

引用格式:朱长明,李均力,沈占锋,等.基于MODIS密集时间序列数据的塔里木河下游植被活动过程监测[J].资源科学,2019,41(3): 591-600. [Zhu C M, Li J L, Shen Z F, et al. Spatiotemporal dynamics of vegetation activities in the lower reach of the Tarim River based on MODIS intensive time series data[J]. *Resources Science*, 2019, 41(3): 591-600.] DOI: 10.18402/resci.2019.03.16

基于MODIS密集时间序列数据的塔里木河下游植被活动过程监测

朱长明¹,李均力²,沈占锋^{3,4},沈 谦¹

(1. 江苏师范大学地理与测绘学院,徐州 221116;

2. 中国科学院新疆生态与地理研究所,乌鲁木齐 830011;

3. 中国科学院遥感与数字地球研究所,北京 100101;

4. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:针对塔里木河下游生态输水的绩效评估和环境效益问题,本文采用2000—2017年的16天合成的MODIS Q1密集时序NDVI数据,辅助以GF-2数据,反演和监测塔里木河下游植被覆盖度(FVC)变化;进而通过最大和平均植被覆盖度指标,探讨了塔里木河下游植被在生态输水条件下的生长和恢复情况。结果表明:总体上,近20年来随着塔河的综合治理工程和人工生态调水工程的推进,塔河下游植被恢复明显,最大植被覆盖度和平均植被覆盖度均呈现显著增加的趋势($P < 0.01$),高植被覆盖区从2000年的3425.95 km²增加到2017年5486.52 km²,中植被覆盖区从2000年的6508.18 km²增加到2015年的7131.23 km²。在时间演化过程上,区域植被覆盖度上升变化过程中存在波动性和不稳定性,整个过程可分为3个阶段(2000—2005年快速上升,2006—2009年波动下降,和2010—2017年稳步上升)。在空间格局上,2000—2017年间FVC增加区域主要分布在河道两旁和河流的尾间湿地,距离河道越近植被恢复越好,远离河道10 km FVC变化特征不显著($P > 0.05$)。结合下游生态输水数据分析表明,塔河下游植被恢复与输水量之间存在强依赖关系,且对生态输水的响应存在时间滞后性。

关键词:植被覆盖度;MODIS;塔里木河;遥感监测;生态输水

DOI: 10.18402/resci.2019.03.16

1 引言

植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)是指植被在地面的投影面积所占区域总面积的百分比,与地表生物量、叶面积指数、植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)等生态学指标高度相关^[1,2]。它是遥感反映区域植被活动特征、评价区域生态环境状况的重要指标参数,反映了区域气候变化和生态系统的健康状况,被广泛应用于气候变化、植被景观生态格局、区域生态环境质量评价等^[3,4]。陆表植被对全球变化的响应研究已经成为国际地圈生物圈计划(IGBP)的核心研究内容之一^[5]。

现有研究主要集中在以下几个方面:①全球变化背景下区域植被的响应特征。例如,Myneni等研究了全球变暖背景下北方高纬度地区植被活动^[6];方精云等利用了NOAA-AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)时间序列数据对中国近20年植被活动进行了监测和分析^[7];陈怀亮等重点研究了黄淮海地区植被变化对全球变化的响应特征^[8]。②区域植被变化的影响因素分析。例如,赵霞等探究了新疆植被活动与气温和降水的关系^[9];杜加强等探讨了新疆植被变化对气候变化和人类活动的响应^[10]。③植被变化对NPP的影响。例如,Wang等研究了

收稿日期:2018-09-30;修订日期:2018-11-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0504204);国家自然科学基金项目(41671034,41201460,U1178302)。

作者简介:朱长明,男,博士,副教授,主要研究方向为遥感信息提取、生态环境遥感以及干旱区水文水资源研究。E-mail: zhuchangming@jnsu.edu.cn

通讯作者:李均力, E-mail: ljli@ms.xjb.ac.cn

中国植被时空变化和对NPP(Net Primary Productivity)的影响^[11]。此外,植被遥感取得了很大进展,监测的空间精度越来越高,研究的时间尺度越来越密集。监测指标上也有将NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)上升到FVC。但是,现有的二分像元FVC反演方法仍然存在一些问题,尤其是在干旱稀疏植被覆盖区^[12]。由于NDVI在干旱稀疏植被区值偏高,二分模型参数率定困难,结果普遍存在高估现象^[12,13],导致FVC变化的年际间可比性较差^[5,10]。

塔里木河流域是全球气候变化的一个敏感区域。近几十年,在气候变化和人类活动的共同作用下,塔河下游地区植被生态退化显著。尤其是大西海子水库建成后,中上游基本没有水源下泄下游河道,下游长期缺水、断流,大面积胡杨林退化、枯死,生态环境退化非常严重。为了恢复和保护塔河下游的生态环境,塔河综合治理工程自2000年以来已经陆续向塔河下游完成了18次生态输水,大西海子累积下泄水量达到62.35亿 m^3 (21%来自孔雀河,79%来自干流)^[2,14]。国内外学者分别从植被遥感、地下水监测、生物多样性调查、胡杨生理长势等角度对塔河下游生态治理工程进行综合效益评估。例如:邓铭江等通过MODIS NDVI指数对输水初期(前7次)植被恢复进行了监测,研究发现塔河下游的植被整体得到改善^[15,16];黄粤等通过4期夏季的Landsat影像提取了2000—2011年区域植被覆盖度,分析了间隙性生态输水塔河下游生态环境的变化,结果表明植被覆盖度与地下水关系密切^[17];王士飞等利用2006年和2011年的Landsat影像对塔里木河下游区域进行了植被分类时空变化分析,认为生态输水是塔河下游植被变化的主导因素^[2];邓铭江通过野外实验观测数据,分析了地下水、胡杨林、群落对生态输水的响应,进一步指出了塔河下游生态系统的脆弱性,生态修复需要一个长期而缓慢的过程^[18],等等。这些研究取得了很多阶段性和结论性成果,并从不同的角度阐述和论证了生态输水的环境效益,具有重要的科学意义。但是,从现有的文献来看,上述研究时间上大部分是在生态输水的第一阶段或早期(2010年前),近年来的文献相对较少,塔河下游详细的生态水文过程还有待于进一步

