

黎睿, 汤显强, 胡艳平, 等. 四湖总干渠溶解氧季节性异常特征与成因分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(5):2816-2826.

Li R, Tang X Q, Hu Y P, et al. Spatial-temporal distribution characteristics of dissolved oxygen and its causes in Sihu Canal [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2816-2826.

四湖总干渠溶解氧季节性异常特征与成因分析

黎睿^{1,2}, 汤显强^{1,2*}, 胡艳平^{1,2}, 王丹阳^{1,2}, 郭栋帆¹, 翟文亮^{1,2}, 杨勇³ (1.长江科学院流域水环境研究所, 湖北 武汉 430010; 2.长江科学院流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430010; 3.湖北省荆州市四湖工程管理局排灌试验站, 湖北 荆州 434013)

摘要: 平原水网地区水体溶解氧(DO)偏低已成为一个普遍的现象.为揭示平原水网地区溶解氧异常成因,以全国最重要的淡水养殖区汉江流域四湖总干渠为例,分析了2010~2023年四湖总干渠水质时空变化规律,调查监测了四湖总干渠 DO、水体和沉积物中营养盐空间分布特征,采用随机森林模型等方法分析了水温、氨氮及流量等参数对水体溶解氧的影响.结果表明:四湖总干渠水体溶解氧(DO)存在明显的季节性波动,年内呈“V”型分布,汛期 DO 浓度相对较低,非汛期基本满足地表水Ⅲ类水要求.2021年四湖总干渠水体缺氧(DO<2mg/L)状况突出,运粮湖、新河村和新滩断面年缺氧天数分别为79、116和96d.汛期四湖总干渠在中上游河段存在明显的低氧区,DO浓度仅为2.61~3.22mg/L.自2010年以来四湖总干渠水质长期处于Ⅳ~Ⅴ类,主要超标因子为DO、高锰酸盐指数、氨氮、总磷.四湖总干渠沉积物总氮含量为857.70~2846.87mg/kg, TP含量为545.99~2475.59mg/kg,沉积物处于轻~中度污染状态,支渠污染重于干渠.随机森林模型能够较好的预测水体DO,拟合系数 R^2 达0.995,均方根误差RMSE仅为0.2085.随机森林模型分析表明水温对DO影响相对重要性均超过35%,其他影响因素依次为pH值、氨氮、电导率、浊度、流量等.为改善四湖总干渠DO汛期异常状况,需加强流域系统治理,改善虾稻和水产养殖排水水质,优化泵站调度运行方式.

关键词: 溶解氧; 缺氧; 平原水网区; 随机森林; 四湖总干渠

中图分类号: X703.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)05-2816-11

Spatial-temporal distribution characteristics of dissolved oxygen and its causes in Sihu Canal. LI Rui^{1,2}, TANG Xian-qiang^{1,2*}, HU Yan-ping^{1,2}, WANG Dan-yang^{1,2}, GUO Dong-fan¹, ZHAI Wen-liang^{1,2}, YANG Yong³ (1.Basin Water Environmental Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2.Hubei Provincial Key Laboratory of Basin Water Resources and Ecological Environment Sciences, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3.Irrigation and Drainage Experiment Station of the Four-Lake Engineering Administration Bureau, Jingzhou 434013, China). *China Environmental Science*, 2025,45(5): 2816~2826

Abstract: Hypoxia has become a prevalent phenomenon in the plain river network region. To reveal the causes of hypoxia in these regions, the Sihu Canal in the Hanjiang River Basin, one of China's most important freshwater aquaculture areas, was selected as a case study. The spatiotemporal variations in water quality, including dissolved oxygen (DO) and nutrients, were analyzed for the period 2010~2023, and the spatial distribution of nutrients in water and sediments were investigated. The impact of parameters such as water temperature, ammonia nitrogen, and flow on DO levels in the water was evaluated using a Random Forest model. The results indicated significant seasonal fluctuation in DO levels, which exhibited a 'V'-shaped pattern throughout the year. DO concentrations were relatively low during flood seasons, while during non-flood seasons the requirements for Class III surface water quality were generally satisfied. In 2021, severe hypoxia (DO<2mg/L) was observed, with the annual hypoxic days amounting to 79, 116, and 96 at the Yunlianghu, Xinhecun, and Xintan sections respectively. Evident hypoxic zones were identified in the mid- and upstream sections of the Sihu Canal, where DO concentrations ranged from 2.61 to 3.22mg/L. From 2010 to 2023, the water quality of the Sihu Canal consistently ranged from Class IV to Class V, with occasional further deterioration recorded. The main parameters exceeding the standards were identified as DO, permanganate index, ammonia nitrogen, and total phosphorus. The total nitrogen and phosphorus contents in the sediments ranged from 857.70 to 2846.87mg/kg, and 545.99 to 2475.59mg/kg, respectively, indicating that the sediments were subjected to mild to moderate pollution, with tributaries being more polluted than the main canal. High accuracy in predicting DO levels was demonstrated by the Random Forest model, which yielded an R^2 of 0.995 and an RMSE of 0.2085. Water temperature had a relative importance exceeding 35% in influencing DO levels, followed by pH, ammonia nitrogen,

收稿日期: 2024-10-08

基金项目: 国家重点研发专项(2022YFC3201902);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CKSF2024327/SH)

* 责任作者, 正高级工程师, ckyshj@126.com

conductivity, turbidity, and flow. To mitigate the hypoxic conditions during flood seasons, it was recommended that the systematic management of the basin be strengthened, the water quality of shrimp-rice and aquaculture drainage systems be improved, and the operation and scheduling of pump stations be optimized.

Key words: dissolved oxygen; hypoxia; plain river network region; random forest; Sihu Canal

目前我国地表水环境质量持续向好,但仍有部分国控水质断面存在溶解氧(DO)等指标长期超标的情况。DO 是评价水体自净能力和受污染程度的重要指标^[1-3],当水体 DO 不足时,会影响水体污染物的生物化学反应过程,进而可能通过食物链累积等方式对人体产生有害影响。研究表明,鱼群的行为会随着 DO 浓度变化而改变^[4],当 DO<2mg/L 时会导致鱼类窒息死亡,大多数藻类也无法存活^[5]。长期以来,人们一直认为水体缺氧主要发生在沿海水域^[6]和深水湖库^[7]。近年来,研究发现河流往往有更多的缺氧事件^[8],缺氧更可能发生在气候温暖、比降较低的河流中,尤其是那些平原水网地区的水体^[9]。

平原河网地区水体 DO 偏低的原因往往比较复杂,影响水体 DO 浓度的因素包括 pH 值、温度、电导率、营养物质浓度、大气复氧水平和水动力过程等^[10]。Zhi 等^[11]通过深度学习模型研究表明,美国河流日 DO 动态变化最主要的驱动因素是温度。南京市地表水溶解氧浓度夏季最低,水温和上游来水带入的耗氧污染物是外秦淮河溶解氧偏低的主要成因^[3]。丁淼等^[12]基于三维荧光光谱分析和氮形态解析发现,夏季氨氮浓度高,是造成运河桐乡水源地 DO 不能稳定达标的首要原因。由气象和水文等多种因素驱动的内源性污染物很可能成为农业小流域水库耗氧污染短期变化的主要驱动因素^[13]。Xu 等^[14]通过向量自回归模型等分析方法发现,磷肥和降雨是长三角地区地表水中 DO 水平的关键驱动因素。华北平原河网区域 10 年的时间序列显示雨季时 DO 浓度较低,河岸缓冲区丧失、河流渠道化、污染排放和闸坝调控是影响 DO 浓度下降和水质恶化的主要因素^[15]。

