

梁思宸, 张金松, 伍驰中, 等. 原水 2-MIB 影响因素分析及数据 AI 应用探索[J]. 净水技术, 2024, 43(12): 64-74.

LIANG S C, ZHANG J S, WU C Z, et al. Analysis of 2-MIB influencing factors in raw water and exploration of data AI application[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(12): 64-74.

原水 2-MIB 影响因素分析及数据 AI 应用探索

梁思宸, 张金松*, 伍驰中, 安娜, 李悦, 王巍巍

(深圳市水务<集团>有限公司, 广东深圳 518000)

摘要 《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)将 2-甲基异莰醇(2-MIB)列为扩展指标,并提出 0.000 01 mg/L(10 ng/L)的要求,部分水厂现有工艺难以满足要求,需积极应对。文章以深圳市 SZ 水库、TG 水库、XL 水库、SY 水库 2021 年—2022 年的 2-MIB 数据为基础,分析 2-MIB 变化规律及其影响因素。结果表明,不同水库 2-MIB 浓度水平差异较大,2-MIB 整体波动明显并呈季节性波动特征,其浓度受水温、藻密度、高锰酸盐指数、气温、风速等因素影响较大。深圳地区部分常规处理工艺水厂需通过投加粉末活性炭以保障出水 2-MIB 达标,为预判 2-MIB 浓度每日变化趋势以及时调整粉末活性炭投加量,文章基于 2-MIB 变化规律及影响因素分析结果,结合 AI 算法构建原水 2-MIB 预测预警模型,该模型可预测未来 15 d 内 2-MIB 逐日浓度,平均误差达到 4.83 ng/L,有效助力 2-MIB 稳定达标。

关键词 2-甲基异莰醇(2-MIB) 原水 影响因素 变化规律 预测模型

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)12-0064-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.12.008

Analysis of 2-MIB Influencing Factors in Raw Water and Exploration of Data AI Application

LIANG Sichen, ZHANG Jinsong*, WU Chizhong, AN Na, LI Yue, WANG Weiwei

(Shenzhen Water <Group> Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749—2022) lists 2-methylisobornyl alcohol (2-MIB) as an extended index and proposes a requirement of 0.000 01 mg/L (10 ng/L). Some water treatment plants (WTPs) have existing processes that are difficult to meet the requirements and need to actively respond. This article was based on the 2-MIB data of SZ Reservoir, TG Reservoir, XL Reservoir and SY Reservoir in Shenzhen from 2021 to 2022, analyzing the variation patterns and influencing factors of 2-MIB. The results showed that there were significant differences in the concentration levels of 2-MIB in different reservoirs, and the overall fluctuation of 2-MIB was significant and exhibited seasonal characteristics. Its concentration was greatly influenced by factors such as water temperature, algal density, permanganate index, temperature and wind speed. Some conventional treatment process WTPs in Shenzhen needed to add powdered activated carbon to ensure that the effluent meets the 2-MIB standard. In order to predict the daily trend of 2-MIB concentration and adjust the dosage of powdered activated carbon in a timely manner, 2-MIB of raw water prediction and warning model was constructed based on the analysis of the 2-MIB change law and influencing factors, combined with AI. This model can predict the daily concentration of 2-MIB in the next 15 days, with an average error of 4.83 ng/L, assist in achieving stable 2-MIB standards effectively.

Keywords 2-methylisobornyl alcohol (2-MIB) raw water influencing factor change pattern prediction model

[收稿日期] 2024-03-07

[作者简介] 梁思宸(1995—),女,硕士,研究方向为饮用水水质影响研究及水质保障, E-mail: 983568543@qq.com。

[通信作者] 张金松(1963—),男,博士,研究方向为市政供水工艺技术、饮用水水质安全技术与 管理, E-mail: zhangjinsong2005@126.com。

2023 年 4 月 1 日起,《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)^[1]正式被实施,将 2-甲基异莰醇(2-MIB)由水质参考指标调整为扩展指标,并提出了 0.000 01 mg/L(10 ng/L)的要求。常规混凝、沉淀、过滤、消毒工艺对其去除能力十分有限^[2],投加粉末活性炭可有效提高去除率^[3],从而保障出水达

标。投加量需根据原水 2-MIB 浓度确定,但由于检测难度较高,无法做到频繁检测,因此水厂多采用固定投加量进行投加,但原水 2-MIB 波动明显^[4],以固定投加量进行投加,出水有超标风险的同时还存在浪费问题。为保障常规处理工艺水厂出水 2-MIB 稳定达标并降低成本,需及时根据原水 2-MIB 波动情况调整投加量。

为预判原水水质情况,许多学者探索建立原水水质模型,如洱海水质模型^[5]。研究^[6]表明,原水中的 2-MIB 主要由丝状蓝藻产生,其产生 2-MIB 的能力受多种因素共同影响。文章基于 SZ 水库、SY 水库、XL 水库、TG 水库 2021 年—

2022 年的 2-MIB 检测数据,分析其变化规律及影响因素,并基于机器学习方法构建原水 2-MIB 浓度预测预警模型,自动预测未来 15 d 2-MIB 浓度水平,为水厂及时调整粉末活性炭投加量提供依据。

1 材料与方法

1.1 水库概况

SZ 水库、SY 水库、XL 水库、TG 水库均为深圳的主力供水水库,其兴利库容分别为 2 593 万、1 447 万、2 311 万 m³ 及 9 340 万 m³,其地貌及分布如图 1 所示。



图 1 水库地貌及分布

Fig. 1 Reservoir Morphology and Distribution

1.2 数据来源

于 2021 年、2022 年每月对各水库进行 1 次以上取样,并检测 2-MIB 及相关指标,水质检测方法

及检测仪器如表 1 所示,各水库检测次数如表 2 所示。气象信息来源于深圳市气象局。

表 1 水质检测方法 & 检测仪器

Tab. 1 Water Quality Testing Methods and Instruments

水质指标	检测方法	检测仪器
水温	《水质 水温的测定 温度计或颠倒温度计测定法》(GB/T 13195—1991)	温度计
2-MIB	《生活饮用水臭味物质 土臭素和 2-甲基异莰醇检验方法》(GB/T 32470—2016);气相色谱-质谱联用法	气相色谱-质谱联用仪 5977C
藻密度	《水和废水监测分析方法》(第四版):浮游生物的测定(B) 显微镜种类鉴定与计数	显微镜 BX-50E-3
优势藻种	《水和废水监测分析方法》(第四版):浮游生物的测定(B) 显微镜种类鉴定与计数	显微镜 BX-50E-3
高锰酸盐指数	《生活饮用水标准检验方法 第 7 部分:有机物综合指标》(GB/T 5750.7—2023);4.1 酸性高锰酸钾滴定法	数显滴定仪

