

DOI: 10.5846/stxb201305070960

白元, 徐海量, 张青青, 叶茂. 基于地下水恢复的塔里木河下游生态需水量估算. 生态学报, 2015, 35(3): 630-640.

Bai Y, Xu H L, Zhang Q Q, Ye M. Evaluation on ecological water requirement in the lower reaches of Tarim River based on groundwater restoration. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 630-640.

## 基于地下水恢复的塔里木河下游生态需水量估算

白 元<sup>1,2</sup>, 徐海量<sup>1,\*</sup>, 张青青<sup>1</sup>, 叶 茂<sup>3</sup>

1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054

**摘要:** 为探明生态输水后地下水响应带范围及地下水恢复下生态需水量, 以塔里木河下游大西海子水库至台特玛湖段为研究区, 基于 2000—2010 年生态输水和地下水埋深分布特征, 分析了塔里木河下游生态输水后两岸地下水位恢复状况, 并借助遥感和地理信息系统技术对研究区生态需水量进行了研究。结果表明: 塔河下游地下水位的抬升幅度与输水量的大小呈一定的正相关关系, 并存在一定的时效性。2004—2010 年地下水处于长期的负均衡状态, 多年下降幅度明显。塔河下游英苏、喀尔达依、阿拉干和依干不及麻断面地下水响应幅度分别为 1195、1050、2281 m 和 1000 m。历经 11a 输水后, 塔里木河下游地下水总恢复需水量为  $7.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 其中, 齐文阔尔河段为  $4.98 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 老塔里木河段为  $2.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 地下水恢复至生态水位 4.5 m 需要 5—8a 的时间。保护塔里木河下游大西海子以下所有天然植被面积 ( $96114.09 \text{ hm}^2$ ) 的生态需水量为  $0.587 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 保护下游地下水响应带天然植被面积 ( $41439.85 \text{ hm}^2$ ) 的生态需水量为  $0.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

**关键词:** 生态需水量; 地下水恢复; 植被; 塔里木河下游

## Evaluation on ecological water requirement in the lower reaches of Tarim River based on groundwater restoration

BAI Yuan<sup>1,2</sup>, XU Hailiang<sup>1,\*</sup>, ZHANG Qingqing<sup>1</sup>, YE Mao<sup>3</sup>

1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Urumqi 830011, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 School of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

**Abstract:** Located in the extremely arid region, Tarim River is the longest continental river in the northwest of China where the environment is vulnerable. Since the construction of Daxihaizi Reservoir in 1970's, the river channel in the lower reaches of Tarim River with 321km distances from the Daxihaizi Reservoir to Tatema Lake has been dried up for more than thirty years. Cut-off of river water along the lower Tarim River and the excessive and unbridled utilization of water resources resulted in a series of ecological environment problems such as groundwater level decline, natural vegetation deterioration, desertification acceleration and so on, which has been accelerating environmental degradation and strongly influenced local agricultural development. In order to conserve the natural vegetation and further to control the desertification and restore the severely degraded ecosystem, an emergency plan-the ecological water conveyance project (EWCP) for synthetically harnessing deteriorate ecological environment were implemented in the lower Tarim River since 2000. After 12 times of ecological water conveyance (The deadline is January 2011), the groundwater level showed some degree of raising along the main river channel of the lower reaches of Tarim River.

**基金项目:** 国家自然科学基金 (41171427, 31370551, 41101534)

**收稿日期:** 2013-05-07; **网络出版日期:** 2014-04-03

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuhl@ms.xjb.ac.cn

Groundwater level has played a key role in the degraded natural vegetation restoration due to the natural vegetation growth mostly depended on groundwater in extremely arid region. Ecological water requirement in the river channel along the lower Tarim river was highly related to elevation of the groundwater level while the elevation of groundwater level is supplemented from the EWCP. To estimate the requirement of the ecological water, firstly two main river along lower Tarim River channels were set up, including the new river channel from Daxihaizi reservoir to Taitema Lake and the old river channel from Daxihaizi reservoir to Alagan, then to analyze the response range of groundwater level to the ecological water conveyance and evaluate the ecological water requirement based on the groundwater restoration by investigating the response width of groundwater restoration after the ecological water conveyance. The phreatic evaporation method was applied to analyze the ecological water requirement in virtue of the Remote Sensing and GIS techniques. The results showed that: (1) The range of groundwater level change was positively related with the amount of water transferring to the channel in the Lower Tarim River. It was characterized by a temporal hysteresis with the response of the groundwater level to the amount of watering to the river channel. The groundwater level decreased obviously from 2004 to 2010, and that was in a negative equilibrium state. The response range of the groundwater to water transfer was 1195 metres, 1050 metres, 2281 metres, and 1000 metres in the transections of Yusu, Kaerdayi, Alagan, and Yiganbujima respectively. (2) After 12 times (for 11 years) of ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River, the total amount of water requirement based on the groundwater restoration was  $7.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ , including  $4.98 \times 10^8 \text{ m}^3$  from Daxihaizi reservoir to Taitema Lake and  $2.09 \times 10^8 \text{ m}^3$  from Daxihaizi reservoir to Alagan transaction. And it needs about 5 to 8 years that the groundwater depth elevate to 4.5m (equal to ecological groundwater level). (3) The amount of ecological water requirement for the natural vegetation protection is  $0.587 \times 10^8 \text{ m}^3$  to meet up with the requirement of the total area of  $96114.09 \text{ hm}^2$  of natural vegetation strip from Daxihai reservoir to Taitema Lake. Moreover, the amount of ecological water requirement is  $0.21 \times 10^8 \text{ m}^3$  for the natural vegetation protection zone of  $41439.85 \text{ hm}^2$  in the area of the groundwater level responding to the ecological water conveyance.

