

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

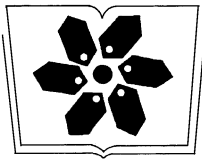
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第7期 Vol.33 No.7 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 7 期 2013 年 4 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 线虫转型发育和寄主识别的化学通讯研究进展..... 张 宾,胡春祥,石 进,等 (2003)
- 生物物种资源监测原则与指标及抽样设计方法..... 徐海根,丁 晖,吴 军,等 (2013)

个体与基础生态

- 呼伦贝尔草原人为火空间分布格局..... 张正祥,张洪岩,李冬雪,等 (2023)
- 青藏高原草地地下生物量与环境因子的关系..... 杨秀静,黄 玫,王军邦,等 (2032)
- 1961—2010 年桂林气温和地温的变化特征 陈 超,周广胜 (2043)
- 黄泥河自然保护区狗冬季卧息地选择..... 朱洪强,葛志勇,刘 庚,等 (2054)
- 青藏高原草地植物叶解剖特征..... 李全发,王宝娟,安丽华,等 (2062)
- 青藏高原高寒草甸夏季植被特征及对模拟增温的短期响应..... 徐满厚,薛 娴 (2071)
- 高温影响番茄小孢子发育的细胞学研究..... 彭 真,程 琳,何艳军,等 (2084)
- 黄土丘陵半干旱区柠条林株高生长过程新模型..... 赵 龙,王振凤,郭忠升,等 (2093)
- 柝属 7 种植物种子的发芽抑制物质研究..... 李庆梅,刘 艳,刘广全,等 (2104)
- 水分胁迫和杀真菌剂对黄顶菊生长和抗旱性的影响..... 陈冬青,皇甫超河,刘红梅,等 (2113)
- 铜尾矿废弃地与相邻生境土壤种子库特征的比较..... 沈章军,欧祖兰,田胜尼,等 (2121)
- 云雾山典型草原火烧不同恢复年限土壤化学性质变化..... 李 媛,程积民,魏 琳,等 (2131)
- 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄果实硝酸盐含量的影响..... 周振江,牛晓丽,李 瑞,等 (2139)
- 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响..... 李 娟,廖洪凯,龙 健,等 (2147)
- 自生固氮菌活化土壤无机磷研究..... 张 亮,杨宇虹,李 倩,等 (2157)
- 德国鳶尾对 Cd 胁迫的生理生态响应及积累特性 张呈祥,陈为峰 (2165)
- 施污土壤重金属有效态分布及生物有效性..... 铁 梅,宋琳琳,惠秀娟,等 (2173)
- 基于叶面积指数改进的直角双曲线模型在玉米农田生态系统中的应用..... 孙敬松,周广胜 (2182)
- 中稻田三种飞虱的捕食性天敌优势种及农药对天敌的影响..... 林 源,周夏芝,毕守东,等 (2189)

种群、群落和生态系统

- 珠江口超微型浮游植物时空分布及其与环境因子的关系..... 张 霞,黄小平,施 震,等 (2200)
- 输水前后塔里木河下游物种多样性与水因子的关系..... 陈永金,刘加珍,陈亚宁,等 (2212)
- 南海西北部陆架区鱼类的种类组成与群落格局..... 王雪辉,林昭进,杜飞雁,等 (2225)
- 滇西北高原碧塔湖滨沼泽植物群落分布与演替 韩大勇,杨永兴,杨 杨 (2236)
- 石羊河下游白刺灌丛演替过程中群落结构及数量特征..... 靳虎甲,马全林,何明珠,等 (2248)

资源与产业生态

- 土壤深松和补灌对小麦干物质生产及水分利用率的影响..... 郑成岩,于振文,张永丽,等 (2260)

豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响..... 张达斌,姚鹏伟,李 婧,等 (2272)

沟壑全覆盖种植方式对旱地玉米生长及水分利用效率的影响..... 李 荣,侯贤清,贾志宽,等 (2282)

城乡与社会生态

北京北护城河河岸带的温湿度调节效应 吴芳芳,张 娜,陈晓燕 (2292)

西安太阳总辐射时空变化特征及对城市发展的响应..... 张宏利,张纳伟锐,刘敏茹,等 (2304)

研究简报

安徽琅琊山大型真菌区系多样性..... 柴新义,许雪峰,汪美英,等 (2314)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 (2320)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 318 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-04



封面图说: 金灿灿的小麦熟了——小麦是世界上最早栽培的农作物之一,是一种在世界各地广泛种植的禾本科植物,起源于中东地区。全世界大概有 43 个国家,近 35%—40% 的人口以小麦为主要粮食。小麦是禾谷类作物中抗寒能力较强的越冬作物,具有一定的耐旱和耐盐碱能力。中国的小麦分布于全国各地,主要集中于东北平原、华北平原和长江中下游一带。小麦秋季播种、冬季生长、春季开花、夏季结实。子粒含有丰富的淀粉、较多的蛋白质、少量的脂肪,还有多种矿物质元素和维生素 B,是一种营养丰富、经济价值较高的粮食。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201112261977

陈永金, 刘加珍, 陈亚宁, 李新功, 朱海勇. 输水前后塔里木河下游物种多样性与水因子的关系. 生态学报, 2013, 33(7): 2212-2224.

Chen Y J, Liu J Z, Chen Y N, Li X G, Zhu H Y. Analysis of the relationship between species diversity and hydrologic factors during an interval of intermittent water delivery at the Lower Reaches of Tarim River, China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2212-2224.

输水前后塔里木河下游物种多样性与水因子的关系

陈永金^{1,2,*}, 刘加珍¹, 陈亚宁², 李新功², 朱海勇¹

(1. 聊城大学环境与规划学院, 聊城 252059; 2. 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要:为检验连续 7a 的输水对塔里木河下游生态系统稳定性的影响, 根据 2006 年与 2010 年塔里木河下游地下水埋深、地下水质以及植被调查资料, 分析了 2006 到 2010 年间物种多样性、地下水位和水质变化状况, 利用非参数相关和 RDA 排序对输水间歇物种多样性与地下水位、水质关系变化作了探讨, 结果发现: 塔里木河下游输水停止后地下水位不断下降, 地下水矿化度也有小幅度增加; 物种多样性 Shannon-Weiner 指数、Simpson 指数、Margalef 指数、Patrick 指数以及 Cody 指数都以下降为主, 表明塔里木河下游受损生态系统尚不具备自维持能力; 物种多样性与地下水埋深和地下水矿化度的关系为, 地下水平均埋深为 5 m 左右时, 物种多样性主要受地下水质状况的影响, 而当地下水平均埋深大于 6.5 m 时, 物种多样性的制约因子则为地下水位。因此, 从物种多样性角度看, 塔里木河下游的合理水位应在 5 m 左右, 大于 6.5 m 则是物种多样性的胁迫水位。

关键词:塔里木河; 生态输水; 物种多样性; 合理地下水位

Analysis of the relationship between species diversity and hydrologic factors during an interval of intermittent water delivery at the Lower Reaches of Tarim River, China

CHEN Yongjin^{1,2,*}, LIU Jiazhen¹, CHEN Yaning², LI Xingong², ZHU Haiyong¹

1 School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng City, 252059, China

2 National Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

Abstract: Tarim River is located in south Xinjiang, northwest China. With a length of 1321 km, it is one of the longest inland rivers in the world. The name translates to “Water of Life”, and certainly the river plays a key role in the development of the local society and the health of the ecosystem. Water resource development driven by irrational exploitation and increases in water utilization at the upper reaches over the past five decades has greatly disturbed the natural distribution of water resources within the valley. One major consequence is that more than 321 km of the watercourse has been drained after the Daxihaizi Reservoir was built in the 1970s. Consequently, groundwater depths along the dry watercourse increased leading to continual deterioration of groundwater quality. Along with fall in groundwater level and deterioration of groundwater quality, was the deterioration of the desert riparian system at the lower reaches of Tarim River. The desert riparian system reached a state of collapse; the area of *Populus euphratica* forest, the main tree species of the region, declined from 5.4×10^4 — 0.523×10^4 hm² along the lower reaches of Tarim River, while the area covered by shrub and meadow decreased by 200 km². In addition, a total area of 12,300 km² experienced desertification. To prevent the continued deterioration of the ecosystem along the dried-up watercourse and to prevent further desertification, a water delivery project has been carried out. Starting from May 2000, the water in Boston Lake was intermittently supplied to the

基金项目:国家自然科学基金(40901276, 40871239, 40871059); 中国博士后基金(2012M512058); 山东省优秀中青年科学家奖励基金(2011BSB01256)资助

收稿日期: 2011-12-26; 修订日期: 2012-08-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yongjincheng2004@yahoo.com.cn

dry watercourse. By December 2006, 11 intermittent water releases had been carried out. The released water played a critical role in vegetation recovery. However, from December 2006—June 2010, the ecological water delivery ceased. This provided a research opportunity for studying the stability of the ecosystem at the lower Tarim River after seven years of introduced water deliveries. The aims of this study were to 1) describe the variations in groundwater depths and the quality of groundwater during the four year long interval of no water delivery, 2) depict the variations in vegetation species diversity during the interval, 3) explain the relationships between groundwater and species diversity. Based on the monitoring data of groundwater depths, groundwater chemistry and species of vegetation, the variations in species diversity and related factors were analyzed. It was found that the average of groundwater depths in 2006 was approximately 5 m, while they were > 6.5 m in 2010. The Shannon-Weiner, Simpson, Margalef and Patrick and Cody indexes expressed a decreased change. In contrast, the Peilou Index showed an increased change, indicating that the ecosystem in the lower Tarim River is in a compromised state, even though seven years of introduced water delivery had been carried out. Both Non-Parameter Analysis and Redundancy Analysis confirmed that in the year 2006, species diversity had close relationships to total dissolved solids (TDS) of groundwater, while the relationship of species diversity to the depths of groundwater was not significant. In contrast, species diversity had a close relationship to the depths of groundwater in 2010 rather than TDS. Therefore, considering the relationship between variations in groundwater level and species diversity, it can be deduced that the rational groundwater depth in the lower Tarim River under the situation of water delivery is 5 m and the intimidated groundwater depth is 6.5 m.

