

【水环境与水生态】

# 基于时间序列遥感的2020年黄河三角洲湿地补水效果监测

黄玉芳<sup>1</sup>, 姜广艳<sup>1</sup>, 葛雷<sup>1</sup>, 黄 聿<sup>2</sup>, 周子俊<sup>1</sup>

(1. 黄河水资源保护科学研究院, 河南 郑州 450004; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 2020年汛期在防御大洪水实战演练期间进行的黄河三角洲湿地生态补水, 生态补水量创历史最高, 三角洲湿地首次实现漫滩式补水。基于 Sentinel-1 与 Sentinel-2 时间序列卫星遥感影像, 评估了2020年三角洲生态补水前中后期湿地动态变化与补水效果。结果表明: 生态补水期间清水沟、刁口河流路湿地水体淹没频率较高, 大多为0.6~0.8, 清水沟流路湿地水面面积由补水前的70 km<sup>2</sup>扩大到100 km<sup>2</sup>, 刁口河流路湿地水面面积由补水前的不足0.1 km<sup>2</sup>扩大到5.25 km<sup>2</sup>, 淹没频率的提高和水面面积的扩大改善了湿地的水分条件, 满足了植被生长期的水分要求; 研究区湿地地表水分指数均值由补水前的下降趋势转为上升趋势, 补水期间与补水后地表水分指数明显高于补水前, 有利于湿地植物群落的正向演替和湿地生态功能的维持, 展现出生态补水对湿地生态恢复的正向作用。

**关键词:** 生态补水; 时间序列遥感; 地表水分指数; 黄河三角洲

中图分类号: TV882.1; P343.5 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.07.017

引用格式: 黄玉芳, 姜广艳, 葛雷, 等. 基于时间序列遥感的2020年黄河三角洲湿地补水效果监测[J]. 人民黄河, 2021, 43(7): 89-93.

## Effect Monitoring of Wetland Water Supplement in the Yellow River Delta in 2020 Based on Time Series Remote Sensing

HUANG Yufang<sup>1</sup>, JIANG Guangyan<sup>1</sup>, GE Lei<sup>1</sup>, HUANG Chong<sup>2</sup>, ZHOU Zijun<sup>1</sup>

(1. Institute of Yellow River Water Resources Protection, Zhengzhou 450004, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The amount of the wetland ecological water supplement in the Yellow River delta during the flood season of 2020 was the highest in history and the delta wetland realized flooding-type water supplement for the first time. Based on Sentinel-1 and Sentinel-2 time series images, this paper monitored and evaluated the dynamic changes and water supplement effects of delta wetland before and after ecological water supplement in 2020, which provided technical support for the ecological regulation of the Yellow River and the ecological restoration of delta wetland. The results show that the submerged frequency of the wetlands of Qingshuigou and Diaokou flow paths is higher during the ecological supplement period, mostly between 0.6 and 0.8. The water surface area of Qingshuigou flow path is expanded from 70 km<sup>2</sup> to 100 km<sup>2</sup> and the water surface area of Diaokou flow path is expanded from less than 0.1 km<sup>2</sup> to 5.25 km<sup>2</sup>. The increase of submerged frequency and the expansion of water surface area have improved the water condition of the wetland and met with the water requirement of vegetation growth period. The mean value of land surface water index (LSWI) of wetland in the study area has changed from a downward trend to an upward trend. The land surface water index during and after water replenishment is significantly higher than that before water supplement, which is beneficial to the positive succession of wetland plant communities and the maintenance of wetland ecological functions and shows a positive effect of ecological water supplement on wetland ecological restoration.

**Key words:** ecological water supplement; time series remote sensing; land surface water index; Yellow River delta

湿地是黄河三角洲生物多样性最为丰富的区域, 是珍稀濒危保护物种的重要栖息地, 是黄河三角洲最具保护价值的生态系统。随着经济和社会的高速发展, 石油开采、农业开垦和水产养殖等人类活动对黄河三角洲湿地造成了严重破坏<sup>[1-2]</sup>, 加之受黄河来水来沙减少、海水入侵和风暴潮等影响, 黄河三角洲湿地出现面积大幅度萎缩、生物多样性受损和植被逆向演替等众多生态问题<sup>[3]</sup>。淡水水源补给是影响三角洲湿地演变的关键因素<sup>[4]</sup>, 是黄河三角洲湿地保护与恢复

