

## 基于水动力模拟的湿地阻水围堤围埝判定——以白洋淀为例

白洁, 陈家琪, 田凯, 麻晓梅, 王欢欢, 赵彦伟

### 引用本文:

白洁, 陈家琪, 田凯, 等. 基于水动力模拟的湿地阻水围堤围埝判定——以白洋淀为例[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(2): 411-417.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0672>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 白洋淀流域水文连通对浮游植物群落的影响

田艺苑, 杨薇, 刘强, 王烜, 赵彦伟

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1538-1547 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1337>

### 基于eDNA技术的白洋淀微型生物群落监测

陈家琪, 董丽, 麻晓梅, 田凯, 白洁, 赵彦伟

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1773-1786 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0632>

### 白洋淀水环境风险受体脆弱性评价

王欢欢, 尹心安, 田凯, 刘世存, 赵彦伟, 孙家君

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2606-2612 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0554>

### 土地利用变化与社会经济因素对湖南典型水库水质变化的影响

杨泽栋, 秦治恒, 白中科, 郝易成

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2270-2277 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1754>

### 会仙湿地水体有机磷农药污染特征及生态风险

张健威, 曾莎莎, 梁延鹏, 覃礼堂, 曾鸿鹄, 马诚佑

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1990-1997 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0208>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

白洁, 陈家琪, 田凯, 等. 基于水动力模拟的湿地阻水围堤围埝判定——以白洋淀为例[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(2): 411-417.

BAI J, CHEN J Q, TIAN K, et al. Determination of wetland water-blocking cofferdams based on hydrodynamic simulation: A case study of Baiyangdian wetland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(2): 411-417.



开放科学 OSID

# 基于水动力模拟的湿地阻水围堤围埝判定 ——以白洋淀为例

白洁, 陈家琪, 田凯, 麻晓梅, 王欢欢, 赵彦伟\*

(水环境模拟国家重点实验室, 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

**摘要:**为识别并拆除影响较大的围堤围埝,以利于湿地恢复,本文提出了包括4个步骤的湿地关键阻水围堤围埝的判定方法,首先利用水动力模型模拟结果提取流线分布图;然后计算流线分布密度、均匀度、平均蜿蜒度指标;接下来初步判定关键阻水围堤围埝;最后利用地形、土地利用校核判定结果,确定关键阻水围堤围埝。以白洋淀为例,进行淀区关键阻水围堤围埝的判定,并模拟了围堤围埝拆除后淀区水动力的变化情况。结果表明,淀区内存在8处关键阻水围堤围埝,总面积约9.93 km<sup>2</sup>。关键阻水围堤围埝拆除后,流线丰富且分布更均匀,水面面积占比由90.42%增加到94.70%,滞水区面积占比降低约4.20%。

**关键词:**水动力模拟;围堤围埝;流线;白洋淀

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)02-0411-07 doi:10.11654/jaes.2021-0672

## Determination of wetland water-blocking cofferdams based on hydrodynamic simulation: A case study of Baiyangdian wetland

BAI Jie, CHEN Jiaqi, TIAN Kai, MA Xiaomei, WANG Huanhuan, ZHAO Yanwei\*

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Owing to the requirements of aquaculture and other social and economic activities, many cofferdams have been built in wetlands, which hinder the connection of the water system and affect the hydrodynamics and self-purification of wetlands. In order to facilitate the restoration of the wetland, it is necessary to determine and remove cofferdams. This study introduces the determination method of key water-blocking cofferdams in wetlands, which includes the following four steps: (1) the distribution diagram of streamlines is extracted using the simulation results of a hydrodynamic model; (2) the indexes of distribution density, distribution uniformity, and mean meandering of streamlines are calculated; (3) the key cofferdams are preliminarily determined; and (4) the key cofferdams are determined according to the topography and land use results. Taking the Baiyangdian wetland as an example, we used this method to determine the key water-blocking cofferdams and to simulate the hydrodynamic changes after their demolition. The results showed that there were eight key water-blocking cofferdams with a total area of approximately 9.93 km<sup>2</sup>. After their demolition, the streamlines were abundant and more evenly distributed. The proportion of water surface area increased from 90.42% to 94.70%, whereas the proportion of stagnant water area decreased by approximately 4.20%.

