

## 利用陆基高光谱遥感捕捉太湖蓝藻水华日内快速变化过程<sup>\*</sup>

张运林<sup>1\*\*</sup>, 张毅博<sup>1</sup>, 李娜<sup>1,2</sup>, 孙晓<sup>1,2</sup>, 王玮佳<sup>1,2</sup>, 秦伯强<sup>1,3</sup>, 朱广伟<sup>1,3</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 南京中科深瞳科技研究院有限公司, 南京 210031)

**摘要:** 受蓝藻自身垂直迁移和频繁风浪扰动影响, 太湖蓝藻水华漂浮混合和迁移堆积等变化迅速, 在传统的湖面定位和断面监测中总感觉蓝藻水华有些“来无影、去无踪”, 限制了对其形成过程、驱动机制和防控治理的深入认识。卫星遥感可以实现蓝藻水华空间分布同步观测, 但由于观测频次的限制很难捕捉蓝藻水华快速动态变化过程。本文利用与杭州海康威视数字技术股份有限公司联合自主研发的陆基(地基、岸基或者平台、船舶、桩基等能固定安装的均可)高光谱多参数水质遥感监测仪, 架设于中国科学院太湖湖泊生态系统研究站(简称太湖站)水上观测场, 通过对叶绿素 *a* 浓度及其他关键水质参数秒—分钟级的连续观测, 有效捕捉了一天蓝藻水华短期突然和快速变化过程。研究结果显示, 在微风和小风条件下蓝藻容易在表层水体漂浮, 盛行西北风驱动湖面开敞水域蓝藻水华快速漂浮集聚到太湖站岸边, 短短半小时内表层水体叶绿素 *a* 浓度可以由 10  $\mu\text{g/L}$  快速攀升到 100  $\mu\text{g/L}$  以上, 一天内会出现多个叶绿素 *a* 峰值, 清晰展示了蓝藻快速日内动态变化过程。受蓝藻快速日内变化影响, 透明度、总氮、总磷和高锰酸盐指数等水质参数也呈现出快速日内变化, 叶绿素 *a* 浓度与透明度存在极显著负相关, 与总氮、总磷和高锰酸盐指数存在极显著正相关, 叶绿素 *a* 能解释总氮、总磷 80% 以上的变化, 说明蓝藻短期内的漂浮和集聚深刻影响到湖泊水质。

**关键词:** 陆基高光谱遥感; 蓝藻水华; 叶绿素 *a*; 湖泊水质; 太湖

## Capturing the rapid intra-day change of cyanobacteria bloom by land-based hyperspectral remote sensing in Lake Taihu<sup>\*</sup>

Zhang Yunlin<sup>1\*\*</sup>, Zhang Yibo<sup>1</sup>, Li Na<sup>1,2</sup>, Sun Xiao<sup>1,2</sup>, Wang Weijia<sup>1,2</sup>, Qin Boqiang<sup>1,3</sup> & Zhu Guangwei<sup>1,3</sup>

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

(3: *Nanjing Zhongke Deep Insight Technology Research Institute Co., Ltd, Nanjing 210031, P.R.China*)

**Abstract:** Due to the vertical migration of cyanobacteria and frequent wind waves disturbance, the floating, mixing, migration and accumulation of cyanobacteria bloom in Lake Taihu occur rapidly. It is very difficult to accurately capture cyanobacteria bloom occurrence and appearance using the traditional lake positioning and cross-section monitoring due to low temporal and spatial observation frequency and resolution, which limits the in-depth understanding of cyanobacteria bloom formation process, driving mechanism, prevention and control. Satellite remote sensing can realize the synchronous observation of the spatial distribution of cyanobacteria bloom, but it is difficult to capture the rapid dynamics of cyanobacteria bloom due to the limitation of observation frequency. Using independently developed land-based (ground-based, shore-based, or fixed on the platform, ship and pile foundation) hyperspectral water quality remote sensing instrument by the Hangzhou Hikvision Digital Technology Co., Ltd and Nanjing Zhongke Deep Insight Technology Research Institute Co., Ltd installed in Taihu Laboratory for Lake Ecosystem Research (TLER) of Chinese Academy of Sciences, the short-term sudden and rapid cyanobacteria bloom dynamics in a day was effectively

<sup>\*</sup> 2021-08-22 收稿; 2021-09-10 收修改稿。

中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20200071)和国家自然科学基金项目(41930760, 41621002, 41771514)联合资助。

<sup>\*\*</sup> 通信作者; E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn.

captured through the continuous observation of chlorophyll-*a* concentration and other key water quality parameters at the second-minute level. The results show that cyanobacteria are easy to float in the surface water under the conditions of breeze and light wind, and the prevailing northwest wind drives the cyanobacteria bloom in the open water area of the lake to float and accumulate to the shore of TLLER quickly. Chlorophyll-*a* concentration in surface water can rapidly rise from 10  $\mu\text{g/L}$  to more than 100  $\mu\text{g/L}$  in just half an hour. Several chlorophyll-*a* peaks are recorded in a day from 8:30 to 18:30. All these results clearly show that cyanobacteria have a rapid hourly dynamic change process. Affected by the rapid hourly variations of cyanobacteria, water quality parameters such as secchi disc depth, total nitrogen, total phosphorus and chemical oxygen demand also show rapid hourly variations. Significantly negative relationship between chlorophyll-*a* and secchi disc depth but significantly positive relationships between chlorophyll-*a* and total nitrogen, total phosphorus, chemical oxygen demand are found, which indicate short-term floating and gathering of cyanobacteria have a profound impact on the water quality of lakes.