的关键<sup>[5-6]</sup>。为遏制黄河三角洲湿地生态环境不断恶化的趋势, 黄河水利委员会先后开始了黄河水量统一调度、调水调沙及生态调度、三角洲生态补水等实践,

收稿日期: 2021-05-20

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目 (2017YFC0404401-04)

作者简介: 黄玉芳 (1976—), 女, 河南新乡人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为水资源与水生态保护

通信作者: 黄聿 (1975—), 男, 安徽六安人, 副研究员, 博士, 研究方向为海岸带遥感

E-mail: huangch@lreis.ac.cn

对三角洲湿地生态系统保护与修复起到了促进作用<sup>[7-12]</sup>。

据统计,2008—2019年,累计向黄河三角洲淡水湿地恢复区补水4.64亿m<sup>3</sup>,其中向清水沟流路(现行流路)湿地补水2.20亿m<sup>3</sup>、向刁口河流路(黄河故道)湿地补水2.44亿m<sup>3</sup>。2020年汛期在防御大洪水实战演练期间进行的黄河三角洲湿地生态补水,生态补水量创历史最高,防御大洪水实战演练期间共补水1.32亿m<sup>3</sup>。同时,黄河利津站发生近30a来最大流量4580m<sup>3</sup>/s,三角洲湿地首次实现漫滩式补水。笔者基于Sentinel-1与Sentinel-2时间序列卫星遥感影像,提取并计算三角洲湿地补水区域水体淹没频率、水面面积和地表水分指数(LSWI),对三角洲湿地生态补水效果进行动态评估。

## 1 数据与研究方法

黄河三角洲位于山东省东北部黄河入海口处,北临渤海,东临莱州湾。现代黄河三角洲为以渔洼为顶点,北起挑河口、南至宋春荣沟,面积约2400km<sup>2</sup>的扇形地带。黄河最近一次较大的人工改道事件发生在1976年,原北向刁口河流路被废弃,改道东南经清水沟流路入海。1996年施行人工改道,原流路废弃,黄河改由清8汉断面东北向入海,形成黄河当前入海口。为保护黄河三角洲淡水湿地生态系统,黄河三角洲自然保护区管理部门分别于2003年、2006年在自然保护区内设立了3333.33、6666.67hm<sup>2</sup>湿地恢复区并开展引黄生态修复工作。2009年,以刁口河流路过水为契机,在三角洲保护区北部划定了1333.33hm<sup>2</sup>湿地恢复区。2011年,在清水沟流路北侧划定了666.67hm<sup>2</sup>湿地恢复区。目前,三角洲保护区共有湿地恢复区1.2万hm<sup>2</sup>。三角洲自然保护区和淡水湿地恢复区范围见图1。本文研究范围为2020年生态补水区域,分为刁口河流路湿地补水区和清水沟流路湿地补水区两部分,其中刁口河流路湿地补水区位于黄河故道,清水沟流路湿地补水区位于黄河现行流路。

### 1.1 数据来源与处理

(1) Sentinel-1数据及预处理。采用2020年6月1日至2020年10月31日的Sentinel-1合成孔径雷达(SAR)影像,分析补水后水体淹没频率、水面面积动态变化情况。Sentinel-1是欧洲航天局哥白尼计划(Co-pernicus Programme)中的对地观测卫星,载有C波段合成孔径雷达,由1A和1B双星组成。本研究所用Sentinel-1 SAR数据来源于欧洲航天局网站(<https://scihub.copernicus.eu/>),数据获取模式为干涉宽幅模式(IW),产品类型Level-1级地距影像(GRD),其空

