

一种湖泊生态环境改善方案比选方法——以白洋淀为例

尚青, 王晨, 常硕, 麻晓梅, 曾勇

引用本文:

尚青, 王晨, 常硕, 麻晓梅, 曾勇. 一种湖泊生态环境改善方案比选方法——以白洋淀为例[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1531-1536.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1179>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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

农业环境科学学报. 2022, 41(2): 411-417 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0672>

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>

水生植物对生态沟渠底泥磷吸附特性的影响

李红芳, 刘锋, 肖润林, 何洋, 王迪, 吴金水

农业环境科学学报. 2016, 35(1): 157-163 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.021>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

尚青, 王晨, 常硕, 等. 一种湖泊生态环境改善方案比选方法——以白洋淀为例[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1531–1536.
SHANG Q, WANG C, CHANG S, et al. A method of screening ecological environment improvement scenarios for lakes: A case study of the Baiyangdian Lake, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(7): 1531–1536.



开放科学 OSID

一种湖泊生态环境改善方案比选方法 ——以白洋淀为例

尚青¹, 王晨², 常硕², 麻晓梅³, 曾勇^{1*}

(1. 中国石油大学(北京)化学工程与环境学院, 重质油国家重点实验室, 北京市油气污染防治重点实验室, 北京 102249; 2. 北京市门头沟区生态环境局, 北京 102300; 3. 北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 湖泊生态环境改善与恢复是系统工程, 筛选科学合理的改善方案是湖泊治理的重要工作。本文面向湖泊生态环境整体改善要求, 构建包括水动力、水质和生境三要素指标的生态环境改善方案比选指标体系, 提出了基于TOPSIS决策的方案比选方法。以白洋淀为例, 设定了“补水格局优化(S1)”、“深度治污(S2)”、“补水格局优化+适度治污(S3)”3套比选方案, 开展了水动力和水质模拟, 进行了方案比选。结果表明, 3套方案对理想解的贴近度分别为0.35、0.55、0.84, S3方案为推荐方案, 对水动力、水质、水生境改善效果最优。

关键词: 湖泊; 生态环境改善; 方案比选; 白洋淀

中图分类号: X321; TV882.9 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)07-1531-06 doi:10.11654/jaes.2021-1179

A method of screening ecological environment improvement scenarios for lakes: A case study of the Baiyangdian Lake, China

SHANG Qing¹, WANG Chen², CHANG Shuo², MA Xiaomei³, ZENG Yong^{1*}

(1. State Key Laboratory of Heavy Oil, Beijing Key Laboratory of Oil and Gas Pollution Control, School of Chemical Engineering and Environment, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. Bureau of Ecology and Environment of Mentougou District, Beijing City, Beijing 102300, China; 3. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The improvement and restoration of shallow lake ecological environments involves systems engineering. Screening the best scenarios is an important component of lake management. According to the overall improvement requirements of the lake ecological environment, an index system consisting of hydrodynamic, water quality, and aquatic habitat indicators was put forward and was further employed to screen the best scenarios based on the TOPSIS decision-making method. Taking the Baiyangdian Lake as an example, three scenarios of "water allocation optimization (S1)", "deep pollution control (S2)", and "water allocation optimization + moderate pollution control (S3)" were set up and simulated based on hydrodynamic and water quality simulation models. The screening results showed that the closeness of the three scenarios to the ideal solution were 0.35, 0.55, and 0.84 respectively. Among them, S3 was recommended as the best scenario, which has the best effect on the improvement of hydrodynamics, water quality, and aquatic habitat of the Baiyangdian Lake.