即使在营养负荷较低的水流较缓的河流中,低氧状况也可能普遍存在^[16]。闸控河段会导致河道断流和缺氧,渠道异质性、堰闸的结构形式和启闭控制等均对 DO 浓度有重要影响^[17]。然而现有研究主要集中于分析水体中污染物的相互关系,较少关注沉积物、水体水动力条件等对水体 DO 的影响。四湖流域是湖北省水产养殖及水稻种植较为集中的区

域^[18],四湖总干渠是流域内主要的养殖用水来源和排水通道,鲜有研究关注四湖总干渠水体 DO 不达标情况,研究水体 DO 超标成因,有助于为区域水环境管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

四湖总干渠位于汉江流域,起于荆州市沙市区观音垱镇习口闸,止于洪湖市新滩镇胡家湾村,流经沙市区、江陵县、潜江市、监利市、洪湖市,全长 191km。四湖流域地势较为平坦,排涝渠、灌溉渠交错连接形成水网,部分渠道通过取水泵站与汉江、长江连通(图 1)。

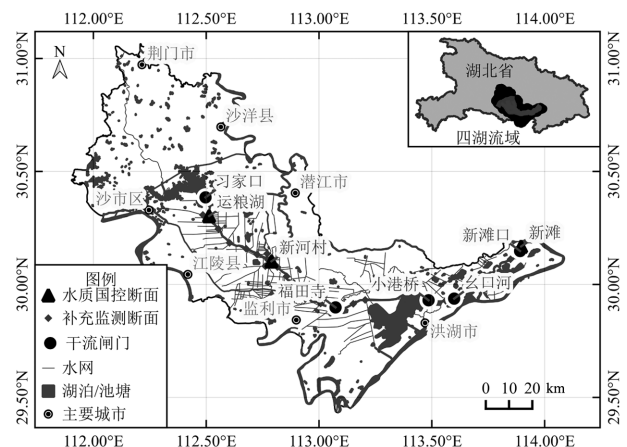


图 1 四湖总干渠主要涵闸、水质监测断面位置示意

Fig.1 Location of main culvert gates and water quality monitoring sections of Sihu Canal

四湖流域年平均降雨量约 1200mm,降雨一般集中在 5~10 月,其降雨量约占全年降雨量的 70%^[19]。根据荆州市水利工程专项普查结果,有 154 个水闸工程与四湖总干渠相连。上游以习家口节制闸控制,中游经福田寺防洪闸调控汇入洪湖,由洪湖小港闸等控制进入下游,至新滩口汇入长江。

1.2 样品采集与分析

于 2023 年 6 月和 12 月中旬,在四湖总干渠采集了水体及沉积物样品,采样断面如图 1 所示,所有样品均在断面中泓采集。现场采样使用水质多参数仪

(YSI, EXO-2)测定水体温度、pH 值、DO 及电导率等指标.采用 ADCP(M9)测量了水体流速及断面流量.参照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[20]分析了水体总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)、硝酸盐氮(NO₃-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})等指标.以 Milli-Q 超纯水为参比,使用 1cm 光程比色皿,采用紫外可见光度计(岛津, UV-2600)分析了水体的光谱特征^[21],扫描步长为 1nm,扫描范围为 190~700nm.沉积物样品冷冻干燥后研磨过 100 目筛,采用 SMT 法测定总磷,碱性过硫酸钾法测定总氮.以样品在 550 °C 下灼烧 3h 的质量损失表征沉积物有机质含量^[22],通过提取法分析了沉积物水溶解态氮磷^[23].

1.3 数据收集与处理

在荆州市生态环境局收集了 2010~2020 年的历史水质监测资料,通过生态环境部地表水水质自动监测实时发布系统收集了 2020~2023 年运粮湖、新河村、新滩等 3 个国控断面水质监测数据.在荆州市水利部门收集了四湖总干渠控制闸流量、水位等水文资料.DO 饱和度采用温度、气压修正经验公式计

算^[24].参照中国湖泊背景值(TN 690mg/kg,TP 543mg/kg),采用单因子指数法对底泥营养盐污染进行评价^[25].

在剔除监测站点维护数据及异常值之后,采用 R 3.5.1 软件包 Trend 中的 Mann-Kendall 法分析溶解氧变化趋势,并用 Pettitt 突变点检验法得到 DO 明显变化的时间点.将通过多重共线性检验^[26]之后的影响因素作为解释变量,DO 浓度作为因变量,采用 R 语言 randomForest 程序包构建机器学习模型,评估影响因素重要性.首先对数据集进行拆分,取 70% 的数据集样本量作为训练集,剩余 30% 样本量作为测试集.为评估模型对水质拟合的准确性,利用验证点 DO 浓度的实测值和模型在训练集和测试集上的预测值,分别计算了决定系数 R^2 以及均方误差 RMSE. RMSE 的值越小、 R^2 越接近 1,表明预测结果越准确^[27].

2 结果与分析

2.1 四湖总干渠 DO 时空变化特征

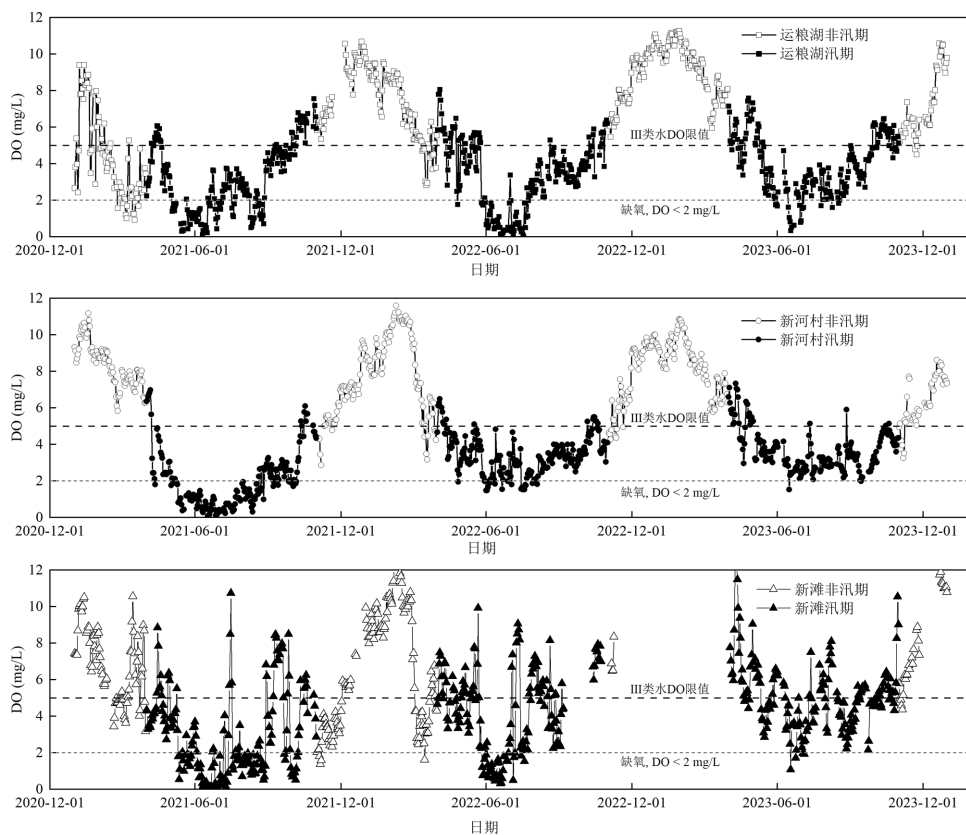


图 2 四湖总干渠国控断面 DO 变化特征

Fig.2 Characteristics of DO variations in national control sections of Sihu Canal

新滩断面由于设备维护检修,部分时段数据缺失

四湖总干渠水体溶解氧存在明显的季节性波动特征,年内 DO 呈“V”型分布(图 2).在汛期(4~10 月)DO 浓度相对较低,日均浓度仅为 1.11~4.86mg/L,其中在 6 月下旬至 7 月上旬达到最小值,非汛期水体 DO 浓度相对较高,基本满足地表水 III 类水 DO 浓度要求.DO 饱和度也呈现同样的季节性变化趋势,汛期和非汛期 DO 饱和度范围分别为 0.34%~85.98% 和 28.59%~102.16%.当水体 DO 浓度<2mg/L 时,水体将出现严重的缺氧状况^[28-29], 2021 年四湖总干渠水体缺氧状况尤为突出,运粮湖、新河村和新滩断面全年分别有 79, 116 和 96d 处于缺氧状况(图 2).从时间变化趋势上来看,四湖总干渠年缺氧时长显著降低,水体缺氧状况得到改善.从图 2 还可以看出,新滩断面的波动较为显著,其余断面的变化则相对缓和.