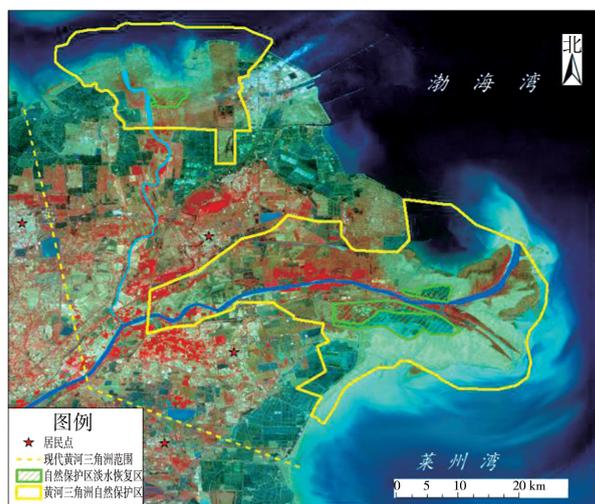


图1 黄河三角洲淡水湿地恢复区示意

间分辨率为5m×20m,时间分辨率为6d。数据预处理主要包括多视距处理、大气校正、斑点滤波以及几何校正,采用欧洲航天局提供的SNAP软件中的Sentinel-1 Toolbox(S1TBX)工具实现。为去除雷达成像时的斑点噪声,选取Refined Lee算法对图像进行滤波处理,并将后向散射系数进行转分贝处理,转化方法为

$$\sigma_{DB} = 10 \lg DN$$

式中:DN为图像像素灰度值; $\sigma_{DB}$ 为后向散射系数。

(2) Sentinel-2、Landsat 8数据及预处理。采用2020年6月1日至2020年10月31日所有可获得的Sentinel-2光学影像,辅以Landsat 8影像,提取地表水分指数(LSWI),并分析其随时间的变化特征。Sentinel-2是欧洲航天局哥白尼计划中哨兵系列卫星的光学卫星,包括2A与2B双星,卫星携带了MSI多光谱成像仪,包含13个光谱波段,具有60、20、10m共3种空间分辨率。本研究用到的Sentinel-2数据从欧洲航天局网站下载,该数据为经过正射校正和亚像元级几何精校正后的L1C大气表观反射率产品,利用欧洲航天局提供的Sen2cor插件对Sentinel-2影像进行辐射定标与大气校正。

### 1.2 研究方法

(1) 基于Sentinel-1时间序列影像的地表水淹没频率分析。基于Sentinel-1时间序列影像,提取、计算研究区内的水体淹没频率、水面面积,并分析其变化特征。水体淹没频率为一个像素在一段时间内被识别为水体的次数与影像总期数的比值,反映该像素的水分情况,水体淹没频率计算公式为

$$FW = \frac{N_{water}}{N_{observation}}$$

式中:FW为水体淹没频率,为0~1之间的值; $N_{water}$ 为某一像素在一段时间内被确定为水体的次数; $N_{observation}$

为一段时间内 Sentinel-1 总的观测次数。

(2) 基于 Sentinel-2 与 Landsat 8 时间序列影像的地表水分指数变化分析。地表水分指数包含对土壤湿度和植被水分敏感的短波红外波段反射率,可以用于土壤湿度变化的监测,湿度越大,LSWI 值越大,LSWI 计算公式为

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir1}}{\rho_{nir} + \rho_{swir1}}$$

式中:  $\rho_{nir}$  为近红外波段的地表反射率;  $\rho_{swir1}$  为短波红外波段的地表反射率。

## 2 结果与分析

水作为湿地的控制因子,是湿地恢复的关键因素。适宜的水量补给并保证地表径流不断更新水体,对湿地水生植物群落正向演替、增强湿地生态功能具有明显促进作用<sup>[10]</sup>。对 2020 年大洪水期间黄河三角洲生态补水前中后期湿地补水区的水体淹没频率、水面面积和地表水分指数进行监测,评估 2020 年大洪水期间生态补水对湿地的影响。

### 2.1 水体淹没频率与水面面积动态变化

(1) 水体淹没频率变化。刁口河、清水沟流路湿地补水区水体淹没频率分布见图 2,其中白色边框内为补水区范围。湿地补水区不同水体淹没频率对应的面积见表 1。刁口河流路水体淹没频率主要集中在 0.6~0.8,淹没频率为 0.6~0.8 的面积为 2.60 km<sup>2</sup>,占补水区总面积的 16.74%。清水沟流路湿地补水区水体淹没频率为 0.6~0.8 的面积为 41.88 km<sup>2</sup>,淹没频率为 0.8~1.0 的面积为 30.96 km<sup>2</sup>,芦苇沼泽水体淹没频率大多大于 0.8。

