

太湖叶绿素 a 质量浓度年际变化特征及其对多因子协同的响应

张中天^{1,2},袁海钰²,许强¹,陈鹤翔²,杨文海³,唐仁¹

(1. 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司规划分院,江苏 苏州 215006; 2. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 3. 华北水利水电大学水利学院,河南 郑州 450046)

摘要:基于太湖 2005—2022 年实测数据,采用 Mann-Kendall 检验法和 BP 神经网络模型,分析了叶绿素 a 质量浓度的年际变化特征及其对水文水动力因子(水位、风速、降水)、生源物质因子(总氮、总磷、COD_{Mn})和热能因子(气温、日照时长、总辐射)的协同响应。结果表明:2005 年以来叶绿素 a 质量浓度呈上升趋势,2015—2022 年的平均质量浓度比 2005—2014 年增长约 95%,但从 2020 年起叶绿素 a 质量浓度峰值出现下降趋势;叶绿素 a 质量浓度变化过程对总辐射、水位与气温因子协同作用的敏感性最高,热能因子对叶绿素 a 质量浓度变化过程的影响最为显著。

关键词:叶绿素 a;多因子分析;Mann-Kendall 检验;BP 神经网络;太湖

中图分类号:X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)03-0093-06

Interannual variation characteristics of chlorophyll-a mass concentration in Taihu Lake and its synergistic responses to multiple factors//ZHANG Zhongtian^{1,2}, YUAN Haiyu², XU Qiang¹, CHEN Hexiang², YANG Wenhai³, TANG Ren¹(1. Planning Branch, Jiangsu Taihu Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Suzhou 215006, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)
Abstract: Based on measured data of Taihu Lake from 2005 to 2022, the Mann-Kendall test and BP neural network model were used to analyze the interannual variation characteristics of chlorophyll-a mass concentration and its synergistic response to hydrodynamic factors (water level, wind speed, precipitation), nutrient factors (total nitrogen, total phosphorus, COD_{Mn}), and thermal factors (air temperature, daylight duration, total radiation). The results show that the chlorophyll-a mass concentration has shown an upward trend since 2005, with the average mass concentration from 2015 to 2022 being about 95% higher than that from 2005 to 2014. However, the peak mass concentration of chlorophyll-a has exhibited a declining trend since 2020. The variation process of chlorophyll-a mass concentration shows the highest sensitivity to the synergistic effects of total radiation, water level, and air temperature. The thermal factors have the most significant impact on the variation process of chlorophyll-a mass concentration.
Key words: chlorophyll-a; multi-factor analysis; Mann-Kendall test; BP neural network; Taihu Lake

太湖周边地区人类活动频繁,输入湖泊的营养物质质量大^[1-4],加之近年来太湖及周边地区的水文气象条件发生了很大变化,加剧了太湖的富营养化,导致太湖水域经常发生由蓝藻引起的水华^[1,5-6]。作为蓝藻的指示性标志物,太湖的叶绿素 a 常用于预测蓝藻水华的发生^[7],其质量浓度的增大通常伴随着蓝藻的生长和蓝藻水华的发生^[8-10]。

蓝藻水华由蓝藻过度生长和聚集形成,通常在水体中形成大量藻类聚集体,呈现为绿色、蓝绿色或

棕色,太湖地区的叶绿素 a 质量浓度与蓝藻水华的形成密切相关^[9-12]。蓝藻生物量的增加会导致湖水的氧耗上升,抑制湖中其他异养生物的生长和繁殖。水面上的蓝藻在水华期间可以遮挡阳光,抑制水下植物的光合作用。研究表明,太湖地区的浮游植物对水体透明度的贡献可达 10%~15%,夏季甚至可以达到 20%^[13]。因此蓝藻水华会破坏湖泊生态系统稳定性,并加剧水污染和富营养化^[14]。

太湖中的水文气象特征和生源物质的丰度是决

基金项目:国家自然科学基金项目(52309090);江苏省水利科技项目(2023002)
作者简介:张中天(1991—),男,工程师,博士,主要从事环境水力学研究。E-mail:zhongtian_zhang@163.com
通信作者:陈鹤翔(1997—),男,博士,主要从事环境水力学研究。E-mail:chenhx@hhu.edu.cn