**Keywords:** Land-based hyperspectral remote sensing; cyanobacteria bloom; chlorophyll-*a*; lake water quality; Lake Taihu

过去 40 年,我国经济社会快速发展的同时也遭遇持续不断的污染困扰,人类活动导致的大量氮磷污染物排放进入河流和湖库,引发长江中下游及东部沿海地区许多湖库都面临富营养化与蓝藻水华问题,严重威胁湖库生态系统健康和饮用水安全<sup>[1-3]</sup>. 而全球气候变化与营养盐富集的协同放大效应进一步加剧了湖库富营养化及蓝藻水华暴发程度,导致近年来通过大规模流域控源截污以防止湖库藻类水华也难奏效<sup>[4-5]</sup>,使得湖库富营养化治理与藻类水华控制成为一项长期而又艰巨的任务. 2007 年太湖蓝藻水华事件曾造成无锡自来水被污染,数百万居民自来水供应中断一周<sup>[2]</sup>. 之后的十多年高强度治理显示,太湖总氮浓度持续下降,但作为浮游植物生长和蓝藻水华发生关键限制因子的总磷浓度则先降后升,并且在 2017—2019 年居高不下、高位波动,蓝藻水华频繁暴发甚至发生小规模“湖泛”事件的威胁依然存在<sup>[6-8]</sup>. 据中国科学院太湖湖泊生态系统研究站(简称太湖站)全湖 32 个站点季度长期定位观测数据显示,2019 年太湖水体总氮浓度已由 2007 年的 3.37 mg/L 降到 2.03 mg/L,但总磷浓度只由 0.122 mg/L 变为 0.118 mg/L. 相伴随的是 2017 年发生了有记录以来最严重的蓝藻水华,最大水华面积达 1582 km<sup>2</sup><sup>[4]</sup>,2018 年虽略有减轻,但 2019 年的蓝藻水华强度依然较高,强度仅次于 2017 年. 因此,太湖生态环境保护与治理仍面临较长时期内的控源截污、蓝藻水华防控和“两个确保”压力(确保饮用水安全、确保不发生大面积湖泛).

太湖蓝藻水华在风场和水动力作用下呈现高度的时空异质性和快速动态变化,在小时尺度上会发生明显水平迁移和垂直混合<sup>[9-12]</sup>,传统的湖面定位和断面监测总感觉蓝藻水华有时“来无影、去无踪”<sup>[13]</sup>. 蓝藻水华在湖面上的漂浮不定给藻华和湖泛等异味水体的防控和治理带来了很大挑战,也威胁到饮用水源地安全. 多源卫星遥感可以实现蓝藻水华空间分布同步观测,但受制于卫星传感器时间、空间和光谱分辨率,加之云雨天气的影响,很难捕捉蓝藻水华快速动态变化过程. 水下探头高频监测为水质快速动态变化过程观测提供了新的途径<sup>[14-16]</sup>,但太湖湖面开阔、风浪扰动强烈、水体浑浊,水下探头很容易被附着和污染,也容易被风浪损坏,受水况环境干扰造成监测精度不稳定,可监测指标有限,使用受到极大限制,并且仪器价格高昂、后期管理和维护成本非常高<sup>[17-19]</sup>. 与此同时,2015 年国务院发布的《生态环境监测网络建设方案》提出:“强化高新技术、先进装备与系统的应用,提高生态环境监测立体化、自动化、智能化水平”. 因此,迫切需要发展新的自动化和智能化的水环境监测设备和技术方法,实现蓝藻水华及关键水质参数快速动态变化连续高频监测,应对水环境突然变化,补充和完善现有监测体系不足,服务蓝藻水华防控和水环境监管.

本文利用前期自主研发的陆基高光谱多参数水质遥感监测仪,通过秒—分钟频次浮游植物叶绿素 *a*、透明度、总氮、总磷和高锰酸盐指数的连续观测,试图精细刻画蓝藻水华及其关键水质参数快速变化过程,结合逐时风速风向等气象数据分析其快速变化原因,明晰蓝藻水华漂浮的临界风速,量化外部漂浮输入和本地生长对藻类生物量的贡献,有助于深入理解太湖蓝藻水华形成过程与驱动机制,破解蓝藻水华“来无影、去无踪”奥秘,支撑蓝藻水华精准打捞和快速清除等主动防控策略,实现更高水平“两个确保”.

## 1 数据与方法

### 1.1 现场观测

2018 年我们率先提出近地面离水高光谱多参数水质陆基(地基、岸基)遥感监测理念和实施路径,南京

中科深瞳科技研究院有限公司联合杭州海康威视数字技术股份有限公司首创近水面非接触式陆基(地基、岸基或者平台、船舶、桩基等能固定安装的均可)高光谱多参数水质遥感监测仪(ZKDI-R2021型),仪器集成高光谱采集、视频监控、毫米波雷达水位测定、水质参数反演和深度学习等技术,可以实现复杂天况下总氮、总磷、高锰酸盐指数、悬浮物、透明度、浊度、消光吸收、有色可溶性有机物吸收、叶绿素、藻蓝素、藻密度共11个关键水质参数实时高频监测。陆基高光谱多参数水质遥感监测仪既克服了以往水下探头的易污染、难维护、参数少和精度低的问题,又解决了卫星遥感监测中时间和光谱分辨率低以及受天气和大气尘埃干扰的影响,实现遥感和断面监测的深度融合。

陆基高光谱多参数水质遥感监测仪架设在中国科学院太湖湖泊生态系统研究站(简称太湖站)水上观测场栈桥顶端,离岸边约400 m,观测站点东面紧靠岸边,北、西、南三面为开敞水域,特别是西面没有任何岸边阻断(图1)。仪器距水面约4.0 m(架设高度3~10 m均可)(图1),光谱波段为400~1000 nm,光谱分辨率为1 nm,观测频次为20 s/次。仪器通过上光谱相机和下光谱相机同步测量入射光和水面反射光进而计算得到辐照度比。仪器内已植入前期开发的11个关键水质参数深度学习反演算法,算法基于太湖、富春江水库、千岛湖、梁溪河和南京城市河流等近700个样品构建,可同步输出水体高光谱辐照度比和水质参数实时数据<sup>[20]①</sup>。对于400~1000 nm可见光和近红外光学遥感来说,悬浮物、透明度、叶绿素和有色可溶性有机物等光学物质有明显的光学信号,高光谱遥感反演起来比较容易,而总氮、总磷的吸收光谱在紫外波段,其在可见光和近红外确实没有光学信号,但总氮、总磷等非光学物质与悬浮物、透明度、叶绿素和有色可溶性有机物等光学物质具有复杂的耦合关系,因此在反射光谱上也会有响应,只是这种响应不是线性或者一对一的。目前仪器植入的是神经网络模型、高斯回归过程等机器学习算法,从400~900 nm以每5 nm或者10 nm光谱辐照度比作为输入数据进行模型训练和检验,由于算法包含的光谱通道比较多,可以很好反映总氮、总磷等非光学物质与光谱反射率之间的复杂耦合关系,同时算法训练数据集和检验数据集覆盖不同类型水体,样本量也比较大,相关参数精度都在80%以上<sup>[20-22]①</sup>。

