杨宏业,陈迪,袁云娟,等. 蓝藻水华的短期监测预警与防控策略[J].环境科学与技术,2024,47(S1):189-197. Yang Hongye, Chen Di, Yuan Yunjuan, et al. *Cyanobacteria* blooms short-term monitoring and prevention control strategies[J]. Environmental Science & Technology,2024,47(S1):189-197.

# 蓝藻水华的短期监测预警与防控策略

杨宏业[1], 陈迪[2], 袁云娟[3], 杨凯伦[3],
刘婉蓉[1], 黄舒欣[1], 屈铭志[1*]
(1.上海建科环境技术有限公司,上海 200032;
2.武汉市水务局,湖北 武汉 430010;
3.湖北君邦环境技术有限责任公司,湖北 武汉 430000)

**摘 要**:蓝藻水华问题持续影响着中国内陆湖泊,华中地区O湖近年6-10月均会受到蓝藻水华的侵扰,造成水体生物死亡,堆积与异味影响到了湖泊的休憩功能。该研究于2022年7-10月在O湖展开,通过对该湖蓝藻水华的持续低空监测与研究,分析其湖面分布情况,结合气象数据探究其漂移方向与规律,对其发展情况展开预测,并尝试通过物理阻隔等措施,减少其扩散范围。结果表明,2022年7月初O湖蓝藻主要分布在湖区东部区域,西部与南部区域蓝绿藻数量较低,未形成水华。通过气象数据分析结合自动站水质监测数据,提前预测蓝藻水华会由东部区域突破已设置的挡藻围隔进入西部湖区。因此,研究立即在O湖大桥布设档藻围隔,将水华控制在O湖东部区域,避免了其向其他区域漂移和扩散,使得O湖西部与南部区域未出现蓝藻水华。研究表明,水质自动站数据及无人机监测能够较准确地判断蓝藻的空间分布,结合气象数据能够预测蓝藻水华期的漂移,根据预测结果建设挡藻物理阻隔,能有效限制蓝藻水华的漂移,验证了蓝藻水华监控与防治方法的可行性,为蓝藻早期控制与治理提供了新的思路。

**关键词**:蓝藻水华; 无人机监测; 气象条件; 预测; 防控
**中图分类号**:X832 **文献标志码**:A **doi**:10.19672/j.cnki.1003-6504.1401.23.338 **文章编号**:1003-6504(2024)S1-0189-09

# *Cyanobacteria* Blooms Short-term Monitoring and Prevention Control Strategies

YANG Hongye[1], CHEN Di[2], YUAN Yunjuan[3], YANG Kailun[3],
LIU Wanrong[1], HUANG Shuxin[1], QU Mingzhi[1*]
(1. Shanghai Jianke Environment Technology Company Limited, Shanghai 200032, China;
2. Wuhan Municipal Water Affairs Authority, Wuhan 430010, China;
3. Hubei Junbang Environmental Technology Co., Ltd, Wuhan 430000, China)

**Abstract**: The problem of blue-green algae blooms continues to affect my country's inland lakes. Lake O in Central China has been infested by blue-green algae blooms from June to October in recent years, causing the death of water organisms, and the accumulation and odor have affected the lake's recreational function. The research was carried out in Lake O from July to October 2022. Through continuous low-altitude monitoring and research of the cyanobacteria bloom in the lake, it analyzed its lake surface distribution, combined with meteorological data to explore its drift direction and law, and predicted its development. And try to reduce its spread through physical barriers and other measures. The results show that in early July 2022, blue-green algae in Lake O were mainly distributed in the eastern part of the lake area. The number of blue-green algae in the western and southern parts was lower and no algae blooms were formed. Through meteorological data analysis combined with water quality monitoring data from automatic stations, it is predicted in advance that *Cyanobacteria* blooms will break through the established algae barriers from the eastern region and enter the western lake area. Therefore, the study immediately set up an algae barrier at the O Lake Bridge to control the algae bloom in the eastern area of Lake O and prevent it from drifting and spreading to other areas, so that no cyanobacteria bloom occurred in the western and southern areas of Lake O. Research shows that water quality automatic station data and drone monitoring can more accurately determine the spatial distribution of cyanobacteria, and combined with meteorological data can predict the drift of *Cyanobacteria* blooms. Building physical

《环境科学与技术》编辑部:(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com
**收稿日期**:2023-07-20;修回2023-09-05
**基金项目**:上海市2020年度"科技创新行动计划"启明星项目资助(20QB1403900)
**作者简介**:杨宏业(1995-),女,硕士,研究方向为摄影测量与遥感,(电子信箱)yanghongye@sribs.com;*通讯作者,(电子信箱)qumingzhi@sribs.com。

barriers to block algae based on the prediction results can effectively limit the occurrence of cyanobacteria blooms. Drift has verified the feasibility of *Cyanobacteria* bloom monitoring and prevention methods, and provided new ideas for early control and management of *Cyanobacteria*.

**Key words**: *Cyanobacterial* bloom; unmanned aerial vehicle detection; meteorological condition; prediction; prevention-control

水体富营养化、湖泊水环境遭到破坏，导致蓝藻水华灾害频繁影响着内陆湖泊，包括太湖[1,2]、巢湖[3-5]、滇池等[6,7]。华中地区的O湖作为该市第三大城中湖，近些年在每年的7-9月高温天气均会出现蓝藻水华现象，不仅引发湖泊水生态系统退化，还产生恶臭气味，危害居民的健康，对周边教育、科技园区造成威胁。因此，开展O湖蓝藻监测与防控迫在眉睫。

很多研究表明，水体中氮、磷等营养盐浓度较高时有利于蓝藻的生长[8-10]。根据该市生态环境局《地表水及集中式饮用水源地监测报告》显示，从2017年至2022年，O湖断面水质目标均为Ⅳ类，而实际全年水质介于劣Ⅴ类~Ⅴ类之间，主要超标因子为总磷(TP)和氨氮($NH_3$-N)，总磷超标倍数为0.97~2.6。如表1，2022年7-10月水质情况均不达标，处于中度富营养状态，主要污染物为总磷，这为O湖蓝藻的生长提供了条件。