**Key Words:** ecological water requirement; undergroundwater restoration; vegetation; the lower reaches of Tarim River

对水资源可持续利用的愿望极大地推动了人们对水资源转换机制和合理使用途径的深入探索,生态需水成为当前生态学、水文学、环境学等领域的研究热点。事实证明,“忽视水资源与生态环境系统之间的关系”是 20 世纪水资源管理的失误,直接导致了生态环境的恶化,引发森林退化、生物多样性减少、河道断流和地下水位下降等诸多生态环境问题,并严重威胁人类的生存环境<sup>[1-2]</sup>。对极端干旱区生态系统而言,水是可持续发展的最重要因素,有水即为绿洲,无水即变荒漠。因此,为了保护荒漠地区的天然植被,需要对其合理生态需水量进行研究。

关于生态环境需水量的研究最早是在国外开展的,主要集中在河流生态环境需水方面。早在 1940 年,美国渔业与野生动物保护组织规定了维持河流的最小生态流量。90 年代以来,生态系统需水量研究成为全球关注的焦点,逐步从河流生态系统类型扩展到了森林、草地、湿地、湖泊、河口、等其他生态系统类型上<sup>[3]</sup>。目前,国内生态需水研究多集中在水资源供需矛盾突出以及生态环境相对脆弱和问题严重的干旱、半干旱和季节性干旱的半湿润区<sup>[4]</sup>。干旱区降水稀少,不足以维持其生态系统特别是非地带性天然植被组成的系统的正常运转,河水与地下水之间的相互补给和排泄构成水循环运动基本方式,补给地下水需水量是河流系统生态环境需水量的重要组成部分。1993 年世界银行发布的水资源政策文件明确了地下水可再生性维持的标准,即水资源开发利用总量决不能超过地下水补给量,但缺乏有关生态环境需水量的确定标准<sup>[5]</sup>。近年来,地表水与地下水之间的相互转换研究范围不断扩大,出现了“地下合理生态水位”、“地下生态警戒水位”和“盐渍临界水位”等概念<sup>[6-8]</sup>,目前常见的确定河流(渠)渗漏补给量的方法有水文学、地下水动力学法和试验法以及数值模拟等方法<sup>[9-10]</sup>。在地下水采补平衡的情况下,使地下水水位恢复到生态水位,这将有利于维护地下水生态环境不再恶化并逐渐改善。恢复地下水生态环境需水量是供给天然植被生长、发育需水的基础,

因此,以地下水资源合理开发利用及生态环境保护为目的的生态需水研究,已成为当今地下水资源研究领域十分重要的课题<sup>[11]</sup>。

近 50 年来,塔里木河源流区和中上游大规模引水和截流,导致下游地区因来水量日趋减少,造成大西海子水库以下长达 321 km 河段基本断流。自 2000 年开始向塔河下游断流 30a 的河道实施应急输水工程<sup>[12]</sup>。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<sup>[13-15]</sup>,发现了河水补给引起地下水位变动,其变化幅度随着远离河流而越来越小,变化时间随远离河岸越来越推迟,变动速率也随远离河流越来越小,地下水对生态输水的响应是逐渐实现的<sup>[16-17]</sup>,水位的时空差异导致了地表植被在时间和空间响应上的明显不同<sup>[18-19]</sup>,随着下水位下降,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<sup>[20-21]</sup>,生态输水对植物生理指标的影响是显著的,随着地下水位的降低,叶片相对含水量减少,脯氨酸、脱落酸因积累而增加<sup>[22-23]</sup>,生态输水使树木年轮生长发生了良性转变<sup>[24]</sup>,随着输水次数和年输水量的稳步增加,植被覆盖度、面积稳步增长<sup>[25]</sup>,地下水响应范围由第 1 次输水后的 450 m 宽增加扩大到了第 8 次的 3334 m,历经 8 次输水后,输水河道区域地下水净补给量达到  $7.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,占总下泄水量的 35.63%<sup>[26-27]</sup>,研究者计算塔里木河下游植被生态需水量在  $2.19-3.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[28-29]</sup>,由于植被面积及模型参数的不同造成计算结果存在较大差别。而对于近期治理规划后 2000—2010 年地下水恢复范围、生态补水后地下水恢复至生态水位的需水量以及 2010 年不同覆盖度植被生态需水量的研究较少<sup>[30]</sup>。

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,至 2011 年 1 月总计向下游输水 12 次,生态输水总计  $26.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。最初只是为了河道的完整,到恢复地下水位,最后达到生态环境的重建。随着生态输水的延续,地下水得到了初步的恢复,输水量应当根据下游生态环境及水文变化加以转变,将多余的水资源应用与生态恢复。本文考虑水文变异,然后借助遥感和 GIS 技术,对塔河下游地下水响应带的范围进行了界定,并以此为依据结合区域植被遥感分类结果中提取出的植被分布面积,对绿色走廊的植被生态需水量进行了研究,对于转变生态需水量的观念,同时为今后水资源的优化配置提供科学依据<sup>[31]</sup>。

## 1 研究区概况

塔里木河下游位于新疆维吾尔自治区南部尉犁县和若羌县境内,呈东南方向穿行于塔克拉玛干沙漠和库鲁克沙漠之间狭长的冲击平原(图 1)。该区是中国最干旱地区之一,年降水量仅 17.4—42.0 mm,年蒸发量(潜势)高达 2500—3000 mm,属于典型的大陆性干旱气候。20 世纪 50 年代以来,由于人类不合理的水土资源开发,塔河下游大西海子水库以下 321 km 河道断流,沿线地下水埋深多降至 8—12 m。由此造成河畔以胡杨林为主要建群种的自然植被严重退化,荒漠植被衰败,物种多样性下降,土地沙漠化和土壤盐渍化加剧,下游绿色走廊急剧萎缩,塔克拉玛干沙漠和库姆塔格沙漠呈合拢趋势<sup>[32]</sup>。自 2000 年开始向塔河下游断流 30a 的河道实施应急输水工程,下游生态环境有所好转,近河道地下水埋深逐年抬升。在干旱荒漠气候的控制下,该地区的地带性植被是温性灌木和半灌木。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为主要建群种的荒漠河岸林,主要有乔木胡杨(*Populus euphratica*),灌木主要有怪柳(*Tamarix ramosissima*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)和铃铛刺(*Halimodendron halodendron*),草本植物有芦苇

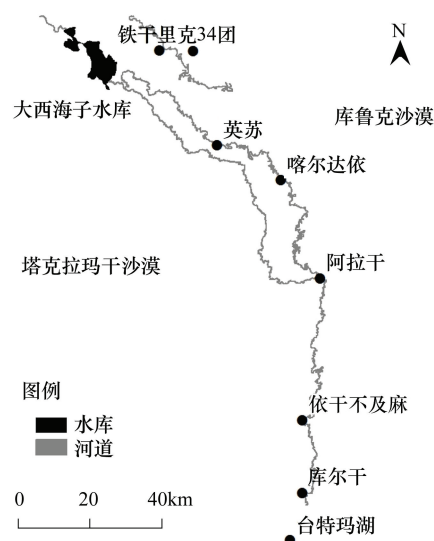


图 1 塔里木河下游水系分布及断面图

Fig. 1 River system distribution and transects in the lower reaches of Tarim River

