

阿克苏河流域艾西曼湖湿地时空演变及对生态输水的响应

聂艳¹, 何新莹¹, 谭盈¹, 张辉², 刘新华²

(1.华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079;

2.新疆塔里木河流域阿克苏管理局, 新疆 阿克苏 841000)

摘要: 及时了解和定量分析干旱半干旱地区天然生态系统的变化趋势及对生态输水过程的响应, 对维护绿洲生态系统健康具有重要意义。论文结合遥感影像和生态输水监测数据, 对阿克苏河流域艾西曼湖湿地的时空演变特征和生态输水的响应进行了研究。结果表明, 艾西曼湖水域面积萎缩较严重, 由 1996 年的 61.57 km² 萎缩至 2020 年的 27.76 km², 经历了快速下降、缓慢下降和缓慢恢复 3 个阶段, 生态输水后水面面积出现明显的季相变化并伴随滞后现象, 峰值出现在 11 月左右; 生态输水对地下水水位有明显的抬升作用, 并受输水量、输水天数的影响, 地下水水位变动与生态输水的响应存在明显的滞后效应, 时间约为 1~2 个月; 不同的自然植被对生态输水的响应特征存在差异, 胡杨对生态输水的响应明显且在距离输水口 100~500 m 的范围内长势最好, NDVI 月度变化显示生态输水对自然植被生长的滞后时间为 1 个月左右。研究结果对阿克苏河流域天然植被恢复、区域水资源调配、生态需水调度等具有重要的指导价值。

关键词: 自然湖泊; 生态输水; 水体指数法; 阿克苏河流域

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0116-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.06.017

Spatio-temporal Evolution of Eichmann Lake Wetland in Aksu River Basin and Its Response to Ecological Water Transfer

NIE Yan¹, HE Xinying¹, TAN Ying¹, ZHANG Hui², LIU Xinhua²

(1. Hubei Key Laboratory for Geographical Process Analysis and Simulation, Central China Normal University,

Wuhan 430079; 2. Aksu Administration Bureau of Tarim River Basin of Xinjiang, Akesu, Xinjiang 841000)

Abstract: Timely understanding and quantitatively analyzing the change trend of natural ecosystem and its response to ecological water transport process in arid and semi-arid areas is great significance to maintain the health of oasis ecosystem. Combined with remote sensing images and ecological water transfer monitoring data, this paper studied the temporal and spatial evolution characteristics of the Eichmann Lake wetland of Aksu River basin and its response to ecological water transfer. The results showed that the water area of Eichmann Lake shrunk seriously, from 61.57 km² in 1996 to 27.76 km² in 2020. The changes of water area experienced three stages, including rapid decline, slow decline and slow recovery. Water area of Eichmann Lake showed obvious seasonal change and lag effect after ecological water transfer, and the peak value appeared around November. Ecological water transfer had a significant lifting effect on the groundwater level, and was affected by water conveyance volume and water conveyance days. There was an obvious lag effect between the change of groundwater level and ecological water transfer, which was 1~2 months. The response characteristics of different natural vegetation to ecological water transfer were different. The response of *Populus euphratica* to ecological water transfer was more obvious. The growth of *P. euphratica* was the best in the range of 100~500 meters from the water delivery outlet. The monthly variation of NDVI showed that the lag time of ecological water conveyance on natural vegetation growth was about one month. This research could provide valuable reference for natural restoration, regional water resources allocation and ecological water demand regulation in Aksu River Basin.

Keywords: natural lake; ecological water transfer; water body index method; Aksu River Basin

水是影响干旱半干旱地区生态系统的重要因素,直接制约着水生态系统及相关生态系统的发育和演变趋势,而内陆湖泊是其重要的水资源组成部分,决定着绿洲生态系统的健康和演化过程^[1-3]。随着全球气候变化的加剧,水资源问题日益突出^[4-7]。上世纪70年代,塔里木河下游321 km河道断流,地下水位显著下降,尾间湖泊(罗布泊与台特玛湖)相继干涸,自然植被大面积退化并伴随较严重的土地荒漠化^[8]。2000年开始塔里木河下游实施生态输水工程,经过近20次的连续生态输水,塔河下游湖泊、胡杨等天然生态逐步恢复。不少学者借助遥感和定位监测数据从湖泊面积、生物多样性、植被恢复、地下水埋深等角度定量研究了塔河下游天然生态系统恢复状况,也有学者^[9-15]从植被结构、生态价值、生态用水保障等方面评估了生态输水工程的效益,但对塔河上游、塔河源流生态输水的影响研究非常有限。

