

基于气候、土地利用方式及水环境变化的乌梁素海水质驱动因素研究

刘旭华^{1,2}, 刘华民^{2,3,4}, 马林芊², 张睿², 王立新^{2,3,4}

(1. 内蒙古财经大学统计与数学学院; 2. 内蒙古大学生态与环境学院; 3. 草原生态安全协同创新中心;
4. 蒙古高原生态与资源利用教育部重点实验室)

摘要:基于 2000—2022 年乌梁素海流域气候、土地利用方式以及水质监测数据,采用广义加性模型、计量经济模型、混合演化算法,定量探究了各因素对湖泊水质指标变化的驱动机制,并通过灰色关联分析研究了不同因素的贡献率。结果表明:流域土地利用方式变化是乌梁素海水质变化的主要驱动因素,耕地、草地和不透水地面积增加会显著恶化水质,而林地、水体和裸地面积增加则会改善水质;水环境变化对湖泊水质的影响次之,水体电导率、透明度、水深、pH 值、溶解氧和 COD 等因素对 TN 和 TP 的影响呈现非线性关系;气候因素对水质的影响相对较小,年平均气温升高会增加 COD 含量,年降水量升高会降低 TP 质量浓度;乌梁素海水质变化受多种因素综合影响,其中人类活动(土地利用方式变化)较气候因素对湖泊水质的影响更为显著。

关键词:气候;土地利用方式;水环境变化;乌梁素海

Study on driving factors of water quality in Ulansuhai Lake based on climate, land use patterns, and water environment changes//Liu Xuhua^{1,2}, Liu Huamin^{2,3,4}, Ma Linqian², Zhang Rui², Wang Lixin^{2,3,4}(1. School of Statistics and Mathematics, Inner Mongolia University of Finance and Economics; 2. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University; 3. Collaborative Innovation Center for Grassland Ecological Security (Jointly Supported by the Ministry of Education of China and Inner Mongolia Autonomous Region); 4. Key Laboratory of Ecology and Resource Use of the Mongolian Plateau, Ministry of Education)

Abstract: This study quantitatively explored the driving mechanisms of various factors on the changes in lake water quality indicators based on the meteorological, land use, and water quality monitoring data of the Ulansuhai Lake Basin from 2000 to 2022, by adopting the generalized additive model, econometric model, and hybrid evolutionary algorithm. Meanwhile, the contribution rates of different factors were measured via grey relational analysis. The results showed that: changes in land use patterns of the basin were the primary driving factor for the variations in water quality of Ulansuhai Lake; the expansion of cultivated land, grassland, and impervious surfaces significantly deteriorated the water quality, whereas the increase in forestland, water bodies, and bare land areas contributed to water quality improvement. Changes in the aquatic environment exerted the second most significant impact on lake water quality; factors including water electrical conductivity, transparency, water depth, pH value, dissolved oxygen (DO), and chemical oxygen demand (COD) exhibited non-linear relationships with total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) concentrations. Climatic factors had a relatively minor influence on water quality; the rise in annual average temperature increased the COD content, while the growth in annual precipitation reduced the TP mass concentration. Water quality changes of Ulansuhai Lake were affected by the combined effects of multiple factors, among which human activities (changes in land use patterns) exerted a more pronounced impact than climatic factors.

Key words: climate; land use patterns; water environment change; Ulansuhai Lake

湖泊等内陆水域为人类提供饮用水、灌溉水源与食物等资源,同时维系着生物多样性,为生物圈稳定与环境健康提供了重要支撑^[1],因此,有效监测与分析湖泊流域长期水质变化的影响因素,是环境

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金项目(2025QN04030);国家自然科学基金项目(32160279);内蒙古教育厅一流学科科研专项项目(YLXKZX-NCD-013);中央引导地方科技发展资金项目(2024ZY0128);CSPON 项目(2023ZRBShZ064)

作者简介:刘旭华(1995—),女,讲师,博士,主要从事生态环境可持续发展研究。E-mail: Xh_liu1995@163.com

通信作者:王立新(1975—),男,教授,博士,主要从事环境生态学研究。Email: Lxwang@imu.edu.cn

管理的核心环节^[2]。近年来,全球湖泊水质受气候变化与人类活动的双重影响,湖泊面积减少、富营养化加剧、水质恶化等现象频发^[3-5]。此外,水在湖泊与水库中的滞留时间长于溪流等其他水系,由于物理、化学和生物参数之间的相互作用,较长的滞留时间亦影响了水质的变化^[6]。因此,厘清湖泊水质变化的驱动机制,量化分析多因素对湖泊水环境的影响,对湖泊流域生态系统修复、水环境治理与规划具有重要意义^[7]。

近年来,湖泊水质变化驱动机制的研究方法主要包括机器学习^[8]、冗余分析^[9]、广义加性模型^[10]、LMDI 模型^[11]等。Chomicki 等^[12]采用主成分分析(PCAs)法研究了 2007—2013 年安大略湖区域在人为与自然因素共同作用下的水质驱动因素,结果表明,环境驱动因素对水质的影响存在季节差异,且不同季节水环境会受到降水、光照、周期性再循环和生物活性等因素的影响。Pennino 等^[13]通过随机森林模型,确定美国中西部、北部和东北部 17 个州湖泊的磷浓度主要受流域农业与森林用地覆盖、肥料投入及湖泊深度 3 项重要因子的影响;将该 3 项因子作为预测变量代入 R 语言平台构建的交互式用户界面,以模拟流域土地利用、气候和其他变量对地表水营养物质浓度的驱动关系。任春坪等^[14]通过分析 2003—2020 年四川邛海湖泊富营养化因子与理化指标的相关性,发现磷是邛海水体藻类生长的限制因子,并以此提出高原淡水湖泊水生态系统修复的对策建议。毛德华等^[15]基于 1990—2016 年湘江流域水质数据,从不同空间尺度,分析水位与土地利用方式变化对水质的影响,通过相关性分析,确定不同缓冲区水质变化的主要驱动因素。

当前,国内外关于水环境变化驱动机制的研究多集中于单因素或双因素,基于长时间序列多因素分析湖泊水质影响因素的研究相对匮乏;而将多因素单独分析与贡献度评估相结合的方法,能够更加客观、全面地解释水环境变化的驱动机制。

