

doi: 10.6046/gtzyyg.2020.03.20

引用格式: 霍天赐,颜伟,马晓飞. 内陆河尾间湖泊水域面积变化及驱动因素研究——以台特玛湖地区为例[J]. 国土资源遥感,2020,32(3):149–156. (Huo T C,Yan W,Ma X F. A study of the variation and driving factors of the water area of the terminal lake of inland river: A case study of Taitema Lake region[J]. Remote Sensing for Land and Resources ,2020,32(3):149–156.)

内陆河尾间湖泊水域面积变化及驱动因素研究

——以台特玛湖地区为例

霍天赐¹, 颜 伟², 马晓飞^{1,3}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 信阳师范学院地理
科学学院, 信阳 464000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 尾间湖作为干旱区内陆河下游绿洲生态系统的重要组成部分,具有涵养水源、防风固沙等功能。然而近半个世纪以来,受气候变化和人类活动的影响,内陆河尾间湖不断萎缩,湖区周围生态环境一度恶化,已严重威胁区域社会经济发展。为探究干旱区尾间湖泊水域变化及其驱动因素,以新疆维吾尔自治区台特玛湖地区为例,选取 1986—2019 年间 9 期 Landsat TM/OLI 遥感影像,提取并分析了台特玛湖地区水域面积变化特征及其驱动因素。结果表明: 34 a 间研究区水域面积共增加了 163.93 km²,21 世纪前水域零星分布在车尔臣河下游河道附近,进入 21 世纪以来主要分布在台特玛湖附近; 研究区水域重心迁移经历了 20 世纪 80 年代末的快速向西转移,20 世纪 90 年代期间的缓慢向东移动、20 世纪 90 年代末至 21 世纪初的大幅度迅速东移和 21 世纪以来的波动向东移动 4 个过程; 以塔里木河下游输水为界,输水前台特玛湖地区水域面积主要受区域自然因素综合作用,其中降水为主要驱动因素($r^2=0.825$),输水后,人为干预的输水过程是影响研究区水域面积变化的主导因素($r^2=0.977$)。随着不断向下游输水,台特玛湖地区生态环境持续恢复。为防止湖水丰盈,向东溢入罗布泊,有必要探究台特玛湖最大载水量,以期合理控制输水过程。

关键词: 尾间湖; 台特玛湖; 水域变化; 生态输水; 遥感

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2020)03-0149-08

0 引言

台特玛湖是中国最大内陆河塔里木河和车尔臣河的尾间湖。20 世纪 70 年代后,由于塔里木河中上游不合理的截流用水,导致下游断流,台特玛湖干涸,区域生态环境急剧恶化^[1-2]。为遏制塔里木河流域生态环境持续恶化,2000 年国家启动了塔里木河流域近期综合治理工程,向下游生态输水^[3-4]。由此产生的“生态输水—湖泊波动响应—生态环境演变”间的交互关系,一度引起了相关学者的重点关注。李丽君等^[5]研究了近 20 a 间塔里木河下游输水对生态环境的影响,发现塔里木河下游植被逐渐恢复,地下水抬升,水质好转,生态环境明显改善;王雅梅等^[6]调查研究了生态输水前后台特玛湖植物的多样性变化,发现随着输水的进行,区域植被多

样性明显增加;钟家骅^[7]利用中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer,MODIS)影像数据对 2007—2017 年间塔里木河流域植被生态变化情况进行研究;郭继凯^[8]研究了塔里木河植被覆盖对气候变化及人类活动的响应;黄粤等^[9]对间歇性输水下塔里木河下游生态环境变化进行研究,发现区域植被覆盖度随地下水抬升呈逐渐增加趋势,而地下水位随生态输水波动而变化;阿布都米吉提等^[10]基于空间数据研究了台特玛—康拉克湖泊群水域变化情况。以上研究多集中探究了塔里木河下游生态环境对生态输水的响应,缺乏对台特玛湖面积变化,尤其是输水前后影响水域变化的主导因素研究。

随着 2019 年 8 月塔里木河下游第 20 次生态输水的启动,亟需进行台特玛湖水域变化及其周围生态响应的综合梳理。本文基于对台特玛湖地区 34 a

收稿日期: 2019-11-06; 修订日期: 2020-03-06

基金项目: 江苏省自然科学基金项目“基于遥感和水文模型的喀喇昆仑山北坡冰川阻塞湖突发洪水监测与预报研究”(编号: BK20181059)、河南省科技攻关项目“基于降水观测误差修正的河南省降水产品再分析及其灾害风险评估”(编号: 202102310338)和信阳师范学院青年骨干教师资助计划(编号: 2019GGJS-07)共同资助。

第一作者: 霍天赐(1994-),男,硕士,科研助理,主要从事水文遥感与陆面过程模拟研究。Email: huotianci2@163.com。

通信作者: 颜 伟(1986-),男,博士,讲师,主要从事水文水资源和遥感水文研究。Email: yanwei.jw@xynu.edu.cn。

间遥感影像进行水体提取,对比分析了台特玛湖地区水域面积波动变化及其驱动因素,旨在进一步量化评估生态输水效益,为完善内陆河水资源综合利用提供理论依据。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

