18]。而且此类研究多集中于荒漠绿洲区或是塔里木河下游地区,针对塔里木河中游植被特征与地下水位关系的相关研究较为少见。塔里木河位于中国最干旱的地区——塔里木盆地境内,降水极为稀少,境内的植被较为稀疏,种类较少。本实验结合塔里木河中游植被和地下水变化的野外调查,分析浅层地下水变化对地表天然植被的影响,探讨塔里木河中游地区荒漠河岸林植被的合理生态水位,为塔里木河中游地区乃至全流域的生态保育和受损生态系统恢复提供参考依据。

1 研究区概况

塔里木河位于新疆南部,塔克拉玛干沙漠北缘,

河流全长2 637 km,是中国最长的内陆河^[19]。塔里木河干流长约1 321 km,流域总面积92.06万km²。塔里木河中游地段是指从轮台县的英巴扎至尉犁县的恰拉,河段长约389 km,属暖温带极干旱气候区,年平均气温10.5℃,年平均日照数为2 778~2 970.3 h,≥10℃的年积温为4 039.4~4 183.9℃,无霜期为211~214 d,适合多种作物的生长^[20]。植被包括乔木、灌木和草本等植物群落,乔木主要有胡杨(*Populus euphratica*),灌木主要有柽柳(*Tamarix chinensis*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)等,草本植物主要有芦苇(*Phragmites communis*)、罗布麻(*Apocynum venetum*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)等。

2 资料来源与研究方法

2.1 地下水位监测与植被样方调查

在塔里木河中游地段,沿河道设置了沙吉利克、沙子河口、乌斯满、阿其河、铁依孜5个监测断面,在垂直于河道的方向上,每间隔100~200 m,对地下水位进行监测并记录,每个断面上调查6个监测井,共调查了30眼地下水位监测井,平均每2个月监测1次(图1)。

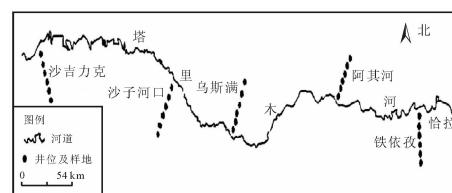


图1 塔里木河中游地区观测断面及监测井示意图

Fig. 1 The distribution of investigation sections at the middle reaches of Tarim River in China

在各个监测断面上,依照地下水位监测井的位置,共布设了30个 $25\text{ m}\times 25\text{ m}$ 植物样地,记录样方内乔木和灌木的个体数、盖度、冠幅等。另外,在各个大样方内,设置3个 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的草本小样方,记录每种草本植物的个体数、盖度、频度等。样方调查时间为2010~2012年每年的7月份。

2.2 数据分析

将记录的地下水位监测数据进行整理,以多年的平均值为依据,将地下水按埋深划分为 $0\sim 2\text{ m}$ 、 $2\sim 4\text{ m}$ 、 $4\sim 6\text{ m}$ 、 $6\sim 8\text{ m}$ 、 $8\sim 10\text{ m}$ 、 $>10\text{ m}$ 共6个变化的梯度。用Matlab软件进行正态拟合分析,研究不同地下水埋深梯度下植被的盖度以及多样性等数量指标的变化趋势。

3 结果与分析

3.1 植被盖度随地下水埋深的变化

对塔里木河中游地区的植物实地调查结果(表1)表明,研究区内乔木、灌木、草本植物共出现15种。由表1可以看出,研究区内的植物隶属于10科15属,胡杨的重要值最大,其次为柽柳,说明它们是研究区内最重要的种群;再者,为芦苇、花花柴、胀果甘草、铃铛刺、黑刺,它们组成了灌木和草本的优势种群;其余物种的分布较少。以上可以看出研究区主要物种组成及数量状况,其代表了该区的群落的类型与结构的特点。