表 2 检测次数

Tab. 2 Detection Frequency

水库名称	检测次数/次
SZ 水库	82
SY 水库	55
XL 水库	76
TG 水库	67

2 原水 2-MIB 变化规律分析

2.1 原水 2-MIB 年度变化规律

统计 2021 年—2022 年 SZ 水库、SY 水库、XL 水库、TG 水库每月 2-MIB 浓度均值,其中检测结果为“<5 ng/L”数据在计算均值时统一以 2.5 ng/L 计,结果如图 2 所示。结果表明,同一地区的各水库间 2-MIB 浓度水平差异较明显,整体表现为 SY 水库 2-MIB 浓度水平最高,平均质量浓度为 32.33 ng/L;其次为 TG 水库,平均质量浓度为 22.30 ng/L;SZ 水库及 XL 水库 2-MIB 水平较低,平均质量浓度分别为 14.84 ng/L 及 10.44 ng/L。同时各水库年度 2-MIB 浓度波动明显,并呈现一定的季节性波动规律,具体表现为每年秋季、春季浓度最高,夏季、冬季浓度水平最低,上海、北京等地的原水也呈现类似的季节性波动规律^[7-8]。

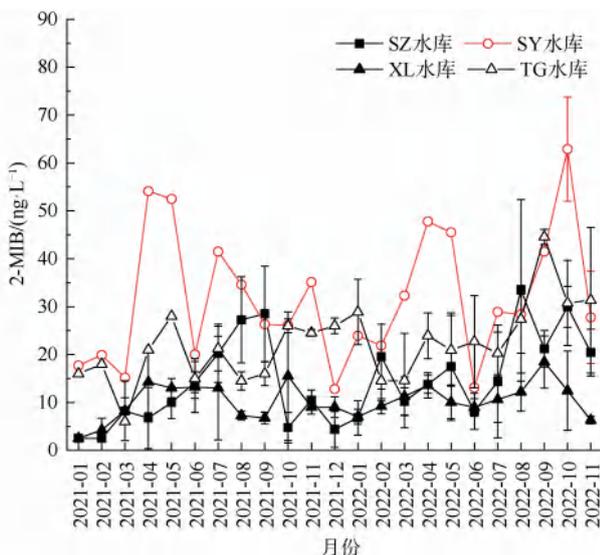


图 2 各水库 2-MIB 浓度变化

Fig. 2 Changes of 2-MIB Concentration in Each Reservoir

2.2 原水 2-MIB 1 d 内变化规律

为研究 1 d 内 2-MIB 变化规律,于 3 月对 2-MIB 浓度水平较高的 SY 水库进行 24 h 内连续检测,结果如图 3 所示。结果显示,1 d 内 2-MIB 浓度水平

仍有较大范围的波动,21:00 质量浓度水平最低为 34.9 ng/L,11:00 质量浓度最高达到 71.2 ng/L,总体表现为 05:00—17:00 浓度水平较高,夜间浓度水平较低。

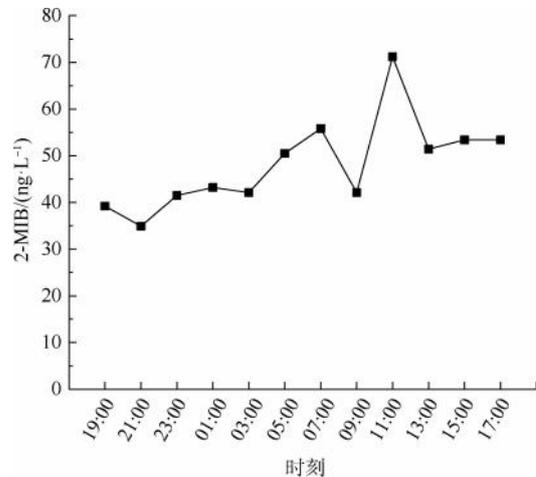


图 3 SY 水库 1 d 内 2-MIB 浓度变化

Fig. 3 Changes of 2-MIB Concentration in SY Reservoir Within One Day

3 原水 2-MIB 影响因素分析

3.1 水质因素

3.1.1 藻密度

SZ 水库、XL 水库优势藻种为硅藻、绿藻,其 2-MIB 浓度水平相对较低,TG 水库、SY 水库优势藻种为蓝藻,其 2-MIB 浓度水平相对较高。分析 2-MIB 浓度与藻密度之间关系如图 4 所示。结果表明,不同水库之间,2-MIB 与藻密度存在正相关关系,表现为藻密度水平越高 2-MIB 浓度水平越高,如 TG 水库原水藻密度水平明显高于 SZ 水库及 XL 水库,其 2-MIB 值也明显更高。对于各水库,整体也表现为藻密度越高,2-MIB 浓度水平越高。陈晓萌^[7]对上海某水厂原水 2021 年度数据研究表明,藻类与 2-MIB 浓度之间呈显著正相关性,是影响浓度变化的主要因素。邵晨等^[9]对东太湖某地原水的研究也表明,2-MIB 与藻密度呈明显的线性相关。

在 24 h 内对 SY 水库进行藻类及 2-MIB 的连续分析,发现 SY 水库藻密度水平较高,同时其 2-MIB 水平也相对较高,优势藻为蓝藻,1 d 内蓝藻占比变化幅度不大,为 70%~90%,同时 2-MIB 浓度与藻密度、蓝藻密度均呈较明显的正相关关系,总体变化趋势类似,具体如图 5 所示。