乌梁素海是我国北方干旱-半干旱地区典型的浅水草型湖泊,也是全球罕见的兼具多种生态系统功能的大型湖泊,是我国“两屏三带”生态安全战略格局中“北方防沙带”的重要组成部分^[16]。乌梁素海流域常年的农田退水与工业污水经乌梁素海入湖口红圪卜扬水站汇入湖泊,经过湖泊的稀释净化作用,再由乌毛计排入黄河^[17]。乌梁素海的水质状况及生态系统功能直接影响黄河中下游水质及我国北方粮食生产安全,其生态保护与治理成效更是关乎区域生态平衡与国家生态安全的关键环节。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

乌梁素海位于内蒙古自治区西北部巴彦淖尔市乌拉特前旗境内(40°46′N~41°07′N,108°40′E~109°00′E),湖泊面积 305 km²,呈南北狭长、东西较窄的形态。该湖由黄河改道形成,是黄河流域内蒙古段最大的淡水湖,也是同纬度地区面积最大的湿地。其补给水源以流域农田退水为主,生活污水与工业污水次之,湖区具有降水量少、蒸发量大的水文特征^[18-19]。作为全球干旱-半干旱地区典型的大型浅水草型湖泊,乌梁素海对维持区域生物多样性及生态系统多功能性具有重要意义。

乌梁素海流域主要位于巴彦淖尔市境内,面积约 3.6 万 km²,流域内四季分明,地势平坦,其腹地的河套灌区是我国 3 个特大型灌区之一,也是我国重要的粮油生产基地,灌溉面积超 66.67 万 hm²^[20]。

乌梁素海水质采样点分别位于入湖口、湖心与出湖口 3 处。各采样点的空间分布与湖泊水流形态、水深、水生植被覆盖度、湖泊水流进出口空间位置具有较好的对应关系,可全面反映湖泊水质的长时序变化规律。

1.2 数据来源

采用 2010—2022 年乌梁素海水质数据,来源于内蒙古自治区环境监测总站。数据涵盖入湖口、湖心、出湖口 3 个采样点的逐月监测指标,包括水深、水温、DO、TN、TP、叶绿素 a(Chl-a)等 14 项水质和水环境指标的逐月监测数据。3 个采样点用于建模的水质和水环境指标基本特征见表 1。

乌梁素海 2000—2022 年气温、降水等气候数据来源于距湖区 21.4 km 的乌梁素海国家气候站(40°73′N,108°65′E)。气温数据包括年平均气温、年最高气温与年最低气温,即全年日平均气温、日最高气温及日最低气温的算术平均值;降水数据涵盖年降水量、月降水量与最大月降水量,分别为 1 a 和 1 月的日降水量之和,以及 1 a 各月降水量的最大值。

乌梁素海流域 2000—2020 年每 5 年间隔的土地利用数据,来源于 30 m 分辨率的中国土地覆盖数据集(China land cover dataset, CLCD)^[21]。土地利用类型主要包括耕地、林地、草地、水体、裸地与不透水地面 6 类。

2 研究方法

2.1 混合演化算法

混合演化算法(hybrid evolutionary algorithm,

表 1 乌梁素海 2010—2022 年不同采样点水环境和水质特征

Table 1 Water environment and water quality characteristics of different sampling sites from 2010 to 2022 in Ulansuhai Lake

采样点	水温/℃	水深/m	pH 值	电导率/(mS/m)	透明度/ cm	$\rho_{\text{DO}}/(\text{mg/L})$	$\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}/(\text{mg/L})$
入湖口	14. 31±1. 02	1. 86±0. 04	8. 13±0. 05	325. 04±20. 13	46. 21±2. 67	8. 13±0. 29	7. 72±0. 50
湖心	13. 89±1. 01	2. 39±0. 08	8. 23±0. 03	397. 79±17. 59	30. 00±2. 79	7. 18±0. 27	7. 75±0. 31
出湖口	14. 04±0. 99	2. 35±0. 06	8. 23±0. 04	457. 80±17. 59	38. 65±3. 27	6. 91±0. 25	7. 82±0. 29
采样点	$\rho_{\text{BOD}}/(\text{mg/L})$	$\rho_{\text{COD}}/(\text{mg/L})$	$\rho_{\text{TN}}/(\text{mg/L})$	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/(\text{mg/L})$	$\rho_{\text{TP}}/(\text{mg/L})$	$\rho(\text{F}^-)/(\text{mg/L})$	$\rho_{\text{Chl-a}}/(\text{mg/m}^3)$
入湖口	6. 07±0. 73	36. 84±2. 43	4. 50±0. 93	2. 02±0. 80	0. 22±0. 04	0. 73±0. 05	16. 35±1. 92
湖心	5. 30±0. 42	35. 20±1. 90	1. 67±0. 12	0. 30±0. 03	0. 05±0. 01	0. 75±0. 03	6. 71±1. 25
出湖口	5. 89±0. 94	40. 87±2. 44	1. 91±0. 11	0. 32±0. 04	0. 06±0	0. 76±0. 03	7. 27±1. 37

HEA)通过系统遗传规划对复杂且非线性的时间序列规则集进行演化与预测,并对模型中的参数进行优化,是目前国际上较为先进的多目标优化算法,能够实现多角度、多维度非线性数据的分析与预测。HEA 最终构建的模型采用“IF-THEN-ELSE”规则集形式,且允许嵌入由算术运算符组合而成的复杂函数。

基于 HEA 构建模型,引入爬坡法 (hill climbing, HC)迭代并优化参数,最终选取拟合度最优的模型,构建水质指标的“IF-THEN-ELSE”规则集。大量研究证实,基于 HEA 构建的长时间序列“IF-THEN-ELSE”规则集,可为全球湖泊水质变化驱动机制的定量研究提供较为合理的解释与预测。此外,HEA 可对各输出模型的输入变量进行敏感性分析,输入变量的敏感性分析曲线以百分比形式呈现其输出轨迹。