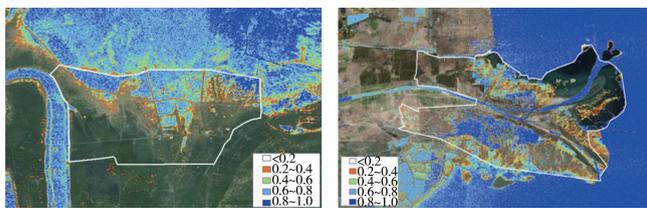


图 2 湿地补水区水体淹没频率分布

表 1 湿地补水区不同水体淹没频率对应的面积

水体淹没频率	刁口河		清水沟	
	面积/km <sup>2</sup>	所占比例/%	面积/km <sup>2</sup>	所占比例/%
0~0.2	10.09	64.97	215.58	63.77
0.2~0.4	1.05	6.76	25.52	7.55
0.4~0.6	1.37	8.82	24.09	7.13
0.6~0.8	2.60	16.74	41.88	12.39
0.8~1.0	0.42	2.71	30.96	9.16
合计	15.53	100	338.03	100

(2) 水面面积动态变化。湿地补水区 6 月至 10

月水面面积变化曲线见图 3。2020 年 6 月 5 日至 20 日,刁口河流路湿地补水区水面面积不足 0.1 km<sup>2</sup>。刁口河流路 2020 年 6 月 29 日开始生态补水,7 月 14 号补水结束。补水开始后,湿地补水区水面面积增大,7 月 15 日湿地补水区水面面积增大到 0.77 km<sup>2</sup>。8 月、9 月对刁口河流路进行了汛期第二次生态补水,8 月 29 日水面面积达到 4.65 km<sup>2</sup>,随后水面面积增长速率降低,9 月 28 日水面面积达 5.25 km<sup>2</sup>。10 月初,湿地补水区水面面积开始下降,10 月 18 日降至 1.18 km<sup>2</sup>。

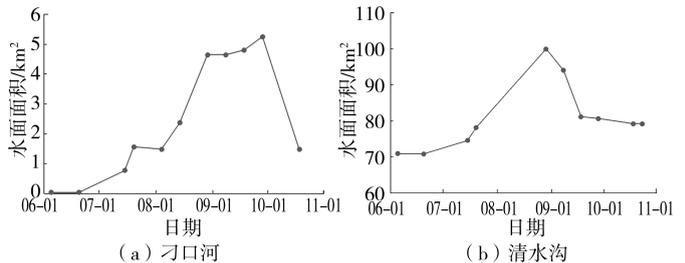


图 3 湿地补水区 6 月至 10 月水面面积变化曲线

6 月 5 日至 6 月 20 日,清水沟流路湿地补水区水面面积保持在 70 km<sup>2</sup>左右。清水沟流路湿地于 2020 年 6 月 27 日开始生态补水,补水区水面面积增大,7 月 15 日补水区水面面积增大到 74.54 km<sup>2</sup>,8 月 29 日水面面积达 100 km<sup>2</sup>。9 月初,补水区水面面积开始下降,至 10 月 23 日水面面积减至 79.23 km<sup>2</sup>。

黄河三角洲湿地补水的实施,有效改善了湿地退化的状况,湿地植被恢复呈正向演替趋势,沼泽、草甸和灌丛等生态斑块面积增大,为鸟类提供了丰富的食物、庇护场所和繁殖地,迁徙、繁殖鸟类数量增多<sup>[13-14]</sup>。通过补水工程调控湿地水位和水面面积,退化的淡水湿地生态系统逐渐恢复,水鸟多样性明显提高,尤其是提高了鹤鹑类、雁鸭类和鸕类的丰富度<sup>[15]</sup>。刁口河流路通过在补水期内蓄水,使湿地生长的白茅-瘠茅群落、芦苇草甸、芦苇-盐生杂草甸等植被类型转变为芦苇沼泽或有向芦苇沼泽演替的趋势,遏制了刁口河流路湿地生态退化的趋势<sup>[7]</sup>。在湿地补水的影响下,芦苇面积明显增大,栖息地质量提升区域面积逐步扩大,维护了水鸟等动植物的生境,基本实现了生态补水的目的<sup>[16]</sup>。