定藻类水华的规模、程度和持续时间的两个主要因素^[15-18]。就水文气象的变化而言,气温上升将可能导致太湖水温升高,从而影响蓝藻的生长期和生长速率。升高的水温有利于提高蓝藻的生长速率和生产力,并可能延长蓝藻的生长期^[19-20]。另外,气候极端事件(如暴雨、干旱和高温)频率和强度的增大可能直接或间接影响太湖的蓝藻生态系统^[21],导致水位、水动力条件、光照条件等的变化,从而影响蓝藻的生长和水华的形成^[22-24]。例如 Qin 等^[25]研究发现,尽管自 2007 年以来采取了减排措施,但由于气候异常,特别是 2016 年的洪水和 2016—2017 年的暖冬,导致蓝藻水华持续存在,表明区域水文气象原因促进了太湖的蓝藻水华发生。就生源物质而言,水体中过量的氮和磷等营养物质可以刺激蓝藻的生长,为蓝藻水华的发生提供物质基础^[26-30]。水文气象特征和生源物质是共同影响太湖蓝藻变化趋势的^[21],如 Zou 等^[31]发现 2005—2020 年太湖的叶绿素 a 对生源物质的敏感性逐月增大,其主要原因就是受水温升高、风速降低等水文气象因子的影响。

因此,选取叶绿素 a 为标志物,深入研究太湖蓝藻的演变趋势及其与环境因子之间的关系,对于科学理解太湖水环境演变规律、有效预测和应对水华暴发具有重要意义。本文采用人工神经网络等多种数据预测和分析方法,分析了 2005—2022 年太湖叶绿素 a 质量浓度的年际变化趋势及其对水文水动力因子、生源物质因子和热能因子的协同响应,以期为太湖水环境保护和生态修复提供参考。

1 数据来源与分析方法

1.1 数据来源

本文分析采用的数据包括太湖的叶绿素 a 质量浓度、水位、风速、降水、总氮、总磷、COD_{Mn}、气温、日照时长、总辐射等环境因子数据,时间跨度为 2005—2022 年,为季均数据。其中气象数据来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>),水质数据来自中国科学院南京地理与湖泊研究所长期监测数据。本文利用上述水文水动力因子(水位、风速、降水)、生源物质因子(总氮、总磷、COD_{Mn})和热能因子(气温、日照时长、总辐射)分析不同类别环境因子对叶绿素 a 质量浓度的影响。

1.2 分析方法

太湖叶绿素 a 质量浓度的长期变化趋势采用 Mann-Kendall (M-K) 检验法进行分析。考虑到太湖不同环境因子与叶绿素 a 质量浓度之间的复杂非线性关联,采用 BP 神经网络模型来预测太湖叶绿素 a 质量浓度的变化趋势,同时引入损失函数来分析叶

绿素 a 质量浓度对以上 3 类环境因子的响应关系。损失函数的定义如下:

$$F = \frac{1}{n} \sum (y_1 - y_2)^2 \tag{1}$$

式中: F 为损失函数; n 为样本数; y_1 为模拟值; y_2 为真实值。

2 结果与分析

2.1 叶绿素 a 质量浓度演变趋势分析

由图 1 可知,太湖叶绿素 a 质量浓度在 2005—2022 年的长期趋势表现为增长,2005—2014 年叶绿素 a 平均质量浓度为 17.9 $\mu\text{g/L}$,2015—2022 年为 34.9 $\mu\text{g/L}$,增长幅度约为 95%。各年质量浓度的峰值呈增长趋势,谷值变化较为平缓,无明显上升或下降趋势,但在 2019 年之后峰值质量浓度有明显的下降(图 1)。对比图 1 中的模拟值和实测值可知两者吻合程度较高,表明了构建的 BP 神经网络模型的可靠性。

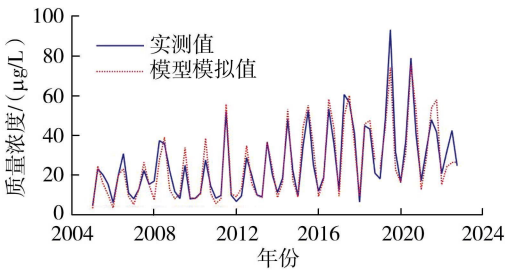
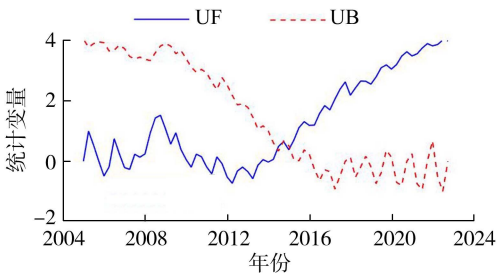
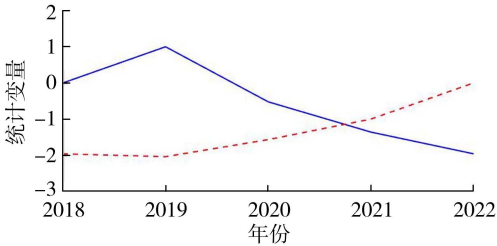


