J. Lake Sci.(湖泊科学),2023,**35**(2):519-529
DOI 10.18307/2023.0210
© 2023 by *Journal of Lake Sciences*

分层异重流背景下降雨对三峡水库香溪河水华消退的影响*

陈聿奇[1,2],崔玉洁[1,2**],黄浩昇[2],张必昊[1,2],成再强[1,2],纪道斌[1,2],龙良红[1,2],唐　静[2]
(1:三峡库区生态环境教育部工程研究中心,宜昌 443002)
(2:三峡大学水利与环境学院,宜昌 443002)

摘　要: 为探究在三峡水库特殊分层异重流背景下降雨对水华消退的影响,以香溪河为例,对库湾降雨前后水动力、生态环境因子开展连续三维立体跟踪监测。结果表明:降雨对水华的消退作用显著,降雨后香溪河库湾叶绿素 *a*(Chl.*a*)浓度明显下降。热分层稳定指数(*RWCS/H*)变化不大,库湾近河口处分层较弱、中上游分层较强的特性并未随此次降雨发生较大变动。受降雨影响,藻类在表层水体聚集程度降低,藻类聚集度指数(*MI*)、微藻群体平均深度(*MRD*)下降。库湾流态随降雨发生而变得复杂,库湾水体浊度明显增加,异重流倒灌形式由近表层倒灌向中下层倒灌转变,雨后又逐渐转变为中层倒灌,长江干流水体倒灌进入库湾的影响范围、潜入深度增加。水体水平输移增强,分散下沉的藻类易随水体环流流出库湾,水华消退。雨后库湾入库流量增加,大部分上游来流依旧由上层流向河口,与中层倒灌异重流形成逆时针环流,藻类无法在表层水体稳定生长,库湾 Chl.*a* 浓度能在较长时间内保持较低水平,不会再次迅速暴发水华。
关键词: 香溪河;降雨;水华;异重流;环流模式;三峡水库

Rainfall impact on the disappearance of algal blooms in Xiangxi River of Three Gorges Reservoir under stratified density current*

Chen Yuqi[1,2], Cui Yujie[1,2**], Huang Haosheng[2], Zhang Bihao[1,2], Cheng Zaiqiang[1,2], Ji Daobin[1,2], Long Lianghong[1,2] & Tang Jing[2]
(1: *Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir*, *Ministry of Education*, *Yichang* 443002, *P.R. China*)
(2: *College of Hydraulic & Environmental Engineering*, *China Three Gorges University*, *Yichang* 443002, *P.R.China*)

Abstract: In order to explore the impact of rainfall on the disappearance of algal blooms under the background of special stratified density current in the Three Gorges Reservoir, taking Xiangxi River as an example, this study conducted continuous three-dimensional tracking monitoring of hydrodynamic and ecological environmental factors before and after rainfall in the Xiangxi Bay (XXB). Results showed that rainfall had an obvious effect on the disappearance of algal blooms. The concentration of chlorophyll-*a* decreased significantly after rainfall in the XXB. The stability index of thermal stratification (*RWCS/H*) changed slightly. Meanwhile the phenomenon which the stratification was weak near the estuary area but strong in the middle and upper reaches of the XXB did not change significantly under the rainfall. Affected by rainfall, the degree of algal aggregation in surface water, the morisita's depth (*MI*) and mean residence depth (*MRD*) all decreased. The flow pattern of the XXB became complex with rainfall, with a significant rise in the turbidity of the water body. The pattern of backflow density current changed from near-surface inversion to middle-lower inversion, and gradually changed into middle inversion after rain. The influence range and depth of the backflow of the Yangtze River mainstream into the XXB increased. Besides, the horizontal transport of water body enhanced so that the algae that dispersed and sank were easy to flow out of the XXB with the water circulation, and algal blooms disappeared. After the rain, the inflow of the XXB increased, and most of the upstream inflow still flowed from the upper layer to the estuary, forming a counter-

* 2022-09-02 收稿;2022-10-30 收修改稿。
国家自然科学基金项目(52009066,51909135, 52079069)和三峡库区生态环境教育部工程中心开放基金项目联合资助。
** 通信作者;E-mail:cuida2008@163.com。

clockwise circulation with the middle inverted density current, which made it impossible for algae to grow stably in the surface water. The concentration of chlorophyll-*a* could be in low for a long time, and there will be no more rapid blooms again.
Keywords: Xiangxi Bay; rainfall; algal blooms; density current; circulation patterns; Three Gorges Reservoir

三峡水库自蓄水以来,长江干流水体水质整体维持在Ⅱ~Ⅲ类,但支流普遍存在不同程度的水体富营养化和水华问题,已成为三峡库区最重要的水环境问题,引起国内外广泛关注[1-2]。在营养盐充足条件下,浮游植物在适宜的水文气象及水动力共同作用下大量繁殖聚集形成水华[3]。目前防控水华的最佳策略是降低河流营养盐浓度、减少污染输入,但这是一个长期过程[4];而利用化学生物方法防控水华,对于三峡水库这种战略水源地易带来次生危害。因此,针对三峡水库支流水华防控,以刘德富等为主的学者提出通过生态调度防控支流水华[5],但该研究与具体调度实施尚有一定距离,特别是降雨过程对藻类水华消退影响尚不明确。

在一般的湖库水体的研究中,Simić等[6]发现降雨后塞尔维亚 Sumarice 水库营养盐水平提高进而导致蓝藻(水华束丝藻)大量暴发;李飞鹏[7]的研究结果表明,在浅水湖泊中,降雨对藻类抑制作用有限,降雨并未对水华有明显降低作用,反而因营养盐补给作用,叶绿素 *a* 浓度在雨后迅速上升。而在三峡水库支流库湾现场监测发现,降雨通常伴随着不同程度的水华消退,对水华的抑制效果明显[8-9]。总体上,目前关于降雨对水华生消机理的研究多集中在营养盐的输移对藻类生长和演替的影响上,而对水文水动力影响下藻类的输移关注较少。然而近坝支流自三峡水库蓄水以来与原来天然河流相比,水位抬升、水面变宽、流速减缓,水动力条件发生改变,由原先的河流型生境特征向深水湖泊型生境特征转换,且支流水体在不同时期存在不同类型的异重流[10],致使浮游藻类生物群落具有空间异质性,其空间分布特征和风力作用、水体环流以及藻类自身运动等有关[11-12]。水动力条件已成为影响藻类生长的关键因素,降雨对支流水华生消的影响愈加复杂[13-14],有必要开展深入研究。