台特玛湖位于新疆维吾尔自治区若羌县北约 50 km 处,西侧为塔克拉玛干沙漠,东侧为库鲁克沙漠,东距罗布泊干涸湖盆约 175 km,是塔里木河和车尔臣河的尾间湖,过去曾与罗布泊相通^[6]。车尔臣河发源于昆仑山木孜塔格峰^[11],流经且末县城后一路向东北方向沿塔克拉玛干沙漠边缘注入台特玛湖,全长 800 多 km。20 世纪 80 年代末,车尔臣河河道自下游库完墩开始向北迁移^[10],河水流经沙漠,在沙丘间蓄积形成康拉克湖群,又注入博斯坦洼地,形成大片水域^[11]。本文描述的台特玛湖地区包括台特玛湖以及车尔臣河下游硝尔库勒至台特玛湖区域。为突出台特玛湖,文中将康拉克湖群和博斯坦洼地统称为车尔臣河下游水域。研究区干旱少雨,属极端干旱大陆性气候^[12],年均降水量 25 mm,蒸发量 2 500 mm,年均气温 10.1 ℃,全年太阳总辐射量 119.2 kcal/cm³ (1 kcal≈4185.85 J)。区域自然植被主要以红柳(*Tamarix ramosissima* Lcdcb.)和芦苇(*Phragmites communis* (Cav.) Trin. ex Steud.)为主,其他植被有胡杨(*Populus euphratica*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge)和骆驼刺(*Alhagi sparsifolia* Shap.)等。

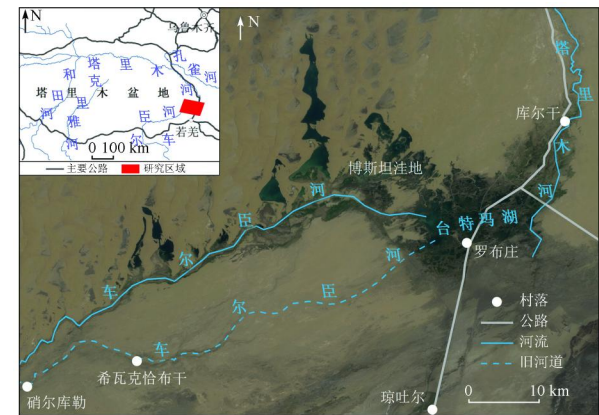


图 1 台特玛湖地区示意图
(2019 年 7 月 Landsat OLI B4(R),B3(G),B2(B)影像)

Fig.1 Overview of Taitema Lake region

1.2 数据来源

选取 1986—2019 年间 Landsat TM 和 OLI 系列、行列号为 141/033 的 9 期遥感影像(表 1)作为本研究

的主要数据源。影像均下载自美国地质勘探局(United States Geological Survey,USGS)网站(<http://earthexplorer.usgu.gov>)。所选 9 期影像在研究区范围内均无云雾覆盖,且成像时间均在 6—9 月份,以此减小季节差异带来的误差。利用 ENVI5.3 对全部影像进行预处理(辐射定标、大气校正和几何纠正),消除大气所造成的干扰,最后裁剪出研究区范围。

表 1 遥感影像数据信息

Tab.1 Information of remote sensing images				
编号	传感器类型	行列号	获取时间	空间分辨率/m
1	TM	141/033	1986-06-17	30
2	TM	141/033	1991-08-18	30
3	TM	141/033	1994-06-07	30
4	TM	141/033	1998-09-06	30
5	TM	141/033	2002-06-29	30
6	TM	141/033	2007-06-11	30
7	TM	141/033	2011-08-25	30
8	OLI	141/033	2015-08-20	30
9	OLI	141/033	2019-07-14	30

气象数据来自中国气象科学数据共享网(<http://data.cma.cn>),包括铁干里克站 1986—2018 年间的气温和降水数据。塔里木河输水数据来源于塔里木河流域管理局。

2 研究方法

2.1 水域信息提取

遥感影像中特定波段进行归一化差值计算得出的归一化差分水体指数(normalized difference water index,NDWI)可以凸显影像中的水体信息^[13],是目前常用的提取水体信息的方法,但该方法易混淆遥感影像中的阴影与水体;而徐秋涵^[14]提出的一种改进归一化差值水体指数(modified normalized difference water index,MNDWI)能够很好地区分遥感影像中的阴影与水体。考虑到研究区范围内存在大量的高大沙丘,形成部分阴影,故选用 MNDWI 对研究区水体进行提取,其表达式为:

$$MNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{MIR}}{\rho_{Green} + \rho_{MIR}}, \tag{1}$$