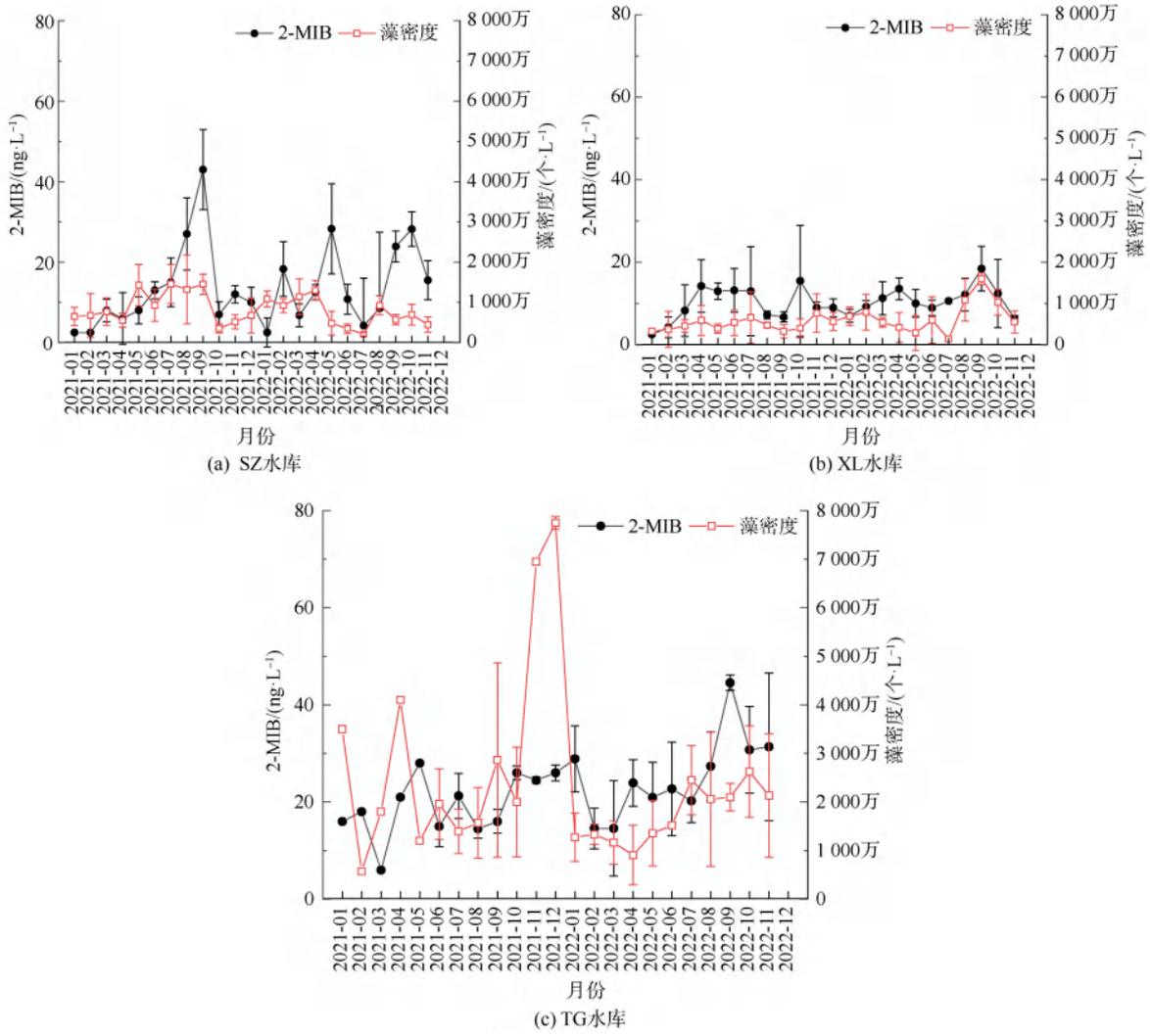


图4 2-MIB与藻密度关系

Fig. 4 Relationship between 2-MIB and Algal Density

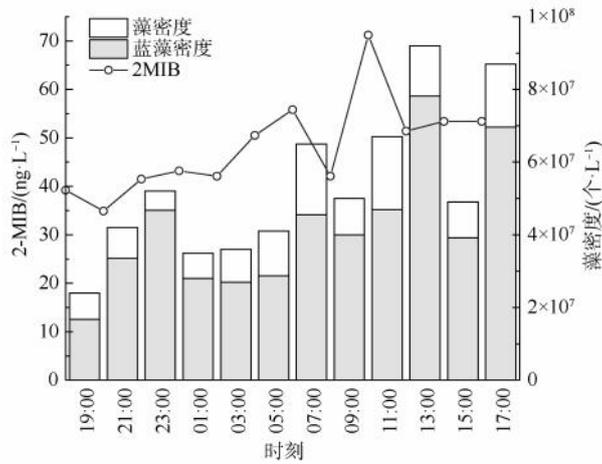


图5 1d内2-MIB与藻密度关系

Fig. 5 Relationship between 2-MIB and Algal Density Within One Day

3.1.2 水温

分析 2-MIB 浓度与水温关系如图 6 所示。结果表明,2-MIB 与水温之间整体呈现正相关关系,对于 SZ 水库(优势藻为硅藻、绿藻)、SY 水库(优势藻为蓝藻),在 14~32 °C 时 2-MIB 浓度明显随水温升高而升高,这与优势藻为硅藻的上海原水规律^[7]类

似,以蓝藻为优势藻的 SY 水库可能是藻密度较高,硅藻、绿藻等非优势藻密度也较高,故呈现了类似的规律;对于 XL 水库,则与水温相关性较弱;对于 TG 水库(优势藻为蓝藻),则表现为 23~26 °C 的水温最适宜,且高温影响不如低温影响明显,这与成建国等^[10]针对蓝藻的研究结果类似。