阿克苏河是塔河的源流之一,介于 $40^{\circ}00' - 41^{\circ}35'N$, $78^{\circ}47' - 82^{\circ}43'E$,具有明显的大陆性季风气候,水资源相对匮乏;受经济利益驱动,部分林草地被开垦为耕地,生态用水被挤占,重要天然生态系统逐步退化。艾西曼湖作为流域最大的淡水湖泊,近十年来湖面快速缩减,相连的湖区逐渐演变成独立的小湖甚至消失,地下水位下降,极大弱化了流域生态功能。自2017年起,利用主汛期和灌溉间歇期,逐步向阿克苏河流域的艾西曼湖和胡杨林集中区进行生态应急补水,经过4次生态补水,艾西曼湖水面扩大、水质改善、地下水位上升、胡杨林逐步恢复。由于生态输水时间较短,艾西曼湖仍处于萎缩状态,流域内天然林、草植被仍需进一步恢复与改善^[16-18]。同时针对阿克苏河流域天然湖泊面积变化、自然植被分布格局、输水响应过程的研究较少,而掌握流域天然湖泊的时空格局变化过程、评估生态环境改善状况等,对科学指导阿克苏河流域生态输水调度、引导恢复流域天然生态系统健康具有重要作用^[16-20]。因此,本文以阿克苏河流域艾西曼湖为研究区域,结合1996—2020年的遥感数据、地下水位观测数据和生态输水数据,分析艾西曼湖湿地(自然湖泊和天然植被为主)的时空演变特征及对生态输水的响应规律,以期为阿克苏河流域生态保护与恢复、生态用水精细管理和大型生态输水工程效益评估等提供参考借鉴。

1 材料与方法

1.1 数据来源

选取1996年、2005年、2010年、2015—2020年覆盖研究区的少云、可见度高的LandSat TM、GF-1 WFV

影像数据,以及部分覆盖了湖区的GF-2影像数据,数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)和中国卫星应用中心(<http://www.cresda.com/CN/>)。应用ENVI 5.3软件对原始遥感影像进行辐射定标、大气校正、几何校正、镶嵌和裁剪、图像融合等预处理,借助归一化植被指数获取研究区自然植被生长状况^[21-23]。研究区地下水埋深动态监测、生态输水等数据来自于塔里木河流域阿克苏管理局。

1.2 研究方法

1.2.1 水体指数法 水体指数法是通过遥感影像波段之间的比值运算来增强地物之间的反差,常用的水体指数有归一化差异水体指数(NDWI)、增强水体指数(EWI)等^[9,24-25]。通过试验对比,高分一号水体指数(GF1_WI)通过GF-1 WFV影像的蓝波段和近红波段吸收和反射的反差能更加明显的突出水体的效果,计算公式为:

$$GF1_WI = \frac{(B1 - B4)}{(B1 + B4)} \quad (1)$$

$$GF1_WI > \alpha \quad (2)$$

式中: $B1$ 和 $B4$ 分别为第1、第4波段的DN值; α 为阈值,经过多次试验得到 α 值为0。

本研究选用EWI提取1996年、2005年、2010年的湖泊水域面积,GF1_WI提取2015—2020年的湖泊水域面积。通过随机选取的900个样点对提取结果进行精度验证,结果表明验证精度均在90.6%以上。

1.2.2 时序变化与响应分析 采用年际变化、季节变化描述自然湖泊的时序变化过程。其中年际变化采用自然湖泊的年最大/最小/平均值的面积曲线相结合的方法进行分析;季节变化采用季节指数方法分析,其中季节指数是用算术平均法计算某一指标时序在1年内月份或季度变化的相对数。

为定量描述自然湖泊面积、植被指数与生态输水量之间的关系,将其与生态输水量进行趋势分析、空间距离模拟。地下水埋深是干旱区植被生长的关键因子,为了探求地下水对植被指数变化的影响,分析了月度植被指数与月度地下水曲线的时滞相关关系。

2 结果与分析

2.1 湖泊水面年度变化特征及其与生态输水的响应

借助水体指数提取并汇总得到1996年、2005年、2010年、2015—2020年艾西曼湖区水域面积,分别为61.57, 25.16, 22.15, 22.65, 22.33, 24.31, 27.67, 34.14, 27.76 km²。从整体来看,艾西曼湖水域面积呈显著减少趋势,1996年水域面积为61.57 km², 2020年仅27.76 km², 22年间共减少33.81 km², 湖