式中 ρ_{Green} 和 ρ_{MIR} 分别为绿光波段和中红外波段的反射率。

2.2 重心点转移模型

重心是描述地理要素空间特征的重要指标^[15],能够反映一段时期内地理要素的空间位置变化轨迹。通过计算研究区不同时期水域的重心,既能直观地认识研究区水域空间变化特征,又能定量地描述水域在空间上的变化情况。重心计算公式为^[16]:

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^n S_{ti} x_i}{\sum_{i=1}^n S_{ti}}, Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n S_{ti} y_i}{\sum_{i=1}^n S_{ti}}, \quad (2)$$

式中： X_t 和 Y_t 分别为第 t 年水域重心的经度和纬度； S_{ti} 为组成第 t 年水域中第 i 个离散水面的面积； x_i 和 y_i 分别为第 i 个离散水面的经纬度。重心移动方向计算公式为^[15]：

$$\alpha = \frac{k\pi}{2} + \arctan\left(\frac{Y_{t+1} - Y_t}{X_{t+1} - X_t}\right), \quad (3)$$

式中： α 为第 $t+1$ 年相对于第 t 年重心移动的角度（ $-180^{\circ}\leq\alpha\leq180^{\circ}$ ）， 0° 表示正东方向，逆时针方向为正，顺时针方向为负。重心移动距离 d 计算公式为：

$$d = C \sqrt{(Y_{t+1} - Y_t)^2 + (X_{t+1} - X_t)^2}, \quad (4)$$

式中： C 为常数，是球面坐标转换为平面距离的系数，其值等于 $111.111^{[17]}$ 。

2.3 变化幅度及动态度指数

为深入分析研究区水域面积变化特征，引入水域面积变化幅度 R 和动态度指数 R_s 2个指标。前者主要反映一段时期内水域面积变化总体形势；后者用以反映这种变化的速度。 R 和 R_s 的计算公式^[16]为：

$$R = \frac{(S_b - S_a)}{S_a} \times 100\%, \quad (5)$$

$$R_s = \frac{(S_b - S_a)}{S_a T} \times 100\%, \quad (6)$$

式中： S_a 和 S_b 分别表示研究时段开始和结束年份的水域面积； T 为研究时段长度。

3 结果与分析

3.1 水域面积时空变化特征

对所选9期遥感影像利用MNDWI指数提取研究区范围内水体。选取合适阈值，对提取结果进行二值化处理，将研究区分为水体和非水体2类，再通过随机选取的1000个样点对每期结果进行精度验证，结果表明验证精度均在89%以上。

图2展示了研究区水域时空变化，可知，20世纪80年代中后期，车尔臣河还未改道^[10,18]，水域在旧河道附近零星分布；20世纪90年代至21世纪初，车尔臣河河道逐渐往北迁移，旧河道附近再无水域分布，相应水域随河道往北偏移分布在河道附近。正是由于塔里木河下游断流，加之车尔臣河改道等因素导致的其正常年份水量难以汇入台特玛湖，使