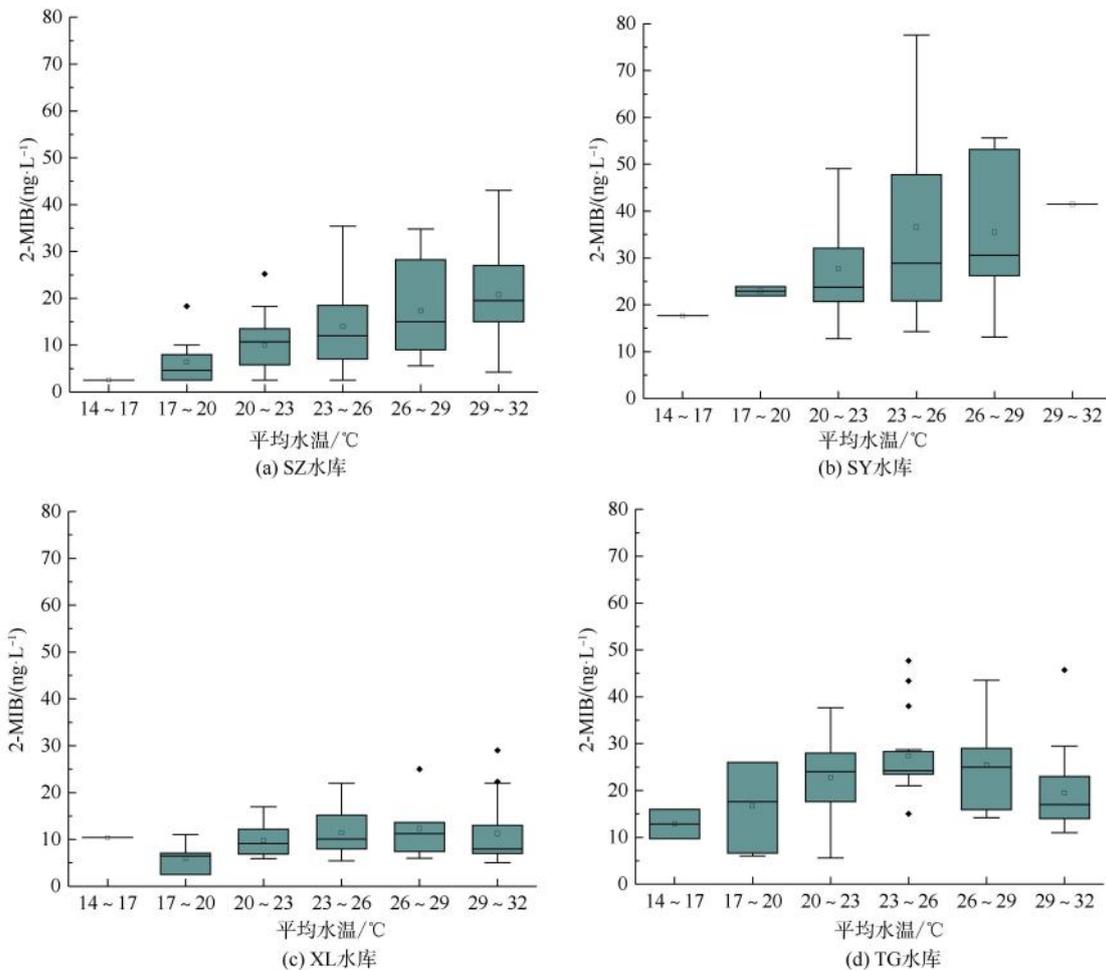


图 6 2-MIB 与水温关系

Fig. 6 Relationship between 2-MIB and Water Temperature

3.1.3 高锰酸盐指数

分析各水库 2-MIB 与高锰酸盐指数关系如图 7 所示。结果表明,各水库间 2-MIB 浓度与高锰酸盐指数呈明显的正相关关系,表现为高锰酸盐指数越高,其 2-MIB 浓度越高。

针对单一水库,2-MIB 也与高锰酸盐指数呈现正相关性,表现为当高锰酸盐指数低于 1.5 mg/L 时,2-MIB 浓度均处于该水库的较低水平,并随高锰酸盐指数升高而逐渐升高,该规律对于 2-MIB 浓度水平高的 SY 水库表现更为明显,对于 2-MIB 浓度水平低的

XL 水库则表现相对不明显,具体如图 8 所示。研究^[11]表明,高锰酸盐指数的升高与藻类光合作用相关,故高锰酸盐指数的升高可能反映了藻类代谢活动的增强,而藻类代谢活动引起了 2-MIB 的升高。

3.1.4 其他水质因素

除上述水质指标外,仍有其他水质指标对 2-MIB 浓度有影响或可反映藻类生长情况^[11-12]。研究^[10]表明降低 N、P 等营养盐浓度可以抑制浮丝藻细胞的生长,但会促进藻细胞的胞外 2-MIB 分泌;石文平等^[12]研究表明,藻类暴发前期,pH、溶

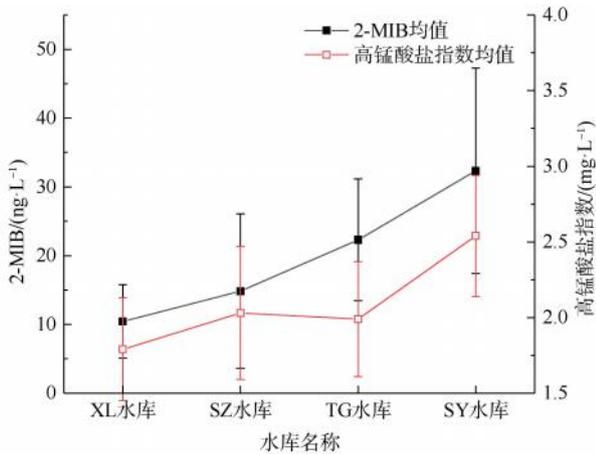


图7 2-MIB与高锰酸盐指数关系

Fig. 7 Relationship between 2-MIB and Permanganate Index

解氧会升高并出现峰值,这是藻类的光合作用所导致水体的 pH、溶解氧升高。

3.2 气象因素

3.2.1 气温

分析各水库 2-MIB 浓度与日均气温关系如图 9 所示。结果表明,对于 2-MIB 浓度水平较高的 SY 水库,平均气温在 23~26 °C 时,其 2-MIB 浓度水平明显高于其他温度,对于 2-MIB 浓度水平较低的其他水库,23~26 °C 时其 2-MIB 水平也处于较高水平,分析认为 23~26 °C 有利于 2-MIB 的产生及释放;平均温度在 14~17 °C 时,各水库的 2-MIB 均处于较低水平,说明低温不适宜 2-MIB 的产生及释放,这与多位学者^[13-14]的研究结果类似。

