

水情波动下 2006—2011 年塔里木河下游植被变化研究

王士飞^{1,2}, 包安明¹, 王永琴³, 黄粤¹, 刘驰⁴

(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, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 塔里木河流域管理局 信息中心, 新疆 库尔勒 841000; 4. 南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100038)

摘要: 由于开都—孔雀河来水量的减少, 塔里木河下游生态输水量自 2006 年开始锐减, 之后连续枯水 3 a, 直至 2010 年来自上游的输水水头才重新到达塔河下游台特玛湖处。采用 2006—2011 年 Landsat TM 卫星遥感影像数据, 对塔里木河下游区域进行了植被分类和覆盖度信息提取; 在连续植被变化监测数据的基础上, 研究了水情波动影响下的塔里木河下游地区植被时空变化格局, 探讨了形成植被变化时空差异的主要原因。结果表明, 2006—2011 年植被覆盖面积总体上呈现先下降再升高的现象, 其中灌木林地变化最为显著; 2011 年研究区植被覆盖度总体高于 2006 年, 大部分区域的植被覆盖度呈缓慢增加趋势, 覆盖度显著增加区域面积占 2011 年植被覆盖面积 6.3%; 生态输水量的变化是影响塔里木河下游植被生长与恢复的主导因素, 大范围的植被恢复的主要原因在于地下水位的显著抬升, 而地下水位的升降主要依赖于生态输水量的变化。

关键词: 遥感; 植被变化; 塔里木河; 生态输水

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)04-0131-05

中图分类号: P208

Changes of Vegetation Coverage Under Hydrological Fluctuations in Lower Leaches of Tarim River Basin

WANG Shi-fei^{1,2}, BAO An-ming¹, WANG Yong-qin³, HUANG Yue¹, LIU Chi⁴

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Information Center, Tarim Basin Management Bureau, Korla, Xinjiang 841000, China; 4. Administration of the South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, China)

Abstract: Due to the reduction of water flow from Kaidu—Kongque River since 2006, the ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River decreased sharply for three years until the waterflow reached into Taitema Lake in 2010. The paper studied on the spatial and temporal changes of vegetation coverage with continuous monitoring of the vegetation changing under hydrological fluctuations during 2006—2011 by substracting the data of vegetation information through Landsat TM remote sensing image data in lower reaches of Tarim River Basin and explored the main reasons of the spatial and temporal variances of the vegetation changes. The results indicated that vegetation area decreased during 2006 to 2009 and then increased with the maximum area increase in shrub land; the overall vegetation coverage of the studied region was higher in 2011 than 2006 with a slow increasing in most of the area and a significant increased area only accounted 6.3% of the whole area in 2011; the change of water flow in the Tarim River is the dominant factor of vegetation growth and recovery in the area since it raised the groundwater that directly prompted vegetation recovery.

Keywords: remote sensing; vegetation change; Tarim River; ecological water conveyance

塔里木河是我国最大的内陆河流, 其流域范围地
处西北干旱区, 属于大陆型干旱气候, 蒸发强烈, 降水

稀少, 其中塔里木河下游的水资源主要是靠上游来水
供给。20 世纪 50 年代以来, 由于大规模的农垦以及

收稿日期: 2012-11-02

修回日期: 2012-11-21

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”(XDA05050104); 中国科学院“西部之光”项目; 西部博士资助项目(XBBS201010)

作者简介: 王士飞(1985—), 男(汉族), 河南省辉县人, 硕士研究生, 研究方向为遥感与地理信息系统应用。E-mail: 130hongfei@163.com。

通信作者: 包安明(1967—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 研究员, 研究方向为干旱区资源与环境遥感。E-mail: baoam@ms.xjb.ac.cn。

对水资源的不合理开发利用,使塔河干流的水文情势和生态环境产生了巨大的变化,其中干流的水量呈现明显的减少趋势,塔河下游更是自 20 世纪 70 年代大西海子水库建成后开始出现断流现象,下泄的水量仅能到达英苏断面,其以下完全断流。由于水文情势的巨大变化,致使下游河段地下水位连续下降,天然植被急剧减少,流沙侵蚀等环境退化问题日趋严重,生态环境遭到严重破坏^[1]。