塔里木河中游地区,随着地下水埋深的逐渐加大,样地的植被盖度基本上呈下降的趋势(图2)。

表1 塔里木河中游地区主要植物名录

Table 1 Plants species in the middle reaches of Tarim River

编号 Code	种名 Species	重要值 Importance value
1	胡杨 <i>Populus euphratica</i>	39.22
2	柽柳 <i>Tamarix chinensis</i>	22.83
3	黑刺 <i>Lycium ruthenicum</i>	2.31
4	花花柴 <i>Karelinia caspica</i>	10.62
5	铃铛刺 <i>Halimodendron halodendron</i>	3.84
6	盐生草 <i>Halogeton glomeratus</i>	0.67
7	骆驼刺 <i>Alhagi sparsifolia</i>	1.20
8	芦苇 <i>Phragmites communis</i>	12.63
9	胀果甘草 <i>Glycyrrhiza inflata</i>	4.14
10	小障毛 <i>Aeluropus pungens</i>	0.18
11	鹿角草 <i>Glossogyne tenuifolia</i>	0.27
12	罗布麻 <i>Apocynum venetum</i>	0.32
13	鸦葱 <i>Scorzonera austriaca</i>	0.61
14	苔草 <i>Carex tristachya</i>	0.63
15	小花棘豆 <i>Oxytropis glabra</i>	0.54

当地下水埋深介于 $0\sim 2\text{ m}$ 时,植被盖度的平均值为39.14%;当地下水埋深介于 $2\sim 4\text{ m}$ 时,植被盖度的平均值降为31.27%;当地下水埋深介于 $4\sim 6\text{ m}$ 时,植被的覆盖度平均值为24.67%;当地下水埋深介于 $6\sim 8\text{ m}$ 时,植被的覆盖度已小于20%;地下水埋深到8 m多时,植被的平均盖度进一步减小为13.27%;当地下水埋深低于10 m时,样方植被的平均覆盖度仅为7.65%。

3.2 物种的多样性随地下水埋深的变化

为了综合全面反映物种多样性的变化,本实验选取了Margalef指数、Alatalo指数、Shannon-Wiener指数和Simpson指数。各指数的计算公式如下:

$$\text{Margalef丰富度指数: } D = (S-1)/\ln N \quad (1)$$

Alatalo 均匀度指数:

$$D = [1/\sum_{i=1}^S (\frac{N_i}{N})^2 - 1]/[\exp(-\sum_{i=1}^S \frac{N_i}{N} \ln \frac{N_i}{N}) - 1] \quad (2)$$

Shannon-Wiener 信息指数:

$$D = -\sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i) \quad (3)$$

综合反映物种丰富度和均匀度的修正的 Simpson指数: $D = 1 - \ln[\sum_{i=1}^S (\frac{N_i}{N})^2]$ (4)

式中,D为多样性指数;S表示样方内的物种数;N为样方中全部种的个体数; N_i 表示样方中第*i*个种的个体数; P_i 表示第*i*个种的多度比例。

在不同地下水埋深梯度下,以植被调查样方的多样性指数的平均值作为物种多样性的测度指标,对塔里木河中游地区的物种多样性随地下水埋深的变化状况做了比较(图3)。

由图3可知,在塔里木河中游地区,随着地下水埋深的增加,各类指数呈现出先增加后降低的趋势,一般在地下水埋深 $2\sim 4\text{ m}$ 时达到最大值,其次是4

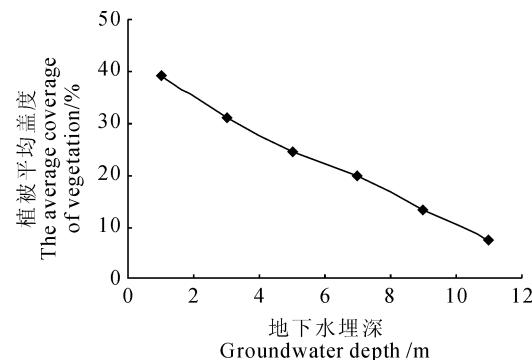


图2 塔里木河中游植被盖度与地下水埋深关系

Fig. 2 Vegetation coverage changes under different groundwater depth in the middle reaches of Tarim River