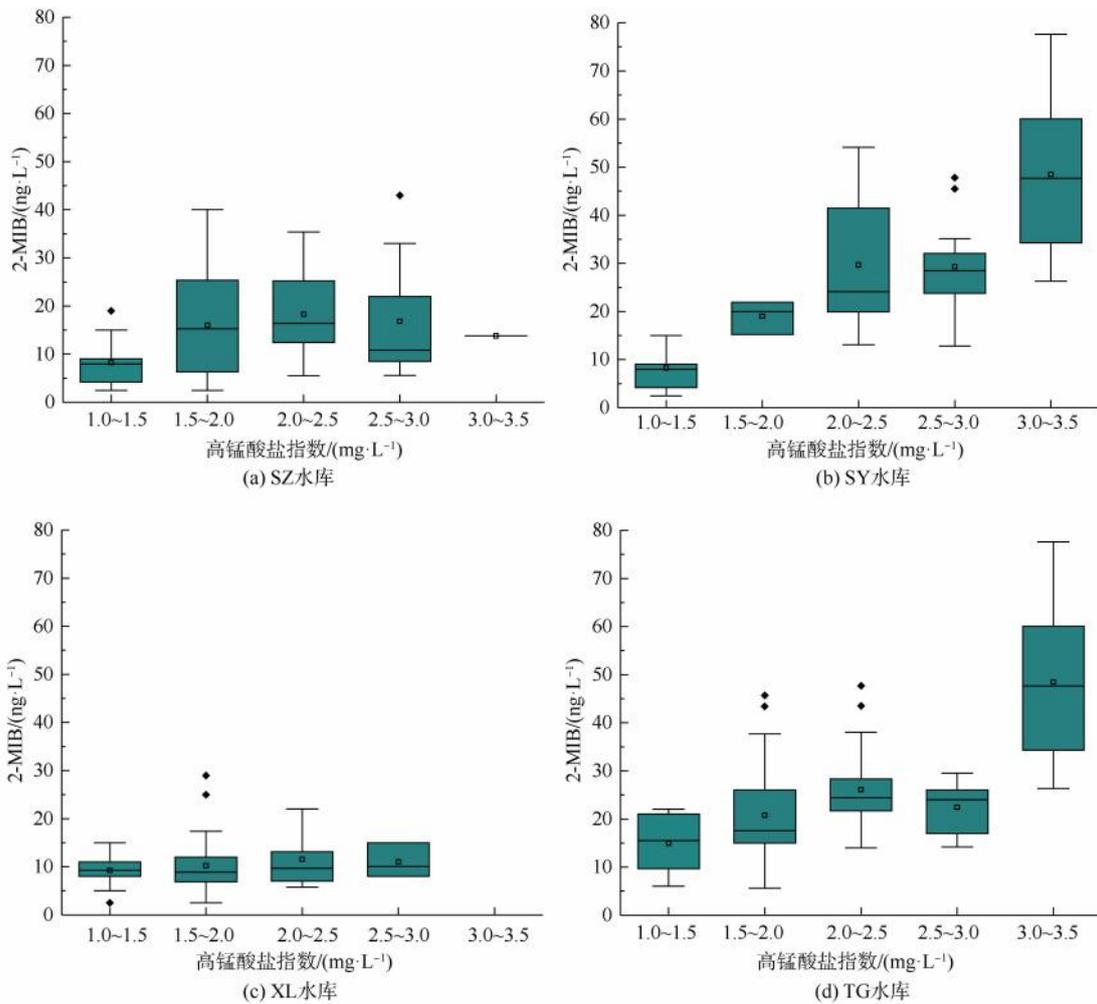


图8 各水库2-MIB与高锰酸盐指数关系

Fig. 8 Relationship between 2-MIB and Permanganate Index in Each Reservoir

3.2.2 风速

在大型浅水型湖泊中,风对浮游植物的影响

可分为 3 个部分:对浮游植物的直接干扰影响,如对养分吸收效率和光竞争的影响;对浮游植物

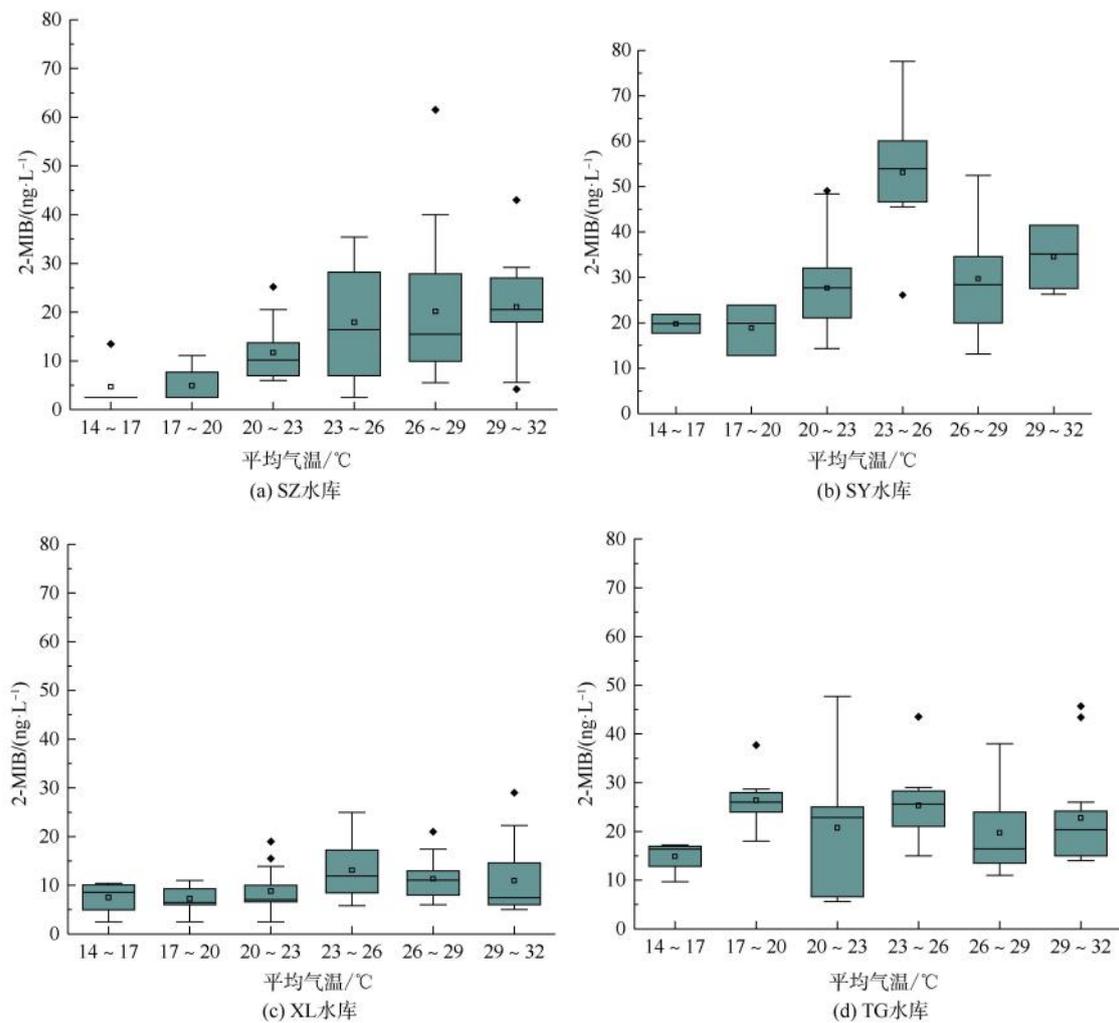


图9 2-MIB 与气温关系

Fig. 9 Relationship between 2-MIB and Water Temperature

的间接影响,如风引起的内部养分释放;对浮游植物运输的影响,包括垂直迁移和水平漂移^[15]。因为 2-MIB 与浮游植物的生长存在一定相关性,认为风速可能是影响 2-MIB 浓度水平的重要因素,分析各水库 2-MIB 浓度与风速关系结果如图 10 所示。

结果表明在 5~14 km/h 的风速下,随风速增加 2-MIB 浓度整体呈升高的趋势,孙小静等^[16]针对太湖藻类的影响因素研究表明当风速低于 14.4 km/h 时,蓝藻密度和蓝藻生物量随风速增大而升高,分析认为这继而造成了 2-MIB 升高的趋势。同时风速对 2-MIB 的影响程度与 2-MIB 浓度水平成正相关关系,浓度水平越高,其受风速影响越明显,对于 2-MIB 浓度水平较高的 SY 水库,高风速(12~14 km/h)时 2-MIB 浓度明显高于低风速情况,其他

水库则差异较小。

3.2.3 其他气象因素

除气温、风速外,研究^[12,17]表明,光照、降雨也会不同程度影响藻类生长,进而影响 2-MIB 浓度。研究^[17]表明,60~100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光照强度较适宜伪鱼腥藻生长,其中 90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光强最适宜伪鱼腥藻生长,而在 20 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光强下,伪鱼腥藻的生长明显受到抑制。石文平等^[12]研究表明雨季的到来可以加速藻类的暴发。

