

# 山仔水库环境因子与藻类群落生长的 相互作用机制探究及应对建议

郑震<sup>1</sup>, 冷东梅<sup>1</sup>, 郑莺<sup>1</sup>, 姚鹏峰<sup>1</sup>, 魏雪霞<sup>1</sup>, 庞维海<sup>2</sup>, 谢丽<sup>2</sup>, 李惠平<sup>2\*</sup>

(1.福州市环境科学研究院, 福州 350000;

2.长江水环境教育部重点实验室, 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:**【目的】深入研究藻类群落与环境因子的演替关系及相关性, 揭示山仔水库水华爆发机制。【方法】采用RDA和相关性分析的方法, 对山仔水库2020—2021年的水温、pH值、DO、透明度和优势藻类等指标进行对应分析, 探究该水库藻类群落季节性演替及垂向分布特点。同时, 采用机器学习的方法建立相关环境因子与叶绿素a之间的关系。【结果】①山仔水库全年TN和TP营养盐平均质量浓度分别为(0.675±0.137) mg/L和(0.021±0.006) mg/L, 长期处于III类水体。②水库优势藻类以硅藻和蓝藻为主, 硅藻爆发期为5—7月, 主要在中温、弱光环境下; 蓝藻爆发期在7—9月, 造成水体pH值、DO和透明度下降; 蓝藻与水温、pH值、浊度、TP显著正相关,  $R^2$ 分别为0.71、0.77、0.65、0.74。③硅藻则与水温、pH值、浊度、TP等指标负相关,  $R^2$ 介于-0.43~-0.37; GBDT机器学习算法拟合效果最优,  $R^2$ 可达0.85。【结论】山仔水库不同种类藻类的爆发时期及爆发机制存在差异, 根据其相关环境因子建立的机器学习模型适用性较好。

**关键词:** 水库; 藻类群落; 环境因子; 水华; RDA分析

中图分类号: S274.3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023124

OSID: 

郑震, 冷东梅, 郑莺, 等. 山仔水库环境因子与藻类群落生长的相互作用机制探究及应对建议[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(11): 131-139.

ZHENG Zhen, LENG Dongmei, ZHENG Ying, et al. The Interplay between Environmental Factors and Algal Community Growth in Shanzai Reservoir[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11): 131-139.

## 0 引言

【研究意义】稳定水动力环境、水温及营养条件均对藻类生长造成影响<sup>[1-2]</sup>, 明晰环境因子与藻类群落生长的相互作用机制对藻类防控至关重要。秋冬季节, 气象水文条件是影响藻类生长的主要控制因子, 而夏秋季节藻类同时受到气象水文和营养盐浓度等因子协同影响<sup>[3]</sup>。此外, 不同藻类种属间的共生、捕食以及竞争等相互关系也会对藻类群落造成影响。

【研究进展】近年来, 由于过量营养盐被排入水体环境中, 水体藻类数量急剧增长, 造成水体生态结构和功能受损。国内已有关于“水华”爆发的报道多与湖库有关<sup>[4-6]</sup>, 与江河相比, 湖库具有流速缓、水面宽、水体深以及更替缓慢等特点, 由此使得污染物更易富集, 引起水华爆发。温成成等<sup>[7]</sup>对陕西省李家河水库藻类季节性爆发研究发现, 春季以绿藻、硅藻

和甲藻为主, 夏季则以绿藻、硅藻和蓝藻为主。张含笑等<sup>[8]</sup>对天津市于桥水库1983—2019年藻类的演替中发现, 藻类群落以蓝藻和绿藻为优势种。由于地形、气候及当地产业结构和经济等多种因素作用, 造成不同水库水华爆发的优势藻类及环境因子存在差异。山仔水库作为福州市第二饮用水源地, 承担该区域重要的环境生态功能和水源供水功能<sup>[9]</sup>。受人为因素影响, 山仔水库呈一定程度富营养化特征, 水体生态功能和服务功能退化, 对当地居民饮用水安全与健康造成威胁。尽管近年来已有针对山仔水库相关治理方案的有效实施, 但由于过去积累在库内的营养盐本底值较高, 环境因子异变仍有可能引起水华爆发。【切入点】以往关于山仔水库的研究缺乏水质因子与藻类质量浓度长期对应的监测数据, 难以明晰山仔水库内优势藻类的爆发机制。【拟解决的关键问题】因此, 本研究应用机器学习算法深入分析该水库藻类群落在水平和表层垂向空间分布及其随季节的变化规律, 探究了不同藻类的爆发时期以及影响机制, 为山仔水库“水华”现象的精准防控提供理论依据。

收稿日期: 2023-03-26 修回日期: 2023-07-22 网络出版日期: 2023-11-13

基金项目: 福建省环保科技计划项目(2021R015)

作者简介: 郑震(1989-), 男, 工程师, 主要从事水生态环境治理与技术研究。E-mail: zzm110@126.com

通信作者: 李惠平(1995-), 男, 博士研究生, 主要从事水污染控制及资源化研究。E-mail: 2210525@tongji.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

山仔水库位于福建省第六大河敖江中游,水库呈长条不规则分布,调节库容  $1.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,于 1994 年开始蓄水,1997 年被定为福州市第二饮用水源,并于 2003 年正式向福州市供水。但由于水质污染,山仔水库 2000 年就呈现富营养化趋势并受到蓝藻水华影响。根据山仔水库区域范围及研究需要,确定布设采样点分别为 S1 为七里 ( $119^\circ 17.897' \text{N}$ ,  $26^\circ 23.400' \text{E}$ ),位于水库入流口; S2 为库心 ( $119^\circ 18.697' \text{N}$ ,  $26^\circ 22.150' \text{E}$ ),位于水库中心;以及 S3 为坝前 ( $119^\circ 19.832' \text{N}$ ,  $26^\circ 20.368' \text{E}$ ) 位于水库出口(图 1)。采样过程中,自水面至水底均匀分为 3 层,采集表层 0.5、1、2 m 的样品,采取瞬时水样,每层采集水样 3 L。