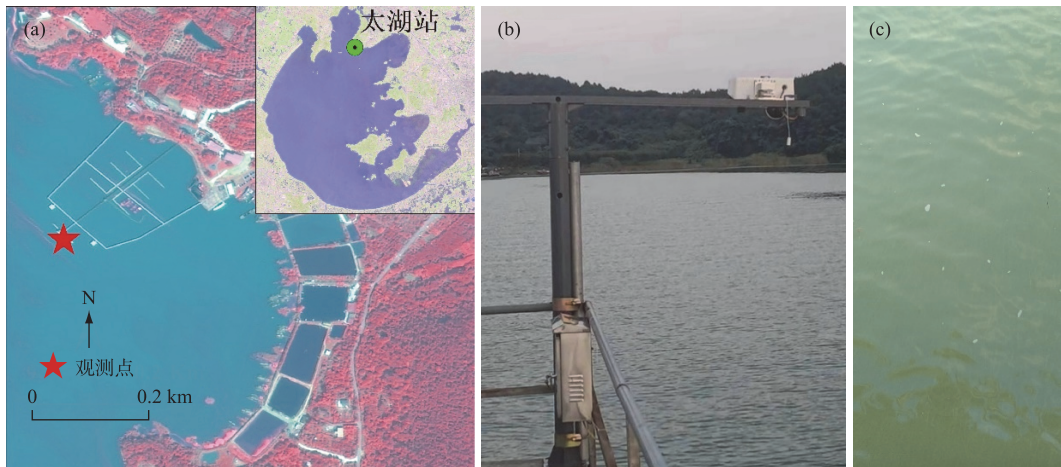


图1 观测点位置(a)、陆基高光谱多参数水质遥感监测仪现场架设照片(b)和藻华现场图片(c)

Fig.1 Location of observation site (a), photo of *in situ* land-based hyperspectral water quality remote sensing monitor instrument (b), and algal bloom photo (c)

## 1.2 气象水文数据

太湖站架设有气象观测站,实时记录逐时气象观测数据,主要包括气温(日最低、日最高、日平均)、风速风向(平均风速、最大风速)和降水等。水温数据来自于太湖站栈桥顶端水下探头连续高频监测,监测频率是

① 陆基高光谱多参数水质遥感算法 2021.05 版。

0.5 h/次.

### 1.3 蓝藻水华界定

水华界定和对应的生物量阈值判定一直都是个难题<sup>[23]</sup>,有研究用叶绿素 *a* 浓度大于 10  $\mu\text{g/L}$  或藻细胞超过  $1.5 \times 10^7$  cells/L,并在水面形成一层肉眼可见的漂浮藻类作为水华判别阈值<sup>[24-25]</sup>;美国佛罗里达州将湖泊水体叶绿素 *a* 浓度大于 40  $\mu\text{g/L}$  定义为藻类水华<sup>[26]</sup>. 根据我们在太湖开展的蓝藻水华卫星遥感监测和同步叶绿素 *a* 浓度测定发现,当叶绿素 *a* 浓度在 30~40  $\mu\text{g/L}$  之间时卫星影像就能观测到明显表面水华,因此以叶绿素 *a* 浓度 30~40  $\mu\text{g/L}$  作为太湖蓝藻水华判别阈值.

### 1.4 统计分析

采用 SPSS 20 软件对数据进行统计分析,包括计算其平均值、线性拟合等,当显著性水平值  $P \leq 0.05$  时表明显著相关, $P \leq 0.01$  时表明极显著相关. 利用 OriginPro 2018 绘制文中数据图.

## 2 结果与讨论

### 2.1 气象水文条件

从观测期间气象水文来看,8月7—9日没有明显降水过程,7号有零星小雨,当天累积降水量 3.6 mm,天气整体晴朗少云,气温较高,经历高温过程,逐时平均气温在 24.4~36.6 $^{\circ}\text{C}$ . 逐时平均水温在 29.6~31.3 $^{\circ}\text{C}$ ,变化幅度显著小于气温日内变化,受气温日变化影响较小,逐时气温与水温不存在显著性相关( $R^2 = 0.04$ ,  $P = 0.14$ ),这与以往逐日观测结果明显不一样<sup>[27]</sup>. 整体而言,风速不大,7日逐时平均风速为 2.66 m/s,8日更是降至 1.60 m/s,属于小风和微风环境;7日风向以东风偏北为主,由太湖站岸边往湖面开敞水域吹,8日风向则以北风和西北风为主,由湖面开敞水域往太湖站岸边吹(图1、图2).

