

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221029

夏季香溪河库湾溶解氧与叶绿素 a 日间垂向分布特征及影响因子初探

陈 怡^{1a,1b}, 姚亚芹², 李一平^{1a,1b}, 黄亚男^{1a,1b}, 赵星星³, 徐海波⁴

(1. 河海大学 a. 环境学院; b. 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 南京市高淳区水务局, 江苏 南京 211301; 3. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 4. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

摘要: 为了解三峡水库水华爆发时空特征,于2020年6月在三峡库区香溪河库湾未发生水华的条件下通过日间高频次连续加密监测,分析溶解氧、叶绿素 a 等指标的时空变化,甄别藻类生长特性。结果表明,温跃层和表中层倒灌异重流的存在阻碍了垂向水动力交换,进而促使水体表底均存在氧跃层;夏季连续的晴天可能会导致 07:00~11:00、14:00~17:00 爆发水华的几率增加;水华爆发存在滞后性,仅通过单层水体藻密度无法表征藻类生长状况,需通过藻类垂向迁移范围内的平均藻密度作进一步水华预警判断。

关键词: 香溪河;垂向分布;日变化;夏季;叶绿素 a

中图分类号: TV882.9;X5

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)04-0069-04

1 引言

三峡水库自 2003 年蓄水以来,支流库湾频繁发生水华,引起广泛关注^[1]。水华爆发本质上即为藻类在短时间内异常增殖并聚集于水体表面的现象,故研究水体中藻类的时空迁移特性与水体环境因子之间的联系有利于探寻水华爆发的诱因,了解藻类垂向迁移规律及影响因素对于水华防控具有实际意义。汪婷婷等^[2]通过分析不同季节叶绿素 a(Chl-a)浓度影响因子,发现香溪河春、夏季易发生水华,主要由水温分层或混合层深度变化导致;杨正健^[3]通过春季连续定点监测,发现香溪河春季水华期间优势藻种不断变化,且藻浓度最大值在水深 1~3 m 之间。但此类研究主要通过季节性对比及单因素控制试验来研究藻类生长特征以解释水华生消机制^[4],但藻类垂直迁移受影响条件较多,藻种具有多样性,研究单一因子并不能完全反映叶绿素 a 垂向上的运动趋势^[5],因而需探讨多环境因子影响下藻类垂向迁移特性。鉴此,本文以三峡水库典型支流香溪河库湾为例,在水华高发时期开展日间加密监测(频率为 0.5 h),分析垂向光照强度、溶解氧等环境因子的日变化及 Chl-a 特征,初步探讨香溪河的水动力

等环境因子对藻类日间的运动规律的影响机制,为三峡库区水华监测和治理提供参考。

2 研究方法

2.1 研究区域概况及样点布设

香溪河地处湖北省西部,位于三峡水库库首,起源于神农架地区,是三峡水库湖北库区一级支流。本次试验监测点选取在野外站水上平台(XXB)附近(31°06'59.6"N,110°46'49.4"E),此处既受干流倒灌异重流的影响,也位于水华高发区域。采样点位置见图 1。试验开展时三峡库区处于低水位运行状态,采样点水深稳定在 12 m。期间气温 23~36 °C,风速稳定在 2 m/s 左右,水流不易受风力影响。

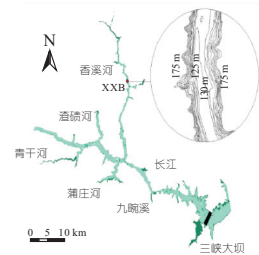


图 1 采样点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling points

收稿日期: 2022-05-16, **修回日期:** 2022-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(52039003,51779072);中央高校基本科研业务费专项(B200204014)