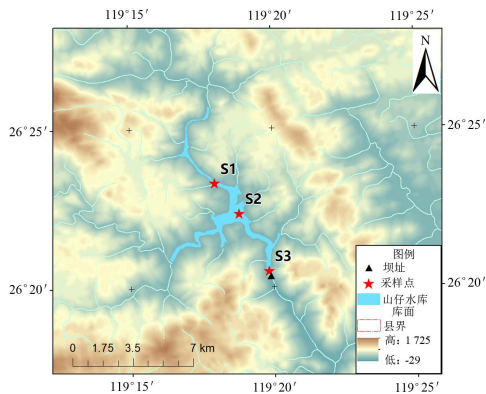


图 1 取样点分布

Fig.1 Distribution of sampling points

### 1.2 水质参数测定

#### 1.2.1 在线监测

对山仔水库 S2-库心 ( $119^\circ 18.697' \text{N}$ ,  $26^\circ 22.150' \text{E}$ ) 水样进行全年在线监测,监测频率为 6 次/d,取平均值作为最终结果。监测指标为:水温、pH 值、电导率、DO (溶解氧)、TN (总氮)、TP (总磷)、叶绿素 a 质量浓度,通过在线水质分析仪(力合科技股份有限公司)现场测定,其中水温、pH 值、电导率、DO 采用玻璃电极法测定,浊度分析采用光散射法测定,TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,TP 采用钼酸被分光光度法测定,叶绿素 a 采用荧光法测定。

#### 1.2.2 现场监测

透明度和藻类门类识别通过现场采样分析,测定仪器为便携式 FluoroFroee 野外藻类分析仪 (BBE, 德国) 现场测定,监测频率为 5~10 次/月。

### 1.3 RDA 和相关性分析

RDA 分析采用 CANOCO 5.0 软件,相关性分析

采用 SPSS 20 软件,使用 EXCEL 作图。

### 1.4 机器学习算法

为探究藻类质量浓度与多种水质因子间的相关关系,采用支持向量机 (SVM)、决策树 (DT)、随机森林 (RF) 算法和梯度提升树 (GBDT) 4 种机器学习算法进行建模,最后对比拟合精度评估模型适用性进行评估,并选取最优模型进行重点分析。其中 SVM 算法是建立特定的最优决策超平面,将此平面两侧距离该平面最近的 2 类样本之间的距离最大化,对分类问题具备良好泛化能力<sup>[10]</sup>。另外 3 种算法基于分类与回归树 (Classification and Regression Trees, CART) 完成预测,通过构建二叉树将样本递归划分,分裂节点以样本最小方差为依据,上述算法的具体介绍及原理参见文献[11-12]。

采用十折交叉验证 (10-fold CV) 方法来调整参数,训练数据被分为 10 个子集,在每个训练迭代中,1 个子集被用作验证集,其他 9 个子集构成训练集,以提高模型的预测和泛化能力。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境因子变化分析

由图 2 可知,山仔水库 2020—2021 年水温、pH 值、DO、透明度随季节变化较大。全年水温最低为  $10^\circ \text{C}$ ,最高为  $34^\circ \text{C}$ ;1—6 月属于水温上升期,6—8 月属于平稳期,8—12 月属于水温下降期(图 2(a))。由图 2 (b) 可知,pH 值变化规律与水温类似,pH 值最低值为 6.42 (12 月),最高值为 10.59 (6 月)。这是由于夏季水温升高为藻类生长提供适宜条件,藻细胞生长代谢消耗水中溶解性  $\text{CO}_2$  致使 pH 值升高<sup>[13]</sup>。全年 DO 呈波动变化,DO 最低值为  $4.87 \text{ mg/L}$  (9 月),最高值为  $13.31 \text{ mg/L}$  (5 月),1—7 月 DO 质量浓度较为平稳,7—9 月 DO 质量浓度显著降低,9—12 月又逐步上升(图 2 (c))。透明度与水温、pH 值、DO 变化规律相反(图 2 (c))。1—6 月,水体透明度波动变化 (0.5~2.1 m),且逐渐降低;6—12 月,水体透明度急剧降低至 0.5 m 且持续较长时间。1—9 月,TN 与 TP 变化趋势保持一致;9—12 月,TN 与 TP 变化趋势则相反(图 2 (f)、图 2 (g));TP 与叶绿素 a 变化趋势基本一致,TN 与叶绿素 a 趋势无明显相关,说明叶绿素 a 与 TP 关系较为密切。根据图 2 (h) 可知,叶绿素 a 质量浓度在不同月份差异显著,1—3 月叶绿素 a 质量浓度低于  $40 \mu\text{g/L}$ ,3—5 月逐步上升至约  $60 \mu\text{g/L}$ ,5 月 27 日上升到最高的  $92.43 \mu\text{g/L}$ ,对应的水温、pH 值、TN 和 TP 质量浓度分别为  $26.2^\circ \text{C}$ 、9.35、 $0.54 \text{ mg/L}$  和  $0.019 \text{ mg/L}$ 。