Key Words: Tarim River; ecological water deliveries; species diversity; rational groundwater depth

物种多样性是一个地区生态系统健康稳定的基础^[1],反映某一群落内物种与物种、物种与环境之间的相互关系。物种多样性测定主要有 3 个空间尺度: α 多样性、 β 多样性指数、 γ 多样性^[2-5]。 α 多样性主要关注局域均匀生境下的物种数目,因此也被称为生境内的多样性。 α 多样性的度量有物种丰富度指数如 Margalef 指数、Patrick 指数等,均匀度指数如 Peilou 指数等,多样性指数如 Shannon-Weiner 指数、Simpson 指数等。 β 多样性指数则是指物种多样性时空维的变化程度。物种多样性的变化受诸多因素的影响^[6-8],在干旱区主要受水分及盐分的影响^[9-17]。

干旱内陆河流域由于自然变化与人为活动的干扰,水资源时空配置异化,带来河流下游荒漠河岸林生态系统的退化。塔里木河下游应急生态输水对挽救濒临死亡的胡杨柽柳林起到雪中送炭的效果(输水相关信息见表 1)。学者对塔里木河下游输水条件下地下水位水质变化以及植被生理生态响应等进行了大量研究,发现了地下水水质随地下水位的变化而成升—降—升阶段性变化的特点^[18-21]、生态输水使沿河两岸的植物得到了复壮,胡杨、柽柳等植物体内的脯氨酸、SOD 和水势等生理指标都对地下水位的变化有明显响应^[22-27],随着输水的进行群落物种多样性有显著变化,地下水位变化是影响物种多样性的最关键环境因子^[28-37]、土壤水盐与养分状况对物种多样性也有直接影响^[38-39]。而对于输水间歇地下水位、水质变化及其对物种多样性影响的研究更为少见。本文利用 2006 年和 2010 年塔里木河下游地下水埋深、地下水水质和植物样地调查资料,分析从 2006 年到 2010 年的输水间歇地下水位、水质和物种多样性的变化,研究分析经过连续输水后塔里木河下游荒漠河岸林生态系统自维持能力,探讨输水条件下基于物种多样性的合理生态地下水位和胁迫水位,为下游地区物种多样性的恢复提供科学参考,为干旱内陆河流域的水资源管理和生态保护提供科学依据。

1 研究区概况

塔里木河全长 1321 km,是我国最长,也是世界著名的内陆河。其上游为肖夹克至英巴扎段,中游为英巴扎至卡拉水库段,下游为卡拉水库至台特玛湖。研究区属于典型的暖温带大陆性干旱气候区^[21],根据铁干里克气象站的观测资料,年均气温 10.5℃,平均年降水量 17.4—42.0 mm,年潜在蒸发量 2500—3000 mm,沙尘暴日数 8.2 d,风沙危害严重。由于多年断流,地下水位大都下降到 8—12 m,地下水含盐量及矿化度都很高。

植物区系包括亚洲中部成分、中亚成分、古地中海成分和少量泛热带成分^[21],主要植物有胡杨(*Populus euphratica*),怪柳(*Tamarix ramosissima*)、黑刺(*Lycium ruthenicum*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)、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。

表 1 塔里木河下游历次输水信息统计

Table 1 Basic information of water delivery at the lower reaches of the Tarim River

次号 Water delivery	阶段 Stage	输水开始时间 Start date	输水结束时间 End date	输水量/($\times 10^8 \text{ m}^3$) Volume	水头到达位置 Site of water-head
第 1 次 1 st		2000-05-14	2000-07-12	0.98	喀尔达依
第 2 次 2 nd		2000-11-03	2001-02-05	2.25	阿拉干
第 3 次 3 rd		2001-04-01	2001-11-18	3.82	台特玛湖
第 4 次 4 th		2002-07-20	2002-11-10	3.31	台特玛湖
第 5 次 5 th	1	2003-03-02	2003-06-25	3.40	台特玛湖
	2	2003-08-04	2003-11-03	2.85	台特玛湖
第 6 次 6 th	1	2004-04-22	2004-06-25	1.02	台特玛湖
	2	2004-08-04	2004-11-03	2.85	台特玛湖
第 7 次 7 th	1	2005-04-18	2005-06-07	0.52	台特玛湖
	2	2005-08-30	2005-10-31	2.28	台特玛湖
第 8 次 8 th		2006-09-25	2006-11-29	2.33	考干
第 9 次 9 th		2010-06-25	2010-11-06	3.4	台特玛湖

2 数据采集与分析

2.1 数据采集

沿输水河道设置了 9 个监测断面,分别是阿克墩断面(A)、亚合甫马罕断面(B)、英苏断面(C)、阿布达勒断面(D)、喀尔达伊断面(E)、图格买莱断面(F)、阿拉干断面(G)、依干布及麻断面(H)以及考干断面(I)(图 1),用于监测生态输水后地下水位,水质的响应,在每个监测断面分别设置了 3—8 眼监测井,共计 40 眼监测井。对每眼监测井进行定期的地下水埋深和地下水采样测定,其测定方法为导线法,同进采集地下水水样,水样采集后当场密封,送入实验室进行化学分析,内容包括:矿化度、pH 值、总碱度、总硬度、电导率、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 等 13 项指标。同时,在每个断面每一监测井附近设置了植物调查样地,调查时间在 7 月底到 8 月初。因各断面植被长势不同,设置样地的大小有所差异,其中,5 m×5 m 的样地布设于草本群落的段面;30 m×30 m 的样地布设在植被生长稀疏或基本无草本植物的段面,以 15 m 为间隔设置 4 个 15 m×15 m 的乔灌木样方;50 m×50 m 的样地布设在乔、灌、草植被都占一定比例的段面,以 25 m 为间隔设置 4 个 25 m×25 m 的乔灌木样方,样方内设置 5 m×5 m 的草本样方,样地选定后用 GPS 定位,用木桩做固定标志。调查内容为植物种类组成、植被盖度、个体数目、

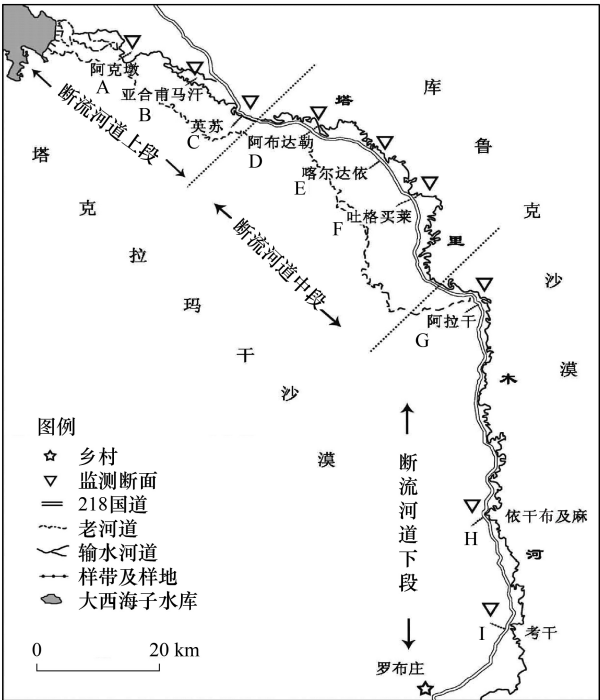


图 1 塔里木河下游植物样地与地下水监测井布设示意图

Fig.1 Distributions of transects and investigating sections in the lower reaches of the Tarim River