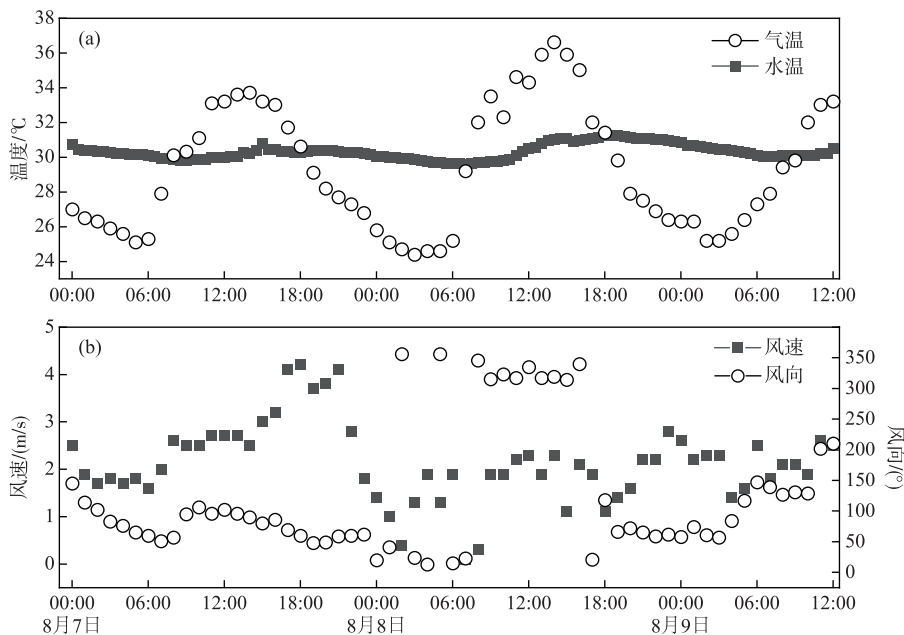


图2 观测站点 2021 年 8 月 7—9 日气温、水温(a)以及风速、风向(b)逐时变化

Fig.2 Hourly variations of air temperature and water temperature (a), wind speed and wind direction (b) of observation site from August 7–9, 2021

### 2.2 叶绿素 *a* 快速变化过程

8月8日8:30—18:30期间总共观测了1800组叶绿素 *a* 数据,变化范围在 8.0~115.0  $\mu\text{g/L}$ ,平均值为  $(59.5 \pm 22.63)$   $\mu\text{g/L}$ . 以叶绿素 *a* 浓度 30~40  $\mu\text{g/L}$  作为太湖蓝藻水华判别阈值,从图3a叶绿素 *a* 高频动态

变化过程来看,全天经历了明显的水华快速变化过程.早上8:30—9:00期间叶绿素 $a$ 浓度非常低,在10  $\mu\text{g/L}$ 波动,没有观测到明显水华;在9:20左右出现一个短暂峰值,叶绿素 $a$ 浓度在30~35  $\mu\text{g/L}$ 之间,出现零星水华;9:30—10:30维持在低值,叶绿素 $a$ 浓度略高于10  $\mu\text{g/L}$ .从10:30之后叶绿素 $a$ 浓度快速拉升,在短短半小时内迅速增加到100  $\mu\text{g/L}$ 以上,增加了10倍左右,水面漂浮大量藻颗粒,形成明显的蓝藻水华(图1),清晰彰显了短期内蓝藻水华“来无影”快速变化过程.之后尽管叶绿素 $a$ 浓度有所降低,但到18:30时一直都维持在高值,整体在60~80  $\mu\text{g/L}$ 波动,期间13:30也有一个叶绿素 $a$ 浓度在100  $\mu\text{g/L}$ 左右的明显峰值.此外,在15:40、16:20和17:50还存在多个叶绿素 $a$ 浓度低峰,大约在80  $\mu\text{g/L}$ 左右.

从叶绿素 $a$ 的高频变化过程来看,在短短的10小时之内,观测站点经历一次从无到有的水华快速变化过程,特别是10:30—11:00期间叶绿素 $a$ 浓度迅速从10  $\mu\text{g/L}$ 左右上升到100  $\mu\text{g/L}$ 以上.在这么短的时间内藻类自身的生长繁殖不可能支撑叶绿素 $a$ 浓度如此快速的变化过程,只有可能是周边水域藻类水华漂浮集聚到观测站点.综合分析观测站点位置和观测期间风速风向变化,很容易解释叶绿素 $a$ 浓度短时间内的快速变化过程.观测站点东面紧靠岸边,北、西、南三面为开敞水域,特别是西面没有任何岸边阻断(图1).8月8日8:00—19:00期间观测站点经历微风和小风环境,风速非常低,在0.3~2.3 m/s之间,平均风速为1.70 m/s,这个风速非常有利于蓝藻水华在水面的漂浮集聚,以往研究表明当风速低于3~4 m/s时蓝藻很容易在水面漂浮集聚<sup>[9,28]</sup>,8:00—16:00盛行西北风,平均风向为325°,恰好将梅梁湾湖面开敞水域表面蓝藻水华吹向观测站点,从而形成明显的水面藻华过程(图1、图3a).

过去关于太湖蓝藻水华形成和快速变化究竟是本区域藻类迅速生长累积形成还是由于风速水动力扰动堆积而成存在很多的争议,本文从秒—分钟高频观测很好地证明了小时尺度上表面蓝藻水华快速形成主要受制于风力形成的水动力作用,水动力引起的蓝藻水华短期迁移堆积可能要远远大于生物的生长累积,半小时内叶绿素 $a$ 浓度由10  $\mu\text{g/L}$ 左右上升到100  $\mu\text{g/L}$ 以上,说明90%以上藻类生物量累积是由于风浪对蓝藻水华的迁移堆积所致.这些研究结果进一步深化了以往基于MODIS逐日和GOCI逐时遥感监测得到的蓝藻水华动态变化过程认识<sup>[9-11,29]</sup>,量化外部漂浮输入和本地生长对藻类生物量的贡献.除了遥感监测外,自2007年太湖饮用水危机事件后,为快速捕捉蓝藻水华动态变化过程,国家和地方监测部门以及高校科研院所使用美国YSI多参数水质仪在太湖布设了许多高频自动监测系统,但由于太湖水体浑浊、水下探头很容易被附着和污染,造成YSI多参数水质仪监测的叶绿素 $a$ 浓度存在很大出入和不确定性,因此鲜少见到基于水下探头分析太湖蓝藻水华和水质动态变化的研究结果<sup>[10]</sup>.而基于陆基遥感高频监测能非常真实、客观和准确地反映叶绿素 $a$ 、藻类水华和关键水质参数的快速动态变化,精细刻画传统的季度、逐月和逐周观测无法捕捉的水环境快速高频变化过程.