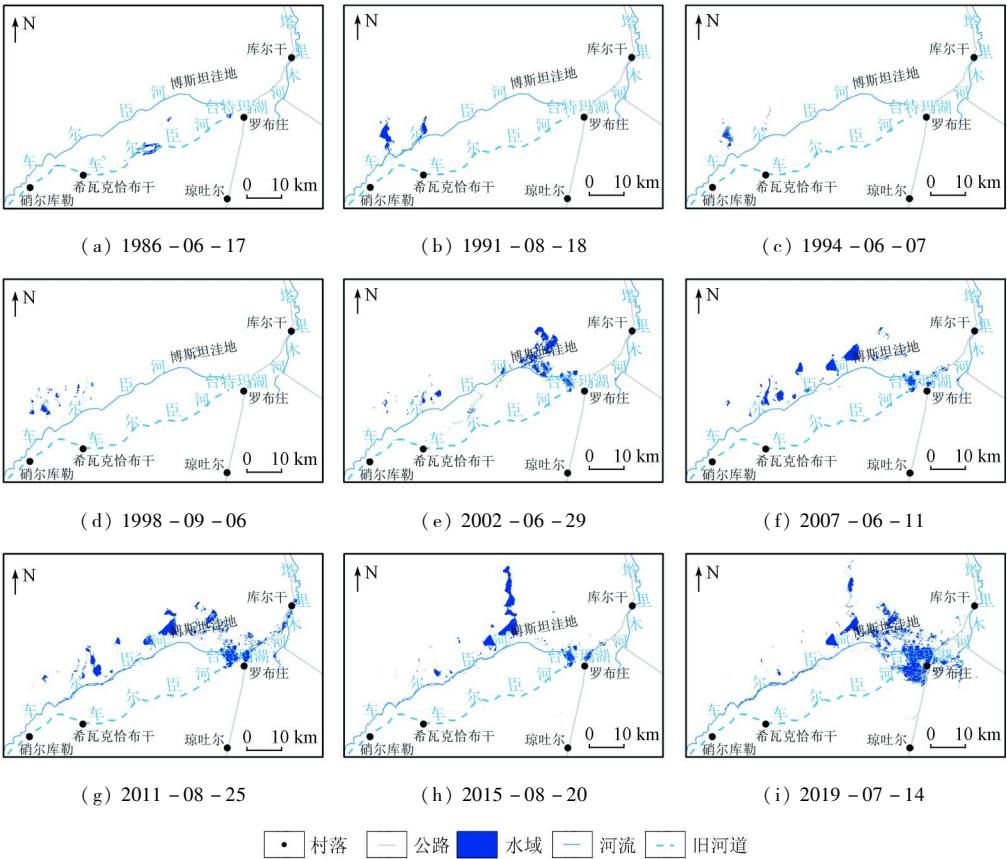


图2 1986—2019年间台特玛湖地区水域面积时空变化

Fig. 2 Spatial - temporal variation of the water area in the Taitema Lake region from 1986 to 2019

台特玛湖长期干涸。21 世纪初,台特玛湖开始出现水域,且水域面积显著增大(图 3),向西北延伸至博斯坦洼地,加之车尔臣河改道完成^[10],研究区西侧许多大大小小的水域沿河道分布,并也扩张至博斯坦洼地,逐渐与其东侧的台特玛湖相接。这主要是因为 2000 年开始实施的塔里木河下游输水工程^[19],恢复了断流已久的塔里木河下游,并最终将水注入台特玛湖;也正是因为长期向下游输水,研究区地下水位有所提高^[5],相应的车尔臣河补给地下水减少,使流域下游水域面积有所增大。

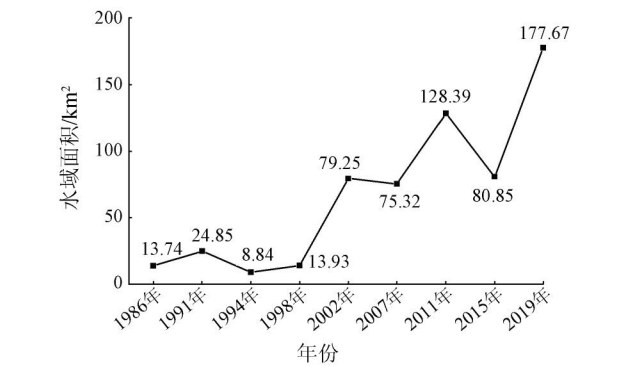


图 3 1986—2019 年间台特玛湖地区水域面积变化
Fig. 3 Changes of the water area of Taitema Lake region from 1986 to 2019

整体看来,研究区水域空间变化特征可以概括为 2 个阶段:第一个阶段是 21 世纪前,水域呈现出研究区西侧多、而东侧少甚至没有的空间格局;第二个阶段是进入 21 世纪以来,研究区东西侧水域面积均有增加,但东侧增长明显快于西侧,并逐渐形成“东多西少”的空间格局。

图 4 是 1986—2019 年研究区水域重心位移图,表 2 为具体转移距离和角度。可知该区水域重心位移划分为 4 个阶段:①20 世纪 80 年代末水域重心由研究区中部车尔臣河旧河道附近快速向西侧迁移;②20 世纪 90 年代,水域重心在研究区西侧缓慢向东侧移动,表现为 1994 年和 1998 年水域重心较其前一时期分别向北偏西 80.43°和北偏东 63.38°方向上移动了 2.78 km 和 5.46 km,这是因为该时期车尔臣河改道造成的;③20 世纪 90 年代末至 21 世纪初,是研究区水域重心变化最大的时段。该时期水域重心由西侧迅速大幅度向东侧迁移,表现为 2002 年水域重心较 1998 年向北偏东 79.57°方向上移动了 35.41 km,这归功于 21 世纪初实施的塔里木河输水工程,让干涸近 30 a 的台特玛湖重新注水,使得该区水域分布从西多东少(无)的格局向东多西少、逐渐相连的格局转变;④21 世纪以来,水域重心在研究区东侧波动继续向东移动,表现为 2002—2007 年、

2007—2011 年、2011—2015 年和 2015—2019 年 4 个阶段水域重心在空间上波动变化,位移距离(移动方向)较前一时期分别为 4.19 km(南偏西 74.72°)、6.48 km(北偏东 83.06°)、5.83 km(北偏西 59.12°)和 11.5 km(南偏东 71.82°),这主要是因为塔里木河输水量受人为干预明显,变化特点并不单一。

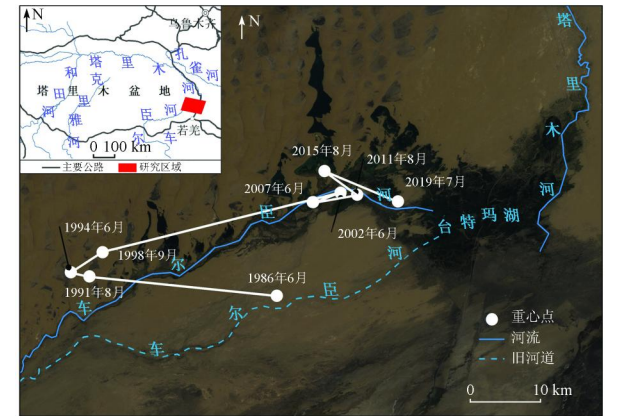


图 4 1986—2019 年台特玛湖地区水域重心位移
(2019 年 7 月 Landsat OLI B4(R), B3(G), B2(B) 影像)
Fig. 4 Displacement of the center of water area gravity in Taitema Lake region from 1986 to 2019