图 3 为汛期(4~10 月)、非汛期(11 月至翌年 3 月)运粮湖断面水体 DO 浓度典型昼夜变化过程.汛期 DO 浓度日变异系数可达 12.91%,其昼夜波动显著高于非汛期.在汛期 04:00~08:00 时段 DO 浓度相对较低,随着白天光合作用复氧,在 16:00 达到一天中 DO 浓度峰值,随后 DO 浓度缓慢降低.

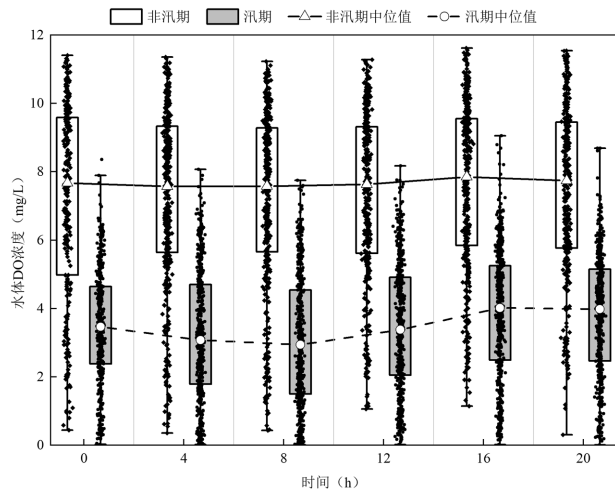


图 3 运粮湖断面水体 DO 昼夜变化特征

Fig.3 Diurnal variation characteristics of DO in the section of Yunlianghu

汛期四湖总干渠水体 DO 在中上游存在明显偏低现象,在中上游(东干渠汇入前)河段存在明显的低氧区(图 4),DO 浓度仅为 2.61~3.22mg/L.而在新河村以下,水体 DO 水平逐渐恢复,至新滩断面水体溶解氧已达到 8.76mg/L.这一发现与水质自动监测站同期监测结果一致,即水体 DO 浓度在空间上表现为

运粮湖<新河村<新滩.

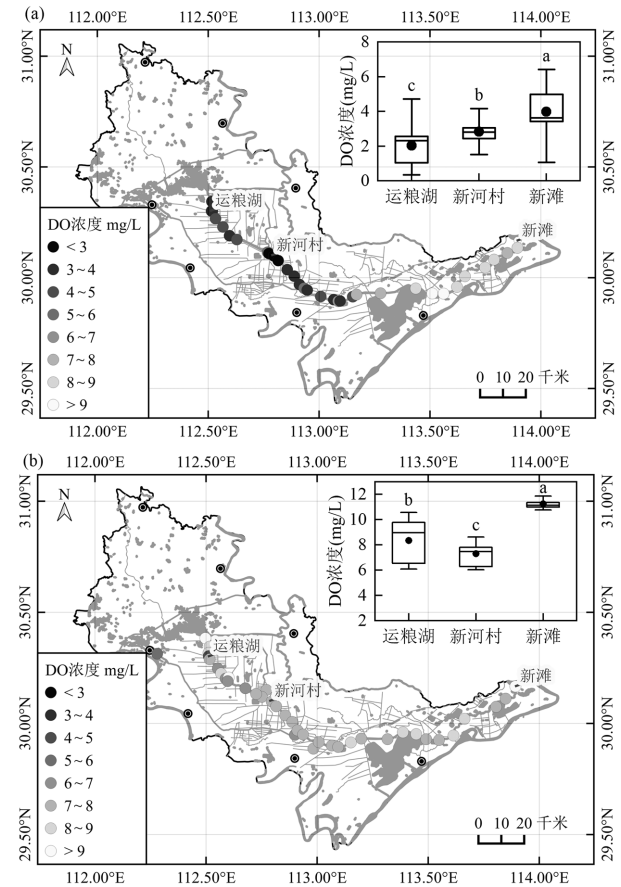


图 4 2023 年 6 月(a)、12 月(b)四湖总干渠水体 DO 空间变化特征

Fig.4 Spatial distribution characteristics of DO in the Sihu Canal in June (a) and December (b) 2023
箱线图字母表示断面之间 DO 的差异, $P<0.05$

2.2 四湖总干渠水质及底质特征

2021~2023 年四湖总干渠水体 pH 值相对稳定,介于 6.87~8.16 之间.电导率平均为 424.7~456.4 μ S/cm,中上游相对较高,而下游新滩断面相对较低.水体浊度则呈中游新河村断面相对较高,而上游和下游浊度相对较低(表 1).在空间上 COD_{Mn} 自上游至下游呈逐渐升高趋势,水体氨氮和总磷则呈沿程降低趋势,总氮沿程无明显变化.根据《荆州市地表水环境质量月报》,自 2010 年以来四湖总干渠水质长期处于 IV~劣 V 类,主要超标因子为 DO、 COD_{Mn} 、氨氮、总磷等,各评价因子中超标相对严重的指标是 DO 和氨氮,水体有机污染特征明显.在空间分布上,四湖总干渠上游至中游福田寺段水体污染严重,流经新滩口水质得到改善^[30].四湖总干渠水体氮浓

度还呈现一定的季节性变化特征,即总氮和氨氮浓度自 4 月开始急剧上升,在 9 月之后开始快速下降,

与农业生产过程施用氮肥较为一致^[31],这一时间变化趋势与水体 DO 浓度变化也较为吻合。

表 1 2021~2023 年四湖总干渠水体主要理化参数
Table 1 Main physicochemical parameters of Sihu Canal from 2021 to 2023

指标	运粮湖	新河村	新滩
pH 值	6.87~8.16(7.46)	7.00~7.69(7.36)	7.03~7.96(7.34)
电导率(μS/cm)	344.6~541.8(439.1) ^{ab}	386.4~512.5(456.4) ^a	314.1~522.7(424.7) ^b
浊度(NTU)	13.8~126.3(43.4) ^a	10.7~45.5(26.7) ^b	11.6~195.9(52.3) ^a
COD _{Mn} (mg/L)	2.88~8.26(4.70) ^b	3.54~7.97(5.23) ^b	4.23~11.20(6.56) ^a
NH ₃ -N(mg/L)	0.103~2.271(0.641) ^a	0.238~0.991(0.502) ^a	0.031~0.555(0.220) ^b
TP(mg/L)	0.059~0.363(0.177) ^a	0.098~0.223(0.151) ^{ab}	0.057~0.305(0.124) ^b
TN(mg/L)	1.17~4.00(2.39)	1.39~2.98(2.21)	1.10~3.50(2.27)

注:上标字母表示断面之间的差异, $P < 0.05$;()内数值表示均值。

四湖总干渠沉积物总氮含量为 857.70~2846.87mg/kg, TP 含量为 545.99~2475.59mg/kg(表 2),呈现明显的空间特征,从上游至下游总磷含量依次降低.总体上,四湖总干渠沉积物处于轻-中度污染状态,支渠污染重于干渠。