为了修复塔里木河下游的生态环境,2000 年 4 月开始,有关部门利用开都河来水偏丰,博斯腾湖持续高水位的有利时机,由塔里木河管理局与巴州、农二师共同组织实施向塔里木河下游应急输水工程,旨在通过河道输水,下渗补给和抬升地下水位,改善下游日渐恶劣的生态环境。生态输水实施以来,塔里木河生态环境的恢复状况受到国内外密切关注。植被作为塔河下游生态系统最基本的组成部分和最主要的生产者,对其变化状况的研究较多^[2-4]。采用的方法主要包括实地调查和卫星遥感监测两类:实地调查能够获取准确的植被生理变化信息,往往只能给出某些具体位置的情况,难以获得大区域植被变化的全貌;相比而言,卫星遥感监测则是开展大范围环境变化研究的更为有效的工具。近年来,国内学者运用卫星遥感技术,采用 MODIS、中巴资源卫星和 Landsat TM/ETM 等数据源,对塔里木河下游生态输水后植被的时空变化特征进行了系统研究和分析^[5-7]。但是,这些研究多集中于 2000 年生态输水实施以来至 2005 年第 7 次生态输水结束期间的植被恢复与变化情况。2006 年以来,由于开都—孔雀河来水量不足,导致博斯腾湖向塔河生态输水量急剧减少,塔里木河下游生态输水自 2006 年后连续多年没有正常进行,导致下游连续枯水 3 a,直至 2010 年,输水量才有较大程度的恢复。因此,2006—2011 年正是生态输水实施以来塔河下游水情变化最大的几年,生态输水量的不确定性使得 2006 年以前经过 7 次生态输水已达到一定恢复水平的下游天然植被状况发生变化,但目前这一变化的过程和程度尚不清楚。本研究采用 2006—2011 年的遥感资料和 2010、2011 年实地调查资料,提取塔里木河下游地区植被类型与覆盖度信息,对植被的时空变化格局进行了分析,进而探讨间歇性的生态输水对植被恢复的影响,为塔河下游未来治理提供科学依据。

1 研究区概况

塔里木河全长 1 321 km,是中国最长的内陆河流,自西北流向东南,形成了塔里木河冲积平原,地势

平缓,海拔 798~1 027 m。塔里木河干流本身不产流,水资源全靠源流补充。由于人类活动的影响与气候变化等影响,许多源流相继减少或中断了对干流的水量补给。目前,与塔里木河干流有地表水联系的只有和田河、叶尔羌河和阿克苏河三条源流,孔雀河流经扬水站从博斯腾湖抽水经库塔干渠向塔里木河下游输水,形成目前“四源一干”的格局。本研究区覆盖塔里木河干流下游大西海子水库以下的部分,位于塔克拉玛干、库木塔格沙漠之间,总面积约为 8 022 km²。该区域年平均降水量为 17.4~42.0 mm,而年平均蒸发力高达 2 500~3 000 mm,≥10℃的年积温为 4 100~4 300℃,平均日较差 13~17℃,是中国最干旱地区之一。

2 研究方法

2.1 数据源与预处理

采用 Landsat5 TM 数据,图像获取时间 2006—2011 年的 7—9 这 3 个月份,轨道号 141/032,141/033,142/032。对获取的遥感图像进行辐射定标和大气辐射校正,将图像拼接,提取研究区范围内的植被变化信息。

2.2 遥感影像解译与植被分类

根据研究目的和研究区土地覆盖和利用特点,将研究区分为以下 7 种主要地物类型:裸地、耕地、乔木林地、水体、草地、灌木林地、居民地。采用面向对象的遥感信息提取软件 eCognition,根据地物的光谱特征进行信息提取;以具有相同特征的影像对象为基本分析单元,同时考虑影像的光谱和空间信息。