模型运行过程中,计算机随机选取乌梁素海 TN、TP 数据集的 75% 作为训练集,剩余 25%作为测试集;模型共运行 100 次,每次运行迭代 80 次,最终构建水温、水深等指标对 TN、TP 的驱动机制模型。模型优劣由决定系数 R^2 与均方根误差 RMSE 协同评价。HEA 采用 C++ 软件构建,并通过 Microsoft Excel 2019 与 R4.0.2 完成绘图分析。

2.2 计量经济模型

借助计量经济模型^[22],探究长时间序列下乌梁素海流域 6 类土地利用类型对其营养盐(TN 和 TP)的驱动机制,通过 SPSS 21 软件对计量经济模型进行逐步回归。

2.3 广义加性模型

广义加性模型 (generalized additive model, GAM)是线性回归模型的进一步扩展,已成为解析环境因素驱动机制的有效工具^[23]。本文采用 GAM 模拟乌梁素海流域气候因子(气温、降水)变化对湖泊营养盐(TN、TP)的影响与驱动机制。GAM 使用 R 4.0.2 的 macv 程序包进行分析及作图。

2.4 灰色关联分析

首先对数据进行标准化预处理,继而通过灰色关联分析,综合研判气候因素、土地利用方式及湖泊水环境指标与乌梁素海水质指标的关系,并判断乌梁素海水质变化各驱动机制的贡献率。灰色关联分析的基本原理见文献[24]。

本文通过 Microsoft Excle 2019 计算各类驱动因素对湖泊水质指标变化的贡献率。

3 结果与分析

3.1 气候因子对乌梁素海水质的影响

采用 GAM 探究气候因子对乌梁素海水质指标的驱动机制,以应对未来气候变化不确定性对湖泊水质的影响,分析结果见表 2。可见,DO、COD、TN 和 TP 与各气候因子之间均呈非线性关系,且与降水相关因素的显著性普遍高于气温相关因素,其中,在降水相关因素中,乌梁素海年降水量与 DO、TN、TP 均呈显著或极显著响应关系;最大月降水量与 DO、COD、TP 均呈极显著关系。

对具有极显著性($p<0.05$)的因素进行可视化分析,结果见图 1(图中 s 为平滑函数的拟合值)。可见,DO 随着年降水量和最大月降水量的增加呈非线性上升趋势;COD 随着年平均气温的升高呈先降低后升高的变化趋势,于 9.6℃左右降至最小值,而其对年最高气温升高的响应则表现为波动变化趋势,在 32.5℃左右达到最大值;TP 与年降水量、最大月降水量均表现出极强的相关性,且随着年降水量的增加呈逐渐下降趋势,在最大月降水量约为 90 mm 时降至最小值,此后又逐步回升。

3.2 流域土地利用方式对乌梁素海水质的影响

基于 2000—2020 年乌梁素海流域 6 类土地利用类型数据与湖泊水质监测数据,构建计量经济模型,分析土地利用方式的变化对湖泊水质的驱动效应。研究结果显示(表 3),TN、TP 的回归分析模型均呈现极显著相关性($p<0.01$)。

表 2 乌梁素海流域气候与水质因子的 GAM 分析结果

Table 2 GAM analysis results of relationship between climatic and water quality factors in the Ulansuhai Lake Basin									
水质因子	气候因子	自由度	解释率/%	校正 R^2	水质因子	气候因子	自由度	解释率/%	校正 R^2
DO	年平均气温	1.000	8.55	0.08	TN	年平均气温	1.000	10.60	0.05
	年最高气温	1.000	7.75	0.05		年最高气温	1.000	0.12	0.05
	年最低温度	1.000	2.92	-0.02		年最低温度	1.000	0.91	-0.04
	年降水量	1.714	37.60	0.39**		年降水量	5.055	29.80	0.34*
	最大月降水量	1.411	29.80	0.32**		最大月降水量	1.000	7.01	0.02
COD	年平均气温	4.991	37.10	0.11**	TP	年平均气温	1.000	12.00	0.04
	年最高气温	4.998	34.00	0.15***		年最高气温	1.523	28.10	0.10*
	年最低温度	2.902	22.70	0.09		年最低温度	1.858	5.83	-0.05
	年降水量	4.639	30.60	0.09		年降水量	3.744	91.70	0.96***
	最大月降水量	3.767	9.43	-0.12**		最大月降水量	1.996	65.30	0.68***

注：*、**、*** 分别表示在 0.1、0.05、0.01 水平上差异极显著。

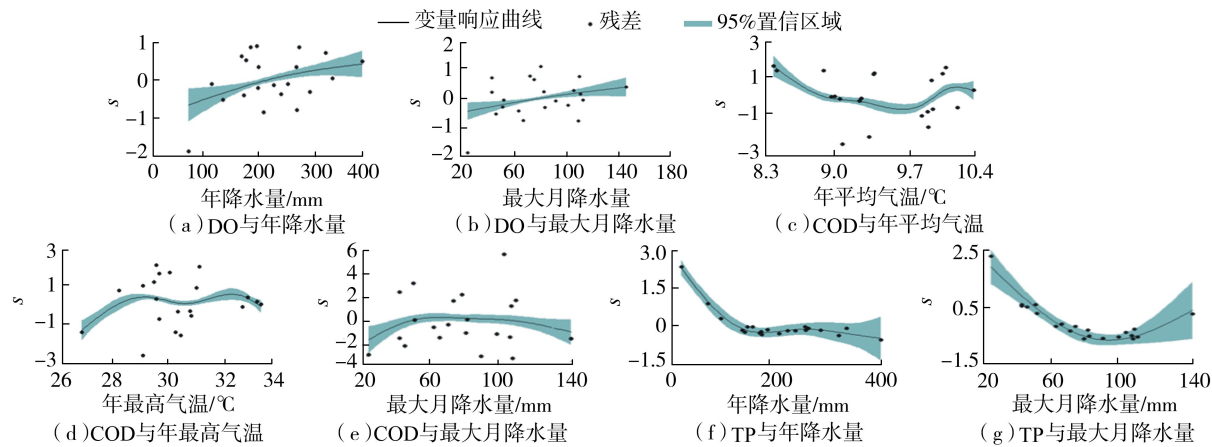


图 1 乌梁素海流域气候变化与湖泊水质的单变量 GAM 分析

Fig.1 Univariate GAM analysis of climate change and lake water quality in the Ulansuhai Lake Basin