表 2 四湖总干渠底质氮磷及有机质含量特征
Table 2 Total phosphorus, total nitrogen, and LOI in the sediments of Sihu Canal

位置	TP(mg/kg)	TN(mg/kg)	LOI(%)
上游	1314.58 ± 821.86	1132.73 ± 491.76	5.49 ± 1.99
干渠 中游	876.12 ± 189.80	1049.73 ± 434.42	6.25 ± 3.01
下游	759.22 ± 74.63	1688.63 ± 1079.21	6.79 ± 2.39
支渠	1434.84 ± 506.29	1567.27 ± 192.50	6.47 ± 1.90

2.3 四湖总干渠水体 DO 异常成因分析

2.3.1 气象因素 水温是影响水体 DO 浓度的重要因素,四湖总干渠水体 DO 与水温呈显著负相关关系(图 5)。水温会随着气温波动,自 1971 年以来荆州地区年平均气温由 16.0℃显著升高至 18.1℃,升温速率为每年 0.0369℃(图 5)。4~10 月四湖总干渠平均水温接近 20℃(图 6),有超过 87.8%的 DO 监测值,低于 60%饱和溶解度(图 5)。受气温升高影响,全球范围内普遍存在水体 DO 下降现象,据报道美国 70%的河流存在缺氧状况,其中农业河流的变暖速度最慢,但溶解氧下降速率最快^[8]。在四湖总干渠 DO 随水温变化急剧下降(图 5),其变化曲线斜率远高于水温对 DO 饱和度的影响,这表明除水温之外,水体 DO 还受到其他因素的影响。

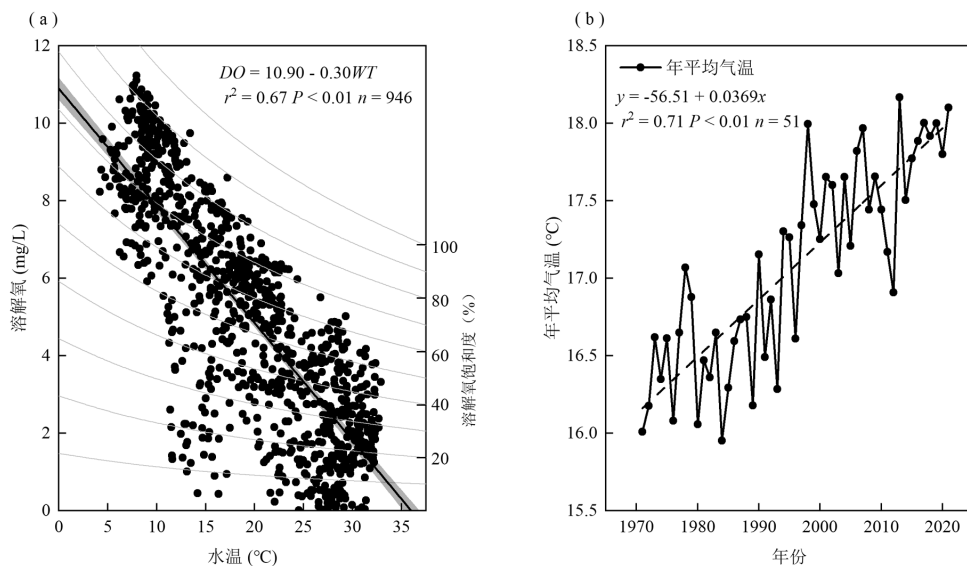


图 5 水体 DO 随水温变化及 1971 年以来荆州地区年平均气温变化情况
Fig.5 Changes in DO related to water temperature, and annual average temperature in Jingzhou since 1971

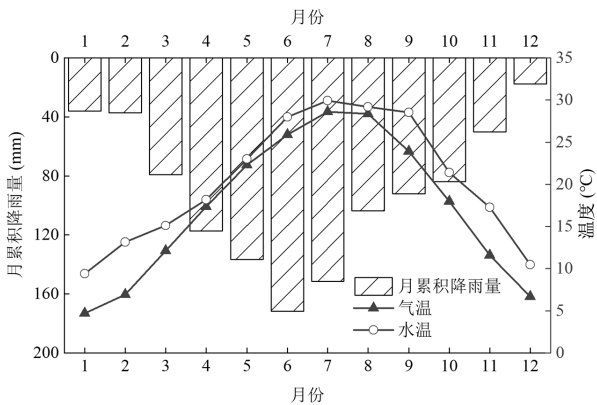


图 6 2020~2021 年荆州地区气温、累计降雨量年内变化
Fig.6 Annual variations in air temperature, water temperature, and cumulative rainfall in Jingzhou from 2020 to 2021

2.3.2 水动力 四湖总干渠上游以灌溉为主兼顾防洪,而中下游则主要以防洪排涝为主,由此产生了地表水系循环与水动力的时空分布不匹配现象^[32].每年 4~10 月因排水和灌溉需要,四湖流域内闸坝(泵站)运行,河道流量一般不低于 30m³/s,在其

他时期(11 月至翌年 3 月)涵闸关闭,河道基本处于封闭状态,有些河渠甚至出现断流现象^[33].以福田寺防洪闸为例,2022 年全年闸上水位在 25.22~27.27m 之间波动,过闸流量为 12.2~373m³/s,全年有 130d 处于关闭状态(图 7).由于水闸长期处于关闭状态,水体连通性不足,水动力较弱,实测流速介于 0.078~0.966m/s 之间,污染物难以扩散交换,水体自然复氧能力减弱.

然而汛期水闸开放运行却加剧了水体缺氧,由图 7(a)可知汛期四湖总干渠水体 DO 与过闸流量存在显著负相关关系($R^2=0.2217, P<0.05$).造成这一现象的原因可能是排涝站及涵闸运行使流域内大量污水汇入,非点源污染加重,水体中耗氧物质显著增加^[34].汛期随着流量升高,水体 COD_{Mn} 呈线性增加趋势(图 7),这表明流动的水体带来了更多的污染物.因此,汛期当过闸流量增加时,水体 DO 浓度反而降低,这一现象在其他研究也有发现^[35-36].