深入研究;在植被遥感调查上虽然使用了多期遥感数据,但是仍然缺乏密集时序的过程监测。

由于生态输水量受到上游来水影响,具有不稳定性、波动性和间歇性等特点。原计划年度向下游输水3.14亿 m^3 ,但是实际上从第7次(2005年)调水后,博斯腾湖处于低水位,塔河干流来水减少,这一输水量计划远远没有实现。2006年调水量减少,从2007年期连续3年调水未能正常进行,甚至在2008年一度停止,到2010年生态输水量再次有了较大恢复,但2014年输水量又非常小。在不同输水强度的条件下,需要通过密集时间序列的遥感观测下游植被的生长和恢复情况,从而评估植被生长对不稳定性生态输水过程的响应。为此,本文基于MODIS密集时间序列遥感数据,结合地面观测资料,综合分析塔河下游植被的时间序列变化特征以及对地下水的响应,进一步阐明近20年来植被动态变化与生态输水的关系,宏观评价生态输水的效果。

2 研究区与数据源

2.1 研究区

塔里木河下游通常指恰拉水库—台特玛湖河段(总长约363 km),河道两岸的绿色廊道是阻止塔克拉玛干沙漠和库鲁克姆沙漠两大沙漠合拢的绿洲屏障,在区域生态环境中的作用举足轻重。本文中的研究区范围适当放宽,包括了孔雀河(从博斯腾湖生态调水),见图1。该区域属于典型的大陆性暖温带荒漠,平均降水量只有30 mm,蒸发量却达到2500~3000 mm,极端干旱气候,水资源补给主要靠上游补给,河道两侧为沙漠包围,区域生态环境非常敏感和脆弱^[19-21]。大西海子水库建成后,基本没有水源下泄下游河道,大西海子—台特玛湖段河道曾经一度干涸,大面积胡杨林退化、枯死,生态环境退化非常严重^[17,22]。大量的地表沙土和盐渍土被大风吹走,218国道被流沙多处掩埋^[23]。为了挽救下游日益恶化的生态环境,塔管局自2000年启用了向下游生态输水的方案,水源主要来自上游的孔雀河(博斯腾湖调水)和塔河干流。截至2017年9月,先后完成了18次生态输水,累积调水量达到62.35亿 m^3 。为了有效地监测下游生态水文状态,塔管局在沿干流垂直方向设置了生态监测断面,每个断面距离河道50、150、300、500、750、1050 m处挖设生态

2019年3月

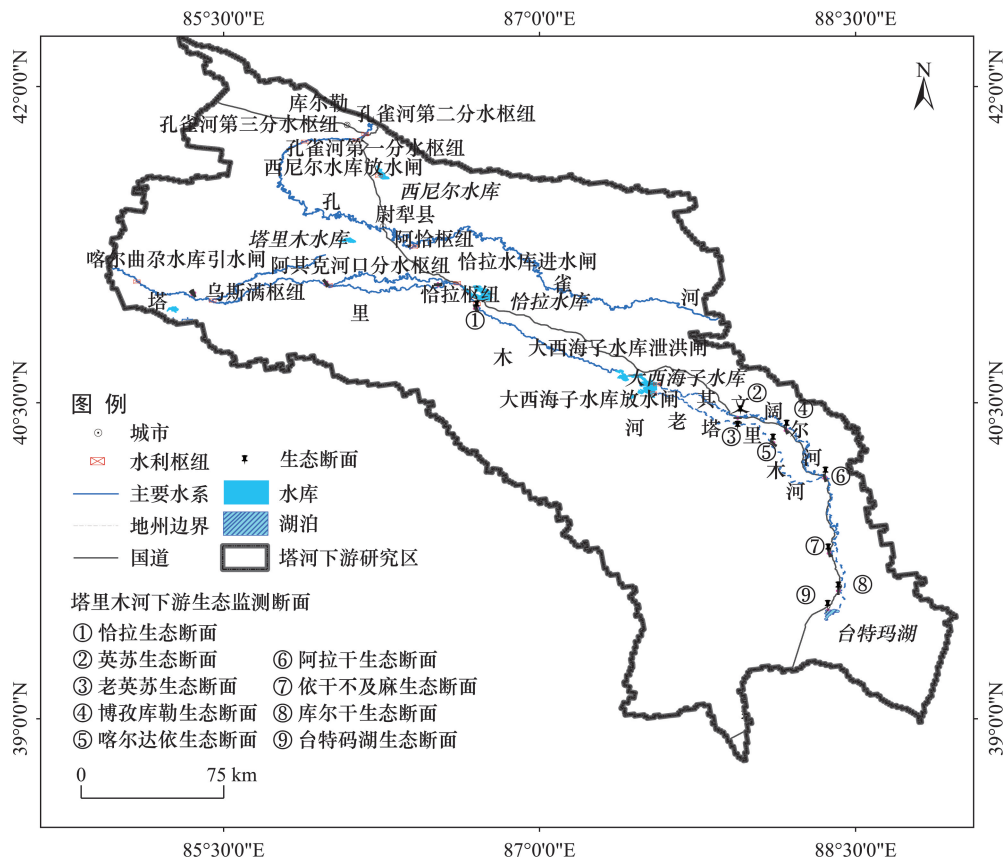


图1 研究区

Figure 1 Study area

井,监测地下水位动态。塔河下游共有恰拉、英苏、老英苏、博孜库勒、喀尔达依、阿拉干、依干不及麻、库尔干断面和台特玛9个生态断面。其中,台特玛湖断面是后来设置,布设有50 m和250 m两个地下水监测井。

