

# 香溪河库湾水质对水文条件变化的响应<sup>1</sup>

王旭, 范向军, 杨霞, 林雨霁, 黄宇波\*

(中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理中心, 湖北宜昌 443133)

**【摘要】**: 三峡水库蓄水发电以来, 支流库湾水文条件发生了显著变化, 而库湾水质与水文条件的变化密切相关。以香溪河库湾为研究区域, 探究库区水文条件对库湾水质变化的影响。应用 MIKE21 搭建香溪河二维水动力水质模型, 设置多种工况对干流水位变幅、香溪河上游流量引起的库湾水质变化进行模拟。结果表明, 干流水位变幅增大、香溪河上游流量增加会显著改善库湾水动力条件, 水位变幅增大 1 m, 平均流速提高 0.22cm/s, 上游流量增加 100m<sup>3</sup>/s, 平均流速提高 0.5 cm/s; 干流水位变幅增加会使营养盐向上游迁移, 支流上游流量增加会加快营养盐向河口处迁移, 且两种水文条件增强均会降低河道中段叶绿素 a 浓度; 最后依据综合水文条件下叶绿素 a 浓度分布, 将距河口 0~17.1 km 水域划分为 I 级水华敏感区, 在水华频发时期应加强对该河段的监测。研究成果可为三峡库区支流库湾水动力提升、水质改善、水华防控及生态调度等提供理论支撑。

**【关键词】**: 水文条件; 香溪河; MIKE21; 水质; 敏感区

**【中图分类号】**: X522      **【文献标识码】**: A      **【文章编号】**: 1004-8227(2023)11-2393-10

DOI:10.11870/cjlyzyyhj202311014

自三峡水库 2003 年蓄水发电以来, 长江干流及支流库湾水文和水环境条件发生了显著变化[1], 水环境与水文条件密切相关。在三峡库区支流相关研究中, 水动力和水华消机理[2,3]、营养物质对水文条件响应[4]、生态调度防控水华方法[5]等是研究者们关注的热点问题。

目前库区干流水质整体维持在 II~III 类水平, 水质稳中向好。支流库湾水体由于流速减缓[6]、透明度增加, 营养物质滞留时间加长[7]以及干流营养盐倒灌[8]等原因, 导致水质有所降低。库湾成为藻类水华敏感区[9]。

已有成果表明河流水文条件对水质变化存在影响。利用数学模型进行水质模拟是研究水文条件与水质响应的主要手段。徐国宾等[10]采用非恒定二维水动力模型构建了三峡水库调峰运行下香溪河水动力模型, 模拟结果表明水库调峰运行可以显著增强库区河支流的水位波动, 促进水体交换。宋林旭等[11]基于 SWAT 建立香溪河流域径流、营养盐模型, 发现径流和营养盐负荷呈正相关。黄庆超等[12]基于 Delft3D 软件构建了香溪河回水区末端氨氮排放模型, 发现水动力特征对污染物分布起决定性作用, 污染物容易滞留在回水区。以上研究分别侧重于水动力模拟、流域营养盐输入、单一污染物扩散等, 未建立起干流水位变幅、库湾上游流量与库湾水质的联系, 缺乏对不同水文条件下库湾流速分布、营养盐分布和浓度探究。

本研究以香溪河库湾为研究区域, 使用汛期加密日尺度水质监测数据, 结合已有的水文和地形数据, 利用 MIKE21 软件构建香溪河二维水动力水质模型。模拟香溪河流速、营养盐和叶绿素 a 等指标对三峡库区干流水位变幅和支流上游流量的响应,

<sup>1</sup> 收稿日期: 2023-03-01; 修回日期: 2023-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(U2040210,U2040220); 中国长江三峡集团有限公司员工科研项目(NBYG2022004450)

作者简介: 王旭(1997~), 男, 助理工程师, 主要研究方向为河流水动力水质模拟.E-mail:1258536290@qq.com

\*通讯作者 E-mail:yubo618@163.com

并根据模拟结果划分水华敏感区，为三峡库区支流库湾水动力提升、水质改善、水华防控及生态调度等提供理论支撑。

## 1 研究区域和方法

### 1.1 研究区域

香溪河库湾由北向南流入长江，是三峡水库在湖北省内最大的支流，河口位于三峡大坝上游 34.5 km 处，香溪河流域总面积约为 3 099 km<sup>2</sup>(图 1)。自三峡水库蓄水后，形成 25~40 km 的库湾回水区，库湾内水体流速降低，由原来的 1.00~3.00 m/s 下降到 0.05 m/s，多年平均流量为 65.5 m<sup>3</sup>/s。香溪河水文条件的变化适宜藻类的生长，每年都爆发不同程度的水华。