(*Phragmites australis*)、罗布麻(*Poacynum hendersonii*)、疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、胀果甘草(*Glycyrrhiza inflata*)等耐盐草本植物。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源与处理

本文运用卫星遥感信息和 GIS 技术相结合的方法对景观要素的空间数据进行收集与分析,配合地表水与地下水监测断面数据,计算塔里木河下游天然植被生态需水量(图 2)。利用塔里木河干流地区 2010 年 8 月 Landsat 5-TM 影像,在 ENVI 中首先对 TM 影像辐射定标、大气校正,按照植被覆盖分类指标,进行波段运算,得到植被覆盖类型等级数据。利用 Arc/Map 进行数字影像 543 波段的彩色合成,利用目视判读和数字化工作,生成矢量化地图,再结合野外调查数据和 Google Earth 对解译结果进行人工修正。结合研究区域的实际情况和研究目的,将研究区天然植被主要划分为乔木、灌木、草地,采用叠加分析和缓冲区分析的方法,获得不同盖度下植被类型的面积,采用潜水蒸发模型定量计算天然植被需水量。将塔河下游自 2000 年生态输水开始实施至 2010 年输水结束看作一个时间整体,将该时段生态输水背景下形成的塔河下游地下水波动带作为地下水恢复研究区,结合合理地下水生态水位研究成果,利用 Excel2010 和 Spss 11.0 回归分析模块对地下水数据进行统计和分析,计算地下水恢复需水量。

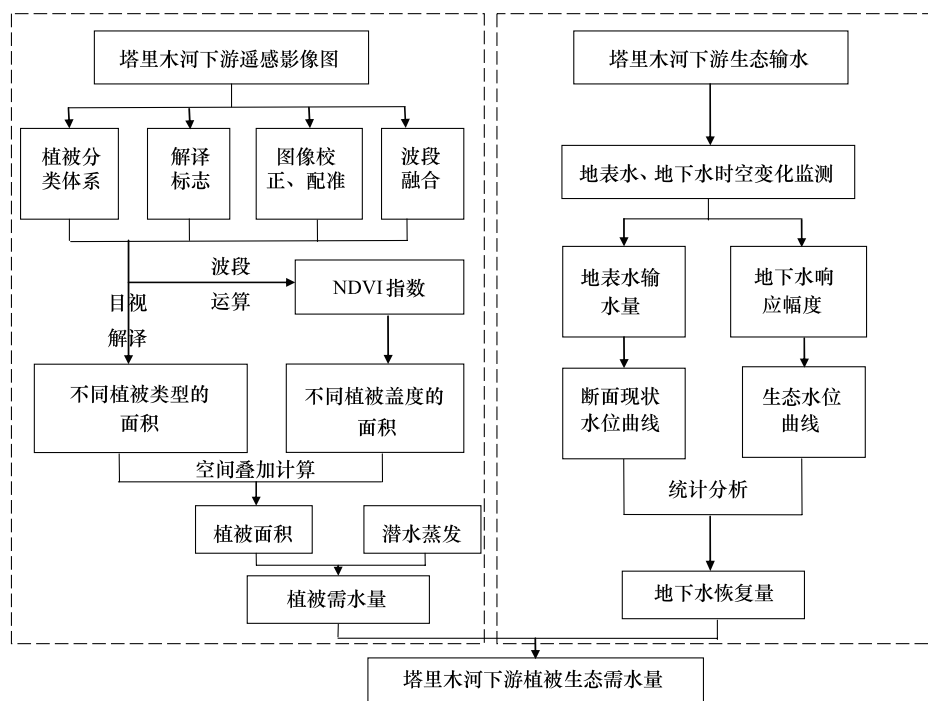


图 2 研究思路框图

Fig.2 Sketch line of technology

### 2.2 地下水波动

塔里木河下游在大西海子水库以下分为两支,北侧一支称为齐文阔尔河,南侧一支是老塔里木河,两河体大致呈平行状并在阿拉干处交汇后向南流入台特玛湖。为了解塔里木河下游地下水位的整体变化,沿塔里木河下游输水河道垂直方向上布设了 7 个监测断面,分别位于恰拉(近似替代大西海子)、英苏、老英苏、喀尔达依、阿拉干、依干不及麻和库尔干(近似替代台特玛湖)。

#### (1) 地下水监测

在每个断面上沿河道垂直方向按一定间距,50、150、300、500、750、1050 m 布设地下水监测井,井深 8—17 m,定期进行观测,输水资料来源于塔里木河流域管理局,本研究获取各监测井 2000—2010 年输水过程中

地下水埋深监测资料。

### (2) 地下水响应幅度

考虑到区域生态输水影响范围变化直接体现在区域地下水位及其辐射范围的变化上,因而本研究根据塔河下游 2004 年(代表生态输水最大的响应幅度)与 2010 年(代表研究时段内形成的塔河下游地下水响应幅度)的地下水位调查,采用两次输水的地下水埋深差值来计算地下水响应的幅度。各断面不同监测井的地下水位取年平均值,地下水响应幅度的公式:

$$GD_i = L_{mi} - L_{ni} \quad (1)$$

式中,  $GD_i$  为离河道  $i$  距离地下水响应的幅度,  $L_{mi}$ ,  $L_{ni}$  分别为 2010 年和 2004 年离河道  $i$  的地下水位。

### (3) 地下水恢复量

指将地下水位恢复到所需要的生态水位以后,维持这个水位不下降所需下泄的水量。塔河下游由于河道断流多年,造成地下水严重亏损,通过长期输水把河道附近最大有效影响范围内的地下水位上升到生态水位以后,地下水主要消耗于潜水蒸发和植被蒸腾,必须恢复到一定水位,称为地下水恢复水量<sup>[33]</sup>。地下水恢复至目标水位所需水资源量见图 3,对地下水恢复量采用以下公式计算:

$$Q = \mu \cdot \int_0^x [f_2(x) - f_1(x)] dx \quad (2)$$

$$\mu = M \cdot n$$

式中,  $f_1(x)$  为河床一侧 2010 年的地下水位线,  $f_2(x)$  为河床一侧适宜的生态水位线,  $x$  则表示河道对地下水的最大影响幅度;  $\mu$  为地下水位上升时的土壤含水量饱和差,  $M$  为水位变动带的饱和差,  $n$  为土壤干容重,参数根据宋郁东<sup>[34]</sup>等研究确定。