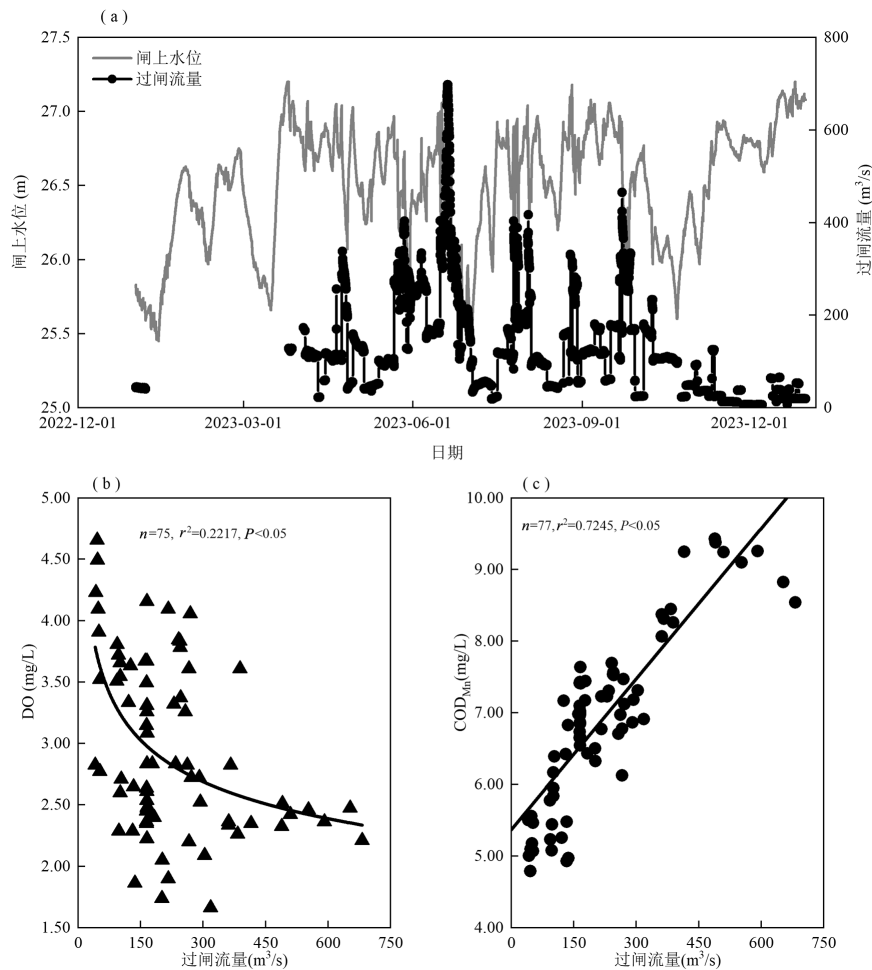


图 7 福田寺过闸流量与新河村 DO、COD 关系曲线

Fig.7 Relationship curve between the discharge through Futiansi sluice and DO, COD at Xinhecun site

2.3.3 外源及内源污染 四湖总干渠水体 DO 随 COD_{Mn} 的增加呈显著降低趋势(图 8),高锰酸盐指数的高低反映了水体有机污染物的水平,而水体有机物的降解过程中消耗了 DO,因此这是 DO 降低的主要因素之一.四湖流域污水收集处理率相对较低,四湖流域年排放工业废水达 4000 多万 t,排放生活污水 8000 多万 t,农业生产施用的化肥、农药带来严重的面源污染^[37].已有研究表明,残饵和代谢产物是养殖水体中有机质污染负荷的主要存在形式,是 COD_{Mn} 超标的主要原因^[38].四湖总干渠水体 DOM 的吸光度比值 E3/E4 均小于 3.5, E2/E3 为 1.58~2.06(图 9),这表明水体 DOM 以胡敏酸为主,并且水体有机物主要来自于外源^[39].

四湖总干渠水体 DO 浓度与 NH_3-N 呈负相关关系,随着 NH_3-N 浓度的升高,DO 呈显著下降趋势,拟合曲线符合幂函数曲线(图 8).氮的周转过程与 DO 的消耗高度耦合,是消耗水体 DO 的主要动力之一^[40].在汛期,水体温度相对较高,微生物活性较强,硝化反应等对水体 DO 的消耗更为剧烈.而在非汛期,渠道内水量相对较少,水体对 NH_3-N 等污染物的稀释作用较小,微生物活性减弱,因而水体 DO 随 NH_3-N 浓度变化相对平缓.较低的 DO 浓度可直接

抑制底泥-水体界面的硝化作用,减少 NH_3-N 的消耗,厌氧菌分解有机物产生 NH_3-N ,增加 NH_3-N 的释放^[30].运粮湖断面约 78.2% 的监测时段 NH_3-N 浓度 < 1.00mg/L,这表明其对水体 DO 的消耗是有限的.

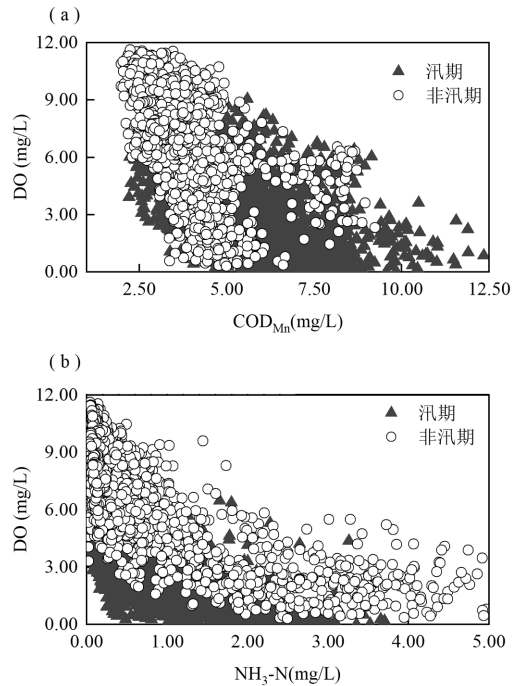


图 8 水体 DO 与 COD_{Mn} 、 NH_3-N 关系曲线
Fig.8 Relationship between DO and COD_{Mn} , NH_3-N

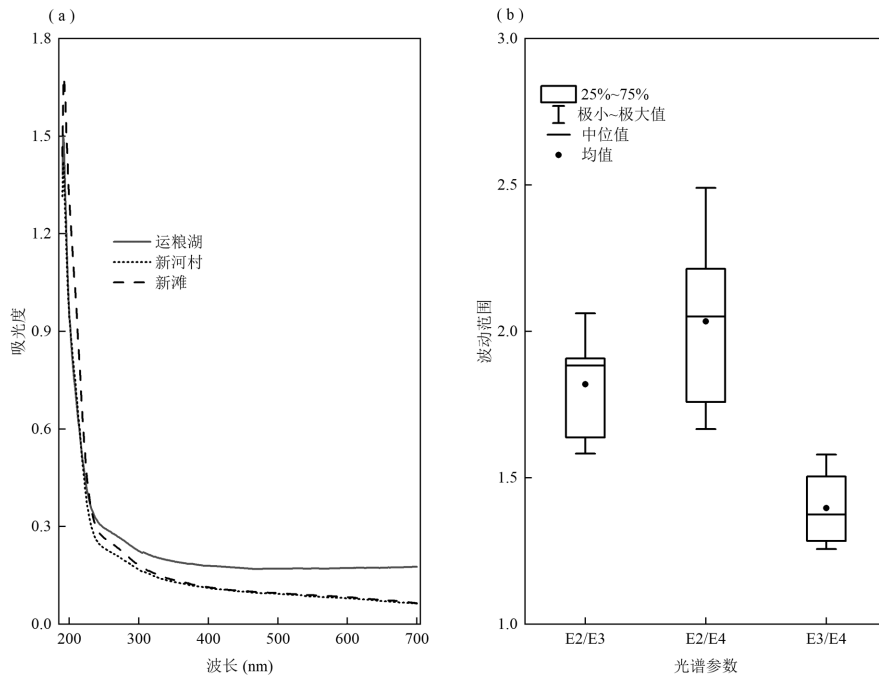


图 9 四湖总干渠水体紫外-可见吸收光谱及光谱参数

Fig.9 UV-Vis absorption spectra of DOM in the overlying water along with an analysis of its parameters

E2/E3、E2/E4 和 E3/E4 分别表示波长 250nm 和 365nm 处吸光度的比值、波长 250nm 和 400nm 处吸光度的比值和波长 300nm 和 400nm 处吸光度的比值

沉积物中溶解性有机质(DOM)的分解是影响水体 DO 浓度的主要因素之一^[27],四湖总干渠沉积物 LOI 平均含量为 5.49%~6.79%(表 2),总体状况与太湖较为接近^[41],参考太湖沉积物需氧量,四湖总干渠沉积物需氧量约为 $0.99\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{h})$ 。

3 讨论

将水温、高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮、

浊度、电导率、流量等影响因素作为自变量,水体 DO 浓度作为因变量,分别构建广义相加模型、随机森林模型和多元线性回归模型,并以 R^2 和 RMSE 为评价指标,比较了上述 3 种方法的预测效果.由图 10 可知,随机森林模型的拟合 R^2 达到了 0.995,显著高于其他模型,并且预测误差(RMSE)仅为 0.2085,在所有模型中最小,因此可以采用随机森林模型分析四湖总干渠水体 DO 浓度的影响因素。