表 2 水域重心点转移情况

Tab. 2 Displacement of the center of water area gravity			
研究时段	转移距离/km	转移角度/(°)	方位描述
1986—1991 年	27.23	175.12	北偏西 85.12°
1991—1994 年	2.78	170.43	北偏西 80.43°
1994—1998 年	5.46	26.62	北偏东 63.38°
1998—2002 年	35.41	10.43	北偏东 79.57°
2002—2007 年	4.19	-164.72	南偏西 74.72°
2007—2011 年	6.48	6.94	北偏东 83.06°
2011—2015 年	5.83	149.12	北偏西 59.12°
2015—2019 年	11.50	-18.18	南偏东 71.82°

3.2 水域面积变化分析

为进一步分析研究区水域面积变化情况,计算了不同研究时段水域变化面积、变化幅度 R 和动态度 R_s (表 3)。

表 3 台特玛湖地区水域面积变化、变化幅度和动态度
Tab. 3 Changes of water area, range of change and dynamic degree in Taitema Lake region

研究时段	水域变化面积/km ²	$R/\%$	$R_s/\%$
1986—1991 年	11.11	80.87	16.17
1991—1994 年	-16.02	-64.44	-21.48
1994—1998 年	5.09	57.65	14.41
1998—2002 年	65.32	468.88	117.22
2002—2007 年	-3.93	-4.95	-0.99
2007—2011 年	53.07	70.46	17.61
2011—2015 年	-47.54	-37.02	-9.26
2015—2019 年	96.82	119.75	29.94
1986—2019 年	163.93	1 193.00	36.15

分析可知,研究区水域面积在1991—1994年、2002—2007年和2011—2015年3个时期内表现为减少,其余研究时段内均呈现增加状态。1986—1991年、1991—1994年和1994—1998年3个时期水域面积变化动态度不大,表明研究区水域面积在21世纪以前变化缓慢,且无较大起伏。因为这一时期的水域主要分布在车尔臣河下游河道附近,若无极端气候现象发生,水域面积主要受车尔臣河流量、区域气温和降水的影响。1998—2002年间水域面积变化是所有研究时段中变化面积、变化幅度和动态度最大的时期,1998—2002年间水域面积增加了65.32 km²,变化幅度达468.88%,动态度为117.22%。表明在4 a间迅速增加了468.88%的水域,其原因是21世纪初开始向塔里木河下游输水,最终注入台特玛湖,使研究区水域面积迅速增大。2002—2007年、2007—2011年、2011—2015年和2015—2019年4个时段研究区水域面积增减交替,减少幅度远远小于增加幅度。

整体上看,1986—2019年研究区水域面积增加了163.93 km²,变化幅度为1 193%,动态度为

36.15%,表明研究区34 a间增加了1 193%的水域面积,但增速并不是很快,这是因为研究区水域面积并非一直处于增加状态,而是呈现出波动增长的态势。

4 讨论

4.1 水域面积变化驱动因素分析

全球变化背景下,我国西北干旱区气候类型正由暖干向暖湿转变^[20],气温升高导致干旱区以冰川补给为主的河流流量增大,且降水变化直接影响区域水量变化。从图5可以看出,1986—2018年间,研究区年均气温和年降水量均呈现增加趋势,年均气温从1986年的10.9℃波动增加至2018年的11.5℃,年降水量也从1986年的12.2 mm增加到2017年的64.9 mm。车尔臣河年径流量从1980年的5.11亿 m³增加到2006年的6.2亿 m³,也呈现缓慢增加态势(图6)。考虑到2000年开始实施的塔里木河下游输水工程对研究区水域空间分布格局的显著影响,统计了2000—2018年间共18次输水记录中到达台特玛湖的历次输水总量(图6),并以向

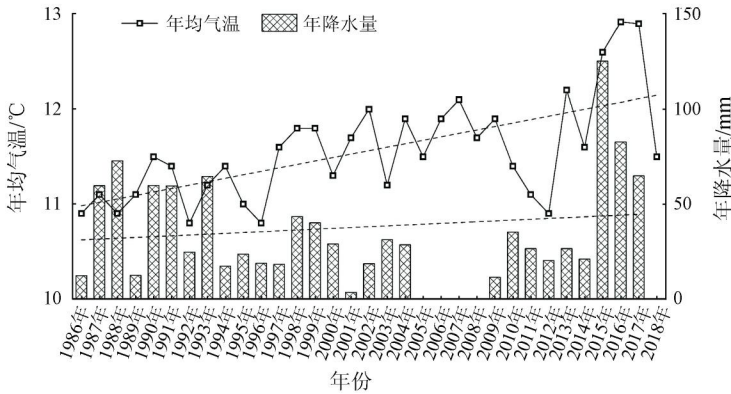


图5 研究区年平均气温和降水量变化

注: 2005、2006、2007、2008、2018年站点降水缺失

Fig. 5 Changes of average annual air temperature and precipitation in the study area