2.2 数据源

本文选择的数据主要包括:MOD13Q1数据、GF-2数据、Sentinel、ETM+和野外台站观测数据。其中MOD13Q1使用的是2000—2017年,每年的第81天(4月1日)开始到第321天(11月17日)16天合成的NDVI产品,一年共16期,用于监测区域FVC的变化。GF-2数据的采集时间为:2017年8月3日和8日,空间分辨率为0.8 m,主要用来初始化二分像元模型参数和植被覆盖度精度验证。ETM+影像采用的是1999年9月15日和2000年的9月29日的数据,融合后空间分辨率为15 m;Sentinel影像采用的是2017年8月2日和8月29日数据,空间分辨率

为10 m。ETM+和Sentinel主要用来局部对比分析空间变化区域,从更细的尺度分析植被覆盖度变化。地下水位数据主要是来自生态断面的地下水观测数据,输水量数据来自塔管局水文监测数据和相关文献中的数据统一整理^[18,22]。

3 研究方法

在旱荒漠区,利用MODIS数据进行植被变化监测,最佳植被指数为NDVI^[24]。现有的遥感植被覆盖度估算算法中,基于NDVI的二分像元法计算简单、算法稳健、结果可靠,是区域尺度植被覆盖度遥感反演的首选方法^[4,25]。该模型原理:假设一个像素由植被和非植被两类构成,像元的光谱从理论上来说就是这个2类组份光谱的线性组合,且与各自组份在像元中占面积比率就是权重。那么,像元二分模型的计算模型可以表达为公式(1)^[26]:

$$FVC = \frac{F_C - F_{soil}}{F_{veg} - F_{soil}} \quad (1)$$

式中: F_c 是传感器观测到的信号; F_{veg} 是纯植被像元区的遥感信号; F_{soil} 是全无植被像元区的遥测信号。如果传感器观测到的信号强度用NDVI表示, 则像元二分模型可以进一步表达为公式(2):

$$FVC = \frac{NCVI - NDVI_{soil}}{NCVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (2)$$

$$\max.FVC = \max(FVC_1, FVC_2, FVC_3, \dots, FVC_n) \quad (3)$$

$$\text{ave}.FVC = \sum_{i=1}^n FVC_i / n \quad (4)$$

式中: $NDVI_{soil}$ 为完全是裸土或无植被覆盖区域的NDVI值; $NCVI_{veg}$ 则代表完全被植被所覆盖的像元的NDVI值, 即纯植被像元的NDVI值; $\max.FVC$ 、 $\text{ave}.FVC$ 分别为年最大植被覆盖度和年平均植被覆盖度; n 为年监测的总期数16。该方法的难点在于计算公式中 $NCVI_{veg}$ 、 $NDVI_{soil}$ 参数阈值的确定^[27,28]。

从二分模型的原理假设得知, 模型参数的率定需要找到植被和裸土覆盖的纯像元。由于混合像元的影响, 从250 m空间分辨率的影像上找到植被纯像元是比较困难的, 尤其是在植被较少的干旱区。但是, 如果从0.8 m空间分辨率的GF-2影像上寻找植被和非植被纯像元, 可行性来说相对容易。为此, 本文首先从GF-2影像上提取植被和非植被区, 然后重采样至250 m分辨率, 再根据纯植被区和非植被区对应的MODIS NDVI均值作为 $NCVI_{veg}$ 和

$NDVI_{soil}$ 。依据上述方法本文最终确定研究区的 $NCVI_{veg}$ 为0.86, $NDVI_{soil}$ 为0.11。根据国家2015版本《生态环境状况评价技术规范》, 结合区域植被的生态特征, 将流域干旱区的植被分为: 低疏植被区 ($5\% < FVC \leq 20\%$)、中等植被区 ($20\% < FVC \leq 50\%$) 和高植被覆盖区 ($FVC > 50\%$)。

4 结果分析与讨论

4.1 时间变化过程

图2显示了2000—2017区域最大植被覆盖度和平均植被覆盖度变化曲线。从图2可以看出, 区域的最大和平均植被覆盖度均呈现显著上升趋势 ($R^2 > 0.84$, $P < 0.01$), 区域最大植被覆盖度 ($\max.FVC$) 和区域平均植被覆盖度 ($\text{ave}.FVC$) 变化趋势基本上一致。但是, 区域植被覆盖在变化时间过程上呈现明显的波动性, 根据波动性变化特征, 2000—2017区域植被覆盖度变化大体上可分为3个阶段: 2000—2005年快速上升阶段, 此阶段的典型特征是植被覆盖度上升非常快; 2006—2009年波动性下降阶段, 此阶段植被覆盖度总体趋势下降但变化具有不确定性和不稳定性; 2010—2017年稳步上升阶段, 此阶段的植被覆盖度上升速度比较稳健, 基本上呈现逐年增加的特征。