水面面积的增大和水体淹没频率的提高,可以改善湿地的水分条件,促进湿地植被的正向演替、芦苇生长以及鸟类栖息地的修复。2020 年黄河防御大洪水实战演练期间的生态补水,使清水沟流路湿地水面面积由补水前的 70 km<sup>2</sup>扩大为 100 km<sup>2</sup>,到 10 月仍维持了 79.23 km<sup>2</sup>的水面面积,有利于湿地植物群落正向演替和湿地生态功能的维持,达到了预期的生态补水目的。

## 2.2 地表水分指数动态变化

湿地实施生态补水后,补水区域土壤水分显著增加,土壤盐分含量降低,土壤养分含量增加,为湿地的生态恢复提供了适宜的生境条件<sup>[6]</sup>。地表水分指数(LSWI)可以表征土壤湿度变化情况,因此采用地表水分指数对补水效果进行动态评估。

(1)刁口河流路湿地补水区 LSWI 随时间的变化。刁口河流路湿地补水区 LSWI 均值 6 月至 10 月变化情况见图 4。可以看出,2020 年 6 月 5 日至 20 日,刁口河流路湿地补水区 LSWI 均值呈下降趋势;7 月至 9 月刁口河流路湿地补水区 LSWI 均值明显增大,原因是黄河三角洲刁口河流路于 2020 年 6 月 29 日开始生态补水,黄河水的补给使得湿地生态系统水分得以补充,LSWI 均值随之上升;10 月刁口河流路湿地补水区 LSWI 均值呈下降趋势,但仍高于补水前的水平。刁口河流路湿地补水区 LSWI 均值的变化展现出生态补水对湿地保护区生态系统的改善作用。

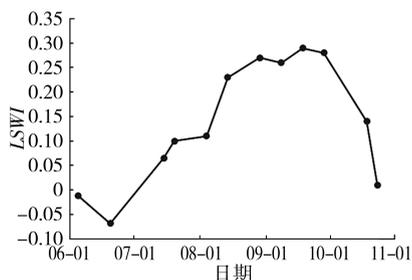


图 4 刁口河流路湿地补水区 LSWI 均值变化情况

(2)清水沟流路湿地补水区 LSWI 随时间的变化。清水沟流路湿地补水区 LSWI 均值 6 月至 10 月变化情况见图 5。可以看出,2020 年 6 月 5 日至 20 日,清水沟流路湿地补水区 LSWI 均值呈下降趋势;6 月下旬至 9 月底,清水沟流路湿地补水区 LSWI 均值增大明显,原因是黄河三角洲现行清水沟流路于 2020 年 6 月 27 日开始生态补水,黄河水的补给使得湿地生态系统水分得以补充,LSWI 均值随之上升;10 月 LSWI 均值呈下降趋势,但仍高于补水前的水平。

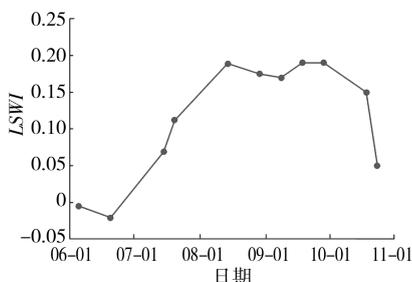


图 5 清水沟流路湿地补水区 LSWI 均值变化情况

把土壤盐分控制在植物耐盐阈值范围内可以提升退化湿地生态自我修复能力,是湿地生态修复与恢复

的关键因素之一<sup>[3]</sup>。大量淡水的输入对湿地土壤交换性盐基离子具有明显洗脱作用<sup>[11]</sup>,向黄河三角洲退化湿地进行淡水资源补给,对降低盐碱湿地的盐度效果显著<sup>[17]</sup>。黄河三角洲湿地生态补水后,湿地土壤含盐量较补水前降低<sup>[7]</sup>。淡水补充还可以改变湿地土壤碳氮含量,随着恢复年限的增加,补水恢复区湿地土壤有机碳、全氮含量逐渐上升<sup>[17]</sup>,有效提升了土壤养分,对提高湿地生态系统的生产力、维持湿地生态系统的功能具有重要作用。生态补水工程的实施改善了水盐条件,湿地的植被和生物得到一定程度恢复<sup>[18]</sup>。

刁口河流路湿地补水区和清水沟流路湿地补水区地表水分指数变化情况表明,在生态补水前湿地的地表水分指数较低且呈下降趋势,不利于湿地生态修复和维持;生态补水后,湿地地表水分指数显著增大,说明生态补水有效提高了湿地土壤含水率,湿地补水效果明显。