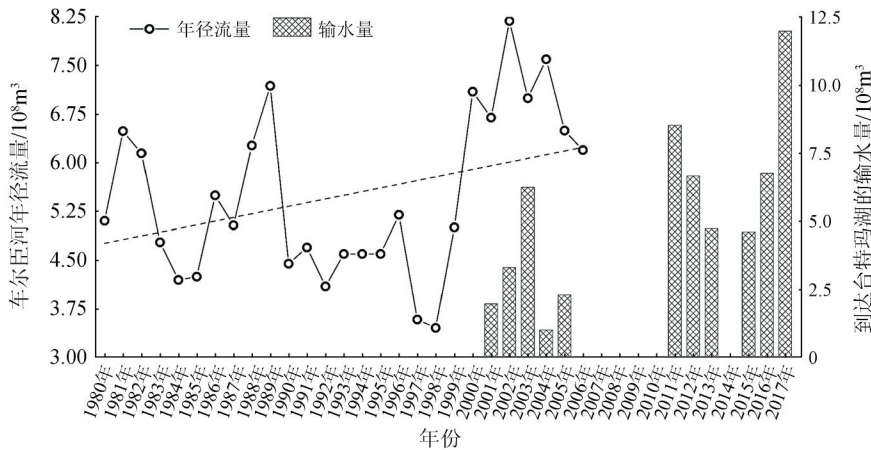


图6 车尔臣河年径流量及塔里木河下游输水量变化

Fig. 6 Changes of the annual discharge of the Qarqan River and water transport to lower reaches of Tarim River

塔里木河下游开始输水为节点分 2 个时段对研究区水域面积与气温、降水、车尔臣河年径流量以及到达台特玛湖的塔里木河下游输水总量做相关分析,深入诠释研究区水域面积变化的驱动因素。对输水前时段(1986—1998 年)水域面积与车尔臣河年径流量、年均气温和年降水量相关分析结果显示,研究区水域面积与车尔臣河年径流量、年均气温和年降水量均成正相关关系,相关系数分别为 0.066,0.032 和 0.825。分析可知,该时段气温波动上升缓慢,气温升高不足以大幅度地增加车尔臣河径流量,因此气温和径流量变化对研究区水域形成贡献较小;而降水能直接补给河流及水域,对区域水量增加具有较快且明显的贡献。表明,在塔里木河下游输水之前,研究区水域面积变化主要受降水影响,气温和车尔臣河径流量变化幅度不大,对水域面积变化影响较小。输水后时段(2002—2019 年)水域面积与塔里木河下游输水总量、年均气温和年降水量的相关分析结果显示,该区水域面积与塔里木河下游输水总量呈正相关,且相关系数达 0.977(0.05 显著性水平下),与年均气温和年降水量成负相关关系,相关系数分别为 -0.906 和 -0.415。表明这一阶段水域面积变化受人为因素和自然因素共同影响,但人为控制输水总量是影响该区水域面积变化的主导因素,气温升高、降水增加的暖湿气候特征导致区域蒸发加强^[21],是造成水域缩减的原因之一。

综上,21 世纪前,研究区水域受自然因素综合作用,降水占主导地位;21 世纪以来,人为干预的塔里木河下游输水工程是左右研究区水域面积变化的主导因素,而自然因素反向作用于研究区水域面积变化过程。

4.2 建议措施

塔里木河下游输水工程对下游生态修复、改善干旱区尾间湖地区生态脆弱性具有重大意义和深远影响。自塔里木河下游生态输水以来,不仅使干涸近 30 a 之久的台特玛湖重新恢复湖面,更重要的是保护了塔里木河下游天然绿色廊道^[22-23],阻止了塔克拉玛干沙漠和库鲁克沙漠合拢,具有重要的现实意义。输水以来,塔里木河下游地区地下水位上涨,植被覆盖度明显增加,台特玛湖湿地面积已达 511 km²,持续输水必将是塔里木河下游生态恢复的保障^[5]。由于台特玛湖曾与罗布泊相连^[21],湖水丰盈时可向南溢入喀拉和顺,再向东流出注入罗布泊^[11]。湖水东流,虽然一定程度上能够改善周边及罗布泊地区生态环境,但考虑到塔里木河下游生态输水目的是恢复下游生态环境,保证台特玛湖有水流入,且罗布泊北部有

超大型钾盐矿,若湖水注入,溶解钾盐,影响开采必将对我国农业和工业生产带来不小损失。因此建议,有必要探明台特玛湖最大载水量,为合理控制塔里木河输水提供依据,做到既能最大限度地满足生态恢复需求,又不至于浪费水资源,甚至造成经济损失。

