

## 三峡水库支流小江富营养化模型构建及在水量调度控藻中的应用\*

杨中华<sup>1</sup>, 杨水草<sup>1,2</sup>, 李 丹<sup>1</sup>, 白凤朋<sup>1</sup>

(1: 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

(2: 辽宁省水利水电勘测设计研究院, 沈阳 110006)

**摘 要:** 三峡水库蓄水以来, 支流小江呈富营养化加重的趋势, 且多次暴发春季水华。水库蓄水以后支流流速变缓, 水体滞留时间增加, 是引发支流水华的主要因素之一。基于 MIKE 软件, 建立小江调节坝下游至河口的二维水动力-富营养化模型, 考虑碳、氮、磷 3 种元素在浮游植物有机体、死亡腐屑和无机盐中的循环转化, 模拟小江河段的春季水华过程。分析小江生态调节坝的水量调节抑藻作用, 即人为制造“洪水脉冲”, 增加短时间内的水流流速, 对下游流场进行扰动以控制水华。计算结果表明, 增大泄水量对调节坝下游的小江河段的春季藻华总体上具有一定的抑制作用。小江上游河段调度作用效果明显, 下游高阳至入汇口河段调节作用较小, 上游调节坝水力调度可以作为三峡水库支流水华应急治理措施之一。营养盐控制应该是控制支流水华的根本措施。

**关键词:** 富营养化模型; 三峡水库; 小江; 生态调度; 水华

## Numerical simulation of eutrophication and its test of ecological operation schedule in Xiaojiang River, the tributary of Three Gorges Reservoir

YANG Zhonghua<sup>1</sup>, YANG Shuicao<sup>1,2</sup>, LI Dan<sup>1</sup> & BAI Fengpeng<sup>1</sup>

(1: State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R. China)

(2: Investigation and Design Institute of Water Resources and Hydropower Liaoning Province, Shenyang 110006, P.R.China)

**Abstract:** Xiaojiang River, the tributary of the Three Gorges Reservoir, has suffered from eutrophication since the impoundment in 2003. Previous study showed that the lower river velocity and longer residence time are the key factors which promote the phytoplankton spring bloom. A two dimensional hydraulic and eutrophication model was developed to investigate the hydraulic and eutrophication dynamics in Xiaojiang branch. The model describes cycling of three nutrients element, namely carbon, nitrogen and phosphorus, in phytoplankton, detritus and inorganic nutrient. The effect of the hydraulic regulating of the sub-reservoir on dominance of the spring bloom was examined numerically. Artificial flood-impulse from the sub-reservoir is arranged to promote the physical disturbance in downstream river. The model predicts that flushing with water from the sub-reservoir will suppress phytoplankton blooms to some extent when the flushing water quantity is sufficiently increased. The effective suppressing river reach is the upper reaches of Gaoyang. While in the reach below Gaoyang, there is no obvious response of the phytoplankton growth to the hydraulic regulating. The eco-operation of the upstream reservoir can be used as one of the emergency alternative management for controlling the algal bloom in Three Gorges Reservoir. In order to control algal blooms in the tributary, nutrient loading should be reduced significantly.

**Keywords:** Eutrophication dynamics model; Three Gorges Reservoir; Xiaojiang River; ecological regulation; algae bloom

水体的营养盐水平一直被认为是影响水体富营养化的主要因素, 光照、温度等因素在藻类生长过程中也非常重要。随着人们对富营养化问题研究的深入, 尤其是对于河流、水库等流动性水体, 水体动力特征越来越成为富营养化问题的重要因子之一。水流条件的变化对浮游植物生长的影响主要表现在: 改变营养盐

\* 国家自然科学基金项目(51079105, 51379157, 51439007)资助。2015-05-14 收稿; 2015-10-26 收修改稿。杨中华(1977~), 男, 博士, 教授; E-mail: yzh@whu.edu.cn.

在水体中的时空分布,从而改变藻类生长对营养盐的动态响应关系<sup>[1]</sup>;改变底泥向水体中的营养盐释放量,打破水体营养盐平衡<sup>[2-4]</sup>;影响水体内的悬移质和藻类的垂向运动,从而影响水体的透光性<sup>[5-6]</sup>;水力条件的改变导致浮游植物种群竞争关系的改变<sup>[7-8]</sup>;水体的流动性直接影响藻类初级生长速率<sup>[9-14]</sup>.