若在河道某河段上游断面的恢复水量为  $Q_{\text{上}}$ ,下游断面的恢复水量为  $Q_{\text{下}}$ ,两断面间的河道距离为  $L$ ,则在此区间内河段两岸的恢复总水量  $W$  为:

$$W = L \cdot (Q_{\text{上}} + Q_{\text{下}}) \quad (3)$$

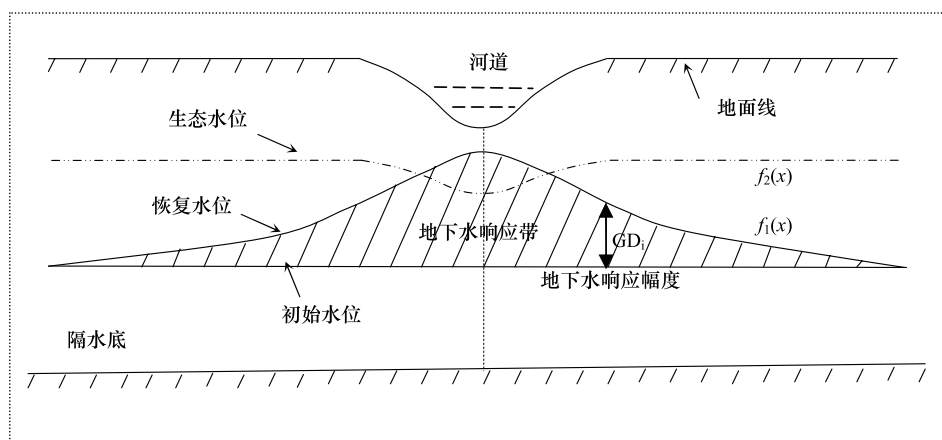


图 3 地下水埋深恢复示意图

Fig.3 Schematic of the groundwater depth recovery

## 2.3 植被盖度的计算

本文以植被指数估算植被盖度,利用归一化植被指数 NDVI,又称标准化植被指数,建立了归一化指数定量估计植被盖度模型。计算公式为<sup>[35]</sup>:

$$NDVI = \frac{CH4 - CH3}{CH4 + CH3} \quad (4)$$

式中, CH3 代表 TM 影像第三通道的反射值; CH4 代表 TM 影像第四通道的反射值。

利用 NDVI 计算植被覆盖度的模型在实际应用中是最方便也最普遍的,植被盖度通过其与 NDVI 植被指

数之间的关系得出(公式 5)<sup>[36]</sup>:

$$f = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \quad (5)$$

式中,NDVI 为所求像元的归一化植被指数;NDVI<sub>min</sub>、NDVI<sub>max</sub> 分别为非植被覆盖部分(裸地和未利用地)和植被覆盖部分(林地、草地和耕地)归一化植被指数值的最小值和最大值,由于不可避免存在噪声,NDVI<sub>max</sub> 和 NDVI<sub>min</sub> 一般取一定置信度范围内的最大值与最小值,根据野外调查数据,确定 NDVI<sub>max</sub> = 0.7, NDVI<sub>min</sub> = 0。

根据水利部 1996 年颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-96)<sup>[37]</sup>,将植被盖度分为五级,分类标准见表 1。

## 2.4 自然植被生态需水量

估算研究区天然植被的生态需水量采用潜水蒸发法,即某一植被类型在某一潜水位面积乘以该潜水位下的潜水蒸发量。其计算模型如下:

$$W = \sum_{i=1}^4 10 - 3K_i \cdot A_i \cdot W_{gi} \quad (6)$$

式中,  $W$  为植被生态需水量( $10^8 \text{ m}^3$ );  $A_i$  为植被类型  $i$  的面积( $10^4 \text{ hm}^2$ );  $W_{gi}$  为植被类型  $i$  在地下水某一地下埋深时的潜水蒸发量(mm),参考宋郁东等在《中国塔里木河水资源生态问题研究》中的成果(表 2);  $K_i$  表示植被影响系数,采用《阿克苏农业考察报告》中提供的不同埋深时的植物蒸腾对潜水影响系数。

## 3 结果与分析

表 1 植被覆盖度分类标准

Table 1 The standard classification of vegetation coverage

| 级别<br>Grade | 植被覆盖度值<br>Coverage | 类型<br>Type |
|-------------|--------------------|------------|
| I           | <0.1               | 极低覆盖度      |
| II          | 0.1—0.3            | 低覆盖度       |
| III         | 0.3—0.5            | 中覆盖度       |
| IV          | 0.5—0.7            | 中高覆盖度      |
| V           | 0.7—1              | 高覆盖度       |

### 3.1 地下水的变化

研究区由于降水量稀少,降水量对地下水的补给可以忽略,因此,塔河下游地下水的主要补给来源为河道径流以垂向和侧向的方式补给。地下水消耗主要供给植被蒸腾,不断的补充土壤水,地下水不断的向外排泄。当生态输水对地下水的补给能力小于排泄能力时,地下水位降低,当生态输水对地下水的补给能力大于排泄能力时,地下水位升高<sup>[38]</sup>。其区域范围的大小受生态输水过程中来水量多少、区域地质地貌条件、局部区域地下水补给源等众多因素影响。

#### 3.1.1 地下水响应的时效性

本研究的时间序列为 2000—2010 年,下游 5 个监测断面的年平均地下水位与年生态输水量的变化见图 4。自 2000 年下游第 1 次实施生态输水措施以来,到 2010 年第 11 次输水,历时 10a 多,累计断面下泄水量  $26.59 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,河道两岸地下水埋深有所抬升,但由于输水的“间歇性”特征,监测表明,地下水埋深并没有抬升至绝大多数天然植被正常生长的潜水水位。自 2000—2003 年地下水埋深随着生态输水量的增加而减小,说明输水量  $3.23 \times 10^8$ — $6.25 \times 10^8 \text{ m}^3$  补给大于排泄,可以使下游生态得到恢复;自 2004—2006 年随生态输水量的降低,地下水埋深开始缓慢增加,老英苏断面变化幅度最小,说明  $1.02 \times 10^8$ — $2.82 \times 10^8 \text{ m}^3$  的输水对其

表 2 乔、灌、草植被的单位面积蒸散量

Table 2 Vegetation water requirements per hectare of woods, shrubs and herbs

| 植被类型<br>Vegetation type | 盖度<br>Coverage | 平均地下水埋深<br>Average groundwater table /m | 潜水蒸发<br>Phreatic evaporation/<br>( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ) |
|-------------------------|----------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 乔木 Woods                | >0.5           | 2                                       | 3741.5                                                        |
|                         | 0.5—0.3        | 3                                       | 1432.4                                                        |
|                         | 0.3—0.1        | 4                                       | 497.3                                                         |
|                         | <0.1           | 4.5                                     | 392                                                           |
| 灌木 Shrubs               | >0.3           | 2.5                                     | 2343.8                                                        |
|                         | 0.3—0.1        | 4                                       | 497.3                                                         |
|                         | <0.1           | 4.5                                     | 392.1                                                         |
| 草地 Herbs                | >0.7           | 1                                       | 10738                                                         |
|                         | 0.7—0.3        | 2.5                                     | 2343.8                                                        |
|                         | 0.3—0.1        | 3.5                                     | 867.3                                                         |
|                         | <0.1           | 4.5                                     | 392.1                                                         |