Keywords: lake; ecological environment improvement; scenario screening; Baiyangdian

收稿日期: 2021-10-14 录用日期: 2022-01-17

作者简介: 尚青(1999—), 女, 陕西渭南人, 硕士研究生, 从事水环境与水生态研究。E-mail: qingshang19990101@163.com

*通信作者: 曾勇 E-mail: yongzeng1974@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(52070020, 52079006); 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, 52079006); The Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment(2018ZX07110001)

湖泊是陆地上主要的淡水资源,具备提供水源、净化污染、维护生物多样性等重要生态服务功能^[1]。水资源过度开发等人类活动导致湖泊水量减少、水体富营养化、水生生物多样性下降显著^[2-4],因此迫切需要实施湖泊生态环境治理。随着雄安新区的成立,作为区内的重要生态依托,白洋淀过度恶化的生态环境制约了新区可持续发展,其恢复与改善得到各方重视。

湖泊生态环境受人为活动及自然过程作用,涉及多要素、多因子协同影响^[5],其改善与治理是多变量、多目标的复杂系统工程,方案筛选的研究受到广泛关注。目前基于水动力、水质模型构建比选指标来选择最佳湖泊改善方案的研究已有一定的成果,但在比选指标体系的构建上存在一定问题^[6-12]。杨卫等^[13]、华祖林等^[14]和王磊等^[15]分别结合数值模拟与所构建比选指标体系,得到玄武湖、汤逊湖最优改善方案,但比选指标体系由水力、水质、经济指标构成,未考虑水生态方面指标。ZHANG等^[16]构建了环境、生态、社会、经济指标体系用于太湖恢复方案比选,环境层面主要包括各类水质指标的平均浓度,但忽略了湖泊水质整体改善,且未考虑水动力指标。总体上看,以往的湖泊治理方案比选研究中,多选取水动力、水质、经济成本等方面的部分指标,未全面考虑水质、水动力、水生境改善方面的指标,选择的比选指标体系不够系统,难以反映湖泊生态环境系统的完整性和复杂性,且指

标处理中的定量性也需要提升,这制约了方案比选的科学性和实用性。

本文提出一种湖泊生态环境改善方案的比选方法,以水动力、水质模拟模型为基础,建立包括水质、水动力、水生境3要素指标的方案比选指标体系和综合决策方法,并以白洋淀为例进行案例研究,为湖泊生态环境改善与恢复提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白洋淀地处河北省保定市,位于 $38^{\circ}43' \sim 39^{\circ}02' N$, $115^{\circ}38' \sim 116^{\circ}07' E$ (图1),总面积 366 km^2 ,为华北平原最大的浅水型湖泊,享有“华北之肾”之称。近年来白洋淀入淀水量减少,2010年至2016年平均入淀水量低于 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$,淀区水位降低至 6.6 m 以下,水面面积缩减,湖泊萎缩;水体流速缓慢(低于 $0.8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$),部分水体基本不流动,水动力条件与水文连通性差。同时,携带工业污水的入淀河流水质欠佳,且受淀区生活污水、农业非点源污染影响,湖泊水质差,基本为IV~V类水平,主要污染物为COD、总磷等,生态环境形势不容乐观,亟需进行改善^[17-21]。