作者简介: 陈怡(1995-),男,硕士研究生,研究方向为水环境综合治理,E-mail:656630912@qq.com

通讯作者: 李一平(1978-),男,博士、教授,研究方向为水环境数值模拟与预测,E-mail:liyiping@hhu.edu.cn

2.2 监测指标与方法

2020年6月25日对采样点位进行加密监测,时间为07:00~19:00,其中溶解氧(DO)、叶绿素 a(Chl-a)、水温(WT)等参数采用 YSI-EXO2 多参水质分析仪(美国)现场测定,垂向间隔为 1 m,频率为每 0.5 h 一次;光和有效辐射(PAR)通过 IL4100 光照计(美国)现场测定,垂向间隔为 0.5 m,频率为每 0.5 h 一次;垂向流速通过多普勒流速剖面仪(ADCP)进行定点 24 h 测量;现场采集表层水样 1 000 mL,加入 15 mL 鲁哥试剂进行固定。用聚乙烯瓶分装后立即运回实验室,沉降后浓缩至 50 mL,通过显微镜对浮游植物计数,分辨监测期间优势藻种,藻类根据《中国淡水藻类》^[6]和《淡水微型生物图谱》^[7]进行鉴定。

2.3 数据分析方法

应用 Excel 和 Origin9.0、Surfer11 软件进行数据处理和绘图,相关性分析应用 SPSS 26 软件。采用 1% 表面光强所对应的水深(m)作为真光层深度^[8]。在 Origin 绘图时,由于测量的数据较密集,为了方便分析,选取 07:00、10:00、12:00、15:00、17:00、19:00 时刻各环境因子数据绘制理

化因子垂向变化图表。

3 结果与分析

3.1 理化因子、Chl-a 浓度日变化规律

3.1.1 理化因子日变化规律

日间垂向溶解氧浓度、温度、光照强度随时间变化曲线见图 2。由图 2 可知:①0~12 m 内溶解氧存在明显分层现象,07:00~17:00 垂向溶解氧分层程度不断增强;0~9 m 溶解氧浓度随水深增大而下降,9~12 m 溶解氧略有上升,整体呈表底高、中间低的趋势。②日间垂向温度整体呈弱分层状态。各时刻垂向上水温变化趋势大致相同,呈逐渐降低的分布趋势;日间 0~3、9~12 m 存在稳定的温跃层^[9]。垂向上水温层化结构呈现异重流最具特点的双混斜形态^[10]。③日间垂向光照强度随水深下降呈指数减小趋势。光照强度在 0~4 m 之间变幅较大,变幅在 2~977.6 W/m²(10~4 892 lx)之间。早上 07:00 光辐强度处于最低,正午左右最高,部分时刻由于阴云导致光强测量出现一定偏差。

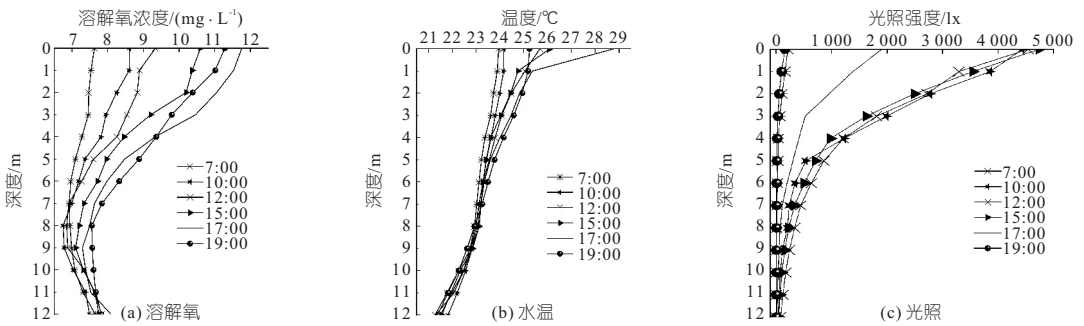


图 2 溶解氧、水温、光照垂向日变化

Fig. 2 Vertical diurnal variation of dissolved oxygen, water temperature and illumination