有补给作用;在 2007—2009 年生态输水量较小,地下水埋深增加趋势明显,处于负均衡状态。值得注意的是 2003 年输水量最大,但地下水埋深最小值出现在 2004 年,之后呈现逐渐增大的趋势。地下水位的上升反映了地表水对地下水的补给,地下水位的抬升幅度主要与输水量的大小和放水持续时间有关,并呈一定的正相关关系。

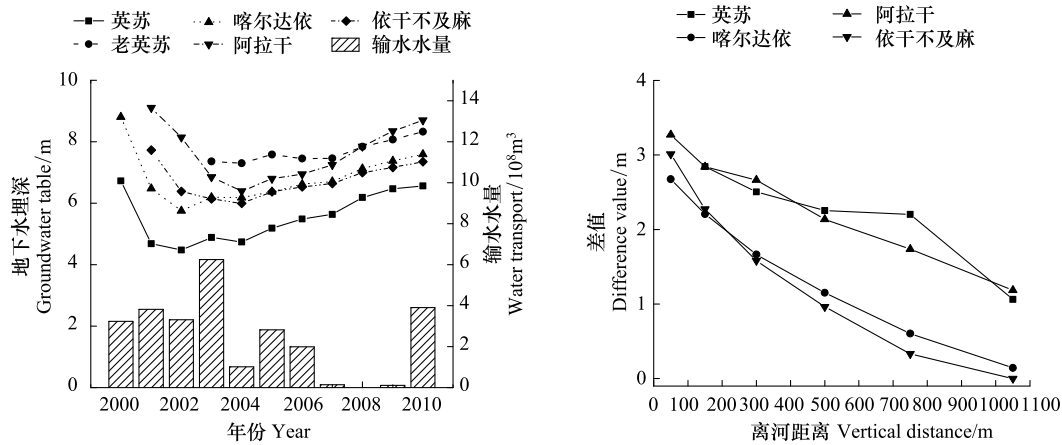


图 4 塔河下游地下水动态变化  
Fig.4 The changing dynamics of groundwater level in the lower reaches of the Tarim River

3.1.2 地下水响应的宽幅

对塔里木河下游而言,两次来水量不同的生态输水过程所形成的地下水波动带宽度也不同,且后一次输水效果又是前次与本次输水过程共同作用的结果。根据地下水响应幅度的计算方法(公式 1),得出下游 4 个断面生态输水的影响(图 4),通过对曲线的拟合,相关系数在 0.01 的水平上都达到极显著,求出每个断面的最大响应幅度(表 3)。

表 3 塔河下游不同断面响应宽幅

Table 3 The response amplitude of groundwater in the lower reaches of Tarim River

| 断面<br>Section | 拟合方程<br>Fitting equation                       | $R^2$  | $P$       | 影响距离<br>Response scope /m |
|---------------|------------------------------------------------|--------|-----------|---------------------------|
| 英苏            | $y = -2 \times 10^{-6} x^2 + 0.0001x + 2.7383$ | 0.9305 | 0.0001 ** | 1195                      |
| 喀尔达依          | $y = 2 \times 10^{-6} x^2 - 0.0042x + 2.8356$  | 0.9983 | 0.0001 ** | 1050                      |
| 阿拉干           | $y = 5 \times 10^{-7} x^2 - 0.0026x + 3.3293$  | 0.9916 | 0.0001 ** | 2281                      |
| 依干不及麻         | $y = 3 \times 10^{-6} x^2 - 0.006x + 3.209$    | 0.9957 | 0.0001 ** | 1000                      |

x: 影响距离,y: 地下水响应幅度, \*\*: 在  $\alpha=0.01$  的水平上,回归系数达到极显著水平

地下水位的变化过程与河道来水过程密切相关,由于目前采取沿自然河道线性输水的方式,就水流从上而下呈纯耗散状态,河道上断面过水流量应大于下断面,沿输水河道中轴线向两侧,地下水位升幅呈逐渐减少的趋势,对生态输水的响应程度由上而下逐渐减弱,距放水口较近的英苏断面的地下水位响应敏感,影响距离为 1195 m;距放水口较远的依干不及麻断面的地下水位响应幅度最小,影响距离为 1000 m;距放水口较远位置的断面水量少,持续时间短,放水后其地下水响应幅度变化远小于距放水口较近位置的断面;随着与河道距离的增加,地下水位的变化趋于平缓。对下游英苏、喀尔达依、阿拉干和依干不及麻河道生态影响幅度计算,发现中间断面阿拉干响应幅度(2281 m)在 4 个断面中最大,其原因主要是采用 2004 年和 2010 年生态输水所测定资料进行计算,这两次输水均为其文阔尔河和老塔河双河道输水,两河道交汇后的阿拉干断面的生态流量均大于其他断面,造成地下水位影响幅度最大。

3.2 地下水恢复需水量

塔河下游由于河道断流多年,造成地下水严重亏损,通过长期输水把河道附近最大有效影响范围内的地

下水位上升到生态水位以后,地下水主要消耗于潜水蒸发和植被蒸腾,必须恢复到一定水位,称为地下水恢复水量<sup>[33]</sup>。因而,本文认为地下水恢复量的估算问题,关键就是寻找既能减少地下水强烈蒸发返盐,又不造成土壤干旱而影响植物生长的地下水位称为合理生态水位。徐海量<sup>[39]</sup>在探讨塔河下游合理水位认为当地下水位在 4.5 m 以上时,基本能满足乔、灌木生长需水,一般不会发生荒漠化。荣丽杉<sup>[40]</sup>根据地下水埋深与胡杨样枝生长的关系,塔里木河下游合理地下水生态水位为 4—6 m。郝兴明<sup>[41]</sup>分析地下水位变化对植物物种多样性与种群生态位的影响,认为地下水埋深 4—6 m 为合理生态水位。宋郁东<sup>[34]</sup>根据潜水蒸发极限,把 4—4.5 m 作为合理生态水位的下限。叶朝霞<sup>[29]</sup>基于生态水文过程的塔里木河下游植被生态需水量研究,根据阿维里杨诺夫公式计算当地下水埋深达到 4.5 m 时,潜水蒸发量接近 0。因此,本文认为可以把 4.5 m 地下水埋深作为下游合理地下水生态水位。