1.2 方案比选方法

应用水动力水质模型对备选方案进行情景模拟与预测,基于本研究所构建方案比选指标体系,采用TOPSIS决策方法进行方案排序与比选。

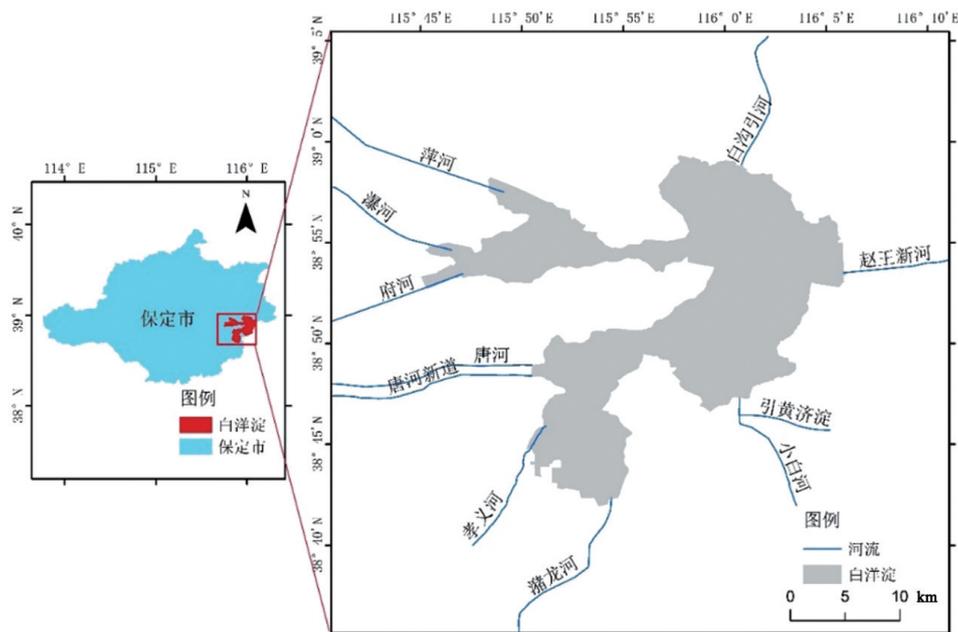


图1 白洋淀地理位置图

Figure 1 The geographic location of the Baiyangdian Lake

1.2.1 模型率定验证

获取水下地形、气象、水文、水质等数据,利用 MIKE21 软件平台中的 HD(水动力)模块和 ECO lab(水质)模块,构建白洋淀水动力水质模型,用淀区3个水位站点2018年3月至2019年3月、2019年3月至2020年3月的水位逐日时间序列数据分别进行水动力模型率定与验证,用2个水质监测点2019年3月至2020年1月、2018年3月至7月的水质逐月时间序列数据分别进行水质模型率定与验证,代表性点位率定与验证结果见图2~图3,根据 MORIASI 等^[22]的模型精度评价标准,水动力模型精度非常好,水质模型精度处于好和非常好之间,满足精度要求,可用于模拟预测。

1.2.2 比选指标体系确定

白洋淀水动力条件弱化,水质下降,湖泊面积缩减,根据生态环境系统现状,构建包括水动力、水质、

水生境等的湖泊生态环境改善方案比选指标体系,包括目标层、准则层、指标层,共12项指标,具体见表1。

1.2.3 方案比选

基于各情景方案模拟结果,获得比选指标值,运用 TOPSIS 决策方法进行方案比选。构造规范化加权矩阵 X [见式(1)],获取正负理想解,计算方案与正、负理想解直接的欧式距离 s_i^+ 、 s_i^- ,见式(2)与(3),根据式(4)计算各个方案与理想解的相对贴近度 C_i^* ,对其进行排序,贴近度越高方案越优,可作为推荐方案。

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & x_{ij} & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: X 为规范化加权矩阵; x_{ij} 为第*i*个方案第*j*个比选指标的规范化加权计算值, $i=1,2,\dots,m$; $j=1,2,\dots,n$ 。