~6 m 和 0~2 m。其中,Alatalo、Shannon-Wiener、Simpson 指数值在地下水埋深 4~6 m 时略高于地下水埋深 0~2 m 的值,而 Margalef 指数值在地下水埋深 4~6 m 时低于 0~2 m 的值。变化幅度最小的为 Alatalo 均匀指数,为 0.21~0.61;变化幅度最大的为 Shannon-Wiener 指数,为 0.22~0.96。这表明该地区最适合植物生长的地下水埋深为 2~6 m,之后随着地下水位的逐步下降,物种的多样性、均匀度以及丰富度都随之出现与之对应的递减趋势。

3.3 不同地下水埋深下物种的多样性排序

本实验从不同的角度选取了 4 个物种多样性指数,在一定的样方内,都可以计算出一个指数值,所以这些多样性指数都是固定的。然而,自然界的生态系统是十分复杂的,一个固定的值往往反映不出物种的多样性特征,所以需采用含有参数的多样性指数加以综合的描述。含有参数的多样性指数是指在方程中含有一个或多个可变的参数,随着参数取值的不同,物种多样性的指数也就不同,这种指数更有利于解释环境变化对多样性的影响。在此,引入 Hill 多样性指数排序的方法^[21]。

$$Na = \left(\sum_{i=1}^S P_i^a \right)^{1/1-a} \quad (5)$$

式中, Na 为多样性的排序值; $a \geq 0, a \neq 1$; 规定 $a=1$ 时, $Na=e^D$, D 为 Shannon-Wiener 信息指数; $a=0$ 时, $Na=S$ 。 S 为样方内的物种数; P_i 为第 i 个种的多度比例。

Hill 多样性指数的分析结果如图 4 所示,从图 4 中可是看出,随着地下水位的下降,物种的多样性也是表现出先升高后降低的趋势。若物种多样性从

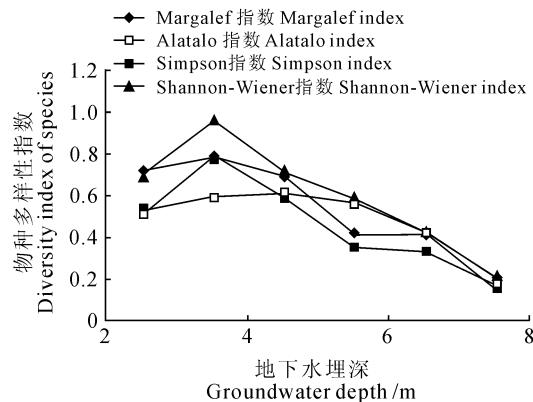


图 3 塔里木河中游地区物种多样性随地下水梯度的变化

Fig. 3 Species diversity along groundwater depth gradients in the middle reaches of Tarim River

高到低排序的话,相对应的地下水位为 2~4、4~6、0~2、6~8、8~10 和 >10 m。

另外,从图 4 还可以看出,塔里木河中游的物种多样性随着地下水位的变化表现出了 3 个阶段性趋势。首先,第一阶段的地下水埋深为 0~6 m,此阶段不同地下水位所对应的物种多样性曲线走向一致;第二阶段的地下水埋深为 6~10 m,曲线的走势趋于平直化;第三个阶段为地下水埋深 >10 m 时,由于水资源的严重短缺,植被类型仅为柽柳以及少量的胡杨,多样性曲线几乎成了一条直线。

综上所述,在塔里木河中游地区,就多样性的变化与地下水位而言,当地下水的埋深超过 6 m 时,物种的多样性减少明显,这主要是由于这些区域的地下水深度超过了草本植物的适宜生态水位;同时,过低的地下水位也使部分灌木衰退,种类和数量也不如地下水位较高的区域。

3.4 塔里木河中游物种合理水位的高斯模型分析

根据在塔里木河中游地区对胡杨、柽柳、芦苇、骆驼刺、花花柴、黑刺等典型植物的随机抽样,得到这些植被在不同地下水埋深范围内出现的频率统计结果(表 2)。

从表 2 可以看出,数据属于偏正态分布。所以,用频率代替物种多度,用高斯回归(Gaussian regression)模型进行拟合^[22],其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\frac{1}{2}(\ln x - u)^2} \quad (6)$$

