

文章编号: 1001-8166(2005)02-0158-08

新疆塔里木河下游物种多样性 变化与地下水位的关系*

陈亚宁, 张宏锋, 李卫红, 陈亚鹏

(中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘 要:根据塔里木河下游 9 个断面 40 眼地下水位观测井和 8 个植物样地野外采集的数据, 运用物种多样性指数对塔里木河下游物种多样性与地下水位变化进行了分析计算。研究表明, 塔里木河下游物种多样性与地下水位变化有着密切的关系, 地下水位对物种多样性的变化起着主导作用。塔里木河下游浅层地下水位埋深较大, 并且表现为由上游段至下游段逐渐加深这样一个明显的递减变化。塔里木河下游物种多样性指数较低, Shannon-Weiner 指数和 Simpson 指数分别变化在 1.93 ~ 0.53 之间和 0.82 ~ 0.35 之间; 随着由上游段至下游段地下水位埋深的加大, 塔里木河下游植物种类减少、群落结构简单、物种多样性指数和丰富度指数呈明显降低的态势。反映了干旱区水分胁迫对生态系统的强烈影响。

关 键 词:物种多样性; 地下水位; 植物群落结构; 塔里木河下游

中图分类号: P641 **文献标识码:** A

0 引 言

物种多样性与生态系统稳定性有着密切的关系, 是当前国际社会关注的热点问题之一^[1~3]。物种多样性是指物种及其集合体的生物多样性, 物种多样性研究的核心是物种的数量变化和物种的生物多样性程度, 其中包括物种多样性时空变化在各种尺度范围的格局、成因及其规律^[4]对区域物种多样性的研究, 可以更好地了解群落的组成、变化和发展, 加深对区域生态系统稳定性的认识。物种多样性变化的研究已有较多报道, 主要集中在物种多样性随海拔的梯度变化^[5~13]和水分因子对物种多样性的影响方面^[8, 14], Cooper 等曾对浅层地下水变化与生态脆弱区天然植被演替及其相互关系进行过研究^[15~22], 赵文智等^[23]对草原农垦区沙质沙漠化过程中干扰对物种多样性的影响以及由此产生的景观异质性的变化进行了研究, 于云江等^[24]对风沙流

对植物生理、生态的影响进行了研究。但有关极端干旱地区地下水与物种多样性变化之间关系的研究尚未见报道。

新疆的塔里木河, 干流全长 1 321 km, 是中国最长的内陆河, 也是世界最干旱的地区之一。在过去的 50 年里, 塔里木河在以水资源开发利用为核心的大强度人类经济、社会活动的作用下, 流域自然生态过程发生了显著变化。塔里木河下游 321 km 河道断流, 河流尾间湖泊——罗布泊和台特玛湖分别于 1970 年和 1972 年相继干涸, 地下水位大幅度下降, 由地下水维系的天然植被极度退化, 以芦苇、罗布麻、骆驼刺等为主的草本植物大片死亡, 柽柳、胡杨大面积衰败, 风蚀沙化加剧, 土地荒漠化过程加强。众多学者纷纷从不同角度分析塔里木河水资源开发过程中的经济与生态的关系, 探讨生态退化与保护对策^[25~31], 为塔里木河流域水资源保护和生态建设提供了许多有益的建议。本文结合近 3 年野外实地

* 收稿日期: 2004-05-18; 修回日期: 2004-10-20

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“塔里木河下游浅层地下水变化的生态效应及生态系统健康评价”(编号: 90102007)资助。

作者简介: 陈亚宁 (1958-), 男, 甘肃人, 研究员, 主要从事环境与生态学研究。E-mail: chenyn@ms.xjhu.ac.cn

调查和地下水变化的实时监测资料,通过对衡量物种多样性的物种丰富度、物种均匀度计算,探讨不同区段地下水位变化与物种多样性之间的关系,解读地下水位变化与生态退化过程,为塔里木河下游受损生态系统的恢复提供科学依据。

1 研究区概况

塔里木河下游位于新疆东南部的塔克拉玛干沙漠和库鲁克塔格两大沙漠之间,属大陆性暖温带、干旱沙漠性气候,生态环境极为脆弱。该区年降水量变化在 17.4~42.0 mm 之间,气候干燥,多大风天气,是我国最干旱的地区之一;近 30 年来,由于河水断流,加之缺乏地表径流的补给,地下水位大幅度下降,由地下水过程维系的天然植被严重衰败,塔里木河下游主要建群种——胡杨大面积衰败,林间沙地活化^[32]。

在植被类型上,塔里木河下游沿河分布着荒漠河岸植被,局部地段有盐生荒漠植被发育,种类贫乏、结构单纯。主要植物有胡杨 (*Populus euphratica*),多枝柽柳 (*Tamarix ramosissima*),刚毛柽柳 (*T. hispida*)、黑刺 (*Lycium ruthenicum*)、芦苇 (*Phragmites communis*)、疏叶骆驼刺 (*Alhagi sparsifolia*)、大花罗