**表1 O湖2022年7-10月水质评价结果表**

| 湖泊名称 | 月份 | 功能类别 | 水质 | 达标情况 | 营养状态 | 主要污染物 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| O湖 | 7月 | Ⅳ | Ⅴ | 不达标 | 中度富营养 | 总磷(0.75) |
| | 8月 | Ⅳ | Ⅴ | 不达标 | 中度富营养 | 总磷(0.68) |
| | 9月 | Ⅳ | Ⅴ | 不达标 | 中度富营养 | 总磷(0.22) |
| | 10月 | Ⅳ | Ⅴ | 不达标 | 中度富营养 | 总磷(0.20) |

本文对O湖蓝藻水华的监测与应急处置工作展开了实验性研究，通过每日无人机监测，分析O湖蓝藻水华湖面分布情况；结合气象和水质等关键影响因子，预测蓝藻水华每日发展趋势，为后期治理提供数据和理论支持。同时，本研究根据预测结果，尝试采取有针对性的治理防范措施以减少扩散范围，降低其带来的不良影响，并通过实验研究进行了验证，对湖泊蓝藻治理具有重要意义。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区域

O湖位于我国华中地区某市东南部，是该市第三大城中湖(图1)。湖泊容积2 500万$m^3$，汇水面积37.44 $km^2$，水域面积7.67 $km^2$。O湖因为周边工业的飞速发展，截弯取直、变水为建筑用地等使得相关支流逐渐消失，与长江的联系逐渐变弱[11]，无上游来水，仅通过一条连通渠对外连接。该连通渠连通O湖和X河，为O湖排水系统的泄洪通道[12]。然而，O湖近年来雨季溢流比较严重，使得湖中氮、磷等营养盐浓度增加，水体富营养化程度增高，为夏秋季蓝藻迅速繁殖提供基础。

### 1.2 数据来源

本文于2022年7-10月开展实验研究，研究路线图见图2。在O湖进行全湖巡查，运用无人机监测O湖表层蓝藻，同时布设人工水质采样点，结合自动监测站数据，对O湖蓝藻水华展开全方位监测，利用气象数据对蓝藻的漂移趋势进行预判，并及时采取措施防止其扩散。

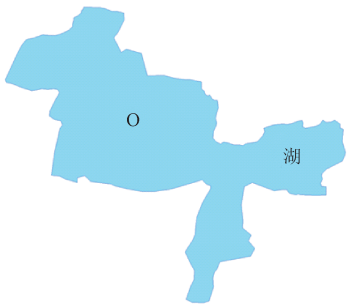



图1 研究区域

#### 1.2.1 无人机监测数据

本研究运用大疆系列无人机(御Mavic 2系列)沿O湖沿岸开展可见光正射飞行监测，飞行时间为2022年7月12日-9月30日，每日飞行监测一次，飞行高度为118 m，飞行范围包含整个O湖，生成数字正射影像，掌握全湖蓝藻分布情况和漂移特征。

#### 1.2.2 气象数据

本文采用的气象指标包括风向、风速和降雨，具体数据来自该市国家气象观测站，日步长监测数据时间为2022年7-9月。

#### 1.2.3 采样监测数据

通过人工徒步的方式，布设采样点，根据风向和风力的综合分析，在下风区进行表层水样收集，对采集的水样开展藻类镜检，判断水样中藻的种类和密度，以进一步确定是否是蓝藻水华。

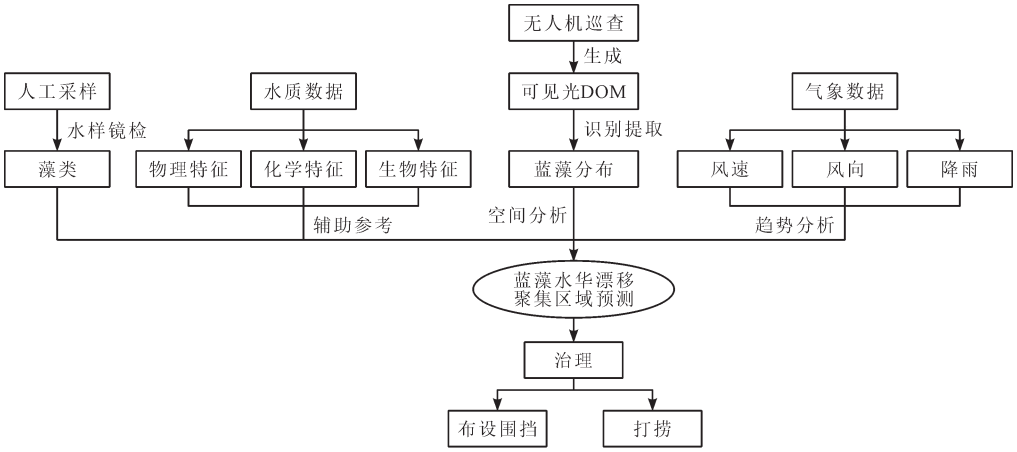



图2 研究路线图

1.2.4　监测站数据

本文采用的O湖3个监测站点的水质数据，主要包括蓝藻和叶绿素*a*。

1.3　*数据分析方法*

1.3.1　无人机影像解译分析

本文无人机日常监测数据运用Pix4D软件进行空三计算和拼接，并通过增强型红绿差值植被指数(visible band enhanced green−red difference index，VEGRDI)[13]计算蓝藻分布情况。VEGRDI在无人机可见光蓝藻提取方面有较好效果，本文运用Python语言编程进行VEGRDI方法提取数字正射影像中O湖蓝藻水华，计算面积。VEGRDI具体计算公式如下：

$$\mathrm{VEGRDI}=\frac{\rho_G-0.5\rho_R}{2\rho_G+0.5\rho_R}+1.5\rho_G \quad (1)$$