泊萎缩率高达 54.91%，面积严重萎缩。根据对艾西曼湖的土地利用结构变化的分析可知，艾西曼湖区内耕地面积由 1996 年的 66.86 km² 增加到 2020 年的 116.88 km²，耕地面积迅速增加，农业灌溉需水量随之增加，农业用水挤占生态用水，湖泊入湖水量减少，加之居民非法抽取湖泊水进行灌溉导致湖泊水量减少，是导致湖泊萎缩的重要原因。从空间上看（图 1），1996 年艾西曼湖水域主要集中在湖泊南部，至 2020 年，受生态补水的影响，北部的萨伊艾日克湖、皇宫湖以及艾西曼湖大湖的水面范围没有明显变化，但西部和南部一团海子、二团海子及东南部水域明显缩小，同时不同方位萎缩的面积和速度不同。除正北和西北方向略有扩张之外，其他 7 个方向均出现湖泊水域面积的萎缩，与湖泊总面积减少趋势一致。

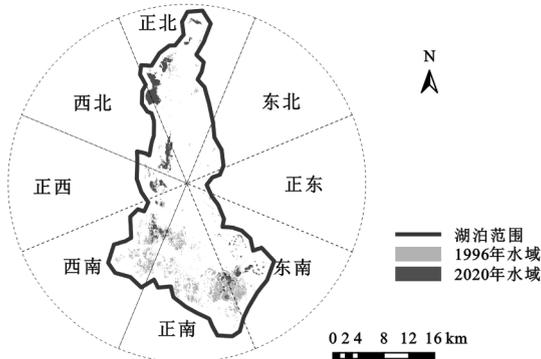


图 1 艾西曼湖水域面积变化空间分布示意

为深入分析艾西曼湖在各时段内水域面积变化特征，采用变化总幅度、年变化幅度和湖泊变化强度指标分析各时段水域面积变化情况，结果见表 1。

表 1 1996—2020 年艾西曼湖区水域面积变化特征

| 年份 | 变化总幅度/km ² | 年变化幅度/km ² | 强度/% |
|-----------|-----------------------|-----------------------|--------|
| 1996—2005 | -36.41 | -4.05 | -6.57 |
| 2005—2010 | -3.01 | -0.60 | -2.40 |
| 2010—2015 | 0.50 | 0.10 | 0.46 |
| 2015—2016 | -0.32 | -0.32 | -1.41 |
| 2016—2017 | 1.98 | 1.98 | 8.85 |
| 2017—2018 | 3.36 | 3.36 | 13.83 |
| 2018—2019 | 6.47 | 6.47 | 23.38 |
| 2019—2020 | -6.38 | -6.38 | -18.69 |

从分析结果可以看出，1996—2020 年艾西曼湖水域面积显著下降，近几年呈现恢复态势但依然处于严重萎缩状态，总体可以分为快速下降、缓慢波动下降和缓慢恢复 3 个阶段。（1）快速下降阶段：1996—2005 年，艾西曼湖区水域面积共减少 36.41 km²，湖泊变化强度为 -6.57%，湖泊迅速萎缩。（2）缓慢波动下降阶段：2005—2016 年，水域面积减少 3.01

km²，湖泊变化强度为 -2.40%，较 1996—2005 年的下降速度明显减慢；2010—2015 年湖区水域面积有所恢复，但上升幅度很小，2016 年湖泊面积又继续下降，较 2015 年减少 0.32 km²，湖泊变化强度为 -1.41%，湖泊水域面积减少速度明显放缓。（3）缓慢恢复阶段：2015—2020 年，艾西曼湖水域面积总体上呈波动上升趋势，湖泊开始缓慢恢复。其中，2017 年、2018 年、2019 年较上 1 年分别增加 1.98, 3.36, 6.47 km²，湖泊变化强度分别为 8.85%, 13.83%, 23.38%，水面面积自 2017 年开始逐渐增大，至 2019 年达到 34.14 km²，这主要得益于 2017 年开始的向艾西曼湖实施生态输水的政策，输水后湖泊面积明显增加，其中一团海子、二团海子和湿地东南洼地水面增加最为明显。二团海子在 2018 年 11 月形成历年最大水面，东南洼地是 2017 年开始形成的季节性积水湖泊，形成至当年的 12 月消失或者结冰，在第 2 年的 8 月或 9 月再次出现，2017—2019 年该洼地的水面出现的时间越来越早、维持的时间也越来越长，生态系统恢复效果明显。2020 年艾西曼湖水域面积略有萎缩，结合艾西曼湖周边 2020 年自然植被分布面积和 NDVI 值出现小幅度减少的情况，通过中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 中国地面气候资料日值数据集 (V3.0) 统计 2015—2020 年阿克苏河流域降水量的年数据，取阿克苏、柯坪和阿拉尔 3 个距离艾希曼湖湿地较近的观测站监测的降水量平均值，2015—2020 年的年均降水量 107.33 mm，而 2020 年降水量仅 87.17 mm，为近 6 年来的最低值，2020 年的旱情影响艾希曼湖自然植被的生长和湖泊水面的变化，气候要素的变化导致 2020 年湿地内自然植被与自然湖泊的恢复受到破坏，应急性生态输水的效果相比往年减弱，但总体上 2015—2020 年艾西曼湖湿地的水面面积呈现缓慢增大的趋势。