本文通过野外连续跟踪监测,研究了降雨对异重流潜入形式和对藻类垂向、水平输移的影响,结合库湾水动力和藻类水华时空分布特性,尝试揭示分层异重流背景下,不同于一般湖库水体,降雨对水华消退的作用。该结论将深化对深水库湾水华生消机理的认识,能结合降雨进一步为生态调度防控支流水华寻求调度时机、调度方式等提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域

香溪河位于湖北省西部,是靠近三峡大坝的首条大型支流,位于长江北岸,河口距离三峡大坝 29 km,流域范围为 30°57′~31°34′N,110°25′~111°06′E, 如图 1。香溪河流域属亚热带大陆性季风气候,多年平均气温 16.6℃,年均降雨量在 800~1200 mm,冬季干旱,夏季多雨,且以中小降雨为主[9],流域多年平均流量为 40.18 m^3/s[15]。三峡水库蓄水后,自河口向上游约 25~40 km 的水体由河流水体转变为类似湖泊水体(缓流水体),此水域称为香溪河库湾,其具有独特的水动力特征,库湾水动力特征主要受上游来水和长江干流影响,水流全年流速较小,且为分层异向流动[10],曾多次暴发严重水华[16]。

1.2 监测方案

为全面分析降雨影响下水华消退路径,结合天气预报,在 2021 年 7 月 16 日至 22 日,每天上午 7:00—12:00 对香溪河库湾纵向和垂向开展连续跟踪监测。纵向上在 XX00、XX02、XX04、XX06、XX08 河道中泓线设置监测点,垂向上利用多参水质分析仪(EXO2,YSI,美国)从表层到水底连续均匀地监测水温、水深、浊度、叶绿素 *a*(Chl.*a*)浓度等指标,其中 20 日由于仪器配重问题,在河口处未监测到底部数据,河口处水深与其他时间有所差异;同步采集表层水样,参考《水和废水分析方法》(第四版)手工测定 Chl.*a* 浓度;流速用 Vector 三维点式流速仪(挪威)现场测定[17];水下光强用 International Light 4100 光照计(美国)测定;透明度(SD)采用塞氏盘现场测定;借助武汉新惠普公司生产的 PH-HB-CJ2 气象站,连续收集气温、降雨量等信息,监测频率为 1 min/次。

1.3 分析方法

真光层深度指开放水体中阳光照射所达、光合作用得以发生的水体深度,是浮游植物生长的有效层,其

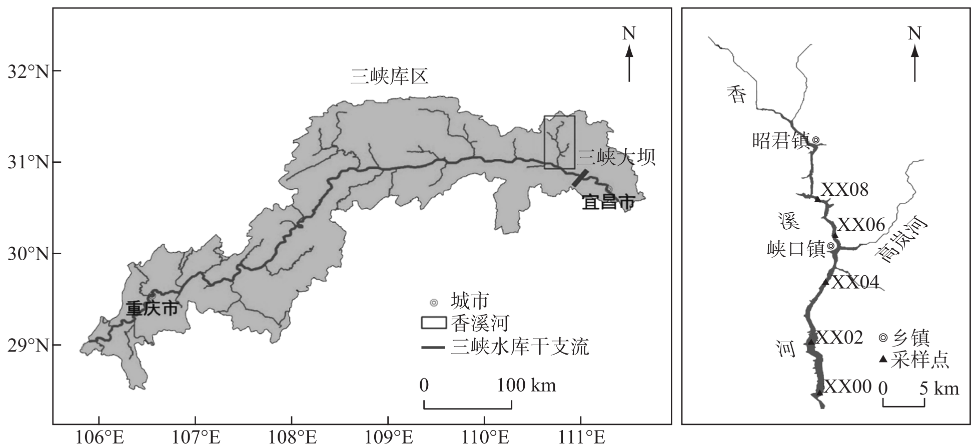

图 1 三峡水库香溪河库湾采样点

Fig.1 Sampling sites in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir

计算基于 Beer-Lamber 原理,真光层深度(Z_{eu})为表层光强(PAR)1%所对应的深度[18-19]。混合层深度定义为水体上层垂直混合充分的水层,是湖库水体层结量化指标,在已有的研究基础上,选取表层水体温差≤1℃处对应的水深为混合层水深(Z_{mix})[20]。

热分层稳定指数($RWCS/H$)[21]可以有效评价热分层稳定水平,计算公式如下:

$$RWCS/H = \frac{D_b - D_s}{(D_4 - D_5)H} \tag{1}$$

式中,D_b 和 D_s 分别为底层、表层水体密度,kg/m^3;D_4 和 D_5 分别为 4℃和 5℃时纯水密度,kg/m^3;H 为水深,m。忽略水中泥沙的影响,水温对应水体密度的计算公式如下[22]:

$$\rho_T = 1000\left[1 - \frac{T + 288.9414}{508929.2(T + 68.12936)}(T - 3.9863)^2\right] \tag{2}$$

式中,ρ_T 为水体密度,kg/m^3;T 为水体温度,℃。$RWCS/H$ 越大,表明水体分层越明显。

微藻粒径颗粒较小,多在微米级别,常以群体性指标——藻类聚集度指数 MI(Morisita's index)来描述[23],MI 指数大于 1 时,表明微藻以聚集形式为主,MI 越大,聚集程度越高,计算公式如下:

$$MI = n\frac{\sum(x_i)^2 - \sum x_i^2}{\left(\sum x_i\right)^2 - \sum x_i} \tag{3}$$

微藻群体的平均深度 MRD(mean residence depth)[24],表明微藻颗粒在垂向整体迁移运动轨迹,计算公式如下:

$$MRD = \frac{\sum(x_i \cdot d_i)}{\sum x_i} \tag{4}$$

式中,x_i 为不同水深的 Chl.a 浓度,mg/m^3;n 为水体分层数;d_i 为水深,m。

2 结果和分析

2.1 水文气象变化特征

图 2a 为 7 月 16 日至 22 日降雨、气温逐小时变化图,16 日降雨前日平均气温为 26.7℃。随后 3 天间断降雨,期内主要发生了 3 次降雨过程,每次降雨历时 1~2 h。第 1 次为 16 日 16:00—17:00,累计降雨量 13.8 mm;第 2 次发生在 18 日 14:00—15:00,累计降雨量 10.2 mm,其中 15:00 雨强达 9.8 mm/h;第 3 次发生在 19 日至 20 日凌晨,累计降雨量为 4.6 mm。此外 17 日 19:00 出现了持续时间 1 h 的降雨过程,降雨强度