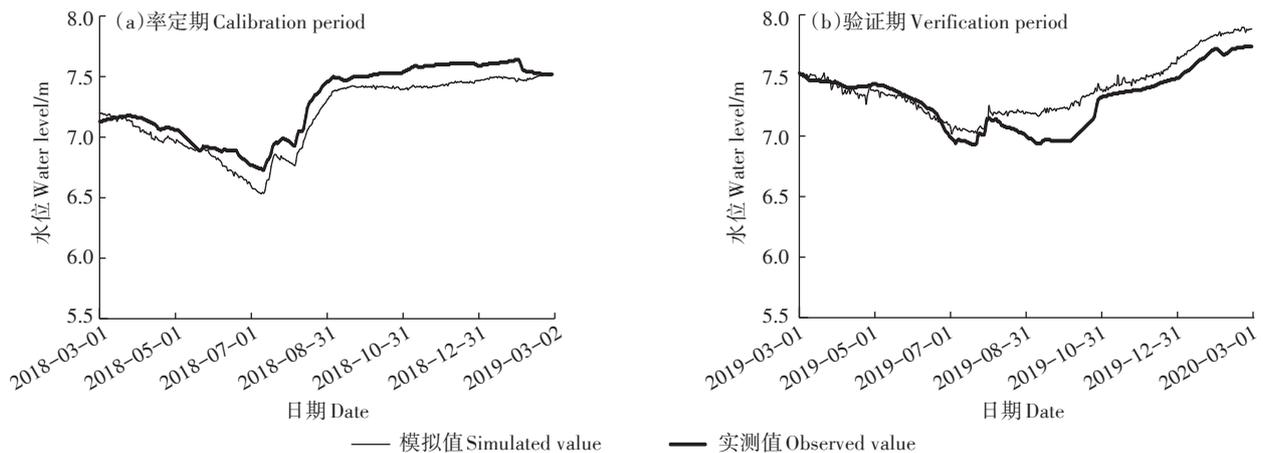


图2 水位模拟值与实测值比较(王家寨站)

Figure 2 The comparison of simulated and observed water level values(Wangjiazhai station)

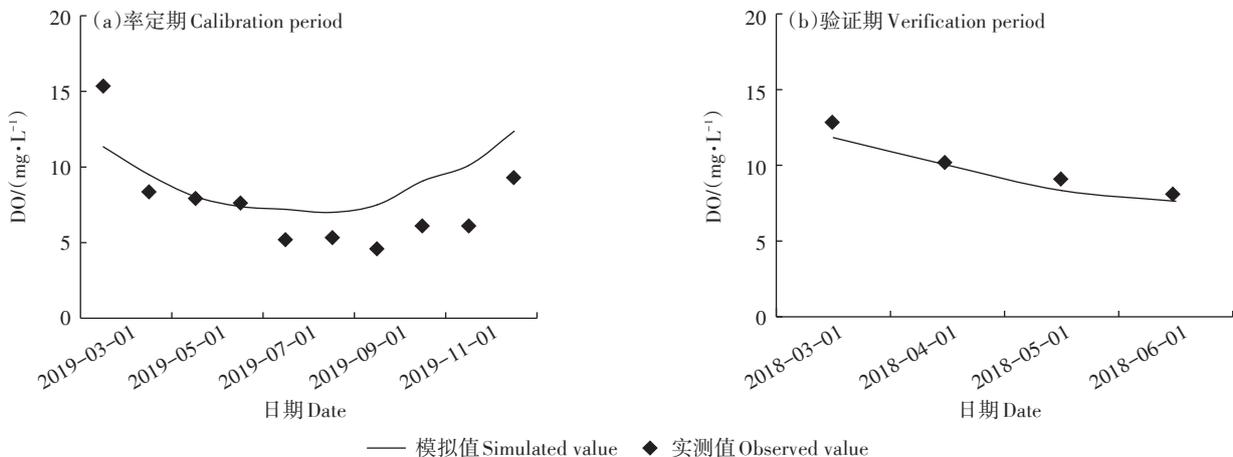


图3 DO模拟值与实测值比较(采蒲台站)

Figure 3 The comparison of simulated and observed DO values(Caiputai station)

表1 湖泊生态环境改善方案比选指标

Table 1 The screening indicators for improvement scenarios of lake ecological environment