图 1 叶绿素 a 质量浓度变化趋势

由图 2(a)可知,2005—2017 年 M-K 检验的 UF 值在-1.96~1.96 之间波动,说明太湖在该时段内叶绿素 a 质量浓度没有显著变化;2015 年以后 UF 和 UB 曲线出现交点,说明此时叶绿素 a 质量浓度



(a) 2005—2022 年



(b) 2018—2022 年

图 2 叶绿素 a 质量浓度变化趋势的 M-K 检验

的年际变化趋势已由之前的保持平稳转变为开始上升;2017年后UF值高于1.96,说明近年来叶绿素a质量浓度呈现显著上升趋势。由图2(b)可知,2019年后叶绿素a的质量浓度开始呈现下降趋势,转折点出现在2021年附近。

2.2 不同类型环境因子对叶绿素a质量浓度演变趋势的影响

为探究不同类型环境因子对太湖叶绿素a质量浓度变化的影响,采用BP神经网络模型对水文水动力因子、生源物质因子和热能因子3大类主要环境因子分别开展了去除某类环境因子时的叶绿素a质量浓度演变趋势分析,结果如图3和图4所示。

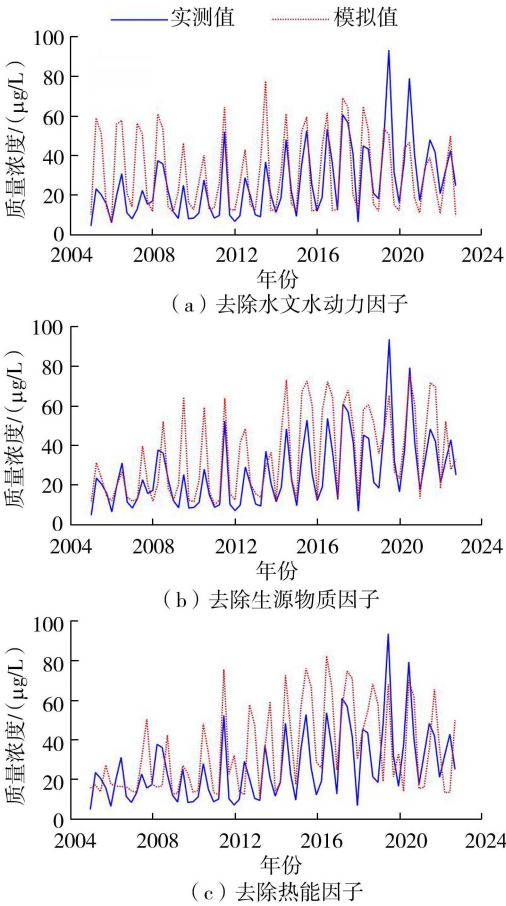


图3 去除不同类型环境因子时的叶绿素a质量浓度变化趋势

a. 当去除水文水动力因子时(图3(a)),与实测值相比,叶绿素a质量浓度模拟值变化过程改变非常显著,且年际差异明显减小,其中2005—2009年相较于实测值有所上升,2015—2020年则有所下降。M-K检验结果(图4(a))表明,UF在整个时段内在-1.96~1.96之间波动,并多次交叉,说明太湖叶绿素a质量浓度无显著变化,这与实测值的变化趋势存在明显差异。