影像直方图是图像灰度级概率密度函数一种

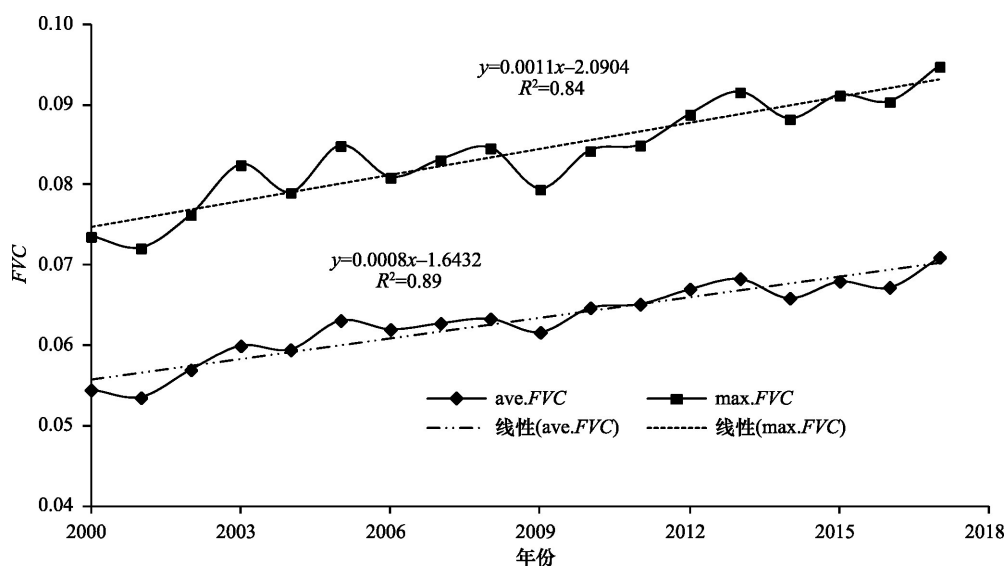


图2 2000—2017年塔河下游植被覆盖度总体变化时间过程

Figure 2 Temporal change of fractional vegetation cover in the lower reach of the Tarim River from 2000 to 2017

2019年3月

直观的离散化表达方法,从直方图可以清楚地看出图像在空间域分布。为了进一步更直观地反映区域植被的覆盖情况,本文统计了2000—2017年18期区域植被覆盖度的动态直方图,绘制了区域直方图时间序列曲线(见图3)。从影像直方图可以明显看出:2000年以来区域植被覆盖度直方图峰值总体上不断向右侧偏移,这说明人工生态输水促使流域范围内植被覆盖度呈逐年增加的趋势。2000年以后,随着塔河的综合治理工程和人工生态调水工程的实施,高植被覆盖度面积从2000年的3425.95 km²增加到2017年5486.52 km²,中植被覆盖区从2000年的6508.18 km²增加到2017年的7131.23 km²。

4.2 空间变化特征与强度

图4为2017年与2000年区域植被变化的空间变化范围和强度。从中可以看出塔河下游地区,2000—2017年间植被覆盖度增加区域主要分布在河道两旁和孔雀河下游区域,增加最显著的地方在河道尾间湿地和下河道两侧。此外,从图上还可看出局部区域植被覆盖也呈现退化,主要分布在恰拉水库上游地区和距离河道较远地区。通过局地2000年的ETM+影像和2017年的Sentinel影像比

较,可以明显看出河道两侧的植被得到显著恢复(图4);局部植被覆盖度降低,例如,图4C是由于水位上升,地势较低的水库上游以及河床和阶地被淹。

分别沿中心河道向两侧做缓冲区分析,缓冲区距离分别设置为:0~3 km、3~5 km、5~10 km、10~20 km。通过空间缓冲区 Person 相关统计分析发现:随着距中心河道距离的增加,相关性在减弱,植被覆盖度的增加强度和显著性水平在降低(图5)。其中,0~3 km 范围内植被覆盖度呈现显著上升趋势,上升速率为0.41%/a,决定系数 R^2 达到0.72($P<0.01$);3~5 km 植被覆盖度提高速率0.40%/a,决定系数 R^2 为0.62($P<0.01$);5~10 km 范围内,植被覆盖度上升速度为0.16%/a, R^2 为0.47($P<0.01$);10~20 km 范围内植被覆盖度变化速度为0.09%/a($P>0.05$)。这表明,远离河道10 km,植被变化特征不显著。

4.3 植被变化与生态输水过程分析

截至2017年9月,塔河下游共完成18次生态输水;可分2个阶段:2000—2009年为第1阶段,2010至今为第2阶段。累积从大西海子水库泄洪闸下泄水量达到62.35亿 m³,输水水头共到达台特玛湖13