## 3 讨论

长期实施生态补水,特别是大流量、高脉冲的补水过程,可以显著增加湿地生态系统服务价值<sup>[16,19]</sup>。从三角洲生态需水来看,三角洲生态需水 2.8 亿~4.2 亿  $m^3/a$ ,适宜生态需水量为 3.5 亿  $m^3/a$ ,湿润年份适宜生态补水量为 2.8 亿  $m^3/a$ ,3 月至 10 月采用适宜生态需水量补水可使保护区的主导生态功得到较好发挥<sup>[20]</sup>。刘晓燕等<sup>[21]</sup>指出,4 月至 5 月补水量最好达总补水量的三分之一。照此估算,2020 年为湿润年份,适宜补水量为 2.8 亿  $m^3$ ,6 月至 10 月补水量宜占 2.8 亿  $m^3$  的三分之二,即 1.9 亿  $m^3$ 。因此,2020 年大洪水期间的 1.32 亿  $m^3$  补水量虽然为近年来最大补水量,但与该时段适宜补水量 1.9 亿  $m^3$  仍有差距。在黄河水资源量短缺的情况下,如何实现更高效的生态补水,是今后需要持续研究的课题。从补水时间上来看,黄河三角洲芦苇发芽的关键期是 4 月至 6 月,芦苇生长关键期为 7 月至 10 月<sup>[20]</sup>,2020 年生态补水时间为芦苇生长关键期,满足了芦苇生长期的需水要求,补水时间较为适宜。

本次研究发现,地表水分指数作为指示因子比水面面积能更为灵敏地反映出湿地的水分状态。例如,2020 年 6 月 5 日至 20 日,清水沟流路湿地补水区水面面积稳定保持在 70  $km^2$  左右,但同期地表水分指数呈下降趋势,刁口河流路湿地地表水分指数和水面面积也呈现了同样的趋势,说明地表水分指数可以更为灵敏地反映湿地的水分状态。地表水分指数可以用于土壤湿度变化的监测。土壤含水率是湿地恢复的关键因素,土壤含水率的提高促进了湿地植被的生长、演

替,在一定程度上改善了土壤结构<sup>[22]</sup>。淡水沼泽芦苇、盐化草甸芦苇和咸水沼泽芦苇生长适宜的土壤水分(体积含水率)下限分别为25.7%、32.0%、34.0%,最低土壤水分(体积含水率)下限分别为21.5%、25.1%、27.1%<sup>[23]</sup>。因此,在三角洲湿地生态补水效果监测和评估中,可将地表水分指数作为指示因子,并同步进行土壤含水率监测,建立地表水分指数和土壤含水率的响应关系,动态监测湿地植被需水的时空过程,在土壤水分达到植被需水的低限点时及时提示生态补水需求,使三角洲湿地生态补水和湿地生态系统保护更加科学高效。

#### 4 结 语

通过对2020年大洪水期间黄河三角洲生态补水前中后期湿地恢复区的水体淹没频率、水面面积和地表水分指数的监测和分析,动态评估了2020年大洪水期间生态补水对湿地的影响,得出以下结论:生态补水期间,清水沟和刁口河流路湿地水体淹没频率较高,大多介于0.6~0.8之间,刁口河、清水沟流路湿地水体淹没频率为0.6~0.8的面积分别为2.60、41.88 km<sup>2</sup>;生态补水前,清水沟、刁口河流路湿地水面面积都较小,随着湿地补水的进行,补水区内原本为非水面的区域逐渐被水淹没,保护区内芦苇沼泽长势变好,生态补水结束后一段时间(至9月、10月),水面面积逐步下降,但湿地水面面积仍大于生态补水前的;生态补水前,清水沟、刁口河流路湿地地表水分指数均值都呈下降趋势,随着湿地补水的开展,黄河水的补给使得湿地生态系统水分得以补充,地表水分指数均值随之增大,生态补水结束后一段时间(至9月、10月),地表水分指数缓慢下降,黄河三角洲生态补水前中后期LSWI均值的变化,展现出生态补水对湿地保护区生态恢复的正向作用。