b. 当去除生源物质因子时(图3(b)),与实测值相比,叶绿素a质量浓度模拟值变化过程整体改

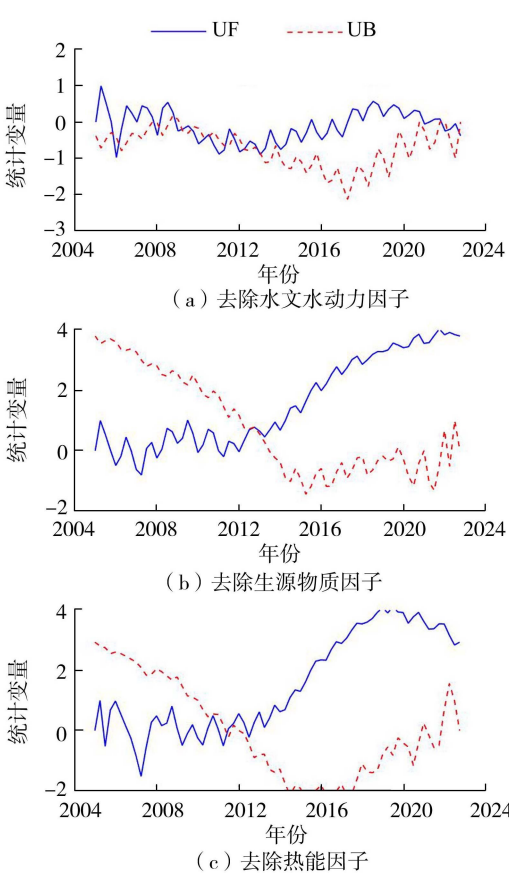


图4 去除不同类型环境因子时的叶绿素a质量浓度变化趋势的M-K检验

变幅度较小,其中2005—2008年与实测值基本持平,2009—2022年大部分年份都略高于实测值。M-K检验结果(图4(b))表明,2005—2016年UF值在-1.96~1.96之间波动,说明该时段内太湖叶绿素a质量浓度没有显著变化;UF和UB曲线交点出现在2014年附近,说明此时叶绿素a的年际变化趋势已由之前的保持平稳转变为开始下降;2016年后UF值高于1.96,说明叶绿素a质量浓度呈现显著上升趋势。对比图2(a)和图4(b),可以得出它们的整体趋势大致相同,略有差异的地方在UF和UB曲线交点提前2a左右。

c. 当去除热能因子时(图3(c)),与实测值相比,叶绿素a质量浓度模拟值变化过程改变也较为显著,其中2005—2006年和2019—2020年叶绿素a质量浓度总体上比实测值低,2007—2018年总体上比实测值高,2021—2022年总体上与实测值持平。M-K检验结果(图4(c))表明,2005—2016年UF值在-1.96~1.96之间波动,说明该时段内太湖叶绿素a质量浓度没有显著变化;UF和UB曲线交点出现在2012年附近,说明此时叶绿素a质量浓度的年际变化趋势已由之前的保持平稳转变为开始下降;2016年后UF值高于1.96,说明叶绿素a质量浓度呈现显著上升趋势。对比图2(a)和图4(c))可知,整

体趋势略有差异,主要在于趋势转折点及显著增长起始点均表现为提前 1~3 a。

2.3 叶绿素 a 质量浓度对单因子的响应关系

为精细刻画太湖叶绿素 a 质量浓度变化对单一环境因子的响应关系,本文计算了去除单个环境因子时对应 BP 神经网络模型模拟值的损失函数和叶绿素 a 质量浓度与各因子间的相关系数,结果如表 1 所示。

表 1 叶绿素 a 质量浓度对各环境因子的响应关系

环境因子	损失函数	相关系数	环境因子	损失函数	相关系数
水位	0.42	0.67	COD _{Mn}	0.46	0.45
风速	0.28	-0.06	气温	0.26	0.67
降水	0.52	0.37	日照时长	0.29	0.44
总氮	0.26	-0.50	总辐射	0.54	0.48
总磷	0.35	0.24			

由表 1 可见,去除各环境因子时对应 BP 神经网络模型模拟值的损失函数,以去除总辐射为最大(0.54),其次是降水(0.52),这表明叶绿素 a 的质量浓度变化趋势对总辐射和降水非常敏感。如果单独去除水位、总磷和 COD_{Mn},其损失函数都介于 0.3~0.5 之间,这表明叶绿素 a 质量浓度变化趋势对这 3 个因子的敏感程度中等。如果单独去除风速、总氮、气温和日照时长,其损失函数都低于 0.3,表明叶绿素 a 质量浓度变化趋势对这些因子都不敏感。

从叶绿素 a 与各环境因子的相关系数(表 1)来看,叶绿素 a 质量浓度与水位、COD_{Mn}、气温、日照时长、总辐射为中等正相关性(相关系数在 0.4~0.7 之间),与降水和总磷为弱正相关性(相关系数在 0.2~0.4 之间),与总氮为中等负相关性(相关系数在 -0.7~-0.4 之间),这是由于主导因子与非主导因子之间的不同所导致的,例如总氮与总磷之间的主导作用,并不代表总氮对叶绿素 a 质量浓度不起作用^[31-33];叶绿素 a 质量浓度与风速为微弱负相关性(相关系数在 -0.2~0 之间),这是由于太湖水动力主导因子为风生流,在高流速时段太湖蓝藻不易形成聚集,因此水华形成较为困难^[34-36]。

2.4 叶绿素 a 质量浓度对多因子协同作用的响应关系

如前所述,太湖水文水动力因子与叶绿素 a 质量浓度相关性较高,因此本文选取水位、风速、降水 3 个环境因子进行叶绿素 a 质量浓度对多因子协同的响应分析,结果如图 5 所示。由图 5 可知,去除的水文水动力因子越多,损失函数越大,这是由于太湖蓝藻发展趋势受到水文水动力因子的综合影响^[37-38]。当去除降水因子时(图 5(a)),模型模拟

值与实测值整体相差较小,仅个别年份相差较大;当去除风速、降水因子时(图 5(b)),大部分年份的模拟值均与实测值出现了一定的偏差,但整体趋势并未发生明显改变;当同时去除水位、风速、降水因子时(图 5(c)),模拟值与实测值出现了较大偏差,无法体现叶绿素 a 质量浓度在 2005—2022 年出现的增长态势。