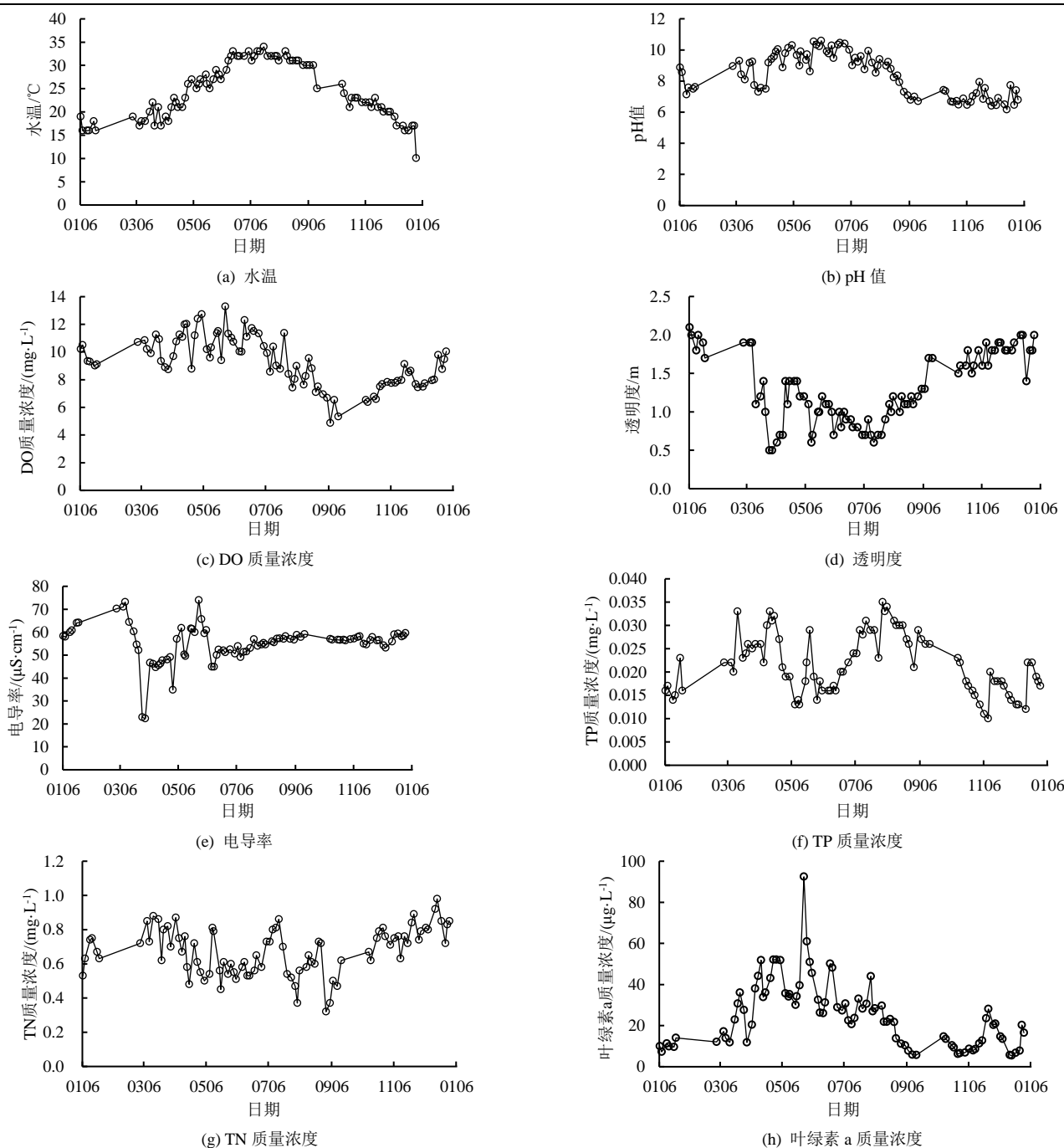


图 2 山仔水库 2020—2021 年水质变化

Fig.2 Change in online monitoring of water quality in Shanzei Reservoir from 2020—2021

### 2.2 藻类群落水平及垂向演替变化

图 3 为 2020—2021 年山仔水库 S1、S2、S3 点位的藻类群落。监测期内共检出 4 门常见浮游藻类，分别为绿藻、蓝藻、硅藻和隐藻。图 3 (a) 为七里采样点藻类群落年内变化规律，藻类总质量浓度在 5 月 13 日达到最高为 62.66  $\mu\text{g/L}$ ，其中绿藻、蓝藻、硅藻和隐藻占比分别为 32.53%、1.02%、66.38%和 0.07%。5—8 月，藻类质量浓度呈下降趋势，但在 8 月中旬，藻类迎来第 2 次爆发期，叶绿素 a 质量浓度达到 48.99  $\mu\text{g/L}$ ，硅藻占比降至 7.64%，而绿藻和蓝藻转变为优势藻类，二者占比分别上升至 25.48%、35.74%。随着河流入库，库心藻类质量浓度明显高于七里（图 3

(b))。藻类总质量浓度也于 5 月 13 日达到最高的 105.09  $\mu\text{g/L}$ ，是七里采样点的 1.38 倍，其中优势藻类仍以绿藻 (25.08%) 和硅藻 (69.45%) 为主。但该采样点第 2 次藻类爆发较弱，发生于 7 月下旬，藻类总质量浓度达到 33.20  $\mu\text{g/L}$ ，优势藻类以蓝藻为主，占比达到 84.28%。在坝前采样点，5 月中旬、下旬的监测过程均发现较高的藻类总质量浓度，分别达到 57.65、61.10  $\mu\text{g/L}$ ，优势藻类仍以绿藻和硅藻为主。第 2 次藻类爆发期发生于 8 月 5 日，优势藻类以蓝藻为主。这可能是由于污染物在河流至水库的流入过程中发生累积，导致营养盐的空间差异性，进而影响藻类群落的分布变化。