4 原水 2-MIB 数据 AI 应用

4.1 数据 AI 应用需求及思路

深圳目前仍有近 1/3 的水量未实现深度处理工艺覆盖,对 2-MIB 的去除效果十分有限,为满足新国标对 2-MIB 的要求,往往采用投加粉末活性炭的方式保障出水达标。粉末活性炭对 2-MIB 有较好

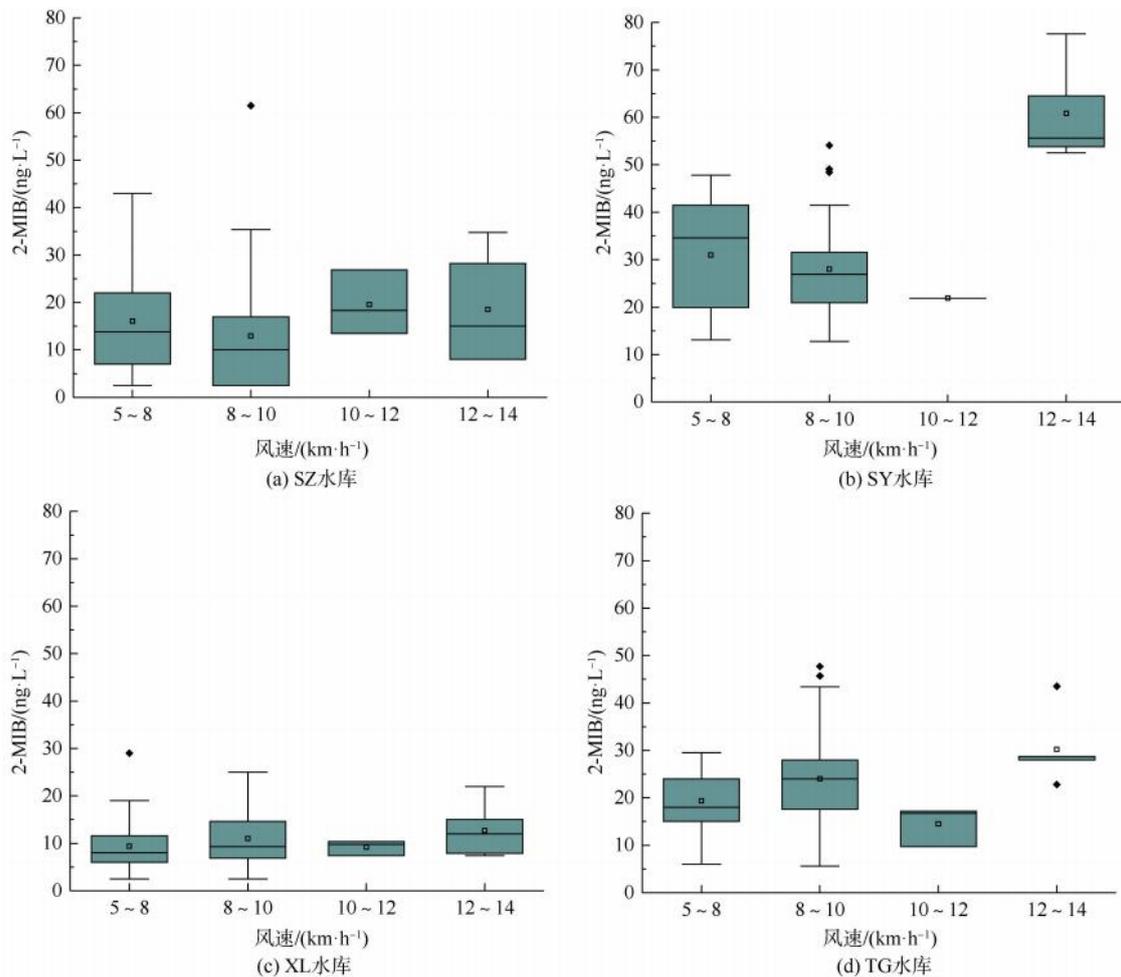


图 10 2-MIB 与风速关系

Fig. 10 Relationship between 2-MIB and Wind Speed

的吸附去除效果,但较难回收且价格昂贵,过量投加会造成粉末活性炭浪费的同时,也存在穿透滤池的风险^[18]。因此,需根据原水 2-MIB 浓度及时调整投加量,但受限于检测难度、检测频率的限值,水厂多采用固定投加量进行投加,投加量过低则有可能带来出水超标问题,投加量过高则造成浪费问题。

基于前文对 2-MIB 浓度变化规律、影响因素的分析及文献调研结果,认为可基于历史 2-MIB 检测结果及相关水质、气象、水文数据预测 2-MIB 浓度,为水厂调整粉末活性炭投加量提供参考。

4.2 数据 AI 应用方法

为保障模型输入数据的时效性及稳定性,除 2-MIB 历史检测结果由实验室管理系统(LIMS)抓取外,其他指标均采用在线监测结果,目前 SZ 水库、SY 水库、XL 水库、TG 水库已部署了水质、水文在线监测设备,气象信息可通过气象局获取,同时根据分析及

文献调研结果,对原始指标进行了特征衍生,具体如表 3 所示。

基于上述特征数据及其衍生数据,利用深水云脑 AI 平台所搭载的机器学习算法分别构建极端梯度提升模型(XGBoost)、轻量级梯度提升机模型(LightGBM)和类别特征提升模型(CatBoost)训练模型,并分别进行参数优化后采用集成学习方法,将 3 个模型的预测结果与传统时序模型(Prophet)模型进行集成,最终得到 2-MIB 浓度预测模型。

4.3 数据 AI 应用效果

模型已于 2023 年开始自动运行,各水库 2-MIB 实际检测结果与模型预测结果如图 11 所示。结果显示,模型预测结果整体变化趋势与实际趋势类似,预测结果的平均绝对误差为 4.83 ng/L,与基于多元线性回归的预警模型相比有所降低^[19],对于水厂工艺的调整、粉末活性炭投加量的确定具有较好的参

表 3 特征及其衍生方式
Tab. 3 Features and the Derivative Methods

指标	衍生方式
蓝绿藻密度	差分、阶段均值、方差、周级别变化、每 3、7、14 d 趋势
高锰酸盐指数	日均值、日极差
水温	差分、阶段均值、方差、周级别变化、每 3、7、14 d 趋势
溶解氧	日均值、日极差、日方差、前一周趋势
pH	日均值、日极差、日方差、每 3、7、14 d 趋势
气温	日均值、日极差、日方差、每 3、7、14 d 趋势
降水量	日总量、最大小时量
风速	日均值、日方差
水位	最大值、最小值、日均值、极差、
时间	提取月份、季节特征
历史 2-MIB 检测结果	2-MIB 趋势、增长率、时间衰减 2-MIB 统计值