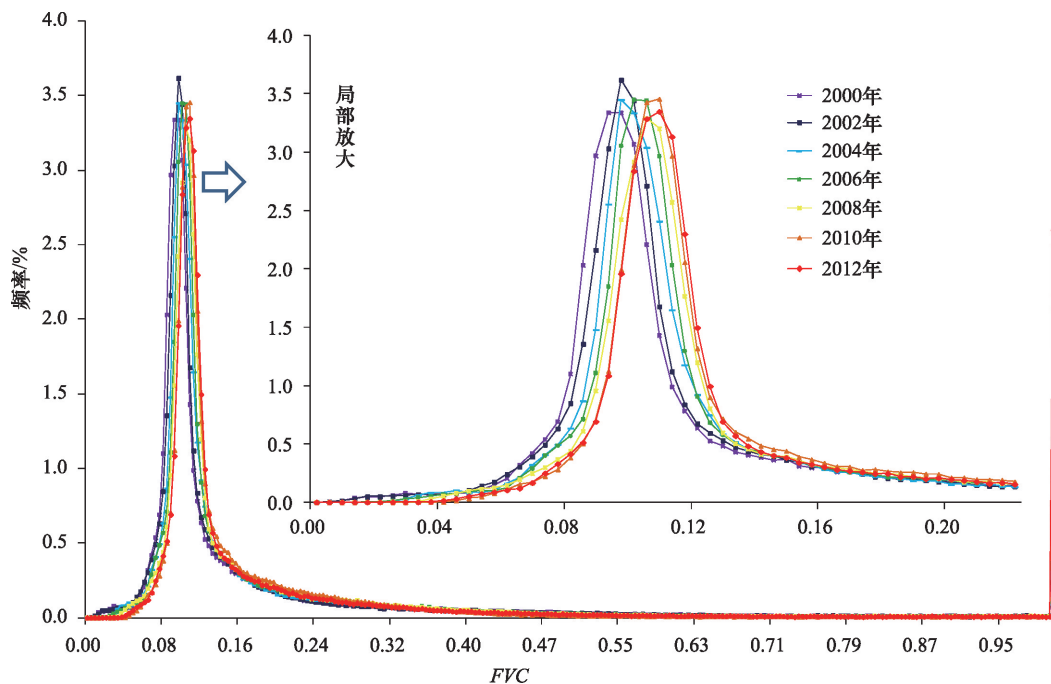


图3 塔河下游植被覆盖度直方图变化

Figure 3 Histogram of fractional vegetation cover in the lower reach of the Tarim River

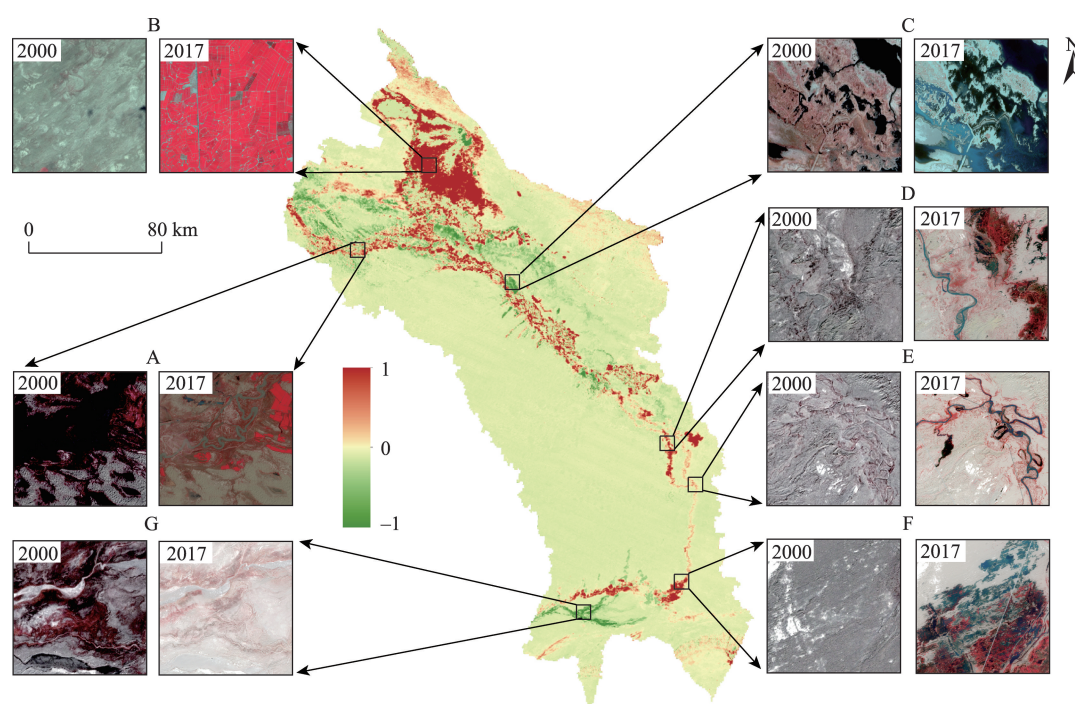


图4 2000—2017年塔河下游植被覆盖变化与局部对比

Figure 4 Distribution of vegetation change in the lower reach of the Tarim River from 2000 to 2017

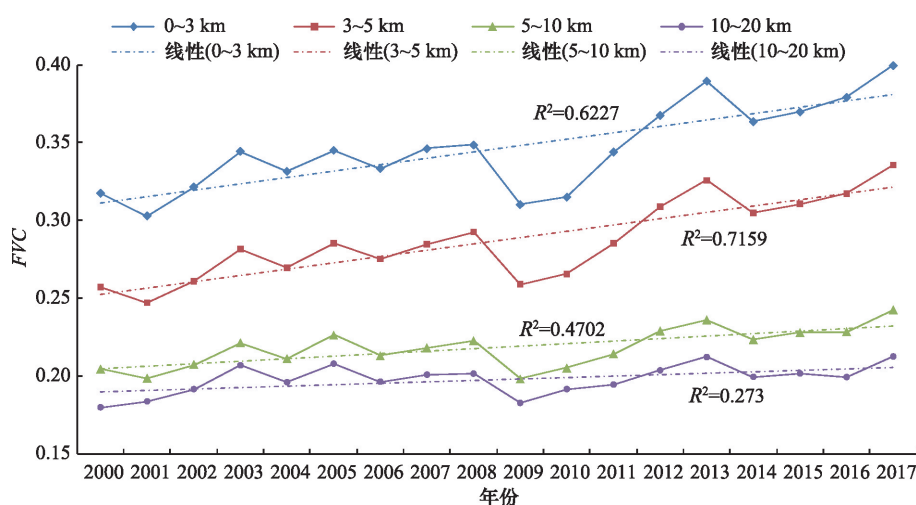


图5 不同空间范围植被覆盖度动态变化曲线

Figure 5 Fractional vegetation cover changes by distance from the river

次,其中第1次、第2次、第8次、第9次、第10次水头未直接抵达(图6)。从图6中可以看出:塔河下游的生态输水量非常的不稳定,完成前5次生态输水后,第6次输水量明显下降,尤其是2007年起连续3年无法正常进行,直至2010年输水量才有较大程度的恢复。第2阶段,除了2014年输水未正常进行外(水量非常少),其余年份输水量基本得到了有效的