株高、冠幅、乔木胸径等指标。

2.2 数据处理分析

2.2.1 多样性指标

本文相应选取了反应物种丰富度的 Margalef 指数;反映物种均匀度 Pielou 指数;以信息公式表示多样性的 Shannon-Wiener 指数;以及综合反映物种丰富度和均匀度的修正的 Simpson 指数。根据植物群落数量特征的样方调查结果,分别计算各个物种的重要值 P_i ,计算公式见文献^[40]

因重要值考虑了频度、盖度、个体数及生物量等参数,从而避免了以单一的个体数来测度物种多样性指标导致的偏差,故以重要值作为物种多样性的测度依据,计算出样地植被的多样性指数,具体计算公式见文献^[40]。

为了研究物种多样性随时间的变化,采用 β 多样性指数中的 Cody 指数(β):

$$\beta = [g(H) + I(H)]/2 \quad [41] \quad (1)$$

式中, $g(H)$ 是沿生境梯度(或时间跨度)增加的物种数目; $I(H)$ 是沿生境梯度(或时间跨度)失去的物种数目,即在上一个梯度中存在的而在下一个梯度中没有的物种数目。在空间维上得到的 β 值称为物种替代速率^[42],时间维上得到的 β 值称为物种恢复或消亡速率^[2,43]。为了更好地体现植物物种的增加或减少,我们对 β 多样性指数计算公式进行修正,使 $g(H)$ 取正值, $I(H)$ 取负值,以直观地从 β 值上观察到植物物种多样性的变化方向。修正后的公式为:

$$\beta = [g(H) - I(H)]/2 \quad (2)$$

2.2.2 排序方法

冗余分析(RDA)是一种直接梯度分析方法,能从统计学的角度来评价一个或一组变量与另一组多变量数据之间的关系。本文选择2006年与2010年塔里木河下游29个样地的物种多样性、丰富度与均匀度指标,及相应井位点的地下水矿化度、电导率、酸碱度、总碱度、总硬度与地下水位6个环境因子指标进行分析。每一年的分析采用了2个数据文件,即物种多样性数据文件与环境因子数据文件,用DCA估计排序轴梯度长度(LGA),结果表明排序轴最大的梯度长度2006年为0.992,2010年为1.344均小于4,表明数据文件均具有较好的线性,即多样性对生态梯度的响应是线性的。数据处理过程中对物种经过了中心化和标准化处理,样方没有中心化,用499次的蒙特卡罗检验来考察,整个分析过程在Canoco4.5软件中完成。

3 结果与分析

3.1 α 多样性变化

2006年Margalef指数在7.734—1.09之间,2010年下降为1.24—0.25之间,下降幅度最大的断面是亚合甫马罕断面,随着距离输水源头大西海子水库距离的增加下降幅度呈减小趋势(图2)。

塔里木河下游河道的断流时间从阿克墩断面到考干断面逐渐递增,地下水埋深也从阿克墩断面到考干断面逐渐增加。2000年开始的生态输水受益最大的是距离大西海子水库较近的监测断面,亚合甫马罕断面2006年地下水埋深在3 m左右,这为浅根系草本植物物种的生长提供了条件,该断面物种数达13个;输水停止后,地下水埋深不断增加,不少草本植物因根系无法获取充足的水分而枯死。2010年,亚合甫马罕断面物种数仅有7个,接近一半的物种消失。

Patrick指数从2006年到2010年在下游各断面以下降为主,其中下降幅度最大的是亚合甫马罕断面:2006年该断面各样地平均物种数为9.5,2010年则为5.5,下降幅度达42%。只有阿拉干断面丰富度呈增加变化,而阿克墩、阿布达勒、喀尔达伊以及依干布及麻断面丰富度变化幅度较小(图2)。

种的均匀度是反映群落各物种个体数目分配的均匀程度的一项指标。与2006年相比,2010年下游各断面Pielou指数有的增加,有的降低,还有的基本未变。但下降断面的下降幅度远小于上升的幅度,因此,从总体看物种均匀度指数以上升为主。一个区域物种多样性下降,其均匀度就高,这从一个侧面揭示了物种多样性的降低(图2)。

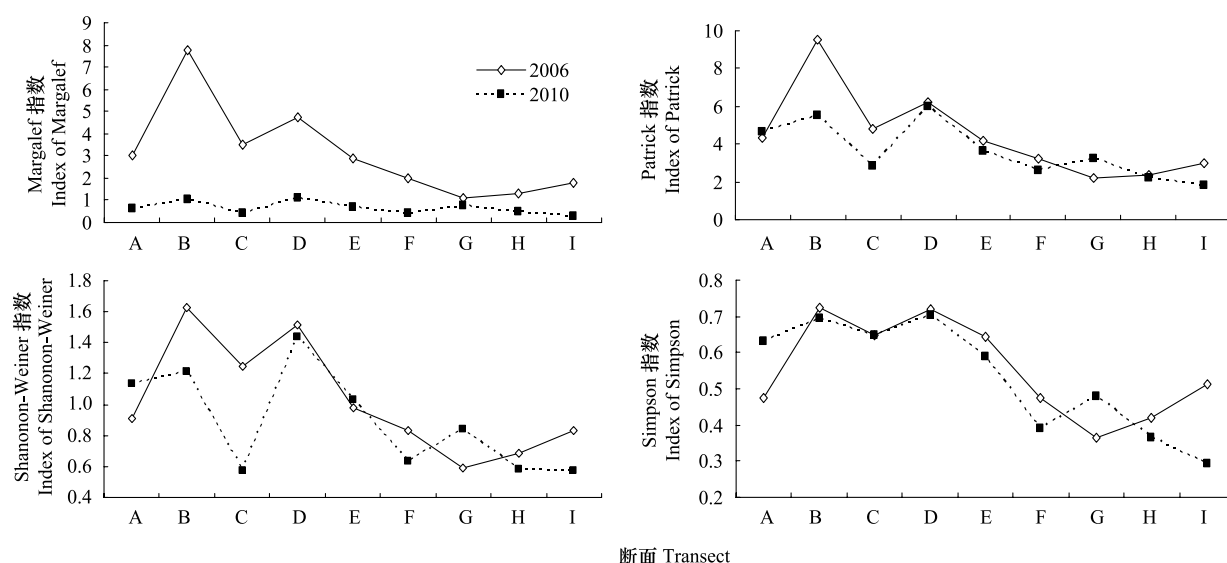


图2 塔里木河下游输水停止前后物种多样性的变化

Fig. 2 Variations in vegetation diversity between 2006—2010

多样性指数是丰富度和均匀性的综合指标。2006 年下游 9 个断面物种 Shannon-Weiner 指数在 0.5876—1.6233 之间,2010 年 Shannon-Weiner 指数在 0.5696—1.4368 之间,物种多样性整体表现出下降趋势。不论是 2006 年还是 2010 年塔里木河下游 9 个监测断面中处于上段断面 Shannon-Weiner 指数都比下段高;从年度变化看,2010 年 Shannon-Weiner 指数低于 2006 年;英苏断面 2006 年 Shannon-Weiner 指数是 1.247,2010 年则变成了 0.570,下降幅度达 54%;考干断面,Shannon-Weiner 指数从 0.83 降至 0.57,下降幅度大于 30%。与多数断面不同的是阿克墩和阿拉干断面,这两个断面的 Shannon-Weiner 指数呈上升变化的特点(图 2)。

2006 年到 2010 年,塔里木河下游物种多样性 Simpson 指数的变化与 Shannon-Weiner 指数一样,以下降为主;2006 年下游各断面 Simpson 指数在 0.3629—0.7225 之间,2010 年变成 0.2945—0.7022 之间。从整个下游断面看,Simpson 指数的下降有随着距离尾端越近,幅度越大的特点;阿克墩断面是增加的,亚合甫马罕断面下降 0.03,阿布达勒断面下降 0.2,依干布及麻断面下降 0.06,图格买莱断面下降 0.09,考干断面下降 0.22。与 Shannon-Weiner 指数的变化特点相似,阿克敦断面和阿拉干断面 Simpson 指数也是呈增加变化;阿克墩断面 Simpson 指数 2006 年为 0.47544,2010 年增长至 0.63216,增长幅度为 33%;阿拉干断面 2006 年 Simpson 指数是 0.3629,2010 年变为 0.478894,增长幅度为 31.96%,略低于阿克墩断面(图 2)。

3.2 β 多样性的变化

图 3 是塔里木河下游 2006 年至 2010 年间物种多样性 β 指数的变化,从图上可行看出,在下游 9 个监测断面中,除第 1 个断面(A 阿克墩断面)和第 7 个断面(G 阿拉干断面)物种呈增加变化外,其它断面都以减小或不变为主,而且,有 6 个断面的物种呈减小变化,变化值在 -0.5 到 -3 之间。说明在间歇性输水停止后,物种多样性逐渐下降,塔里木河下游的生态系统尚处于不稳定状态。