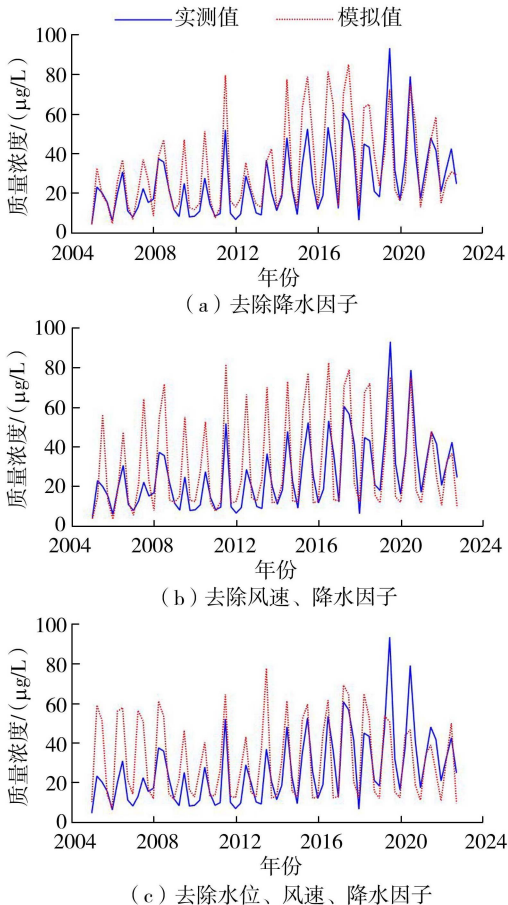


图 5 去除不同环境因子时的叶绿素 a 质量浓度变化趋势

进一步地,为了解环境因子间协同作用对叶绿素 a 质量浓度变化的影响,分别计算了不同环境因子间两两组合并同时去除时,对应的损失函数(图 6)。结果表明,水位、风速、气温、总辐射 4 个环境因子与其余环境因子协同作用时,损失函数较大。其中水位与气温协同作用时损失函数最大(1.50),水位与总辐射协同作用时损失函数次之(1.20),气温与总辐射协同作用时损失函数再次之(0.93),说明总辐射、水位、气温三者间协同作用对叶绿素 a 质量浓度的变化过程影响非常大,这是由于水位和气温条件与季节相对应,通常情况下高水位条件与高温季节相对应(夏季),而高温季节是蓝藻生长的最佳时期,且水位与气温均与叶绿素 a 质量浓度呈正相关关系(表 1)。

在分别去除水文水动力因子、生源物质因子、热

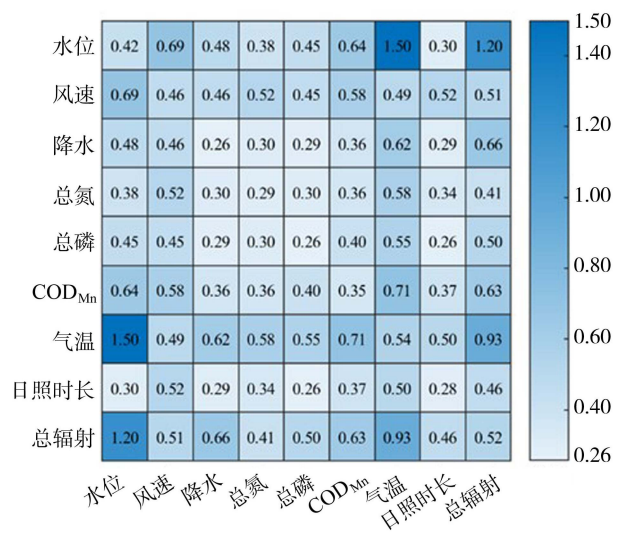


图 6 去除任意双因子组合时的损失函数

能因子 3 大类环境因子的情况下,损失函数分别为 0.70、0.40、0.78,其中去除热能因子的损失函数最大,说明热能因子与叶绿素 a 质量浓度的相关性最大,去除水文水动力因子次之,生源物质因子与叶绿素 a 质量浓度的相关性最小。这是由于热能因子中的 3 个环境因子(气温、日照时长和总辐射)与季节变化高度相关,而蓝藻的生长与死亡规律恰好呈现出季节性特征,通常表现为夏季生长旺盛而冬季衰退的趋势^[39-40]。

3 结 论

a. 2005—2022 年太湖叶绿素 a 质量浓度整体呈上升趋势,2015—2022 年平均质量浓度比 2005—2014 年增长约 95%,但在 2020 年后其峰值质量浓度出现了明显下降。

b. 对于单因子的作用,太湖叶绿素 a 质量浓度变化对总辐射和降水的敏感性最高;对于双因子的协同作用,叶绿素 a 质量浓度变化过程对水位与气温 2 个环境因子协同作用的敏感性最高。

c. 2015—2022 年长序列过程中,太湖叶绿素 a 质量浓度变化过程对不同类型环境因子的响应程度不同,其中对热能因子最为敏感,其次是水文水动力因子,对生源物质因子的敏感性最小。

参考文献:

[1] TANG Chunyan, LI Yiping, ACHARYA K. Modeling the effects of external nutrient reductions on algal blooms in hyper-eutrophic Lake Taihu, China [J]. Ecological Engineering, 2016, 94: 164-173.