表 3 乌梁素海流域 2000—2020 年土地利用类型与湖泊水质计量经济模型

Table 3 Econometric model of land use types and lake water quality in the Ulansuhai Lake Basin from 2000 to 2020				
回归模型		R^2	p	n
$\ln \rho_{\text{TN}} = 15.825 + 0.172 a_1 - 0.503 a_2 + 0.265 a_3 - 1.047 a_4 - 32.744 a_5 + 2.402 a_6$		0.70	<0.01	21
$\ln \rho_{\text{TP}} = -16.217 + 0.224 a_1 - 0.117 a_2 + 0.227 a_3 - 1.748 a_4 - 23.879 a_5 + 1.801 a_6$		0.66	<0.01	21

注： $a_1 \sim a_6$ 分别为耕地、林地、草地、水体、裸地和不透水地面的面积占比； n 为模型样本量。

耕地是乌梁素海流域的主要土地利用类型之一,约占流域总面积的 30%。回归分析表明,耕地面积的扩张对湖泊 TN、TP 含量存在显著负面影响;同理,草地与不透水地面面积的增加亦会加剧湖泊水质恶化。其中,草地面积扩大促进了畜牧业的发展,而牲畜粪便中大量未分解的污染物则随着地表径流汇入湖泊,导致湖泊富营养化水平升高;城市化进程的加快造成不透水地面面积的增加,削弱了降雨过程中土地对污染物的截留能力,从而加速了湖泊水质的恶化进程。

林地、水体及裸地这 3 类土地利用类型面积占比与湖泊水质指标呈显著负相关关系,其面积的增加可有效抑制湖泊水质恶化。其中,林地具备涵养水源、防风固沙等生态功能,对流经的污染物具有一定的吸收和截流作用,降低了污染物直接入湖的风险;水体面积的扩大可增强对污染物的稀释与净化

作用;裸地因无农作物种植,且受人类活动影响较少,污染物产出量相对较低。

3.3 水质和水环境指标变化对乌梁素海水质的影响

通过 HEA 探究乌梁素海水质和水环境指标变化对湖泊 TN 和 TP 质量浓度变化的驱动关系,分别以透明度(T_r)、pH 值、电导率(σ)、COD、水深(d)和水温(T)等作为输入变量,以 ρ_{TN} 和 ρ_{TP} 作为输出变量,经过参数的选取和优化,最终确定 TN 和 TP 质量浓度预测的规则集:

$$\rho_{\text{TN}} = \begin{cases} 0.38 + \frac{\ln(12.59 + \rho_{\text{COD}}) + \ln(\rho_{\text{DO}}/T_r)}{3} & \sigma \geq 349.71 \text{ mS/m} \\ 0.38 + \frac{32.16}{T_r} - \frac{2932.3d}{\rho_{\text{COD}}} & \sigma < 349.71 \text{ mS/m} \end{cases} \quad (1)$$

$$\rho_{TP} = \begin{cases} 0.005 + \frac{pH}{456.18d} & pH < 8.92 \\ 0.005 + \frac{0.337\ln T}{T_r - pH + \rho_{COD} - 10.93} & pH \geq 8.92 \end{cases} \quad (2)$$

TN 规则集中,以电导率为生态阈值,当 $\sigma \geq 349.71$ mS/m 时,COD 和 DO 质量浓度的增加对 TN 具有“兴奋”作用,透明度的增加对 TN 具有“抑制”作用;否则,水深和透明度的增加对 TN 具有“抑制”作用,COD 质量浓度的增加对 TN 具有“兴奋”作用。

TP 规则集中,以 pH 值为生态阈值,当 $pH < 8.92$ 时,pH 值与 TP 质量浓度呈非线性关系且其增加对 TP 具有“兴奋”作用,而水深的增加会抑制 TP 质量浓度的增加。否则,透明度和 COD 质量浓度的增加会抑制 TP 质量浓度的增加,而水温 and pH 值增长会促进 TP 质量浓度的增加。

TN 和 TP 质量浓度的 HEA 变量拟合和残差图如图 2 所示,模型相关系数分别为 0.84 和 0.81。TN 质量浓度在 0.29~20.60 mg/L 波动变化;2015 年后,TN 质量浓度基本维持在 1.5 mg/L 左右。图 2(c)(d)表明,拟合值较为稳定,但 TN 和 TP 的 HEA 残差较大,应进一步优化模型参数,体现实测数据的波动性。HEA 表明,TP 质量浓度在 0.02~0.80 mg/L 波动变化,2016 年之后,TP 质量浓度逐渐降低后趋于稳定,且残差较小。

3.4 多因素变量对乌梁素海水质变化的贡献率

以乌梁素海流域气候因子(年平均气温、年降水量)、土地利用方式(耕地面积比例、不透水地面面积比例)和湖泊其他水质指标(水温、电导率和 pH 值)的变化作为驱动因子,通过灰色关联度模型,综合分析各因子对乌梁素海水质变化的贡献率,结果见表 4。

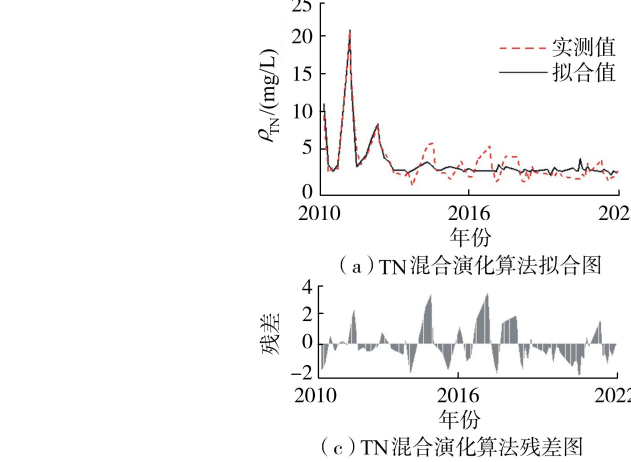


图 2 TN 和 TP 混合演化算法拟合和残差图

表 4 乌梁素海水质特征变化驱动力因子关联系数					
Table 4 Correlation coefficients of driving force factors for changes in water quality characteristics of Ulansuhai Lake					
驱动因子	指标	$\Delta\rho_{DO}$	$\Delta\rho_{COD}$	$\Delta\rho_{TN}$	$\Delta\rho_{TP}$
气候因子	年平均气温	0.66	0.65	0.45	0.65
	年降水量	0.59	0.61	0.47	0.62
土地利用因子	耕地面积比例	0.72	0.70	0.50	0.71
	不透水地面面积比例	0.70	0.67	0.52	0.67
其他水质因子	水温	0.72	0.71	0.50	0.70
	电导率	0.62	0.74	0.49	0.67
	pH 值	0.72	0.71	0.50	0.72