### 2.3 其他水质参数变化过程

由于藻类颗粒物对光的吸收、散射和衰减,随着藻类生物量增加透明度呈现相反的变化趋势.整体来看,从8:30—10:30当叶绿素 $a$ 浓度较低时,水体透明度较高,在0.4 m左右,当叶绿素 $a$ 浓度增加到60  $\mu\text{g/L}$ 左右时,透明度大致维持在0.3 m左右(图3b).由于太湖水体浑浊、除藻类颗粒物外还有大量的非色素无机颗粒物,因此水体透明度都不高.受藻类生物量影响,总氮、总磷浓度等呈现出与叶绿素 $a$ 浓度较为一致的变化趋势(图3c、3d、3e),10:30—11:00期间也呈现快速增加趋势,分别由1.75和0.05 mg/L增加到3.5和0.175 mg/L,增加了100%和250%,之后维持高值动态波动.相比于叶绿素 $a$ 浓度短期内增加了900%,总氮、总磷的峰值和增加没有那么明显,反映除了藻类生物量引起的氮磷变化外,总氮、总磷中还包含许多其他颗粒态和溶解态氮磷成分.高锰酸盐指数随着叶绿素 $a$ 浓度变化会发生一些变化,但不如氮磷营养盐那么明显,当叶绿素 $a$ 浓度较低时高锰酸盐指数在4.5 mg/L左右,叶绿素 $a$ 浓度明显增加后其值维持在6.0 mg/L左右,增加30%左右,说明高锰酸盐指数受藻类生物量的影响相对较小.

### 2.4 叶绿素 $a$ 与其它水质参数间的关系

为定量分析透明度、总氮、总磷和高锰酸盐指数随叶绿素 $a$ 浓度的变化情况,进行简单线性相关分析.从图4结果可知,透明度与叶绿素 $a$ 浓度存在极显著负相关,总氮、总磷、高锰酸盐指数则均与叶绿素 $a$ 浓度存在显著正相关.从线性相关的决定系数来看,叶绿素 $a$ 浓度可以解释总氮、总磷80%以上变化,而只能解释透明度、高锰酸盐指数35%左右的变化,说明无机悬浮颗粒物、溶解性有机物和其他耗氧有机物控制了透

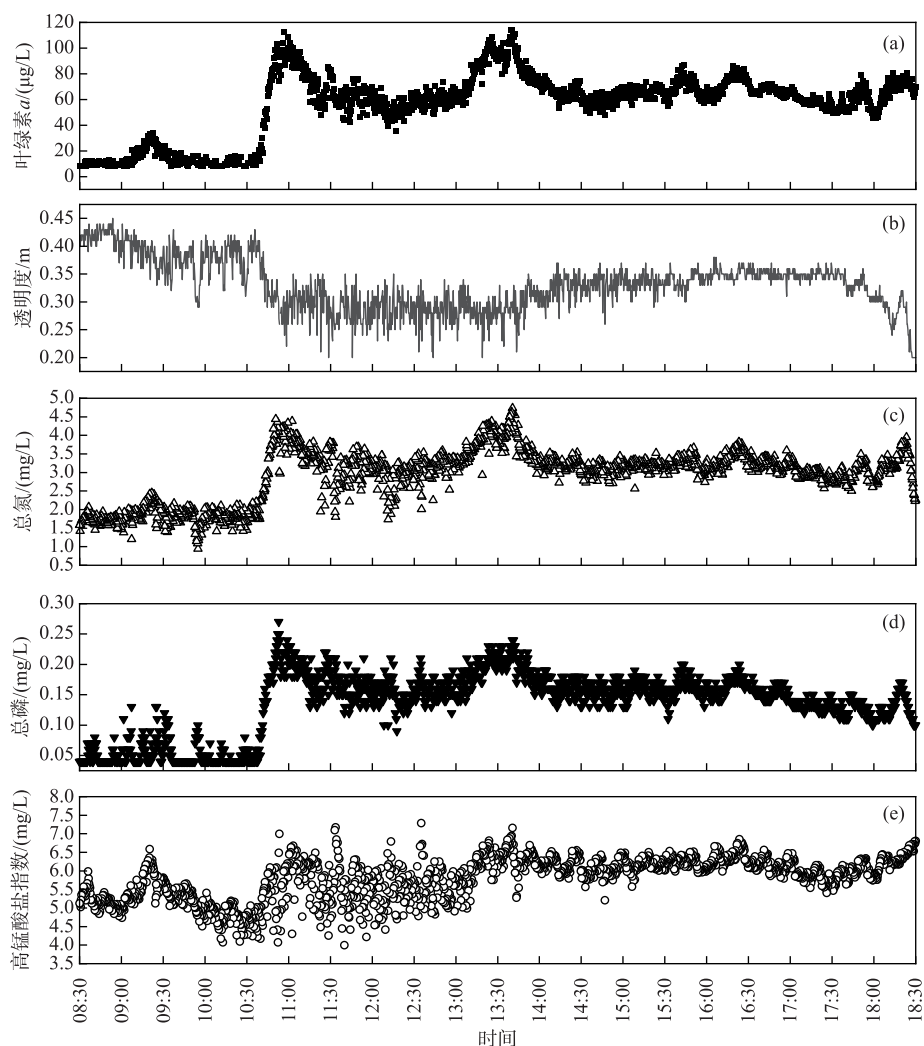


图3 2021年8月8日8:30—18:30 叶绿素 $a$ 浓度(a)、透明度(b)、总氮浓度(c)、总磷浓度(d)和高锰酸盐指数(e)高频变化

Fig.3 High-frequency observations of chlorophyll- $a$  concentration (a), secchi disc depth (b), total nitrogen concentration (c), total phosphorus concentration (d) and chemical oxygen demand (e) from 8:30 to 18:30 on August 8, 2021