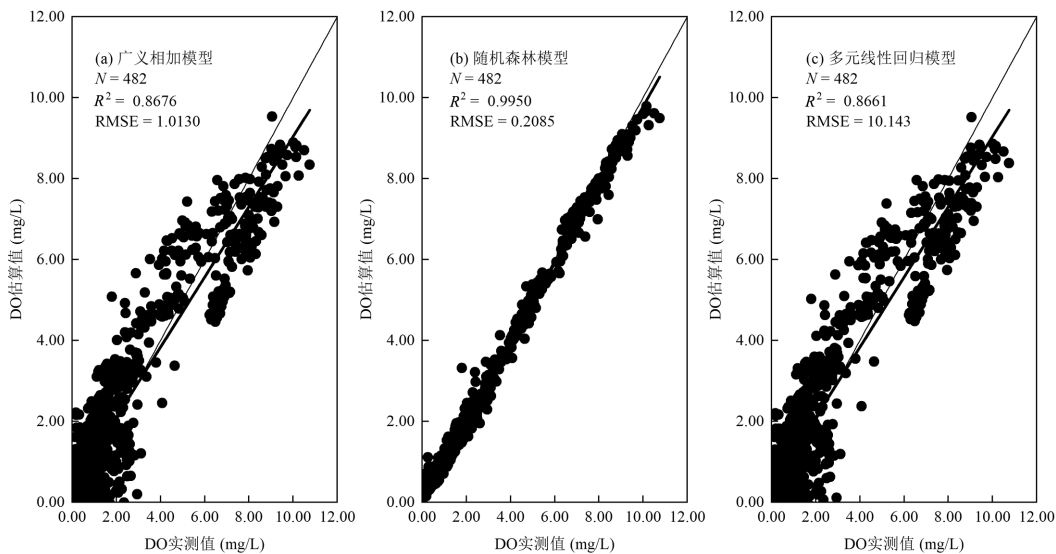


图 10 不同模型估算的 DO 浓度验证

Fig.10 Scatter plots of DO concentration for model estimation and original data

DO 是水生生态系统健康状况的基本指标,已有研究表明 pH 值和温度是估算河流溶解氧的关键因素,而水位、温度、电导率和化学需氧量等对河流环境特征具有重要意义^[42].进一步采用特征重要性排序,量化评价了各因子对 3 个站点(运粮湖、新河村、新滩口)溶解氧的相对贡献(图 11).相对重要性超过 20%的指标有水温、pH 值、氨氮、电导率、浊度、流量、总磷、总氮等.其中水温在 3 个断面的相对重要性分别为 38.53%、46.71%和 35.11%,这表明水温对四湖总干渠水体 DO 浓度有较大影响.水温除了通过影响水体 DO 饱和度之外,还会通过改变环境中微生物的活性,从而间接影响水中 DO 的消耗^[43].Shi 等^[44]也发现,汛期微生物活性高,是水体溶解氧偏低的主要原因。

从图 11 还可以看出除了水温之外,不同断面影响因素的相对重要性排序存在差异,在上游运粮湖断面 pH 值(36.1%)、氨氮(23.9%)等的相对重要性较

高,而流量(18.93%)、高锰酸盐指数(17.89%)的相对重要性较低.在中游新河村断面氨氮(27.49%)、浊度(21.02%)的相对重要性较高,pH 值(15.47%)、流量(14.71%)相对重要性较低.在下游新滩断面电导率(27.65%)、pH 值(24.14%)和流量(23.73%)的相对重要性较高,高锰酸盐指数(15.41%)和总氮(14.39%)的相对重要性较低.这表明,在分析水体 DO 影响因素时,需要关注空间异质性的影响。

河流生态系统的新陈代谢参数显著受光照、水文条件、营养状况等的共同调控^[45].由于营养物质的富集和温度的上升,许多闸控河流很容易出现富营养化和缺氧的情况^[46].在四湖流域这一特定区域内,由于河流、湖泊与人工河渠的密集交织,水系结构复杂且边界模糊,加之区域产汇流过程受强烈人为活动干扰,限制了水体交换能力,削弱了水体的自净能力.此外,该区域缺乏自然集水区域,河湖岸线广泛被堤坝等水工建筑物包围,进一步加剧了自然水系的

人工分割,使得水文参数(如流速、流量、水深)高度依赖于人工调控^[47],为了维持一定水位需求,在非汛期闸坝关闭,污染物随水体一同滞留,而在汛期及排灌时段污染物则会随着水流迁移扩散.因此,水体

DO 浓度,随着流量升高呈降低趋势(图 7),水动力的增加并没有如预期一样增加水体溶解氧浓度,这意味着水体好氧物质(COD_{Mn}等)是导致 DO 偏低的主要原因.

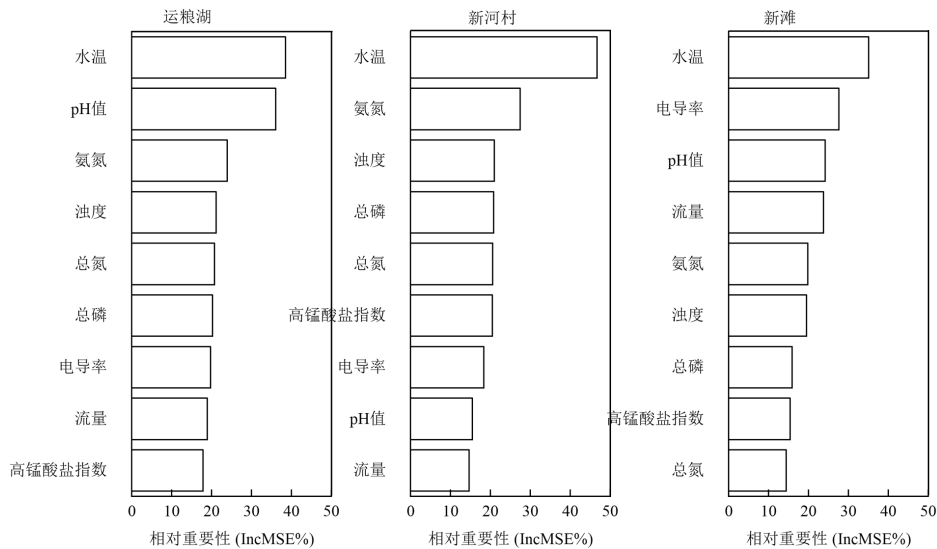


图 11 不同影响因素对国控断面水体 DO 影响的相对重要性排序

Fig.11 Importance ranks of the main factors affecting DO in different sections

河流缺氧的发生是由河流内在属性(如河流比降)和流域环境特征(如土地利用)等决定的,它们相互作用以确定河道内的生化和物理条件^[47]稻虾共作模式在四湖流域极为普遍.每年 9~10 月水稻收割后,稻田被改造为深水环境(40~50cm)以养殖小龙虾,并在次年春季(3~5 月)进行饲料投喂^[18].汛期作为水产快速生长期,饲料投加量显著增加,导致湖泊化学需氧量上升^[49].稻虾共作农田成为氮磷的重要来源,其氮磷流失与相连河流的降水量、总氮和总磷浓度密切相关^[50].相较于传统稻作模式,稻虾共作模式因水资源消耗量大及秸秆还田、饲料投入等因素,导致田面水中硝态氮、氨氮含量显著增加,加剧了水体富营养化的风险.

研究表明单独削减入污水排放量的措施对河流溶解氧的恢复十分有限^[51].为了改善四湖总干渠水体 DO 汛期异常状况,需要加强流域系统治理,尤其是要加强对虾稻及水产养殖的尾水排放处理,拦截水面漂浮垃圾,减少污染物的输入通量,优化泵站闸坝的调度运行方式,尽量避免汛期污染物的集中排放.此外,对于四湖总干渠这种平原水网区域,闸坝拦截了氮磷等营养物质,增加了水体 DO 的消耗^[36].