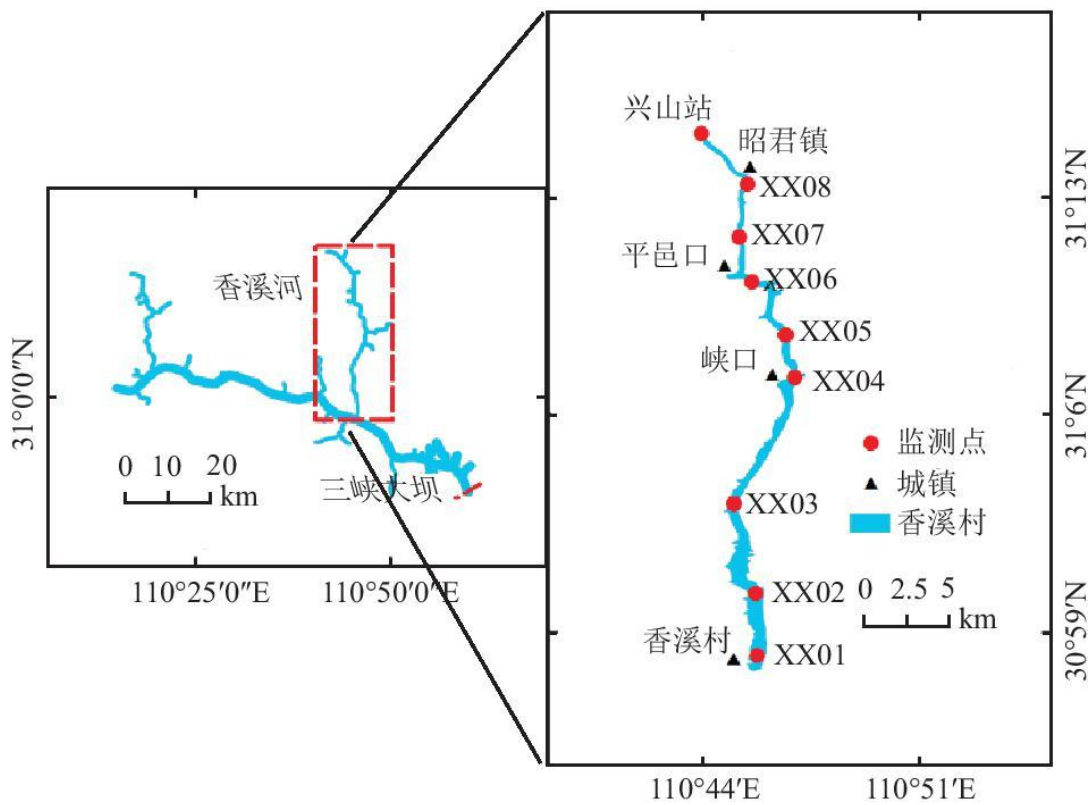


图 1 研究区域示意图

### 1.2 研究方法

MIKE 21 是一种二维水环境模型，可以进行水文条件对水质的影响模拟研究，本研究选取水动力模块和 Eco Lab 模块，构建香溪河水动力水质模型。水动力模块为平面二维非恒定流方程组，Eco Lab 模块为 MIKE 内置变量方程，模型中的曼宁系数、科式力系数、风阻系数等参数选取适宜三峡库区支流库湾的固定系数，并且结合已有经验确定固定值。

#### 1.2.1 研究区概化

根据香溪河实地勘测数据，利用 MIKE 21 内置工具对地形进行概化，共生成 31 282 个计算网格，插值得到香溪河地形用于构建模型(图 2)。

### 1.2.2 模拟条件

香溪河上边界选取兴山站流量数据、实测水质数据，下边界选取库区干流水位数据、实测水质数据，水文条件变化通过调整流量和水位来实现，水质为一维时间序列数据固定不变。初始水质条件选取基于实测水质数据制作的二维场文件，使模拟更加符合真实情况。

### 1.2.3 模型率定和验证

模型率定和验证结果采用 Nash-Sutcliffe 效率系数(ENS)和百分比偏差系数(PBIAS)进行评价，ENS 越接近 1 表明模拟结果与实测结果越符合，PBIAS 越接近 0 表明模拟结果与实测结果偏离程度越小，模拟精度越高。选取模型进水边界下游兴山站为率定和验证站点，最终确定曼宁糙率值为 45,其他参数在已有的数据和研究成果上进行设置。率定 ENS 为 0.92,PBIAS 为 0.04%,验证 ENS 为 0.78,PBIAS 为 0.12%,模型效果良好，可以用于后续模拟。