目标层 Target layer	准则层 Rule layer	指标层 Index layer	单位 Unit	含义 Connotation	计算公式 Calculation formula	备注 Note
水力	流路状况	流线分布密度	km ⁻²	反映湖泊流路状态,该指标越高,湖泊流路状况越好,进而水系连通性与畅通程度越好	$D_j = \frac{N}{S}$	N为流线条数;S为水面面积,km ²
		流速状况	平均流速	m·s ⁻¹	反映湖泊流速特征,影响污染物扩散、自净能力与湖泊抑制水华能力,该指标越高,流速状况越优	$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{t=1}^{12} v_{i,t}}{12 \times 5}$
		平均流速时间标准差	/	流速分布在时间上的均匀性,该指标越低,流速状况越优	$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (v_i - \bar{v})^2}{12 - 1}}$	v_i 为全湖第 <i>t</i> 月平均流速, m·s ⁻¹ , $v_i = \frac{\sum_{i=1}^5 v_{i,t}}{5}$
		平均流速空间标准差	/	流速分布在空间上的均匀性,该指标越低,流速状况越优	$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (v_i - \bar{v})^2}{5 - 1}}$	v_i 为第 <i>i</i> 个站点全年平均流速, m·s ⁻¹ , $v_i = \frac{\sum_{t=1}^{12} v_{i,t}}{12}$
	水体更新状况	水力停留时间	d	反映水体更新速率、湖泊水体置换能力,与水冲刷污染物速度负相关,该指标越小,水体更新状况越好	$HRT = \frac{V}{Q_{out}}$	V为体积, m ³ ; Q_{out} 为出湖流量, m ³ ·d ⁻¹
	滞水状况	滞水区面积比例	%	反映水体整体更新程度,该指标越小,滞水状况越好	$r = \frac{s_z}{s_w} \times 100$	s_z 为滞水区面积, m ² ; s_w 为水面总面积, m ²
水质	水质改善状况	水质改善度	%	包括COD、TN、TP、NH ₃ -N 4种水质指标,反映水质改善程度	$w = \frac{\sum_{j=1}^4 C_{j0} - C_j}{C_{j0}} \times 100$	C_{j0} 、 C_j 为第 <i>j</i> 种污染物方案实施前浓度、实施后预测浓度, mg·L ⁻¹ , $j=1, 2, 3, 4$, 分别代表4种污染物
	水质达标状况	水质总达标率	%	反映全年、全站点4种污染物达标状况,该指标越高越好	$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^4 d_{i,j}}{5 \times 4 \times 365} \times 100$	$d_{i,j}$ 为第 <i>i</i> 个水质监测站点的第 <i>j</i> 种水质指标一年内达标天数
		水质达标率时间标准差	%	水质达标在时间上的均匀性,该指标越小,水质达标状况越好	$q_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} (P_i - \bar{p})^2}{12 - 1}}$	P_i 为第 <i>t</i> 月全站点的水质达标率, $P_i = \frac{\sum_{i=1}^5 P_{i,t}}{5}$, 其中 $P_{i,t}$ 为第 <i>i</i> 个水质站点第 <i>t</i> 月的达标率, $P_{i,t} = \frac{\sum_{j=1}^4 P_{i,j,t}}{4}$, $P_{i,j,t}$ 为第 <i>i</i> 个水质站点第 <i>j</i> 个污染物第 <i>t</i> 月的达标率
		水质达标率空间标准差	%	水质达标在空间上的均匀性,该指标越小,水质达标状况越好	$q_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (P_i - \bar{p})^2}{5 - 1}}$	P_i 为第 <i>i</i> 站点全年水质达标率, $P_i = \frac{\sum_{t=1}^{12} P_{i,t}}{12}$
水生境	生态水位状况	生态水位满足度	%	湖泊恢复到适宜生态水位能满足生态、水环境、景观建设等方面需求,该指标越高生态水位状况越优	$h = \frac{d_t}{365} \times 100$	d_t 为目标年满足生态水位的天数
	生境状况	水面面积率	%	水面面积占湖泊面积比例,该指标越高,生境状况改善效果越好	$r' = \frac{s_w}{s_t} \times 100$	s_w 为水面面积, m ² ; s_t 为湖泊总面积, m ²

$$s_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j^*)^2}, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$s_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j^-)^2}, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: s_i^* 、 s_i^- 为方案与正、负理想解直接的欧式距离; x_j^* 、 x_j^- 为正、负理想解,分别由矩阵中各指标的最大值、最小值构成。