**Keywords:** hydrodynamic simulation; cofferdam; streamline; Baiyangdian Lake

收稿日期:2021-06-11 录用日期:2021-08-23

作者简介:白洁(1996—),女,山西大同人,硕士研究生,从事流域水环境管理研究。E-mail:201921180044@mail.bnu.edu.cn

\*通信作者:赵彦伟 E-mail:awei1974@bnu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(52070020);水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110001)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (52070020); Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (2018ZX07110001)

因水产养殖、农业耕种等社会经济活动需要,湿地建设围堤围埝等阻水构筑物,导致水流通道过流断面变窄,湿地自然地形与水系连通遭受破坏,进而改变水动力特征,破坏湿地水文循环,影响湿地生态功能<sup>[1-3]</sup>。湿地生态修复受到前所未有的重视,拆除阻水构筑物、恢复湿地微地形、改善水动力成为湿地生态修复的重要手段<sup>[4]</sup>。但湿地内阻水构筑物数量多、分布广,受制于工程量、实施成本、时间等限制因素,生态修复实践中难以实现完全拆除,因此需对影响较大的关键阻水构筑物实施优先拆除,从而改善水动力状况。

随着人类活动对湿地水系连通的破坏引起关注,围堤围埝、围网、圩堤等阻水构筑物对水动力及拆除效果的影响研究受到重视。魏清福<sup>[5]</sup>针对东太湖围网养殖区对水流的阻滞效应进行了研究,分析了围网养殖区拆除的水动力效果。王俊等<sup>[6]</sup>建立平原河网水动力模型,模拟了蜈蚣湖退圩还湖工程实施前后的水动力变化,明确了湿地阻水设施拆除后的水动力改善效果。YUAN等<sup>[7]</sup>、杜耘等<sup>[8]</sup>、田泽斌等<sup>[9]</sup>、姚静等<sup>[10]</sup>、赖格英等<sup>[11]</sup>、Li等<sup>[12]</sup>也都开展了相应的模拟与分析研究。在已有研究中,大多通过模型模拟手段,选取水位、流速、水面面积、滞水区面积等指标,进行拆除前后的效果对比。而实际中,流线可以反映水动力条件,通过判定流线状态来判定需要拆除的阻水构筑物是一个比较可行的方法。流线分布密度可反映流速大小,分布均匀度可反映水动力空间分布均衡性,流线平均蜿蜒度可反映区域内水流路径形态的曲折程度,三者综合,可作为判定阻水状况的定量依据,有利于提高判定结果的精确性,可为湿地阻水构筑物拆除提供更为准确的依据。

本文以淀泊众多、围堤围埝分布密集、沟渠密布在白洋淀为例,基于MIKE 21构建了白洋淀水动力模拟模型,提取流线分布,计算了区域流线的分布密度、均匀度、平均蜿蜒度等指标,判定出淀区关键阻水围堤围埝的分布,并对比模拟了围堤围埝拆除后的水动力效果,为白洋淀水系连通方案制定提供重要依据,为同类湿地水动力改善与提升提供技术依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

白洋淀是“华北之肾”,在污染控制、物种多样性和生态平衡维持等方面发挥着巨大作用。淀区总面积366 km<sup>2</sup>,淀内主要由白洋淀、马棚淀、烧车淀、

藻荇淀等143个大小不等、相互联系的淀泊和3 700多条沟壕组成。历史上为发展养殖,大量构筑围堤围埝,淀内建设有大小围堤围埝1 600多个,总面积达27 km<sup>2</sup><sup>[13]</sup>。高强度的围堤围埝建设,破坏了白洋淀自然地形,水面被无序、密集分布的围堤围埝分隔为错综复杂的狭窄沟渠<sup>[14-15]</sup>,再加上白洋淀缺乏天然水补给,依靠引黄济淀等外源补水很难满足生态水位要求,生态需水相对缺乏<sup>[16]</sup>,导致淀区水系连通性下降,水体流动性变差,湿地环境与生态功能难以提升,亟待实施围堤围埝拆除。

### 1.2 水动力模型构建

基于二维水动力模拟软件MIKE 21,构建了白洋淀水动力模型。白洋淀中部区域主要网格设置为30 m×30 m,府河、孝义河等主要河流通道设置为30 m×30 m,其余区域设置为100 m×100 m。模型共划分501 738个节点,993 753个网格单元。考虑模型精度需求及模型计算时间限制,选取王家寨、端村、十方院2019年3月1日至8月31日补水周期内水位数据进行模型率定,以2019年9月1日至2020年2月28日补水周期内的水位数据进行模型验证,验证结果见图1。验证结果表明,水位模拟误差在0.1~0.2 m,结果较好,模型可用。

模型构建所需的地形数据在2019年1:2 000的实测数据基础上加密得到,蒸发、降水等气象数据、各入淀河流量数据、各水位站水位数据来源于实地调研搜集,均为实测日均值。