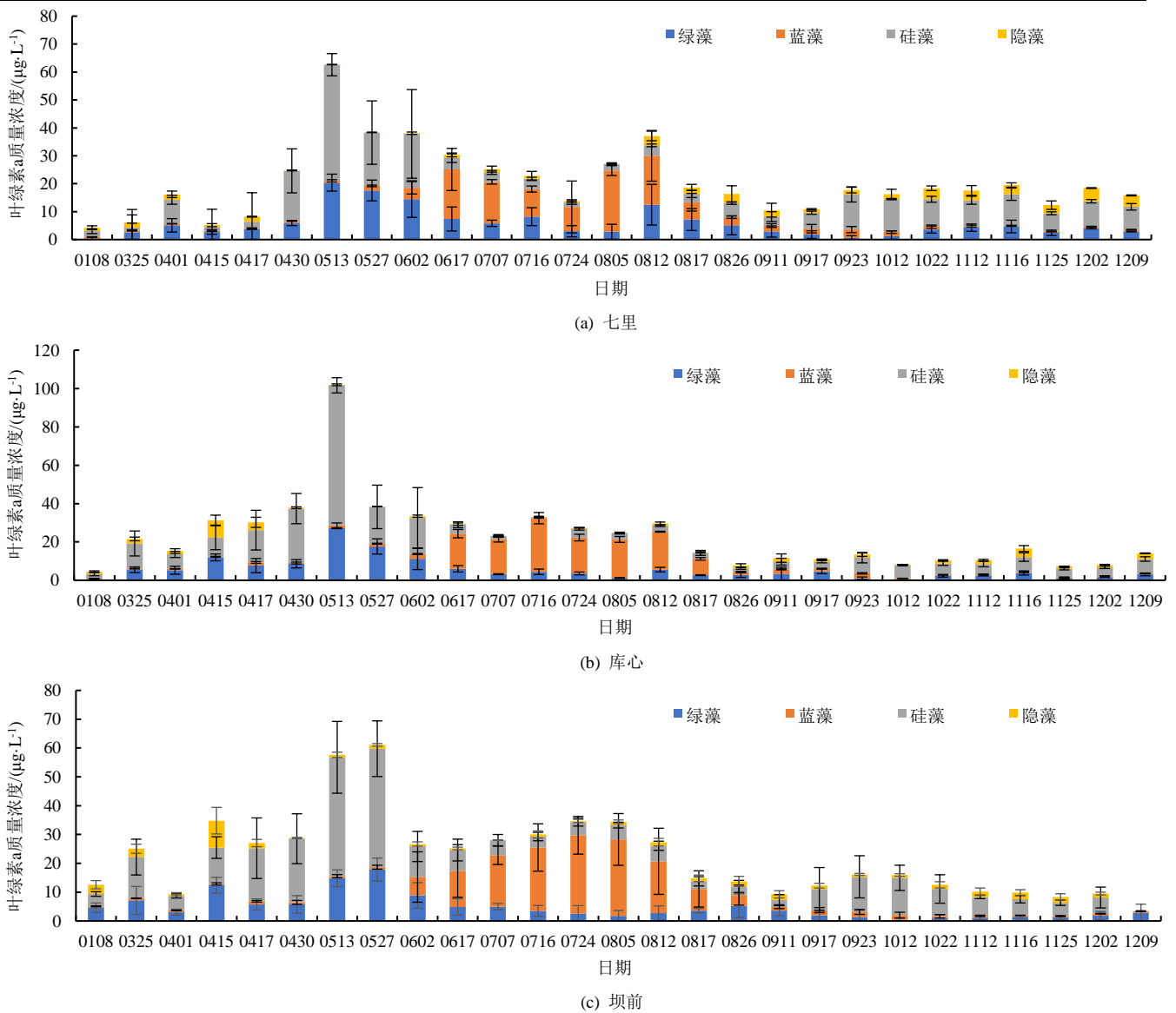


图3 山仔水库 2020—2021 年藻类群落变化

Fig.3 The changes in algal communities in Shanzai Reservoir from 2020 to 2021

此外,根据不同藻类爆发期的群落垂向分布可知(图4)。绿藻和硅藻在 0.5 m 水深范围内占比较高,而蓝藻在水深 2 m 范围内占比较高(66.1%)。该阶段水温相对较低,但水体 pH 值、DO 和透明度较高。在蓝藻爆发期,蓝藻在水深 1 m 范围内占比最高,达

到 39.7%,此阶段水体水温较高,水体透明度、pH 值和 DO 质量浓度均较低。绿藻不做为优势群落,但其在 0.5、1 m 水深范围内占比分别高达 47.9%和 39.9%,这主要是因为绿藻具有较强趋光性。

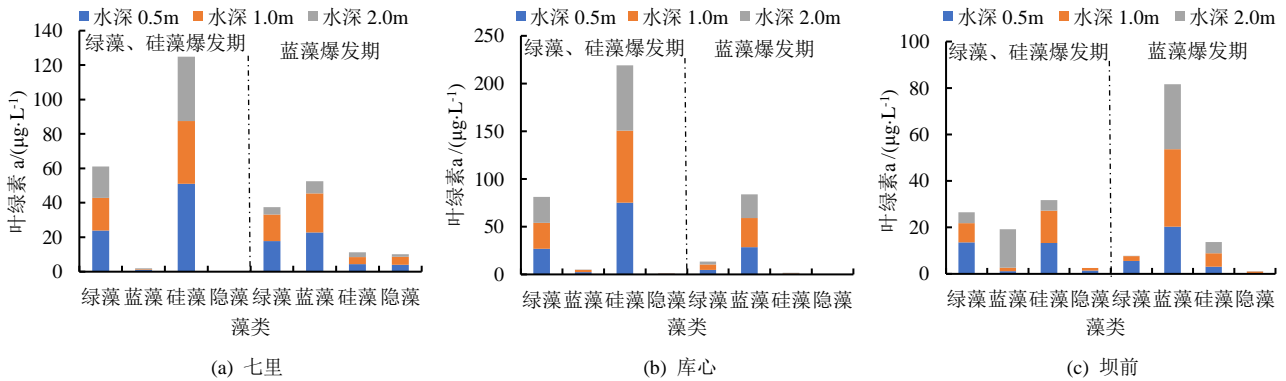


图4 藻类爆发期的群落垂向分布

Fig.4 Vertical distribution of communities during algal outbreaks

### 2.3 引起季节性藻类爆发差异的关键因子分析

图 5 为山仔水库水质因子与不同藻类间的 RDA 分析。前 2 个 RDA 轴可较好地解释数据总差异，其中 RDA1 占比达到 27.04%，RDA2 占比达到 19.85%（图 5 (a)）。通过 Pearson 相关性分析进一步筛选显著相关因子，确定所选变量因子（透明度、水温、pH 值、DO、电导率、浊度、TP、TN）对山仔水库藻类群落演替影响的模型精度及准确性，结果见图 5(b)。其中蓝藻与水温、pH 值、浊度、TP 显著正相关， $R^2$

分别为 0.71、0.77、0.65、0.74；蓝藻与透明度、电导率、隐藻显著负相关， $R^2$  分别为-0.84、-0.76、-0.70；绿藻与蓝藻的环境影响因子之间相关性类似。而硅藻则与水温、pH 值、浊度、TP 等因子负相关， $R^2$  介于-0.43~-0.37；隐藻与硅藻的环境影响因子之间相关性基本类似。由此可见，水温、pH 值、DO、透明度、TN、TP 变化均对山仔水库不同藻类生长的影响程度存在差异性。

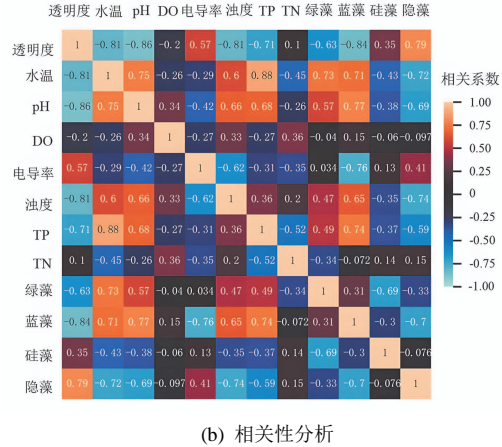
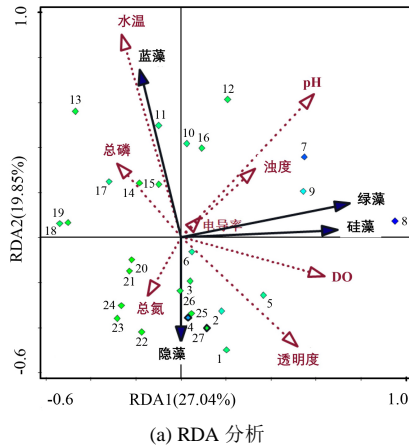