式中，$\rho_R$、$\rho_G$分别表示在红、绿波段的反射率。

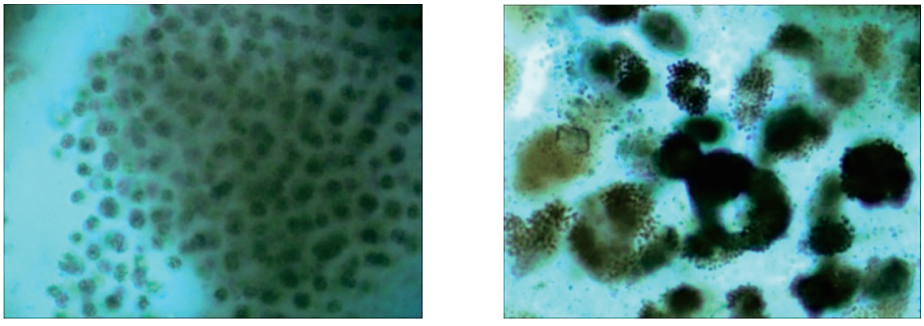
1.3.2　统计分析

本文气象数据和水质监测数据均用Origin Pro 9.0进行统计分析，该软件是由OriginLab公司开发的一个科学绘图、数据分析软件，适用于本文的气象与水质监测数据。

## 2　结果与分析

2.1　水样镜检结果分析

为确定O湖水华藻类，本研究于2022年7月12和16日在采集了O湖区域的水样进行镜检。采样点分布在O湖北部、东部和南部，镜检结果如图3所示。根据3个区域的采样点镜检结果显示，各个水样中藻类具有明显悬浮特征，细胞形态均呈球形和类球形，由多个单细胞形成不定形群体，细胞直径为3~7 μm，有主动运动性，无固氮异形孢子，因此判定为水中藻类为微囊藻，确定O湖存在微囊藻水华情况。



(a)　(b)

图3 水样镜检结果

微囊藻细胞紧密相连形成“微囊”的集合体，呈球形或不规则形状，大小可变，能从几十微米到几毫米不等。在微囊藻水华暴发的时候，风力较低的情况下，大量微囊藻会以群体状态形成大量集合体，漂浮在水体表层在水面形成绿色或蓝绿色的藻膜，通过肉眼或无人机等方法均可见，因此本研究选择合适的时间段，采用无人机技术对其分布进行监测。

2.2　*蓝藻水华的时空分布研究*

近年来，O湖频频发生蓝藻水华情况，在每年的7月下旬至8月上旬，蓝藻可以覆盖整个O湖，尤其是2010年、2014年、2021年等均暴发了较为严重的蓝藻水华，使得O湖几乎成为“蓝海”，陷入难以治理的境地(图4)。



图4 蓝藻水华聚集在水体表层

本研究于2022年7月初通过连续多天的人工采样水质监测结合现场探勘，发现O湖东部水体蓝藻含量较其他区域更多，东部湖区已出现成片蓝藻水华，其他区域暂未出现水华现象。为保证监测的准确性，本研究还采用无人机对O湖沿岸带进行每日监测，获得湖区蓝藻的最新信息，如图5所示。

根据无人机监测结果成图和空间分析可以发现，O湖的蓝藻首先在湖区东部大量生长，在7月初期仅在湖区东部出现水华现象，西部和南部湖区蓝藻含量较低，未有水华情况。相比于往年7月底至8月初全湖蓝藻暴发，早期监测能够发现蓝藻水华是由点至面扩散发展的，并非同一时间全湖暴发，因此，在蓝藻生长初期对湖泊进行密集监测，掌握其分布情况。遏制其漂移扩散是蓝藻防治工作的重中之重。

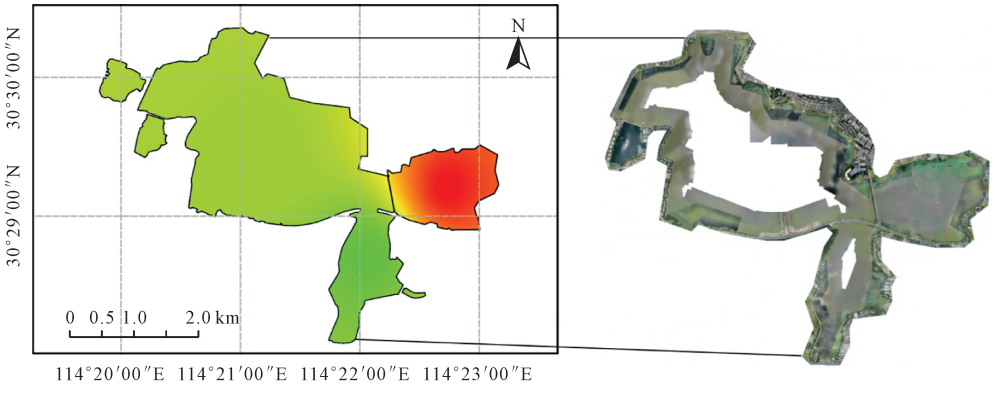



图5 O湖蓝藻空间分布

本研究根据7月初O湖仅在东部湖区有蓝藻的实际情况，从全湖治理转为重点区域防治。将东部湖区定为重点关注对象，通过建设挡藻围隔，将东部与其他区域隔离，把蓝藻集中在东部湖区，以避免蓝藻漂移扩散造成全湖水华的情况。

### 2.3 蓝藻水华的监测研究

#### 2.3.1 降雨对蓝藻水华的影响

在蓝藻的生物量方面，降雨对其的影响专家学者意见各不相同，有的研究认为降雨稀释了水体，降低了藻类密度，抑制了蓝藻水华的发展[14]；刘霞研究了降雨时湖中的水质情况，分析了湖中营养盐的成飞和浓度，认为降雨将陆地中的污水、泥土、化肥等冲刷进水体，使得水体富营养化更严重[15]，更适合蓝藻生长，从而促进蓝藻的发展。

本研究调查了实时气象数据，2022年7月19日上午09时实时降雨量为9.8 mm，2022年7月20日上午09时实时降雨量为6.3 mm。本研究在O湖3个监测点监测了蓝藻生物量和叶绿素*a*的值，实验室蓝绿藻数量检测统计结果如图6所示，这4天各监测站蓝藻数量总体呈平稳趋势。在降雨之后，其在水体的总数量并没有大幅降低，总体生物量并未明显受到降雨的影响。