2.2 自然湖泊水面季节变化特征及其与生态输水的响应

选取艾西曼湖实施生态输水的 2017—2020 年湖泊面积各月的平均值作进一步分析（图 2），从结果可以看出，生态输水后的艾西曼湖的水面面积存在明显的季相变化，1—2 月湿地水面缓慢萎缩并伴随结冰现象，3 月水面小幅度增大，4—6 月水面持续缩小，7—11 月水面逐渐恢复并在 11 月出现最大水面，11 月之后水面又开始萎缩。2017—2020 年的 7—9 月为艾西曼湖生态输水的主要月份，该时间段内艾西曼湖的水面在逐渐扩大，但水面面积最大值出现在 11 月，主要由于 5—9 月阿克苏河流域月蒸发量较大，输

水对湖泊的补充的水分容易通过湖泊水面蒸散流掉,11月流域月蒸发量减少,自然植被和农田生产对水分的需求也较低,湖泊形成全年最大水面。

为了揭示自然湖泊水面面积与生态输水之间的响应关系,分别将2017—2020年湖泊面积月度数值和生态输水量进行对比分析(图2)。由图2可知,进行生态输水的当月与湖泊水面的增大存在明显的滞后现象,2017—2020年的8月左右为艾西曼湖湿地生态输水的时间,而水面都在11月出现明显的增大;对比水面面积月度数值与当年的年均值之差可以看出,2017年的输水效果明显但是水面面积维持在年均值以上的月份只有11月和翌年的2月,2018年和2019年的输水效果明显且效果维持时间相对较长,其中2019年的输水效果持续时间维持到翌年5月,说明生态输水对艾希曼湖水面面积的恢复有着积极的影响。湖泊水面在2020年又呈现萎缩的状态,通过前述分析,这与2020年的降水量大幅度减少有关。

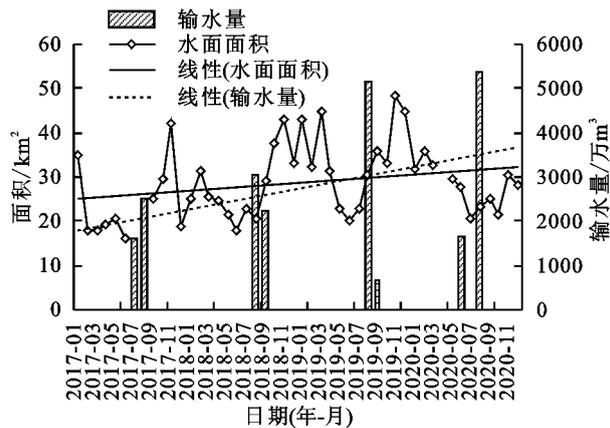


图2 2017—2020年湖泊水面月度数值和生态输水量的关系

2.3 地下水位动态变化特征及其与生态输水的响应

新疆维吾尔自治区于2017年首次把阿克苏河纳入塔里木河流域胡杨林重点保护区生态补水区,至2020年累计输水3.5018亿 m^3 。其中2017—2020年向艾西曼湖区累计输水2.2285亿 m^3 ,主要集中在8月,输水时间在1个月左右。向艾西曼湖进行生态输水的输水通道有3条:一是从西大桥分水枢纽配水经胜利渠、阿音柯干渠到6号闸、7号闸向艾西曼湖区的萨依力克湖补水,通过8号闸向艾西曼湖区的皇官湖补水;二是通过胜利渠四十八分水闸向艾西曼湖区的一团海子湿地补水;三是从西大桥分水枢纽配水经老大河到第一分水闸经洋瓦力克渠到阿瓦提县三号闸向艾西曼湖补水(图3)。