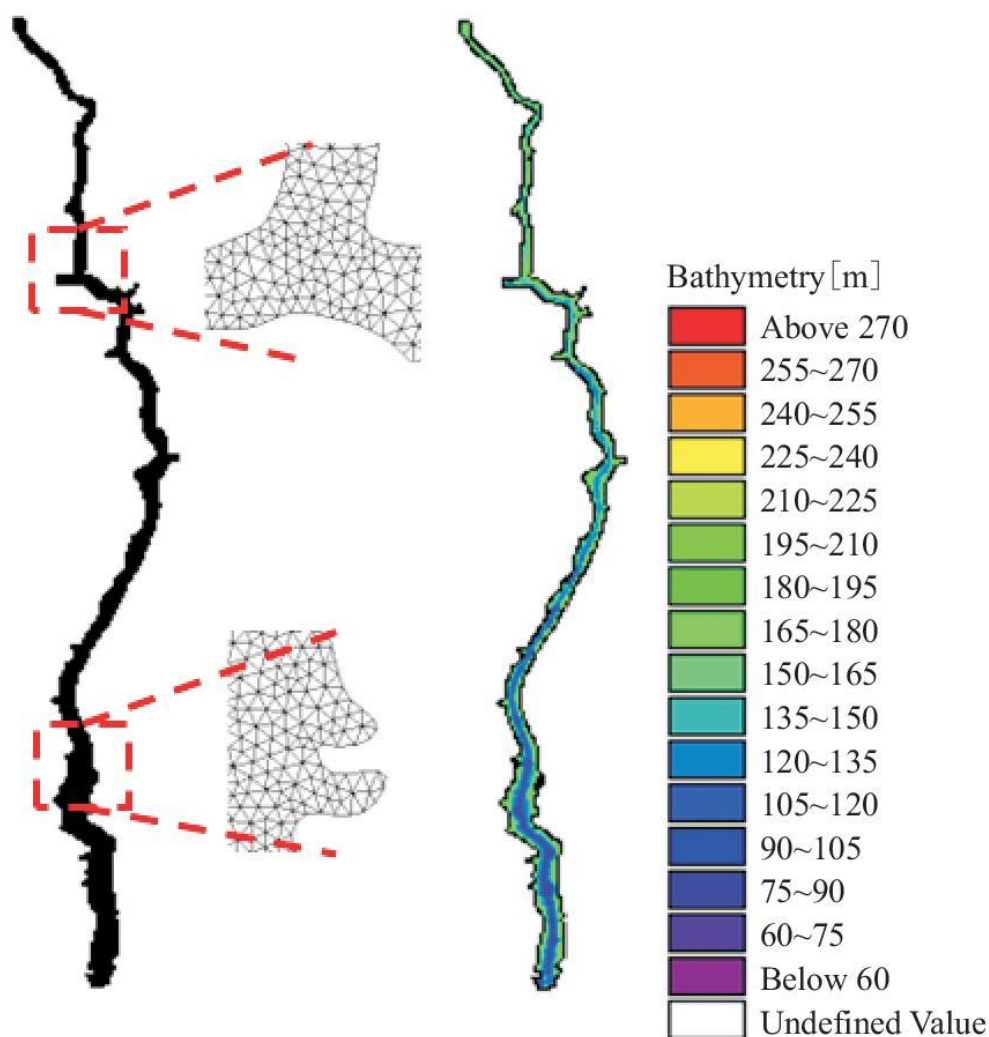


图2 香溪河计算网格及模拟地形

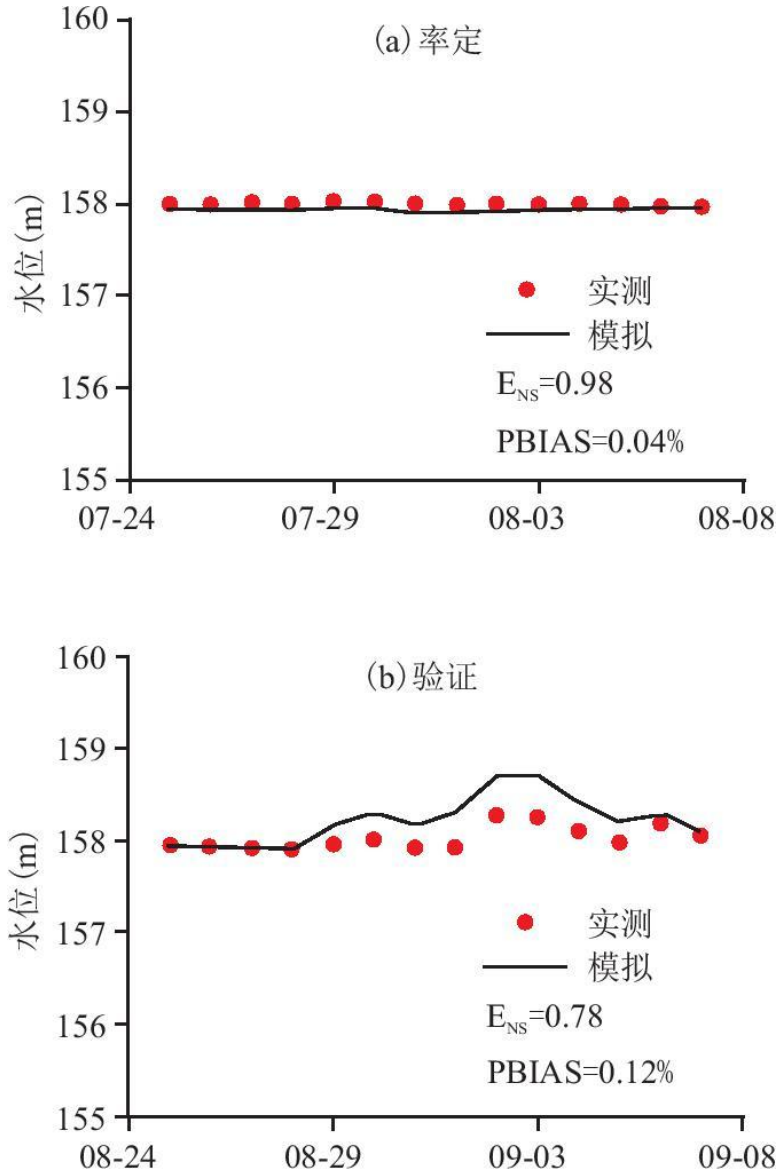


图 3 a, 率定结果; b, 验证结果

## 2 结果

### 2.1 三峡库区干流水位变幅对支流库湾的水质影响

通过分析三峡库区汛期坝前水位变动情况,参考三峡库区调度规程,将初始水位规定为 145 m,水位持续抬升 3 d,将干流水位变化幅度概化为 5 种水文条件(依次为 0、1、3、5、7 m),香溪河上游流量固定为 50 m<sup>3</sup>/s。

随着干流水位变幅的增大,香溪河上游 COD、氨氮、硝酸盐、叶绿素 a 分布范围增加,磷酸盐扩散范围减小(图 4)。干流水位变幅为 0 时,香溪河距离河口约 28 km 内为回水区[13],河道内平均流速超 10 cm/s 的水域主要分布于距河口 21.5 km 以上;水位变幅为 7 m 时,平均流速超 10 cm/s 的水域主要分布于河道边界及 17.9 km 以上河段。水位变幅由 0 增加到 7 m 时,COD(>1.8 mg/L)由距河口 9.5~14 km 向上迁移到 14.7~19.1 km;磷酸盐(>0.05 mg/L)由距河口 17.9 km 以上水体被干流回水顶托到距河口 23.9 km 以上;氨氮(>0.1 mg/L)由河口至 14.4 km 水体扩散到河口至 20.7 km 处;硝态氮(>1.5 mg/L)由河口至 15 km 处水体迁移到至河口 22.1 km 处;叶绿素 a(>30 μg/L)由距河口 5.5~14.5 km 向上迁移到 10.7~21.7 km。

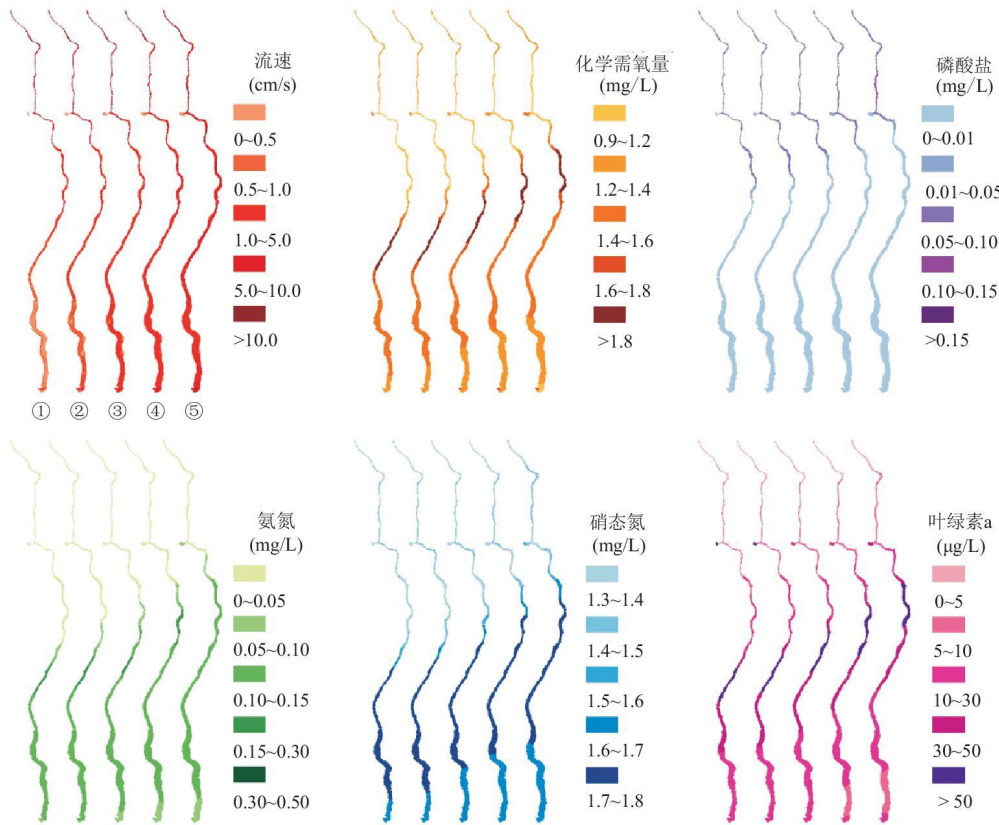


图4 干流水位变幅变化下香溪河指标分布

注：①~⑤:变幅为0、1、3、5、7 m.