[2] LIAN Huishu, LEI Qiuliang, ZHANG Xinyu, et al. Effects of anthropogenic activities on long-term changes of nitrogen budget in a plain river network region: a case

study in the Taihu Basin [J]. Science of the Total Environment, 2018, 645: 1212-1220.

[3] 王延贵, 吴钰川, 刘焕永, 等. 南方主要河流水沙变化及人类活动的影响 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (5): 16-22. (WANG Yangui, WU Yuchuan, LIU Huanyong, et al. Variations of water and sediment and impact of human activities in major rivers in southern China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (5): 16-22. (in Chinese))

[4] 崔雪梅. 基于灰色 GA-LM-BP 模型的 COD_{Mn} 预测 [J]. 水利水电科技进展, 2013, 33 (5): 38-41. (CUI Xuemei. Prediction of COD_{Mn} value based on the grey GA-LM-BP model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (5): 38-41. (in Chinese))

[5] DUAN Hongtao, LOISELLE S A, ZHU Li, et al. Distribution and incidence of algal blooms in Lake Taihu [J]. Aquatic Sciences, 2015, 77 (1): 9-16.

[6] HUANG Changchun, LI Yunmei, YANG Hao, et al. Detection of algal bloom and factors influencing its formation in Taihu Lake from 2000 to 2011 by MODIS [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71 (8): 3705-3714.

[7] 徐海波, 吴金华, 任小龙, 等. 基于固定式 ADCP 的陈东港污染物通量计算 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (6): 178-185. (XU Haibo, WU Jinhua, REN Xiaolong, et al. Calculation of pollutant influx of the Chendong River based on fixed ADCP [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (6): 178-185. (in Chinese))

[8] LI Yiping, TANG Chunyan, YU Zhongbo, et al. Correlations between algae and water quality: factors driving eutrophication in Lake Taihu, China [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2014, 11 (1): 169-182.

[9] JIA Yuhong, JOHNSON D, ZHANG Min, et al. Growth characteristics of algae during early stages of phytoplankton bloom in Lake Taihu, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25 (2): 254-261.

[10] ZHANG Yuchao, LIN Shan, QIAN Xin, et al. Temporal and spatial variability of chlorophyll a concentration in Lake Taihu using MODIS time-series data [J]. Hydrobiologia, 2011, 661 (1): 235-250.

[11] 王婕, 吴挺峰, 丁艳青. 富春江水库变动回水区蓝藻水华成因初探 [J]. 水电能源科学, 2019, 37 (2): 51-54. (WANG Jie, WU Tingfeng, DING Yanqing. Preliminary study on causes of cyanobacteria blooms in fluctuating backwater area of Fuchunjiang Reservoir [J]. Water Resources and Power, 2019, 37 (2): 51-54. (in Chinese))

[12] 孙飞飞, 尹桂平, 范成新, 等. 藻华聚积及污水入流对太湖上下层水体营养盐含量的影响 [J]. 水利水电科技进展, 2010, 30 (5): 24-28. (SUN Feifei, YIN Guiping, FAN Chengxin, et al. Influences of alga accumulation and