在彻底阻断四湖总干渠污染源之前,通过增加过闸流量来改善水动力的方法,对水体 DO 浓度的改善可能收效甚微.

4 结论

4.1 四湖总干渠水体 DO 浓度在时间上表现为非汛期较高,汛期较低的特征.在空间上,中上游 DO 浓度相对较低,而下游相对较高.

4.2 随机森林模型分析表明对水体 DO 浓度影响较大的环境因子为水温、pH 值和氨氮.

参考文献:

- [1] Prakash R K, Seockheon L, Young-Soo L, et al. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007,132:93-110.
- [2] Zhi W, Feng D, Tsai W, et al. From hydrometeorology to river water quality: Can a deep learning model predict dissolved oxygen at the continental scale? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(4):2357-2368.
- [3] 王春,刘军,谢鑫苗,等.南京市地表水溶解氧分布特征及低氧成因初探—以外秦淮河七桥瓮为例 [J]. *环境监控与预警*, 2022,14(3): 63-69.
Wang C, Liu J, Xie X M, et al. Research on the distribution of dissolved oxygen and causes of low oxygen in the surface water of

- Nanjing: a case study of Qiqiaoweng in Waiqinhui River [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2022,14(3):63-69.
- [4] Bao Y, Ji C, Zhang B. Prediction of dissolved oxygen content changes based on two-dimensional behavior features of fish school and T-S fuzzy neural network [J]. *Water Science and Engineering*, 2022,15(3):210-217.
- [5] Deborah V C. *Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring* [M]. 2nd ed. London: CRC Press, 1996.
- [6] Li D, Zhang J, Huang D, et al. Oxygen depletion off the Changjiang (Yangtze River) Estuary [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002,45(12):1137-1146.
- [7] 杜彦良,刘小蔚,刘晓波,等.大型分层水库翻库特性及溶解氧响应研究 [J]. *水利学报*, 2023,54(7):785-793,805.
- Du Y L, Liu X W, Liu X B, et al. Turnover characteristics of dissolved oxygen responses in a large stratified reservoir [J]. *Shuili Xuebao*, 54(7):785-793,805.
- [8] Zhi W, Klingler C, Liu J, et al. Widespread deoxygenation in warming rivers [J]. *Nature Climate Change*, 2023,13(10):1105-1113.
- [9] Blaszczak J R, Lauren E. Koenig, Mejia F H, et al. Extent, patterns, and drivers of hypoxia in the world's streams and rivers [J]. *Limnology and Oceanography Letters*, 2023,8(3):453-463.
- [10] 文 刚,王 硕,曹瑞华,等.湖库温跃层溶解氧最小值的形成原因、衍生的生态风险及控制研究进展 [J]. *湖泊科学*, 2022,34(3):711-726.
- Wen G, Wang S, Cao R H, et al. A review of the formation causes, ecological risks and water quality responses of metalimnetic oxygen minimum in lakes and reservoirs [J]. *Journal of Lake Science*, 2022, 34(3):711-726.
- [11] Zhi W, Ouyang W, Shen C, et al. Temperature outweighs light and flow as the predominant driver of dissolved oxygen in US rivers [J]. *Nature Water*, 2023,1(3):249-260.
- [12] 丁 淼,金 梦,兰亚琼,等.基于 3DEMMs-PARAFAC 技术的运河桐乡水源地夏季低溶解氧成因研究 [J]. *环境化学*, 2023,42(6):1933-1944.
- Ding M, Jin M, Lan Y Q, et al. Study on the low dissolved oxygen in summer in Tongxiang water source of Canal based on 3DEMMs-PARAFAC technology [J]. *Environmental Chemistry*, 2023,42(6):1933-1944.
- [13] Lv S, Li X, Wang R, et al. Autochthonous sources and drought conditions drive anomalous oxygen-consuming pollution increase in a sluice-controlled reservoir in eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,841:156739.
- [14] Xu Y, Zhou T, Su Y, et al. How anthropogenic factors influence the dissolved oxygen in surface water over three decades in eastern China? [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023,326:116828.
- [15] Zhang W, Rong N, Jin X, et al. Dissolved oxygen variation in the North China Plain river network region over 2011-2020 and the influencing factors [J]. *Chemosphere*, 2022,287:132354.
- [16] Carter A M, Blaszczak J R, Heffernan J B, et al. Hypoxia dynamics and spatial distribution in a low gradient river [J]. *Limnology and Oceanography*, 2021,66(6):2251-2265.
- [17] Hutchins M G, Qu Y, Charlton M B. Successful modelling of river dissolved oxygen dynamics requires knowledge of stream channel environments [J]. *Journal of Hydrology*, 2021,603:126991.
- [18] 刘小东.潜江市稻田时空格局演变及对生态环境的影响 [D]. 武汉:华中师范大学, 2021.
- Liu X D. Evolution of temporal and spatial pattern of rice and crayfish fields in Qianjiang City and its impact on ecological environment [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2021.
- [19] 华玲玲,张富林,翟丽梅,等.江汉平原水稻季灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险 [J]. *环境科学*, 2018,39(6):2715-2723.
- Hua L L, Zhang F L, Zhai L L, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus concentration dynamics in natural ditches under an irrigation-drainage unit in the Jiangnan Plain [J]. *Environmental Science*, 2018,39(6):2715-2723.
- [20] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration. *Standard methods for the examination of water and wastewater (4th Edition)* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [21] 于莉莉,钟 晔,孙福红,等.pH 值对滇池水体溶解性有机质(DOM)光降解作用的影响 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2019,39(8):2533-2539.
- Yu L L, Zhong Y, Sun F H, et al. Effects of pH on the Photo-Degradation of dissolved organic matter(DOM) from Dianchi Lake [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019,39(8):2533-2539.
- [22] 张嘉雯,魏 健,刘 利,等.衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价 [J]. *环境科学*, 2020,41(12):5389-5399.
- Zhang J W, Wei J, Liu L, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of nutrients in Hengshui Lake sediments [J]. *Environmental Science*, 2020,41(12):5389-5399.
- [23] 唐金勇,尹月鹏,曹 熙,等.沉积物磷形态空间分布特征及释放风险评估-以沱江流域为例 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(9):4264-4273.
- Tang J Y, Cao Y P, Cao X, et al. Spatial distribution characteristics and release risk assessment of phosphorus forms in sediments: A case study of the Tuojiang River Basin [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(9):4264-4273.
- [24] 黄炜惠,马春子,李文攀,等.我国地表水溶解氧时空变化及其对全球变暖的响应 [J]. *环境科学学报*, 2021,41(5):1970-1980.
- Huang W H, Ma C Z, Li W P, et al. Spatial temporal variations of dissolved oxygen and their response to global warming in China [J]. *Acta ScientiaeCircumstantiae*, 2021,41(5):1970-1980.
- [25] 袁赛波,赵彬洁,王红丽,等.汤逊湖沉积物营养盐污染特征评价及治理策略 [J]. *长江流域资源与环境*, 2022,31(12):2729-2742.
- Yuan S B, Zhao B J, Wang H L, et al. Nutrients pollution characteristic assessment and treatment strategy in sediments of Tangxun Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022,31(12):2729-2742.
- [26] 卢鋈镁,曾穗平,曾 坚,等.基于随机森林的高分辨率 PM_{2.5} 浓度时空变化模拟——以中原城市群核心区为例 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(7):3299-3311.
- Lu J M, Zeng S P, Zeng J, et al. High resolution simulation of temporal and spatial variation of PM_{2.5} concentration based on random forest-A case study of Central Plains Urban Agglomeration Core Area [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(7):3299-3311.
- [27] 李晓瑛,王 华,王屹晴,等.基于机器学习的长江口溶解氧预测模型与评估 [J]. *环境科学*, 2024,45(12):7123-7133.
- Li X Y, Wang H, Wang Y Q, et al. Machine Learning-based Dissolved Oxygen Prediction Modeling and Evaluation in the Yangtze River Estuary [J]. *Environmental Science*, 2024,45(12):7123-7133.
- [28] Bocaniov S A, Leon L F, Rao Y R, et al. Simulating the effect of nutrient reduction on hypoxia in a large lake (Lake Erie, USA-Canada) with a three-dimensional lake model [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2016,42(6):1228-1240.
- [29] Rixen T, Baum A, Sepryani H, et al. Dissolved oxygen and its response to eutrophication in a tropical black water river [J]. *Journal of Environmental Management*, 2010,91(8):1730-1737.
- [30] 薛 莲,金卫斌,艾天成,等.湖北四湖流域农田排水沟渠水质评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2010,19(S1):79-84.
- Xue L, Jin W B, Ai T C, et al. Water quality evaluation of agriculture drainage ditches in four lakes region of hubei province [J]. *Resources*