5种干流水位变幅下平均流速和平均浓度如图5所示。香溪河整体平均流速明显提升，水位变幅为0时，香溪河平均流速为4.38 cm/s，水位变幅为7 m时为5.90 cm/s，水位变幅每增加1 m，平均流速增加约0.22 cm/s。COD有下降趋势，氨氮、硝态氮整体平均浓度有升高趋势，分别在1.45、0.10、1.63 mg/L左右；磷酸盐随着水位变幅的增加从0.019 mg/L降至0.015 mg/L，降低了约21%；叶绿素a整体平均浓度降低，由26 µg/L降至22 µg/L。

## 2.2 香溪河上游流量对支流库湾的水质影响

基于香溪河内兴山站的流量变化情况，概化得到5种流量水文条件(依次为10、50、100、200、300 m<sup>3</sup>/s)，干流水位固定为145 m。

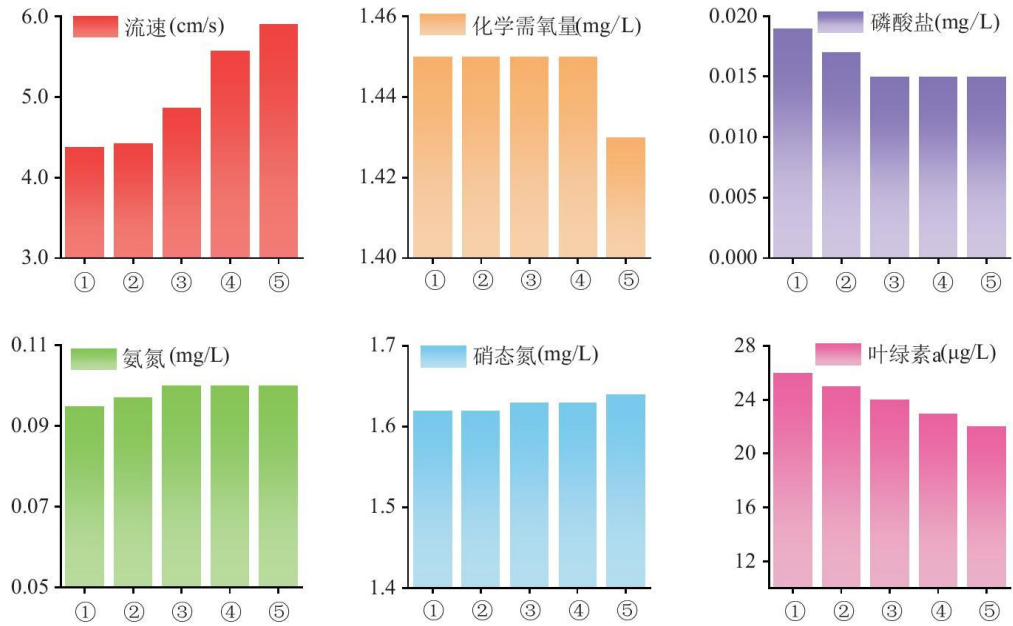


图5 干流水位变幅变化下香溪河指标平均值

注：①~⑤:变幅为0、1、3、5、7 m.

随着香溪河上游流量的增加，COD、氨氮、硝酸盐、叶绿素 a、磷酸盐均向河口方向迁移扩散。随着上游流量由 10 m<sup>3</sup>/s 增加到 300 m<sup>3</sup>/s，流速大于 10 cm/s 的水体由上游小部分水域扩大到距河口 9.5 km 以上全部水域。COD(>2.0 mg/L)由距河口 17.9~20.5 km 扩散进入干流；磷酸盐(>0.05 mg/L)由距河口 31 km 扩散到距河口 3.8 km；氨氮(>0.10 mg/L)由距河口 21.5 km 扩散到距河口 3.8 km；硝态氮(>1.5 mg/L)由距河口 21.7 km 扩散到距河口 3.8 km；叶绿素 a(>30 μg/L)在距河口 6.5~26.1 km 河段扩散到河口 2.5 km 内，并且该部分水体叶绿素 a 平均浓度由 51 μg/L 降至 41 μg/L(图 6)。

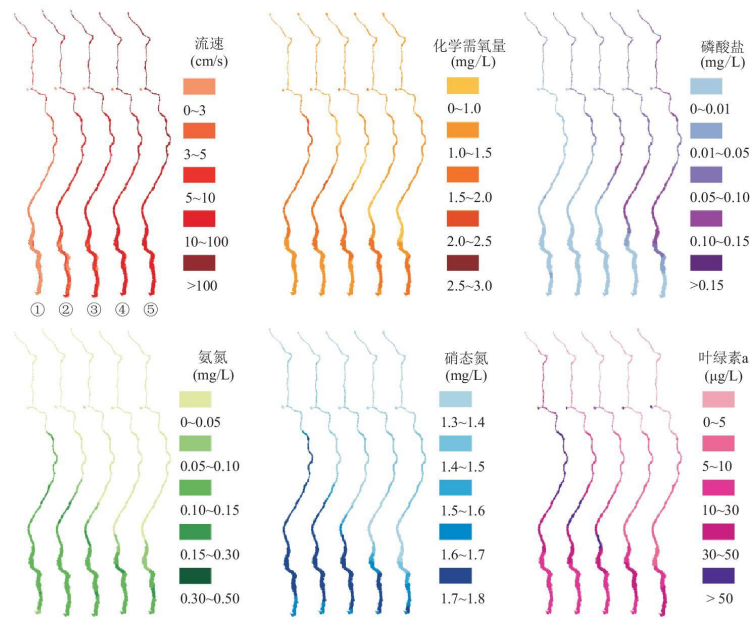


图6 香溪河上游流量变化下指标分布

注：①~⑤:流量为 10、50、100、200、300 m<sup>3</sup>/s.