保证。通过比较生态输水数据和塔河下游的植被动态变化过程发现:生态输水有效地提高了下游的植被覆盖,植被覆盖度的变化与输水数据之间存在着强耦合关系。这和国内外其他专家学者的相关研究结论基本一致^[17,29]。

从2000年开始,下游植被覆盖度逐年提升,前7次输水使得下游植被已达到一定恢复水平;但是,

2019年3月

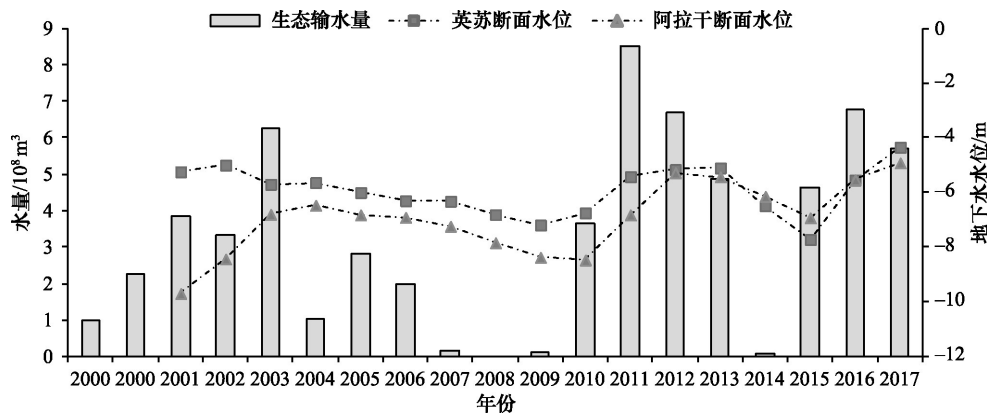


图6 生态输水过程与地下水位变化

Figure 6 Volumes of the ecological water transfer (18 times) and variation of groundwater level

2007、2009年生态输水甚少,2008年暂停了生态输水,植被覆盖度在2007—2009年表现为下降,区域植被覆盖度在2009年达到了最低拐点,随着2010年生态输水量的恢复,区域植被覆盖度又开始回升,但是,2013—2014年动态急剧下滑,区域植被覆盖度在2014年又出现一个低谷,之后又持续回升。植被覆盖度变化过程与生态调水量动态过程具有非常高的特征一致性。通过person相关和显著性检验发现:下游植被覆盖度与生态调水量直接相关关系为0.367($P>0.05$);但是,植被覆盖度和调水数据的错位相关(前一年的调水数据和后一年的植被覆盖度动态)关系系数为0.589($P<0.05$)。这从统计角度显示了植被覆盖度的恢复响应对生态输水有时间滞后性^[30],这主要与地下水位抬升、植被生理响应以及输水时间等因素有关^[15,22]。地表水通过渗透补给周边地下潜水和地下水,地下水位的抬升需要一个缓慢的时间过程,即地下水位抬升具有时间滞后性^[30,31]。其次当植被被浇灌后待水退却,到适宜的季节种子萌芽,植被对生态输水的响应有时间差。此外,有些年份输水时间是9—12月份的冬灌,对植被生长的影响只能是在第2年。

图7显示了不同生态井的地下水位监测数据,从中可以看出地下水埋深存在一个坡度,随着距离的增加地下水流动的势能很小。这也说明了地下水水位的抬升一方面受到输水量的影响,另一方面随着距离的增加,地下水抬升高度降低^[30,31],主要是由于塔河下游生态输水的方式为通过单通道(或双

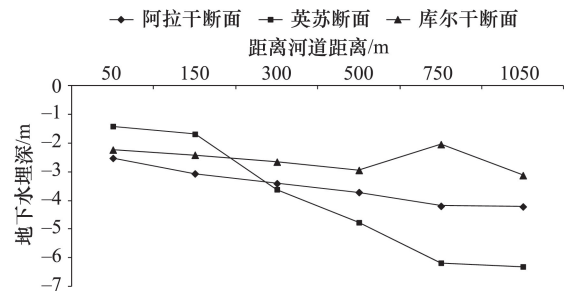


图7 地下水埋深空间分布

Figure 7 Change of groundwater depth with distance from the river course

通道)输水^[18],水资源的供给主要是沿着河道向下游流淌输送,过水面范围很小,河水首先补给的是沿河地表水,然后地表水补给地下水,所以随着距离的增加,地下水抬升高度有限。而植被响应的主要在近河道10 km范围内,因此,进一步表明生态调水影响的主要是河道周边的植被^[30,32]。

5 结论

本文以MODIS密集时间序列数据为主要数据源,通过高空间分辨率的GF-2数据与高时间分辨率的MODIS NDVI相结合,获取植被覆盖度提取像元二分模型的参数,重建了2000—2017年塔里木河下游植被覆盖度动态变化过程,分析了其时空变化特征,以及与生态输水量的关系,宏观评估了塔河下游的植被覆盖恢复情况,研究得到以下结论:

(1)生态输水以来塔河下游植被覆盖度总体上呈现增加趋势;时间过程上呈现波动性和不稳定性。依据变化特征可分为:快速上升(2000—

2005)、波动下降(2006—2009)和稳步上升(2010—2017)三个阶段。

(2)塔河下游植被覆盖度变化过程和生态输水量显著相关($P < 0.05$),在响应时间上植被变化存在滞后性。

(3)空间上植被覆盖度增加的区域主要分布在河道的两旁和下游的尾间湿地。距离河道越远植被覆盖度和输水量的相关性越弱,距离河道10 km以外植被覆盖度增加趋势不显著($P > 0.05$)。