明度和高锰酸盐指数的动态变化等。尽管氮磷营养盐是水体浮游植物生长及湖泊营养状态的重要因素和关键驱动因子,但藻类的大量生长反过来也会造成颗粒态有机氮磷和总氮、总磷的显著增加。太湖站 2005—2020 年长期定位观测数据显示,太湖水体叶绿素 $a$ 浓度与总磷浓度呈极显著幂函数关系,水体叶绿素 $a$ 浓度越高,水体总磷浓度则越高,表明水体浮游植物生物量高低是水体总磷浓度高低的重要影响因素<sup>[8,10,30]</sup>。由于硝化和反硝化作用影响,野外全年逐月监测往往很难观测到叶绿素 $a$ 与总氮存在显著正相关,有时反而为负相关,但春夏季或者短期内藻类的快速聚集无疑会显著增加总氮浓度<sup>[10,30-31]</sup>。而藻类生物量聚集也会明显增加颗粒态有机物,其死亡降解会消耗大量氧气,造成耗氧有机物指标高锰酸盐指数增加。以往在太湖的研究也发现夏季蓝藻水华死亡腐烂降解释放造成高锰酸盐指数与叶绿素 $a$ 浓度存在一致的空间分布,在叶绿素 $a$ 非常高的站点同样会出现高锰酸盐指数异常高值,叶绿素 $a$ 与高锰酸盐指数存在显著正



相关<sup>[32-33]</sup>.

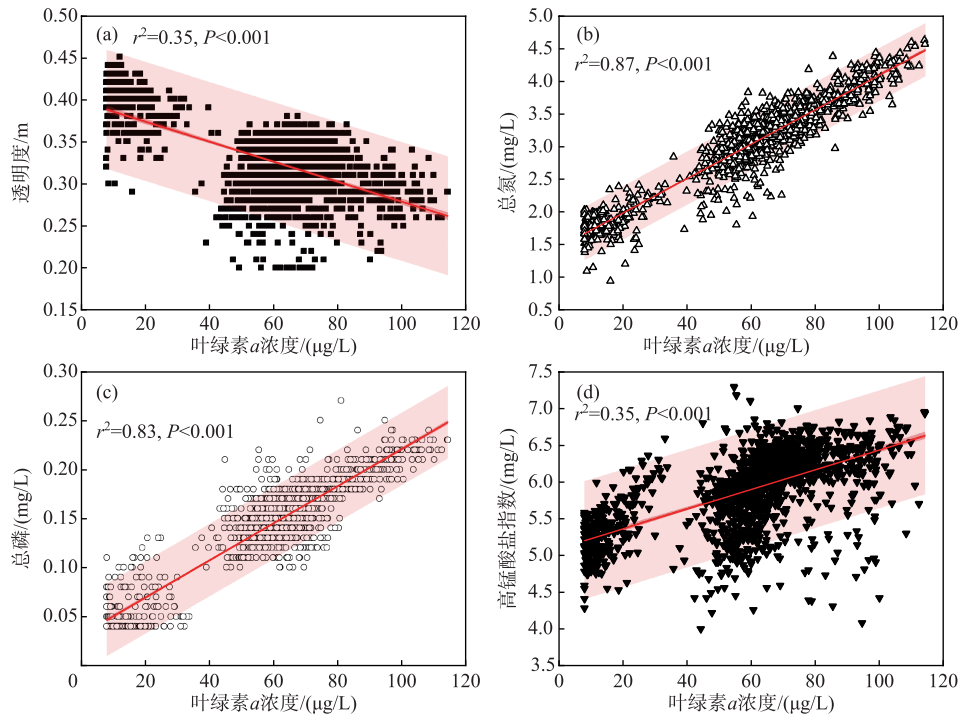


图4 叶绿素 *a* 浓度与透明度(a)、总氮浓度(b)、总磷浓度(c)和高锰酸盐指数(d)间的线性关系

Fig.4 Linear relationships between chlorophyll-*a* concentration and secchi disc depth (a), total nitrogen concentration (b), total phosphorus concentration (c), and chemical oxygen demand (d)

### 3 结论与展望

本文基于自主研发的陆基高光谱多参数水质遥感监测仪,通过秒—分钟频次高频监测成功捕捉了蓝藻水华及其关键水质参数在一天内的短期快速变化过程,并结合气象水文数据分析其形成原因.研究发现在微风和小风条件下蓝藻容易在表层水体漂浮,盛行西北风驱动湖面开敞水域蓝藻水华在太湖站栈桥顶端观测点集聚,造成叶绿素 *a* 浓度在短短半小时内由 10  $\mu\text{g/L}$  快速攀升至 100  $\mu\text{g/L}$  左右,之后整体在 60~80  $\mu\text{g/L}$  波动;相伴随的是透明度明显降低,总氮、总磷和高锰酸盐指数显著增加,说明藻类水华可以引发关键水质参数快速变化.

与此同时,我们研究结果也显示陆基遥感高频观测可以揭示水环境和生态系统精细化过程和突变情况,深化湖泊生态系统动力学认知,为藻类水华和水质水环境监测、诊断提供强大工具,也可以提升未来水环境演化预测预警能力<sup>[19]</sup>.实际上除了藻类快速变化外<sup>[34]</sup>,受极端降水、洪水、台风等自然和人类活动强烈作用,湖泊生态系统物理、化学和生物过程还遭受许多其他短期快速冲击<sup>[16,35-37]</sup>,传统的逐季、逐月和逐周等低频观测往往会错过许多快速变化的关键过程<sup>[23,36]</sup>,而陆基高光谱遥感观测除了本文呈现的叶绿素 *a*、透明度、总氮、总磷和高锰酸盐指数外,还可以开展水温、浊度、有色可溶性有机物、悬浮物等连续高频监测,因此能很好捕捉其他快速变化过程,深入揭示极端气象水文等快速事件对河流、湖库和湿地水环境与水生态的影响过程与机制.