5种香溪河上游流量下平均流速和平均浓度如图7所示。河道整体平均流速提高，流量由10 m<sup>3</sup>/s 增加到300 m<sup>3</sup>/s, 平均流速由1.08 cm/s 升至16.7 cm/s, 上游每增加10 m<sup>3</sup>/s 的流量, 河道内平均流速提高0.05 cm/s。COD平均浓度由1.30 mg/L 降至1.53 mg/L;磷酸盐平均浓度由0.005 mg/L 升至0.079 mg/L;氨氮平均浓度由0.11 mg/L 降至0.07 mg/L;硝态氮平均浓度由1.67 mg/L 降至1.46 mg/L;叶绿素a平均浓度由33 μg/L 降至14 μg/L,降低约58%。

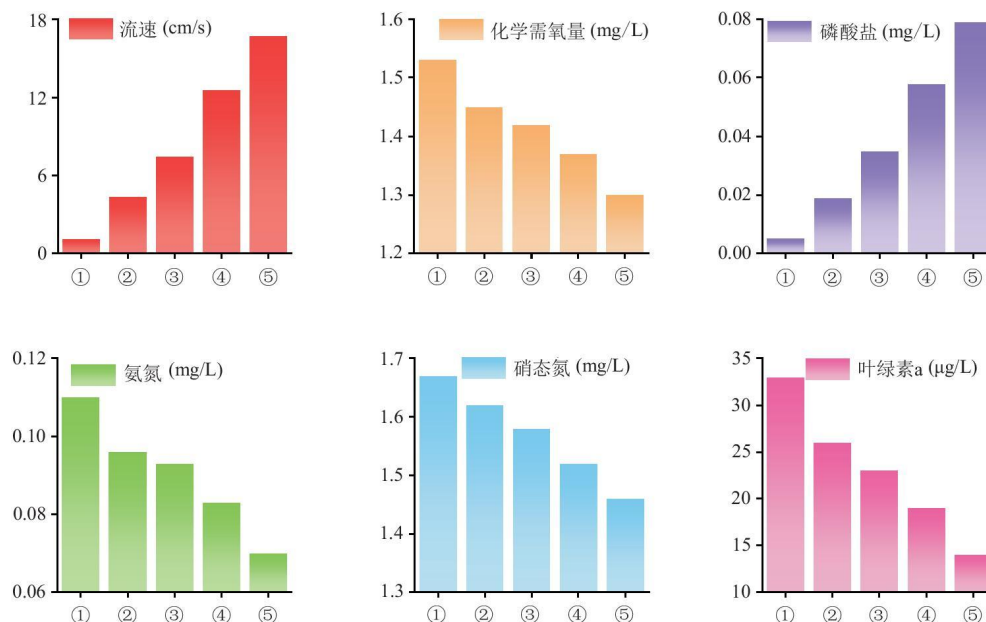


图7 香溪河上游流量变化下指标平均值

注：①~⑤:支流流量为 10、50、100、200、300 m<sup>3</sup>/s.

### 2.3 综合水文条件变化对支流的水质影响

在实际情况中, 香溪河的水文条件是复杂多变的, 因此设置由干流水位波动和支流上游流量组合的综合水文条件(表1)。由于叶绿素a常用来表征浮游植物生物量[14]、水质状况、富营养化和水华爆发阈值[15]等, 本节对综合水文条件下流速和叶绿素a的响应进行讨论, 并以10、30 μg/L 叶绿素a为阈值将香溪河划分为I~III级水华敏感区, 其中I级大于等于30 μg/L。

表 1 综合水文条件

| 工况 | 水位变幅<br>(m) | 上游流量<br>(m <sup>3</sup> /s) | 持续时间<br>(d) |
|----|-------------|-----------------------------|-------------|
| ①  | 0           | 10                          | 3           |
| ②  | 0           | 100                         |             |
| ③  | 0           | 300                         |             |
| ④  | 3           | 10                          |             |
| ⑤  | 3           | 100                         |             |
| ⑥  | 3           | 300                         |             |
| ⑦  | 7           | 10                          |             |
| ⑧  | 7           | 100                         |             |
| ⑨  | 7           | 300                         |             |

综合水文条件下香溪河流速与叶绿素 a 分布显示。干流水位变幅为 0,支流上游流量为 10 m<sup>3</sup>/s 时,香溪河水动力条件最差,此时流速大于 10 cm/s 的水域面积最小,主要分布于距兴山站 2 km 以内及上游河道较狭窄处,香溪河中下游至河口处水体流速均小于 10 cm/s;干流水位变幅为 7 m,支流上游流量为 300 m<sup>3</sup>/s 时,流速大于 10 cm/s 的水域面积最大,包含距河口 9.5 km 内河道边界及 9.5 km 以上水域。上游支流流量为 10 m<sup>3</sup>/s 时(①、④、⑦),叶绿素 a(>30 μg/L)分布水域最广,距河口 6.4~30.3 km 范



围内,干流水位变幅(0~7 m)引起的分布波动会在该范围 2.5 km 内;上游支流流量增加会加快叶绿素 a 向下游扩散并快速降解减少分布,干流水位变幅增加将叶绿素 a 向上游顶托(图 8)。

综合水文条件下流速和营养盐受干流水位幅度、支流上游流量双重影响。水位变幅为 0、3、7 m 时,将上游流量从 10 m<sup>3</sup>/s 增大到 300 m<sup>3</sup>/s,流速分别提高了 15.03、11.84、7.55 cm/s(图 10a);支流流量为 10 m<sup>3</sup>/s 时,随着水位变幅增加,香溪河整体平均流速由 1.08 cm/s 提高到 4.78 cm/s,支流流量为 100 m<sup>3</sup>/s 时,整体平均流速在 7.28 cm/s 左右,支流流量为 300 m<sup>3</sup>/s 时,整体平均流速逐渐降低,由 16.71 cm/s 降低为 12.33 cm/s(图 10 b)。干流水位变幅增大和上游支流流量增加都能够降低叶绿素 a 浓度(图 10 b、c),其中香溪河整体叶绿素 a 平均浓度最低的是工况③、⑥、⑨,平均浓度分别为 14、16、15 μg/L,3 种工况中上游支流流量均为 300 m<sup>3</sup>/s(图 9)。

基于综合水文条件下的叶绿素 a 浓度划分水华敏感区。各水文条件下叶绿素 a (>30 μg/L)分布于香溪河 6.5~24.7、3.8~9.5、0~2.4、8.9~25.5、5.8~12.5、0.8~4.3、12.7~30.5、8.8~17.1、3.8~6.6 km 水域内,模拟的初始水位和边界条件都来自香溪河汛期,此时为丰水期,兴山站上游来流量平均值在 72.15 m<sup>3</sup>/s,多年最大来流量为 742 m<sup>3</sup>/s[16],因此统计时不考虑上游极端枯水的工况(①、④、⑦),将其他 6 种工况水华爆发阶段水域范围取交集得到香溪河 I 级水华敏感区为距河口 0~17.1 km, II 级水华敏感区为距河口 17.1~20.5 km, III 级水华敏感区为距河口 20.5~35.3 km 河道(图 10)。