综上所述,塔河下游生态输水对河岸植被恢复来说效果是非常明显;但是影响的空间范围有限且对生态输水量强依赖。所以,对于整个塔河下游脆弱的生态系统来说,生态敏感性和脆弱性本质未发生根本转变,生态恢复是个长期、缓慢的过程,目前取得的成效有待于继续巩固和加强。

参考文献(References):

- [1] 吴云,曾源,赵炎,等.基于MODIS数据的海河流域植被覆盖度估算及动态变化分析[J].资源科学,2010,32(7):1417-1424. [Wu Y, Zeng Y, Zhao Y, et al. Monitoring and dynamic analysis of fractional vegetation cover in the Hai river basin based on MODIS data[J]. *Resources Science*, 2010, 32(7): 1417-1424.]
- [2] 王士飞,包安明,王永琴,等.水情波动下2006—2011年塔里木河下游植被变化研究[J].水土保持通报,2013,33(4):131-135. [Wang S F, Bao A M, Wang Y Q, et al. Change of vegetation coverage under hydrological fluctuations in lower reaches of Tarim river basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(4): 131-135.]
- [3] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268. [Mu S J, Li J L, Chen Y Z, et al. Spatial differences of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001-2010[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1255-1268.]
- [4] 冯莉莉,何贞铭,刘学锋,等.基于MODIS-NDVI数据的吉林省植被覆盖度及其时空动态变化[J].中国科学院大学学报,2014,31(4):492-499. [Feng L L, He Z M, Liu X F, et al. Dynamic monitoring of the fractional vegetation cover in Jilin province based on MODIS-NDVI data[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Science*, 2014, 31(4): 492-499.]
- [5] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. *Science*, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [6] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991[J]. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [7] 方精云,朴世龙,贺金生,等.近20年来中国植被活动在增强[J].中国科学,2003,33(6):554-565. [Fang J Y, Piao S L, He J S, et al. China's vegetation activities have been increasing in the past 20 years[J]. *Science in China*, 2003, 33(6): 554-565.]
- [8] 陈怀亮,徐祥德,杜子璇,等.黄淮海地区植被活动对气候变化的响应特征[J].应用气象学报,2009,20(5):513-520. [Chen H L, Xu X D, Du Z X, et al. Vegetation activity responses to climate change in the Huang Huai Hai Area based on GIMMS NDVI dataset[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(5): 513-520.]
- [9] 赵霞,谭琨,方精云.1982—2006年新疆植被活动的年际变化及其季节差异[J].干旱区研究,2011,28(1):10-16. [Zhao X, Tan K, Fang J Y. NDVI-based interannual and seasonal variations of vegetation activity in Xinjiang during the period of 1982-2006[J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(1): 10-16.]
- [10] 杜加强,贾尔恒·阿哈提,赵晨曦,等.1982—2012年新疆植被NDVI的动态变化及其对气候变化和人类活动的响应[J].应用生态学报,2015,26(12):3567-3578. [Du J Q, Jiaerheng A, Zhao C X, et al. Dynamic changes in vegetation NDVI from 1982 to 2012 and its responses to climate change and human activities in Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(12): 3567-3578.]
- [11] Wang X, Tan K, Chen B, et al. Assessing the spatiotemporal variation and impact factors of net primary productivity in China[J]. *Scientific Reports*, 2017, DOI: 10.1038/srep44415.
- [12] Jiapaer G, Chen X, Bao A. A comparison of methods for estimating fractional vegetation cover in arid regions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1698-1710.
- [13] Xiao J, Moody A. A comparison of methods for estimating fractional green vegetation cover within a desert-to-upland transition zone in central new mexico, USA[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(2): 237-250.
- [14] Zhu X, Yuan G, Yi X, et al. Quantifying the impacts of river hydrology on riparian vegetation spatial structure: Case study in the lower basin of the Tarim River, China[J]. *Ecohydrology*, 2017, 10(7): 1-9.
- [15] 盛昊,李均力,杨辽,等.MODIS-NDVI时序数据分析方法研究:以塔里木河下游第七次秋季输水为例[J].干旱区地理,2007,30(2):251-256. [Sheng H, Li J L, Yang L, et al. MODIS-NDVI time series method: A case study on the 7th autumn ecologic water conveyance in the lower reaches of Tarim river[J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(2): 251-256.]
- [16] 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. [Deng M J. An appraisal of remote-sensing monitoring on vegetation restoration and ecological water-conveying in the lower reaches of Tarim River[J]. *Journal of*