$$C_i^* = \frac{s_i^-}{s_i^- + s_i^*} \quad (4)$$

式中: C_i^* 为方案与理想解的相对贴近度; s_i^* 、 s_i^- 为方案与正、负理想解直接的欧式距离。

2 结果与讨论

针对白洋淀水动力和水质差等问题,目前已通过生态补水、治理入淀河流污染等举措展开生态环境治理的尝试。目前生态补水主要是“引黄济淀”通道,位于淀区东南部,但淀区地形西高东低,水流易在东南部形成区域雍水,无法向中部和北部流动,不利于生态环境改善。为此,本研究设定了3套生态环境改善备选方案:(1)补水格局优化(S1方案),即原补水分配流量至西部入淀河道,治污保持现状;(2)深度治污(S2方案),即深度治理入淀河流至IV类水质。(3)补

水格局优化+适度治污(S3方案),即原补水分配流量至西部入淀河道,适度治理入淀河流至V类水质。

各情景方案比选指标计算结果见表2,方案贴适度计算结果见表3。

计算结果表明,方案S1、S2和S3与理想解的贴适度分别为0.35、0.55、0.84,方案S3的综合效果优于S2和S1,补水格局优化的同时进行治污比单独补水或单纯治污的效果更加明显,因此推荐实施S3方案。

不同方案的实施具有不同的水动力、水质与水生境改善效果。水动力改善效果方面,S1、S3方案效果相同。两方案下,湖泊流线分布密度为 0.14 km^{-2} ,水体畅通程度得到提升,流路状况优于S2方案;两方案水体流速的模拟结果均为 $0.017\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,略优于S2方案的 $0.016\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,有利于水体复氧,平均流速时间、空间标准差小于S2方案;这主要是由于补水分流至西侧上游入淀通道,淀区西南、西北部流速增大,流场条件更加均匀;两方案的水力停留时间为553 d,优于S2方案的1 383 d,水体更新加快,有利于污染物下泄;滞水区面积比例均为14.9%,相较S2方案的25.0%有明显降低。相较于S2方案,S1、S3方案对淀区水动力改善的整体效果更好。

水质改善效果方面,S2方案下的水质改善度(28.37%)最高,优于S3方案(27.70%)和S1方案(5.46%);S2方案下的水质平均达标率(97.8%)优于S3(96.3%)和S1(71.6%),这表明对入淀河流深度治污对改善淀区水质起到关键作用。S3方案下的水质达标率时空标准差优于S2和S1方案,达标较为均匀,水质整体达标效果较好。S2方案的水质改善效果优于S3和S1方案,但S2方案下的平均达标率仅稍优于S3方案,达标率时空均匀性上不如S3方案,表明补水和治污综合措施更加有效。

水生境改善效果方面,S1和S3方案下的生态水

表3 各方案贴适度计算结果

Table 3 Calculation results of closeness

方案 Scenario	S1	S2	S3
贴适度	0.35	0.55	0.84

位满足度为86.7%,略高于S2方案的83.5%,S1、S3方案下的水面面积率为77.94%,高于S2方案下的56.60%。S1和S3方案均包括补水格局优化内容,对生态水位与生境状况的改善效果更好。

本文提出的比选方法,从水动力、水质、水生境3方面选择了具有代表性的12项指标构成指标体系。相较于以往研究,指标更加系统,全面反映了组成湖泊生态环境的关键要素和各要素的关联和传递特征,且选取的指标包含时间与空间上的均衡性指标,更能体现湖泊生态环境时空整体改善要求。由于生物监测数据相对缺乏,以水生境指标间接指示了湖泊水生态状况,同时未考虑生态补水、污染治理措施实施的经济成本,这可能会影响方案筛选的结果,需要在以后的研究中逐步完善。