相比于航空/航天/近地无人机载的水环境遥感,陆基高光谱水环境遥感由于离水面比较近(5 m 左右),离水辐射信号强,大气的影响基本上可以忽略,无需进行大气校正,因此可以实现阴天、多云和晴朗等复杂天况下更高精度的水环境遥感监测.同时,陆基高光谱遥感监测仪覆盖 400~1000 nm 可见光和近红外

波段,光谱分辨率为 1 nm,可以应用于包括水色参数在内的更多水质参数,实现更精准的遥感反演和监测。当前,仪器内置了总氮、总磷、高锰酸盐指数、叶绿素、透明度和有色可溶性有机物吸收系数等 11 个关键水质参数算法。未来还需继续开展大范围陆基高光谱遥感同步实验,积累覆盖范围更宽的反射率和水质数据集,优化和提升现有算法精度和适用性;构建更多水质参数深度学习算法(如颗粒和溶解性有机碳等),支撑河流湖库碳输移和迁移转化过程监测,服务于国家“双碳”计划;对接生态环境管理部门,形成技术规程与标准,支撑断面考核和环境管理。此外,陆基高光谱遥感不单可应用于河流、湖库、湿地、池塘等近岸水体开展监测,事实上在开敞水域的平台、船舶、桩基等固定和移动位置均可以安装陆基高光谱多参数水质遥感监测仪,实现对关键或敏感水域连续高频监测。集成的雷达水位测定和视频监控还可以对暴雨洪水过程以及人为干扰和破坏进行监控报警。

陆基高光谱多参数水质遥感监测仪适合生态环境、水利、市政、自然资源监测等行业部门,广泛应用于全国地表水监控断面、集中式饮用水源地及其他敏感水域开展连续高频水环境监测,弥补现有的人工和自动监控断面监测在观测频次、观测参数、观测精度和观测成本上的不足。同时,也可以用于科研院所、高校等开展监测科研工作,安装简单方便、可移动。此外,目前的陆基高光谱多参数水质遥感监测仪还可以开发手持式移动观测以及船载和无人机载观测系列产品及成像系统,支撑全国地表水体水环境监测与应用研究,为水环境治理与修复提供监测与诊断的系统化解决方案,服务水环境管理。

致谢:太湖湖泊生态系统研究站提供相关气象水文和长期营养盐数据,在此表示感谢。感谢杭州海康威视数字技术股份有限公司高阳辉、高晶、田野和许毅等在陆基高光谱多参数水质遥感监测仪安装和调试等方面提供的帮助。

#### 4 参考文献

- [1] Zhou YQ, Ma JR, Zhang YL *et al.* Improving water quality in China: Environmental investment pays dividends. *Water Research*, 2017, **118**: 152-159. DOI:10.1016/j.watres.2017.04.035.
- [2] Qin BQ, Zhu GW, Gao G *et al.* A drinking water crisis in Lake Taihu, China: Linkage to climatic variability and lake management. *Environmental Management*, 2010, **45**(1): 105-112. DOI:10.1007/s00267-009-9393-6.
- [3] Song KS, Fang C, Jacinthe PA *et al.* Climatic versus anthropogenic controls of decadal trends (1983–2017) in algal blooms in lakes and reservoirs across China. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(5): 2929-2938. DOI:10.1021/acs.est.0c06480.
- [4] Qin BQ, Paerl HW, Brookes JD *et al.* Why Lake Taihu continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10-years (2007–2017) efforts. *Science Bulletin*, 2019, **64**(6): 354-356. DOI:10.1016/j.scib.2019.02.008.
- [5] Guo CX, Zhu GW, Paerl HW *et al.* Extreme weather event may induce *Microcystis* blooms in the Qiantang River, South-east China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(22): 22273-22284. DOI:10.1007/s11356-018-2216-7.
- [6] Xin HR, Zhu GW, Wang XS *et al.* Variation and driving factors of black water event intensity in Lake Taihu during 2009 to 2018. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4914-4923. DOI:10.13227/j.hjks.202004172.[辛华荣, 朱广伟, 王雪松等. 2009—2018 年太湖湖泛强度变化及其影响因素. 环境科学, 2020, **41**(11): 4914-4923.]
- [7] Qin BQ, Zhang YL, Zhu GW *et al.* Are nitrogen-to-phosphorus ratios of Chinese lakes actually increasing? *PNAS*, 2020, **117**(35): 21000-21002. DOI:10.1073/pnas.2013445117.
- [8] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al.* Fluctuation of phosphorus concentration in Lake Taihu in the past 70 years and future control strategy. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 957-973. DOI:10.18307/2021.0401.[朱广伟, 秦伯强, 张运林等. 近 70 年来太湖水体磷浓度变化特征及未来控制策略. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 957-973.]
- [9] Zhang YL, Shi K, Liu JJ *et al.* Meteorological and hydrological conditions driving the formation and disappearance of black blooms, an ecological disaster phenomena of eutrophication and algal blooms. *Science of the Total Environment*, 2016, **569/570**: 1517-1529. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.06.244.
- [10] Huang CC, Shi K, Yang H *et al.* Satellite observation of hourly dynamic characteristics of algae with Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) data in Lake Taihu. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **159**: 278-287. DOI:10.1016/j.rse.2014.12.016.