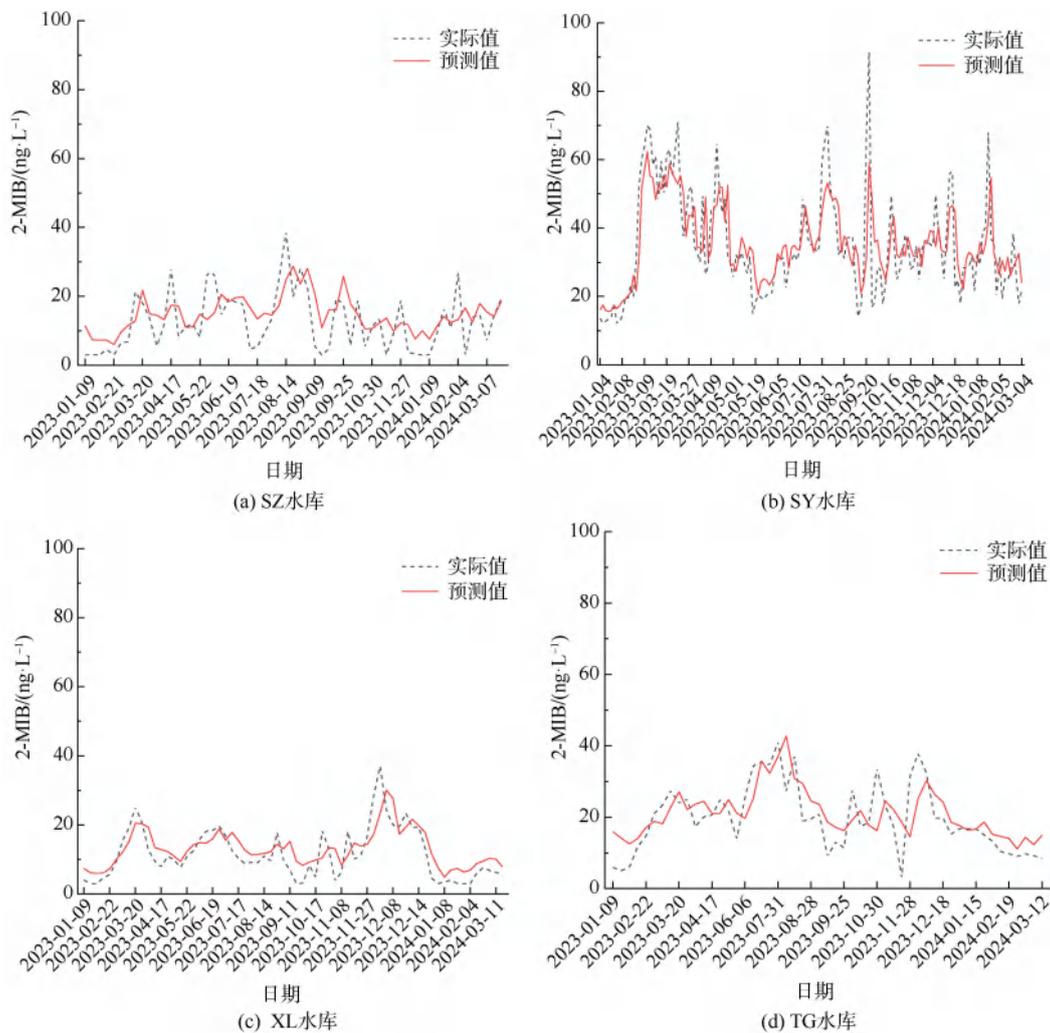


图 11 模型效果

Fig. 11 Renderings of the Model

考意义,有效消除因检测频次不足造成工艺调整不及时所引起的水质风险。但在某些异常高点仍则存

在偏差较大的情况,如 2023 年 9 月 21 日 SY 水库实际检测值为 91.5 ng/L,但模型预测结果为 58.94 ng/L,相差较多,分析认为可能是由于历史数据积累不足,且当日实际值已超过用于模型构建的 SY 水库历史数据范围(12.8~77.6 ng/L),该种情况可随着数据积累有所改善。

5 总结与展望

(1)深圳地区的 4 座水库间 2-MIB 浓度水平存在较大差异,平均质量浓度为 10.44~32.33 ng/L,各水库 2-MIB 浓度呈现一定的季节性波动规律,表现为每年秋季、春季浓度较高,夏季、冬季浓度水平最低。1 d 内 2-MIB 浓度水平也存在较大范围的波动(34.9~71.2 ng/L),具体表现为 05:00—17:00 浓度水平较高,夜间浓度水平较低,水厂需及时调整工艺以保障稳定达标。

(2)基于 2021 年—2022 年数据分析 2-MIB 浓度与水质、气象因素关系。结果表明:2-MIB 浓度水平与藻密度呈正相关关系;SZ 水库、SY 水库在 14~32 ℃时 2-MIB 浓度明显随水温升高而升高,XL 水库及 TG 水库则表现为 23~26 ℃的水温下 2-MIB 浓度最高;2-MIB 浓度水平与高锰酸盐指数呈正相关关系;气温在 23~26 ℃时 2-MIB 浓度较高;在 5~14 km/h 的风速下,随风速增加 2-MIB 浓度整体呈升高的趋势。

(3)深圳地区部分常规处理工艺水厂需通过投加粉末活性炭以保障出水 2-MIB 达标,为预判 2-MIB 浓度每日变化趋势以及及时调整粉末活性炭投加量,基于 2-MIB 变化规律及影响因素分析结果,结合机器学习算法构建原水 2-MIB 预测预警模型,该模型可预测未来 15 d 内 2-MIB 逐日浓度,平均误差达到 4.83 ng/L,可有效避免因检测频次不足造成工艺调整不及时的情况,从而降低水质风险。

参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022[S]. 北京:中国标准出版社, 2022.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standards for drinking water quality: GB 5749—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [2] 杜崇岭,秦新岭,王令刚,等. 季节性原水水质变化除臭应用实践[J]. 给水排水, 2022, 48(s1): 577-581.