布麻 (*Apocynum venetum*)、花花柴 (*Karelinia caspica*)、胀果甘草 (*Glycyrrhiza inflata*)等。

2 资料来源及研究方法

2.1 资料来源

结合 2000 年塔里木河下游实施生态输水,沿塔里木河下游输水河道布置了 9 个断面 40 眼地下水位观测井(图 1),并定期观测地下水位变化。同时,根据植被情况,沿地下水监测断面,在英苏、阿布达勒、喀尔达依、阿拉干、依干不及麻 5 个断面布置了 8 个植物样地,其中,英苏 2 个、阿布达勒 1 个、喀尔达依 2 个、阿拉干 2 个、依干不及麻 1 个。样地大小为 50 m × 50 m,在每个样地中,再以 25 m 为间隔设置成 4 个 25 m × 25 m 的乔木灌木样方,记录每种乔木(或灌木)的个体数、盖度、胸径、基径、高度、冠幅等指标;同时,样方内设置 4 个 5 m × 5 m 的草本样方,分别记录每种草本的个体数、盖度、高度、冠幅、频度等指标,并以 GPS 进行定位,记录每个样地的海拔高度、经纬度及各样地的地下水位埋深等。同时,通过对垂直于河道不同距离的样方数据的统计分类,获得不同立地主要植物种类的组成列表(表 1)。

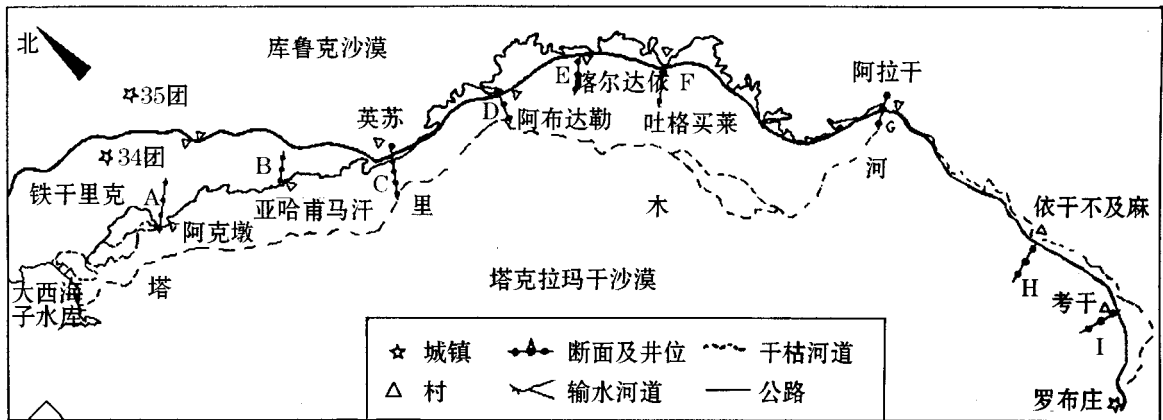


图 1 新疆塔里木河下游 9 个监测断面示意图

Fig 1 The distribution map of 9 investigation sections at lower reaches of Tarim River, Xinjiang

2.2 物种多样性的求解与计算

对物种多样性的衡量可以通过对群落或生境内物种丰富度、物种均匀度的测量获得。物种丰富度是指一个群落或生境中物种数目的多少,是物种多样性的测度方法;物种均匀度是指一个群落或生境中全部物种的个体数目的分配情况,它反映的是各

物种个体数目分配的均匀程度;而物种多样性指数是物种丰富度和物种均匀度的综合指标。

首先,根据采集的样地资料,计算出各样地植物的重要值^[33,34]。重要值的计算公式为:

$$\text{重要值} = \text{相对盖度} + \text{相对密度} + \text{相对高度}$$

然后,根据算出的各样地植物的重要值,运用物

表 1 不同气候条件下 Shannon 指数对比一览表^[39-45]

Table 1 Comparison of the Shannon index in different natural conditions

研究区名称	气候	Shannon 指数	备注
塔里木河下游	温带、极端干旱区	0.53 ~ 1.93	
佛坪自然保护区	亚热带与暖温带过渡地带、湿润区	1.08 ~ 6.63	岳明, 1999
太白山北坡	暖温带、湿润区	2.276 ~ 3.695	岳明, 1997
陕北黄土区	陕北黄土区、半湿润区	1.866	岳明, 1998
五指山地区	热带、湿润区	5.9	安树青, 1999
川中丘陵区	亚热带季风气候、湿润区	1.91 ~ 2.90	彭培好, 2000
福建格氏栲保护区	中亚热带季风气候、湿润区	3.312 ~ 3.948	朱大前, 2000
广东大东山保护区	中亚热带、湿润区	2.950 ~ 4.573	陈北光, 1997