为 2.4 mm/h。气温在监测期间内呈明显的昼夜规律,白天随着太阳辐射增强,大气温度逐渐升高,夜间下降,昼夜温度范围在 25~35℃之间。气温受降雨影响显著,降雨期间日平均气温低于非降雨期间,降雨当天高温时段明显缩短。16 日降雨导致 16:00—17:00 气温迅速下降,由 30.2℃降至 24.5℃;18 日降雨导致 14:00—15:00 气温迅速下降,由 31.7℃降至 25.4℃,降雨结束后气温略有回升,17:00 升至 26.1℃。20 日日间至监测期结束为降雨后,日最高气温相较于降雨期间有所升高,21 日、22 日分别为 33.8、35.1℃,为监测期间峰值。监测期间香溪河库湾入库流量如图 2b,降雨前平均来水量 22 m^3/s,降雨后骤升至 100 m^3/s,增加了约 4 倍,库湾水位波动与入库流量呈明显正相关,随入库流量的增加而增加。

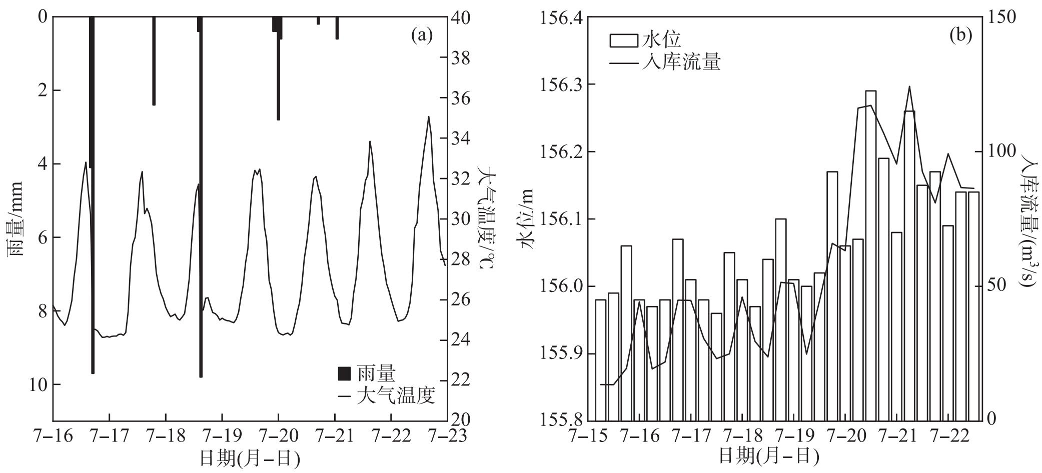

图 2 香溪河库湾水文气象特征

Fig.2 Hydrometeorological characteristics of Xiangxi Bay

2.2 流场特征

图 3 为监测期间香溪河库湾流速矢量与电导率等值线图,电导率可表征水体中溶质盐浓度的高低,被普遍用于不同性质水体交换过程的示踪[25],电导率的变化对三峡库区支流回水区域具有指示作用,回水与来水交汇处电导率变化明显[26]。以 16 日代表降雨前,18、20 日代表降雨期间,22 日代表降雨后,可以看出,香溪河库湾存在明显的倒灌异重流。降雨前,长江干流水体主要从水深 0~15 m 范围潜入,以近表层异重流形式倒灌进入库湾,上游来水通过中、底部流向河口,库湾上层水体以及上游底部水体电导率变化明显。随着降雨的发生,异重流的倒灌形式开始发生变化,异重流潜入深度逐渐增加,18 日增加至 24 m 处,逐渐转变为中上层倒灌,到 20 日异重流倒灌潜入深度进一步增加,转变为中下层倒灌;18 日库湾中上游中层水体电导率较高,在库湾呈楔形分布,20 日中下层水体电导率变化显著,底部电导率明显下降,库湾上层水体流向河口的流速由接近 0 增加至雨后 0.02 m/s。降雨过后,干流水体由水深 20~30 m 范围潜入库湾,22 日库湾异重流形式逐渐演变为中层倒灌异重流,倒灌至距河口约 18 km 处。

2.3 浊度特征

监测期间内香溪河库湾浊度均呈现从下游向上游减小的变化趋势,同时库湾水体浊度在降雨前后变化显著(图 4)。降雨前,库湾整体浊度较小,下游上层水体浊度较大,约为 40 NTU,对库湾影响范围很小,影响距河口 3 km 区域。降雨期间,香溪河库湾浊度迅速增加,下游中下层水体浊度由 18.8 NTU 骤升至 66.6 NTU,底部浊度由下游河口向上游递减,同时浑浊水体对库湾的影响范围增加,影响至距河口 12 km 区域;降雨后,下游底层浊度开始下降,中层水体浊度依旧较高,但影响范围开始减小,中上游底部浊度增加,靠近底部顺坡出现一条较高浊度带。

2.4 叶绿素 *a* 浓度特征

Chl.*a* 浓度是一种常用的度量藻类生物量的关键指标,考虑到多参测定 Chl.*a* 浓度可能存在一定误差,本研究同步采集表层水体,进行手工 Chl.*a* 浓度测定,2 种方法测得表层 Chl.*a* 浓度结果如图 5。

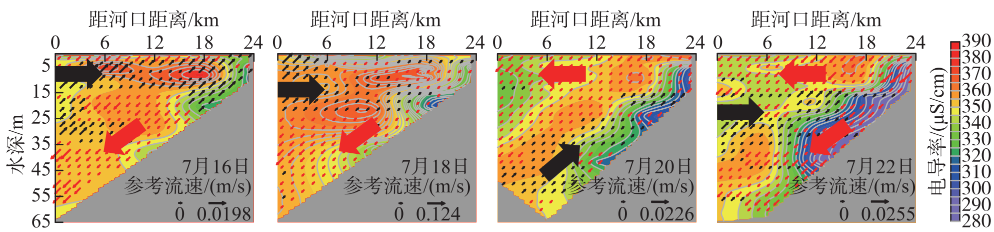

图 3 降雨前后香溪河库湾流速矢量与电导率等值线纵剖面图
(黑色箭头表示水流由河口流向库湾上游,红色箭头表示水流由库湾上游流向河口)
Fig.3 Longitudinal profile of velocity vector and conductivity isoline in the Xiangxi Bay before and after rainfall