### 1.3 指标选择

围堤围埝通过影响水下地形从而影响水流速度和方向,因此在判定关键阻水围堤围埝时,选取的指标应能较好地反映阻水物对流速和流向的影响。流线是某一瞬间流场中一系列质点的流动方向线,流线疏密程度可反映水体流动速度大小,流线越密集则表明该区域内流速越大,故选用流线分布密度指标反映流速大小。围堤围埝也可能导致围堤围埝分布区域内流速变小,围堤围埝之间的沟渠水流集中,流速变大,流线分布均匀度指标可反映流速在空间分布的均衡性。流线形状可以反映瞬时流场内水流方向与曲折程度,围堤围埝会导致水流流向变化与转弯曲折,用流线平均蜿蜒度指标反映区域内流线的曲折程度,判定是否受到围堤围埝影响。流线分布密度、分布均匀度、流线平均蜿蜒度指标可综合反映围堤围埝对水动力的影响,共同作为判定阻水状况的指标。

流线分布密度的计算公式为:

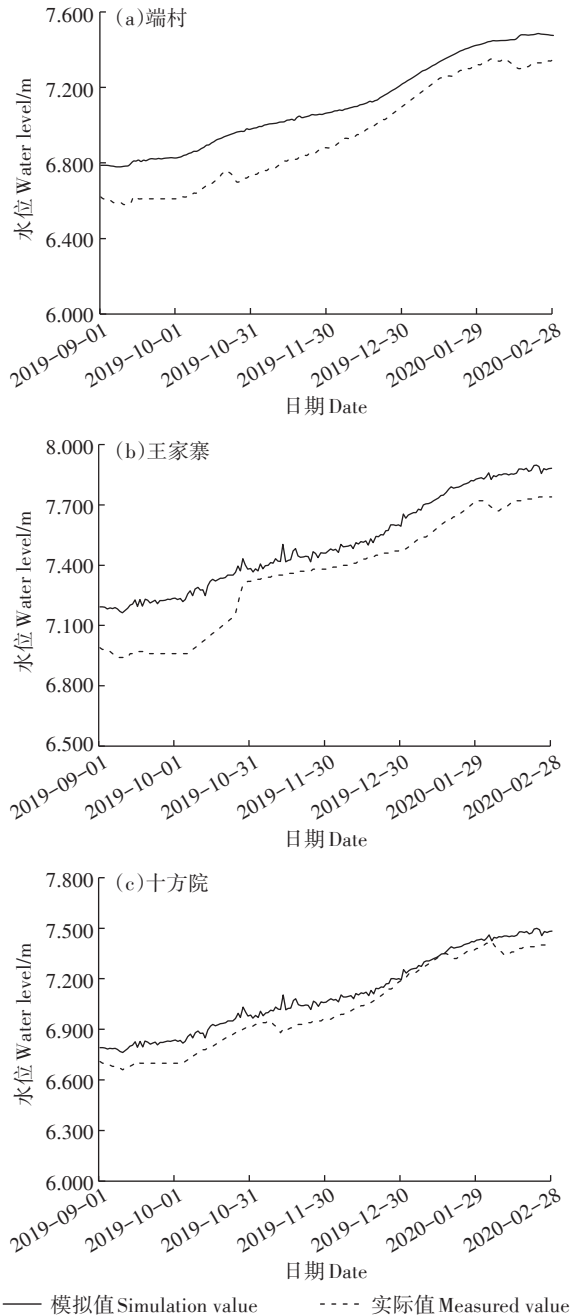


图1 水位验证结果

Figure 1 Comparison of simulated and measured water level values

$$\rho = n/s \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为区域流线分布密度,条 $\cdot$ km $^{-2}$ ;  $n$ 为区域内流线条数;  $s$ 为区域面积,km $^2$ 。

流线分布均匀度的计算公式为:

$$E = \sqrt{\frac{m}{\sum_{i=1}^m (d_i - d)^2}} \quad (2)$$

式中: $E$ 为均匀度;  $m$ 为区域内流线间间隔数量;  $d_i$ 表

示区域内第  $i$  条流线与第  $i+1$  条流线之间的距离, km;  $d$  为所有流线间间距的平均值, km。

流线平均蜿蜒度的计算公式为:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n L_i / D_i}{n} \quad (3)$$

式中:  $W$  为流线平均蜿蜒度;  $n$  为区域内流线条数;  $L_i$  为第  $i$  条流线实际长度, km;  $D_i$  为第  $i$  条流线在该区域内沿水流方向两点间直线距离, km。

#### 1.4 关键阻水围堤围埝判定

本研究提出一种基于水动力模拟结果, 结合流线分布密度、均匀度、平均蜿蜒度指标判定关键阻水围堤围埝的方法。具体步骤如下:

(1) 提取流线分布图。根据水动力模型模拟结果, 利用 Tecplot 软件提取流线分布图。

(2) 计算区域流线分布密度、分布均匀度和平均蜿蜒度。利用流线分布图, 计算区域流线分布均匀度、密度及平均蜿蜒度。

(3) 判定关键阻水围堤围埝。根据(2)中计算结果, 若区域流线分布密度低于标准值( $\rho_{\text{标}}$ ), 表明区域内围堤围埝严重影响水体流动性, 判定其为关键阻水围堤围埝; 若流线分布密度大于  $\rho_{\text{标}}$ , 均匀度小于标准值( $E_{\text{标}}$ ), 判定其为关键阻水围堤围埝; 若分布密度大于  $\rho_{\text{标}}$ , 均匀度大于  $E_{\text{标}}$ , 且平均蜿蜒度大于标准值( $W_{\text{标}}$ ), 判定其为关键阻水围堤围埝。各指标判断标准参考历史资料, 并对比流动性较好区域的实际情况综合考虑确定。以研究区白洋淀为例, 各指标标准值参考白洋淀历史资料、水动力较好的水域模拟与实测结果及专家咨询结果确定, 分别为  $\rho_{\text{标}} = 2$ 、 $E_{\text{标}} = 7$ 、 $W_{\text{标}} = 1.3$ 。

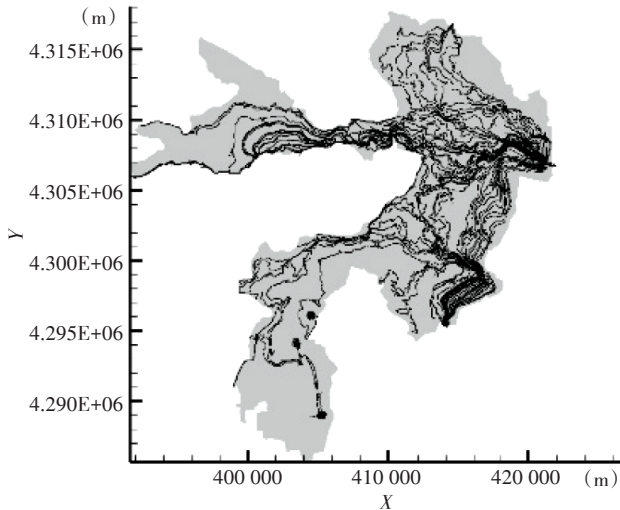
(4) 判定结果的校验。基于 GIS 平台, 将流线分布图与水下地形图、土地利用图、水利设施分布图等叠加, 实施人工研判与叠加分析, 明确判定出的关键阻水围堤围埝区域内的流线分布变化是由围堤围埝阻水所致, 而非受水下地形变化、水利设施调度或台地影响导致。

## 2 结果与分析

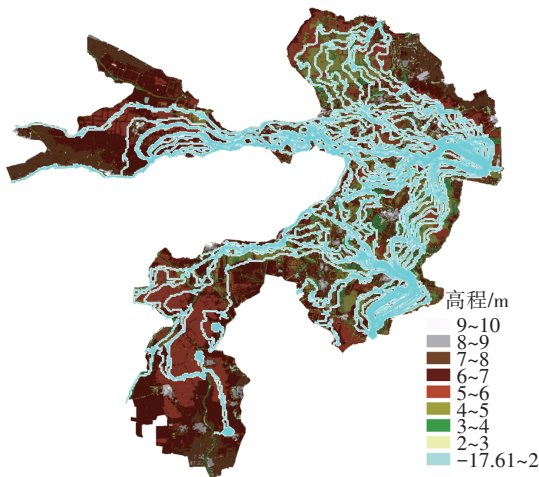
### 2.1 关键阻水围堤围埝判定结果

参考现状补水流量, 确定入流量等数据, 进行了白洋淀水动力模拟。利用模型模拟结果, 提取出白洋淀流线分布图(图 2a)。根据 1.3 中公式计算流线分布密度、分布均匀度、平均蜿蜒度, 初步判定出关键阻水围堤围埝分布。其中, 将流线分布图与地形图、土

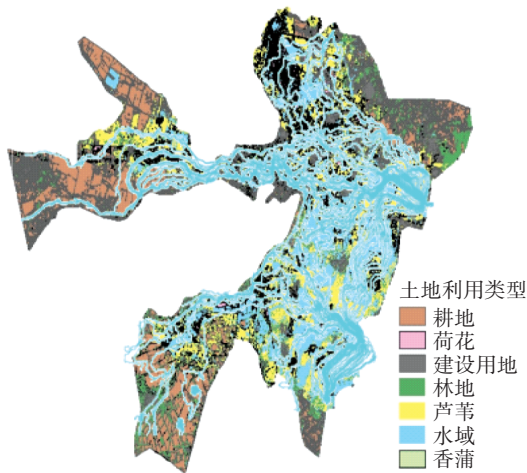




(a) 流线分布图  
Streamline distribution map



(b) 流线分布与地形叠加结果  
Superposition of streamline distribution map and terrain



(c) 流线分布与土地利用叠加结果  
Superposition of streamline distribution map and land use

图2 白洋淀流线分布及叠加结果(坐标系为CGCS2000)