三峡水库蓄水以来,库湾支流频频暴发水华. 初步研究表明,水库蓄水以后,流速变缓,水体滞留时间增加,是引发支流水华的主要因素<sup>[15-17]</sup>,由此引发大量水体动力条件对水华影响的相关研究. 近年来,针对水库水华问题的生态调度被提出并用于实践<sup>[11,15,18-20]</sup>. 本文拟针对三峡小江支流的水华问题,开展水力调度控藻的研究,主要目的有2个:一是建立能够综合考虑三峡支流小江流域的水流、营养盐、气象条件等的富营养化模型,模拟小江流域的富营养化状态;二是采用数学模型进行生态调度数值实验,研究不同水力调节方案下的生态过程,探讨针对富营养化问题的生态调度的可行性.

小江是三峡库区中段、北岸流域面积最大的支流,河口距三峡大坝约247 km,2条主要支流南河和北河

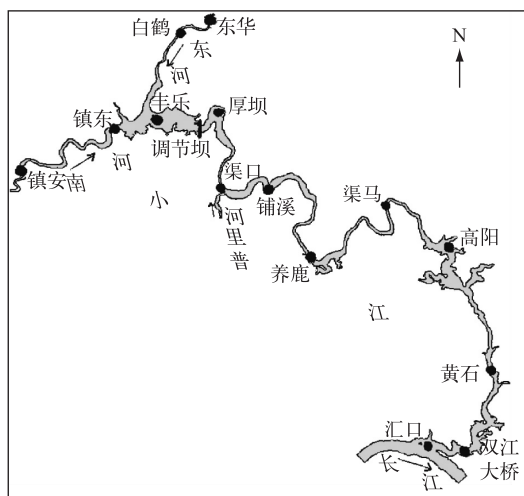


图1 研究区域示意图

Fig.1 Sketch of the study area

汇于开县. 三峡水库蓄水以后,在开县县城形成面积约45 km<sup>2</sup>、最大消落深度30 m的消落区,为了稳定消落区生态系统,在开县新城下游4.5 km处修建了一个专门的消落区调节坝. 小江调节坝采用水闸及溢流堰联合过水方式,水闸底板高156.5 m,溢流堰堰顶高程168.5 m. 调节坝建成以后,将小江流域分成2部分(图1):调节坝以上为调节坝库区,三峡水位在168.5 m以下时,调节坝闸门关闭挡水,坝上游的消落区形成汉丰湖;三峡水库水位在168.5 m以上时,调节坝闸门开启,汉丰湖水位受三峡大坝控制.

调节坝以下至入江口(双江镇)72 km河段属于三峡水库库湾,受到三峡水库水位和调节坝的共同作用. 根据已有水质监测结果<sup>[21-22]</sup>,该河段已有多处暴发水华,且春季水华呈现较高的重现率,该河段的春季水华作为研究的主要问题. 本文的研究时段为2008年1—4月,春季是三峡水库的持续降水时段,三峡水库的水位下降对于加大小江支流的水流流速,增加水体更新时间是有利的. 但是由于春季降雨量少,支流来水少,

且三峡水位下降速度缓慢,因此三峡水库的调节作用对于藻类影响很小,水华暴发仍然频繁.

## 1 模型框架

建立的富营养化模型包括水动力模块(MIKE 21)和生态模块(MIKE ECO)两部分,通过求解一系列的对流扩散方程模拟各水力要素和理化要素.

### 1.1 水动力模型

采用雷诺平均的N-S方程,根据Boussinesq假定和静水压强近似,得到二维浅水方程. 笛卡尔坐标系下的平面二维浅水方程的形式为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot U)}{\partial x} + \frac{\partial(h \cdot V)}{\partial y} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial(h \cdot U)}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot U^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h \cdot U \cdot V)}{\partial y} = f \cdot V \cdot h - g \cdot h \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{hx}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x} \left( 2h \cdot A \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \cdot A \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(h \cdot V)}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot U \cdot V)}{\partial x} + \frac{\partial(h \cdot V^2)}{\partial y} = f \cdot U \cdot h - g \cdot h \cdot \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{hy}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x} \left( h \cdot A \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2h \cdot A \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (3)$$

式中, $t$ 为时间, $U$ 、 $V$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向的水深平均速度, $q$ 为单位面积上水流的源汇强度, $\eta$ 为水面高程, $h$ 为水深, $d$ 是河底相对于基准面的深度, $h = \eta + d$ , $f$ 为柯氏力, $A$ 为水平涡粘度, $\rho_0$ 为水体密度.