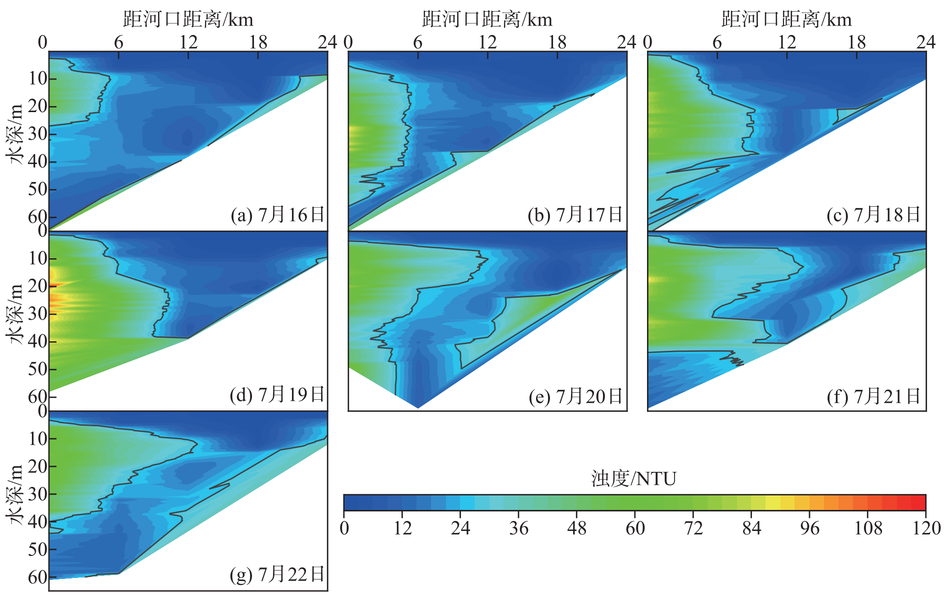

图 4 香溪河库湾浊度每日变化
Fig.4 Daily varieties in turbidity in Xiangxi Bay

两种测量方法所得数据总体变化趋势一致,7 月 16 日至 22 日库湾表层 Chl.*a* 浓度整体呈下降趋势(图 5)。手工测定结果略高于多参结果,这可能与采样的方式存在差异有关,总体误差在允许范围内,因此在野外实地工作中多参的监测结果是可信的,为了对比库湾垂向 Chl.*a* 浓度差异,本文将统一使用多参的数据进行分析。

香溪河库湾 Chl.*a* 浓度时空变化情况如图 6,从库湾纵向剖面看,各点位 Chl.*a* 浓度峰值均出现在 16 日降雨前,均超过水华暴发阈值 32 mg/m^3[25],且越往上游 Chl.*a* 浓度越高,XX06、XX08 表层 Chl.*a* 浓度分别达到了 92.47 和 81.06 mg/m^3;降雨发生后,库湾上游表层 Chl.*a* 浓度率先下降,XX06、XX08 Chl.*a* 浓度分别骤降至 1.6 和 0.9 mg/m^3,较 16 日降幅为 98.27% 和 98.89%,Chl.*a* 浓度在库湾表现为上游小于中下游;雨后的 3 天各点位表层 Chl.*a* 浓度持续保持在较低水平。从垂向上分析,降雨前,库湾下游中下层水体 Chl.*a* 浓度趋近于 0,上游底部存在少量藻类,Chl.*a* 浓度约为 10.33 mg/m^3;降雨期间,Chl.*a* 浓度垂向分布上发生变化,17 日至 19 日库湾下游中、下层水体 Chl.*a* 浓度有所增加,高于 1.67 mg/m^3;降雨后,库湾 10 m 及以下水深处 Chl.*a* 浓度趋近于 0。

2.5 水温分层特性

香溪河库湾水温变化如图 7 所示,垂向水温分布表现为上游水温梯度较大,分层较强,越靠近河口水温

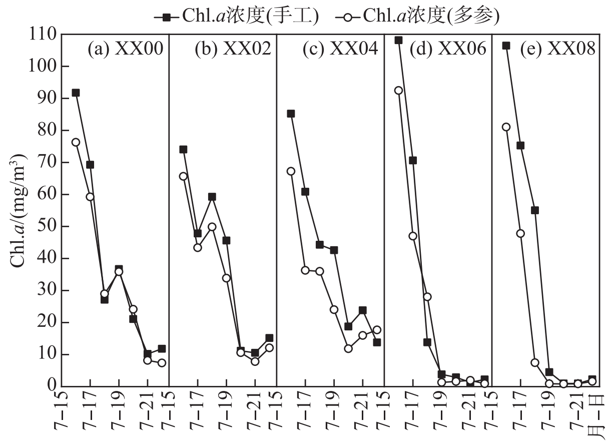

图 5 香溪河库湾各点位表层 Chl.*a* 浓度逐日变化

Fig.5 Daily varieties in concentration of chlorophyll-*a* in surface layer at each point in Xiangxi Bay

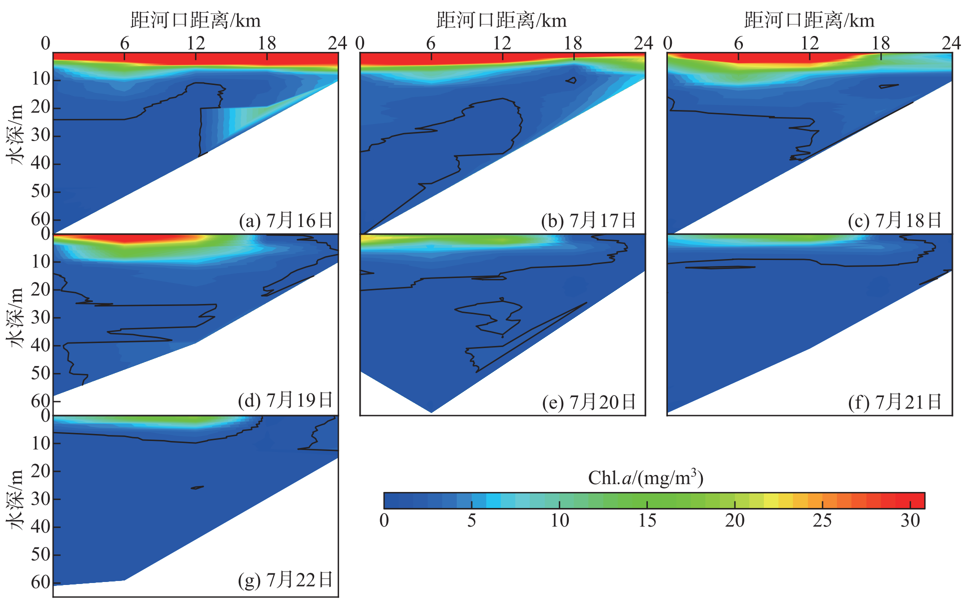

图 6 香溪河库湾叶绿素 *a* 浓度每日变化

Fig.6 Daily varieties in concentration of chlorophyll-*a* in Xiangxi Bay

梯度有所下降,分层减弱。降雨前,受太阳辐射影响,库湾表层水温较高,在 26℃左右;而库湾上游来水由中、底部流向河口,库湾底部水温基本相同,在 21℃左右。降雨期间库湾水温有所下降,但降幅不明显,中上层水温下降 1℃左右。降雨过后,气温回升,表层水温逐步升高;而底部水温受中层倒灌异重流上行和上游低温来水下潜影响,表现为由下游向上游递减。