Figure 2 Baiyangdian streamline distribution map and superposition results

地利用图进行叠加(图 2b 和图 2c),对判定出的关键阻水围堤围埝进行校验,最终确定出关键阻水围堤围埝分布(表 1 与图 3)。

由表 1 和图 3 可见,白洋淀淀区内有 8 处关键阻水围堤围埝。判定关键阻水围堤围埝总面积约 9.93 km<sup>2</sup>,占淀区内围堤围埝总面积的 36.7% 左右。关键阻水围堤围埝的堤顶高程在 7.5~8.0 m 之间。

为衡量  $\rho_{\text{标}}$ 、 $E_{\text{标}}$ 、 $W_{\text{标}}$  取值标准的合理性,进一步比较了不同取值标准下的判定结果。表 1 中结果在  $\rho_{\text{标}} = 2$ 、 $E_{\text{标}} = 7$ 、 $W_{\text{标}} = 1.3$  的取值标准下判定得到,如将判定标准提高 50%,即  $\rho_{\text{标}} = 3$ 、 $E_{\text{标}} = 10.5$ 、 $W_{\text{标}} = 0.65$ ,则判定的关键阻水围堤围埝有 7 处,分布在南刘庄附近、白沟引河入淀口处、王家寨西、光淀村西、圈头西街村西、圈头西街村北和引黄补淀入口至

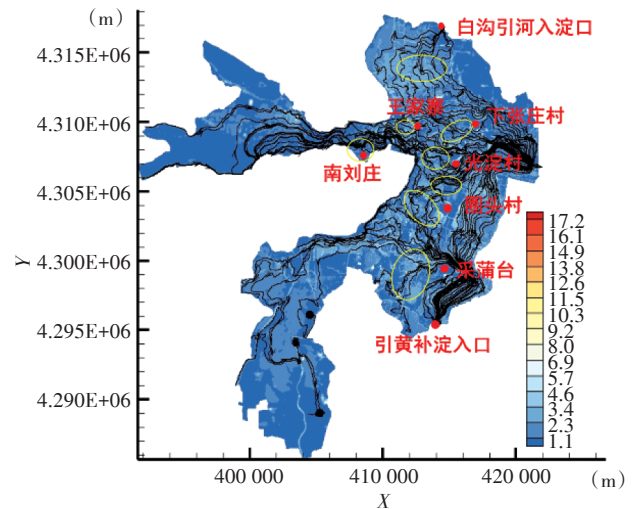


图3 白洋淀关键阻水围堤围埝判定结果(坐标系为CGCS2000)

Figure 3 Determination result of key cofferdams of Baiyangdian

表 1 关键阻水围堤围埝分布情况及指标计算结果

Table 1 Distribution of key water blocking cofferdams and indicator calculation results

编号 Number	分布区域 Distribution area	面积 Area/km <sup>2</sup>	指标计算结果 Indicator calculation results		
			$\rho$	$E$	$W$
1	白沟引河入淀口处	0.50	1.78	5.47	1.22
2	南刘庄附近	0.58	0.34	5.26	1.28
3	王家寨西	0.25	8.00	6.90	1.12
4	下张庄村西南	0.20	3.20	11.34	1.32
5	光淀村西	0.70	3.12	10.26	1.39
6	圈头西街村北	0.80	2.22	5.40	1.46
7	圈头西街村西	1.10	2.50	6.88	1.60
8	引黄补淀入口至采蒲台村西	5.80	0.98	4.83	1.11

采蒲台村西,下张庄村西南处的围堤围埝将不被判定为关键阻水围堤围埝。若将判定标准降低50%,即 $\rho_{\text{标}} = 1$ 、 $E_{\text{标}} = 3.5$ 、 $W_{\text{标}} = 1.95$ ,则淀区内围堤围埝几乎均应判定为关键阻水围堤围埝。为保证结果符合实际需求,关键阻水围堤围埝判定时,应保证判定过程中不遗漏影响较大的关键阻水围堤围埝,同时避免拆除过多实际影响较小的围堤围埝。设定 $\rho_{\text{标}} = 2$ 、 $E_{\text{标}} = 7$ 、 $W_{\text{标}} = 1.3$ ,可以较好地满足以上要求,证明该标准取值具有一定的合理性。