3.3 物种多样性变化与水因子之间的关系

3.3.1 水盐环境因子的变化

比较 2006 年和 2010 年塔里木河下游代表性监测井地下水埋深变化情况,可以看出,输水停止后几乎所

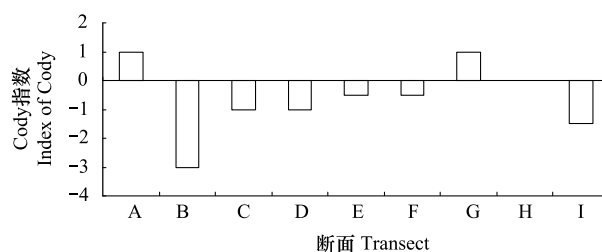


图3 塔里木河下游输水停止前后物种多样性 Cody 指数的变化

Fig. 3 Variations in Cody index between 2006—2010 at the lower Tarim River

有的监测井地下水埋深都呈增加变化,即,地下水位是下降的。单因素方差分析结果表明,2010 年和 2006 年塔里木河下游各监测井地下水埋深差异显著。2010 年整个下游地下水平均埋深远离大西海子水库的断面水位下降幅度大,但考干断面地下水埋深不增反减,这可能是地下水从地势较高处下低洼方向运动的运动规律所使然。从垂直河道方向看,距离输水河道越近,地下水埋深变化幅度越大,喀尔达伊断面和阿拉干断面距离河道最远的监测井水位都呈小幅度上升。

图 4 是塔里木河下游各生态监测断面代表性监测井 2006 年与 2010 年地下水埋深变化图,从图上可以看出,除个别远离输水河道和远离大西海子水库断面的监测井地下水埋深有所减小外,绝大多数的监测井地下水埋深随着时间的变化而增大。统计结果表明,2006 年塔里木河下游各监测井地下水平均埋深是 5.33 m,2010 年是 6.5 m,平均埋深增加了 1.17 m。虽然 2010 年的最大埋深 9.52 m 比 2006 年的 10.83 m 有所减小,但最小埋深却增加了 1.02 m(表 2)。

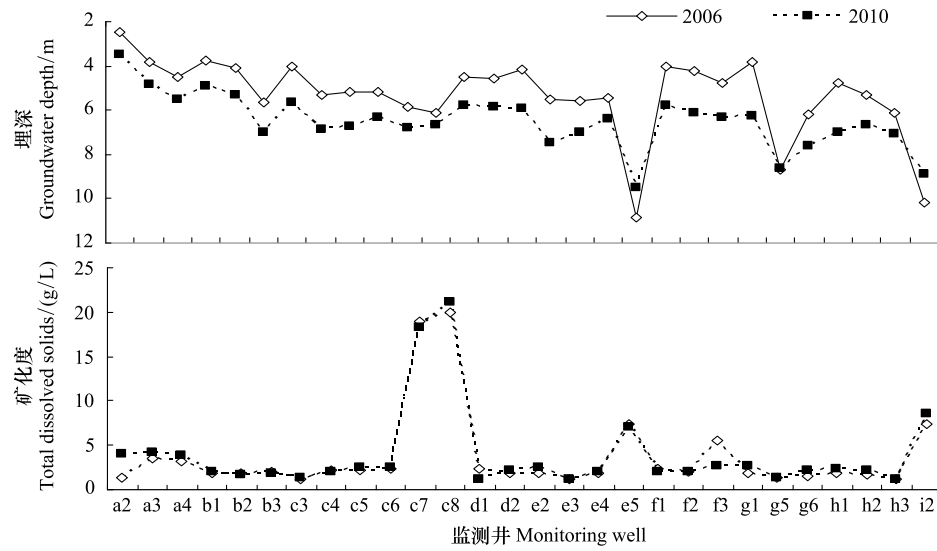


图 4 塔里木河下游 2006—2010 年地下水埋深与地下水矿化度的变化
Fig.4 Variations in depth and TDS of groundwater during 2006—2010 at the lower Tarim River

表 2 塔里木河下游 2006 年与 2010 年地下水埋深的统计分析

Table 2 Statistics of groundwater depths in 2006 and 2010

年份 Year	样本数 N	均值 Mean	标准差 Std. Deviation	标准误 Std. Error	极小值 Minimum	极大值 Maximum
2006	29	5.33	1.82	0.34	2.49	10.83
2010	29	6.50	1.23	0.23	3.51	9.52
合计 Total	58	5.92	1.65	0.22	2.49	10.83

输水停止后,河道两侧地下水矿化度有所增加,但增加幅度很小(图 4)。从 2006 年与 2010 年各监测井地下水矿化度含量曲线几乎看不出明显的变化。统计结果表明,2010 年各监测井地下水矿化度平均含量比 2006 年仅增加 0.168 g/L(表 3)。

3.3.2 物种多样性与地下水水质、埋深关系分析

(1)非参数相关分析

把 2006 年塔里木河下游物种多样性与地下水埋深、地下水水质进行非参数 Spearman 相关性分析,结果表明 Shannon-Weiner 指数,Margalef 指数和 Patrick 指数和覆盖度与地下水矿化度都表现为显著相关,物种多样性与地下水埋深相关性都不显著(表 4)。

表 3 塔里木河下游 2006 年与 2010 年地下水矿化度的统计分析

Table 3 Statistics of total dissolved solids in groundwater depths in 2006 and 2010						
年份 Year	样本数 N	均值 Mean	标准差 Std. Deviation	标准误 Std. Error	最小值 Minimum	最大值 Maximum
2006	28	3.71	4.74	0.89	1.18	19.97
2010	28	3.87	4.78	0.90	1.20	21.13
总计 Total	56	3.79	4.72	0.63	1.18	21.13

表 4 2006 塔里木河下游物种多样性与地下水埋深和矿化度相关性分析

Table 4 Nonparametric correlations between species diversity and depth and TDS in groundwater of the year 2006						
	Shannon-Weiner 指数 Shannon-Weiner Index	Marglef 指数 Marglef Index	Pielou 指数 Pielou Index	Patrick 指数 Patrick Index	地下水埋深 Groundwater depth	矿化度 TDS
Shannon-Weiner 指数 Shannon-Weiner Index	1.000	0.835 **	0.505 **	0.835 **	-0.178	0.406 *
Marglef 指数 Marglef Index	0.835 **	1.000	0.068	1.000 **	-0.308	0.456 *
Pielou 指数 Pielou Index	0.565 **	0.342 *	0.827 **	0.068	0.151	-0.036
Patrick 指数	0.835 **	1.000 **	0.068	1.000	-0.308	0.456 *
地下水埋深 Groundwater depth	-0.178	-0.308	0.228	-0.308	1.000	0.002
矿化度 TDS	0.406 *	0.456 *	-0.110	0.456 *	0.002	1.000

** 置信水平为 0.01 (双尾检验); * 置信水平水平 0.05 (双尾检验).

2010 年物种多样性 Shannon-Weiner 指数、Patrick 指数都与地下水埋深显著相关,与地下水矿化度相关性不显著(表 5)。

表 5 2010 塔里木河下游物种多样性与地下水埋深和矿化度相关性分析

Table 5 Nonparametric correlations between species diversity and depth and TDS in groundwater of the year 2010						
	Shannon-Weiner 指数 Shannon-Weiner Index	Marglef 指数 Marglef Index	Pielou 指数 Pielou Index	Patrick 指数 Patrick Index	地下水埋深 Groundwater depth	矿化度 TDS
Shannon-Weiner 指数 Shannon-Weiner Index	1.000	0.866 **	0.399 *	0.924 **	-0.606 **	-0.035
Marglef 指数 Marglef Index	0.866 **	1.000	0.130	0.921 **	-0.208	-0.297
Pielou 指数 Pielou Index	0.399 *	0.130	1.000	0.076	-0.233	-0.158
Patrick 指数 Patrick Index	0.924 **	0.921 **	0.076	1.000	-0.537 *	-0.129
地下水埋深 Groundwater depth	-0.580 **	-0.208	-0.233	-0.487 *	1.000	-0.136
矿化度 TDS	-0.035	-0.297	-0.158	-0.129	-0.136	1.000

** 置信水平为 0.01 (双尾检验); * 置信水平水平 0.05 (双尾检验)

比较 2006 年和 2010 年物种多样性与地下水埋深与地下水水质相关性可以这样推测:2006 年地下水埋深基本能满足植物生长的需要,这时候,水质就成为植物进一步向良化发展的限制因子,2010 年的地下水矿化度比 2006 年有所增加,但埋深下降幅度更大,多数草本植物都无法继续生存,地下水位成为下游地区植物生长的制约因子。

(2)排序分析

2006 年物种多样性与环境因子的排序结果如图 5 所示,图中,空心圆点表示样地,空心箭头射线分别代表物种多样性、丰富度与均匀度的变化趋势,环境因子用带实心箭头的线段表示,连线的长短表示样地、植物种类分布与该环境因子关系的大小,箭头连线方向与排序轴的夹角表示该环境因子与排序轴相关性的 大小,箭头所指的方向表示该环境变量值的增大趋势。分析时,可以做出某一样点到环境因子射线(或多样性射线)的垂直投影点,垂直投影点与环境因子实心箭头(或多样性空心箭头)越近,表示该种样点与该类生境因