图 5 山仔水库藻类群落及环境因子相关性分析

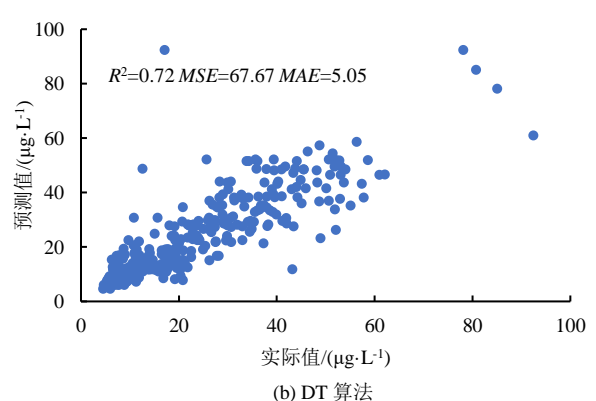
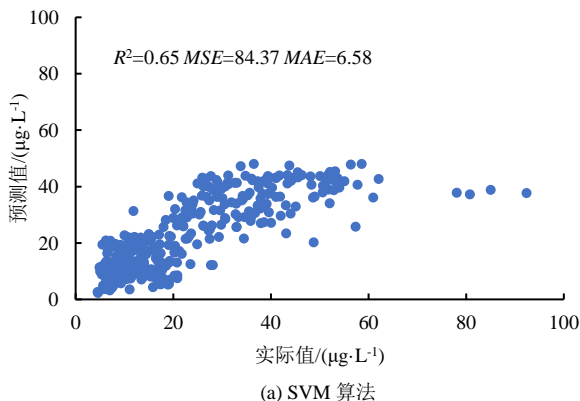
Fig.5 RDA analysis of algal communities and environmental factors in Shanzai Reservoir

### 2.4 水质因子与藻类质量浓度的机器学习算法模型

为探明山仔水库水质因子与藻类质量浓度间的相互影响关系，其中以水质因子（水温、pH 值、DO、透明度、电导率、浊度、TN、TP）为自变量，将藻类质量浓度作为因变量，以叶绿素 a 衡量，上述数据均为 2020 年 1 月 1 日—12 月 31 日自动监测点位所得（共 365 组）。完成数据匹配及清洗工作后，分别采用支持向量机（SVM）、决策树（DT）、随机森林（RF）和梯度提升树（GBDT）算法建立了相关模型，分析结果见图 6。SVM 算法拟合效果最差，其  $R^2$ 、 $MSE$ 、 $MAE$  值分别为 0.65、84.37、6.58。DT 算法模型拟合结果  $R^2$ 、 $MSE$ 、 $MAE$  值分别为 0.72、67.67、5.05。DT 算法技术简单、易于理解，但由于忽略了数据之间的相关性，易于造成过拟合风险。RF 算法则是保护多个决策树的算法，该算法可对预测因子进

行分类学习，并按不同量级对应拟合流量值，从而降低单项预测因子突变带来的误差。RF 算法建立的模型精度较 SV、MDT 算法有了显著提升，其中  $R^2$ 、 $MSE$ 、 $MAE$  值分别为 0.85、35.55、3.84。GBDT 算法则以残差拟合为核心，该算法拟合精度略优于 RF 算法，其中  $R^2$ 、 $MSE$ 、 $MAE$  值分别为 0.853 0、35.63、4.11。

为直观表达山仔水库叶绿素 a 实测值与预测值变化规律，选择综合性能最优的 GBDT 算法建模进一步分析。由图 7 可知，山仔水库不同藻类爆发期差异显著，硅藻和蓝藻是造成藻类爆发的主要优势种属。该水库 4—7 月属于绿藻和硅藻爆发期，绿藻、硅藻质量浓度先急剧上升，在 6—8 月又逐渐降低，随后蓝藻成为优势藻类。9—12 月，硅藻又成为优势藻类，其他藻类质量浓度始终较低。