注: $\Delta\rho$ 为水质指标质量浓度的变化。

可见,3 类驱动因子对 TN 质量浓度的关联系数均低于 DO、COD 和 TP。土地利用因子与 DO、COD、TN 和 TP 质量浓度的关联系数均高于气候因子和其他水质因子。气候因子中,年平均气温的关联系数与其他水质因子中水温的关联系数变化规律一致。其他水质因子方面,水温和 pH 值对 DO、TN 和 TP 质量浓度的关联系数均高于 COD,而电导率的关联系数变化趋势则与之相反。可见,人类活动(土地利用方式变化)对乌梁素海水质的影响程度显著高于气候因子。

4 讨论

4.1 湖泊水质与水环境指标对湖泊水质变化驱动因子分析

湖泊水质与水环境指标中,DO、COD、透明度和水深的变化会驱动 TN 质量浓度的变化,水深、pH 值、水温、透明度和 COD 质量浓度的变化会驱动 TP 质量浓度的变化。为定量讨论其驱动机制,对本文构建的 HEA 进行敏感性分析(图 3)。

当湖泊水深由 0.91 m 逐渐增加到 3.12 m 时,TN 质量浓度迅速下降(图 3(b)),水深由 1.53 m 逐

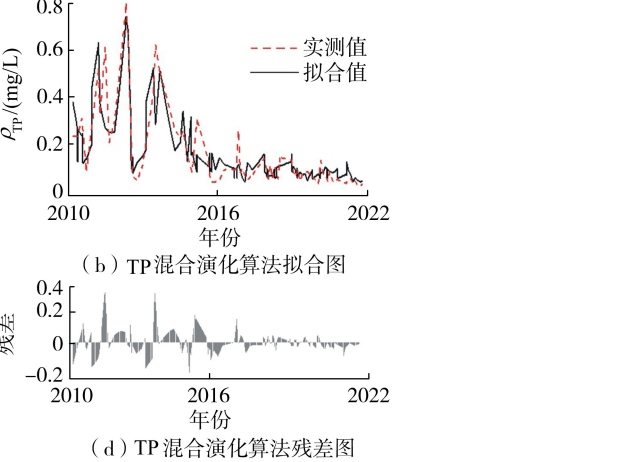


图 2 TN 和 TP 混合演化算法拟合和残差图

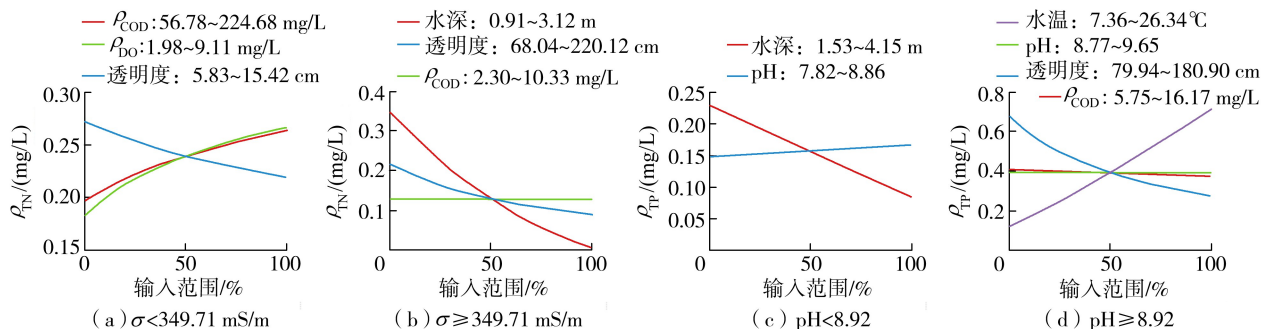


图3 混合演化算法 TN、TP 敏感性

Fig.3 Sensitivity of hybrid evolutionary algorithm to TN and TP

渐增加到 4.15 m 时,TP 质量浓度也有相似的变化趋势(图 3(c));水体透明度由 5.83 cm 增加到 15.42 cm 时,TN 质量浓度逐渐降低至 0.21 mg/L 左右(图 3(a)),透明度由 79.94 cm 提升至 180.90 cm 时,TP 质量浓度由 0.7 mg/L 逐渐降低至 0.3 mg/L (图 3(d))。可见,随着水深和水体透明度的增加,TN 和 TP 质量浓度均呈显著的非线性下降趋势。究其原因,乌梁素海流域腹地的河套灌区分布有大面积耕地,农业面源污染问题突出。未被作物吸收的氮、磷等肥料经雨水冲刷后,随径流汇入乌梁素海的湖滨缓冲区及浅水区,致使水深较浅区域的氮磷污染程度更为严重。而水深与水体透明度的提升,可有效稀释湖泊营养物质,降低养分浓度,进而改善湖泊水质。该结论与 Recknagel 等^[25]基于 HEA 对格爾塞湖富营养化驱动因子的研究结果一致,也与梁丽娥等^[26]对呼伦湖富营养化与水环境指标的相关性分析结果一致。

DO 与 COD 对 TN 质量浓度变化均呈正相关关系(图 3(a)),但二者的增长幅度存在细微差异,这可能与模型生态阈值相关。该结果与 Wang 等^[27]通过主成分分析,对我国太湖水质驱动机制分析结果一致,与苏程佳等^[28]对潭江下游 TN 与 DO 的相关性检验结果相吻合。