3 结论

(1)依据湖泊生态治理的系统性与整体性要求,考虑当前湖泊生态环境存在的问题,构建包括水动力、水质和水生境三要素指标的生态环境改善方案比选指标体系,提出了基于TOPSIS决策的方案比选方法。

(2)以白洋淀为例进行了案例研究,结果表明:S1与S3方案的水动力、水生境改善效果优于S2方案,S2方案的水质改善优于S1、S3方案,综合决策比选出S3方案最佳,即“补水格局优化+适度治污”方案具有更好的生态环境改善效果,验证了方法的科学合理性。

参考文献:

[1] 杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护

表2 各情景方案比选指标结果

Table 2 Results of screening indicators under various scenarios

目标层 Target layer	水动力 Hydrodynamic						水质 Water quality				水生境 Aquatic habitat	
准则层	流路 状况	流速状况		水体更新 状况	滞水状况	水质改善 状况	水质达标状况			生态水位 状况	生境状况	
指标层	流线分 布密度/ km^{-2}	平均 流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	平均流速 时间标准 差/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	平均流速 空间标准差/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	水力停留 时间/ d	滞水区面 积比例/ %	水质改善 度/%	水质平均 达标率/ %	水质达标率 时间标准 差/%	水质达标率 空间标准差/ %	生态水位 满足度/ %	水面面积率/ %
S1	0.14	0.017	0.009	0.007	553	14.9	5.46	71.6	4.7	6.2	86.7	77.94
S2	0.07	0.016	0.010	0.009	1 383	25.0	28.37	97.8	5.7	8.6	83.5	56.60
S3	0.14	0.017	0.009	0.007	553	14.9	27.70	96.3	2.8	4.3	86.7	77.94