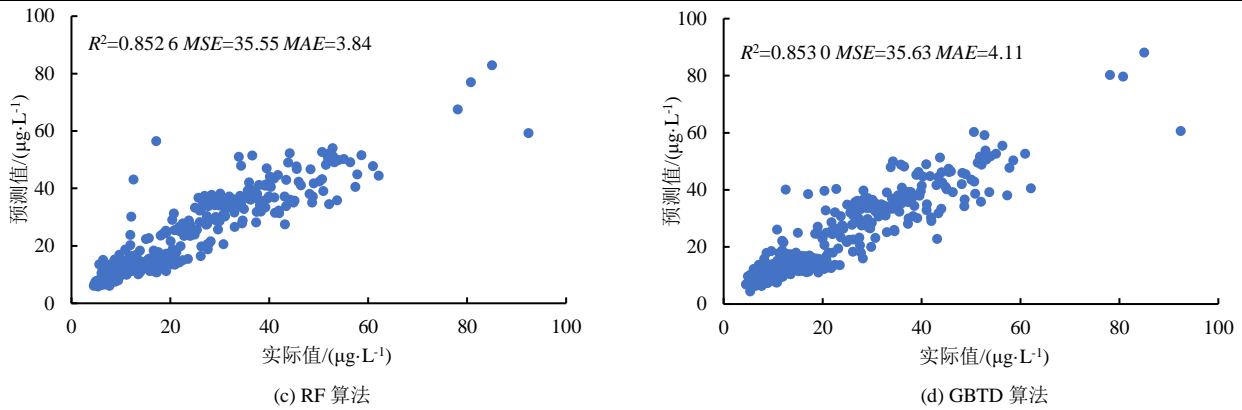


图6 模型预测结果

Fig.6 Model prediction results

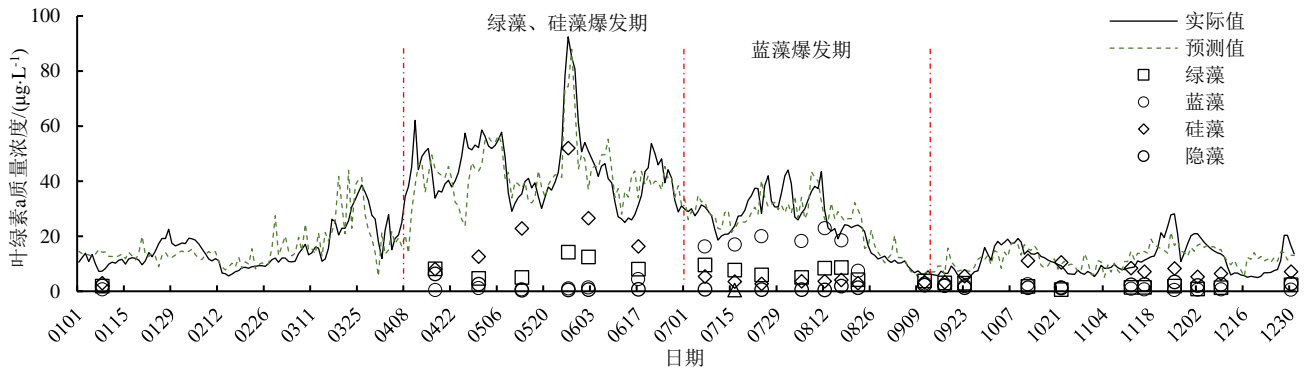


图7 基于GBDT算法下山仔水库2020—2021年藻类质量浓度

Fig.7 Algae concentration quality at Shanzai Reservoir from 2020 to 2021 based on GBTD algorithm

### 3 讨论

山仔水库优势藻类群落主要以硅藻、绿藻和蓝藻为主,群落分布及爆发分别受多种环境因子影响。本研究表明,水库硅藻占比最高,爆发期在5—7月,此阶段属于库区水体分层期,水温和pH值升高。除降雨、排放等外源输入的氮磷物之外,水库由混合期转变为水热分层期的过程导致水库底泥中沉淀的营养物质释放至上层水体,从而使得硅藻质量浓度急剧升高。刘怡靖<sup>[14]</sup>在对山仔水库沉积物中氮的累积与释放研究中发现,沿进口-库心-大坝方向沉积物氮的累积量逐渐升高。筑坝等人为活动促进了藻类群落间的生态位共享或相互作用,这或许是造成山仔水库不同点位藻类爆发差异性的主要原因之一。程曦等<sup>[15]</sup>对淀山湖研究也发现,2月硅藻和绿藻数量指数级增长,而6月蓝藻数量进入指数级增长。闫苗苗等<sup>[16]</sup>也发现,李家河水库蓝藻丰度于8月达到最大,而其余月份水库藻类则以硅藻和绿藻为主。这与本文研究的藻类分布特点相似,即隐藻在水温和光照较低的春、秋季优势较大,而蓝藻和绿藻则在夏季优势更为明显。硅藻更易于在较低水温(10~20℃)和富营养盐条件下生长繁殖,蓝藻和绿藻易于在中高水温(24~30℃)下生长爆发,当水温超过30℃后,蓝藻和绿藻活性受到抑制<sup>[17]</sup>。由于山仔水库处于热带和亚热带区域,

全年水温不低于15℃,故水温对山仔水库硅藻群落影响较小,营养盐及可溶性硅量则变成了影响山仔水库硅藻的主导要素<sup>[18]</sup>。

此外,山仔水库属于深水型水库,因此排除底泥扰动或水体悬浮物对透明度的影响,透明度主要受藻类和有机物季节性变化的影响。当水体透明度低于1m时可作为藻类爆发的主要依据之一,但不同类型水体透明度的影响因素也存在差异,影响滇池、杭州西湖等水体透明度的主要因素是藻类季节性变化;影响太湖水体透明度的最重要因素是悬浮物<sup>[19]</sup>。pH值过高、氮磷比例失衡、高温强光等因素均会引起蓝藻的快速繁殖,进而成为优势藻类。山仔水库入库氮、磷负荷分别为3248、192t/a,库内营养盐主要由河流汇集输入<sup>[20]</sup>,沉积物中氮在夏季和冬季的释放速率分别为90.31~128.37、72.52~93.79mg/(m<sup>2</sup>·d),夏季水华由水库内源性氮的释放造成<sup>[14]</sup>。本研究表明,山仔水库蓝藻爆发期在水温最高的7—9月,蓝藻爆发期蓝藻质量浓度明显低于硅藻爆发期,这说明由于近年来水库治理,无论是外源输入或是内源释放,带来的氮磷营养盐质量浓度适中,并不会像先前一样引起蓝藻密度暴增。但是,蓝藻爆发期仍会引起水体pH值、透明度和DO质量浓度急剧下降,由此导致部分其他藻类生长被抑制,对水库水质造成一定影响。闫苗苗等<sup>[16]</sup>在对李家河水库夏季藻类群落垂向演替

的研究中也发现, 藻类群落受水深影响显著, 在水深 0、3 m 内, 微囊藻 (蓝藻门) 为优势种属; 在水深 6 m 处, 小环藻和针杆藻 (硅藻门) 占优势, 二者相对丰度显著升高。针对山仔水库, 藻类群落的垂向分布差异性可能是由于不同藻类对生境的适应要求不同, 以及季节变化引起藻类群落之间的相互抑制。

绿藻与DO和pH值相关性最明显; 蓝藻与水温、pH值和TP正相关, 与透明度负相关, 这是由于蓝藻通过特有的悬浮机制爆发于水库表层, 显著影响了水库透明度, 其中可通过悬浮机制吸收“空气-水”中CO<sub>2</sub>的微囊藻易成为优势物种, 形成漂浮水面的“水华”, 对水体造成较大影响<sup>[20-21]</sup>。硅藻与DO和pH值正相关, 隐藻与水温显著负相关, 而与DO、透明度、TN正相关, 这主要是由于硅藻门和隐藻门的特异性导致。绿藻和蓝藻受水温、TN、pH值、COD<sub>Mn</sub>影响, 其中蓝藻爆发显著受水温驱动, 硅藻爆发则主要由DO驱动。相关研究也证明<sup>[22]</sup>, 表层水体藻类群落与水温、DO、pH值、浊度、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、叶绿素a等多种水质指标因子有关, 在水深6 m处的藻类群落主要受到TN、电导率和铁盐的影响。此外, 本研究借用机器学习算法可更进一步建立环境因子与藻类质量浓度关系的模型, 从而快速高效地预测藻类质量浓度。模型运算结果表明, 与SVM、DT和RF算法相比, GBDT算法拟合效果最优。吴娟等<sup>[23]</sup>采用3种机器学习预测太湖流域藻华面积的研究中也发现, GBDT算法拟合精度最优, 预测结果最为稳定。汪志成等<sup>[24]</sup>研究发现, 在各种藻蓝素质量浓度反演模型中, GBDT算法建立的蓝藻素质量浓度反演模型精度最高。本研究采用机器学习算法对山仔水库环境因子与叶绿素a之间的变量关系进行建模发现, GBDT算法的综合效能同样优异。