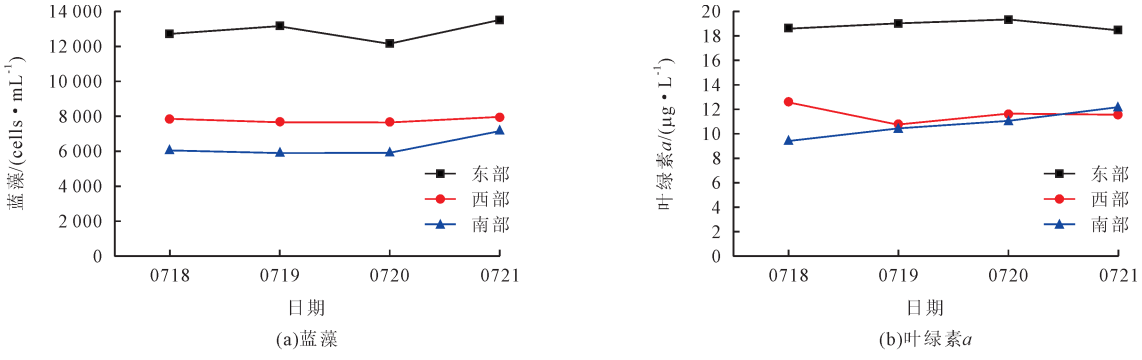
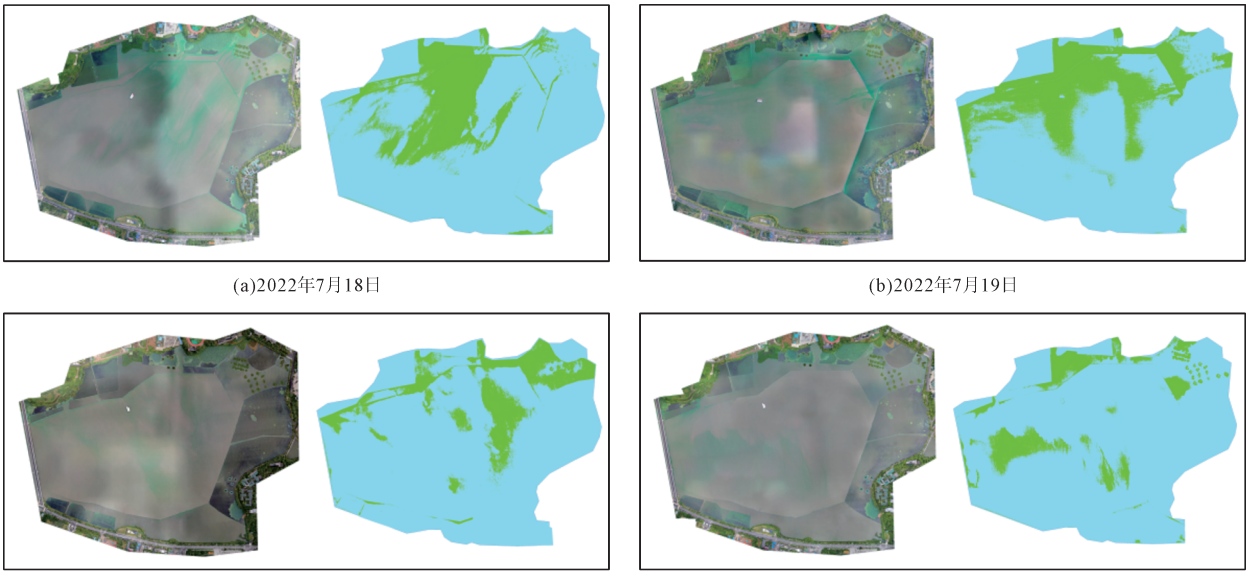



图6 蓝藻和叶绿素*a*统计图

在蓝藻空间分布方面，有的学者通过降雨后的卫星影像观测不到蓝藻水华，认为降雨可以有效抑制蓝藻水华的暴发[16]。本研究利用无人机监测，制作了地面采样距离（ground sample distance，GSD）达到0.05 m的数字正射影像（digital orthophoto map，DOM），并提取了O湖东部湖区的蓝藻水华，结果如图7所示。在降水前后连续4天的时间里，蓝藻水华覆盖范围有明显减少，在湖表面的占比在7月20日下降到6.83%，但并没有完全消失。同时，根据提取结果可以发现，蓝藻水华逐渐向西漂移。



(a)2022年7月18日　(b)2022年7月19日

(c)2022年7月20日　(d)2022年7月21日

图7 7月18-21日O湖东部蓝藻无人机正射影像和提取结果

综合上述结果进行分析，降雨过程是物理上对蓝藻水华进行了搅动和打散，使得蓝藻下沉，在垂直方向进行更多的移动，无法对蓝藻细胞产生破坏，不会从根本上减少蓝藻数量，等降雨结束后水体相对平静，蓝藻又会上浮堆积形成蓝藻水华，降雨对湖中蓝藻数量并没有太大影响。有的学者在降雨后的卫星影像中看不见蓝藻水华，有很大的原因是卫星影像的分辨率较低，尤其是经过降雨打撒的蓝藻不易大面积聚集，在空间分辨率在10 m以上卫星影像中难以显示。无人机这类中低空的遥感方式在蓝藻水华表达方面具有较好表现，不仅能实现实时湖面监测，可视方面更能做到厘米级精度，对于小范围的蓝藻集合能够有效显示，利于后续的蓝藻分析与统计。同时，降雨使得整个湖泊水位上升，对于O湖来说，只有一条连通渠作为泄洪通道，驱动流流向泄洪通道，并携带湖中被打散的蓝藻，使得水中大量蓝藻顺水向西漂移，待降雨停止后又重新上浮至水面，因此产生了湖表面蓝藻水华减少且向西漂移的情况。

2.3.2　风力、风速对蓝藻水华的影响

风速和风向是影响O湖蓝藻分布情况的重要因子。O湖全湖只有一条连通渠连通其他水体，湖泊本身的流入和流出对蓝藻的分布影响不大，而风对水面的切应力产生的风生流是蓝藻水华分布的主要驱动因子[17,18]。