3.1.2 Chl-a 浓度日变化规律

Chl-a 浓度常被用来表征水生生态系统中藻类的生长状态及分布特征^[11],故通过日间 Chl-a 浓度变化可反映藻类生长和迁移特征,见图 3。由图 3 可知,日间 07:00~19:00 香溪河库湾中藻类垂向迁移基本发生在 0~6 m 水体中,07:00~11:00 藻类向表层(0 m 水层)迁移并聚集;11:00~

14:00 藻类向 2~3 m 水层迁移;14:00 后又开始向表层聚集;17:00 后表层水体 Chl-a 浓度最大。藻种鉴定发现,当天水体中蓝藻(微囊藻属)为优势藻种。07:00~19:00,垂向上总体 Chl-a 浓度随时间推移呈增大趋势。

3.2 成因分析

3.2.1 溶解氧垂向变化特性成因分析

水体表、底层溶解氧的来源不同,且同时存在温跃层,这使溶解氧垂向交换受阻,垂向溶解氧浓度分布表现出特殊的分布结构(表底高,中间低)。香溪河库湾日间真光层平均深度在 6.3 m 左右,大于混合层深度(0.78~5.78 m 之间),这有利于藻类生长繁殖,表层水体中大量的藻类光合作用产氧,使表层溶解氧不断升高^[12];上游神农架源头来流以底部顺坡异重流的形式从支流流向河

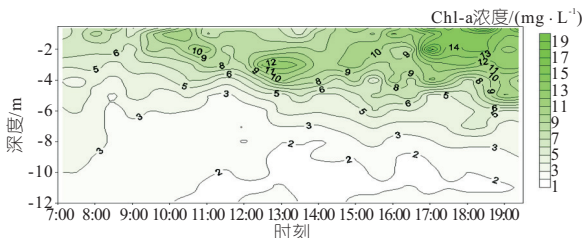


图 3 Chl-a 浓度垂向分布日变化等值线图

Fig. 3 Isograph of diurnal variation of Chlorophyll-a concentration on vertical distribution

口^[13],在其进入下游水体前,通过大气复氧补充溶解氧;而 0~3、9~12 m 水体存在的温跃层阻止了溶解氧向中层水体传递^[9]。通过饱和溶解氧浓度公式^[14]计算可知,水体表层溶解氧处于过饱和状态,底层处于不饱和状态,故水库深层溶解氧可能是通过垂向对流补充底部溶解氧,表层则是通过藻类光合产氧补充。监测发现,日间垂向溶解氧分层程度不断增强,可能是表层 0~4 m 水体中藻类的光合作用不断进行所致^[10];底层藻类浓度低,溶解氧仅通过上游神农架源头表层水体复氧的方式补充,故日间底部溶解氧浓度基本维持在 7.5 mg/L 左右;中层 4~9 m 溶解氧变化不明显,且低于表层和底层,则是因为温跃层阻碍了溶解氧的垂向交换^[9]。

3.2.2 Chl-a 垂向分布随时间变化成因分析

结合光强变化图(图 2(c))可知,本研究区域短时间内水体 Chl-a 特殊的垂向变化可能是由藻类垂向迁移导致,其中光照、水温结构对藻类垂向迁移影响较大,营养盐及流速变化的影响较小。藻类有明显的趋光性,根据藻类对光强的适应性可将光照强度分为光限制区、光过渡区、光饱和区和光抑制区^[15],随光强变化,蓝藻会通过伪空胞调节进行垂向迁移^[16]。研究表明^[17],1 000~4 000 lx 为微囊藻的适宜生长范围,5 500 lx 以上的强光照则会抑制微囊藻生长,本文藻类垂向迁移发生时的光照强度基本符合微囊藻光照适宜阈值,光照处于光饱和区以下(1 000~4 000 lx)时藻类会富集于水体表面,过饱和光照(4 000 lx 以上)会导致藻类向下迁移躲避强光,光照强度过低时藻类又将于表层聚集吸收光照。黄钰铃^[18]研究发现香溪河库湾存在充足的营养盐,处于重度富营养化状态,且在香溪河中当流速低于 0.1 m/s 时,其对水华暴发的影响较小,当流速在 0.1~0.3 m/s 时,其对水华有促进作用。本次监测结果表明,水体流速变化范围在 0.15 m/s 以下,对藻类的垂向迁移影响较小,故藻类垂向迁移受流速和营养盐的影响较小。