本研究认为, 针对库区硅藻防控, 需从根本上控制氮磷营养盐外源输入, 并增设原位修复装置净化水库水质以及减少库底沉积物内的营养盐。针对库区蓝藻防控, 短期内可增设扬水曝气等水力扰动装置破坏水库热分层, 并向库底充氧以减少沉积物中营养盐的释放, 改变蓝藻生长条件; 长期内仍需严控点源和面源污染, 从根本上减少水库污染物的输入, 恢复水库自然生态。此外也需要采取相关新型技术方法, 通过在线监测技术对水温、DO、pH值、电导率、TN、TP和藻类质量浓度进行实时监测, 并采用机器学习算法对已有数据进行建模, 将风险评估与实际分析相结合, 明晰导致藻类季节性爆发的根本原因, 并通过实际采样结果验证分析, 重点监测水库入流口、农田区域及污水厂排口等区域, 以实现针对山仔水库生态保障的精准高效预警、靶向生态修复及灵活控污减排等措施。

## 4 结论

1) 山仔水库TN、TP营养盐平均质量浓度分别为(0.675±0.137)、(0.021±0.006) mg/L, 长期属于III类水体, 易于引起水华的优势藻类以硅藻(爆发期为5—7月)和蓝藻(爆发期为7—9月)为主。

2) 硅藻与水温、pH值、浊度、TP等指标负相关, R<sup>2</sup>介于-0.43~-0.37, 主要在中温、弱光环境下易于爆发; 而蓝藻与水温、pH值、浊度、TP显著正相关, R<sup>2</sup>分别为0.71、0.77、0.65、0.74, 在强光、高温环境下易于爆发。

3) 机器学习算法可有效预测山仔水库环境因子与叶绿素a之间的模型关系, 其中GBDT算法拟合R<sup>2</sup>可达0.85。可采用机器学习算法对已有数据进行建模, 将风险评估与实际分析相结合, 明晰导致藻类季节性爆发的根本原因, 以实现精准治理。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

## 参考文献:

- [1] 张文强, 单保庆, 张洪, 等. 河流沉积物中有机磷提取剂(NaOH-EDTA)提取比例与机制研究[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 163-170.  
ZHANG Wenqiang, SHAN Baoqing, ZHANG Hong, et al. Characterization and optimization of the NaOH-EDTA extracts for solution 31P-NMR analysis of organic phosphorus in river sediments[J]. Environmental Science, 2014, 35(1): 163-170.
- [2] 李衍庆, 黄廷林, 张海涵, 等. 水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2 158-2 165.  
LI Yanqing, HUANG Tinglin, ZHANG Haihan, et al. Succession characteristics of algae functional groups and water quality assessment in a drinking water reservoir[J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2 158-2 165.
- [3] 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 等. 新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 713-727.  
DA Wenyi, ZHU Guangwei, LI Yunxiang, et al. High-frequency dynamics of water quality and phytoplankton community in inflowing river mouth of Xin'anjiang Reservoir, China[J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 713-727.
- [4] 罗桂林, 田林锋. 基于WQI法的宁夏湖泊藻类爆发过程水环境质量变化及溯源探究[J]. 环境化学, 2021, 40(7): 2 073-2 082.  
LUO Guilin, TIAN Linfeng. Study on water environmental quality change and source tracing of algae bloom in lakes of Ningxia based on WQI method[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(7): 2 073-2 082.
- [5] 李璇, 周燕平, 夏琼琼, 等. 磷胁迫对藻类生长代谢的影响及藻类对胁迫响应机制的研究进展[J]. 环境化学, 2020, 39(8): 2 074-2 083.  
LI Xuan, ZHOU Yanping, XIA Qiongqiong, et al. The impacts of phosphorus stress on the growth and metabolism of algae and its response mechanism[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(8): 2 074-2 083.
- [6] 卢金锁, 张颖, 胡亚潘. 深水型水库中藻类功能群落演替及其与环境因子的关系[J]. 环境工程学报, 2014, 8(11): 4 605-4 611.  
LU Jinsuo, ZHANG Ying, HU Yapan. Succession of algae functional groups and its relationship with environmental factors in a deep water reservoir[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014,