## 2.2 关键阻水围堤围埝拆除前后水动力变化

对判定出的8处关键阻水围堤围埝全部拆除至高程6 m左右,对拆除前后的水动力进行模拟,分析了平均流速、流线分布、水面面积比例和滞水区面积比例4个指标的变化。

关键阻水围堤围埝拆除后,平均流速由 $0.032 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小为 $0.029 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,略有减小,但流线分布明显改善(图4)。围堤围埝拆除后,白洋淀淀区北部白沟引河入淀口附近流线增加,中部各村庄附近水流受阻减小,流线分布均匀度明显提升。南部引黄补淀入口至采蒲台村西侧区域内流线明显丰富,引黄补淀来水在淀区南部分布更均匀。以水深大于10 cm(湿边界)为水面进行网格统计,发现拆除后水面面积比由90.42%增加至94.70%,水面面积明显增加。参照相关研究<sup>[17]</sup>,设置流速小于平均流速1/10的区域为滞水区,可以发现滞水区面积占比降低(图5和图6),由拆除前的35.45%下降至31.22%,减小4.23个百分点。

拆除判定出的关键围堤围埝后,白洋淀水域流线分布、水面面积比、滞水区面积比等指标均有所改善。

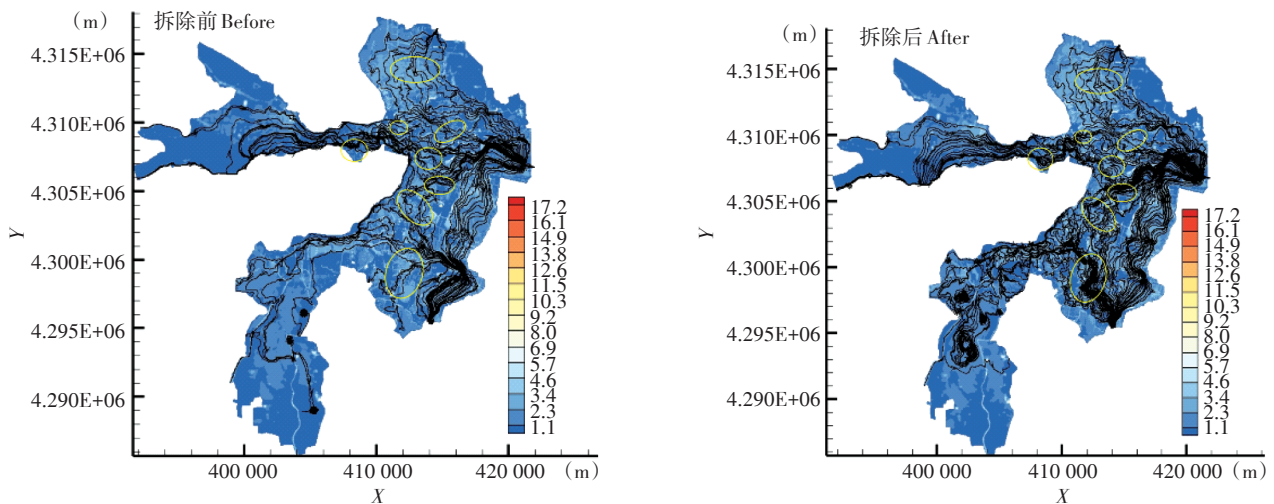


图4 关键阻水围堤围埝拆除前后流线分布图(坐标系为CGCS2000)

Figure 4 The streamline distribution result of the key water blocking cofferdams before and after removal

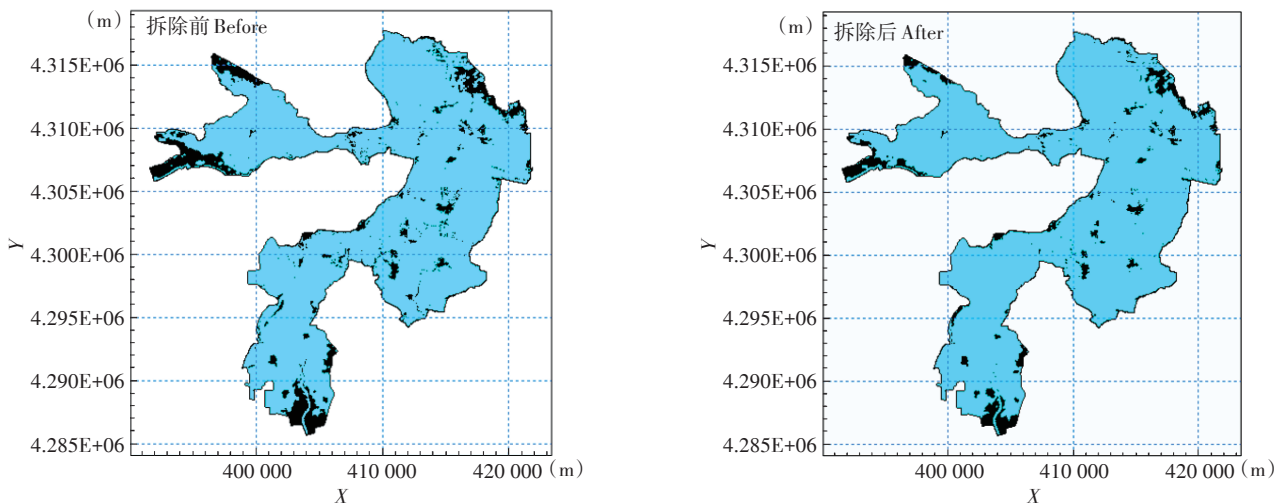


图5 关键阻水围堤围埝拆除前后水面面积比例(坐标系为CGCS2000)