对于O湖来说，一定的风速能够混合水体，提高水中的溶氧量，有利于蓝藻上浮聚集在水体表面形成水华。很多专家学者研究发现，高温微风的气象条件更适合蓝藻的生长，更易于形成蓝藻水华。本研究统计了O湖历年的方向数据，形成了风向玫瑰图，如图8所示。

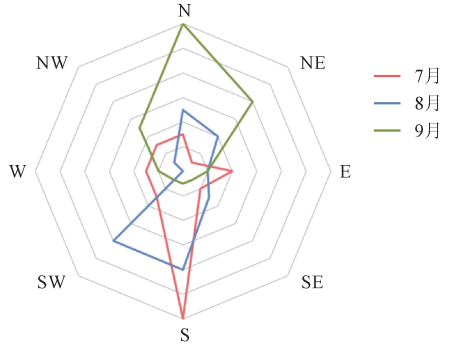



图8 7-9月O湖风向玫瑰图

根据统计结果，7月盛行南风，8月西南风较多，9月北风较常见。根据风向会影响水体的水流和湖泊的流向，使得蓝藻更易聚集在下风向，因此7月需要重点关注北部区域，8月重点关注东北区域，9月更关注南部区域。

同时，风速对蓝藻分布也有较大影响。如果风速过大，会产生较大的波浪，导致水体搅动，致使水体表层蓝藻下沉，破坏蓝藻的聚集体结构，改变藻密度的

垂直分布，减少其在湖面的分布范围。根据文献研究，蓝藻在平均风速约2 m/s的情况下，容易漂浮到水面并聚集，平均风速大于4 m/s时则抑制水华的形成。根据O湖7–9月的日平均风速图(图9)，7月平均风速为1.71 m/s，8月平均风速为1.89 m/s，9月平均风速为1.5 m/s，均小于2 m/s，且每日风速中均没有超过4 m/s，因此，O湖在7–9月处于适合蓝藻繁殖的风速环境，均利于蓝藻生长。

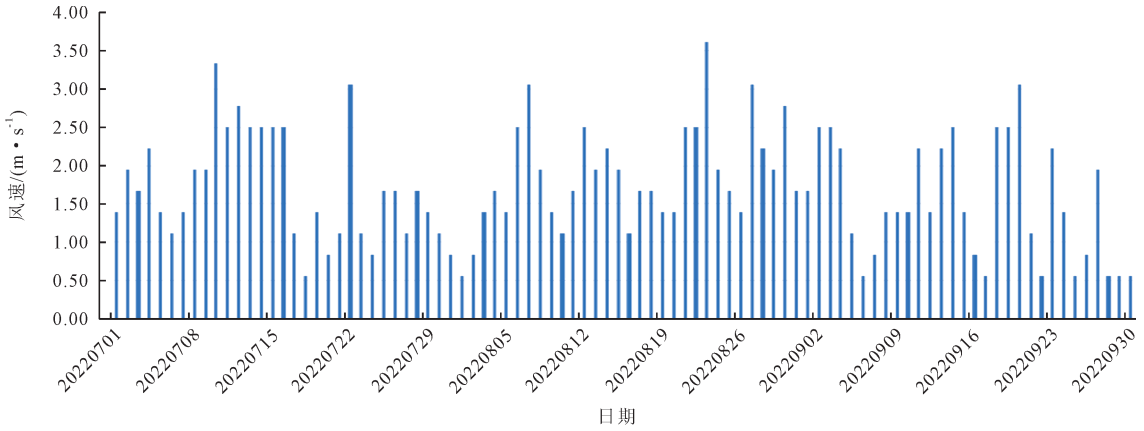
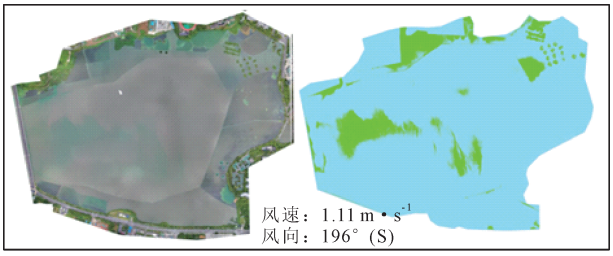
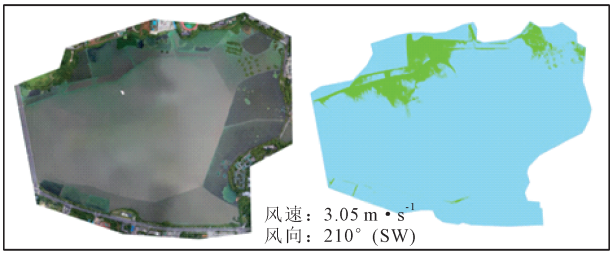



图9 7-9月O湖风速统计图

将气象数据与无人机监测数据结合，7月22日西南风，风速达到3.05 m/s，结合7月21日与7月22日无人机正射影像影像提取结果(图10)可以看出，7月21日蓝藻主要分布在北部、西部及中心区域，南部浮坝边缘存在聚集情况。7月22日蓝藻漂移至北部区域，西北部和东北部区域均有聚集。因此，风速影响蓝藻在湖面分布的面积，风向影响蓝藻在湖面分布的位置，蓝藻在低风速下在会顺风漂移，聚集在下风向，在治理过程中，在下风区提前布设围隔有助于防止其扩散。




(a)20220721




(b)20220722日

图10 蓝藻漂移对比图

## 2.4 蓝藻水华的防治研究

蓝藻治理方法有很多，常见的包括物理控藻法、化学控藻法和生物控藻法[19–21]。物理控藻法有打捞、遮光、超声波除藻等，化学除藻法有投放杀藻剂、絮凝剂和催化剂等化学方法，生物控藻法有水生植物法、水生动物法、微生物法等。通过两种或多种控藻方法的组合使用，是目前较为常用的手段，不仅能提高工作效率，还能增加稳定性和持续性。

然而，O湖整体水生态现状不容乐观，其自然分布沉水和浮叶植物消失，水生植物不具备自然恢复能力，且底栖动物和鱼类物种多样性低、鱼类群落结构不合理，无法靠湖泊自身能力修复，更无法使用生物控藻法，增加了整个湖泊的蓝藻水华防治难度。因此，本研究利用最简单的物理法，通过建设挡藻围隔与人工打捞结合，以缓解O湖东部区域蓝藻污染情况。