首先将整个影像划分为不规则的、互不重叠的区域,区域内的所有像素拥有相同的光谱和属性特征^[8]。通过多次调整尺度、光谱和形状因子的权值,直至到达最优效果。为了避免地类会混在一起,经过反复试验,最后确定分割尺度为 15,形状因子为 0.1,光谱因子 0.9,紧凑度 0.5,光滑度为 0.5,各波段的权重都为 1;然后,根据研究区植被特征参数及地物本身的形态、分布等特征,建立合适的规则集来提取信息,特征参数包括归一化的植被指数(NDVI),有效叶面积指数(SLAVI),水陆掩膜指数(LMW)等参数;最后对分类结果进行精度评价。另外分类时应遵循先易后难的原则,如裸地(非植被区)、水体以及耕地的特征明显,易于提取且精度高,因而在进行分类时,应先将这 3 个类别提取出来。

2.3 植被覆盖度及变化趋势分析

植被覆盖度是衡量地表植被状况的主要指标之一,是描述生态系统的重要基础数据,也是区域生态

系统环境变化的重要指标^[9]。植被覆盖度可以定义为植被在地面的垂直投影面积占统计区域总面积的百分比。研究区植被群落生长分布极为稀疏,遥感影像上的植被光谱信息特征极其不明显^[10]。在植被覆盖度提取上,采用修正后的 3 波段最大梯度差法模型。其中 3 波段最大梯度法模型是针对土壤、植被光谱信号的特点提出的,修正后的 3 波段最大梯度差法模型经过验证能较好的反映稀疏植被的植被覆盖度信息。

修正后的 3 波段最大梯度法模型^[11]:

$$A = d/d_{\max} d = \frac{TM_4 - TM_3}{\lambda_{TM_4} - \lambda_{TM_3}} - \frac{TM_5 - TM_4}{\lambda_{TM_5} - \lambda_{TM_4}} \quad (1)$$

式中: d ——3 个波段梯度差; d_{\max} ——3 个波段最大梯度差; TM_3, TM_4, TM_5 ——红、近红、短波红外 3 个波段反射率; $\lambda_{TM_3}, \lambda_{TM_4}, \lambda_{TM_5}$ ——3 个波段的波长。

2006—2011 年各像元的植被覆盖度变化趋势利用变化斜率法进行分析,其计算公式为:

$$\delta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times f_{ci} - (\sum_{i=1}^n i) \sum_{i=1}^n f_{ci}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中: δ_{slope} ——趋势变化斜率; n ——监测年数; f_{ci} ——第 i 年的植被覆盖度。斜率值为正,表示覆盖度增加,反之则降低。通过对相关系数来进行显著性检验,根据覆盖度变化趋势及显著性水平,将变化趋势分为 4 类,显著增加($X > 0, \alpha \leq 0.05$);无显著增加($X > 0, \alpha > 0.05$);无显著降低($X < 0, \alpha > 0.05$)和显著降低($X < 0, \alpha \leq 0.05$)^[12]。

3 结果分析

3.1 植被类型变化分析

在裸地、耕地、林地、水体、草地、灌木林地、居民地等一级分类的基础上,根据植被覆盖度的大小,对林地、草地、灌木林地及水体进行了二次分类,将植被覆盖度 $< 15\%$ 的林地、草地、灌木林地对应划分为稀

疏林地、稀疏草地、稀疏灌木,水体根据其特征划分为河流与湖泊/水库。根据生态输水年际变化特点,选择 2006,2009 和 2011 年的分类结果,依据研究区域植被类型的变化图(附图 3),结合野外采集的各地类的共 94 个地面样点对于分类结果进行检验,采用精度百分比和 Kappa 系数对分类结果进行精度评价(表 1)。由表 1 可以看出,结果表明,分类结果的总精度是 82.9%,Kappa 系数为 0.767,验证结果表明,分类方法具有较好的适用性。