- 策略[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799-810. YANG G S, MA R H, ZHANG L, et al. Lake status, major problems and protection strategy in China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 799-810.
- [2] 黄智华, 薛滨, 逢勇. 近50a中国东部和西部湖区水量空间变化趋势[J]. 湖泊科学, 2007, 19(5): 497-503. HUANG Z H, XUE B, PANG Y. Spatial variation of lake water quantity in the east and west regions of China during the past 50 years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(5): 497-503.
- [3] WU Z S, ZHANG D W, CAI Y J, et al. Water quality assessment based on the water quality index method in Lake Poyang: The largest freshwater lake in China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1799.
- [4] 刘世存, 王欢欢, 田凯, 等. 白洋淀生态环境变化及影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1060-1069. LIU S C, WANG H H, TIAN K, et al. Ecological environmental changes and influencing analysis in Baiyangdian Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 1060-1069.
- [5] 刘慧丽, 戴国飞, 张伟, 等. 鄱阳湖流域大型湖库水生生态环境变化及驱动力分析——以柘龙湖为例[J]. 湖泊科学, 2015, 27(2): 266-274. LIU H L, DAI G F, ZHANG W, et al. Analysis of the water ecological environment changes of the large lakes and driving factors in Lake Poyang basin: A case study of Lake Zhelin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(2): 266-274.
- [6] 李志一, 谢鹏程, 杜鹏飞. 昆明市老运粮河污染治理的模拟研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(5): 1657-1667. LI Z Y, XIE P C, DU P F. Simulation of pollution control in Laoyunliang River, Kunming[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(5): 1657-1667.
- [7] CAMPOLO M, ANDREUSSI P, SOLDATI A. Water quality control in the River Arno[J]. *Water Research*, 2002, 36(10): 2673-2680.
- [8] 窦明, 贾瑞鹏. 基于环境自净能力的龙凤湿地水质改善优化调控模型[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2418-2426. DOU M, JIA R P. Optimization of water quality improvement program for Longfeng wetland considering the purification of aquatic plants[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(6): 2418-2426.
- [9] 李雁鹏, 吴玮, 张如锋, 等. MIKE11模型在河道生态修复方案优选中的应用[J]. 水电能源科学, 2019, 37(11): 41-45. LI Y P, WU W, ZHANG R F, et al. Application of MIKE11 model in optimization of river ecological restoration scheme[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(11): 41-45.
- [10] 丁一, 贾海峰, 丁永伟, 等. 基于EFDC模型的水乡城镇水网水动力优化调控研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1440-1446. DING Y, JIA H F, DING Y W, et al. Hydrodynamic optimization of urban river network of water towns based on EFDC model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(4): 1440-1446.
- [11] 曾庆慧, 胡鹏, 赵翠平, 等. 多水源补给对白洋淀湿地水动力的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7153-7164. ZENG Q H, HU P, ZHAO C P, et al. Influence of multi-water resource replenishment on the hydrodynamic behavior of Baiyangdian Wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20): 7153-7164.
- [12] 张丽丽, 殷峻暹, 张双虎, 等. 丹江口水库向白洋淀补水生态调度方案研究[J]. 湿地科学, 2012, 10(1): 32-39. ZHANG L L, YIN J X, ZHANG S H, et al. Ecological operation schemes on water diversion from Danjiangkou Reservoir to Baiyang Lake[J]. *Wetland Science*, 2012, 10(1): 32-39.
- [13] 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. Inter-connected river system network scheme of urban lake group based on water environment improvement[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 115-128.
- [14] 华祖林, 顾莉, 薛欢, 等. 基于改善水质的浅水湖泊引调水模式的评价指标[J]. 湖泊科学, 2008, 20(5): 623-629. HUA Z L, GU L, XUE H, et al. Assessing indicators for water diversion based on improving water quality of shallow lakes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(5): 623-629.
- [15] 王磊, 韩龙喜, 张奕, 等. 多指标综合评价法在城市湖泊补水中的应用——以南京玄武湖为例[J]. 环境保护科学, 2018, 44(6): 56-61. WANG L, HAN L X, ZHANG Y, et al. Application of multi-index comprehensive evaluation method in water supplement of urban lakes: The case of Xuanwu Lake, Nanjing City[J]. *Environmental Protection Science*, 2018, 44(6): 56-61.
- [16] ZHANG R B, QIAN X, ZHU W T, et al. Simulation and evaluation of pollution load reduction scenarios for water environmental management: A case study of inflow river of Taihu Lake, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11(9): 9306-9324.
- [17] 孟睿, 何连生, 席北斗, 等. 白洋淀污染的主成分分析[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(增刊2): 100-103. MENG R, HE L S, XI B D, et al. Principal component analysis of Baiyangdian Lake pollutions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(Suppl 2): 100-103.
- [18] 易雨君, 林楚翹, 唐彩红. 1960s以来白洋淀水文、环境、生态演变趋势[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1333-1347, 1226. YI Y J, LIN C Q, TANG C H. Hydrology, environment and ecological evolution of Lake Baiyangdian since 1960s[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1333-1347, 1226.
- [19] 徐菲, 赵彦伟, 杨志峰, 等. 白洋淀生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2013, 33(21): 6904-6912. XU F, ZHAO Y W, YANG Z F, et al. Ecosystem health assessment in Baiyangdian Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(21): 6904-6912.
- [20] 张素珍, 田建文, 李贵宝. 白洋淀湿地面临的生态问题及生态恢复措施[J]. 水土保持通报, 2007, 27(3): 146-150. ZHANG S Z, TIAN J W, LI G B. Ecological problems and restoration measures of Baiyangdian Wetland[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(3): 146-150.
- [21] 高婷, 尹心安, 何山, 等. 白洋淀水系结构连通性评价[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(5): 63-69. GAO T, YIN X A, HE S, et al. Structural connectivity evaluation of the Baiyangdian Lake water system[J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(5): 63-69.
- [22] MORIASI D N, ARNOLD J G, LIEW M, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transaction of the Asabe*, 2007, 50(3): 885-900.

(责任编辑:叶飞)