Figure 5 The proportion of water surface area of the key water blocking cofferdams before and after removal

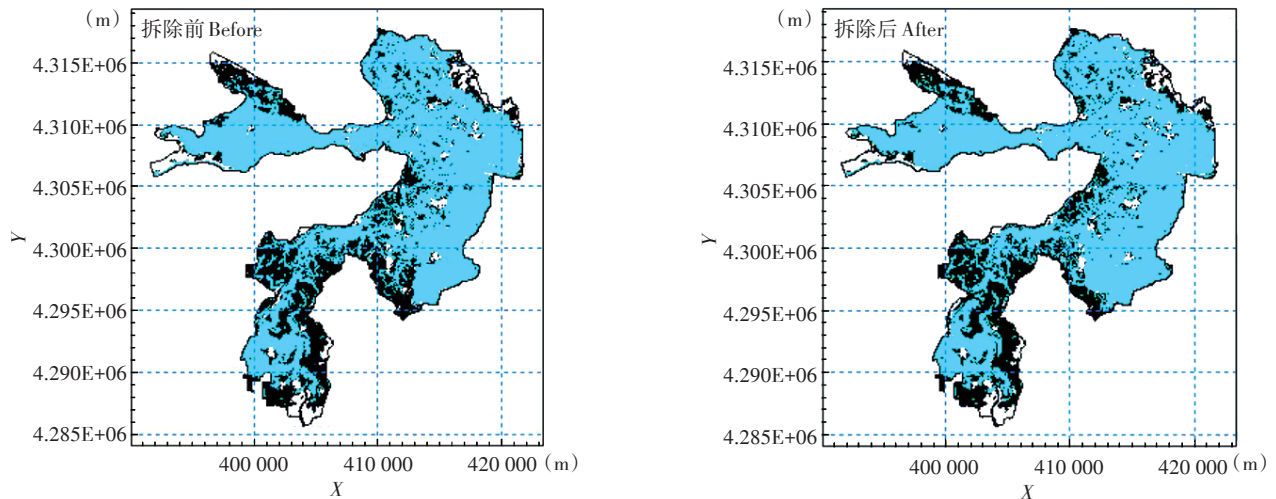


图6 关键阻水围堤围埝拆除前后滞水区面积比例(坐标系为CGCS2000)

Figure 6 The proportion of stagnant water area of the key water blocking cofferdams before and after removal

淀区北部、中部及南部区域内流线更加丰富,整体流线分布更均匀,滞水区面积明显减小,水面面积增加,水体流动性明显增强。以关键阻水围堤围埝为对象实施拆除,既实现了水动力条件的改善,又节约了成本,具有环境与经济双重效益。

### 3 结论

(1)提出了一种湿地关键阻水围堤围埝的判定方法。判定方法包括4个步骤:首先利用水动力模型模拟结果,提取流线分布图;然后计算流线分布密度、均匀度、平均蜿蜒度指标;接下来初步判定关键阻水围堤围埝;最后将流线分布与地形、土地利用图等叠加,对判定结果进行校验,确定关键阻水围堤围埝。

(2)模拟判定了白洋淀关键阻水围堤围埝。构建白洋淀水动力模拟模型,利用模拟结果判定了白洋淀内存在8处关键阻水围堤围埝,总面积约9.93 km<sup>2</sup>。

(3)进行了关键阻水围堤围埝拆除前后水动力指标的对比分析。关键阻水围堤围埝拆除后,淀区水动力条件改善。淀区北部、中部的流线分布更为均匀,南部引黄入淀口至采蒲台西侧区域内流线明显丰富,滞水区面积占比减少,水面面积占比增加。

#### 参考文献:

[1] 张莹莹,蔡晓斌,杨超,等. 1974—2017年洪湖湿地自然保护区景观格局演变及驱动力分析[J]. 湖泊科学, 2019, 31(1): 171-182. ZHANG Y Y, CAI X B, YANG C, et al. Driving force analysis of landscape pattern changes in Honghu Wetland Nature Reserve in recent 40 years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(1): 171-182.