2019年3月

- Glaciology and geocryology*, 2007, 29(3): 380–386.]
- [17] 黄粤, 包安明, 王士飞, 等. 间歇性输水影响下的2001–2011年塔里木河下游生态环境变化[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1251–1262. [Huang Y, Bao A M, Wang S F, *et al.* Eco-environmental change in the lower Tarim River under the influence of intermittent water transport[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(9): 1251–1262.]
- [18] 邓铭江, 周海鹰, 徐海量, 等. 塔里木河下游生态输水与生态调度研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(8): 864–876. [Deng M J, Zhou H Y, Xu H L, *et al.* Research on the ecological operation in the lower reaches of Tarim River based on water conveyance[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2016, 46(8): 864–876.]
- [19] 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. [Hao X M, Chen Y N, Li W H, *et al.* Response of desert riparian forest vegetation to groundwater depth changes in the middle and lower Tarim river[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(11): 1123–1130.]
- [20] 闫正龙, 黄强, 牛宝茹. 应急输水工程对塔里木河下游地区植被覆盖度的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 621–626. [Yan Z L, Huang Q, Niu B R. Effects of emergent water project on vegetation coverage in the lower reaches of Tarim river[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3): 621–626.]
- [21] Bao A M, Huang Y, Ma Y G, *et al.* Assessing the effect of ewdp on vegetation restoration by remote sensing in the lower reaches of tarim river[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 74: 261–275.
- [22] 贾俊姝, 孟悦, 戴俊生, 等. 生态输水对塔里木河下游地下水时空分布特征的影响[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2016, 37(5): 81–90. [Jia J Z, Meng Y, Dai J S, *et al.* Affect on characteristic of groundwater spatial and temporal distribution after ecological water transport in the lower reaches of Tarim river [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural : Natural Science Edition*, 2016, 37(5): 81–90.]
- [23] 闫正龙, 汤国安. 塔里木河下游生态应急输水植被恢复的遥感监测[J]. 水土保持通报, 2005, 25(3): 58–60. [Yan Z L, Tang G A. Remote sensing based monitor of vegetation recovery in lower reaches of Tarim River following implementation of emergent water transportation project[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, 25(3): 58–60.]
- [24] 郭玉川, 何英, 李霞. 基于MODIS的干旱区植被覆盖度反演及植被指数优选[J]. 国土资源遥感, 2011, 23(2): 115–118. [Guo Y C, He Y, Li X. Remote sensing inversion of vegetation coverage and optimization of vegetation index based on MODIS data in arid area [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2011, 23(2): 115–118.]
- [25] 罗敏, 古丽·加帕尔, 郭浩, 等. 2000–2013年塔里木河流域生长季NDVI时空变化特征及其影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 50–63. [Luo M, Guli J, Guo H, *et al.* Spatial-temporal variation of growing-season NDVI and its responses to hydro-thermal condition in the Tarim River Basin from 2000 to 2013[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(1): 50–63.]
- [26] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 2004, 26(4): 153–159. [Li M M, Wu B F, Yan C Z, *et al.* Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun reservoir by remote sensing[J]. *Resource Science*, 2004, 26(4): 153–159.]
- [27] Ding Y L, Zheng X M, Zhao K, *et al.* Quantifying the impact of NDVIsoil determination methods and NDVIsoil variability on the estimation of fractional vegetation cover in Northeast China[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(1): 1–15.
- [28] 牛宝茹, 刘俊蓉, 王政伟. 干旱半干旱地区植被覆盖度遥感信息提取研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(1): 27–30. [Niu B R, Liu J R, Wang Z W. Remote sensing information extraction based on vegetation fraction in drought and half-drought area [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(1): 27–30.]
- [29] 郭继凯, 吴秀芹, 董贵华, 等. 基于MODIS/NDVI的塔里木河流域植被覆盖变化驱动因素相对作用分析[J]. 干旱区研究, 2017, 34(3): 621–629. [Guo J K, Wu X Q, Dong G H, *et al.* Vegetation coverage change and relative effects of driving factors based on MODIS/NDVI in the Traim River Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(3): 621–629.]
- [30] 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. [Xu H L, Ye M, Li J M. Dynamic changes of groundwater and ecological response of natural vegetation after water transport in the lower reaches of the Tarim River [J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(4): 460–470.]
- [31] 王希义, 徐海量, 潘存德, 等. 2000–2014年塔里木河下游地下水补给量及合理需求量[J]. 水资源保护, 2017, 33(4): 32–39. [Wang X Y, Xu H L, Pan C D, *et al.* Study on groundwater recharge amount and suitable demand in lower reaches of Tarim river from 2000 to 2014[J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(4): 32–39.]
- [32] 安红燕, 叶茂, 徐海量. 塔里木河下游胡杨径向生长量对生态输水的响应[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 957–962. [An H Y, Ye M, Xu H L. Response of radial increment of populus euphratica to ecological water conveyance in lower reaches of the tarim river[J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(4): 957–962.]

Spatiotemporal dynamics of vegetation activities in the lower reach of the Tarim River based on MODIS intensive time series data

ZHU Changming¹, LI Junli², SHEN Zhanfeng^{3,4}, SHEN Qian¹

(1. Department of Geography and Environment, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;

2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China;

3. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS, Beijing 100101, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For the assessment of environmental benefits and performance of ecological water conveyance in the lower reaches of the Tarim River, this study detected and assessed riparian vegetation restoration by the MODIS 250 m 16-day synthetic product of MOD13Q1 from 2000 to 2017. Fractional vegetation cover (FVC) was used as the main ecological index that was estimated by a pixel dichotomy mode based on MOD13Q1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and GF-2 data. Annual maximum and average vegetation coverages were used for comprehensively exploring the vegetation growth and recovery in the lower reach of the Tarim River basin. The results show that: vegetation activities in the basin enhanced in the past decades after the ecological water transfer. Regional maximum and average FVC increased significantly ($P < 0.01$). The high vegetation coverage area increased from 3425.95 km² in 2000 to 5486.52 km² in 2017, and the medium vegetation coverage area increased from 6508.18 km² in 2000 to 7131.23 km² in 2015. Temporally, fluctuations were observed in the process of regional vegetation coverage increase. The process can be divided into three stages: (1) the rapid increase stage from 2000 to 2005; (2) fluctuations in 2006-2009; and (3) steady rising in 2010-2017. Spatially, the areas of vegetation increase are mainly distributed on both sides of the river and the river's tail wetland between 2000 and 2017. The closer to the river, the better the vegetation was restored. At more than 10 km away from the river, the FVC change characteristics are not significant ($P > 0.05$). Combined with the analysis of downstream ecological water transfer data, there is a strong dependence between vegetation restoration and the volume of water transfer in the lower reach of the Tarim River. Moreover, there is a time lag in the response of vegetation restoration to ecological water transfer.

Key words: fractional vegetation cover (FVC); MODIS; Tarim River; remote sensing monitoring; ecological water conveyance