- wastewater discharge on content of aqueous nutrients in Taihu Lake[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2010,30(5):24-28. (in Chinese))
- [13] ZHANG Yunlin,ZHANG Bing,WANG Xin,et al. A study of absorption characteristics of chromophoric dissolved organic matter and particles in Lake Taihu, China[J]. Hydrobiologia,2007,592(1):105-120.
- [14] JAMES C, FISHER J, RUSSELL V, et al. Nitrate availability and hydrophyte species richness in shallow lakes[J]. Freshwater Biology,2005,50(6):1049-1063.
- [15] DENG Jianming,TANG Xiangming,QIN Boqiang, et al. Decreasing nitrogen loading and climate change promotes the occurrence of nitrogen-fixing cyanobacteria in a restored city lake [J]. Hydrobiologia, 2020, 847 (13): 2963-2975.
- [16] PAERL H W,HAVENS K E,HALL N S,et al. Mitigating a global expansion of toxic cyanobacterial blooms: confounding effects and challenges posed by climate change [J]. Marine and Freshwater Research, 2020, 71 (5): 579-592.
- [17] XU Hai, PAERL H W, ZHU Guangwei, et al. Long-term nutrient trends and harmful cyanobacterial bloom potential in hypertrophic Lake Taihu, China [J]. Hydrobiologia, 2017,787:229-242.
- [18] 吕翔宇,朱梦圆,马永山,等. 太湖流域典型水源水库藻类水华的促发条件[J]. 湖泊科学,2023,35(5):1516-1528. (LYU Xiangyu,ZHU Mengyuan,MA Yongshan,et al. Driving factors of algal blooms in drinking-water reservoirs in Lake Taihu Basin [J]. Journal of Lake Sciences,2023,35(5):1516-1528. (in Chinese))
- [19] LIU Xia, LU Xiaohua, CHEN Yuwei. The effects of temperature and nutrient ratios on *Microcystis* blooms in Lake Taihu, China: an 11-year investigation [J]. Harmful Algae,2011,10(3):337-343.
- [20] 康丽娟,朱广伟,邹伟,等. 高温干旱背景下太湖藻情变化特征及机制[J]. 湖泊科学,2023,35(6):1866-1880. (KANG Lijuan,ZHU Guangwei,ZOU Wei, et al. Dynamics and mechanism of cyanobacterial blooms in Lake Taihu reacted extreme drought and warming [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35 (6): 1866-1880. (in Chinese))
- [21] 朱伟,吕艺,薛宗璞,等. 2020 年太湖流域洪水及太湖总磷变化趋势分析[J]. 水资源保护,2023,39(6):16-22. (ZHU Wei,LYU Yi,XUE Zongpu,et al. Analysis of Taihu Lake Basin flood in 2020 and total phosphorus change trend in Taihu Lake [J]. Water Resources Protection,2023,39(6):16-22. (in Chinese))
- [22] WU Tingfeng, QIN Boqiang, ZHU Guangwei, et al. Dynamics of cyanobacterial bloom formation during short-term hydrodynamic fluctuation in a large shallow, eutrophic, and wind-exposed Lake Taihu, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20 (12): 8546-8556.
- [23] WANG X J,LIU R M. Spatial analysis and eutrophication assessment for chlorophyll a in Taihu Lake [J]. Environmental Monitoring and Assessment,2005,101(1/2/3):167-174.
- [24] 郑锦涛,陈伏龙,张鑫厚,等. 新疆玛纳斯河年径流频率分析[J]. 水利水电科技进展,2018,38(1):68-74. (ZHENG Jintao,CHEN Fulong,ZHANG Xinhou, et al. Annual runoff frequency analysis of the Manas River in Xinjiang [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(1):68-74. (in Chinese))
- [25] QIN Boqiang, DENG Jianming, SHI Kun, et al. Extreme climate anomalies enhancing cyanobacterial blooms in eutrophic Lake Taihu, China [J]. Water Resources Research,2021,57(7):e2020WR029371.
- [26] SONG Qixuan, HUANG Suzhen, YANG Shuai, et al. Relationship between algal bloom and phosphorus in water environment in Zhushan Bay,Taihu Lake[J]. Water, Air, & Soil Pollution,2024,235(1):69.
- [27] WANG Jiehua,BAI Xiuling,LI Wenchao,et al. Variations of sediment organic phosphorus and organic carbon during the outbreak and decline of algal blooms in Lake Taihu, China[J]. Journal of Environmental Sciences,2024,139:34-45.
- [28] WU Pan,QIN Boqiang,YU Ge,et al. Effects of nutrient on algae biomass during summer and winter in inflow rivers of Taihu Basin, China [J]. Water Environment Research, 2016,88(7):665-672.
- [29] YAO Xiaolong, ZHANG Yunlin, ZHANG Lu, et al. Emerging role of dissolved organic nitrogen in supporting algal bloom persistence in Lake Taihu, China: emphasis on internal transformations [J]. Science of the Total Environment,2020,736:139497.
- [30] 曹晶,田泽斌,储昭升,等. 太湖蓝藻水华暴发的氮磷控制阈值分析[J]. 湖泊科学,2022,34(4):1075-1089. (CAO Jing,TIAN Zebin,CHU Zhaosheng,et al. Nitrogen and phosphorus control thresholds of cyanobacterial blooms in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2022,34(4):1075-1089. (in Chinese))
- [31] ZOU Wei, ZHU Guangwei, XU Hai, et al. Temporal dependence of chlorophyll a-nutrient relationships in Lake Taihu: drivers and management implications[J]. Journal of Environmental Management,2022,306:114476.
- [32] KANG Lijuan, ZHU Mengyuan, ZHU Guangwei, et al. Decreasing denitrification rates poses a challenge to further decline of nitrogen concentration in Lake Taihu, China [J]. Water Research,2024,256: 121565.