5 结论

本文基于遥感技术,以台特玛湖地区为例,探究了干旱区尾间湖泊水域变化及驱动因素,结论如下:

1) 台特玛湖地区 34 a 间水域空间变化特征分为 2 个阶段:第一阶段是 21 世纪前水域零星分布在车尔臣河河道附近,呈现出研究区西多、东少甚至没有的空间格局。第二个阶段是进入 21 世纪以来,研究区东侧水域迅速扩大,逐渐形成东侧多于西侧的空间分布格局。

2) 研究区 34 a 间水域面积处于波动增长态势,1986—2019 年间水域面积增加了 163.93 km²,水域重心整体大幅度向东侧的台特玛湖转移。水域重心变化主要分为 4 个过程,分别是 20 世纪 80 年代末的快速向研究区西侧转移、20 世纪 90 年代期间的缓慢向东移动、20 世纪 90 年代末至 21 世纪初的大幅度、迅速向东转移和 21 世纪以来的波动向东移动过程。

3) 研究区水域面积变化在不同时期受不同因素的制约,以 21 世纪初向塔里木河下游输水为界,输水前水域面积主要受区域自然因素综合作用,其中降水为主要驱动因素;输水后,人为干预的输水过程是影响研究区水域面积变化的主导因素。

参考文献(References):

[1] 陈 曦,包安明,王新平,等.塔里木河近期综合治理工程生态成效评估[J].中国科学院院刊,2017,32(1):20-28.
Chen X, Bao A M, Wang X P, et al. Ecological effect evaluation of comprehensive control project in Tarim River basin[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(1): 20-28.

[2] 杨鹏年,邓铭江,李 霞,等.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[J].干旱区研究,2008(3):331-335.
Yang P N, Deng M J, Li X, et al. Respond width of groundwater level after conveying stream water to the lower reaches of the Tarim River, Xinjiang: A case study along the Yengisu section in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2008(3): 331-335.

[3] 徐海量,樊自立,杨鹏年,等.塔里木河近期治理评估及对编制流域综合规划建议[J].干旱区地理,2015,38(4):645-651.
Xu H L, Fan Z L, Yang P N, et al. Short term evaluation and advice