- [11] Qi L, Hu CM, Visser PM *et al.* Diurnal changes of cyanobacteria blooms in Taihu Lake as derived from GOCI observations. *Limnology and Oceanography*, 2018, **63**(4): 1711-1726. DOI:10.1002/lno.10802.
- [12] Wu TF, Qin BQ, Brookes JD *et al.* The influence of changes in wind patterns on the areal extension of surface cyanobacterial blooms in a large shallow lake in China. *Science of the Total Environment*, 2015, **518/519**: 24-30. DOI:10.1016/j.scitotenv.2015.02.090.
- [13] Qin BQ. Shallow lake limnology and control of eutrophication in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1229-1243. DOI: 10.18307/2020.0501. [秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1229-1243.]
- [14] Marcé R, George G, Buscarinu P *et al.* Automatic high frequency monitoring for improved lake and reservoir management. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(20): 10780-10794. DOI:10.1021/acs.est.6b01604.
- [15] Seifert-Dähnn I, Furuseth IS, Vondolia GK *et al.* Costs and benefits of automated high-frequency environmental monitoring—The case of lake water management. *Journal of Environmental Management*, 2021, **285**: 112108. DOI:10.1016/j.jenvman.2021.112108.
- [16] Meinson P, Idrizaj A, Nöges P *et al.* Continuous and high-frequency measurements in limnology: History, applications, and future challenges. *Environmental Reviews*, 2016, **24**(1): 52-62. DOI:10.1139/er-2015-0030.
- [17] Liu J, Zhou M, Chen X *et al.* Study on the construction and management of the quality automatic monitoring network of state surface water. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2014, **6**(1): 10-13. [刘京, 周密, 陈鑫等. 国家地表水水质自动监测网建设与运行管理的探索与思考. 环境监控与预警, 2014, **6**(1): 10-13.]
- [18] Duan HT, Wan NS, Qiu YG *et al.* Discussions and practices on the framework of monitoring system in eutrophic lakes and reservoirs. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1396-1405. DOI:10.18307/2020.0513. [段洪涛, 万能胜, 邱银国等. 富营养化湖库天—空—地一体化监控平台系统设计与实践. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1396-1405.]
- [19] Qin BQ, Li W, Zhu GW *et al.* Cyanobacterial bloom management through integrated monitoring and forecasting in large shallow eutrophic Lake Taihu (China). *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **287**: 356-363. DOI:10.1016/j.jhazmat.2015.01.047.
- [20] Sun X, Zhang YL, Shi K *et al.* Monitoring water quality using proximal remote sensing technology. *Science of the Total Environment*, 2022, **803**: 149805. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.149805.
- [21] Zhang YL, Sun X, Li N *et al.* Machine learning algorithm for land-based remote sensing of chlorophyll and phycocyanin in complex scenes. China Patent, No. 202010923955.X. [张运林, 孙晓, 李娜等. 复杂场景下水体叶绿素和藻蓝素陆基遥感机器学习算法. 中国专利, 202010923955.X.]
- [22] Zhang YL, Sun X, Li N *et al.* Land-based remote sensing monitoring method for water nutrients and chemical oxygen demand. China Patent, No. 202110097894.0. [张运林, 孙晓, 李娜等. 水体营养盐和化学需氧量的陆基遥感监测方法. 中国专利, 202110097894.0.]
- [23] Isles PD, Pomati F. An operational framework for defining and forecasting phytoplankton blooms. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2021. DOI:10.1002/fee.2376.
- [24] White AE, Watkins-Brandt KS, McKibben SM *et al.* Large-scale bloom of *Akashiwo sanguinea* in the Northern California current system in 2009. *Harmful Algae*, 2014, **37**: 38-46. DOI:10.1016/j.hal.2014.05.004.
- [25] Ma JR, Deng JM, Qin BQ *et al.* Progress and prospects on cyanobacteria bloom-forming mechanism in lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(10): 3020-3030. [马健荣, 邓建明, 秦伯强等. 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展. 生态学报, 2013, **33**(10): 3020-3030.]
- [26] Havens KE. Phosphorus-algal bloom relationships in large lakes of south Florida: Implications for establishing nutrient criteria. *Lake and Reservoir Management*, 2003, **19**(3): 222-228. DOI:10.1080/07438140309354087.
- [27] Zhang YL, Qin BQ, Zhu GW *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. *Water Resources Research*, 2018, **54**(7): 4319-4331. DOI:10.1029/2017WR022401.
- [28] Hunter PD, Tyler AN, Willby NJ *et al.* The spatial dynamics of vertical migration by *Microcystis aeruginosa* in a eutrophic shallow lake: A case study using high spatial resolution time-series airborne remote sensing. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(6): 2391-2406. DOI:10.4319/lo.2008.53.6.2391.
- [29] Shi K, Zhang YL, Zhou YQ *et al.* Long-term MODIS observations of cyanobacterial dynamics in Lake Taihu: Responses to nutrient enrichment and meteorological factors. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 40326. DOI:10.1038/srep40326.

- [30] Xu H, Paerl HW, Zhu GW *et al.* Long-term nutrient trends and harmful cyanobacterial bloom potential in hypertrophic Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2017, **787**(1): 229-242. DOI:10.1007/s10750-016-2967-4.
- [31] Zou W, Zhu GW, Cai YJ *et al.* Quantifying the dependence of cyanobacterial growth to nutrient for the eutrophication management of temperate-subtropical shallow lakes. *Water Research*, 2020, **177**: 115806. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115806.
- [32] Zhang YL, Yang LY, Qin BQ *et al.* Spatial distribution of COD and the correlations with other parameters in the northern region of lake Taihu. *Environmental Science*, 2008, **29**(6): 1457-1462. DOI:10.13227/j.hjlx.2008.06.006.[张运林, 杨龙元, 秦伯强等. 太湖北部湖区 COD 浓度空间分布及与其它要素的相关性研究. 环境科学, 2008, **29**(6): 1457-1462.]
- [33] Yin Y, Zhang YL, Liu XH *et al.* Temporal and spatial variations of chemical oxygen demand in Lake Taihu, China, from 2005 to 2009. *Hydrobiologia*, 2011, **665**(1): 129-141. DOI:10.1007/s10750-011-0610-y.
- [34] Carpenter SR, Arani BMS, Hanson PC *et al.* Stochastic dynamics of Cyanobacteria in long-term high-frequency observations of a eutrophic lake. *Limnology and Oceanography Letters*, 2020, **5**(5): 331-336. DOI:10.1002/lol2.10152.
- [35] Jennings E, Jones S, Arvola L *et al.* Effects of weather-related episodic events in lakes: An analysis based on high-frequency data. *Freshwater Biology*, 2012, **57**(3): 589-601. DOI:10.1111/j.1365-2427.2011.02729.x.
- [36] Blaen PJ, Khamis K, Lloyd C *et al.* High-frequency monitoring of catchment nutrient exports reveals highly variable storm event responses and dynamic source zone activation. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, **122**(9): 2265-2281. DOI:10.1002/2017JG003904.
- [37] Saraceno JF, Pellerin BA, Downing BD *et al.* High-frequency *in situ* optical measurements during a storm event: Assessing relationships between dissolved organic matter, sediment concentrations, and hydrologic processes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2009, **114**(G4): G00F09. DOI:10.1029/2009JG000989.