#### 参考文献:

[1] 孔祥伦,李云龙,韩美,等.1990年以来3个时期黄河三角洲天然湿地的分布及其变化的驱动因素研究[J].湿地科学,2020,18(5):603-612.  
 [2] 洪佳,卢晓宁,王玲玲.1973—2013年黄河三角洲湿地景观演变驱动力[J].生态学报,2016,36(4):924-935.  
 [3] 孙志高,牟晓杰.黄河三角洲湿地保护与恢复的现状、问题与建议[J].湿地科学,2011,9(2):107-115.  
 [4] 栗云召,于君宝,韩广轩,等.黄河三角洲自然湿地动态演变及其驱动因子[J].生态学杂志,2011,30(7):1535-1541.  
 [5] CUI B, YANG Q, YANG Z, et al. Evaluating the Ecological Performance of Wetland Restoration in the Yellow River Delta,

China[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(7): 1090-1103.  
 [6] 杨薇,裴俊,李晓晓,等.黄河三角洲退化湿地生态修复效果的系统评估及对策[J].北京师范大学学报(自然科学版),2018,54(1):98-103.  
 [7] 刘青勇,王爱芹,张娜,等.基于调水调沙的黄河三角洲湿地生态修复技术[J].中国农村水利水电,2016(2):60-63.  
 [8] 柏建坤,臧震宇,冯建祥,等.黄河三角洲芦苇湿地生态修复效果评价研究[J].湿地科学与管理,2016,12(3):17-22.  
 [9] 黄翀,刘高焕,傅新,等.黄河三角洲刁口河流路湿地恢复遥感监测与评价[J].地理科学进展,2012,31(5):570-576.  
 [10] 唐娜,崔保山,赵欣胜.黄河三角洲芦苇湿地的恢复[J].生态学报,2006,26(8):2616-2624.  
 [11] 韩玲,白军红,叶晓飞,等.淡水恢复对黄河口盐沼湿地土壤水盐信息的影响[J].北京师范大学学报(自然科学版),2018,54(1):42-47.  
 [12] 宋创业,胡慧霞,黄欢,等.黄河三角洲人工恢复芦苇湿地生态系统健康评价[J].生态学报,2016,36(9):2705-2714.  
 [13] 朱书玉,王伟华,王玉珍,等.黄河三角洲自然保护区湿地恢复与生物多样性保护[J].北京林业大学学报,2011,33(增刊2):1-5.  
 [14] 王瑞玲,连煜,黄锦辉,等.黄河三角洲湿地补水生态效益评价[J].人民黄河,2011,33(2):78-81.  
 [15] 袁秀,孙燕燕,王计平,等.基于水鸟栖息地恢复的黄河三角洲水资源综合利用策略[J].资源科学,2020,42(1):104-114.  
 [16] 裴俊,杨薇,王文燕.淡水恢复工程对黄河三角洲湿地生态系统服务的影响[J].北京师范大学学报(自然科学版),2018,54(1):104-112.  
 [17] 董凯凯,王惠,杨丽原,等.人工恢复黄河三角洲湿地土壤碳氮含量变化特征[J].生态学报,2011,31(16):4778-4782.  
 [18] YANG Wei, LI Xiaoxiao, SUN Tao, et al. Habitat Heterogeneity Affects the Efficacy of Ecological Restoration by Freshwater Releases in a Recovering Freshwater Coastal Wetland in China's Yellow River Delta[J]. Ecological Engineering, 2017, 104: 1-12.  
 [19] YANG Wei, SUN Tao, YANG Zhifeng. Does the Implementation of Environmental Flows Improve Wetland Ecosystem Services and Biodiversity? A Literature Review [J]. Restoration Ecology, 2016, 24(6): 731-742.  
 [20] 连煜,王新功,黄翀,等.基于生态水文学的黄河口湿地生态需水评价[J].地理学报,2008,63(5):424-434.  
 [21] 刘晓燕,连煜,可素娟.黄河河口生态需水分析[J].水利学报,2009,40(8):956-961,968.  
 [22] 郑明喜,解伏菊,侯传美.黄河三角洲退化湿地植被与土壤的恢复研究[J].气象与环境学报,2012,28(1):11-16.  
 [23] 谢涛,杨志峰.黄河三角洲芦苇湿地土壤水分安全阈值[J].水科学进展,2009,20(5):683-688.

【责任编辑 吕艳梅】