水温对乌梁素海 TP 质量浓度的影响较为显著(图 3(d)),当水温由 7.36℃ 逐渐增加到 26.34℃ 时,TP 质量浓度由 0.1 mg/L 增加至 0.7 mg/L,这是由于水温升高会促进沉积物中磷的释放。该结论与吴东少等^[29]对滇池环境指标驱动 TP 质量浓度变化机制的研究结果一致,李志伟等^[30]在分析淮河干流水温与上覆水 TP 相关性时,也得出了相似的结论。乌梁素海流域年平均水温约为 14℃,光照充足、热量充沛,这一环境条件会促进湖泊藻类大量繁殖,加速 TP 的累积,进而提高了水体富营养化的风险,该结论与时瑶等^[31]对四川邛海水温与湖泊磷浓度响应关系的研究结果一致。

4.2 土地利用方式对湖泊水质变化驱动因子分析

乌梁素海水质变化的驱动因素主要为流域土地利用方式的变化。多项研究表明,流域耕地主要集中在南部的河套灌区,耕地面积增加会导致含氮、磷等元素的化肥施用量增多,化肥农药残留量较高,面源污染问题突出;随着降水量的增加,土壤表面的面源污染物会随着径流汇入乌梁素海,导致湖泊水质恶化。该结论果与 Michael 等^[32-34]研究结论一致。

乌梁素海流域不透水地面面积相关污染是仅次于农业面源污染的第二大污染源。随着城市化进程的推进,产生了大量的工业与生活污水,经吸附能力较弱的不透水地面汇入湖泊,造成水质下降,该结果与代孟均等^[35]通过冗余分析对海河流域水质因子驱动机制的研究结论一致。刘瑞艳等^[36]对南水北调期间洪泽湖水质驱动因子的分析表明,污染物主要来源于建设用地排放的面源污染,与本文结果相似。

草地面积的增加对湖泊水质指标呈正向驱动作用,该结论与李威等^[37]的研究结果相反。究其原因,乌梁素海流域草地面积多年维持在流域总面积的 50%左右,广阔草场推动了流域畜牧业的发展,牲畜粪便排放量随之增加,未分解的污染物流入湖泊,导致湖泊水质下降。

裸地是乌梁素海流域内面积占比仅次于草地的土地利用类型,潘梅娥等^[38]研究指出,植被覆盖度降低会加剧水土流失,进而恶化湖泊水质,这与本文结论不一致,其更凸显相较于自然因素,人类活动是导致乌梁素海水质恶化的重要驱动因素。

综上,乌梁素海流域应协调农业与畜牧业发展,平衡经济发展与水生态保护的关系,在合理范围内控制耕地与城镇化面积的增长,这对保护流域河湖水质具有重要意义。

4.3 其他因素对湖泊水质变化驱动因子分析

尽管人类活动对乌梁素海水质的影响更为显著,但水化学因素、流域上游来水质量和生态补水量

对湖泊水质的影响亦不可忽视^[39-40]。刘莹慧等^[18]研究表明,乌梁素海丰水期和枯水期的 TN、TP 质量浓度存在显著差异,表明湖泊水质在很大程度上受到上游补水量的影响。2012 年以来,乌梁素海生态补水量呈稳定上升的趋势,基本稳定在 6.60 亿~9.50 亿 m³。主要排水干渠退水量与引黄补水量的增加,使湖泊水域面积扩张,水位加深,水体流速加快,湖泊富营养化程度波动向好^[41]。

同时,乌梁素海承纳河套灌区大量农田退水。近些年,河套灌区推行减少农业灌水量、施肥量及优化耕作方式等举措,有效削减了农业面源污染,一定程度上降低了 TN、TP 向乌梁素海的入湖负荷^[42]。此外,在较长的时间序列下,湖盆地型、水位、流速等水文因素对湖泊水质的影响逐渐增加^[43-44]。因此,在未来的研究和实践中需在强化污染源管控的基础上,结合实际发展需求,对水化学反应、人类活动、水文特征等进行更合理的规划。

5 结 论

- a. 乌梁素海流域水质变化驱动因素主要是由土地利用方式变化所导致,流域耕地、不透水地面和草地面积的增加将会恶化水质。
- b. 湖泊水质及水环境指标变化对湖泊 TN、TP 的影响主要体现在水温、水深、透明度、pH 值、溶解氧和 COD 质量浓度的变化。
- c. 气候因子变化对乌梁素海水质变化的影响相对较小。

参考文献:

[1] Guo Hongwei, Zhu Xiaotong, Huang J J, et al. An enhanced deep learning approach to assessing inland lake water quality and its response to climate and anthropogenic factors[J]. Journal of Hydrology, 2023, 620: 129466.

[2] Stanley E H, Collins S M, Lottig N R, et al. Biases in lake water quality sampling and implications for macroscale research[J]. Limnol Oceanogr, 2019, 64: 1572-1585.

[3] Zessner M, Schönhart M, Parajka J, et al. Novel integrated modelling framework to assess the impacts of climate and socio-economic drivers on land use and water quality[J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 1137-1151.

[4] Sun Qiming, Gao Maosheng, Wen Zhang, et al. Reactive transport modeling for the effect of pumping activities on the groundwater environment in muddy coasts[J]. Journal of Hydrology, 2023, 612: 129614.

[5] Han Zhiquan, Liu Tong, Wang Tao, et al. Quantification of water resource utilization efficiency as the main driver of plant diversity in the water-limited ecosystems [J]. Ecological Modelling, 2020, 429: 108974.

[6] Loucif K, Nefar S, Menasria T, et al. Physico-chemical and bacteriological quality assessment of surface water at Lake Tonga in Algeria [J]. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 2020, 13: 100284.

[7] Liu Hongyan, Yin Yi, Piao Shilong, et al. Disappearing lakes in semiarid northern China: drivers and environmental impact [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(21): 12107-12114.

[8] 徐荣, 邓雅静, 李一平, 等. 秦淮河流域典型排涝泵站前池水质与降雨特征响应关系[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 11-20. (Xu Rong, Deng Yajing, Li Yiping, et al. Response relationship between water quality and rainfall characteristics in front pond of typical urban drainage pumping stations of Qinhuai River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(1): 11-20. (in Chinese))

[9] Loucif K, Chenchouni H. Water physicochemical quality as driver of spatial and temporal patterns of microbial community composition in lake ecosystems [J]. Applied Water Science, 2024, 14(6): 115.