- 8(11): 4 605-4 611.
- [7] 温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 等. 北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析[J]. 环境科学, 2023, 44(3): 1 452-1 464.  
WEN Chengcheng, HUANG Tinglin, KONG Changhao, et al. Analysis of mechanism and start-up thresholds of seasonal algal blooms in a Northern eutrophic stratified reservoir[J]. Environmental Science, 2023, 44(3): 1 452-1 464.
- [8] 张含笑, 白雪, 霍守亮, 等. 于桥水库藻类群落演替过程及影响因素[J]. 环境科学研究, 2020, 33(12): 2 802-2 809.  
ZHANG Hanxiao, BAI Xue, HUO Shouliang, et al. Succession of phytoplankton algae community and influencing factors in Yuqiao reservoir[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(12): 2 802-2 809.
- [9] 周亮进. 山仔水库富营养化影响因素分析[J]. 能源与环境, 2008(1): 63-66.  
ZHOU Liangjin. Analysis of factors influencing eutrophication in Shanzai Reservoir[J]. Energy and Environment, 2008(1): 63-66.
- [10] 张可, 崔敬浩, 黄华爱, 等. 基于支持向量机的小型水库风险等级模型研究[J]. 水利经济, 2021, 39(3): 69-74, 88.  
ZHANG Ke, CUI Jinghao, HUANG Hua'ai, et al. Model for risk rate of small reservoirs based on support vector machine[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2021, 39(3): 69-74, 88.
- [11] JIANG Jian, WANG Rui, WANG Menglun, et al. Boosting tree-assisted multitask deep learning for small scientific datasets[J]. Journal of Chemical Information and Modeling, 2020, 60(3): 1 235-1 244.
- [12] HUANG R X, MA C X, MA J, et al. Machine learning in natural and engineered water systems[J]. Water Research, 2021, 205: 117 666.
- [13] 沈青. 地表水中藻类代谢对 pH 和含氧量影响分析[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(S2): 261-262, 286.  
SHEN Qing. Analyses on the influence of algae metabolism on pH and DO in surface water[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(S2): 261-262, 286.
- [14] 刘怡靖. 山仔水库表层沉积物氮负荷与释放研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2015, 10(2): 49-55.  
LIU Yijing. Internal loadings and fluxes of surface sediment nitrogen in Shanzai Reservoir[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2015, 10(2): 49-55.
- [15] 程曦, 李小平. 淀山湖浮游藻类群落的早期增长[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3 215-3 222.  
CHENG Xi, LI Xiaoping. Early growth of phytoplankton community in Dianshan Lake[J]. Environmental Science, 2011, 32(11): 3 215-3 222.
- [16] 闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 等. 分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 221-233.  
YAN Miaomiao, ZHANG Haihan, HUANG Tinglin, et al. Mechanism of algal community dynamics driven by the seasonal water bacterial community in a stratified drinking water reservoir[J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 221-233.
- [17] 王得玉, 冯学智, 周立国, 等. 太湖蓝藻爆发与水温的关系的 MODIS 遥感[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 173-178.  
WANG Deyu, FENG Xuezhong, ZHOU Liguang, et al. Relationship between blue algal bloom and water temperature in Lake Taihu based on MODIS[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(2): 173-178.
- [18] 陈慈, 谭琳, 朱昆鹏, 等. 流溪河底栖硅藻群落结构的时空异质性及其影响因素[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(6): 92-101.  
CHEN Ci, TAN Lin, ZHU Kunpeng, et al. Temporal and spatial heterogeneity of the benthic diatom community and influencing factors in Liuxi River, South China[J]. Journal of Hydroecology, 2022, 43(6): 92-101.
- [19] 张兰婷. 富营养化蓝藻水华发生的主要成因与机制研究综述[J]. 水利发展研究, 2019, 19(5): 28-33.  
ZHANG Lanting. A review of the main causes and mechanisms of the occurrence of eutrophic cyanobacterial blooms[J]. Water Resources Development Research, 2019, 19(5): 28-33.
- [20] 陈能汪, 吴殷琪, 张玉珍, 等. 流域氮磷输出、河流输送与库区富营养化关联分析: 以福建山仔水库为例[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9): 1 862-1 869.  
CHEN Nengwang, WU Yinqi, ZHANG Yuzhen, et al. Linking watershed nutrient loads and riverine export to reservoir eutrophication: The case of Shanzai Reservoir, Fujian Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(9): 1 862-1 869.
- [21] 赵孟绪, 韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析[J]. 生态学报, 2005, 25(7): 1 554-1 561.  
ZHAO Mengxu, HAN Boping. Analysis of factors affecting cyanobacteria bloom in a tropical reservoir (Tangxi Reservoir, China)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7): 1 554-1 561.
- [22] 闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 等. 分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3 285-3 296.  
YAN Miaomiao, CHEN Shengnan, HUANG Tinglin, et al. Water quality and bacterial population regulation of algal pendant succession in a stratified reservoir[J]. Environmental Science, 2020, 41(7): 3 285-3 296.
- [23] 吴娟, 朱跃龙, 金松, 等. 三种机器学习模型在太湖藻华面积预测中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 542-551.  
WU Juan, ZHU Yuelong, JIN Song, et al. Area prediction of cyanobacterial blooms based on three machine learning methods in Taihu Lake[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(6): 542-551.
- [24] 汪志成, 王杰, 晏实江, 等. 基于 Sentinel-3 OLCI 影像的巢湖藻蓝素浓度年内动态遥感监测[J]. 湖泊科学, 2022, 34(2): 391-403.  
WANG Zhicheng, WANG Jie, YAN Shijiang, et al. Annual dynamic remote sensing monitoring of phycocyanin concentration in Lake Chaohu based on Sentinel-3 OLCI images[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(2): 391-403.



## The Interplay between Environmental Factors and Algal Community Growth in Shanzai Reservoir

ZHENG Zhen<sup>1</sup>, LENG Dongmei<sup>1</sup>, ZHENG Ying<sup>1</sup>, YAO Pengfeng<sup>1</sup>,  
WEI Xuexia<sup>1</sup>, PANG Weihai<sup>2</sup>, XIE Li<sup>2</sup>, LI Huiping<sup>2\*</sup>

(1. Fuzhou Academy of Environmental Sciences, Fuzhou 350000, China; 2. The Yangtze River Water Environment Key Laboratory of the Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** **【Objective】** This study delves into the successional interrelationship between algal communities and environmental factors to uncover the mechanisms behind water bloom outbreaks in Shanzai Reservoir. **【Method】** Utilizing redundancy analysis and correlation analysis, we investigated the temporal variations in water temperature, pH, dissolved oxygen (DO), transparency, and dominant algal species in Shanzai Reservoir from 2020 to 2021. We explored the seasonal succession and vertical distribution of the algal community. A machine learning approach was used to establish the relationship between pertinent environmental factors and chlorophyll a. **【Result】** The average total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) concentrations in Shanzai Reservoir measured in the studied period were  $(0.675\pm 0.137)$  mg/L and  $(0.021\pm 0.006)$  mg/L, respectively. Water quality in the reservoir was Class III grade. The dominant algal species in the reservoir are diatoms and cyanobacteria. Diatom blooms were prevalent from May to July, particularly under moderate temperature and reduced light conditions. In contrast, cyanobacteria proliferated from July to September, leading to a reduction in pH, DO and water quality. The cyanobacterial outbreaks had a significant positive correlation with water temperature, pH, water turbidity, and TP, with their  $R^2$  being 0.71, 0.77, 0.65, and 0.74, respectively. Diatoms were negatively correlated to water temperature, pH, turbidity, and TP, with their  $R^2$  ranging from -0.43 to -0.37. Using machine learning algorithms can improve the  $R^2$  to 0.852 6. **【Conclusion】** There were differences in outbreak timings between different algae species in Shanzai Reservoir due to the difference in their underlying mechanism. Machine learning model has a good applicability and can be used for accurate analysis of algal blooms in Shanzai Reservoir.

**Key words:** reservoir; algal community succession; environmental factors; water bloom; RDA analysis

责任编辑：白芳芳