种多样性指数进行评判分析,各断面的物种多样性指数采用断面各个样方的物种多样性指数平均值。采用的物种多样性指数公式如下^[35-38]:

$$\text{Shannon-Weiner 指数: } H = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i / SN_i$$

$$\text{Simpson 指数: } D = 1 / \sum_{i=1}^n P_i^2$$

$$\text{Margalef 指数: } d_{Ma} = (S - 1) / \ln N$$

$$\text{Menhinick 指数: } D = S / \text{SQRT}(N)$$

$$\text{Pielou 指数 1: } JSW = (- \sum P_i \ln P_i) / \ln S$$

$$\text{Pielou 指数 2: } Jsi = (1 - \sum P_i^2) / (1 - 1/S)$$

P_i 为种 i 的相对重要值; SN_i 为种 i 的重要值; N 为种 i 所在样方的各个种的重要值之和; S 为种 i 所在样方的物种总数。

3 结果与分析

3.1 地下水位变化分析

从地下水观测井实测的地下水位变化数据分析表明,自 2000 年以来,已先后 4 次向塔里木河下游实施了间歇性生态输水工程,在生态输水过程中,各断面地下水位都有不同程度的抬升。2000 年输水前,塔里木河下游英苏断面平均地下水位为 8.34 m,阿布达勒断面平均地下水位为 8.41 m,喀尔达依断面平均地下水位为 9.16 m,阿拉干断面平均地下水位为 11.10 m;在 4 次输水后,英苏断面平均地下水位抬升到 4.98 m,阿布达勒断面平均地下水位抬升到 5.10 m,喀尔达依断面平均地下水位抬升到 6.19 m,塔里木河下游下段的阿拉干和依干不及麻断面地下水位也得到不同程度的抬升。分析塔里木河下游上段和下段的地下水位变化可见,不论输水前,还是输水后,地下水位埋深均表现为从上游段到下游段由浅至深这样一个明显的梯度变化(图 2)。

3.2 物种多样性计算分析

塔里木河下游地区的物种多样性变化可以通过

物种多样性指数、丰富度指数以及均匀度指数表达出来。图 3a~c 是塔里木河下游英苏(C)、阿布达勒(D)、喀尔达依(E)、阿拉干(G)和依干不及麻(H)5 个断面的物种多样性变化情况。由计算结果可见,反映物种数量的 Shannon-Weiner 指数较低,变化幅度在 1.93 ~ 0.53 之间, Simpson 指数的变化幅度在 0.82 ~ 0.35 之间;丰富度指数 Margalef 指数的变化幅度在 7.28 ~ 0.91 之间, Menhinick 指数的变化幅度在 5.20 ~ 1.15 之间。表现出由上游段至下游段,随着地下水埋深加大而降低这样一个明显变化趋势(图 3a~b)。

比较各断面的均匀度指数 JSW 指数和 Jsi 指数可见,前者变化幅度在 0.91 ~ 0.76 之间,后者在 0.94 ~ 0.69 之间。除依干不及麻断面外,各断面物种均匀度指数变化不大,这是因为均匀度与物种数目无关^[33]。在物种数目一定的情况下均匀度只与个体数目或生物量在各个物种中分布的均匀程度有关。在塔里木河下游,生态环境恶劣,受环境的影响,植物物种少,群落组成简单,分布稀疏,因此,各断面的物种的分布均匀程度相差不大。而在依干不及麻断面,由于仅分布有胡杨和柽柳两种植物,且以胡杨为主,柽柳零星分布,因此,与其他断面相比,物种均匀度指数呈现出较低的态势(图 3c)。

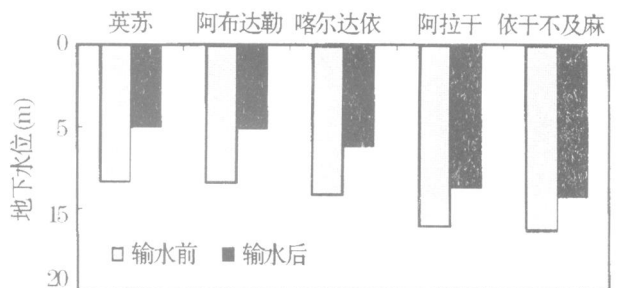


图 2 塔里木河下游输水前后地下水位变化

Fig 2 The change of groundwater level before and after water input in the lower reaches of Tarim River