[10] 黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 等. 过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素: 以骆马湖为例 [J]. 环境科学, 2023, 44(1): 219-230. (Huang Xueying, Gao Mingyuan, Wang Jindong, et al. Long-term succession patterns and driving factors of water quality in a flood-pulse system lake: a case study of Lake Luoma, Jiangsu Province [J]. Environmental Science, 2023, 44(1): 219-230. (in Chinese))

[11] Gao Wei, Howarth R W, Swaney D P. et al. Enhanced N input to lake Dianchi Basin from 1980 to 2010: drivers and consequences [J]. Science of the Total Environment, 2015, 505: 376-384.

[12] Chomicke K M, Taylor W D, Brown C J M, et al. Seasonal variation in the influence of environmental drivers on nearshore water quality along an urban northern Lake Ontario shoreline [J]. Journal of Great Lakes Research, 2022, 48: 914-926.

[13] Pennino M J, Fry M M, Sabo R D. Nutrient explorer: an analytical framework to visualize and investigate drivers of surface water quality [J]. Environmental Modelling & Software, 2023, 170: 1. 1-1. 9.

[14] 任春坪, 郑丙辉. 高原湖泊水质变化趋势及驱动因素研究: 以四川邛海为例 [J]. 湖泊科学, 2024, 36(3): 756-769. (Ren Chunping, Zheng Binghui. Trend recognition and driving factors of water quality change in plateau lakes: a case study of Lake Qionghai, Sichuan Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(3): 756-769. (in Chinese))

[15] 毛德华, 周滢, 周懿琳. 1990—2016 年湘江流域水质时空变化及驱动因素分析 [J]. 环境科学, 2024, 45(7): 3953-3964. (Mao Dehua, Zhou Ying, Zhou Yilin. Analysis of spatiotemporal variation and driving factors of water

- quality in the Xiangjiang River Basin from 1990 to 2016 [J]. Environmental Science, 2024, 45 (7) : 3953-3964. (in Chinese))
- [16] 张博. 环境史视域下乌梁素海对近代河套地区社会发展的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(4) : 50-57. (ZHANG Bo. Impact of lake Wuliangsuhai on the development of Hetao Area from the perspective of environmental history[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(4) : 50-57. (in Chinese))
- [17] Wang Ying, Yang Wenzhu, Jiao Yan, et al. Quantitative analysis of dissolved carbon sources in the farmland artificial ditch drainage: Lake UlanSuhai continuum in the Hetao Irrigation District's, Inner Mongolia[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 55: 101910.
- [18] 刘莹慧, 卢俊平, 赵胜男, 等. 基于长时间序列乌梁素海水环境变化趋势及生态补水等关键驱动因子分析 (2011—2020 年) [J]. 湖泊科学, 2023, 35 (6) : 1939-1948. (Liu Yinghui, Lu Junping, Zhao Shengnan, et al. Water environment change trend and ecological water replenishment of Lake Wuliangsuhai and other key driving factors analysis based on long time series from 2011 to 2020) [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35 (6) : 1939-1948. (in Chinese))
- [19] 崔志谋, 史小红, 赵胜男, 等. 基于 PCA-APCS-MLR 模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析 [J]. 环境科学, 2024, 45 (3) : 1415-1427. (Cui Zhimou, Shi Xiaohong, Zhao Shengnan, et al. Spatiotemporal distribution and source analysis of heavy metals in surface sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR model[J]. Environmental Science, 2024, 45 (3) : 1415-1427. (in Chinese))
- [20] 刘旭华, 张佳慧, 刘华民, 等. 基于种植结构改进的 SWAT 模型模拟乌梁素河流域面源污染负荷[J]. 环境工程学报, 2023, 17 (8) : 2505-2514. (Liu Xuhua, Zhang Jiahui, Liu Huamin, et al. Simulation of non-point source pollution load in Ulansuhai watershed by SWAT model based on improved planting structure[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17 (8) : 2505-2514. (in Chinese))
- [21] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021, 13 (8) : 3907-3925.
- [22] 梁旭, 刘华民, 纪美辰, 等. 北方半干旱区土地利用/覆被变化对湖泊水质的影响: 以岱海流域为例 (2000—2018 年) [J]. 湖泊科学, 2021, 33 (3) : 727-738. (Liang Xu, Liu Huamin, Ji Meichen, et al. Effects of land use/cover change on lake water quality in the semi-arid region of northern China: a case study in Lake Daihai Basin from 2000 to 2018) [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33 (3) : 727-738. (in Chinese))
- [23] 衣鹏, 纪源, 钱睿智, 等. 2012—2023 年南水北调东线水源区水质演变趋势[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2025, 53 (3) : 40-49. (Yi Peng, Ji Yuan, Qian Ruizhi, et al. Evolution trend of water quality in water source area along eastern route of South-to-North Water Diversion Project from 2012 to 2023[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53 (3) : 40-49. (in Chinese))
- [24] 王平, 王云峰. 综合权重的灰色关联分析法在河流水质评价中的应用[J]. 水资源保护, 2013, 29 (5) : 52-54. (Wang Ping, Wang Yunfeng. River water quality evaluation based on grey incidence analysis of comprehensive weight [J]. Water Resources Protection, 2013, 29 (5) : 52-54. (in Chinese))
- [25] Recknagel F, Adrian R, Khler J, et al. Threshold quantification and short-term forecasting of Anabaena, Aphanizomenon and Microcystis in the polymictic eutrophic Lake MÄggelsee (Germany) by inferential modelling using the hybrid evolutionary algorithm HEA [J]. Hydrobiologia, 2016, 778: 61-74.
- [26] 梁丽娥, 李畅游, 史小红, 等. 2006—2015 年内蒙古呼伦湖富营养化趋势及分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28 (6) : 1265-1273. (Liang Lie, Li Changyou, Shi Xiaohong, et al. Analysis on the eutrophication trends and affecting factors in Lake Hulun, from 2006 to 2015 [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28 (6) : 1265-1273. (in Chinese))
- [27] Wang Junli, Fu Zishi, Qiao Hongxia, et al. Assessment of eutrophication and water quality in the estuarine area of Lake Wuli, Lake Taihu, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 650: 1392-1402.
- [28] 苏程佳, 陈晓宏, 谭永强, 等. 潭江水水质时空变化特征及其驱动因子[J]. 水资源保护, 2021, 37 (4) : 109-116. (Su Chengjia, Chen Xiaohong, Tan Yongqiang, et al. Spatial and temporal variation characteristics of water quality in Tanjiang River and its driving factors[J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (4) : 109-116. (in Chinese))
- [29] 吴东少, 曹敏, 段仲昭, 等. 2001—2018 年滇池总磷出入湖通量变化与源汇效应[J]. 湖泊科学, 2023, 35 (4) : 1306-1319. (Wu Dongshao, Cao Min, Duan Zhongzhao, et al. The variation and source-sink effect of total phosphorus flux input and output of Lake Dianchi from 2001 to 2018 [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35 (4) : 1306-1319. (in Chinese))
- [30] 李志伟, 丁凌峰, 唐洪武, 等. 淮河干流污染物分布及变化规律[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2020, 48 (1) : 29-38. (Li Zhiwei, Ding Lingfeng, Tang Hongwu, et al. Distribution and variation of pollutants in main stream of Huaihe River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (1) : 29-38. (in Chinese))
- [31] 时瑶, 张雷, 秦延文, 等. 四川邛海水体氮、磷浓度时空分布特征及其生态环境响应研究[J]. 地学前缘, 2023, 30 (2) : 495-505. (Shi Yao, Zhang Lei, Qin Yanwen, et al.