子的正相关性越大(或表示该样方中物种的多度值越大)。空心射线与实心射线夹角的余玄值代表多样性与环境因子变量的相关性大小。

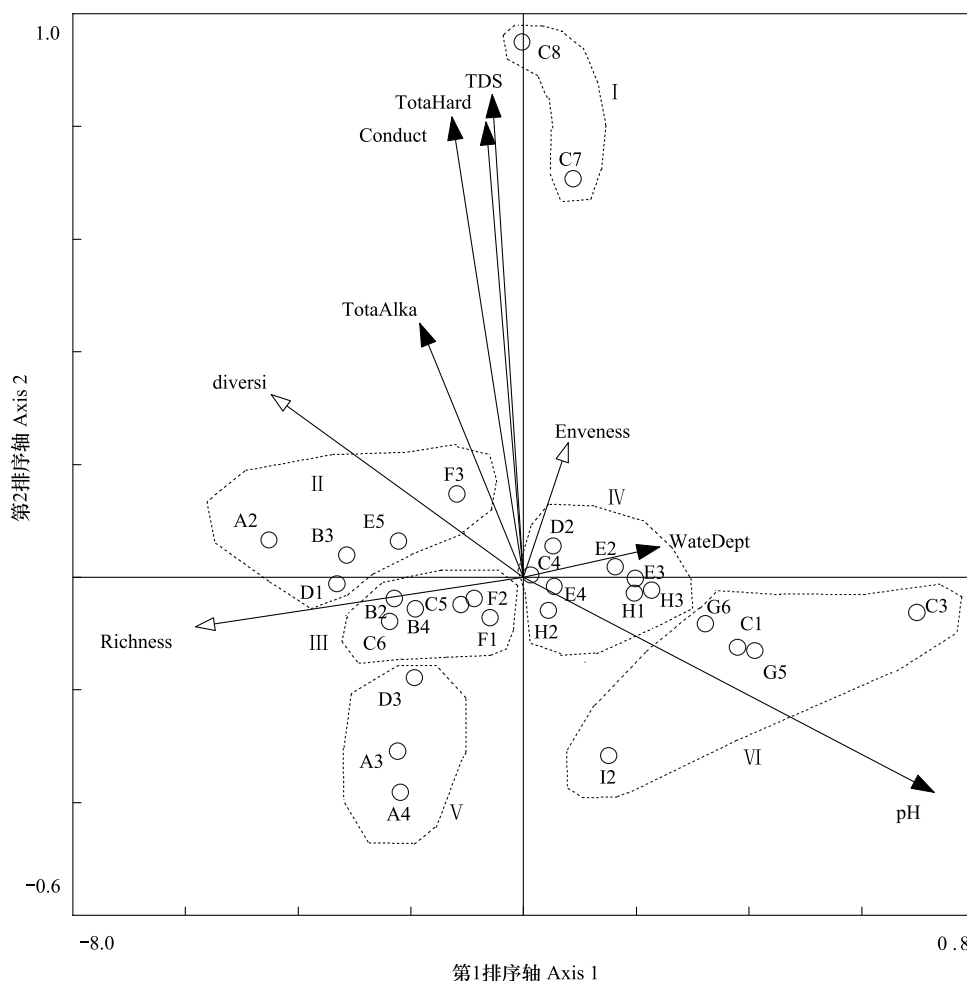


图 5 2006 年塔里木河下游物种多样性与环境因子的 RDA 排序图

Fig. 5 The graph of RDA ordination for diversity in the lower reaches of Tarim River in 2006

图中样点与环境因子箭头共同反映出物种多样性沿每一环境因子梯度的变化特征,约束性排序轴(第一排序轴)、第二排序轴、第三排序轴的特征值分别为 0.420,0.284 和 0.035。第一排序轴与 pH 值与地下水埋深呈正相关(0.4140,0.1372)与其它 4 个因子呈负相关,第二排序轴与矿化度、电导率、总硬度呈较强正相关(0.6257,0.5966,0.5901),与其它 4 个因子相关性较小。第一轴可以反映地下水的酸性,第二轴可以代表地下水盐分状况。较高的地下水位在强烈蒸发作用下,往往导致盐分含量因蒸发浓缩而升高,不利于对高盐分含量耐受性低的物种的生长。样地 A2,B3,E5,F3 位于第一象限内,这些样地的矿化度较高。在第二象限出现的样地有 C7、C8 与 D2、C4、E2,这些样地的多样性指数变化在 1.02—1.19 之间,依次分布于高矿化度与矿化度居中区,其余大部分样地分布在第三、第四象限,趋向于低矿化度方向分布。

根据地下水中盐度因子对物种多样性的分布影响可把这些样地分为 3 个大区:第一大区是高矿化度区,此区域分布两种类型的样地即高多样性低丰富度(组 I)与高多样性高丰富度组(组 II),除 A2、D1 外此区域样地大部分分布在远河道处。第二大区为中矿化度区,此区域包括高多样性高丰富度(组 III)与低多样性低丰富度组(组 IV)两个类型,除 H3、B4 外此区域的样地大部分分布在近河道或中距离处。第三大区为低矿化度区,此区域包括低多样性高丰富度(组 V)与低多样性低丰富度组(组 VI)。

图 6 是 2010 年物种多样性与环境因子的排序结果,图中第一排序轴、第二排序轴、第三排序轴的特征值

分别为 0.569、0.268 和 0.007。第一排序轴与总硬度、矿化度、电导率呈正相关,相关系数依次为 0.9054、0.8864、0.6992,与其它 3 个因子相关性较小,第二排序轴与地下水埋深呈较强正相关(0.3551),而与总碱度呈负相关(0.3216),与其它因子相关性较小。第一轴可以代表地下水盐度,第二可以看成地下水埋深轴。物种多样性射线与矿化度呈正相关性,而与地下水位呈明显负相关。物种丰富度指标与地下水埋深、矿化度均呈明显负相关。丰富度指数与地下水的酸碱性呈较大正相关。样地 G1、D1、F1、A2、B2 等位于第一象限内,这些样地的地下水埋深较浅,样地分布于近河道处,物种多样性接近均值,但物种丰富度较大。在第二象限出现样地 C7、C8,与 2006 年相同,此样地的多样性指数较高但丰富度较低,地下水位较高。其余大部分样地分布在第三、第四象限,趋向于地下水埋深较大的方向分布。

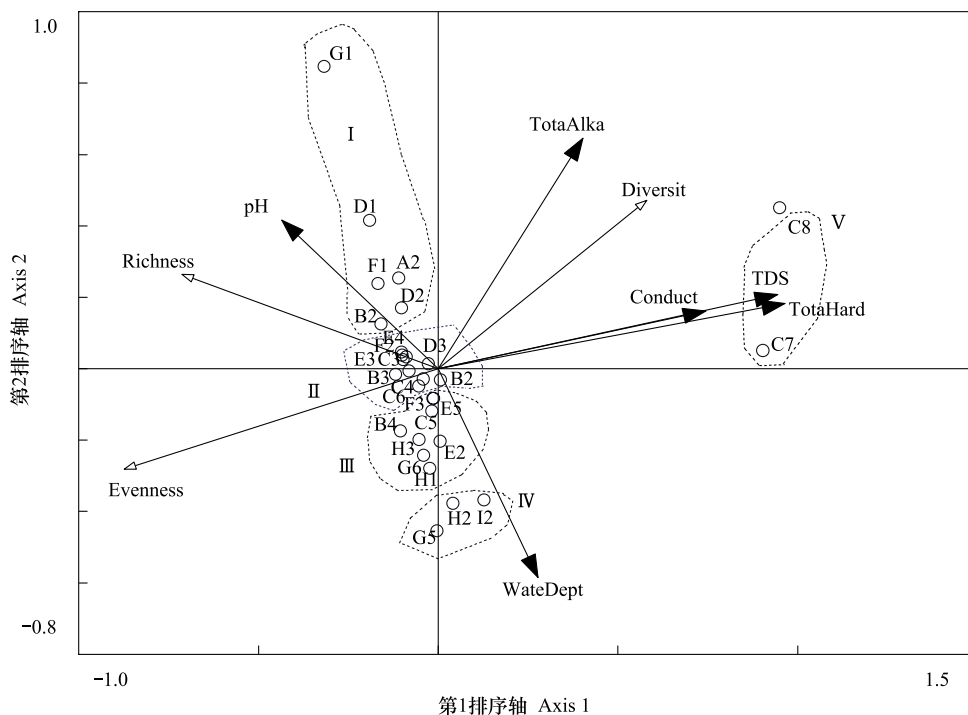


图 6 2010 年塔里木河下游物种多样性与环境因子的 RDA 排序图

Fig. 6 The graph of RDA ordination for diversity in the lower reaches of Tarim River in 2010