为动态监测生态输水对地下水埋深的变化,在艾西曼湖输水区布设G5.4和ST003 2个地下水位监测井,位于艾西曼湖西侧,距离生态输水口较近,由于自

动监测设备的问题,仅选取2018年、2019年的地下水埋深自动监测数据进行分析(图4)。从结果来看,G5.4地下水位监测井的地下水埋深较浅,2018年和2019年的年平均埋深为1.335,1.196 m;而ST003地下水位监测井的年平均地下水埋深较深,2018年和2019年分别达到2.855,3.166 m。地下水位监测井数据显示地下水埋深对生态输水响应明显,尤其在地下水水位较低的地区。2018年,艾西曼湖在8—9月进行连续输水5289.77万 m^3 ,艾西曼湖的2个地下水位监测井的地下水在9月明显上升,地下水位的平均抬升量为0.29 m,但G5.4的地下水位在9月份之后又恢复了平均水位,ST003的地下水位上升直至11月(12月数据缺失)。2019年,G5.4和ST003的地下水埋深随着艾西曼湖8月的生态输水的进行有明显上升,这2个监测井的地下水位变化特点和2018年的一致,相比8月,G5.4和ST003的地下水在9月分别上升0.26,0.54 m,平均抬升量为0.4 m,G5.4的地下水位在9月之后缓慢下降,地下水较深的地区比地下水较浅的地区对生态输水的响应更明显。

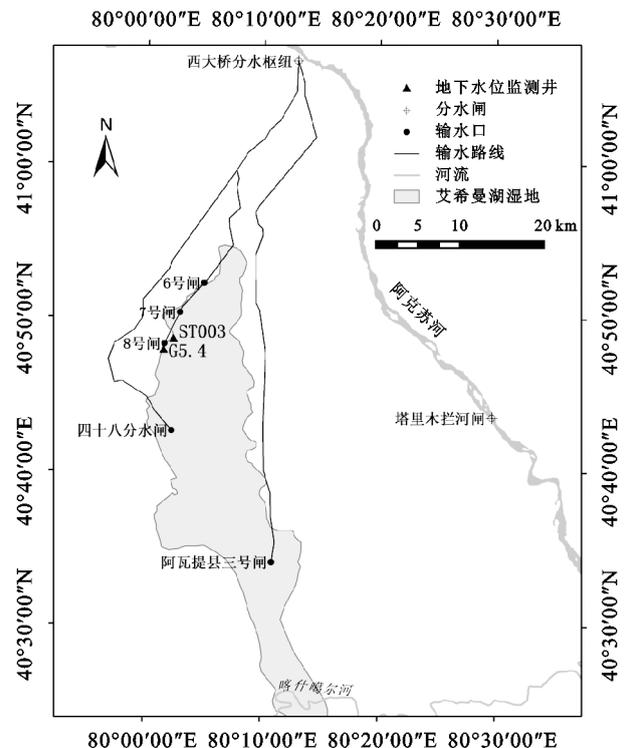


图3 艾西曼湖湿地生态输水闸及地下水位监测井位置示意

在季节变化上,地下水位对生态输水有明显的响应特征,且地下水位较低的地区对生态输水的响应更加明显,在输水后地下水位维持的时间也更长,地下水位较高的地区对生态输水的响应相对平缓,输水后很快恢复至平常的水位;受水位高低差异的影响,输水后相对水位较低的地区水位抬升更加明显。地下水位抬升量和输水量相关,2019年对艾西曼湖的输

水量相对 2018 年增加 532.99 万 m^3 , 输水后的地下水位抬升量增加 0.11 m^3 。前人^[11-13]研究认为, 生态输水与地下水抬升显著相关, 且随着距离输水河道越近则越大, 而且越靠近下游的抬升幅度越大。同时, 在实施过生态输水的地区, 地下水位对输水响应的滞

后时间可能更短, 艾西曼湖的地下水位对输水期间的第 2 个月响应明显, 滞后时间约为 1 个月。也有研究^[26]也认为, 生态输水对地下水位变动具有累积生态效应且具有滞后性, 塔里木河地下水位变动在输水 80 天之后的累积效应最显著。