- and Environment in the Yangtze Basin, 2010,19(S1):79-84.
- [31] 胡梦辰,朱 滔,蒋青松,等.滇池溶解氧浓度变化的氮磷循环响应模拟研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021,57(3):481-488.
Hu M C, Zhu T, Jiang Q S, et al. Simulation study on nitrogen and phosphorus recycling response of changing dissolved oxygen concentration in Lake Dianchi [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021,57(3):481-488.
- [32] 田月明,卢碧林,郑林章.江汉平原集约农区水体氮通量分析 [J]. 湖北农业科学, 2013,52:4611-4614,4618.
Tian Y M, Lu B L, Zheng L Z. Analysis of water nitrogen fluxes of intensive agricultural field in Jiangnan Plain [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013,52:4611-4614,4618.
- [33] 范鲁晔,顾文权,邵东国,等.江汉平原河湖水系连通性评价研究 [J]. 中国农村水利水电, 2023,8:111-119.
Fan L Y, Gu W Q, Shao D G, et al. Research on the connectivity evaluation of river and lake systems in Jiangnan Plains [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023,8:111-119.
- [34] 叶 紫,陈伟亚.江汉平原河网区河渠水环境容量研究 [J]. 环境科学与技术, 2010,33(6E):297-300.
Ye Z, Chen W Y. Research of water environment capacity of Jiangnan Plain River network's graffs [J]. Environmental Science & Technology, 2010,33(6E):297-300.
- [35] 王 菊,吴 琼,罗 欢,等.东江北干流溶解氧时空分布特征及影响因素探讨 [J]. 长江科学院院报, 2024,41(3):37-44.
Wang J, Wu Q, Luo H, et al. Spatial-temporal distribution and influencing factors of dissolved oxygen in the north mainstream of Dongjiang River [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024,41(3):37-44.
- [36] Shen X M, Cai Y P, Su M R, et al. High discharge intensified low net ecosystem productivity, hypoxia, and acidification at three outlets of the Pearl River Estuary, China [J]. Water Research, 2022,214,118171.
- [37] Cisowska I, Hutchins M G. The effect of weirs on nutrient concentrations [J]. Science of the Total Environment, 2016,542:997-1003.
- [38] 肖中东.荆州市四湖流域乡镇和农村生活污水处理现状与对策 [J]. 现代农业科技, 2017,23:155-157.
Xiao Z D. Current situation and countermeasure of township and rural domestic sewage treatment in Sihu Basin of Jingzhou City [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2017,23:155-157.
- [39] 杨 坤,胡星明,卢文轩.巢湖流域水产养殖尾水水质分析与评价 [J]. 生物学杂志, 2023,40(1):85-90.
Yang K, Hu X M, Lu W X. Analysis and evaluation of water quality of aquaculture tail water of Chaohu Lake basin [J]. Journal of Biology, 2023,40(1):85-90.
- [40] 李海斌,谢发之,李国莲,等.南漪湖上覆水溶解性有机质的光谱特征 [J]. 中国环境科学, 2022,42(7):3306-3315.
Li H B, Xie F Z, Li G L, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in the overlying water from Nanyi Lake [J]. China Environmental Science, 2022,42(7):3306-3315.
- [41] 刘德鸿,余居华,钟继承,等.太湖流域典型河网水体氮磷负荷及迁移特征 [J]. 中国环境科学, 2016,36(1):125-132.
Liu D H, Yu J H, Zhong J C, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loading and migration in typical river networks in Taihu lake basin [J]. China Environmental Science, 2016,36(1):125-132.
- [42] Pant N, Toshniwal D, Gurjar B R. Short-term forecasting of dissolved oxygen based on spatial-temporal attention mechanism and kernel-based loss function [J]. Journal of Water Process Engineering, 2025,69,106677.
- [43] Ma R C, Chen Z, Wang B, et al. Spatiotemporal variations and controlling mechanism of low dissolved oxygen in a highly urbanized complex river system [J]. Journal of Hydrology: Regional Studie, 2024,52,101691.
- [44] Shi L L, Gao C, Wang T, et al. Information extraction of seasonal dissolved oxygen in urban water bodies based on machine learning using sentinel-2imagery: An open access application in Baiyangdian Lake [J]. Ecological Informatics, 2024,82,102782.
- [45] Bernhardt E S, Savoy P, Vlah M J, et al. Light and flow regimes regulate the metabolism of rivers [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2022, 119(8)e2121976119.
- [46] Wang S, Flipo N, Romary T. Oxygen data assimilation for estimating micro-organism communities' parameters in river systems [J]. Water Research, 2019,165:115021.
- [47] 李天生,邹朝望.江汉平原水网生态治理对策探讨 [C]//中国水利学会.中国水利学会 2021 学术年会论文集第五分册.郑州:黄河水利出版社, 2021:400-403.
Li T S, Zou C W. Exploration of countermeasures for aquatic ecological governance in the water network of Jiangnan Plain [C]// Proceedings of the 2021 Annual Conference of the Chinese Hydraulic Engineering Society (Volume 5). zhengzhou: the Yellow River Water Conservancy Press, 2021:400-403.
- [48] Blaszcak Joanna R, Koenig Lauren E, Mejia Francine H, et al. Extent, patterns, and drivers of hypoxia in the world's streams and rivers [J]. Limnology and Oceanography Letters, 2023,8(3):453-463.
- [49] 陈 帅,莫彩芬,李艳蕾,等.洪湖水质时空特征及污染驱动力分析 [J]. 环境污染与防治, 2019,41(4):421-425.
Chen S, Mo C F, Li Y Q, et al. Spatio-temporal characteristics of water quality and the pollution driving forces of Honghu Lake [J]. Environmental Pollution & Control, 2019,41(4):421-425.
- [50] 陈 玲,范先鹏,黄 敏,等.江汉平原稻虾轮作模式地表径流氮、磷流失特征 [J]. 农业环境科学学报, 2022,41(7):1520-1530.
Chen L, Fan X L, Huang M, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff under the rice-crawfish rotation system in the Jiangnan Plain, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022,41(7):1520-1530.
- [51] Lajaunie-Salla K, Sottolichio A, Schmidt S, et al. Comparing the efficiency of hypoxia mitigation strategies in an urban, turbid tidal river via a coupled hydro-sedimentary - biogeochemical model [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2019,19(11):2551-2564.

作者简介: 黎 睿(1990-),男,湖北竹溪人,高级工程师,硕士,主要从事流域水环境保护研究.发表论文 20 余篇.Leeruiwh@outlook.com.