- DU C L, QIN X L, WANG L G, et al. Deodorization application practice of seasonal source water quality change[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(s1): 577-581.
- [3] 高蕴成. 粉末活性炭-臭氧工艺去除水中嗅味中试研究[J]. 给水排水, 2022, 48(s1): 705-710.
GAO Y C. Pilot study on the removal of odor of water by powdered activated carbon zone process[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(s1): 705-710.
- [4] 张建芳,顾青青,符策竿,等. 某浅水湖型水源地土臭素(GSM)和 2-甲基异茨醇(2-MIB)的变化规律[J]. 净水技术, 2018, 37(11): 7-10.
ZHANG J F, GU Q Q, FU C G, et al. Variation regulation of geosmin(GSM) and 2-methylisoborneol(2-MIB) in a water source of shallow-lake type[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(11): 7-10.
- [5] 张锦鹏. 基于 EFDC 模型的洱海水动力-水质数值模拟[D]. 北京:中国环境科学研究院, 2020.
ZHANG J P. Numerical simulation of hydrodynamic-water quality in Lake Erhai based on EFDC model[D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2020.
- [6] 陈克云. 水体藻源嗅味物质产生特征与生物降解研究[D]. 济南:山东师范大学, 2010.
CHEN K Y. Research on the production characteristics and biodegradation of odor substances derived from algae in water[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2010.
- [7] 陈晓萌. 上海 H 水厂二甲基异茨醇和土臭素年变化规律及其影响因素探索[J]. 净水技术, 2022, 41(s2): 1-7, 41.
CHEN X M. Exploration on the annual variation laws and influencing factors of 2-methylisoborneol and geosmin in WTP H of Shanghai[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s2): 1-7, 41.
- [8] SU M, YU J W, ZHANG J Z, et al. MIB producing cyanobacteria (*Planktothrix* sp.) in a drinking water reservoir: Distribution and odor producing potential[J]. Water Research, 2015, 68: 444-453. DOI: 10.1016/j.watres.2014.09.038.
- [9] 邵晨,黎雷,于水利,等. 产嗅藻类对东太湖某地原水中嗅味物质 2-MIB 的贡献[J]. 中国环境科学, 2014, 34(9): 2328-2333.
SHAO C, LI L, YU S L, et al. Contribution of algae on the occurrence of odor and taste compound 2-MIB in drinking water source of East Tai Lake[J]. China Environmental Science, 2014, 34(9): 2328-2333.
- [10] 成建国,马力通,赵文渊,等. 环境因素对淡水浮丝藻生长及产生嗅味的影响[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(2): 70-76.
CHENG J G, MA L T, ZHAO W Y, et al. The influence of environmental factors on the growth and odor production of freshwater filamentous algae[J]. Journal of Hydroecology, 2022, 43(2): 70-76.

- [11] 杨琛, 李强. 北方中小河流春季 pH 值和高锰酸盐指数超标情况分析与对策[J]. 中国新技术新产品, 2020(17): 134-135.
YANG C, LI Q. Analysis and countermeasures of exceeding the pH value and permanganate index in spring of small and medium-sized rivers in northern China [J]. New Technology & New Products of China, 2020(17): 134-135.
- [12] 石文平, 朱佳, 张朝升, 等. 水库浅水区底泥营养物质释放与藻类生长关系研究[J]. 环境工程, 2015, 33(5): 75-80.
SHI W P, ZHU J, ZHANG C S, et al. Relationship between sediment nutrient release and algae growth in the shallow area of the reervoir[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(5): 75-80.
- [13] WANG Z J, LI R H. Effects of light and temperature on the odor production of 2-methylisoborneol-producing *Pseudanabaena* sp. and geosmin-producing *Anabaena ucrainica* (cyanobacteria)[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2015, 58: 219-226. DOI: 10.1016/j.bse.2014.12.013.
- [14] GAO J S, ZHU J, WANG M W, et al. Dominance and growth factors of *Pseudanabaena* sp. in drinking water source reservoirs, Southern China [J]. Sustainability, 2018, 10(11): 393611. DOI: 10.3390/su10113936.
- [15] WANG H, ZHANG Z Z, LIANG D F, et al. Separation of wind's influence on harmful cyanobacterial blooms[J]. Water Research, 2016, 98(1): 280-292.
- [16] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟, 等. 风浪对太湖水体中胶体态营养盐和浮游植物的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 506-511.
SUN X J, QIN B Q, ZHU G W, et al. Effect of wind-induced wave on concentration of colloidal nutrient and phytoplankton in Lake Taihu [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2007, 28(3): 506-511.
- [17] 尚帅. 温度、光照对长江口几种优势藻类生长的影响研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2017.
SHANG S. Study on influence of temperature and light on the growth of several dominant algae in Yangtze River estuary[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2017.
- [18] 邱爱华, 牟小林, 宋思杨, 等. 粉末活性炭在上海市饮用水处理中的应用[J]. 净水技术, 2017, 36(7): 5-12.
QI A H, MOU X L, SONG S Y, et al. Application of powdered activated carbon in drinking water treatment in Shanghai City [J]. Water Purification Technology, 2017, 36(7): 5-12.
- [19] 代倩子, 季冠宁, 徐兆安, 等. 基于多元线性回归对太浦河水源地 2-MIB 的预警研究[C]. 北京: 2022 中国水利学术大会论文集(第二分册), 2022.
DAI Q Z, JI G N, XU Z A, et al. Study on early warning of 2-MIB in Taipu River water source based on multiple linear regression[C]. Beijing: Proceedings of the 2022 China Water Conservancy Academic Conference, 2022.

(上接第 63 页)

- [12] 白泽升, 王孟鸿, 王世方. 平稳风荷载的数值模拟及 CFD 应用[J]. 建筑结构, 2021, 51(s2): 248-252.
BAI Z S, WANG M H, WANG S F. Numerical simulation of the stationary wind load and the application of CFD [J]. Building Structure, 2021, 51(s2): 248-252.
- [13] 冯觉民, 蒋继申, 胡修国. 现代化净水厂技术手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
FENG J M, JIANG J S, HU X G. Technical manual of modern water purification plant [M]. Beijing: China State Construction, Engineering and Construction Industry Press, 2013.
- [14] 戴红玲. 基于 Fluent 流场分析与机器视觉絮体检测的微涡流絮凝工艺优化研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
DAI H L. Study on the optimization of micro-vortex flocculation process based on fluent flow field analysis and machine vision flocs detection [D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [15] 常青. 絮凝动力学的现状与研究方法进展[J]. 环境科学学报, 2015, 35(10): 3042-3049.
CHANG Q. Current status and research method progress of flocculation dynamics [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(10): 3042-3049.
- [16] 张新喜, 冯承民, 胡旭亮, 等. 基于 Fluent 软件的往复折流式调质池的特性数值模拟优化设计[J]. 净水技术, 2022, 41(10): 97-106.
ZHANG X X, FENG C M, HU X L, et al. Numerical simulation of the model based on fluent software [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(10): 97-106.
- [17] 于利伟. 三相流管道输送试验与数值模拟分析研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
YU L W. Transportation test and numerical simulation analysis of three-phase flow pipeline [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [18] 张新喜, 邱高, 钟梅英, 等. 基于 Fluent 流场模拟的絮凝剂加药管结构改进研究[J]. 给水排水, 2022, 48(9): 7-12.
ZHANG X X, QIU G, ZHONG M Y, et al. Study on structural improvement of Flocculant drug addition tube based on Fluent flow field simulation [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(9): 7-12.