(下转第 110 页)

- concrete gravity dams including dam-water-foundation interaction[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(8):04014202.
- [8] 唐嘉博,马刚,涂承义,等. 基于 Cosserat 理论的三维弹塑性模型及其在重力坝抗滑稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(8): 1702-1712. (TANG Jiabo, MA Gang, TU Chengyi, et al. Three-dimensional elastic-plastic model based on Cosserat theory and its application in anti-sliding stability analysis of gravity dams [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(8): 1702-1712. (in Chinese))
- [9] 刘银勇,林潮宁,刘晓青,等. 基于有限元重力坝抗滑稳定静动力可靠度快速求解方法[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(6): 8-13. (LIU Yinyong, LIN Chaoning, LIU Xiaoqing, et al. Fast solution method for static and dynamic reliability of gravity dam anti-sliding stability based on Finite Element Method [J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2023, 45(6): 8-13. (in Chinese))
- [10] 佟大威,杨传会,余佳,等. 基于 XGBoost-PSO 的混凝土重力坝体型多目标优化设计[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 91-98. (TONG Dawei, YANG Chuanhui, YU Jia, et al. Multi-objective shape optimization of concrete gravity dam based on XGBoost-PSO [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(3): 91-98. (in Chinese))
- [11] 张社荣,张耀飞,王超,等. 基于统一场景的重力坝极端动力灾害链传递混合模拟方法[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 1-9. (ZHANG Sherong, ZHANG Yaofei, WANG Chao, et al. Hybrid simulation method of extreme dynamic disaster chain transfer for gravity dams based on unified scene [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 1-9. (in Chinese))
- [12] 韩彰,苏怀智,李慧. 考虑渗流体力的某大坝地震响应仿真分析[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(2): 70-76. (HAN Zhang, SU Huaizhi, LI Hui. Simulation analysis of seismic response for a dam considering seepage force [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(2): 70-76. (in Chinese))
- [13] 何梦佳,陈波,刘庭赫,等. 基于有限元分析的特高拱坝实时风险率模型[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 113-122. (HE Mengjia, CHEN Bo, LIU Tinghe, et al. Real-time risk rate model for extra-high arch dams based on finite element analysis [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 113-122. (in Chinese))
- [14] 程井,韦锦鹏,李宗樾,等. 基于 Neumann 展开随机有限元的混凝土重力坝结构可靠度分析[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 46-50. (CHENG Jing, WEI Jinpeng, LI Zongyue, et al. Structure reliability analysis of concrete gravity dams using Neumann expansion stochastic finite element method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 46-50. (in Chinese))
- [15] 王良琛. 混凝土坝地震动力分析[M]. 北京:地震出版社, 1981.

(收稿日期:2024 - 05 - 27 编辑:俞云利)

(上接第 98 页)

- [33] XU Hai, PAERL H W, QIN Boqiang, et al. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China [J]. Limnology and Oceanography, 2010, 55(1): 420-432.
- [34] HUANG Lei, FANG Hongwei, HE Guojian, et al. Effects of internal loading on phosphorus distribution in the Taihu Lake driven by wind waves and lake currents [J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 760-773.
- [35] XUE Zongpu, ZHU Wei, CHENG Lin, et al. Wind-driven hydrodynamic characteristics of Lake Taihu, a large shallow lake in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(17): 26123-26140.
- [36] 丁文浩,李云,徐世凯,等. 变化风场下太湖表层湖流特征及其对蓝藻迁移的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 58-65. (DING Wenhao, LI Yun, XU Shikai, et al. Characteristics of surface lake current and its effect on cyanobacteria migration in Lake Taihu under changing wind field [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(6): 58-65. (in Chinese))
- [37] ZHAO Dehua, JIANG Hao, CAI Ying, et al. Artificial regulation of water level and its effect on aquatic macrophyte distribution in Taihu Lake [J]. PLoS One, 2012, 7(9): e4483.
- [38] CAO Hongye, HAN Ling, LI Liangzhi. A deep learning method for cyanobacterial harmful algae blooms prediction in Taihu Lake, China [J]. Harmful Algae, 2022, 113: 102189.
- [39] ZHOU Qichao, CHEN Wei, SHAN Kun, et al. Influence of sunlight on the proliferation of cyanobacterial blooms and its potential applications in Lake Taihu, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(3): 626-635.
- [40] ZHANG Yunlin, QIN Boqiang, ZHU Guangwei, et al. Profound changes in the physical environment of Lake Taihu from 25 years of long-term observations: implications for algal bloom outbreaks and aquatic macrophyte loss [J]. Water Resources Research, 2018, 54(7): 4319-4331.

(收稿日期:2024 - 04 - 09 编辑:熊水斌)