本研究每日利用无人机对该地区进行蓝藻水华监测，形成了75张高清数字正射影像，选择其中15张如图11所示。根据无人机正射影像统计湖面蓝藻水华的分布情况，并结合气象数据展开分析，预测第二天蓝藻漂移态势，提前在对应区域布设围隔或打捞，以达到治理的效果。

本研究根据气象数据观察到O湖7月19–21日存在降水情况，并伴随东风，结合无人机当日监测数据，大量蓝藻向西漂移，预测蓝藻水华会由O湖东部漂移至O湖大桥处，突破O湖大桥设置的挡藻围隔(延伸到水面以下3 m)，进入西部湖区。为避免蓝藻水华影响近一步扩大，本研究随即建议在O湖大桥东部增设蓝藻围隔。新建的档藻围隔于7月29日开始建设，7月30日建设完成，建设过程如图12所示。

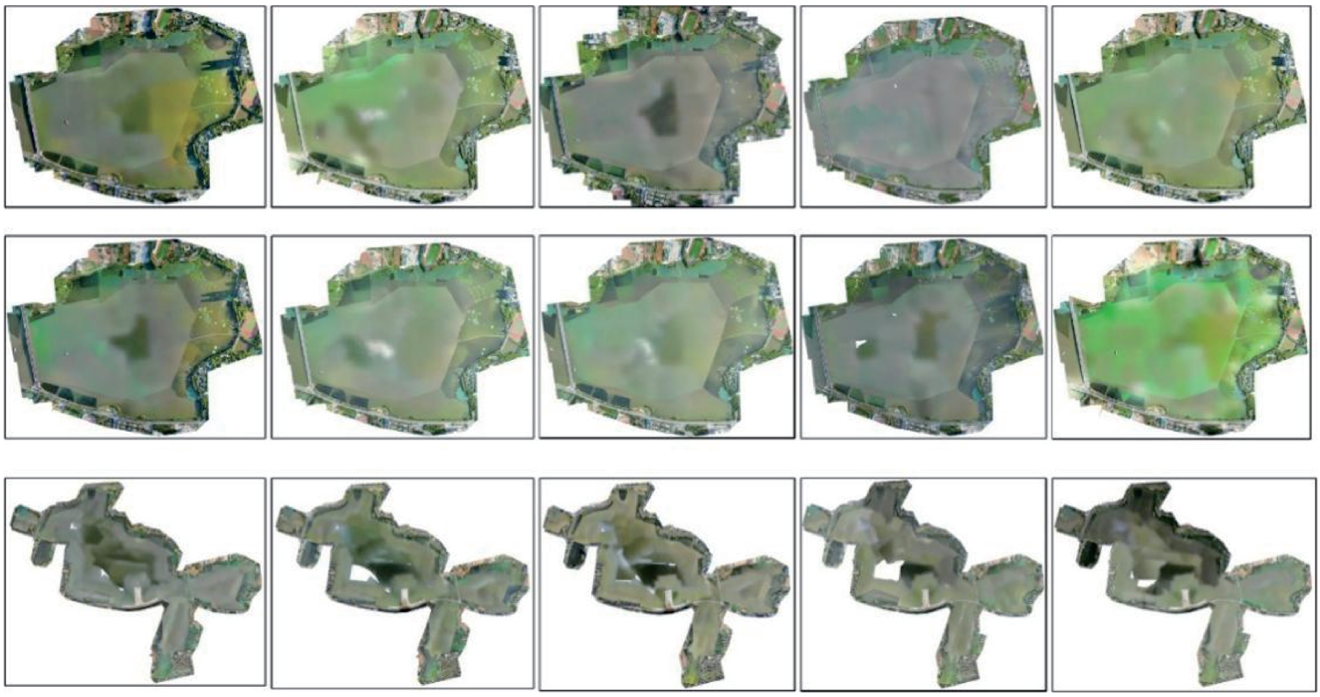
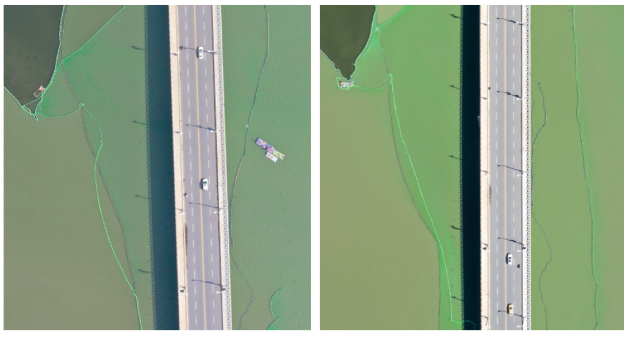


图11 每日无人机监测正射图



(a)　　(b)

图12 蓝藻围隔建设

在蓝藻围隔建设之前，O湖大桥处原本的围隔在持续东风的情况下无法阻挡所有水华，由于风较大掀起浪涛或者围隔破损，出现了蓝藻泄露的情况，有部分蓝藻水华从间隙中流向O湖西部，如图13所示。