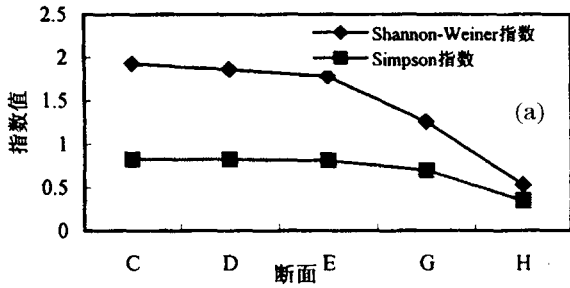


图 3a 塔里木河下游物种多样性指数变化图

Fig 3a The species diversity indices at the lower reaches of Tarim river

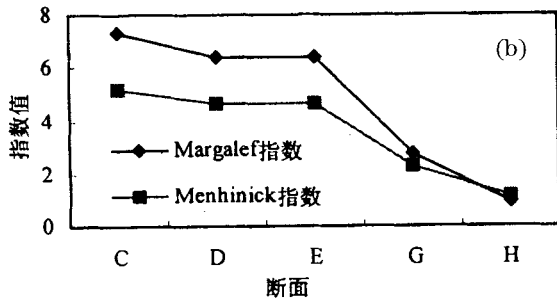


图 3b 塔里木河下游物种丰富度指数变化图

Fig 3b The species richness indices at the lower reaches of Tarim river

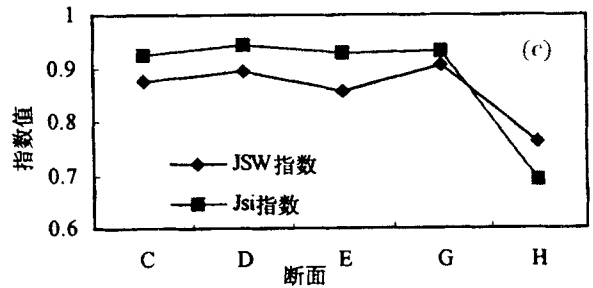


图 3c 塔里木河下游物种均匀度指数变化图

Fig 3c The species evenness indices at the lower reaches of Tarim river

与我国其他地区相比,塔里木河下游的物种多样性指数偏低,而均匀度指数则略偏高(表 2)。反映了塔里木河下游极端干旱地区脆弱的生态环境。

3.3 物种多样性变化的时空序列分析

塔里木河下游不同区段的物种多样性变化与地下水埋深有着直接的关系。从时间序列分析,20 世纪 50 年代初,塔里木河下游恰拉以南、阿拉干以北的塔里木河、纳什河、齐文阔尔河沿岸胡杨林茂密,两河之间林带宽达 7~10 km,在水分条件控制下,由胡杨、柽柳、芦苇和其它中生植物组成呈廊道

表 2 塔里木河下游各不同时段水量水情变化一览表 (10⁸ m³)

Table 2 The change of water volume in the lower reaches of the Tarim river (10⁸ m³)

年 代	恰 拉			铁干里克	阿尔干	罗布庄
	塔里木河来水量	孔雀河输水量	总来水量			
50 (1956—1959)	14.80	0	14.80		常期过水	4~5
60 (1960—1969)	10.39	0	10.39	2.88	时断时续	0.23
70 (1970—1979)	6.45	1	7.45	0.47	断流	枯竭
80 (1980—1989)	3.77	2.01	5.78	0.36	枯竭	干涸
90 (1990—1999)	2.38	2.26	4.64	0.06	干涸	干涸
平均 (1956—1999)	7.11	1.06	8.17	1.83	断流 31 年	断流 30 年

景观分布的自然植被带,随洪水泛滥就地生长,随河流改道而衰败和消亡。1958 年以后,随着塔里木河农垦团场相继建立、垦荒面积的扩大和引用水量的不断增加,导致其下游生态用水匮乏,生态环境退化。20 世纪 70 年代,大西海子水库截流后,铁干里克以南开始出现断流。并且,随着河道断流,河流尾间不断上移,在无任何地表径流补给的情况下,地下水位大幅度下降,大部分区域的地下水位由 20 世纪 50~60 年代的 3~5 m 下降至 2000 年的 8~12 m (图 4),且愈向下游,随着河道断流时间增长(表 2),地下水位下降愈大。靠地下水维系生存的天然植被受到胁迫。尤其阿拉干以下区域,地下水位已

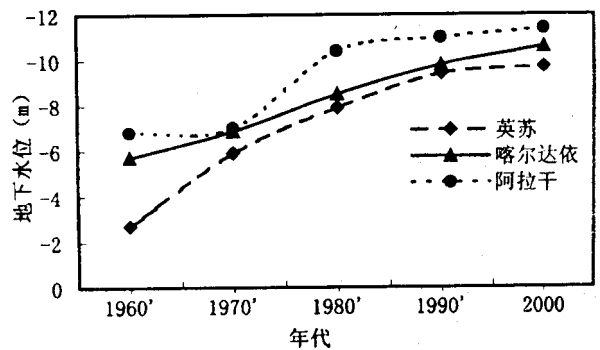


图 4 塔里木河下游地下水变化过程线

Fig 4 The change of shallow groundwater level in the lower reaches of the Tarim river