[2] 侯西勇,张华,李东,等. 渤海围填海发展趋势、环境与生态影响及

政策建议[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3311-3319. HOU X Y, ZHANG H, LI D, et al. Development trend, environmental and ecological impacts, and policy recommendations for Bohai Sea reclamation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3311-3319.

[3] 李晓文,李梦迪,梁晨,等. 湿地恢复若干问题探讨[J]. 自然资源学报, 2014, 29(7): 1257-1269. LI X W, LI M D, LIANG C, et al. On the current key issues in wetland restoration[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(7): 1257-1269.

[4] 王伟,余韵,贾福岩,等. 微地形改造的生态环境效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6462-6469. WEI W, YU Y, JIA F Y, et al. Research progress in the ecological effects of micro-landform modification[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(20): 6462-6469.

[5] 魏清福. 东太湖湖泊水面萎缩的状况及影响[J]. 中国工程科学, 2010, 12(6): 123-126. WEI Q F. The actuality and effect by shrinking of surface of east Taihu Lake[J]. *Engineering Science*, 2010, 12(6): 123-126.

[6] 王俊,王铁虹,高士佩,等. 退圩还湖工程实施方案及其对湖泊环境影响分析[J]. 人民长江, 2020, 51(1): 44-49. WANG J, WANG Y H, GAO S P, et al. Implementation scheme of returning polder to lake and its influence on lake environment[J]. *Yangtze River*, 2020, 51(1): 44-49.

[7] YUAN Y, JALON-ROJAS I, WANG X H. Response of water-exchange capacity to human interventions in Jiaozhou Bay, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2021, 249: 107088.

[8] 杜耘,薛怀平,吴胜军,等. 近代洞庭湖沉积与孕灾环境研究[J]. 武汉大学学报(理学版), 2003, 49(6): 740-744. DU Y, XUE H P, WU S J, et al. Study on the Dongting Lake's sedimentation and flood disaster environment gestation in decades[J]. *Journal of Wuhan University*, 2003, 49(6): 740-744.

[9] 田泽斌,王丽娟,郑丙辉,等. 城陵矶综合枢纽工程建设对洞庭湖水动力影响模拟研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1883-1890. TIAN Z B, WANG L J, ZHENG B H, et al. Impact simulation of the Chenglingji hydraulic project on hydrodynamics of Dongting Lake[J].



*Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(5):1883-1890.

- [10] 姚静, 李云良, 李梦凡, 等. 地形变化对鄱阳湖枯水的影响[J]. 湖泊科学, 2017, 29(4):955-964. YAO J, LI Y L, LI M F, et al. The influence of bathymetry changes on low water level of Lake Poyang[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(4):955-964.
- [11] 赖格英, 王鹏, 黄小兰, 等. 鄱阳湖水利枢纽工程对鄱阳湖水文水动力影响的模拟[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1):128-140. LAI G Y, WANG P, HUANG X L, et al. A simulation research of impacts of the Lake Poyang hydraulic project on hydrology and hydrodynamics[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(1):128-140.
- [12] LI X J, HUANG M T, WANG R H. Numerical simulation of Donghu Lake hydrodynamics and water quality based on remote sensing and MIKE 21[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(2):94.
- [13] 李琳琳, 王国清, 秦攀, 等. 白洋淀水环境状况与治理保护对策[J]. 科技导报, 2019, 37(21):14-25. LI L L, WANG G Q, QIN P, et al. Water environmental quality of Baiyangdian Lake and its treatment and protection countermeasures[J]. *Science & Technology Review*, 2019, 37(21):14-25.
- [14] 王东升, 门彬, 张美一. 论浅水湖泊中的水固交错带与科学清淤规划:以雄安新区白洋淀为例[J]. 环境科学学报, 2020, 40(5):1550-1559. WANG D S, MEN B, ZHANG M Y. Sediment water ecotone and sediment removal of shallow lake: A case study of Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(5):1550-1559.
- [15] 杨苗, 龚家国, 赵勇, 等. 白洋淀区域景观格局动态变化及趋势分析[J]. 生态学报, 2020, 40(20):7165-7174. YANG M, GONG J G, ZHAO Y, et al. Analysis of dynamic changes and trends in the landscape pattern of the Baiyangdian region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20):7165-7174.
- [16] 杨薇, 孙立鑫, 王烜, 等. 生态补水驱动下白洋淀生态系统服务演变趋势[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5):1077-1084. YANG W, SUN L X, WANG X, et al. Changes in ecosystem services in Baiyangdian Lake driven by environmental flow releases[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5):1077-1084.
- [17] 杨卫, 张利平, 李宗礼, 等. 基于水环境改善的城市湖泊群河湖连通方案研究[J]. 地理学报, 2018, 73(1):115-128. YANG W, ZHANG L P, LI Z L, et al. Interconnected river system network scheme of urban lake group based on water environment improvement[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1):115-128.