其中  $\tau_{sx}$ 、 $\tau_{sy}$  分别为水面处  $x$ 、 $y$  方向的风应力:

$$\tau_{sx} = \rho_a \cdot C_D \cdot W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \tau_{sy} = \rho_a \cdot C_D \cdot W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (4)$$

式中,  $\rho_a$  为空气密度,  $C_D$  为无因次拖曳系数,  $W_x$ 、 $W_y$  为水面以上 10 m 处  $x$ 、 $y$  方向上的风速.

$\tau_{bx}$ 、 $\tau_{by}$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的床面应力,由曼宁公式的二维推广来确定:

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho_0} = \frac{g \cdot n^2 \cdot U \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}}, \frac{\tau_{by}}{\rho_0} = \frac{g \cdot n^2 \cdot V \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} \quad (5)$$

式中,  $n$  为河道曼宁阻力系数.

## 1.2 藻类生长动力学模型

富营养化模型主要考虑浮游藻类的生长和死亡、底泥营养盐的释放、光热和营养盐在垂向的传递和分层等过程,主要考虑碳(C)、氮(N)、磷(P)3种元素在浮游植物有机体、死亡腐屑和无机盐中的循环转化. 通过浮游植物碳(PC)、浮游植物氮(PN)、浮游植物磷(PP)、叶绿素 a(CH)、腐屑碳(DC)、腐屑氮(DN)、腐屑磷(DP)、总无机氮(IN)、无机磷(IP)、溶解氧(DO)共 10 个状态变量的物理化学变化来反映小江的生态动力学过程. 对于任一生态学变量随时间和空间的变化均可采用式(6)所示的对流扩散方程来描述.

$$\frac{\partial(h \cdot C)}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot U \cdot C)}{\partial x} + \frac{\partial(h \cdot V \cdot C)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( h \cdot D_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \cdot D_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right) + h \cdot F(C) + C_s \cdot q \quad (6)$$

式中,  $C$  为某一生态学变量的浓度,  $C_s$  为点源浓度,  $D_x$ 、 $D_y$  为  $x$ 、 $y$  方向上的扩散系数,  $hF(C)$  为生化反应项,代表各生态变量在水体中进行的物理、化学、生物作用过程以及各生态动力学过程中水质、水文气象、水动力因子之间的动态联系,对应以下公式(7)~(22).

1.2.1 浮游植物 浮游植物项主要考虑环境条件对浮游植物体内碳、氮、磷含量变化的影响,反映浮游植物外界环境对浮游植物生命周期的联系. 与浮游植物直接相关的状态变量为 PC、PN、PP 和 CH. 它们的生化反应项考虑浮游植物的生长、沉降和死亡 3 个过程. 浮游植物的生长考虑光照、温度、氮磷比和流速的影响,沉降和死亡过程中也考虑氮磷比的影响.

$$F(PC) = \mu - U_s/h \cdot F_2(N,P) \cdot PC - \mu_d \cdot F_2(N,P) \cdot PC \quad (7)$$

$$F(PN) = V_{kn} \cdot \frac{IN}{IN + K_{PN}} \cdot PC - U_s/h \cdot F_2(N,P) \cdot PN - \mu_d \cdot F_2(N,P) \cdot PN \quad (8)$$

$$F(PP) = V_{kp} \cdot \frac{IP}{IP + K_{PP}} \cdot PC - U_s/h \cdot F_2(N,P) \cdot PP - \mu_d \cdot F_2(N,P) \cdot PP \quad (9)$$

$$F(CH) = \frac{CH_{\min}}{IK} \cdot \exp\left(CH_{\max} \cdot \frac{PN/PC - PN_{\min}}{PN_{\max} - PN_{\min}}\right) \cdot \mu - U_s/h \cdot F_2(N,P) \cdot CH - \mu_d \cdot F_2(N,P) \cdot CH \quad (10)$$