夏季水温适宜,有利于蓝藻成为优势藻种,温跃层阻碍了水体的垂向水动力交换,而蓝藻特殊的生理结构(伪空胞)有利于其在水体中垂向迁移,寻找最适光强。本次监测结果中 Chl-a 的时空分布特性和优势藻种(蓝藻)与王岚等^[19]在香溪河的监测结果相似,但吴兴华等^[20]在香溪河库湾研究日间藻类垂向分布时发现优势藻种为拟多甲藻,这可能是因为不同季节水体温度不同,藻类最适生长温度不同,进而导致了优势藻种的差异。

已知藻类具有趋光性,而较强的光照会导致光抑制现象,所以为寻找最适生存环境,藻类在垂向上会发生迁移^[19],但由于温跃层的存在,0~9 m 内水体垂向水动力交换能力较弱^[9],在此条件下,藻类无法通过垂向水动力的交换实现迁移,而蓝藻可通过伪空胞的合成和破裂在垂向水动力交换较弱的水体中迁移^[21]。因此,光照的变化、水体的温度及藻类的自身特性共同作用,导致垂向上藻类在光照适宜时向表层水体富集,过饱和时则向下迁移^[22]。

综上所述,夏季藻类于日间大量增殖,并于表层水体 0~3 m 内随光强变化出现特殊的垂向迁移,夜间蓝藻于表层水体聚集,但由于无光照,故其增殖能力受限,不易发生水华,而连续晴热天藻类不断累积,未来日间 07:00~11:00、14:00~17:00 时段水华发生的概率会增大。王岚等^[19]发现三峡库区蓝藻水华爆发时 Chl-a 的阈值为 40 $\mu\text{g/L}$,远高于本次监测中的最高值 20.6 $\mu\text{g/L}$,故当日间水华爆发概率较小,但持续累积可能会增大后续日藻华爆发的概率。藻类的生长特性和垂向迁移特征使水华爆发可能存在滞后性,单层水体中 Chl-a 浓度不足以表征水体中藻类生长情况,需通过 0~6 m 水体内的平均藻浓度作进一步判断。

4 结论

a. 夏季香溪河库湾日间溶解氧剧烈的垂向变化主要是因为表层藻类的光合产氧及垂向温跃层存在导致特殊对流扰动,随时间推移垂向溶解氧浓度会出现“双氧跃层”现象。

b. 夏季晴天,日间藻类随光照出现垂向移动并增殖,夜间于表层聚集,特殊的迁移繁殖特性使 07:00~11:00、14:00~17:00 时段发生水华几率偏大。

c. 藻类生物量的分布特点和垂向迁移特性使水华爆发具有滞后性,在水华预警时既要重视单层水体中 Chl-a 浓度,也要关注藻类垂向活动范围内的平均藻密度变化量,从而提高水华预警精度。

参考文献:

- [1] 石晓勇,李鸿妹,韩秀荣,等. 夏季南海北部典型中尺度物理过程对营养盐及溶解氧分布特征的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3): 695-703.
- [2] 汪婷婷,杨正健,刘德富. 香溪河库湾不同季节叶绿素 a 浓度影响因子分析[J]. 水生态学杂志, 2018, 39(3): 14-21.