到了不适合乔、灌、草植被生长的程度,天然植被大面积衰败,物种数减少,物种多样性降低,生态系统出现严重退化。

从空间序列分析,塔里木河下游地下水埋深表现为,由上游至下游逐渐加大^[28],存在明显递减变化,植物群落的种类组成和水平结构上随这种地下水位的变化也显现出明显不同:在上游段的亚合甫马汗和英苏断面的部分地段,输水前地下水位在 6.35~8.34 m 之间,在植物群落的种类组成中,乔木主要是胡杨,灌木有多枝怪柳、刚毛怪柳、黑刺、铃铛刺,并且还有甘草、罗布麻、骆驼刺、芦苇、甚至数量较少的花花柴等草本植物;从群落的水平结构来看,群落内植株间生长稀疏,草本植物分布多呈碎片状。在中游段的阿布达勒和喀尔达依断面的部分地区,地下水位已下降到 8.41~9.16 m,在植物群落的种类组成中,主要为胡杨与怪柳,还伴生有黑刺、少量铃铛刺。由于地下水埋深加大,草本植物稀少,除偶见深根系的骆驼刺外,几乎无其它草本植物,且植被多呈衰败状态,植被类型以荒漠化怪柳灌丛、怪柳灌丛和衰败的胡杨林为主。在下游段的阿拉干和依干不及麻地区,地下水位埋深超过 10 m,植被处于极度退化状态,整个群落呈现出复合性的分布特征,即以胡杨、胡杨+怪柳和怪柳 3 种类型组成形式,分布在阿拉干的胡杨严重衰败,物种数明显减少;依干不及麻以下地区呈单一怪柳群落,植被严重退化,植被类型为荒漠化怪柳灌丛以及裸露的流动沙丘。自上而下,随着地下水位的变化,植物群落在种类、数量上呈现出明显减少趋势,群落结构趋向简单化,反映在物种多样性指数变化上,呈现出明显减少态势。横向上,随着远离河道主轴线,浅层地下水位埋深逐渐加大,草、灌、乔植物种类和分布也表现出相应的响应(表 3)。

塔里木河下游在经过 4 次生态输水后,河道附近地下水位得到明显抬升(图 2),但由于是间歇性输水,输水量有限,从英苏到台特玛湖浅层地下水位仍表现为由浅渐深的态势,植物群落物种的种类也因地下水位埋深加大而呈现出降低趋势。塔里木河下游生态输水主要是沿原自然河道实施的,由于没有大规模的洪水漫溢过程,不存在植物落种更新现象,也不涉及植物发生过程,仅在局部洼地由于河水漫溢,出现了诸如牛皮消、苦豆子、猪毛菜等浅根系植物。但在绝大部分地区,河道附近的天然植被因地下水位抬升而得到拯救,长势得到改善,但植物种类没有因生态输水而发生明显变化,这种物种多

样性变化与浅层地下水位的密切关系是干旱区内陆河流域一个重要特点。

表 3 不同立地主要植物种类组成调查统计表
Table 3 The statistics of composition of mostly floristics in different spaces

样地概况 植物名称	距离河道 100 m	距离河道 200 m	距离河道 300 m	距离河道 500 m	距离河道 800 m	距离河道 1 000 m
胡杨	+	+	+	+	+	+
怪柳	+	+	+	+	+	+
黑刺	+	+	+	+	+	
骆驼刺	+	+	+	+	+	
甘草	+	+	+	+		
罗布麻	+	+	+	+		
芦苇	+	+	+			
牛皮消	+	+	+			
盐穗木	+	+	+			
苦豆子	+	+				
叉枝鸦葱	+	+				
猪毛菜	+	+				
花花柴	+					
铃铛刺		+	+	+		

4 结论与讨论

塔里木河下游植物种群的生存、演替,受物理环境支配明显强于群落的生物环境因素^[32,46],大多数植物只是依环境而生存,草本、灌木、乔木之间的相互依存作用较小,由于塔里木河下游长期断流,生态系统呈严重退化态势,反映在植物的丰富度和均匀度上也都较低。通过对塔里木河下游不同区段地下水位变化与物种多样性分析,在塔里木河下游的物种多样性与地下水位之间的关系方面有以下几点认识:

(1) 塔里木河下游气候干燥,降水量稀少,年降水量不足 50 mm,在河道断流的 30 年间,无任何地表径流,塔里木河下游的物种多样性变化主要受制于地下水位埋深变化,对水的依存性极强,地下水及土壤水成为天然乔、灌、草植被赖以生存的主要水源,是影响植物生长的主导因素。

(2) 塔里木河下游由于河道长期断流(达 30 年之久),地下水位大幅度下降,天然植被大面积衰败,甚至死亡,使系统中的物质循环和能量流动以及信息传递中断,如植物的生产力、分解速率、稳定性等也都因此下降。群落结构也趋向简单化,群落大都由具有耐盐性和抗旱性强的物种组成,如胡杨、怪柳、骆驼刺等,物种多样性程度降低。

(3) 塔里木河下游地下水位对物种多样性的变化具有主导作用。以荒漠河岸林为主体的塔里木河下游植物具有伴河生长的特征,在河道断流后,植物

的生长状况则与地下水位变化密切联系着(表 3)。横向上,随着远离河道主轴线和浅层地下水位埋深加大,植物种类减少和趋于简单,植物主要分布在距离河岸 200~500 m 范围内,而随着远离河道一些浅根系物种纷纷消失,在距离河岸 800~1 000 m 的地方,只有胡杨、柽柳、黑刺、骆驼刺等植物生长;纵向上,由塔里木河下游的中段英苏至下段依干不及麻,表现为:愈向下游,随地下水位不断下降,植物种类减少、物种多样性指数降低,群落结构愈趋向简单,生态系统退化加重。反映了干旱区水分胁迫对物种多样性及生态系统的强烈影响。