3 讨论

3.1 水体层化结构对水华生消的影响

光热条件是水华暴发的能量基础[26],降雨前太阳辐射较强,库湾气温较高、上层水体流速较缓,藻类能

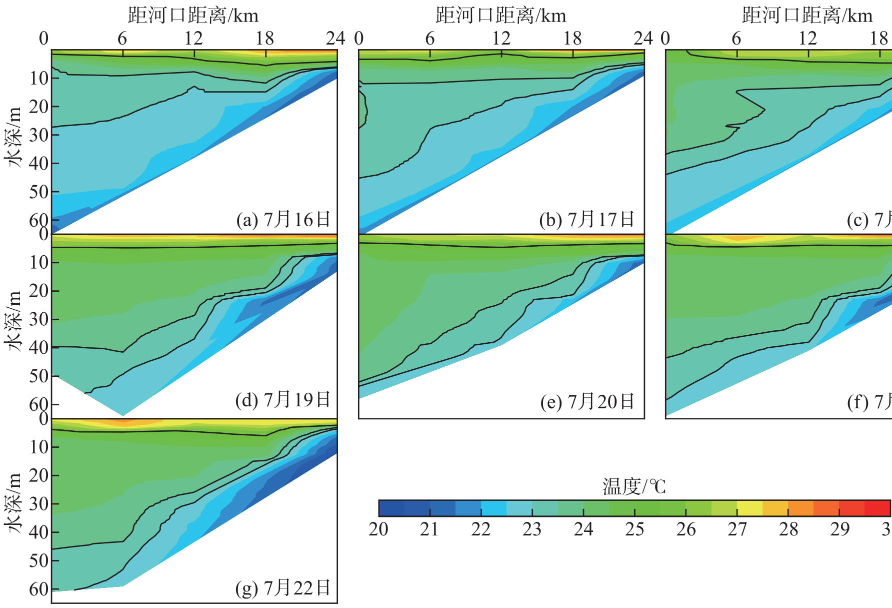

图 7 香溪河库湾水温每日变化

Fig.7 Daily varieties in water temperature stratification in Xiangxi Bay

停滞在光照带接受充足阳光而增殖。杨正健等[27]研究发现,香溪河库湾呈上游水体浅,分层较强,下游水体较深,分层反而较弱的空间分布特点。据 *RWCS/H* 指数可知库湾水体分层显著,并且有明显空间分布差异,下游(XX00)*RWCS/H* 指数约为 2.5 m^{-1},分层较弱,越往上游 *RWCS/H* 指数越大,分层越强,这与前期研究相符。水体分层越强,水华风险越大[28],降雨前库湾表层 Chl.*a* 浓度较高,库湾水华情势严重,上游最高达 92.47 mg/m^3。

结合图 5 和图 8a~c 可知,降雨影响下,香溪河全库湾表层 Chl.*a* 浓度随着时间推移持续下降。中游(XX06)、上游(XX08)水体真光层深度显著升高,与 Chl.*a* 浓度变化趋势相反,这与微藻颗粒形成的遮光效应有关,当藻类浓度降低时,水体透明度增加。而下游河口(XX00)处,由于长江干流倒灌水体泥沙浓度较高,特别 19 日长江干流携高浓度泥沙颗粒倒灌进入库湾,因此即使泥沙的吸附能加速藻类的沉降消退[29],使微藻浓度降低,但水体透明度并未明显增加,真光层深度变化不明显。降雨前后,*RWCS/H* 指数虽有所变动,但中上游仍处于较稳定的热力分层期,可能是由于此次监测多为中小型间断降雨,且降雨时间多数为采样后的下午至夜晚,对分层的破坏作用小于太阳的热辐射效应。下游分层较弱、上游分层较强的特性并未随降雨发生变化,与此次水华的消退关联性不大。不同程度的降雨对库湾水体的影响较为复杂,为进一步明晰降雨对水体层化结构的影响,应进一步研究水体层化结构对不同程度降雨的响应。

3.2 分层异重流演变与藻类输移分析

水华的暴发是在适宜的气候条件及水动力驱动下,大量藻类上浮聚集形成宏观“水华”的过程[30-31],香溪河水华易发期优势藻种为漂浮型蓝藻,常聚集于水体表面[31-32],而衣藻等利用自身表毛运动的藻类运动速度为 0.10~0.17 mm/s,小于库湾水流速度,主要随水流流动[33]。如图 9a,降雨前,香溪河库湾下游(XX00)、中游(XX06)、上游(XX08)*MI* 指数均大于 1,藻类多聚集在表层水体。此时长江干流水温低于库湾河口表层水温,高于中层水温,在库湾形成近表层的中上层倒灌[34],聚集在表层水体的藻类随倒灌水体向上游移动,中上游水华情势更加严重,上游表层 Chl.*a* 浓度远高于下游表层水体。同时库湾中上游底部Chl.*a* 浓度较高(图 6a),结合库湾流场特征可知,部分聚集在表层水体的藻类被倒灌异重流带到中上游底部。

随着间歇性降雨,*MI* 指数逐渐减小,XX06、XX08 降至 1 以下;XX06、XX08 藻类平均深度 *MRD* 逐日减小,在 20 日趋于稳定,XX00 由于位于水位波动较明显的河口处,*MRD* 呈先减小后增加再减小的趋势(图