式中, x 为地下水埋深; u 为 $\ln x$ 的数学期望,反映 $\ln x$ 的平均值; σ 为 $\ln x$ 的均方差,反映 $\ln x$ 偏离其

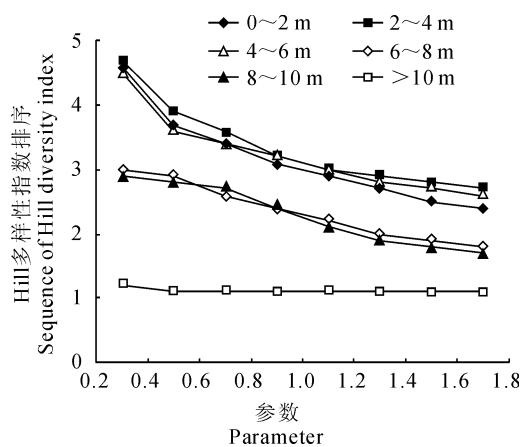


图 4 塔里木河中游不同地下水埋深下 Hill 多样性指数的分析结果

Fig. 4 The result of diversity ordination (Hill diversity index) along groundwater depth gradient in the middle reaches of Tarim River

表2 塔里木河中游地区典型植物在不同地下水埋深范围内的出现频率

Table 2 Frequency of several major plants under different depths of groundwater in the middle reaches of Tarim River

种群 Type community	出现频率 Frequency of appearance/%					
	0~2 m	2~4 m	4~6 m	6~8 m	8~10 m	>10 m
胡杨 <i>Populus euphratica</i>	18.5	41.58	18.37	14.37	5.14	—
柽柳 <i>Tamarix chinensis</i>	24.3	28.23	17.51	6.09	2.31	1.56
芦苇 <i>Phragmites communis</i>	46.3	51.22	7.83	0.77	—	—
骆驼刺 <i>Alhagi sparsifolia</i>	16.66	45.01	27.73	5.56	—	—
花花柴 <i>Karelinia caspica</i>	16.21	55.10	25.55	3.89	—	—
黑刺 <i>Lycium ruthenicum</i>	21.60	64.80	10.80	2.70	—	—

表3 几种典型植物的对数正态分布拟合参数

Table 3 Parameters of logarithm normal distribution fitting of several major plants

植物种类 Type of plants	u	σ	X_{pm}	$E(X)$	$\sigma(X)$
胡杨 <i>Populus euphratica</i>	1.31	0.65	2.43	4.58	3.32
柽柳 <i>Tamarix chinensis</i>	1.12	0.53	2.31	3.53	2.01
芦苇 <i>Phragmites communis</i>	0.71	0.53	1.54	2.34	1.33
骆驼刺 <i>Alhagi sparsifolia</i>	1.29	0.49	2.86	4.10	2.13
花花柴 <i>Karelinia caspica</i>	1.08	0.39	2.53	3.18	1.29
黑刺 <i>Lycium ruthenicum</i>	1.02	0.38	2.40	2.98	1.17

数学期望的程度。

为了确定塔里木河中游地区主要物种生长所需的合理的地下水位,选取 X_{pm} 、 $E(X)$ 、 $\sigma(X)$ 为估算标准。 X_{pm} 为物种出现最大频率时所对应的地下水位,是植物生长的最适值; $E(X)$ 为地下水埋深的数学期望,反映了地下水埋深的平均值; $\sigma(X)$ 为地下水埋深的均方差,反映地下水埋深偏离数学期望的程度^[23]。

$$X_{pm} = e^{u - \frac{\sigma^2}{2}} \quad (7)$$

$$E(X) = e^{u + \frac{1}{2}\sigma^2} \quad (8)$$

$$\sigma(X) = e^{u + \frac{1}{2}\sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

各参数值的计算结果见表3。

对 X_{pm} 、 $E(X)$ 、 $\sigma(X)$ 这3个重要参数的分析结果表明:

(1) 植物出现频率最高值 X_{pm} 所对应的地下水埋深即为植物生长所需的最适地下水埋深。由表3可以看出,在塔里木河中游地区,除了芦苇地下水埋深处于1~2 m外,其余的均在2~3 m之间。