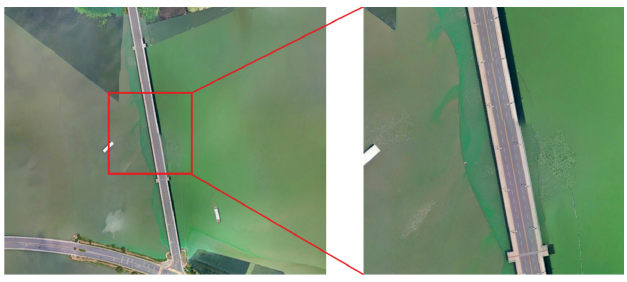
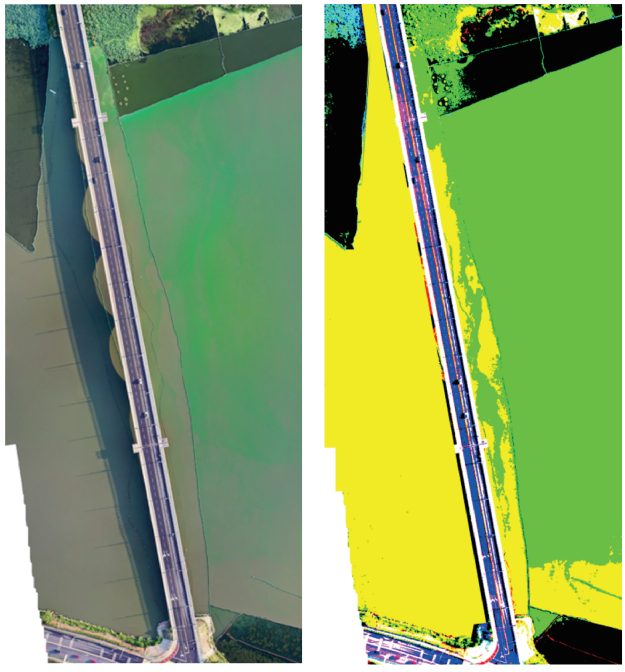


图13 蓝藻泄露

重新建设围隔之后，在8月9日持续东风的情况下，蓝藻向西部漂移，桥下新建的围隔起到了决定性作用，阻止了蓝藻漂移至O湖西部，如图14所示为8月9日的O湖大桥处无人机监测影像和蓝藻水华提取结果。蓝藻水华聚集在O湖大道东侧，在围隔的阻拦下并未通过O湖大桥，在西部区域未见水华，说明新建的蓝藻围隔具有较强的阻隔作用。



(a)　　(b)

图14 新建的隔网阻隔蓝藻水华

为验证本研究方法的正确性和可靠性，本文对O湖水质进行了持续观测，蓝藻指标方面，东部湖区在8–9月份持续降低，表明水体中蓝藻含量逐渐减少，打捞工作具有明显效果。南部和西部区域基本保持较低值，没有明显增长，表明东部暴发的蓝藻水华并未大规模进入其他区域，建设的蓝藻围隔起到了防治作用，保证了O湖南部和西部区域在2022年并未出现蓝

藻水华情况(图15)。

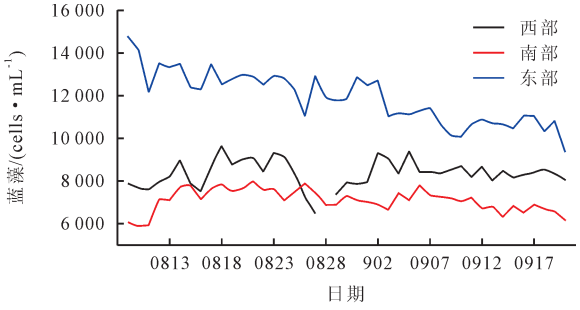



图15 8-9月O湖水质监测蓝藻含量

## 3 讨论与建议

O湖往年蓝藻暴发通常在7月下旬至8月上旬，本文在7月中旬进行监测，已经能够将蓝藻水华控制在东部区域，避免全湖发生水华。若提前到6月底-7月初开展监测，利用无人机全岸线飞检，在可疑区域通过水样镜检判断水中藻种类型，结合监测站数据在加强对风险区域的关注，将会更加早期、及时发现有蓝藻的区域，有效地减少蓝藻水华暴发的可能性。

根据本研究的过程与结果，可以发现蓝藻水华并非是难以解决的问题。对我国的大部分湖泊来说，蓝藻在种子期时不是均匀分布在湖中，而是在较小的区域繁殖，并根据季节天气不断漂移。夏初之际在水体中的部分区域会先形成蓝藻水华，之后蓝藻根据气象和水文情况不断繁殖和漂移，最后分布全湖。因此，蓝藻水华的防治应遵循“早监测、早发现、早隔离、早治疗”的原则。在早期通过日常岸线全覆盖监测，及时发现存在蓝藻水华区域并布设围隔将其与其他区域隔离，抑制其扩散；然后通过物理、化学和生物等治理措施治理，抑制其增长，避免蓝藻水华的发生。通过从“后处理”转向“预防发生”，动态掌握蓝藻分布态势以精准控制蓝藻是蓝藻水华防控工作的关键。

## 4 结论与展望

本文对O湖东部湖区的蓝藻情况展开了监测，并对其漂移规律进行了研究，分析了其分布情况与气象因子之间的关系。通过探究证明风速和风向是夏季蓝藻分布的主要影响因素，蓝藻水华在低风速的情况下会上浮聚集并漂移到下风区；降雨会减少蓝藻在湖表面的分布面积，但不会改变蓝藻实际的生物量。同时，本研究通过实际治理验证了本文的探究结果，证明了气象因素对蓝藻水华分布的重要影响，为河湖蓝藻水华治理提供一定的支持。

蓝藻对生态环境中具有非常大的危害性，蓝藻治理是一项长期且艰巨的任务，对其进行监测是非常必要的。本研究也存在一定的局限性，如由于水质监测站建设时间限制，缺少对水质数据进行全面分析；无人机监测影像颜色不均匀，影像内容分辨不清等。未来，应提前对蓝藻水华易暴发的区域进行精细化监测，多方面综合研判风险以实现对蓝藻水华的有效管控。

**[参考文献]**

[1] 李亚春,谢小萍,朱小莉,等. 结合卫星遥感技术的太湖蓝藻水华形成温度特征分析[J]. 湖泊科学, 2016,28(6):1256-1264.
Li Yachun, Xie Xiaoping, Zhu Xiaoli, et al. Applying remote sensing techniques in analysis of temperature features causing cya-nobacteria bloom in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2016,28(6):1256-1264.

[2] 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.

[3] 李慧,徐方,杨柳,等. 巢湖蓝藻水华衰亡初期营养盐浓度变化的研究[J]. 环境科学与技术, 2019,42(5):161-167.
Li Hui, Xu Fang, Yang Liu, et al. Study on the change of nutrient concentration in the early stage of cyanobacteria bloom in Chaohu Lake[J]. Environmental Science & Technology, 2019,42(5):161-167.