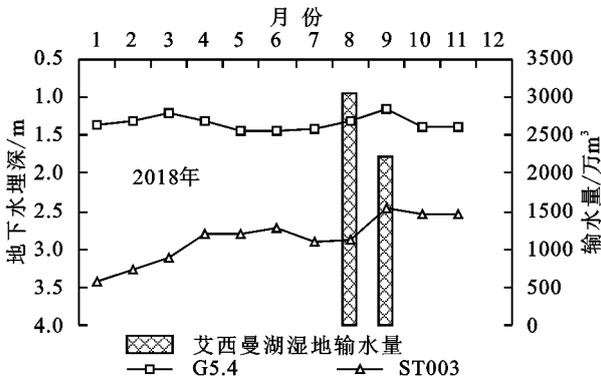


图 4 生态输水条件下监测井地下水埋深的变化趋势

2.4 自然植被与地下水位季节变化的响应关系

由于研究区域中地下水位监测井较少, 且地下水埋深监测的时序数据不连续, 本次研究结合 2018 年、2019 年艾西曼湖自然植被与地下水位埋深数据做进一步分析。提取 2018—2019 年 G5.4、ST0032 个地下水位监测井 1 000 m 范围内胡杨林和灌木的月度 NDVI 值, 分析艾西曼湖区内自然植被与地下水位 (取 G5.4、ST0032 个地下水位监测井的平均值) 季节变化的响应关系。对比艾西曼湖区自然植被 NDVI 和地下水埋深的变化 (图 5) 发现, 2018 年艾西曼湖区的地下水位变动较小, 地下水位在季节变化上的抬升出现在自然植被 NDVI 值达到峰值之后; 而 2019 年的地下水位在 10 月大幅度增加且维持至 12 月, 地下水位在季节变化上的抬升也出现在自然植被 NDVI

达到峰值之后。但艾西曼湖区自然植被的 NDVI 值在 2019 年 11 月再次上升, 可能是由于地下水位在 10—12 月都处于较高值, 导致 2019 年自然植被 NDVI 在非生长期 11 月出现短暂的上升。有研究^[4]表明, 干旱区自然植被的生长受到地下水、植物特性以及植物对环境的适应等综合因素的影响, 植物对地下水位的上升或下降都有一定的适应过程, 长时间的缺水或短时间内水位的突然抬升都可能影响植被的生长环境, 扰乱植被的生长变化。本研究结果也显示, 由于干旱区水资源的有限性和植被生长对地下水需求的季节差异, 地下水位的抬升往往出现在植被生长期后期, 非生长期的时间里地下水位的大幅度抬升导致植被短期内出现水分胁迫效应, 需要一定的适应时间。

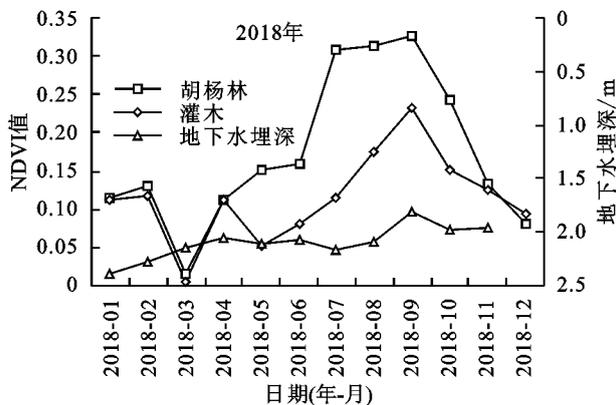


图 5 2018 年和 2019 年艾西曼湖地下水位与自然植被 NDVI 对比

2.5 自然植被与生态输水的响应关系

通过分析艾西曼湖周边自然植被年际变化与生态输水响应关系的可知, 实施生态输水的 2017—2020 年, 生态输水对整个艾西曼湖的自然植被的影响还不明显, 但对区域自然植被生长起到了应急作

用。为了深入分析生态输水的影响范围及其与自然植被响应关系的时空变化, 提取 2017—2020 年艾西曼湖区生态输水口不同距离内自然植被的 NDVI 值, 将不同距离内每年历次输水后自然植被的 NDVI 最大值与生态输水量进行拟合, 通过多次试验选取

50,100,500,1 000 m 不同距离进行拟合(图6)。图5显示,胡杨林在距离输水口100~500 m 内的范围内 NDVI 值最高,但在距离输水口100 m 以内输水后的 NDVI 最大值和生态输水量的拟合关系最优,生态输水对自然植被长势恢复的作用更明显。胡杨林和灌木对生态输水的响应存在差异,胡杨林 NDVI 最大值与输水量的拟合优度明显优于灌木,这可能是灌木和胡杨的根系分布差异引起的,胡杨主要通过发育大量的侧向根系,直接吸收土壤水和地下水,而以红柳、梭梭为代表的灌木群,根系更多的是向下生长,以吸收深层地下水为主。而通过生态输水方式的补水对深层水的影响较小,二者不同的吸水策略导致胡杨对生态输水的响应更加明显。