(4) 在塔里木河下游的群落逆向演替中,环境与群落处于选择和被选择的动态变化。一方面,由于塔里木河下游河道长期断流,地下水位持续下降造成植物群落的衰败,使群落沿着草本—灌木—乔木的退化顺序进行;另一方面,植物对环境的变化也有适应性,通过采取不同的生态表现型来对环境的变化。如胡杨有 2 种繁殖方式:一种是通过种子传播,另一种是通过胡杨根蘖萌生,而目前在无地表径流作用下,通过种子进行更新的可能性几乎没有;芦苇在不同的生境下,有高型、矮生、匍匐 3 种不同的生态型;骆驼刺则靠较长的根系来维持生长,其根系一般长达几米到十几米,而且再生能力强;柽柳也有较广的生态适应性,当地下水下降时,它向超旱生荒漠植被过渡,当地下水位上升、盐渍化加重时,它向盐生荒漠植被过渡。

(5) 向塔里木河下游的生态输水有效地抬升了地下水位,对河道附近现存的天然植被的生长和复壮起到了明显效果。但这种沿自然河道的“线形”输水方式不能达到植物的落种更新目的,实现区域生态的可持续性。目前,一方面塔里木河下游的大部分胡杨已处于老龄化;另一方面,林下植被很少,林间沙地活化,沿自然河道的“线形”输水方式一时也难以使草本植物大面积恢复。因此,在输水方式上,应尽快实施“双河道输水”和漫溢“面上给水”方式,通过工程辅助,有计划的漫溢“面上给水”对种子的萌发和落种更新具有重要意义,通过局部地区的“面上给水”,由点带面,逐步恢复,为群落的正向演替创造条件;在输水时间上,应该考虑到植物种子的成熟期与生态输水时间的一致性,使植物种子在成熟以后能得到充足的水分,便于种子的萌发,以扩大向塔里木河下游输水的生态效应。

参考文献 (References):

[1] Pimm S L. The complexity and stability of ecosystem[J]. *Nature*,

1984, 307: 321-326.

[2] McNaughton S J. Diversity and stability of ecological communities: A comment on the role of empiricism in ecology[J]. *American Naturalist*, 1997, 111: 515-525.

[3] Timan D, Downing J A. Biodiversity and stability in grasslands[J]. *Nature*, 1994, 367: 363-365.

[4] Zhou Hongzhang, Yu Xiaodong, Luo Tianhong, et al. How does species diversity change? Spatio-temporal patterns and scales[J]. *Chinese Biodiversity*, 2000, 8(3): 325-326. [周红章,于晓东,罗天宏,等.物种多样性变化格局与时空尺度生物多样性[J].生物多样性,2000,8(3):325-326.]

[5] A latalo R V. Problems in the measurement of evenness in ecology[J]. *Oikos*, 1981, 37: 199-204.

[6] Baruch Z. Ordination and classification of vegetation along an altitudinal gradient in the Venezuelan Paramos[J]. *Vegetatio*, 1984, 55: 115-126.

[7] Daubenmire R, Daubenmire J B. Forest vegetation of eastern Washington and Northern Idaho[J]. *Agricultural Expt Sta Tech*, 1986, 60: 1-104.

[8] Gentry A H. Neotropical floristic diversity: Phytogeographical connections between central and south America, Pleistocene climatic fluctuations, or an accident of the Andean Orogeny[J]. *Annals of Missouri Botany Garden*, 1982, 69: 557-593.

[9] Currie D J, Paquin V. Large-scale biogeographical patterns of species richness of trees[J]. *Nature*, 1987, 329: 326-327.

[10] Wilson J B, Lee W G, Mark A F. Species diversity in relation to Ultramafic substrate and to altitude in southwestern New Zealand[J]. *Vegetatio*, 1990, 86: 15-20.

[11] Ito S. Species turnover and diversity pattern along an elevation broad leaved forest coenocline[J]. *Journal of Vegetation Science*, 1991, 2: 477-484.

[12] Xie jinyang, Chen lingzhi. Species diversity characteristics of deciduous forests in the warm temperate zone of north China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14(4): 337-344. [谢晋阳,陈灵芝.暖温带落叶阔叶林的物种多样性特征[J].生态学报,1994,14(4):337-344.]

[13] He Jinsheng, Chen Weilie. Characteristics of species diversity of plant communities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(1): 91-99. [贺金生,陈伟烈.陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征[J].生态学报,1997,17(1):91-99.]

[14] Thalen D C P. Variation in some saltmarsh and dune vegetations in the Netherlands with special reference to gradient situations[J]. *Acta Botanica Neerlandica*, 1971, 20: 321-342.

[15] Cooper A. The origin and stability of tropical edaphic savanna on groundwater Podzols in Guyana vegetation[J]. *Tropical Ecology*, 1981, 22(1): 99-115.

[16] Wassen M J, Barendregt A, Bootsma M C, et al. Groundwater chemistry and vegetation of gradients from rich fen to poor fen in the Naardemeer (the Netherlands)[J]. *Vegetatio*, 1989, 79(3): 117-132.