- of compiling planning for the Tarim River basin in future[J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(4): 645–651.
- [4] 杨戈,郭永平. 塔里木河下游末端实施生态输水后植被变化与展望[J]. *中国沙漠*, 2004(2): 55–60.
Yang Y, Guo Y P. The change and prospect of vegetation in the end of the lower reaches of Tarim River after ecological water delivering[J]. *Journal of Desert Research*, 2004(2): 55–60.
- [5] 李丽君,张小清,陈长清,等. 近 20 年塔里木河下游输水对生态环境的影响[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(2): 238–247.
Li L J, Zhang X Q, Chen C Q, et al. Ecological effects of water conveyance on the lower reaches of Tarim River in recent twenty years[J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(2): 238–247.
- [6] 王雅梅,张青青,徐海量,等. 生态输水前后台特玛湖植物多样性变化特征[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(5): 1186–1193.
Wang Y M, Zhang Q Q, Xu H L, et al. Change of plant diversity in the Taitema Lake area before and after implementing the ecological water conveyance[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(5): 1186–1193.
- [7] 钟家骅. 塔里木河流域植被生态变化研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
Zhong J H. The changes of the vegetation ecosystems in Tarim River Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [8] 郭继凯. 塔里木河流域植被覆盖对气候变化和人类活动的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
Guo J K. Responses of vegetation coverage to climate change and human activities in the Tarim River basin[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [9] 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.
- [10] 阿布都米吉提·阿布力克木,阿里木江·卡斯木,艾里西尔·库尔班,等. 近 40 年台特玛—康拉克湖泊群水域变化遥感监测[J]. *湖泊科学*, 2014, 26(1): 46–54.
Ablekim A, Kasimu A, Kurban A, et al. Monitoring the water area changes in Tetima-Kanglayka lakes region over the past four decades by remotely sensed data[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(1): 46–54.
- [11] 樊自立,徐海量,张鹏,等. 新疆车尔臣河及其水资源利用研究[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(1): 20–26.
Fan Z L, Xu H L, Zhang P, et al. The Qarqan River in Xinjiang and its water resources utilization[J]. *Arid Zone Research*, 2014, 31(1): 20–26.
- [12] 王姝怡. 近 30 年台特玛湖地区生态环境演变及影响因素研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2019.
Wang S Y. Study on the evolution and driving factors of ecological environment in the Taitema Lake area in recent 30 years[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2019.
- [13] McFeeters S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7): 1425–1432.
- [14] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005(5): 589–595.
Xu H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005(5): 589–595.
- [15] 吴成永,陈克龙,曹广超,等. 近 30 年来青海省风蚀气候侵蚀力时空差异及驱动力分析[J]. *地理研究*, 2018, 37(4): 717–730.
Wu C Y, Chen K L, Cao G C, et al. The spatial and temporal differences and driving forces of wind erosion climatic erosivity in Qinghai Province from 1984 to 2013[J]. *Geographical Research*, 2018, 37(4): 717–730.
- [16] 胡尔西别克·孜依纳力,毋兆鹏,哈孜亚·包浪提将. 新疆玛纳斯湖近 40 年间时空变化图谱及其驱动机制[J]. *国土资源遥感*, 2018, 30(1): 217–223. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2018. 01. 30.
Ziyinali H, Wu Z P, Baolangtjiang K. Lake changes in spatial evolution and driving force for the water area change of the Manas lake in Xinjiang in the past forty years[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2018, 30(1): 217–223. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2018. 01. 30.
- [17] 黄娉婷,张晓平. 大都市区工业重心时空变动轨迹分析: 以天津市为例[J]. *经济地理*, 2012, 32(3): 89–95.
Huang P T, Zhang X P. Analysis of temporal and spatial movement of the gravity center of city industry: A case study of Tianjin[J]. *Economic Geography*, 2012, 32(3): 89–95.
- [18] 邓铭江,杨鹏年,周海鹰,等. 塔里木河下游水量转化特征及其生态输水策略[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(4): 717–726.
Deng M J, Yang P N, Zhou H Y, et al. Water conversion and strategy of ecological water conveyance in the lower reaches of the Tarim River[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(4): 717–726.
- [19] 朱长明,李均力,沈占锋,等. 塔里木河下游生态环境变化时序监测与对比分析[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(3): 437–444.
Zhu C M, Li J L, Shen Z F, et al. Time series monitoring and comparative analysis on eco-environment change in the lower reaches of the Tarim River[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(3): 437–444.
- [20] 冉津江,季明霞,黄建平,等. 中国北方干旱区和半干旱区近 60 年气候变化特征及成因分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(1): 46–53.
Ran J J, Ji M X, Huang J P, et al. Characteristics and factors of climate change in arid and semi-arid areas over northern China in the recent 60 years[J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 2014, 50(1): 46–53.
- [21] 胡实,莫兴国,林忠辉. 未来气候情景下我国北方地区干旱时空变化趋势[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(2): 239–248.
Hu S, Mo X G, Lin Z H, et al. Projections of spatial-temporal variation of drought in north China[J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(2): 239–248.
- [22] 李丽,曾庆伟,周会珍,等. 新疆车尔臣河绿色走廊河湖湿地变化及原因分析[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(2): 233–237.
Li L, Zeng Q W, Zhou H Z, et al. Change and causes of the river-lake marshes along the green corridor at the lower reaches of the Qarqan River[J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(2): 233–237.
- [23] 樊自立,徐海量,傅彦仪,等. 台特玛湖湿地保护研究[J]. 第四

纪研究,2013,33(3):594-602.

Taitema Lake[J]. Quaternary Sciences,2013,33(3):594-602.

Fan Z L,Xu H L,Fu J Y,et al. Study on protection of wet land of

A study of the variation and driving factors of the water area of the terminal lake of inland river: A case study of Taitema Lake region

HUO Tianci¹, YAN Wei², MA Xiaofei^{1,3}

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. School of Geographic Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Terminal lake, which is an important part of oasis ecosystem in the lower reaches of inland river in arid region, has the functions of water conservation, wind prevention and sand fixation. However, for nearly half a century, the terminal lake of inland river has been shrinking under the influence of climate change and human activities, and the ecological environment around the lake has been deteriorating, which has seriously threatened the regional social development. In order to explore the changes and driving factors of the water area of the terminal lake in the arid region, this paper took the Taitema Lake region as an example, selected nine Landsat TM/OLI remote sensing images from 1986 to 2019, and extracted and analyzed the change characteristics and driving factors of the water area of the Taitema Lake region. The results showed that the water area of the study region increased by 163.93 km² in the past 34 years. In terms of spatial distribution, water area of the study region was scattered around the lower reaches of Qarqan River before the 21st century, and mainly distributed around Taitema Lake since the 21st century. The center of gravity of the water area in the study region experienced four processes: rapid westward shift in the late 1980s, slow eastward shift in the 1990s, rapid eastward shift in the late 1990s to early 2000s, and eastward shift in the fluctuation since the 21st century. Taking the water transport to the lower reaches of Tarim River as the boundary, the water area before water transport is mainly affected by the comprehensive effects of regional natural factors, with precipitation as the main driving factor ($r^2=0.825$). After water transport, the water transport process with human intervention is the leading factor ($r^2=0.977$) affecting the change of water area in the study region. With the continuous water transfer to the downstream of Tarim River, the ecological environment of Taitema Lake has been restored continuously. In order to prevent the lake from overflowing and spilling eastward into Lop Nor, it is necessary to explore the maximum water capacity of Taitema Lake so as to reasonably control the water transfer.

Keywords: terminal lake; Taitema Lake; water area change; ecological water transport; remote sensing
(责任编辑: 张 仙)