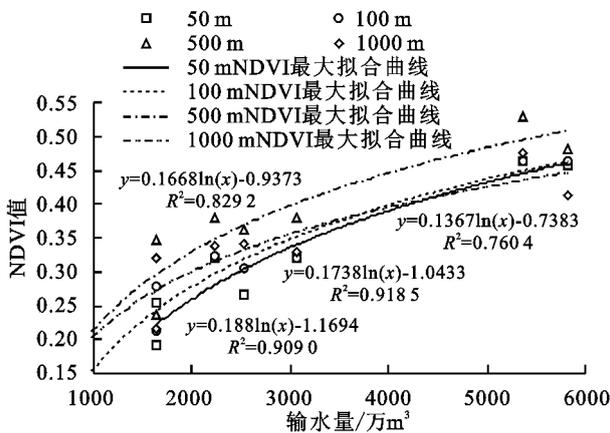


图6 生态输水量和不同距离内胡杨林 NDVI 最大值关系拟合曲线

为了进一步探究自然植被对生态输水响应的时

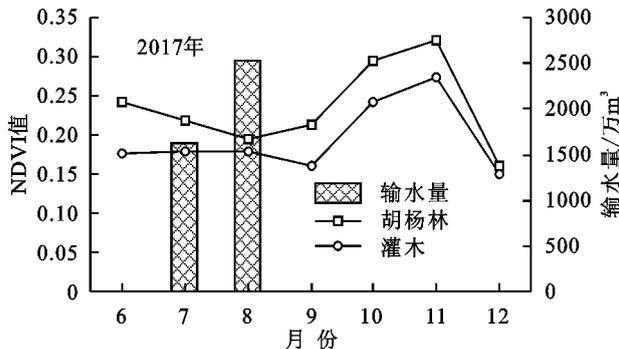


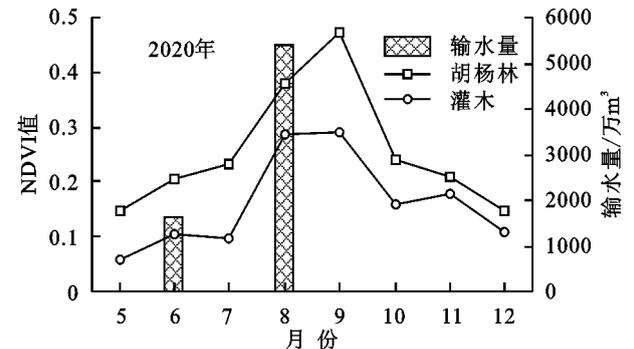
图7 2017年和2020年输水前后艾西曼湖自然植被 NDVI 的变化

3 结论

(1)经遥感提取可知艾西曼湖水域面积萎缩较严重,水域面积由1996年的61.57 km²萎缩至2020年的27.76 km²。生态输水对自然湖泊有明显的恢复作用且存在季相变化规律,7月开始水面逐渐扩大,并在11月出现年内的最大水面,同时气候要素的变化导致自然植被与自然湖泊的恢复受到破坏。

(2)地下水位受生态输水的影响存在明显抬升,且具有滞后效应,时间约为1~2个月,生态输水次数

间变化规律,分别对2017年和2020年输水前后的自然植被 NDVI 进行分析。艾西曼湖周边的胡杨林 NDVI 最大值在距离输水口500 m 范围内存在较明显的空间分布差异,因此取距离输水口500 m 范围内的自然植被 NDVI 值进行分析。从图7可以看出,2017年7—8月对艾西曼湖进行生态输水,7—8月自然植被 NDVI 值没有明显波动,灌木的 NDVI 值在8月出现小幅度的增加但又很快下降;直至10月胡杨和灌木的 NDVI 值才明显增加,11月 NDVI 达到当年的最大值;2020年分别在6,8月对艾西曼湖进行生态输水,6月的生态输水量少于2 000 万 m³,自然植被 NDVI 值仅出现小幅度波动,6—8月仍在持续下降,8月份再次进行输水,输水量达到5 373.03 万 m³,自然植被 NDVI 值在9月大幅度增加。2017年和2020年的输水模式存在差异,2017年输水总量较少,但从7月中旬至8月中旬,历时31天不间断向艾西曼湖输水,输水效应的持续时间也相对较长。2020年输水总量比2017年增加2 851.45 万 m³,其中6月的输水量较小,仅持续11天;8月的输水量较大,持续18天,自然植被 NDVI 在次月就对输水产生明显的响应但持续时间较短。结合生态输水量和 NDVI 最大值拟合分析的结果,生态输水量、输水时长对自然植被与生态输水之间的响应都有影响,输水量越大,自然植被响应的滞后时间越短;连续输水的时间越长,输水后自然植被恢复的时间也越长,植被恢复越稳定。



和输水数量影响生态输水效果,自然植被对地下水位抬升存在一定的适应过程。

(3)不同自然植被对生态输水的响应特征在年际、季节以及空间上存在差异,胡杨对生态输水的响应更加明显,响应的滞后时间更短,胡杨的长势在距离输水口100~500 m 的范围内最好,NDVI 月度变化显示生态输水对自然植被生长的滞后时间为1个月左右。