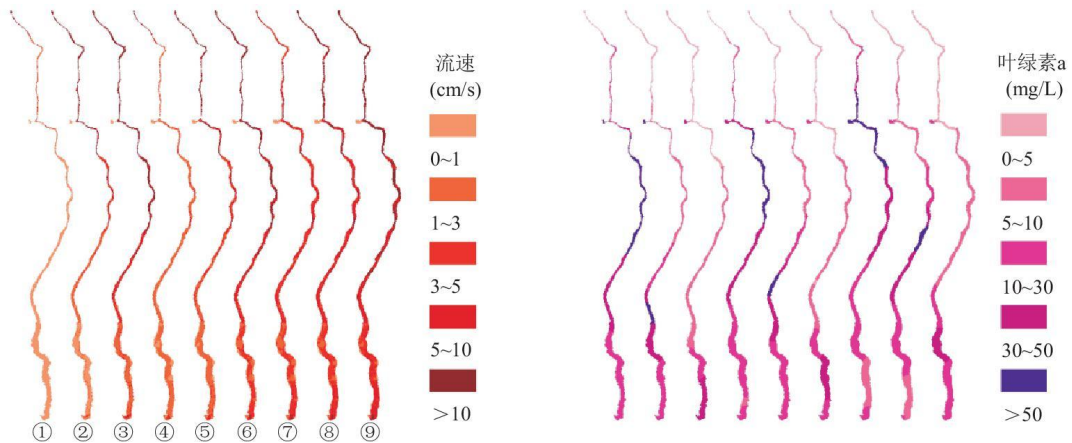


图 8 综合水文条件下香溪河指标分布

注: ①~⑨如表 1 所示.

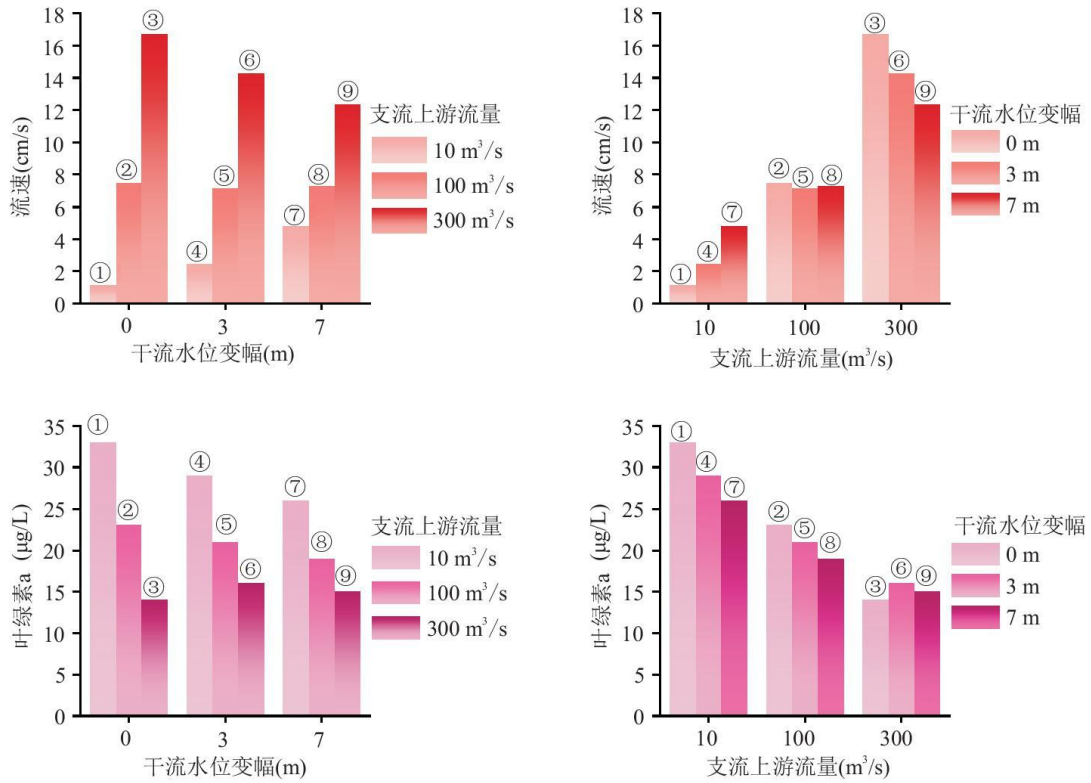


图9 综合水文条件下香溪河流速及叶绿素 a 平均值

注：①~⑨如表 1 所示.

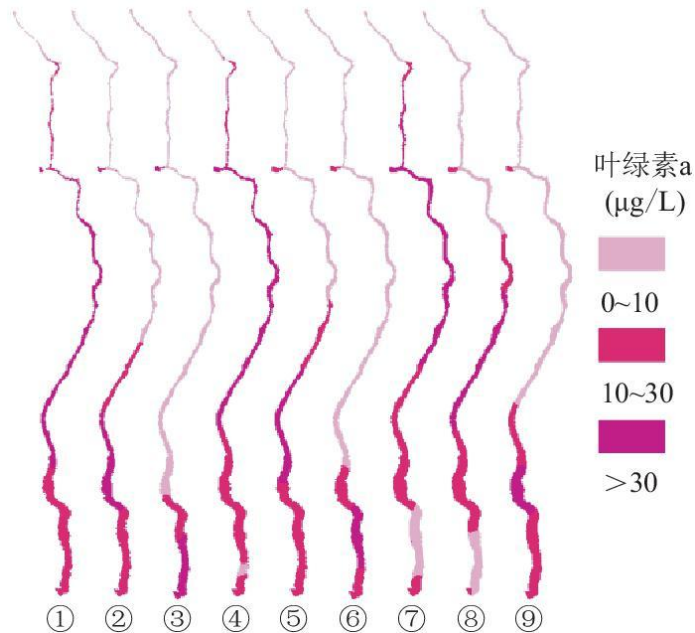


图 10 基于叶绿素 a 的水华敏感区

### 3 讨论

三峡库区蓄水后干支流水文条件显著改变[17],研究认为水动力条件变化是支流富营养化和水华的重要诱因[18]。香溪河水动力受干流水位变幅和支流上游流量影响明显[16],不同的水位变幅与上游来流量对支流库湾水动力的改善效果存在差异。模拟结果显示,增加香溪河上游流量可显著增大支流流速。辛小康等[19]认为通过增大支流流量调控支流流速效果较好,改变干流水位对河口处水体流速提升明显。徐国宾等[10]通过建立三峡水库水动力模型,发现库区水位变动影响范围在距香溪河口 20 km 以内。彭成荣等[5]通过分析洪水调度期间香溪河口和峡口处水动力特征,发现河口平均流速及其变动幅度均大于峡口。由于难以控制支流上游来流量,通过三峡水库调度改变干流水位的方式调控支流水文条件更为可行。目前已证实三峡库区不存在抑制水华的“临界流速”[20,21],流速减缓与水华爆发更多的体现在一种表观联系[3]。但毋庸置疑,改善支流水动力条件确实能在一定程度上对支流水华产生影响[10]。