(2) 数学期望 $E(X)$ 表明了植物生长所要求的地下水埋深的平均深度。由表3中看出,典型植物所要求的地下水平均深度为:胡杨4.58 m、柽柳3.53 m、芦苇2.34 m、骆驼刺4.10 m、花花柴3.18 m、黑刺2.98 m,只有芦苇适宜较浅的地下水埋深(≤ 2.5 m),其余的均在3~4 m左右。

(3) 地下水埋深的方差 $\sigma(X)$ 反映了植物对地

下水位的忍耐程度,数值越大就表明植物的忍耐性越大,即植物可在较大的地下水范围内生存,耐旱能力较强,如胡杨、柽柳和骆驼刺等;数值越小,说明耐旱能力较弱,如芦苇、花花柴等。

4 讨论与结论

在塔里木河中游地区,生态系统脆弱并且不稳定性,天然乔、灌、草等植被对生存空间内水的依赖性表现得极为明显。因此,研究塔里木河中游植被生长所需的合理地下水位显得特别重要。但是,对塔里木河中游地区的地下水研究,不仅仅只局限于该地区,还需考虑上游地区的水资源现状以及开发利用状况。上游地区水资源相对丰富,在今后的研究中应加强上游与中游地区的综合分析,使研究结果更加合理。

随着离河距离的增加,地下水埋深加大,物种多样性指数呈现降低趋势,植物种类减少,群落结构趋向简单。在地下水埋深2~4 m时,物种多样性指数最大,其次为4~6 m和0~2 m,所以,该地区合理的地下水位可能就是2~6 m,当地下水低于6 m时,物种多样性明显降低。这说明水分是影响植被分布和生存的主要因素,地下水位的不断下降以及土壤含水率的丧失是引起植被退化的主导因子。

利用高斯模型模拟结果表明,乔灌木的最适地下水埋深大约为3~4 m,草本植物大约为2~3 m;

保证植物能够正常生长的地下水埋深区间大致为3~5 m;乔灌木的适宜地下水埋深区间较大,耐旱能力强,草本植物的适宜地下水埋深区间较小,耐旱能力较弱。当地下水埋深超过6 m时,植被的盖度已经很小。由此可以得出,地下水埋深6 m就可以作为内陆荒漠河岸植被正常生长受到抑制的临界深

度。因此,保证合理的地下水位是维持流域生物多样性的关键措施。应对流域的水资源进行合理的布局,适度的进行开发,严格控制灌溉的面积,加强管理、科研、监测等方面的工作,以实现该地区地下水的可持续利用,促进生态的恢复和经济的可持续发展。

参考文献:

- [1] FENG J ZH(冯金朝), HUANG Z CH(黄子琛), ZHANG CH L(张承烈), et al. Advance in quantitative research of environmental plant physiology[J]. *Journal of Desert Research*(中国沙漠), 1997, **17**(1): 89—94(in Chinese).
- [2] CHEN H SH(陈荷生), KANG Y H(康跃虎), FENG J ZH(冯金朝). Preliminary study on the plant growth and water balance in Shapotou Area, Tengger Desert[J]. *Journal of Desert Research*(中国沙漠), 1991, **11**(2): 1—10(in Chinese).
- [3] ZHANG G SH(张国盛). Research progress on trees and shrub drought resistance and woodland water activity in arid and semi-arid region [J]. *Journal of Desert Research*(中国沙漠), 2000, **20**(4): 363—368(in Chinese).
- [4] LI X L(李小龙), ZHANG G SH(张国盛), et al. Effect of plant coverage and shallow water table depths on seed natural regeneration of *Salix psammophila* and *Salix cheilophila*[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*(西北植物学报), 2011, **31**(5): 1 018—1 023(in Chinese).
- [5] XU H L(徐海量), CHEN Y N(陈亚宁), LI W H(李卫红). Study on response of groundwater after ecological water transport at the lower reaches of the Tarim River[J]. *Research of Environmental Sciences*(环境科学研究), 2003, **16**(2): 19—22(in Chinese).
- [6] DOBLE R, SIMMONS C, JOLLY I, et al. Spatial relationships between vegetation cover and irrigation-induced groundwater discharge on a semi-arid floodplain, Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, **329**: 75—97.
- [7] CHEN Y N(陈亚宁), LI W H(李卫红), XU H L(徐海量), et al. The influence of groundwater on vegetation in the lower reaches of Tarim River, China[J]. *Acta Geographica Sinica*(地理学报), 2003, **58**(4): 542—549(in Chinese).
- [8] MUÑOZ-REINOSO J C. Vegetation changes and groundwater abstraction in SW Donana, Spain[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, **242**(3/4): 197—209.
- [9] CHEN Y N(陈亚宁), LI W H(李卫红). Physiological response of natural plants to the change of groundwater level in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang[J]. *Progress in Natural Science*(自然科学进展), 2004, **14**(11): 975—983(in Chinese).
- [10] GUO Y CH(郭玉川), YANG P N(杨鹏年), LI X(李霞). Effects of spatial distribution of groundwater on vegetation coverage in arid region-A case study in the lower reaches of Tarim river[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*(干旱区资源与环境), 2011, **25**(12): 161—165(in Chinese).
- [11] JONATHAN L H. Physiological response to groundwater depth varies among species and with river flow regulation[J]. *Ecological Applications*, 2001, **11**(4): 1 046—1 059.
- [12] XU H L(徐海量), SONG Y D(宋郁东), WANG Q(王强), et al. The effect of groundwater level on vegetation in the middle and lower reaches of the Tarim River, Xinjiang, China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 2004, **28**(3): 400—405(in Chinese).
- [13] BAIRD K J, STROMBERG J C, MADDOCK T. Linking riparian dynamics and groundwater: An ecohydrologic approach to modeling groundwater and riparian vegetation[J]. *Environmental Management*, 2005, **36**: 551—564.
- [14] ZHANG L(张丽), DONG Z CH(董增川), HUANG X L(黄晓玲). Model on relation between major plants growth and groundwater depth in Arid Area[J]. *Journal of Desert Research*(中国沙漠), 2004, **24**(1): 110—113(in Chinese).
- [15] ZHUANG L(庄丽), CHEN Y N(陈亚宁), LI W H(李卫红), et al. Relationship of the protective enzymes of desert vegetations with water table at the lower reaches of Tarim River[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*(西北植物学报), 2005, **25**(7): 1 287—1 294(in Chinese).
- [16] LIU H J(刘虎俊), LIU SH Z(刘世增), LI Y(李毅), et al. Response of riparian vegetation to the changes of groundwater level at middle and lower reaches of the Shiyang River[J]. *Arid Zone Research*(干旱区研究), 2012, **29**(2): 335—341(in Chinese).
- [17] XU H L(徐海量), YE M(叶茂), LI J M(李吉政). Dynamics of groundwater and the ecological response of natural vegetation after the ecological water transportation in the lower reaches of Tarim River[J]. *Progress in Natural Science*(自然科学进展), 2007, **17**(4): 460—470(in Chinese).
- [18] CHEN M(陈敏), CHEN Y N(陈亚宁), LI W H(李卫红). Physiological response of *Tamarix* spp. for different groundwater depth in the middle reaches of Tarim River in China[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*(西北植物学报), 2008, **28**(7): 1 415—1 421(in Chinese).
- [19] ZHANG Y M(张元明), CHEN Y N(陈亚宁), ZHANG D Y(张道远). Plant communities and their interrelations with environmental factor in the middle reaches of the Tarim River[J]. *Acta Geographica Sinica*(地理学报), 2003, **58**(1): 109—118(in Chinese).
- [20] 刘晏良. 塔里木河中下游实地踏勘报告[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000: 22—23.
- [21] HILL M O. Reciprocal averaging, an eigenvector method of ordination[J]. *Journal of Ecology*, 1973, **61**: 237—249.
- [22] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 46.
- [23] ZHANG L(张丽). Modeling on relation between major plants growth and groundwater depth in arid area[J]. *Journal of Desert Research*(中国沙漠), 2004, **24**(1): 110—113(in Chinese).