根据公式(2)计算可得到下游河道各断面地下水埋深恢复至生态水位的单位河长的需水量,由式(3)可得到河段区间的地下水恢复需水量,最后得下游大西海子-台特玛湖地下水埋深恢复至 4.5 m 所需水量(表 4)。塔里木河下游齐文阔尔河段区域的地下水总恢复需水量为  $4.98 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,老塔里木河段地下水恢复需水量为  $2.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,历经 12 次输水后,塔里木河下游地下水总恢复需水量为  $7.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据塔里木河下游大西海子以下近年来实际供水情况:(1)干流三源流近 10 年供给大西海子以下水量为  $0.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;(2)近 10 年大西海子以下年平均供给水量为  $2.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;(3)大西海子以下规划年供给水量为  $3.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据杨鹏年<sup>[42]</sup>塔里木河干流下游生态输水后水量转化特征,河道径流量对地下水的补给量占其河道年平均径流量的比例约为 38.1%—56.5%,随着输水次数的增加,河道对地下水的补给量呈逐渐减小并趋于一定值,而蒸腾量则呈逐渐增加的势态。按照大西海子以下年平均供给水量为  $2.3 \times 10^8$ — $3.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,本次地下水恢复量需要时间为 5—8a。若地下水恢复需要 5a 完成,每年恢复水量需要  $1.41 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;若地下水恢复需要 8a 完成,每年恢复水量需要  $0.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

表 4 塔里木河下游地下水恢复需水量( $10^8 \text{ m}^3$ )

Table 4 Water requirement for the groundwater recovery in the lower reaches of the Tarim River

| 河段<br>River reaches | 水位变动带饱和差<br>Saturation deficit of<br>fluctuation belt of<br>water table/M | 土壤容重<br>Soil bulk density /<br>( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 区间长度<br>Spacing Length/km | 区间面积<br>Spacing area / $\text{m}^2$ | 区间需水量<br>Spacing water<br>requirement / $10^8 \text{ m}^3$ |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| A                   | 0.1403                                                                    | 1.36                                                      | 61.4                      | 1268.85                             | 0.30                                                       |
| B                   | 0.1403                                                                    | 1.36                                                      | 34                        | 2774.55                             | 0.36                                                       |
| C                   | 0.1403                                                                    | 1.36                                                      | 109.1                     | 3577.65                             | 1.49                                                       |
| D                   | 0.2018                                                                    | 1.36                                                      | 96                        | 3571.75                             | 1.88                                                       |
| E                   | 0.2018                                                                    | 1.36                                                      | 57                        | 3028.60                             | 0.95                                                       |
| F                   | 0.1403                                                                    | 1.36                                                      | 54                        | 1901.60                             | 0.39                                                       |
| G                   | 0.1724                                                                    | 1.36                                                      | 91                        | 3973.55                             | 1.70                                                       |
| 总计 Total            |                                                                           |                                                           | 502.5                     | 20096.55                            | 7.06                                                       |

A:大西海子-英苏(齐河);B:英苏-喀尔达依(齐河);C:喀尔达依-阿拉干(齐河);D:阿拉干-依干不及麻(齐河);E:依干不及麻-台特玛湖(齐河);F:大西海子英苏(老塔河);G:英苏-阿拉干(老塔河)

### 3.3 植被生态需水量

对于干旱区而言,植被是河道外生态系统的主体,也是整个流域生态系统最主要的保护对象,河道外天然植被需水是河道外生态需水计算的关键。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。因此,本文对下游的生态需水提出 2 种方案:(1)保护下游所有天然植被,在丰水年可以通过生态闸实现“由线到面”的生态输水方式;(2)保护下游地下水响应带天然植被,主要保证河道的水文过程完整及绿色走廊的生态稳定。根据植被生态需水量计算方法,得出不同方案下不同植被类型的生态需水量(表 5)。

塔里木河下游绿色走廊总面积  $518181.75 \text{ hm}^2$ ,天然植被面积为  $96114.09 \text{ hm}^2$ ,占 18.54%,其中乔木、灌

木、草地面积分别为 10759.64、39119.81 $\text{hm}^2$ 和 46235.25  $\text{hm}^2$ ,生态需水量分别为  $5.15\times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $17.63\times 10^6 \text{ m}^3$ 和  $35.96\times 10^6 \text{ m}^3$ ,则保护下游所有天然植被总生态需水量为  $0.587\times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据塔里木河输水情况,采用双河道恢复天然河道植被,保护目标主要是沿河道两侧的天然植被。按照以上生态输水对地下水的影响幅度,保护距离取离大西海子水库最近的英苏断面的地下水响应幅度,因此,通过 ArcGIS 缓冲区分析提取下游大西海子—台特玛湖河段两岸 1195m 的植被面积,天然植被面积为 41439.85  $\text{hm}^2$ ,其中乔木、灌木、草地面积分别为 9287.22、24718.64  $\text{hm}^2$ 和 7434.00  $\text{hm}^2$ ,生态需水量分别为  $4.45\times 10^6$ 、 $11.23\times 10^6 \text{ m}^3$ 和  $5.32\times 10^6 \text{ m}^3$ ,则总生态需水量为  $0.21\times 10^8 \text{ m}^3$ 。

表 5 塔里木河干流乔、灌、草植被类型面积及生态需水量

Table 5 Vegetation acreage and ecological water demand of woods, shrubs and herbs in the lower reaches of the Tarim River