- Temporal and spatial distribution characteristics of nitrogen and phosphorous in the water of Qionghai Lake, Sichuan Province and their response to ecological environment[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(2): 495-505. (in Chinese))
- [32] Michael S, Robin H, Swearer S E, et al. Frog occupancy of polluted wetlands in urban landscapes[J]. Conservation Biology, 2018, 33(2): 389-402.
- [33] 张毅敏, 桂浩翔, 陈婷, 等. 浦阳江中下游氮分布特征及来源解析[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 206-214. (Zhang Yimin, Gui Haoxiang, Cheng Ting, et al. Distribution patterns and source analysis of nitrogen in middle and lower reaches of the Puyang River[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 206-214. (in Chinese))
- [34] 陈丽娜, 张文硕, 徐俊增, 等. 基于 SWAT 模型的南方水稻灌区全生育期面源污染特征及控制模拟[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 198-205. (Chen Lina, Zhang Wenshuo, Xu Junzeng, et al. Simulation of non-point source pollution characteristics and control effect in southern paddy irrigation district based on SWAT model during paddy growth period [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 198-205. (in Chinese))
- [35] 代孟均, 张兵, 杜倩倩, 等. 不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响: 以海河流域天津段为例[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1512-1524. (Dai Mengjun, Zhang Bing, Du Qianqian, et al. Effects of land use types on water quality at different buffer scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an example [J]. Environmental Science, 2024, 45(3): 1512-1524. (in Chinese))
- [36] 刘瑞艳, 张建华, 刘凌, 等. 南水北调东线工程调水期洪泽湖水质变化规律分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 42-49. (Liu Ruiyan, Zhang Jianhua, Liu Ling, et al. Analysis on the water quality variation of Hongze Lake during the water transfer period of the eastern route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 42-49. (in Chinese))
- [37] 李威, 吕思思, 赵祖伦, 等. 土地利用对流域水源涵养及水质净化的影响: 以乌江流域为例[J]. 生态学报, 2023, 43(20): 8375-8389. (Li Wei, Lyu Sisi, Zhao Zulun, et al. Impact of land use change on watershed water conservation and water quality purification service: a case study of Wujiang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8375-8389. (in Chinese))
- [38] 潘梅娥, 杨昆, 邹天乐, 等. 洞里萨湖流域土地利用变化与其水质的关联性[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(11): 4425-4432. (Pan Meie, Yang Kun, Zou Tianle, et al. Correlation between land use change and water quality in Tonle Sap Lake Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(11): 4425-4432. (in Chinese))
- [39] Li Bing, Yang Guishan, Wan Rongrong. Multidecadal water quality deterioration in the largest freshwater lake in China (Poyang Lake): implications on eutrophication management [J]. Environmental Pollution, 2020, 260: 114033.
- [40] 王鹏, 董国庆, 阴祖荣, 等. 面向复杂情景的 SWMM 水质参数敏感性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 31-37. (Wang Peng, Dong Guoqing, Yin Zurong, et al. Sensitivity analysis of water quality parameters in SWMM for complex scenarios[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5): 31-37. (in Chinese))
- [41] 芦津, 杨瑾晟, 罗菊花, 等. 环境因子及生态补水对乌梁素海“黄苔”年际暴发面积的影响 (1986—2021 年) [J]. 湖泊科学, 2023, 35(6): 1881-1890. (Lu Jin, Yang Jinsheng, Luo Juhua, et al. Impacts of environmental factors and ecological hydration on the interannual changes of metaphytic blooms area in Lake Ulansuhai from 1986 to 2021 [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(6): 1881-1890. (in Chinese))
- [42] 王维刚, 史海滨, 李仙岳, 等. 基于改进 SWAT 模型的灌溉-施肥-耕作对乌梁素海流域营养物负荷及作物产量的影响[J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1505-1523. (Wang Weigang, Shi Haibin, Li Xian Yue, et al. Effects of irrigation-fertilization-tillage on nutrient loading and crop yield in Ulansuhai Watershed based on improved SWAT model [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(5): 1505-1523. (in Chinese))
- [43] Zhu Guangrui, Yang Ying. Variation laws and release characteristics of phosphorus on surface sediment of Dongting Lake [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(1): 1-10. (in Chinese))
- [44] 饶贵康, 王玲玲, 徐津, 等. 调水期风场对淮河入江水道浅水湖泊水动力水质的影响研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 31-37. (Rao Guikang, Wang Lingling, Xu Jin, et al. Study on the effect of wind field on hydrodynamic water quality of shallow lakes in Huaihe River watercourse entering Yangtze River during the water diversion period [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 31-37. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-05 编辑: 胡新宇)