2006—2009 年,塔里木河下游地区除灌木林地面积减少了 396.99 km²,其他植被类型面积变化趋势并不明显,区域植被覆盖面积总体呈下降趋势,减少面积为 337.49 km²;2009—2011 年,灌木林地面积急剧增加 385.69 km²,草地面积减少 28.8 km²,植被覆盖面积总体增加 367.59 km²。整体来看,从 2006—2011 年,灌木林地面积先减少后增加,林地、草地和耕地面积变化较小,其中林地面积呈缓慢增加,耕地面积持续小幅减少(图 1)。

3.2 植被覆盖度变化分析

根据水利部 2008 年颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》中植被覆盖度分级标准,将植被覆盖度划分为 5 个等级: $< 4\%$ (低植被覆盖:5 级), $4\% \sim 10\%$ (中低覆盖度:4 级), $10\% \sim 30\%$ (中等覆盖度:3 级), $30\% \sim 60\%$ (中高覆盖度:2 级)和 $> 60\%$ (高覆盖度:1 级)。由表 2 可以看出:至 2011 年高覆盖度、中高覆盖度、中等覆盖度、中低覆盖度和低植被覆盖面积分别占库区陆地总面积的 1.63%,1.79%,9.08%,20.07%和 67.43%。对照研究区植被类型图,高覆盖度和中高覆盖度主要分布在耕地类型中,中等盖度区和中低盖度区主要集中在林地、草地和灌木林地类型中,主要分布在输水河道两侧附近区域;低盖度区则主要分布在沙漠,远离输水河道。植被覆盖度总体上呈现:耕地 $>$ 草地 $>$ 林地 $>$ 灌木林地 $>$ 沙漠。

表 1 分类的误差矩阵

项目	林地	草地	灌木林地	耕地	裸地	水体	居民地	合计
林地	26	3	4	0	0	0	0	33
草地	1	14	2	1	0	0	0	18
灌木林地	5	0	25	0	0	0	0	30
耕地	0	0	0	8	0	0	0	8
裸地	0	0	0	0	0	0	0	0
水体	0	0	0	0	0	3	0	3
居民地	0	0	0	0	0	0	2	2
合计	32	17	31	9	0	3	2	94
精度/%	81.25	82.35	80.62	88.89	0	100	100	

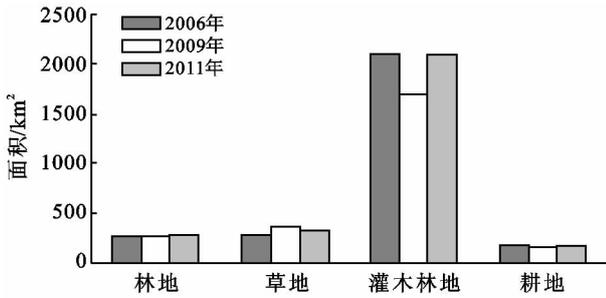


图 1 塔里木河下游 2006—2011 年植被类型面积

根据 2006 和 2011 年研究区植被覆盖度分布, 建立覆盖度各等级转化矩阵^[13], 研究植被覆盖度分布之间的转化(表 2)。结果表明, 5 种类别植被覆盖度等级中, 5 级覆盖面积显著减少 526.22 km²; 其他等级植被的面积均呈增加趋势, 其中 4 级盖度和 3 级覆盖度面积分别增加 356.24 和 128.06 km², 二级和一级盖度相对变化较少, 覆盖面积分别增加 23.35 和 18.57 km²; 总的来看, 2011 年研究区的植被覆盖度较 2006 年整体有所增加, 植被生长态势变好。

表 2 塔里木河下游 2006—2011 年植被覆盖度等级转化矩阵

km²

项目	2011 年						总计	减少
	等级	5 级	4 级	3 级	2 级	1 级		
2006 年	5 级	4 928.80	598.21	32.72	2.83	0.00	5 562.57	633.77
	4 级	96.58	791.37	247.81	5.84	1.24	1 142.83	351.46
	3 级	9.02	107.37	367.74	57.13	9.02	550.28	182.54
	2 级	1.95	1.95	26.36	49.00	30.95	110.20	61.20
	1 级	0.00	0.18	3.71	18.75	80.66	103.30	22.64
	总计	5 036.35	1 499.07	678.34	133.55	121.87		
	增加	107.54	707.70	310.60	84.55	41.21		