| 植被类型<br>Type | 盖度<br>Coverage | 下游植被 Natural vegetation   |                                                | 下游响应带植被 Response scop vegetation |                                                |
|--------------|----------------|---------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|
|              |                | 面积/ $\text{hm}^2$<br>Area | 需水量/ $(10^8 \text{ m}^3)$<br>Water requirement | 面积/ $\text{hm}^2$<br>Area        | 需水量/ $(10^8 \text{ m}^3)$<br>Water requirement |
| 乔木 Woods     | >0.5           | 0.09                      | $3.37\times 10^{-6}$                           | 0.09                             | $3.37\times 10^{-6}$                           |
|              | 0.5—0.3        | 38.93                     | $5.58\times 10^{-4}$                           | 38.18                            | $5.47\times 10^{-4}$                           |
|              | 0.3—0.1        | 8469.20                   | $4.21\times 10^{-2}$                           | 7308.62                          | $3.63\times 10^{-2}$                           |
|              | <0.1           | 2250.81                   | $8.82\times 10^{-3}$                           | 1940.33                          | $7.61\times 10^{-3}$                           |
| 灌木 Shrubs    | >0.3           | 47.41                     | $1.11\times 10^{-3}$                           | 42.17                            | $9.88\times 10^{-4}$                           |
|              | 0.3—0.1        | 20883.25                  | $1.04\times 10^{-2}$                           | 13831.14                         | $6.88\times 10^{-2}$                           |
|              | <0.1           | 18189.14                  | $7.13\times 10^{-2}$                           | 10845.33                         | $4.25\times 10^{-2}$                           |
| 草地 Herbs     | >0.7           | 137.77                    | $1.48\times 10^{-2}$                           | 0.00                             | $2.34\times 10^{-7}$                           |
|              | 0.7—0.3        | 372.63                    | $8.73\times 10^{-3}$                           | 71.67                            | $1.68\times 10^{-3}$                           |
|              | 0.3—0.1        | 32994.13                  | $2.86\times 10^{-2}$                           | 4759.18                          | $4.13\times 10^{-2}$                           |
|              | <0.1           | 12730.71                  | 2603.15                                        | $1.02\times 10^{-2}$             |                                                |
| 总计 Total     |                | 96114.09                  | $5.87\times 10^{-2}$                           | 41439.85                         | $2.10\times 10^{-2}$                           |

#### 4 结论与讨论

(1)塔河下游地下水位的抬升幅度与输水量的大小呈一定的正相关关系,并存在一定的时效性。2004—2010 年地下水处于长期的负均衡状态,地下水位区域性下降,多年下降幅度明显。塔河下游地下水的主要补给来源为河道径流以垂向和侧向的方式补给,地下水波动幅度随距离的增加在纵横两个方向上均逐渐趋缓。输水效益的显现是一个漫长的过程,正如输水前植被的退化过程很缓慢一样,地下水的响应和下游植被的生态响应在一个大的空间和时间尺度上将逐步显现<sup>[17]</sup>。陈亚宁等<sup>[43]</sup>塔里木河下游的 4 次输水的横向影响范围达 1000 m 左右;杨鹏年等<sup>[26]</sup>运用地下水模拟软件 ProcessingModflow 进行了 10 年期的间歇输水模拟,输水的影响范围保持在距河两侧 3 km 的宽度内。从目前响应的范围看,仍然在有限的区域内发生,可保护的植被范围也主要集中于此,远未达到恢复和重建下游生态环境的目标,要实现大规模的生态恢复,还必须在输水过程中适当增加河水漫溢的次数和干扰的强度。

(2)地下水位既是对河道输水产生响应的敏感因子,同时也是决定植被恢复的重要因素。塔里木河下游输水有效地抬升了河道两侧的地下水位由输水前的 6—8 m 抬升到了 2—4 m<sup>[16]</sup>。地下水恢复变化首先与断面距离水源地大西海子水库的远近有关,其次与离河距离远近有关<sup>[27]</sup>。经过 11a 的输水后,地下水恢复至生态水位的恢复需水量为  $7.06\times 10^8 \text{ m}^3$ ,根据间歇性输水条件下水量转化关系,则需要 5—8a 的时间。王让会等<sup>[28]</sup>计算塔河下游大西海子至台特玛湖两岸植被保护 1 km 宽度,地下水恢复至 4 m 水位恢复水量为  $14.4\times 10^8 \text{ m}^3$ ,胡顺军<sup>[44]</sup>计算塔里木河下游地下水恢复水量则为  $20.056\times 10^8 \text{ m}^3$ ,由于采用的现状地下水位和合理生态水位的不同造成地下水生态环境恢复需水量的差异。在输水期间,下渗的河水一部分被土壤与植物所蒸散,另一部分进入含水层补给地下水。地下水不断地补充土壤水,同时裸露土地的潜水蒸发、河道水域的蒸发也在进行,地下水远远不断的向外排泄<sup>[38]</sup>。因此,在生态输水过程中,不仅要考虑适宜的输水量来保证地下

水处于正均衡状态,而且要根据适宜地下水位进行输水方式的调整,维持地下水位的稳定,减少不必要的沿程蒸发损失<sup>[44]</sup>。

(3)塔里木河下游大西海子以下保护所有天然植被面积为 96114.09 hm<sup>2</sup>,生态需水量为 0.587×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,若保护下游地下水响应带天然植被面积为 41439.85 hm<sup>2</sup>,生态需水量为 0.21×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。从目前输水响应带看,仅维持了天然植被 35.8%的生态需水量,生态输水工程必须继续开展下去。天然植被面积是计算生态需水量的关键,陈亚宁等<sup>[45]</sup>计算塔里木河下游天然植被面积为 14.16×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,叶朝霞等<sup>[29]</sup>确定下游天然植被面积为 37.21×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,本文采用 2010 年遥感影像计算河道外生态需水量结果可信。生态水文过程的完整是河岸生态系统稳定的基础,对植物和动物具有摘要意义,断流造成流域水文过程的完整性丧失,地表水与地下水转换的途径被切断<sup>[45]</sup>。按照塔里木河流域近期综合治理规划确定的目标——大西海子水库以下多年平均下泄水量为 3.5×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,随着生态输水效应的不断扩大,可以实现更大范围荒漠河岸林的保护与恢复。在水资源紧缺的干旱区,如何合理利用水资源,发挥其最大效益,则需要根据水文状况和植物的生物学和生态学特性对输水方式和输水规模进行调整。