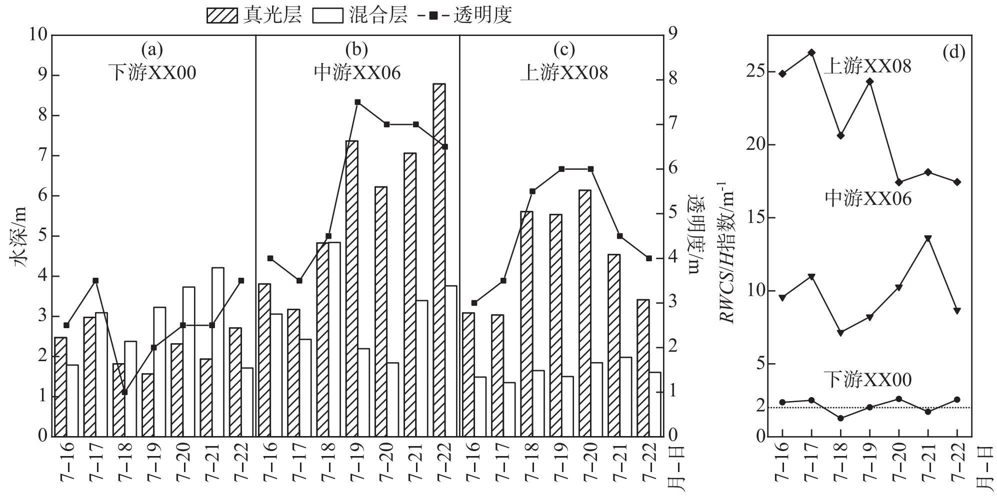

图 8 香溪河库湾 Z_{eu}、Z_{mix}、$RWCS/H$ 指数和透明度每日变化

Fig.8 Daily varieties of Z_{eu}, Z_{mix}, $RWCS/H$ and SD in Xiangxi Bay

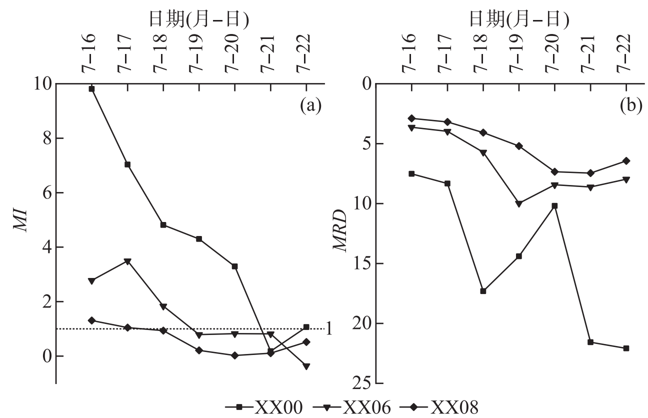

图 9 藻类群体迁移特性

Fig.9 Characteristics of algal migration

9b)。受降雨影响,库湾表层水体扰动增强,藻类在表层水体的聚集程度下降,逐步分散下沉至库湾中层水体,水柱 5 m 水深左右处的 Chl.*a* 浓度最高,高于表层。另一方面,由图 4 可知,区域性降雨使长江干流来流量增加,倒灌强度增加,并携带高浓度泥沙,水体浊度高达 66.6 NTU。因为香溪河异重流主要由水体之间温差和浊度差引起,夏季汛期浊度差是主要原因[35-36],所以水体浊度的增大引起异重流潜入形式改变,由雨前近表层倒灌逐渐转变为中下层倒灌,潜入深度增加。库湾上游来流大部分由中上层流向河口,使藻类随水流流向河口,从而影响了藻类的物理迁移路径。综合前期相关研究进展和本研究结果,三峡水库蓄水前后水文水动力条件改变是水华暴发的根本原因[37-39],而在香溪河分层异重流背景下,降雨主要通过影响水平输移和垂向掺混来改变藻类运动轨迹。

3.3 库湾环流模式与水华生消的影响

纪道斌等基于 CE-QUAL-W2 立面二维模型,从三峡水库典型支流凝练 10 大环流模式,此次降雨引起的香溪河库湾环流模式演变如图 10,符合其总结的有利于水华消退的环流模式[40]。雨前库湾形成中上层倒灌异重流,上层水体总体上由河口流向上游,表层水体由于受到风浪、船行波等影响,实际监测中有部分水

体由上游流向河口(图3)。倒灌异重流与上游来流在库湾形成顺时针环流,致使库湾表层水体流速趋缓,水体滞留时间延长,暴发严重水华且不易消退。

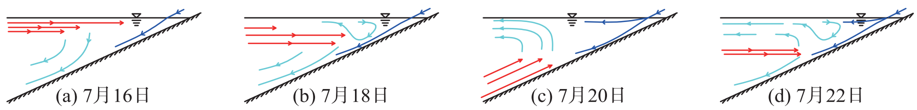

图 10 香溪河库湾环流模式示意
(深蓝色线条表示库湾上游来流,红色线条表示长江干流倒灌,浅蓝色线条表示库湾初始水位)
Fig.10 Diagram of circulation patterns in Xiangxi Bay

随着降雨的进行,库湾倒灌异重流逐渐向中下层倒灌演变,大部分上游来流由上层流向河口,中上层水体形成逆时针环流,小部分上游来流从底部流向河口。库湾环流模式演变的过程中产生的涡旋等现象将增强水体扰动[41],同时长江干流倒灌水体与库湾上游来流显著增加,两股水流交汇处增大的剪切力使上下水体产生不同程度的掺混[42],进一步增强了对藻类的稀释作用,在中上游底部形成温度梯度和一条高浊度带。另一方面,形成的逆时针环流增强了库湾中上层水体的水平输移能力,环流裹挟着大量藻类流出库湾,并在一定程度上破坏了上层水体藻类的生存环境。环流对库湾高浓度 Chl.*a* 稀释和携带的双重作用,是此次水华迅速消退的原因,这也符合库湾 Chl.*a* 浓度由上游先下降,最终小于下游的时空特征(图6)。

一些浅水湖泊的研究表明,藻类运动与流场无显著关系[43],且降雨并未对水华有明显的降低作用,反而受营养盐补给作用,Chl.*a* 浓度雨后迅速上升[7]。即使降雨一般导致产汇流从上游源头、沿河流两岸的坡面进入水体,并携带大量泥沙及营养盐进入水体[44],但此次的监测结果表明,香溪河库湾特殊的环流模式有效抑制了水华在雨后反弹。异重流在雨后逐步向上层倒灌演变,22 日演变为中层倒灌,库湾中上层水体依旧保持逆时针环流模式,香溪河入库流量在雨后增至 117 m^3/s,约为雨前的 5 倍,大部分上游来流仍由上层流向河口,藻类无法稳定停留在表层水体,其生存环境受限,推缓了水华的暴发,抑制时间可长达 3~5 天。刘心愿等在香溪河库湾前期监测发现,表层倒灌异重流影响下,降雨后 Chl.*a* 浓度重新上升,直到底层倒灌异重流影响下,降雨后使 Chl.*a* 浓度降低[9]。综合可知库湾环流模式与水华生消紧密相关,如图 10 的分层异重流演变规律下,降雨对水华消退的影响和蓝藻生长抑制效果显著。

4 结论

1)香溪河流域降雨导致库湾水体浊度增加,进而改变了异重流的倒灌形式,由近表层倒灌向中下层倒灌转变,库湾环流模式随之变化。库湾表层水体扰动增强,进而通过影响水平输移和垂向掺混改变藻类运动轨迹,藻类的运动规律为分散-下沉-水平输移,并最终随环流被带出库湾。库湾环流对高浓度 Chl.*a* 的稀释作用和携带作用是此次库湾水华消退的主要原因。

2)受分层异重流倒灌模式影响,库湾 Chl.*a* 浓度持续维持在较低水平,即使在分层、光热、营养盐等条件适宜浮游植物生长的情况下,水华没有在降雨后立即暴发。雨后香溪河入库流量增大,大部分上游来流仍由上层流出库湾,与中层倒灌异重流形成的逆时针环流模式并未改变,藻类无法停留在表层水体生长,有效推缓了水华的暴发,这有别于一般湖库水体,水华的生消过程应结合异重流演变过程分析。

3)监测期间多为中小型间断降雨,并未对香溪河库湾分层产生根本性破坏,中上游仍处于稳定分层状态,降雨对水体分层的破坏作用小于太阳的热辐射效应。此次库湾水华消退与水体分层关联性不大,为进一步确定不同强度降雨对库湾水体分层的影响,还应进一步研究。

5 参考文献

[1] Li Z, Ma JR, Guo JS *et al*. Water quality trends in the Three Gorges Reservoir region before and after impoundment (1992-2016). *Eco-hydrology & Hydrobiology*, 2019, **19**(3): 317-327. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2018.08.005.