根据地下水埋深对物种多样性分布的影响可把 2010 年样地分为 3 个大区:第一大区是高水位区,此区域的样地群落为高多样性高丰富度(组 I),分布于近河道处。第二大区为中水位区,此区域包括低多样性中丰富度(组 II)与高多样性低丰富度组(组 V)两个类型,其中组 V 的样地分布在远河道处,组 II 的样地大部分分布在近河道或中距离处。第三大区为高水位区,此区域包括低多样性中丰富度(组 III)与低多样性低丰富度组(组 IV),除 E2 外其它样地分布远河道及河流末端处。

经过连续 7a 的输水,2006 年塔里木河下游平均地下水埋深 5.3 m 左右,在下游上段以及距离河道近处一般在 3 m 左右,该水位条件能够满足干旱区植被正常生长的需要,因此,地下水埋深对物种多样性的影响下降。地下水埋深对物种多样性的影响较小,不是制约物种多样性的关键因子。2010 平均地下水埋深超过 6.5 m,此水位条件不能满足根系较浅的草本植物的生长,地下水埋深成为影响物种多样性的重要因子。

4 讨论

生态安全是区域安全的基础,物种多样性的变化与生态系统的健康息息相关。塔里木河自 2006 年第 8 次应急输水后直到 2010 年 6 月才进行第 9 次输水,相对较长时间的输水间歇检验塔里木河下游地区物种多样性的影响如何,受损生态系统是否达到自维持水平是一个良好的机会。物种多样性多项指标都表明,输水停止后物种多样性不断下降,生态环境依然脆弱。各监测断面 Shannon-Weiner 指数从 2006 年到 2010 年总体

上呈下降变化,只有阿克墩断面和阿拉干断面呈上升趋势。究其原因,阿克墩断面距离大西海子水库最近,每次输水阿克墩最先受到输水的影响,受输水影响的时间最长,所以水分条件最好,这里芦苇茂密,很少有其它物种存在。2006 年以后由于长期处于输水的间歇,地下水埋深不断增加,芦苇高度、密度都大幅度下降,为其它物种的入侵提供了条件,所以物种多样性呈增加变化。阿拉干断面物种多样性的增加则是由于靠近河道的第一个植物样地植物物种从只有胡杨和怪柳两种,由于在这里实施了人工抚育恢复,使得该断面物种多样性增加。

Simpson 指数被认为是反映群落优势度较好的一个指标,其值下降说明物种由于环境的影响优势度降低。塔里木河下游的输水始自 2000 年,到 2002 年,英苏断面物种多样性 Simpson 指数已经上升到 0.7,而 2006 年变成 0.64,2010 年基本没有变化。依干布及麻断面 2002 年 Simpson 指数是 0.26,2006 年上升至 0.479,2010 年又回落到 0.363,说明输水对物种多样性的维持和保护具有积极意义,但输水仍需进行。

β 多样性与 α 多样性一起构成了总体多样性或一定地段的生物异质性。反映 β 多样性指标的 Cody 指数从 2006 年到 2010 年 9 个监测断面中有 2 个断面为正值,6 个断面为负值,说明近 70% 断面物种减少,说明塔里木河下游生态恢复的任务依然艰巨。

物种多样性变化受水资源状况的影响^[45-47],这在干旱区尤为显著。塔里木河下游物种多样性与地下水埋深及水质非参数相关性分析结果表明,2006 年物种多样性 Shannon-Weiner 指数、Marglef 指数和 Patrick 指数都与地下水矿化度相关性显著,各多样性指数与地下水埋深的相关性都不显著;2010 年物种多样性 Shannon-Weiner 指数、Patrick 指数都与地下水埋深呈显著相关,各多样性指数与地下水矿化度相关性则不显著。RDA 排序结果进一步论证了非参数相关分析的结论。由此可见,水、盐状况对荒漠河岸林群落物种多样性有着重要影响,但它们并非同时起作用,当水分极度匮乏的时候,即使水质状况不好,也能满足植被一定程度的需要,而水量条件不成为植物生长的限制因子的时候,水质对植被的制约作用开始显现。

相关研究表明,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^[12,48]。刘加珍等将塔里木河下游地下水位按埋深划分为 6 个梯度分析地下水位变化对植物物种多样性的影响。发现草本植物丰富度受损发生在地下水埋深大于 4 m,木本植物丰富度受损发生在地下水埋深大于 8 m^[49]。郝兴明等研究发现,塔里木河下游地下水埋深 2—4 m 时,物种多样性最高,其次为 4—6 m,地下水埋深大于 6 m,物种多样性锐减,认为塔里木河下游物种多样性受损的临界地下水位为 6 m 左右^[50-51]。张佳等研究表明:塔里木沙漠公路防护林下草本植物层片物种多样性与地下水位与水质关系密切^[52];朱海勇等通过对塔里木河中游物种多样性变化与环境因子关系分析发现,物种多样性变化受地下水水质状况影响显著^[53]。从蒸发的角度看,当埋深大于 4 m,水分蒸发就已经非常微弱^[54];从水质与地下水埋深关系看,地下水矿化度在埋深 5 m 左右时最小^[19];从胡杨叶片脯氨酸含量看,当地下水埋深大于 5 m 时,脯氨酸含量急剧上升,表现出明显受胁迫状态^[24]。本研究中,物种多样性受地下水位影响较小的 2006 年的埋深为 5.3 m 左右,受地下水位制约较明显的 2010 年的埋深大于 6.5 m。因此,地下水埋深在 5 m 左右是塔里木河下游生态恢复的人工输水条件下物种多样性的合理水位,而地下水埋深大于 6.5 m 则是物种多样性的胁迫水位。

5 结论

(1) 在间歇性输水停止的近 4 年时间里,塔里木河下游各监测断面物种多样性 Shannon-Weiner 指数、Simpson 指数、Margalef 指数、Patrick 指数以及 Cody 指数都以下降为主,而 Peilou 指数则呈增加变化,表明该区域生态系统尚不具备自维持能力。

(2) 塔里木河下游间歇性输水停止后,地下水埋深从 2006 年的平均 5.33 m 增加到 2010 年的 6.5 m,平均增加了 1.17 m,即水位下降了 1 m 多;地下水矿化度增加幅度较小。

(3) 地下水平均埋深为 5 m 左右时,物种多样性主要受地下水质的影响,而当地下水平均埋深大于 6.5 m 时,物种多样性的制约因子则为地下水位。所以,从物种多样性角度看,塔里木河下游的合理水位应在 5 m 左

右,大于 6.5 m 则是物种多样性的胁迫水位。

References:

- [1] Ricklefs R E, Schluter D. Species diversity: regional and historical influences // Richlefs R E, Schluter, eds. Species Diversity in Ecological Communities: Historical and Geographical Perspectives. Chicago: The University of Chicago Press, 1993: 350-364.
- [2] Ma K P. The measurement of community diversity // Qian Y Q, Ma K P, eds. Principle and Methods of Biodiversity Studies. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1994: 141-165.
- [3] Cody M L. Towards a theory of continental species diversities: bird distributions over Mediterranean habitat gradients // Cody M L, Diamond J M, eds. Ecology and Evolution of Communities. Cambridge: Harvard University Press, 1975: 214-257.
- [4] Pielou E C. Mathematical Ecology. New York: John Wiley and Sons Inc. , 1977.
- [5] Hong W, Wu C Z. Modification of Shannon-Wiener index. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 1999, 7(2): 120-124.
- [6] Lin G J, Huang Z L, Zhu L, Ouyang X J. Beta diversity of forest community on Dinghushan. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(18): 4875-4880.
- [7] Zheng J K, Wei T X, Zheng L K, Da L Z, Chen Z F, Zhao J, Zhu W D, Sun H. Effects of landforms on α biodiversity in slope scale. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(6): 2254-2259.
- [8] Yue T X. Studies and questions of biological diversity. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(3): 462-467.
- [9] Zhou H H, Chen Y N, Li W H. Response of species diversity to the variations in water resource in the Oasis-desert Transition Zone. Progress of Natural Sciences, 2008, 18(7): 789-794.
- [10] He F L, Li Z Y, Zhao M, Wei Q S, Guo S J, Wang D Z. Natural vegetation succession and soil water change in fallow salinization cropland in Minqin Oasis, Gansu Province. Journal of Desert Research, 2010, 30(6): 1374-1380.
- [11] Zheng T, Li W H, Li J G, Wan J H. Characters of community diversity in the oasis-desert transition zone in lower reaches of Tarim River. Journal of Desert Research, 2009, 29(2): 241-247.
- [12] Chen Y N, Zhang H F, Li W H, Chen Y P. Study on species diversity and the change of groundwater level in the lowes reaches of Tarim River, Xinjiang, China. Advance in Earth Sciences, 2005, 20(2): 158-165.
- [13] Yang Z H, E Y H, Fang E T, Liu H J, Ma Q L, Zhan K J. Response of plant species diversity to water resources change in Minqin Oasis Fringe. Journal of Desert Research, 2007, 27(2): 278-282.
- [14] Du Q, Shen H L, Wang J H. Plant community structure and species diversity of desert steppe in Ningxia. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(2): 222-224.
- [15] He Z B, Zhao W Z. Spatial pattern of two dominant shrub populations at transitional zone between oasis and desert of Heihe River Basin. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(6): 947-952.
- [16] Zhao Y Z, Zhu Z Y, Liu Z L, Liang C Z, Wang W, Bao R N, Zhang T, Pei H. Analysis of plant diversity in oasis-deserta ecotone of North Xinjiang. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2003, 17(1): 100-109.
- [17] Zhang L J, Yue M, Zhang Y D, Gu F X, Pan X L, Zhao G F. Characteristics of plant community species diversity of oasis desert ecotone in Fukang, Xinjiang. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(3): 329-334.
- [18] Chen Y J, Chen Y N, Liu J Z, Li W H, Li J, Xu C C. Dynamical variations in groundwater chemistry influenced by intermittent water delivery at the lower reaches of the Tarim River. Journal of Geographical Sciences, 2005, 15(1): 13-19.
- [19] Chen Y J, Zhou K F, Chen Y N, Li W H, Liu J Z, Wang T. Response of groundwater chemistry to water deliveries in the lower reaches of Tarim River, Northwest China. Environmental Geology, 2008, 53(6): 1365-1373.
- [20] Chen Y J, Chen Y N, Liu J Z, Zhang E X. Influence of intermittent water releases on groundwater chemistry at the lower reaches of the Tarim River, China. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 158(1/4): 251-264.
- [21] Li W H, Hao X M, Chen Y J, Zhang L H, Ma X D, Zhou H H. Response of groundwater chemical characteristics to ecological water conveyance in the lower reaches of the Tarim River, Xinjiang, China. Hydrological Processes, 2010, 24(2): 187-195.
- [22] Chen Y P, Chen Y N, Li W H, Xu C C. Characterization of photosynthesis of *Populus euphratica* grown in the arid region. Photosynthetica, 2006, 44(4): 622-626.
- [23] Chen Y N, Wang Q, Ruan X, Li W H, Chen Y P. Physiological response of *Populus euphratica* to artificial water-recharge of the lower reaches of Tarim River. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(12): 1393-1401.
- [24] Chen Y N, Li W H, Chen Y P, Zhang H F, Zhuang L. Physiological response of natural plants to the change of groundwater level in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang. Progress in Natural Science, 2004, 14(11): 975-983.
- [25] Wang Q, Ruan X, Chen Y N, Li W H. Eco-physiological response of *Populus euphratica* Oliv. to water release of the lower reaches of the Tarim

- River, China. *Environmental Geology*, 2007, 53(2): 349-357.
- [26] Zhuang L, Chen Y N. Physiological response of *Tamarix ramosissima* under water stress along the lower reaches of Tarim River. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(9): 1123-1129.
- [27] Fu A H, Chen Y N, Li W H. Analysis on water potential of *Populus euphratica* oliv and its meaning in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(Suppl): 221-228.
- [28] Zhang Y M, Chen Y N, Pan B R. Distribution and floristics of desert plant communities in the lower reaches of Tarim River, southern Xinjiang, People's Republic of China. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63(4): 772-784.
- [29] Liu Y B, Chen Y N, Deng M J. Saving the "Green Corridor": recharging groundwater to restore riparian forest along the lower Tarim River, China. *Ecological Restoration*, 2007, 25(2): 112-117.
- [30] Hao X M, Chen Y N, Li W H. Indicating appropriate groundwater tables for desert river-bank forest at the Tarim River, Xinjiang, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 152(1/4): 167-177.
- [31] Yuan S F, Chen Y N, Li W H, Liu J Z, Meng L H, Zhang L H. Analysis of the aboveground biomass and spatial distribution of shrubs in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1818-1824.
- [32] Liu J Z, Chen Y N, Li W H, Chen Y P. Analysis on the distribution and degraded succession of plant communities at lower reaches of Tarim River. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 379-383.
- [33] Liu J Z, Chen Y N, Chen Y J, Zhang N, Li W H. Degradation of *Populus euphratica* community in the lower reaches of the Tarim River, Xinjiang, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(5): 740-747.
- [34] Zhang Y M, Chen Y N, Zhang X L. Plant communities and their interrelations with environmental factors in the lower reaches of Tarim River. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 903-910.
- [35] Chen Y N, Zhang X L, Zhu X M, Li W H, Zhang Y M, Xu H L, Zhang H F, Chen Y P. Analysis on the ecological benefits of the stream water conveyance to the dried-up river of the lower reaches of Tarim River, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 47(11): 1053-1064.
- [36] Chen Y N, Zilliacus H, Li W H, Zhang H F, Chen Y P. Ground-water level affects plant species diversity along the lower reaches of the Tarim river, Western China. *Journal of Arid Environments*, 2006, 66(2): 231-246.
- [37] Xu H L, Ye M, Song Y D, Chen Y N. The natural vegetation responses to the groundwater change resulting from ecological water conveyances to the lower Tarim River. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 131(1/3): 37-48.
- [38] Ma X D, Li W H, Zhu C G, Chen Y N. Spatio-temporal variation in soil moisture and vegetation along the lower reaches of Tarim River, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(15): 4035-4045.
- [39] Yang Y H, Chen Y N, Li W H. Soil properties and their impacts on changes in species diversity in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 602-611.
- [40] Zhang J T. *Method of Quantitative Vegetation Ecology*. Beijing: Technologic Public House of China, 1995.
- [41] Cody M L. Towards a theory of continental species diversity: birds distributions over Mediterranean habitat gradients // Cody M L, Diamond J M, eds. *Ecology and Evolution of Communities*. Cambridge: Harvard University Press, 1975: 214-257.
- [42] Ricklefs R E, Schluter D. Species diversity: regional and historical influences // Ricklefs R E, Schluter, eds. *Species Diversity in Ecological Communities; Historical and Geographical Perspectives*. Chicago: The University of Chicago Press, 1993: 350-364.
- [43] Zheng D, Li W H, Chen Y P, Liu J Z. Relations between groundwater and natural vegetation in the arid zone. *Resources Science*, 2005, 27(4): 160-167.
- [44] Brochway D G. Forest plant diversity at local and landscape scales in the Cascade Mountains of southwestern Washington. *Forest Ecology and Management*, 1998, 109(1/3): 323-341.
- [45] Lite S J, Bagstad K J, Stromberg J C. Riparian plant species richness along lateral and longitudinal gradients of water stress and flood disturbance, San Pedro River, Arizona, USA. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63(4): 785-813.
- [46] Riis T, Hawes I. Relationships between water level fluctuations and vegetation diversity in shallow water of New Zealand lakes. *Aquatic Botany*, 2002, 74(2): 133-148.
- [47] Zhang H F, Chen Y N, Li W H, Chen Y P. Grey incidence analysis between species diversity and groundwater level in the lower reaches of the Tarim River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(6): 705-712.
- [48] Liu J Z, Chen Y N, Li W H, Chen Y J. The process and mechanism of degradation of desert riparian vegetation. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(9): 946-956.
- [49] Hao X M, Chen Y N, Li W H. The relationship between species diversity and groundwater table in the low reaches of the Tarim River, Xinjiang, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4106-4112.

- [50] Hao X M, Li W H, Chen Y N. Water table and the desert riparian forest community in the Lower Reaches of Tarim River, China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(4): 838-847.
- [51] Zhang J, Li S Y, Jin Z Z, Lei J Q. Relationship between species diversity of herbaceous plants in the shelterbelt and environment factors. *Arid Zone Research*, 2011, 28(1): 118-125.
- [52] Zhu H Y, Chen Y J, Liu J Z. Variations in species diversity with the gradients of depths and quality in groundwater at the middle reaches of Tarim River. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(8/9): 1226-1234.
- [53] Zheng D, Li W H, Chen Y P, Liu J Z. Relations between groundwater and natural vegetation in the arid zone. *Resources Science*, 2005, 27(4): 160-167.