(4)今后在植被类型的精细分类上还可以引入多

源、多时相高分辨率数据,提高研究的精度尤其是量化生态输水响应滞后时间;研究区生态输水的时间偏短地下水水位监测井偏少,也限制了自然植被、天然湖泊对生态输水的响应规律的探讨,这些都是未来研究的方向。

参考文献:

- [1] 高庆,艾里西尔·库尔班,肖昊.塔里木河下游区域植被时空变化[J].自然资源学报,2019,34(3):624-632.
- [2] Zeng Y, Zhao C Y, Li J. Effect of groundwater depth on riparian plant diversity along riverside-desert gradients in the Tarim River[J].Journal of Plant Ecology, 2019,12(3):564-573.
- [3] 付爱红,陈亚宁,李卫红.塔里木河流域生态系统健康评价[J].生态学报,2009,29(5):2418-2426.
- [4] 范磊,侯光才,陶正平,毛乌素沙漠萨拉乌苏组地下水特征与植被分布关系[J].水土保持学报,2018,32(4):151-157.
- [5] 张瑞文,赵成义,王丹丹,等.极端干旱区不同水分条件下胡杨林生态耗水特征[J].水土保持学报,2019,33(4):270-278.
- [6] 常兆丰,刘虎俊,赵明,等.民勤荒漠植被的形成与演替过程及其发展趋势[J].干旱区资源与环境,2007,21(7):116-124.
- [7] Tenreiro T R, García-Vila M, Gómez J A. Using NDVI for the assessment of canopy cover in agricultural crops within modelling research[J].Computers and Electronics in Agriculture,2021,182:e106038.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 王正伟,马利刚,王宏卫,等.干旱内流区绿洲乡村聚落空间格局及影响因素分析:以塔里木河流域为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(12):2636-2646.
- [11] 韩路,王海珍,牛建龙,等.荒漠河岸林胡杨群落特征对地下水水位梯度的响应[J].生态学报,2017,37(20):6836-6846.
- [12] 雍正,赵成义,施枫芝,等.近 20 年塔里木河干流区地下水埋深变化特征及其生态效应研究[J].水土保持学报,2020,34(3):182-189.
- [13] 刘迁迁,古力米热·哈那提,王光焰,等.间歇性生态输水塔里木河下游断面地下水位变化模拟[J].生态学报,2018,38(15):5519-5528.
- [14] 董志玲,徐先英,金红喜,等.生态输水对石羊河尾间湖区植被的影响[J].干旱区资源与环境,2015,29(7):101-106.
- [15] 皮原月,叶茂,徐长春.塔里木河下游不同退化阶段胡杨径向生长量变化特征[J].水土保持研究,2016,23(4):313-317,324.
- [16] 聂艳,马泽玥,周道峰,等.阿克苏河流域土壤湿度反演与监测研究[J].生态学报,2019,39(14):5138-5148.
- [17] 汪瑞.阿克苏河灌区植被及湖泊生态需水量估算与特征分析研究[D].武汉:华中师范大学,2020.
- [18] 赵成义,施枫芝,盛钰,等.近 30 年阿克苏绿洲水面蒸发趋势及影响因素[J].水土保持学报,2012,26(1):237-240,245.
- [19] 王志成,蒋军新,方功焕,等.水资源约束下的阿克苏河流域适宜绿洲规模分析[J].冰川冻土,2019,41(4):986-992.
- [20] 李虹彬,刘亚婷,王卫光,等.气候因素对阿克苏河径流变化影响的定量评估[J].灌溉排水学报,2021,40(1):115-122.
- [21] Carreño-Conde F, Sipols A E, Simon C, et al. A forecast model applied to monitor crops dynamics using vegetation indices (NDVI)[J].Applied Sciences,2021,11(4):e1859.
- [22] 岳东霞,苗俊霞,朱敏翔,等.疏勒河流域陆地水储量与植被指数的时空耦合关系[J].生态学报,2019,39(14):5268-5278.
- [23] 万红梅,李霞,董道瑞,等.塔里木河下游植被覆盖变化遥感定量分析[J].自然资源学报,2013,28(4):668-677.
- [24] 王小平,张飞,Abduwasit G,等.艾比湖流域地表水水质指标与水体指数关系研究[J].环境科学学报,2017,37(3):900-909.
- [25] 徐涵秋.从增强型水体指数分析遥感水体指数的创建[J].地球信息科学,2008,10(6):776-780.
- [26] 廖淑敏,薛联青,陈佳澄,等.塔里木河生态输水的累积生态响应[J].水资源保护,2019,35(5):120-126.