- [3] 杨正健. 基于藻类垂直迁移的香溪河水华暴发模型及三峡水库调控方案研究[D]. 宜昌:三峡大学, 2010.
- [4] 梅佳欣. 辐射日变化对浮游植物生长及初级生产的影响[D]. 厦门:厦门大学, 2018.
- [5] 梁培瑜, 王焯, 马芳冰. 水动力条件对水体富营养化的影响[J]. 湖泊科学, 2013, 25(4): 455-462.
- [6] 胡鸿钧. 中国淡水藻类[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1980.
- [7] 周凤霞. 淡水微生物图谱[M]. 北京:化学工业出版社, 2010.
- [8] REINART A, ARST H, ERM A, et al. Optical and biological properties of Lake Ülemiste, a water reservoir of the city of Tallinn II: Light climate in Lake Ülemiste[J]. Lakes & reservoirs: research and management, 2001, 6(1): 75-84.
- [9] 白杨, 张运林, 周永强, 等. 千岛湖水温垂直分层的空间分布及其影响因素[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(5): 906-914.
- [10] 杨凡, 纪道斌, 王丽婧, 等. 三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2107-2115.
- [11] 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 等. 风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3519-3529.
- [12] 崔彦萍, 王保栋, 陈求稳. 三峡正常蓄水后长江口叶绿素 a 和溶解氧变化及其成因[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6309-6316.
- [13] 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2010, 40(1): 101-112.
- [14] 张朝能. 水体中饱和溶解氧的求算方法探讨[J]. 环境科学研究, 1999(2): 57-58.
- [15] 方海涛, 宋林旭, 纪道斌, 等. 香溪河夏季水华暴发差异性研究及其机制分析[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(9): 68-74.
- [16] 龚川, 贡丹丹, 刘德富, 等. 不同光照强度下香溪河浮游植物演替过程研究[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1214-1224.
- [17] SVERDRUP H U. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton[J]. Journal du conseil, 1953: 287-295.
- [18] 黄钰铃. 三峡水库香溪河库湾水华生消机理研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2007.
- [19] 王岚, 蔡庆华, 张敏, 等. 三峡水库香溪河库湾夏季藻类水华的时空动态及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1940-1946.
- [20] 吴兴华, 李翀, 陈磊, 等. 三峡水库香溪河库湾拟多甲藻(Peridiniopsis)的昼夜垂直迁移行为对碳磷分布的响应[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 121-129.
- [21] 刘绍俊, 艾德平, 祁云宽, 等. 星云湖藻量昼夜变化节律及垂直分布初步研究[J]. 环境科学导刊, 2015, 34(5): 1-4.
- [22] 俞茜, 刘昭伟, 陈永灿, 等. 微囊藻属一日内垂向分布的数值模拟[J]. 中国环境科学, 2015, 35(6): 1840-1846.

Vertical Distribution of Dissolved Oxygen and Chlorophyll-a and Its Influencing Factors in Xiangxi River Reservoir Bay in Summer

CHEN Yi^{1a,1b}, YAO Ya-qin², LI Yi-ping^{1a,1b}, HUANG Ya-nan^{1a,1b}, ZHAO Xing-xing³, XU Hai-bo⁴

(1a. College of Environment; 1b. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Bureau of Water in Gaochun District, Nanjing 211301, China; 3. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: In order to understand the temporal and spatial characteristics of blooms in the Three Gorges Reservoir, the temporal and spatial changes of dissolved oxygen, Chlorophyll-a and other indicators were analyzed, and the growth characteristics of algae was screened, which can provide reference for the early warning of blooms under the condition that no blooms occurred in Xiangxi River bay of the Three Gorges Reservoir in June 2020. The results show that the thermocline and the surface layer of the inverted weight current block the vertical hydrodynamic exchange, and then promote the presence of oxygen thermocline at the bottom of the water surface. Consecutive sunny days in summer may increase the chance of bloom outbreaks from 7:00 to 11:00 and from 14:00 to 17:00. There is a lag in bloom outbreak. Algae growth cannot be characterized only by the density of algae in monolayer water, so it is necessary to use the average density of algae in the vertical migration range for further bloom warning.

Key words: Xiangxi River; vertical distribution; diurnal variation; summer; Chlorophyll-a