[2] Xu T, Wang YC, Liu DF *et al*. An investigation on summer algal blooms in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(3): 646-652. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2014.0053. [许涛, 王雨春, 刘德富等. 三峡水库香溪河库湾夏季水华调

查. 生态学杂志, 2014, **33**(3): 646-652.]

[3] Cui YJ, Liu DF, Song LX *et al*. Application of digital filtering theory in baseflow separation in Xiangxi River Watershed of Three Gorges Reservoir Area. *Journal of China Hydrology*, 2011, **31**(6):18-23. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2011.06.004. [崔玉洁, 刘德富, 宋林旭等. 数字滤波法在三峡库区香溪河流域基流分割中的应用. 水文, 2011, **31**(6):18-23.]

[4] Palmer M, Ruhi A. Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: Implications for river restoration. *Science*, 2019, **365**(6459): eaaw2087. DOI: 10.1126/science.aaw2087.

[5] Liu DF, Yang ZJ, Ji DB *et al*. A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(3): 443-454. [刘德富, 杨正健, 纪道斌等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展. 水利学报, 2016, **47**(3): 443-454.]

[6] Simić SB, Đorđević NB, Milošević D. The relationship between the dominance of cyanobacteria species and environmental variables in different seasons and after extreme precipitation. *Fundamental and Applied Limnology*, 2017, **190**(1): 1-11. DOI: 10.1127/fal/2017/0975.

[7] Li FP, Chen MM, Jia YB *et al*. Effects of meteorological factors on growth and distribution of phytoplankton in an enclosed shallow lake. *Journal of Hydroecology*, 2019, **40**(5): 55-62. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2019.05.008. [李飞鹏, 陈蒙蒙, 贾玉宝等. 气象因素对封闭浅水湖泊浮游藻类生长和分布影响. 水生态学杂志, 2019, **40**(5): 55-62.]

[8] Cui YJ, Liu DF, Song LX *et al*. Phosphorus output characteristics under different rainfall-runoffs in Gaolan River. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 555-560. DOI: 10.13227/j.hjkx.2013.02.056. [崔玉洁, 刘德富, 宋林旭等. 高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征. 环境科学, 2013, **34**(2): 555-560.]

[9] Liu XY, Song LX, Ji DB *et al*. Effect of the rainfall on extinction of cyanobacteria bloom and its mechanism analysis. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 774-782. DOI: 10.13227/j.hjkx.201708203. [刘心愿, 宋林旭, 纪道斌等. 降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析. 环境科学, 2018, **39**(2): 774-782.]

[10] Liu JG, Xu YQ, Ma J *et al*. Model of water temperature stratification in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir with different density currents. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, **35**(4):37-42. DOI: 10.11988/ckyyb.20161150. [刘晋高, 徐雅倩, 马骏等. 三峡水库香溪河库湾不同异重流下水温分层模式研究. 长江科学院院报, 2018, **35**(4):37-42.]

[11] Cao HS, Kong FX, Luo LC *et al*. Effects of wind and wind-induced waves on vertical phytoplankton distribution and surface blooms of *Microcystis aeruginosa* in Lake Taihu. *Journal of Freshwater Ecology*, 2006, **21**(2): 231-238. DOI: 10.1080/02705060.2006.9664991.

[12] Zhu MY, Paerl HW, Zhu GW *et al*. The role of tropical cyclones in stimulating cyanobacterial (*Microcystis* spp.) blooms in hypertrophic Lake Taihu, China. *Harmful Algae*, 2014, **39**: 310-321. DOI: 10.1016/j.hal.2014.09.003.

[13] Calderó-Pascual M, de Eyto E, Jennings E *et al*. Effects of consecutive extreme weather events on a temperate dystrophic lake: A detailed insight into physical, chemical and biological responses. *Water*, 2020, **12**(5): 1411. DOI: 10.3390/w12051411.

[14] Xin Y, Li P, Wu JF *et al*. Impacts of heavy rainfall on the water quality of Shahe Reservoir in the North Canal Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(1): 199-208. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2020.0525. [辛苑, 李萍, 吴晋峰等. 强降雨对北运河流域沙河水库水质的影响. 环境科学学报, 2021, **41**(1): 199-208.]

[15] Tang T, Li DF, Pan WB *et al*. River continuum characteristics of Xiangxi River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(1): 141-144. DOI:ir.ihb.ac.cn/handle/152342/1914. [唐涛, 黎道丰, 潘文斌等. 香溪河河流连续统特征研究. 应用生态学报, 2004, **15**(1): 141-144.]

[16] Yang ZJ, Liu DF, Yi ZQ *et al*. Diurnal vertical migration of *Peridiniopsis* sp. in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir. *Research of Environmental Sciences*, 2010, **23**(1): 26-32. DOI: 10.13198/j.res.2010.01.28.yangzhj.006. [杨正健, 刘德富, 易仲强等. 三峡水库香溪河库湾拟多甲藻的昼夜垂直迁移特性. 环境科学研究, 2010, **23**(1): 26-32.]

[17] Ma J, Liu DF, Ji DB *et al*. Flow measurement methods under low flow velocity at the tributary bays of Three Gorges Reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2011, **28**(6): 30-34, 54. [马骏, 刘德富, 纪道斌等. 三峡水库支流库湾低流速条件下测流方法探讨及应用. 长江科学院院报, 2011, **28**(6): 30-34, 54.]

[18] Chen Y, Yang ZJ, Huang YL *et al*. Research on the influence of mixing layer depth on algal growth. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3049-3056. DOI: 10.13227/j.hjkx.2013.08.004. [陈洋, 杨正健, 黄钰铃等. 混合层深度对藻类生长的影响研究. 环境科学, 2013, **34**(8): 3049-3056.]

[19] Khanna DR, Bhutiani R, Chandra KS. Effect of the euphotic depth and mixing depth on phytoplanktonic growth mechanism. *International Journal of Environmental Research*, 2009, **3**(2): 223-228.