本研究表明,水文条件变化能改变支流营养盐分布。营养盐分布很大程度上受干流倒灌[22]和上游径流[23]影响,模拟结果表明硝态氮、氨氮符合河口浓度高上游浓度低,磷酸盐上游浓度高河口浓度低[24],河道中段受水文影响波动较大等分布特征[25]。随着干流水位变幅增加(0~7 m),营养盐向香溪河上游迁移,分布范围均有所减小。香溪河上游磷酸盐浓度高,但在干流顶托下,高浓度磷的分布范围减小。香溪河上游流量增加,加快营养盐向河道下游迁移,除磷酸盐外,各营养盐分布范围均减小。

此外,水文条件变化改变营养盐浓度。模拟结果表明,库区干流水位变幅增加会降低香溪河 COD、磷酸盐、叶绿素 a 整体浓度,提高氨氮、硝态氮浓度,支流上游流量增加会提高香溪河磷酸盐整体浓度,降低 COD、氨氮、硝态氮、叶绿素 a 浓度。由此可见,两种水文条件变化均会降低叶绿素 a 浓度。基于模拟结果,通过增加香溪河上游流量改善营养物质分布、降低营养物质浓度、防控支流水华作用更强[21],但操作难度较大,而通过水库调度改变水位是一种较为可行的方式,三峡集团利用库区干流水位波动于 2022 年开展了两次生态调度试验[26],第一次试验区内藻类生物量降低约 83%,第二次研究区内叶绿素 a 浓度降低约 65%,两次试验防控水华效果显著。综上,利用库区干流水位波动进行生态调度来防控以香溪河为代表的支流水华发展具有更强的抑制效果和可行性。

支流水文条件变化改变了营养盐的分布和浓度,形成了不同水华敏感区。以往有研究者基于水华爆发时期的监测数据计算三峡库区富营养化敏感指数[27],采用水质指标建立太湖多准则蓝藻水华爆发风险评价体系[28]等,这些方法能够一定程度上反映特定时期的水华和富营养化敏感程度,但都未考虑水文条件对水质指标的影响,不能够全面的反映区域的水文和水质状况。本研究通过多种工况的模拟结果,以发生水华的实际区域划分敏感区,结果表明应重点关注香溪河距河口 0~17.1 km 范围。但由于水环境复杂多变,水文条件和水质水华的模拟存在误差,对于水华敏感区的划分还应做更深入的研究。

### 4 结论

(1)水库调度与支流流量变化影响支流水动力条件,改变营养盐分布和浓度。水位变幅增大 1 m,平均流速提高 0.22 cm/s;上游流量增加 100 m<sup>3</sup>/s,平均流速提高 0.5 cm/s。干流水位变幅增加会使营养盐向上游迁移,支流上游流量增加会加快营养盐向河口处迁移;两种水文条件改变均会降低河道中叶绿素 a 浓度,结合三峡库区干流和香溪河流域的水文特征,通过生态调度改善水质、抑制水华更具有可行性和显著效果。

(2)通过模拟 9 种综合水文条件下香溪河叶绿素 a 浓度分布,将距河口 0~17.1 km 水域划分为香溪河 I 级水华敏感区,在水华频发时期应加强对该河段的监测,防止发生严重水华。

#### 参考文献:

[1]姚金忠,范向军,杨霞,等.三峡库区重点支流水华现状、成因及防控对策[J].环境工程学报,2022,16(6): 2041-2048.

---

YAO J Z, FAN X J, YANG X, et al. Current situation, causes and control measures of water bloom in the key tributaries of the Three Gorges Reservoir [ J ] . Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022 , 16( 6 ) : 2041-2048.

[2]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[J].环境工程技术学报, 2022, 12(2) : 426-435.

ZENG Y H, SHEN X Z, ZHANG J L, et al. Effects of stratified density flow on the spatial distribution of chlorophyll-a in phytoplankton in Xiangxi River [ J ] . Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(2) : 426-435.

[3]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[J].水利学报, 2016, 47(3): 443-454.

LIU D F, YANG Z J, JI D B, et al. A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir [ J ] . Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47( 3 ) : 443-454.

[4]谭路,申恒伦,王 岚,等.三峡水库干流与香溪河库湾 水体营养状态及其对水文条件的响应[J].长江流域资源 与环境,2021, 30(6) : 1488-1499.

TAN L, SHEN H L, WANG L, et al. Trophic Status of the Mainstream of Three Gorges Reservoir and Xiangxi Bay and Its Response to Hydrological Conditions [ J ] . Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021 , 30(6) : 1488- 1499-

[5]彭成荣,陈 磊,毕永红,等.三峡水库洪水调度对香溪河 藻类群落结构的影响[J].中国环境科学, 2014, 34(7): 1863-1871.

PENG C R, CHEN L, BI Y H, et al. Effects of flood regulation on phytoplankton community structure in the Xiangxi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir [ J ] . China Environmental Science, 2014, 34(7) : 1863-1871.

[6]刘玉洁,尹真真.三峡水库支流回水区富营养化时空分布 特征[J].环境保护科学,2014, 40(2) : 30-34.

LIU Y J, YIN Z Z. Space - Time Distribution of Eutrophication in Backwater Zones of Branch Rivers in the Three Gorges Reser-voir [ J ] . Environmental Protection Science, 2014, 40 ( 2 ) : 30-34.

[7]邱光胜,胡 圣,叶 丹,等.三峡库区支流富营养化及水 华现状研究[J].长江流域资源与环境, 2011, 20(3):311-316.

QIU G S, HU S, YE D, et al. Investigation on the present situation of eutrophication and water bloom in the branches of three gorges reservoir [ J ] . Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(3) : 311-316.

[8]田 盼,王丽靖,宋林旭,等.三峡水库典型支流不同时期 的水质污染特征及其影响因素[J].环境科学学报, 2021, 41(6) : 2182-2191.

PAN T, LIJING W, LINXU S, et al. Water pollution characteristics and influencing factors of typical tributaries of Three Gorges Reservoir in different periods [ J ] . Acta Scientiae Circum-stantiae, 2021, 41(6) : 2182-2191.

[9]潘晓洁,黄一凡,郑志伟,等.三峡水库小江夏初水华暴发 特征及原因分析[J].长江流域资源与环境, 2015, 24 (11) : 1944-1952.

---

PAN X J, HUANG Y F, ZHENG Z W, et al. Characteristics of blooms outbreak characteristics and its cause analysis during early summer in Xiaojiang River of Three Gorges Reservoir[ J ]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24 (11) : 1944- 1952.

[10] 徐国宾, 王雅萍, 马超.三峡水库调峰运行下的香溪河水动力二维数值模拟[J].水资源与水工程学报, 2009, 20 (4) : 87-91.