参考文献:

- [2] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 // 钱迎倩, 马克平. 生物多样性研究的原理与方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 141-165.
- [5] 洪伟, 吴承祯. Shannon-Wiener 指数的改进. *热带亚热带植物学报*, 1999, 7(2): 120-124.
- [6] 林国俊, 黄忠良, 竺琳, 欧阳学军. 鼎湖山森林群落 β 多样性. *生态学报*, 2010, 30(18): 4875-4880.
- [7] 郑江坤, 魏天兴, 郑路坤, 大林直, 陈致富, 赵健, 朱文德, 孙慧. 坡面尺度上地貌对 α 生物多样性的影响. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2254-2259.
- [8] 岳天祥. 生物多样性研究及其问题. *生态学报*, 2001, 21(3): 462-467.
- [9] 周洪华, 陈亚宁, 李卫红. 绿洲-荒漠带植物物种多样性特征对水资源的响应. *自然科学进展*, 2008, 18(7): 789-794.
- [10] 何芳兰, 李治元, 赵明, 尉秋实, 郭树江, 王多泽. 民勤绿洲盐碱化退耕地植被自然演替及土壤水分垂直变化研究. *中国沙漠*, 2010, 30(6): 1374-1380.
- [11] 郑田, 李卫红, 李建贵, 湾疆辉. 塔里木河下游绿洲荒漠过渡带群落多样性特征分析. *中国沙漠*, 2009, 29(2): 241-247.
- [12] 陈亚宁, 张宏峰, 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.
- [13] 杨自辉, 俄有浩, 方峨天, 刘虎俊, 马全林, 詹科杰. 民勤绿洲边缘物种多样性对水资源变化的响应. *中国沙漠*, 2007, 27(2): 278-282.
- [14] 杜茜, 沈海亮, 王季槐. 宁夏荒漠草原植物群落结构和物种多样性研究. *生态学杂志*, 2006, 25(2): 222-224.
- [15] 何志斌, 赵文智. 黑河流域荒漠绿洲过渡带两种优势植物种群空间格局特征. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 947-952.
- [16] 赵一之, 朱宗元, 刘钟龄, 梁存柱, 王炜, 宝日娜, 张韬, 裴浩. 新疆北部绿洲-荒漠过渡带植物种类多样性分析. *干旱区资源与环境*, 2003, 17(1): 100-109.
- [17] 张林静, 岳明, 张远东, 顾峰雪, 潘晓玲, 赵桂仿. 新疆阜康绿洲荒漠过渡带植物群落物种多样性特征. *地理科学*, 2003, 23(3): 329-334.
- [31] 袁素芬, 陈亚宁, 李卫红, 刘加珍, 孟丽红, 张丽华. 新疆塔里木河下游灌丛地上生物量及其空间分布. *生态学报*, 2006, 26(6): 1818-1824.
- [32] 刘加珍, 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏. 塔里木河下游植物群落分布与衰退演替趋势分析. *生态学报*, 2004, 24(2): 379-383.
- [34] 张元明, 陈亚宁, 张小雷. 塔里木河下游植物群落分布格局及其环境解释. *地理学报*, 2004, 59(6): 903-910.
- [38] 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.
- [39] 杨玉海, 陈亚宁, 李卫红. 新疆塔里木河下游土壤特性及其对物种多样性的影响. *生态学报*, 2008, 28(2): 602-611.
- [40] 张金屯. 植被数量生态学方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [47] 张宏峰, 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏. 塔里木河下游物种多样性与地下水位灰色关联分析. *冰川冻土*, 2004, 26(6): 705-712.
- [48] 刘加珍, 陈亚宁, 李卫红, 陈永金. 荒漠河岸植被的受损过程与受损机理分析. *地理学报*, 2006, 61(9): 946-956.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 张佳, 李生宇, 靳正忠, 雷加强. 防护林下草本植物层片物种多样性与环境因子的关系. *干旱区研究*, 2011, 28(1): 118-125.
- [52] 朱海勇, 陈永金, 刘加珍. 塔里木河中游水盐梯度下的物种多样性研究. *生态环境学报*, 2011, 20(8/9): 1226-1234.
- [53] 郑丹, 李卫红, 陈亚鹏, 刘加珍. 干旱区地下水与天然植被关系研究综述. *资源科学*, 2005, 27(4): 160-167.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 7 April, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research progress on chemical communication of development and host-finding of nematodes ZHANG Bin, HU Chunxiang, SHI Jin, et al (2003)
- Principles, indicators and sampling methods for species monitoring XU Haigen, DING Hui, WU Jun, et al (2013)

Autecology & Fundamentals

- Spatial distribution pattern of human-caused fires in Hulunbeir grassland ZHANG Zhengxiang, ZHANG Hongyan, LI Dongxue, et al (2023)
- Belowground biomass in Tibetan grasslands and its environmental control factors YANG Xiuqing, HUANG Mei, WANG Junbang, et al (2032)
- Analysis on variation characteristics of air temperature and ground temperature in Guilin from 1961 to 2010 CHEN Chao, ZHOU Guangsheng (2043)
- Winter bed-site selection by roe deer (*Capreolus capreolus*) in Huangnihe Nature Reserve ZHU Hongqiang, GE Zhiyong, LIU Geng, et al (2054)
- Leaf anatomical characteristics of the plants of grasslands in the Tibetan Plateau LI Quanfa, WANG Baojuan, AN Lihua, et al (2062)
- A research on summer vegetation characteristics & short-time responses to experimental warming of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau XU Manhou, XUE Xian (2071)
- Cytological study on microsporogenesis of *Solanum lycopersicum* var. Micro-Tom under high temperature stress PENG Zhen, CHENG Lin, HE Yanjun, et al (2084)
- A new plant height growth process model of *Caragana* forest in semi-arid loess hilly region ZHAO Long, WANG Zhenfeng, GUO Zhongsheng, et al (2093)
- Germination inhibitory substances extracted from the seed of seven species of *Quercus* LI Qingmei, LIU Yan, LIU Guangquan, et al (2104)
- Effects of water stress and fungicide on the growth and drought resistance of *Flaveria bidentis* CHEN Dongqing, HUANGFU Chaohe, LIU Hongmei, et al (2113)
- Characters of soil seed bank in copper tailings and its adjacent habitat ... SHEN Zhangjun, OU Zulan, TIAN Shengni, et al (2121)
- Changes of soil chemical properties after different burning years in typical steppe of Yunwun Mountains LI Yuan, CHENG Jimin, WEI Lin, et al (2131)
- Effects of water and fertilizers on nitrate content in tomato fruits under alternate partial root-zone irrigation ZHOU Zhenjiang, NIU Xiaoli, LI Rui, et al (2139)
- Effect of land use on the characteristics of organic carbon and labile organic carbon in soil aggregates in Karst mountain areas LI Juan, LIAO Hongkai, LONG Jian, et al (2147)
- Mobilization of inorganic phosphorus from soils by five azotobacters ZHANG Liang, YANG Yuhong, LI Qian, et al (2157)
- Physiological-ecological responses of *Iris germanica* L. to Cd stress and its accumulation of Cd ZHANG Chengxiang, CHEN Weifeng (2165)
- The available forms and bioavailability of heavy metals in soil amended with sewage sludge TIE Mei, SONG Linlin, HUI Xiujuan, et al (2173)
- LAI-based photosynthetic light response model and its application in a rainfed maize ecosystem SUN Jingsong, ZHOU Guangsheng (2182)
- The dominant species of predatory natural enemies of three kinds of planthoppers and impact of pesticides on natural enemies in paddy field LIN Yuan, ZHOU Xiazhi, BI Shoudong, et al (2189)

Population, Community and Ecosystem

- Spatial and temporal variation of picophytoplankton in the Pearl River Estuary ZHANG Xia, HUANG Xiaoping, SHI Zhen, et al (2200)

Analysis of the relationship between species diversity and hydrologic factors during an interval of intermittent water delivery at the Lower Reaches of Tarim River, China	CHEN Yongjin, LIU Jiazhen, CHEN Yaning, et al (2212)
Fish species composition and community pattern in the continental shelf of northwestern South China Sea	WANG Xuehui, LIN Zhaojin, DU Feiyan, et al (2225)
Distribution and succession of plant communities in Lake Bita coastal swamp on the plateau region, northwestern Yunnan	HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang (2236)
Analysis on community structure and quantitative characteristics of <i>Nitraria tangutorum</i> nebkhas at different succession stage in lower reaches of Shiyang River	JIN Hujia, MA Quanlin, HE Mingzhu, et al (2248)
Resource and Industrial Ecology	
Effects of subsoiling and supplemental irrigation on dry matter production and water use efficiency in wheat	ZHENG Chengyan, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al (2260)
Effects of two years' incorporation of leguminous green manure on soil properties of a wheat field in dryland conditions	ZHANG Dabin, YAO Pengwei, LI Jing, et al (2272)
Effects of planting with ridge and furrow mulching on maize growth, yield and water use efficiency in dryland farming	LI Rong, HOU Xianqing, JIA Zhikuan, et al (2282)
Urban, Rural and Social Ecology	
Effects of riparian buffers of North Mort of Beijing on air temperature and relative humidity	WU Fangfang, ZHANG Na, CHEN Xiaoyan (2292)
Characteristics of spatial and temporal variations of global solar radiation in Xi'an and relevant response in urban development	ZHANG Hongli, ZHANG Naweirui, LIU Minru, et al (2304)
Research Notes	
A analysis of macrofungal flora diversity in Langyashan Nature Reserve, Anhui Province, China	CHAI Xinyi, XU Xuefeng, WANG Meiyang, et al (2314)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 陈利顶

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 7 期 (2013 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 7 (April, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元