由塔里木河下游植被覆盖度变化趋势及显著性检验图可以看出, 植被覆盖度斜率为正的区域面积为 2061.88 km², 主要分布在输水河道两边, 结合分类结果图, 斜率为正的区域占 2011 年植被覆盖面积的 72%, 表明植被覆盖的大部分区域植被覆盖度呈增加趋势。同时显著性检验表明, 研究区大部分区域的植被覆盖度呈缓慢增加趋势, 显著增加区域面积占 2011 年植被覆盖面积 6.3%, 显著降低区域则占 1.8%。

3.3 塔里木河下游植被变化的的影响因素

植被的生长依赖根系对土壤水分的吸收, 天然降水、地表水和地下水是土壤水分的补给源, 由 3 者共同决定了植被的生长状况^[14-15]。根据研究区范围内仅有的铁干里克气象站 2000—2010 年降水量序列的分析表明, 其平均值为 30.64 mm, 且不存在显著趋势性。就绝对量而言, 研究区常年不足 40 mm 的年降水量对土壤水和地下水的补给也极其有限。因此, 塔河下游植被变化与降水无显著关系, 主要是生态输水的结果, 这与已有结论是一致的^[16-17]。

塔里木河下游处于极端干旱区域, 地下水是影响植被生长的关键因子, 由于区域年平均降水量稀少, 对土壤水和地下水的补给极其有限, 因而地下水位的升降主要来自大西海子水库对下游河道的下泄水量。将 12 次生态输的水量与历次输水后塔河下游地下水埋深进行相关分析, 发现地下水位的变化幅度与生态

放水量显著相关, 相关系数达 0.7。由图 2 所示, 2000 年以来塔河下游生态输水的波动经历了显著增加(2000—2005 年)—急剧减少(2006—2009 年)—快速恢复(2010 至今)的过程。2000—2005 年前 7 次输水保持了较为稳定的来水量, 总输水量达 2.04×10^9 m³, 水头 5 次到达台特玛湖。通过地表水下渗补给, 地下水位也得到了普遍抬升, 已有研究表明, 2000—2005 年塔里木河下游平均地下水埋深由输水前的 6~8 m 抬升到了 2~4 m, 距输水口和输水河道距离越近的地方, 地下水埋深越小, 地下水位上升幅度也越大^[18]。2006 年后, 由于上游来水量的减少, 大西海子水库向塔河下游的下泄水量急剧减少, 2006—2009 年实施的 3 次输水总水量仅为 2.26×10^8 m³, 甚至在 2008 年一度暂停生态输水; 与此同时, 地下水位也表现出显著下降的趋势, 其中英苏断面 2006—2008 年地下水位下降幅度为 2.9 m, 而阿拉干断面地下水位下降幅度更达到了 3.6 m。生态输水量的减少, 使 2000 年后有所抬升的地下水位急剧下降, 从而导致塔河天然植被状况的倒退, 具体表现为区域内灌木林地面积的显著减少; 2010 和 2011 年, 生态输水量快速增加, 特别是在 2011 年达 8.23×10^8 m³, 为历年最高水平, 相应的植被状况有了较大程度的恢复, 灌木林地和林地面积增加, 且大部分区域植被覆盖度较 2006 年有所提高。

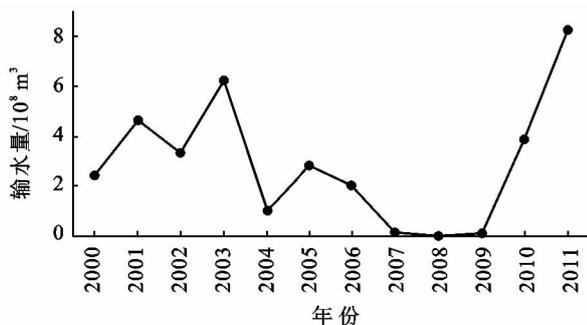


图 2 塔里木河下游 2000—2011 年生态输水量变化

4 结论

(1) 2006—2011 年植被覆盖面积总体上呈现先下降再升高的现象,其中灌木林地变化最为显著,其变化过程表现为先下降后上升,林地、草地和耕地面积呈小幅度变化;2011 年研究区植被覆盖度总体高于 2006 年,大部分区域的植被覆盖度呈缓慢增加趋势,其中显著增加区域面积占 2011 年植被覆盖面积的 6.3%,显著降低区域则占 1.8%;