[4] 马腾耀,肖鹏峰,张学良,等. 基于视频监控图像的环巢湖蓝藻实时动态监测[J]. 湖泊科学, 2022,34(6):1842-1855.
Ma Tengyao, Xiao Pengfeng, Zhang Xueliang, et al. Real-time monitoring of cyanobacterial blooms dynamics around Lake Chaohu based on video surveillance images[J]. Journal of Lake Sciences, 2022,34(6):1842-1855.

[5] 钱瑞. 巢湖滨岸带蓝藻水华堆积风险评估研究[D]. 西北师范大学, 2022.
Qiang Rui. Assessing the Risks of Harmful Algal Blooms Accumulation at Littoral Zone of Lake Chaohu[D]. Northwest Normal University, 2022.

[6] 李加龙,罗纯良,吕恒,等. 2002-2018年滇池外海蓝藻水华暴发时空变化特征及其驱动因子[J]. 生态学报, 2023,43(2):878-891.
Li Jialong, Luo Chunliang, Lyu Heng, et al. Spatio-temporal variation and driving factors of algal bloom at Lake Dianchi during 2002-2018[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(2):878-891.

[7] 张石文. 滇池蓝藻暴发原因及治理措施探讨[J]. 科技创新与应用, 2020(33):116-117.
Zhang Shiwen. Discussion on the causes of cyanobacteria outbreak in Dianchi Lake and its control measures[J]. Technology Innovation and Application, 2020(33):116-117.

[8] 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. Threshold analysis of nitrogen and phosphorus control for cyanobacteria bloom in Taihu Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 2022,34(4):1075−1089.

[9] 刘胜男. 河湖蓝藻水华治理与氮磷营养盐控制技术探析[J]. 黑龙江水利科技, 2022,50(8):184−186.
Liu Shengnan. Discussion on the control technology of cyanobacteria bloom and nitrogen and phosphorus nutrients in rivers and lakes[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2022,50(8):184−186.

[10] 赵华,张先智,肖娴. 氮磷营养盐控制与湖泊蓝藻水华治理研究进展[J]. 环境科学导刊, 2021,40(3):12−15.
Zhao Hua, Zhang Xianzhi, Xiao Xian. Progress on treatment of cyanobacterial bloom and nutrient control[J]. Environmental Science Survey, 2021,40(3):12−15.

[11] 潘欢欢,董贺轩,王通. 武汉南湖水系形态历史演变与内涝的关系研究[C]. 2017中国城市规划年会, 2017:38−45.
Pan Huanhuan, Dong Hexuan, Wang Tong. Study on the relationship between the historical evolution of Wuhan Nanhu water system morphology and waterlogging[C]. Annual National Planning Conference 2017,2017:38−45.

[12] 刘勇亮. 武汉南湖连通渠景观工程设计探讨[J]. 现代园艺, 2015(16):62−63.
Liu Yongliang. Discussion on landscape engineering design of Wuhan Nanhu connecting canal[J]. Contemporary Horticulture, 2015(16):62−63.

[13] 李鑫,孙伟,李林. 基于小型无人机可见光遥感的蓝藻识别研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2017,40(4):153−156.
Li Xin, Sun Wei, Li Lin. Study on the recognition of Spirulina based on visible light remote sensing of the small UAV [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2017,40(4):153−156.

[14] 范裕祥,金社军,周培,等. 巢湖蓝藻水华分布特征和气象条件分析[J]. 安徽农业科学, 2015,43(4):191−193.
Fan Yuxiang, Jin Shejun, Zhou Pei, et al. Analysis on the distributions and meteorological conditions of cyanobacteria bloom in Chaohu Lake[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015,43(4):191−193.

[15] 刘霞. 太湖蓝藻水华中长期动态及其与相关环境因子的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
Liu Xia. Long−term Dynamics of Cyanobacteria Related to Environment Factors in Lake Taihu[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

[16] 武胜利,刘诚,孙军,等. 卫星遥感太湖蓝藻水华分布及其气象影响要素分析[J]. 气象, 2009,35(1):18−23.
Wu Shengli, Liu Cheng, Sun Jun, et al. Remote sensing and analysis on meteorological factors of blue algal bloom in Lake Tai[J]. Meteorological Monthly, 2009,35(1):18−23.

[17] 吕永政,李翠梅,肖昭文. 风生流对贡湖湾水环境的影响过程模拟研究[J]. 水电能源科学, 2022,40(2):39−42.
Lyu Yongzheng, Li Cuimei, Xiao Zhaowen. Simulation research on influence process of wind−drift flow on water environment of Gonghu Bay[J]. Water Resources and Power, 2022,40(2):39−42.

[18] 倘佳舟,李翠梅,肖昭文,等. 风生流和吞吐流共同作用对湖泊环流的影响及污染带特征[J]. 人民黄河, 2022,44(12):95−100.
Chang Jiazhou, Li Cuimei, Xiao Zhaowen, et al. Influence of the combined action of wind−generated flow and throughput flow to the lake circulation and analysis of the characteristics of pollution zone[J]. Yellow River, 2022, 44(12): 95−100.

[19] 余婷,谢三桃. 湖滨湿地生态修复和蓝藻防控治理思路与措施[J]. 水利规划与设计, 2022(10):1−3.
Yu Ting, Xie Santao. Thoughts and measures on ecological restoration of lakeside wetland and prevention and control of cyanobacteria[J]. Water Resources Planning and Design, 2022(10):1−3.

[20] 叶晶,赵剑,周林,等. 湖泊蓝藻水华治理技术研究进展[J]. 绿色科技, 2022,24(24):194−199.
Ye Jing, Zhao Jian, Zhou Lin, et al. Research progress on treatment technology of cyanobacterial bloom in lakes[J]. Journal of Green Science and Technology, 2022, 24(24):194−199.

[21] 宋益峰, 兰林, 吴江. 我国典型浅水湖泊蓝藻水华治理技术研究进展[J]. 中国水运(下半月), 2010(8):154−155.
Song Yifeng, Lan Lin, Wu Jiang. Research progress of cyanobacteria bloom management technology in typical shallow water lakes in China[J]. China Water Transport: second half of the month, 2010(8):154−155.