[20] Price JF, Weller RA, Pinkel R. Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1986, **91**(C7): 8411-8427. DOI: 10.1029/JC091iC07p08411.

[21] Lawson R, Anderson MA. Stratification and mixing in Lake Elsinore, California: An assessment of axial flow pumps for improving water quality in a shallow eutrophic lake. *Water Research*, 2007, **41**(19): 4457-4467. DOI: 10.1016/j.watres.2007.06.004.

[22] Thackeray SJ, George DG, Jones RI *et al*. Statistical quantification of the effect of thermal stratification on patterns of dispersion in a freshwater zooplankton community. *Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences)*, 2004, **30**(1):442-442. DOI: 10.1136/bm-

jopen-2017-018617.

[23] Thackeray SJ, George DG, Jones RI *et al*. Statistical quantification of the effect of thermal stratification on patterns of dispersion in a freshwater zooplankton community. *Aquatic Ecology*, 2006, **40**(1): 23-32. DOI: 10.1007/s10452-005-9021-3.

[24] Wang L, Cai QH, Zhang M *et al*. Vertical distribution patterns of phytoplankton in summer *Microcystis* bloom period of Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir, China. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2011, **20**(3): 553-560. DOI: 10.1080/09593330.2010.501821.

[25] Zeng YH, Shen XZ, Zhang JL *et al*. Effects of stratified density flow on the spatial distribution of chlorophyll-*a* in phytoplankton in Xiangxi River. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, **12**(2): 426-435. [曾一恒, 沈旭舟, 张佳磊等. 分层异重流对香溪河浮游植物叶绿素 *a* 空间分布的影响. 环境工程技术学报, 2022, **12**(2): 426-435.]

[26] Gong C, Gong DD, Liu DF *et al*. Phytoplankton succession process in Xiangxi River under different light intensity. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1214-1224. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.04.01. [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. 环境科学研究, 2020, **33**(5): 1214-1224.]

[27] Yang ZJ, Liu DF, Ma J *et al*. Effects of special vertical layered water temperatures on algal bloom in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2012, **45**(1): 1-9, 15. [杨正健, 刘德富, 马骏等. 三峡水库香溪河库湾特殊水温分层对水华的影响. 武汉大学学报: 工学版, 2012, **45**(1): 1-9, 15.]

[28] Kimura N, Wu CH, Hoopes JA *et al*. Diurnal dynamics in a small shallow lake under spatially nonuniform wind and weak stratification. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **142**(11): 1-21. DOI: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001190.

[29] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学. 北京: 科学出版社, 1983.

[30] 崔玉洁. 三峡水库香溪河藻类生长敏感生态动力学过程及其模拟[学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2017.

[31] 孔繁翔, 宋立荣. 蓝藻水华形成过程及其环境特征研究. 北京: 科学出版社, 2011.

[32] 黄宁秋. 水动力条件对三峡库区次级支流典型藻类生长影响[学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2015.

[33] 刘丰. 异重流环境中游动型藻类与水动力耦合机制研究及数值模拟[学位论文]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.

[34] Huang YN, Ji DB, Shen JK *et al*. Variations of stratified density currents in Xiangxi Bay in flood season and cause analysis. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, **37**(5): 80-92. [黄亚男, 纪道斌, 沈君坤等. 汛期香溪河库湾倒灌异重流变化及其成因分析. 水力发电学报, 2018, **37**(5): 80-92.]

[35] Liu L, Liu DF, Johnson DM *et al*. Effects of vertical mixing on phytoplankton blooms in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir: Implications for management. *Water Research*, 2012, **46**(7): 2121-2130. DOI: 10.1016/j.watres.2012.01.029.

[36] Zhang BH, Cui YJ, Ji DB *et al*. Spatial-temporal distribution and threshold of density flow in the tributaries of the Three Gorges Reservoir. *China Rural Water and Hydropower*, 2022, (5): 62-69. [张必昊, 崔玉洁, 纪道斌等. 三峡水库支流库湾分层异重流成因定量化分析. 中国农村水利水电, 2022, (5): 62-69.]

[37] Zhou GJ, Kuang QJ, Hu ZY *et al*. Assessment of algal diversity and water blooms prevention in four tributaries of Three Gorges Reservoir. *China Environmental Science*, 2006, **26**(3): 337-341. [周广杰, 况琪军, 胡征宇等. 三峡库区四条支流藻类多样性评价及"水华"防治. 中国环境科学, 2006, **26**(3): 337-341.]

[38] Guo JS, Chen J, Li Z *et al*. Investigation of phytoplankton and assessment of algal diversity on backwater area of Xiaojiang River in Three Gorges Reservoir after its initiate impounding to the water level of 156 m in spring. *Environmental Science*, 2008, **29**(10): 2710-2715. DOI: 10.13227/j.hjkx.2008.10.003. [郭劲松, 陈杰, 李哲等. 156m 蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价. 环境科学, 2008, **29**(10): 2710-2715.]

[39] Ji DB, Liu DF, Yang ZJ *et al*. Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir. *Scientia Sinica: Pysica, Mechanica & Astronomica*, 2010, **40**(1): 101-112. [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. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, **40**(1): 101-112.]

[40] Ji DB, Wells SA, Yang ZJ *et al*. Impacts of water level rise on algal bloom prevention in the tributary of Three Gorges Reservoir, China. *Ecological Engineering*, 2017, **98**: 70-81. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.10.019.

[41] Shi XY, Li HM, Han XR *et al*. Influence of typical mesoscale oceanographical process on the distribution of nutrients and dissolved oxygen in the northern part of South China Sea in summer. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(3): 695-703. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0121. [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. 环境科学学报, 2014, **34**(3): 695-703.]

[42] Zeng K, Huang TL, Ma WX *et al*. Impact of storm runoff on water quality of one stratified reservoir. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(9): 4979-4986. [曾康, 黄廷林, 马卫星等. 暴雨径流对分层水库水质的影响. 环境工程学报, 2016, **10**(9): 4979-4986.]

[43] Wu TF, Zhu GW, Qin BQ *et al*. Prior wind field induced hydrodynamics and its influence on cyanobacterial bloom in northern bays of Lake Taihu, China. *J Lake Sci*, 2012, **24**(3): 409-415. DOI: 10.18307/2012.0312. [吴挺峰, 朱广伟, 秦伯强等. 前期风场控制的太湖北部湖湾水动力及对蓝藻水华影响. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 409-415.]

[44] Yang X, Liu DF, Yang ZJ. The origin of algae in the spring phytoplankon bloom in XiangXi Bay. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(6): 2051-2056. [杨霞, 刘德富, 杨正健. 三峡水库香溪河库湾春季水华暴发藻类种源研究. 生态环境学报, 2009, **18**(6): 2051-2056.]