[17] Wassen M J, Barendregt A, Palczynski A, et al. The relationship between fen vegetation gradients, groundwater flow and

- flooding an undrained valley mire at Biebraza, Poland[J]. *Journal of Ecology*, 1990, 78(4): 1 106-1 122.
- [18] Rey Benayas J M, Bemaldez F G, Levasor C, *et al* Vegetation of groundwater discharge sites in the Douro Basin, central Spain [J]. *Journal of Vegetation Science*, 1990, 1(4): 461-466
- [19] Ross M S, Jones R D, O'Brien J J, *et al* Nitrogen and phosphorus in the Florida Keys: Groundwater-vegetation relationship [J]. *Bulletin of Marine Science*, 1994, 54(3): 1 082-1 083.
- [20] Stromberg J C, Tiller R, Richter B. Effects of groundwater decline on riparian vegetation of semiarid regions: The San Pedro, Arizona[J]. *Ecological Applications*, 1996, 6(1): 113-131.
- [21] Lammerts E J, Maas C, Grootjans A P. Groundwater variables and vegetation in dune slacks [J]. *Ecological Engineering*, 2001, 17(1): 33-47.
- [22] Munoz-Reinos J C. Vegetation changes and groundwater abstraction in SW Donana, Spain[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 242(3/4): 197-209.
- [23] Zhao Wenzhi, He Zhibin, Li Zhigang. Biological mechanism of sandy desertification in grassland reclamation area in North China [J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(2): 257-262 [赵文智, 何志斌, 李志刚. 草原农垦区土地沙质荒漠化过程的生物学机制 [J]. *地球科学进展*, 2003, 18(2): 257-262]
- [24] Yu Yunjiang, Shi Peijun, He Liping, *et al* Research on the effects of wind-sand current on the plant growth[J]. *Advances in Earth Science*, 2002, 17(2): 262-267. [于云江, 史培军, 贺丽萍, 等. 风沙流对植物生长影响的研究 [J]. *地球科学进展*, 2002, 17(2): 262-267.]
- [25] Chen Hesheng. Environmental change identification by water resources exploitation in arid northwest China[J]. *Journal of Desert Research*, 1987, 7(2): 1-11. [陈荷生. 西北干旱区水资源开发引起环境变化识别 [J]. *中国沙漠*, 1987, 7(2): 1-11.]
- [26] Zhu Zhenda. Desertification process and its developing trend [J]. *Journal of Desert Research*, 1987, 7(3): 16-28. [朱震达. 塔克拉玛干沙漠地区沙漠化过程及其发展趋势 [J]. *中国沙漠*, 1987, 7(3): 16-28.]
- [27] Chen Yaning, Li Jianbang. Some environmental problems and hamess emphases of the mainstream of the Tarim River[A]. In: *The Water Resource, Environment and Management of Tarim River Watershed* [C]. Beijing: China Environment Science Press, 1998. 239-242. [陈亚宁, 李建邦. 塔里木河流域的环境问题及治理重点 [A]. 见: *塔里木河流域水资源、环境与治理* [C]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998. 239-242.]
- [28] Chen Yaning, Cui Wangcheng, Li Weihong, *et al* Utilization of water resources and ecological protection in the Tarim River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 215-222. [陈亚宁, 崔旺诚, 李卫红, 等. 塔里木河的水资源利用与生态保护 [J]. *地理学报*, 2003, 58(2): 215-177.]
- [29] Li Xin, Zhou Hongfei, Fan Zili. Water resources utilization of Tarim River and land desertification effect analysis [J]. *Journal of Desert Research*, 1998, 18(suppl 1): 46-54. [李新, 周宏飞, 樊自立. 人类活动干预后的塔里木河水资源持续利用问题 [J]. *地理研究*, 1998, 18(1): 46-54.]
- [30] Ji Fang, Fan Zili, Deng Yongxin. Regional characteristics of water resources utilization for the mainstream of the Tarim river[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1998, 12(2): 15-18. [季方, 樊自立, 邓永新. 塔里木河干流水资源利用区域分异特点及其改造途径 [J]. *干旱区资源与环境*, 1998, 12(2): 15-18.]
- [31] Tang Qicheng, Zhang Jiebin. Water Resources and Eco-environment Protection in the Arid Regions in Northwest of China[J]. *Progress in Geography*, 2001, 20(3): 227-233. [汤奇成, 张捷斌. 西北干旱地区水资源与生态环境保护 [J]. *地理科学进展*, 2001, 20(3): 227-233.]
- [32] Liu Jiazhen, Chen Yaning. Analysis on converse succession of plant communities at the lower reaches of Tarim River[J]. *Arid Land Geography*, 2002, 25(3): 231-236. [刘加珍, 陈亚宁. 新疆塔里木河下游植物群落逆向演替分析 [J]. *干旱区地理*, 2002, 25(3): 231-236.]
- [33] Ma Keping, Huang Jianhui, Yu Shunli, *et al* Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China: . Species richness, evenness and species diversities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3): 268-277. [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 丰富度、均匀度和物种多样性指数 [J]. *生态学报*, 1995, 15(3): 268-277.]
- [34] Yue Ming, Zhang Linjing, Dang Gaodi, *et al* The relationships of higher plants diversity and elevation gradient in Foping national reserve[J]. *Scientia geographica sinica*, 2002, 22(3): 349-354. [岳明, 张林静, 党高弟, 等. 佛坪自然保护区植物群落物种多样性与海拔梯度的关系 [J]. *地理科学*, 2002, 22(3): 349-354.]
- [35] Margalef R. Information theory in ecology[J]. *General Systems*, 1958, 3: 36-71.
- [36] Simpson E H. Measurement of diversity [J]. *Nature*, 1949, 163: 688.
- [37] Ludwig J A, Reynolds J F. *Statistical Ecology: A Primer on Methods and Computing*[M]. New York: John Wiley, 1988.
- [38] Whittaker R H. Evolution and measurement of species diversity [J]. *Taxon*, 1972, 21: 213-251.
- [39] Yue Ming, Ren Yi, Dang Gaodi, *et al* Species diversity of higher plant communities in Foping national reserve [J]. *Chinese Biodiversity*, 1999, 7(4): 263-269. [岳明, 任毅, 党高弟, 等. 佛坪国家级自然保护区植物群落物种多样性特征 [J]. *生物多样性*, 1999, 7(4): 263-269.]
- [40] Yue Ming, Zhou Hongxia. Diversity of Higher plants in deciduous broadleaved forests on the northern slope of Taibai Mountain [J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1997, 1(2): 171-176. [岳明, 周虹霞. 太白山北坡落叶阔叶林物种多样性特征 [J]. *云南植物研究*, 1997, 1(2): 171-176.]
- [41] Yue Ming. Species diversity of higher plant of quercus Liaotungensis forest in Qinling Mountain and the Loess Plateau[J]. *Acta botanica Boreo-Occident Sinica*, 1998, 18(1): 124-131. [岳明. 秦岭及陕北黄土区辽东栎林群落物种多样性特征 [J]. *西北植物学报*, 1998, 18(1): 124-131.]