XU G B, WANG Y P , MA C. 2 - Dimensional Hydrodynamic Numerical Simulation of Xiangxi River in Peak load Operation of Three Gorges Reservoir [ J ] . Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20( 4 ) : 87 -91 .

[11] 宋林旭, 刘德富, 肖尚斌, 等.基于 SWAT 模型的三峡库区 香溪河非点源氮磷负荷模拟[J].环境科学学报, 2013, 33(I): 267-275.

SONG L X, LIU D F, XIAO S B, et al. Study on non-point nitrogen and phosphorus load from Xiangxi River in the Three Gorges Reservoir area based on SWAT [ J ] . Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33( 1 ) : 267-275.

[12] 黄庆超, 石巍方, 刘广龙, 等.基于 Delft3D 的三峡水库不同工况下香溪河水动力水质模拟[J].水资源与水工程学报, 2017, 28(2) : 33-39.

HUANG Q C , SHI W F, LIU G L, et al. Modeling the hydrodynamics and water quality of Xiangxi River under different working conditions of Three Gorges Reservoir Based on Delft3D[J] . 2017, 28(02) : 33-39.

[13] 徐 慧, 龙良红, 纪道斌, 等.三峡水库泄水-蓄水过程香 溪河库湾水流振荡特性[J].水科学进展, 2022, 33(2): 264-273.

XU H, LONG L H, JI D B , et al. Study on characteristic of the flow oscillation in release and filling periods in the Xiangxi tributary of Three Gorges Reservoir [ J ] . Advances in Water Science, 2022, 33(2) : 264-273.

[ 14 ] LAWSON R, ANDERSON M A. Stratification and mixing in Lake Elsinore, California: An assessment of axial flow pumps for improving water quality in a shallow eutrophic lake[ J ] . Water Research, 2007, 41( 19) : 4457-4467.

[15] 张 远, 郑丙辉, 刘鸿亮.三峡水库蓄水后的浮游植物特 征变化及影响因素[ ] .长江流域资源与环境, 2006, 15 (2) : 254-258.

ZHANG Y, ZHENG B H, LIU H L. Characteristics of phytoplankton composition with analysis of its impact factors after impounding of The Gorges Reservoir [ J ] . Resources and Environment in the Yangtze Basin , 2006 , 15(2) : 254-258.

[16] 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(I): 101-112.

JI D B, LIU D F, YANG Z J, et al. Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir[ J ] . Scientia Sini-ca ( Physica, Mechanica & Astronomica ) , 2010, 40 ( 1 ) : 101-112.

[17] STRA § KRABA M , TUNDISI J. Reservoir water quality manage-ment[ M ] . International Lake Environment Committee , United Nations Environment Programme , 1999.

- 
- [18] 李锦秀, 廖文根.三峡库区富营养化主要诱发因子分析[J].科技导报, 2003, 21(9): 49-52.
- LI J X, LIAO W G. Analysis of main inducing factors of eutrophication in Three Gorges Reservoir area [ J ] . Science & Technology Review, 2003, 21(9) : 49-52.
- [19] 辛小康, 李恩, 杨霞, 等.干支流水库调度对三峡库区香溪河库湾垂线平均流速影响研究[J].三峡生态环境监测, 2019, 4(3): 18-24.
- XIN X K, LI E, YANG X , et al. Influence of reservoir regulation on vertically- averaged velocity in the Xiangxi tributary bays of the Three Gorges Reservoir [ J ] . Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2019, 4(3): 18-24.
- [20] 刘德富.三峡水库支流水华与生态调度[M]. China Water & Power Press, 2013.
- LIU D F . Three Gorges Reservoir branch flow bloom and ecological regulation[ M ] . 2013.
- [21] 王玲玲, 戴会超, 蔡庆华.香溪河生态调度方案的数值模拟[J].华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(4): 111-114.
- WANG L L, DAI H C, CAI Q H. Numerical simulation of the ecological operation schedule in Xiangxi river [ J ] . Journal of Huazhong University of Science and Technology ( Natural Science Edition) , 2009 , 37 ( 4 ) : 111 - 114.
- [ 22 ] YANG L, LIU D, HUANG Y, et al. Isotope analysis of the nutrient supply in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir[ J ] . Ecological Engineering, 2015 , 77 : 65-73.
- [23] 李凤清, 叶麟, 刘瑞秋, 等.三峡水库香溪河库湾主要营养盐的入库动态[J].生态学报, 2008, 28 ( 5): 2073-2079.
- LI F Q, YE L, LIU R Q, et al. Dynamics of the main nutrients input to Xiangxi Bay of Three Gorge Reservoir[ J ] . Acta Ecologica Sinica, 2008, 28( 5) : 2073-2079.
- [24] 胡征宇, 蔡庆华.三峡水库蓄水前后水生态系统动态的初步研究[J].水生生物学报, 2006, 30( 1): 1-6.
- HU Z Y, CAI Q H. Preliminary report on aquatic ecosystem dynamics of the Three Gorges Reservoir before and after impound-ment[ J ] . Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, 30( 1 ) : 1 -6.
- [25] 陈媛媛, 刘德富, 杨正健, 等.分层异重流对香溪河库湾主要营养盐补给作用分析[J].环境科学学报, 2013, 33 ( 3) : 762-770.
- CHEN Y Y, LIU D F, YANG Z J, et al. The impacts of the stratified density currents on supply pattern of main nutrients in Xiangxi River [ J ] . Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33 ( 3 ) : 762-770.
- [26] 曹光荣, 杨霞, 范向军, 等.金沙江下游三峡梯级水库生态环保工作实践[J].人民长江, 2022, 53(S2): 28-33.
- CAO G R, YANG X, FAN X J, et al. Ecological and environmental protection work practice of cascade reservoirs from Lower

---

Jinsha River to Three Gorges [ J ] . Yangtze River, 2022, 53 (S2) : 28-33.

[27] 郑丙辉, 张远, 富国, 等.三峡水库营养状态评价标准研究[J].环境科学学报,2006, 26(6) : 1022-1030.

ZHENG B H, ZHANG Y, FU G, et al. On the assessment standards for nutrition status in the Three Gorge Reservoir [ J ] . Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26 ( 6 ) : 1022- 1030.

[28] 刘聚涛, 高俊峰, 姜加虎, 等.基于突变理论的太湖蓝藻水华危险性分区评价[J].湖泊科学, 2010, 22(4) : 488-494.

LIU J T, GAO J F, JIANG J H, et al. Catastrophe theory based risk evaluation of blue-green algae bloom of different regions in LakeTaihu [ J ] . Journal of Lake Sciences, 2010 , 22 ( 4 ) : 488-494.