(2) 生态输水量的变化是影响塔里木河下游植被生长与恢复的主导因素,大范围的植被恢复的主要原因在于地下水位的显著抬升,而地下水位的升降主要依赖于生态输水量的变化。2006 年后,由于上游来水量的减少,大西海水库向塔河下游的下泄水量急剧减少,甚至在 2008 年一度暂停生态输水,导致地下水位也表现出显著下降的趋势,最大降幅达到了 3.6 m。生态输水量的减少,使 2000 年后有所抬升的地下水位急剧下降,进而导致塔河天然植被状况的倒退,具体表现为区域内灌木林地面积的显著减少;2010 和 2011 年,生态输水量快速增加,相应的植被状况有了较大程度的恢复,灌木林地和林地面积增加,且大部分区域植被覆盖度较 2006 年有所提高。

[参 考 文 献]

[1] 高前兆,樊自立. 塔里木河流域的环境治理与水土保持生态建设[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1):11-15.
 [2] 陈亚宁,张小雷,祝向民,等. 新疆塔里木河下游断流河道输水的生态效应分析[J]. 中国科学(D辑):地球科学, 2004, 34(5):475-482.
 [3] 邓铭江. 塔里木河流域气候与径流变化及生态修复[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 694-702.

[4] Xu Hailiang, Ye Mao, Song Yudong, et al. The natural vegetation responses to the groundwater change resulting from ecological water conveyances to the lower Tarim River[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 131(1):37-48.
 [5] 邓铭江. 塔里木河下游生态输水及植被恢复遥感监测评价[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 380-386.
 [6] 桂东伟. 塔里木河下游应急输水后的生态响应及生态用水保障研究[D]. 新疆 乌鲁木齐:新疆大学, 2007.
 [7] 刘桂林,库尔班艾里西尔,艾白不拉艾尔肯,等. 塔里木河下游生态输水后植被景观格局动态变化研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1):161-168.
 [8] Walter V. Object-based classification of remote sensing data for change detection[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, 58(3):225-238.
 [9] Los S O, Tucker C J, Justice C O, et al. A revised land surface parameterization (SIB2) for atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data[J]. J. Climate, 1996, 9(4):706-737.
 [10] 邢著荣,冯幼贵,杨贵军,等. 基于遥感的植被覆盖度估算方法述评[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(6): 849-854.
 [11] 古丽·加帕尔,陈曦,包安明. 干旱区荒漠稀疏植被覆盖度提取及尺度扩展效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12):2925-2934.
 [12] 吴昌广,周志翔,肖文发,等. 基于 MODIS NDVI 的三峡库区植被覆盖度动态监测[J]. 林业科学, 2012, 48(1): 22-28.
 [13] 刘瑞,朱道林. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1544-1550.
 [14] 张一驰,于静洁,乔茂云,等. 黑河流域生态输水对下游植被变化影响研究[J]. 水利学报, 2011(7): 757-765.
 [15] Qi J, Marssett R C, Moran M S, et al. Spatial and temporal dynamics of vegetation in the San Pedro River basin area[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 105(1/3): 55-68.
 [16] 郝兴明,陈亚宁,李卫红,等. 塔里木河中下游荒漠河岸林植被对地下水埋深变化的响应[J]. 地理学报, 2008, 63(11): 1123-1130.
 [17] 邓铭江. 塔里木河下游应急输水植被恢复响应及生态修复研究[J]. 中国水利, 2004(14): 15-18.
 [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[J]. 自然科学进展, 2007, 17(4): 460-470.