- [42] An Shuqing, Zhu Xuelei, Wang Zhengfeng, *et al* The plant species diversity in a tropical montane rain forest on Wuzhi Mountain, Hainan[J]. *Acat Ecologica Sinica*, 1999, 19(6): 803-809. [安树青,朱学雷,忘争峰,等. 海南五指山热带山地雨林植物物种多样性研究[J]. 生态学报, 1999, 19(6): 803-809.]
- [43] Peng Peihao, Wang Jinxi, Hu Zhenyu, *et al* Studies on the community diversity of the protection forest in the hilly areas of central Sichuan[J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2000, 21(4): 5-10. [彭培好,王金锡,胡振宇,等. 川中丘陵区防护林群落多样性研究[J]. 四川林业科技, 2000, 21(4): 5-10.]
- [44] Zhu Daqian, Chen Lidong Studies on the species diversity of *Caslanopsis kawakamii* forest community[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Techenology*, 2000, 27(1): 10-13. [朱大前,陈立栋. 格氏栲林群落物种多样性研究[J]. 福建林业科技, 2000, 27(1): 10-13.]
- [45] Chen Beiguang, ZhangMuming, Su Zhiyao, *et al* Species diversity of evergreen broadleaved forest in Dadongshan nature reserve, Guangdong[J]. *Journal of South China Agricutynal University*, 1997, 18(4): 59-63. [陈北光,张木明,苏志尧,等. 广东大东山常绿阔叶林物种多样性分析[J]. 华南农业大学学报, 1997, 18(4): 59-63.]
- [46] Huang Peiyou Desert Ecology[M]. Urumqi: Xinjiang University Press, 1993. 207-230. [黄培祐. 干旱生态学[M]. 乌鲁木齐:新疆大学出版社, 1993. 207-230.]

STUDY ON SPECIES DIVERSITY AND THE CHANGE OF GROUNDWATER LEVEL IN THE LOWER REACHES OF TARIM RIVER, XINJIANG, CHINA

CHEN Ya-ning, ZHANG Hong-feng, LI Wei-hong, CHEN Ya-peng

(*Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*)

Abstract: In this paper, the species diversity and the change of groundwater level in the lower reaches of Tarim River are analyzed and calculated based on the field-collected data from 40 observation wells of groundwater level along 9 sections and 8 plant plots in the lower reaches of Tarim river. The study shows that the species diversity is closely related to the change of groundwater level in the lower reaches of Tarim river, and the groundwater level plays a dominant role in the species diversity. In the lower reaches of Tarim River, the shallow groundwater level is deep, and it becomes deeper gradually from the upper reaches to the lower reaches, *i.e.*, there is an obvious increase in the depth of groundwater. The index of species diversity is small in the lower reaches of Tarim River, and the Shannon-Wiener index and Simpson index vary in ranges of 1.93 ~ 0.53 and 0.82 ~ 0.35 respectively. Along with the increase of groundwater depth from the upper reaches to the lower reaches of Tarim River, the plant species become less, the structure of plant communities becomes simpler, and the diversity index and abundance index of the species are in an obvious decrease status. All these reflect the serious impacts of moisture stress on the ecosystems in this arid area.

Key words: Species diversity; Change of groundwater level; Structure of plant community; The lower reaches of Tarim river