#### 参考文献 (References):

- [1] 王根绪,程国栋. 干旱内陆流域生态需水量及其估算——以黑河流域为例. 中国沙漠, 2007, 22(2): 129-134.
- [2] 赵文智,常学礼,何志斌,张智慧. 额济纳荒漠绿洲植被生态需水量研究. 中国科学 D 辑, 2006, 36(6): 559-566.
- [3] Smakhtin V U. Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology, 2001, 240(3/4): 147-186.
- [4] 崔瑛,张强,陈晓宏,江涛. 生态需水理论与方法研究进展. 湖泊科学, 2010, 22(4): 465-480.
- [5] Davies B R. A Synthesis of the Ecological Functioning, Conservation and Management of South African River Systems. Water Research Commission Report No. 62/93. Pretoria, South Africa: Department of Water Affairs, 1993: 232-232.
- [6] 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.
- [7] 陈永金,陈亚宁,李卫红,刘加珍. 塔里木河下游输水条件下浅层地下水化学特征变化与合理生态水位探讨. 自然科学进展, 2006, 16(9): 1130-1137.
- [8] 周洪华,陈亚宁,李卫红. 新疆铁干里克绿洲水文过程对土壤盐渍化的影响. 地理学报, 2008, 63(7): 714-724.
- [9] Winter T C, Rosenberry D O. The interaction of ground water with prairie pothole wetlands in the cottonwood lake area, east-central North Dakota, 1979-1990. Wetlands, 1995, 15(3): 193-211.
- [10] Osman Y Z, Bruen M P. Modelling stream-aquifer seepage in an alluvial aquifer: an improved loosing-stream package for modflow. Journal of Hydrology, 2002, 264(1/4): 69-86.
- [11] 孙才志,高颖,朱正如. 基于生态水位约束的下辽河平原地下水生态需水量估算. 生态学报, 2013, 33(5): 1513-1523.
- [12] 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.
- [13] Bissels S, Hölzel N, Donath T W, Otte A. Evaluation of restoration success in alluvial grasslands under contrasting flooding regimes. Biological Conservation, 2004, 118(5): 641-650.
- [14] 周斌,杨红梅,胡顺军,熊黑钢. 河水漫溢对塔里木河下游土壤及植被的影响. 干旱区地理, 2010, 33(3): 442-448.
- [15] Renison D, Hensen I, Cingolani A M. Anthropogenic soil degradation affects seed viability in *Polylepis australis* mountain forests of central argentina. Forest Ecology and Management, 2004, 196(2/3): 327-333.
- [16] 陈亚宁,李卫红,陈亚鹏,徐长春,张丽华. 新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复. 生态学报, 2007, 27(2): 538-545.
- [17] 徐海量,叶茂,李吉玫,王卫江. 河水漫溢对荒漠河岸林植物群落生态特征的影响. 生态学报, 2007, 27(12): 4990-4998.
- [18] 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. 自然科学进展, 2007, 17(4): 460-470.
- [19] 李卫红,陈亚鹏,张宏峰,侯平. 塔里木河下游断流河道应急输水与地表植被响应. 中国沙漠, 2004, 24(3): 301-305.
- [20] 陈亚宁,张小雷,祝向民,李卫红,张元明,徐海量,张宏峰,陈亚鹏. 新疆塔里木河下游断流河道输水的生态效应分析. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(5): 475-482.
- [21] 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.
- [22] 徐海量,宋郁东,王强. 胡杨生理指标对塔里木河下游生态输水的响应. 环境科学研究, 2003, 16(4): 24-27.
- [23] 史薇,徐海量,赵新风,凌红波,李媛. 胀果甘草种子萌发对干旱胁迫的生理响应. 生态学报, 2010, 30(8): 2112-2117.

- [24] 徐海量, 邓晓雅, 赵新风. 河道断流对胡杨(*Populus euphratica*)径向生长量的影响. 中国沙漠, 2013, 33(3): 731-736.
- [25] 万红梅, 李霞, 董道瑞, 林海军. 塔里木河下游植被覆盖变化遥感定量分析. 自然资源学报, 2013, 28(4): 668-677.
- [26] 杨鹏年, 邓铭江, 李霞, 董新光. 塔里木河下游间歇输水地下水响应宽度——以塔里木河下游英苏断面为例. 干旱区研究, 2008, 25(3): 331-335.
- [27] 湾疆辉, 陈亚宁, 李卫红, 杨鹏年, 叶朝霞, 付爱红. 断流河道输水对地下水净补给量研究——以塔里木河下游为例. 中国沙漠, 2009, 29(2): 376-382.
- [28] 王让会, 卢新民, 宋郁东, 樊自立, 马英杰. 西部干旱区生态需水的规律及特点——以塔里木河下游绿色走廊为例. 应用生态学报, 2003, 14(4): 520-524.
- [29] 叶朝霞, 陈亚宁, 李卫红. 基于生态水文过程的塔里木河下游植被生态需水量研究. 地理学报, 2007, 62(5): 451-461.
- [30] 阿里木·吐尔逊, 木塔力甫·依明尼亚孜. 断流河道间断输水两岸地下水的运动模型及其解法——以塔里木河下游断流河段生态输水为例. 石河子大学学报: 自然科学版, 2003, 7(2): 131-135.
- [31] 杨鹏年, 邓铭江, 董新光, 郭玉川. 间歇输水河道两侧一维地下水非稳定流运动研究——以塔里木河下游为例. 干旱区地理, 2008, 31(5): 731-736.
- [32] 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. 环境科学, 2003, 24(4): 18-22.
- [33] 宋郁东, 樊自立, 雷志栋, 张发旺. 中国塔里木河水资源与生态问题研究. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000: 248-248.
- [34] 李运刚, 何大明. 红河流域 NDVI 时空变化及其与气候因子的关系. 山地学报, 2009, 27(3): 333-340.
- [35] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003.
- [36] Gb/s1190-1996. 土壤侵蚀分类分级标准.
- [37] 李守波, 赵传燕, 冯兆东. 黑河下游地下水波动带地下水时空分布模拟研究-FEFLOW 模型应用. 干旱区地理, 2009, 32(3): 391-396.
- [38] 冯平, 肖丽英, 林超. 地下水生态需水量的估算方法及其恢复问题的研究. 干旱区资源与环境, 2005, 19(6): 102-107.
- [39] 徐海量, 宋郁东, 陈亚宁. 生态输水后塔里木河下游合理水位探讨. 水土保持通报, 2003, 23(5): 22-25.
- [40] 荣丽杉, 束龙仓, 王茂枚, 邓正波. 合理地下水生态水位的估算方法研究——以塔里木河下游为例. 地下水, 2009, 31(1): 12-15.
- [41] 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.
- [42] 杨鹏年, 张胜江, 董新光. 塔里木河干流下游生态输水后水量转化特征. 干旱区研究, 2007, 24(2): 174-178.
- [43] 陈亚宁, 李卫红, 徐海量, 刘加珍, 张宏峰, 陈亚鹏. 塔里木河下游地下水位对植被的影响. 地理学报, 2003, 58(4): 542-549.
- [44] 胡顺军. 塔里木河干流流域生态——环境需水研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [45] 陈亚宁, 郝兴明, 李卫红, 陈亚鹏, 叶朝霞, 赵锐锋. 干旱区内陆河流域的生态安全与生态需水量研究——兼谈塔里木河生态需水量问题. 地球科学进展, 2008, 23(7): 732-738.