式中,  $\mu$  为浮游植物生长率,受温度、光照和营养盐元素比的影响,其计算公式为:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot f(I) \cdot f(T) \cdot f_1(N,P) \cdot f(U) \cdot FAC \cdot RD \quad (11)$$

式中,  $\mu_{\max}$  为浮游植物最大生长率( $d^{-1}$ );  $f(I)$ 、 $f(T)$ 、 $f_1(N,P)$ 、 $f(U)$  分别为光照、温度、营养盐和流速的影响系数,  $FAC$  和  $RD$  分别为黑暗条件下生长校正系数和相对日长.  $U_s$  为浮游植物沉降速率( $m/d$ ),  $\mu_d$  为浮游植物在最佳营养状态下的死亡率.  $V_{kn}$ 、 $V_{kp}$  分别为浮游植物对 N、P 的吸收常数( $d^{-1}$ ),  $K_{PN}$ 、 $K_{PP}$  分别为浮游植物吸收 N、P 的半饱和常数( $mg/L$ ).  $CH_{\min}$  为最小叶绿素 a 产量的光强决定系数( $E/(m^2 \cdot d)$ );  $CH_{\max}$  为在营养盐充裕的情况下最大叶绿素产量的决定系数,  $PN_{\min}$  为浮游植物细胞内最小氮浓度( $gN/gC$ ).

采用光照、温度和氮磷比的影响函数公式分别为:

$$f(I) = \begin{cases} I/IK & I < IK \\ 1 & I \geq IK \end{cases}, IK = \alpha \theta_i^{(T-20)} \quad (12)$$

$$f(T) = \theta_g^{(T-20)} \quad (13)$$

$$f_1(N,P) = \min(IN/(IN + K_{PN}), IP/(IP + K_{PP})) \quad (14)$$

$$F_2(N,P) = 1/2 [PN_{\max}/(PN/PC) + PP_{\max}/(PP/PC)] \quad (15)$$

$$f(U) = 0.7^{6.6U} \quad (16)$$

式中,  $I$  为实际光强,  $IK$  为不同温度下的饱和光强 ( $E/(m^2 \cdot d)$ ),  $\alpha$  为  $20^\circ\text{C}$  下的饱和光强,  $T$  为温度 ( $^\circ\text{C}$ ),  $\theta_i$  为饱和光强的温度影响系数,  $\theta_g$  为藻类生长的温度影响系数,  $U$  为水流流速.  $PN_{\max}$ 、 $PP_{\max}$  分别为浮游植物细胞内最大 N、P 浓度 ( $\text{gN/gC}$ 、 $\text{gP/gC}$ ).

1.2.2 腐屑 腐屑是指浮游植物死亡后悬浮在水体中的部分, 是 C、N、P 在浮游植物、水体和底泥之间循环的重要载体. 腐屑可以认为是浮游植物从死亡到沉降到水底的中间过程, 它的减少主要由沉淀和分解矿化 2 个过程引起. 与浮游植物项类似, 将其分为腐屑碳 (DC)、腐屑氮 (DN)、腐屑磷 (DP) 3 个状态变量进行描述.

$$F(\text{DC}) = (1 - V_m) \cdot \mu_d \cdot F_2(\text{N}, \text{P}) \cdot PC - U_d/h \cdot DC - \mu_m \cdot \theta_D^{(T-20)} \cdot DO^2/(DO^2 + MDO) \cdot DC \quad (17)$$

$$F(\text{DN}) = (1 - V_m) \cdot \mu_d \cdot F_2(\text{N}, \text{P}) \cdot PN - U_d/h \cdot DN - \mu_m \cdot \theta_D^{(T-20)} \cdot DO^2/(DO^2 + MDO) \cdot DN \quad (18)$$

$$F(\text{DP}) = (1 - V_m) \cdot \mu_d \cdot F_2(\text{N}, \text{P}) \cdot PP - U_d/h \cdot DP - \mu_m \cdot \theta_D^{(T-20)} \cdot DO^2/(DO^2 + MDO) \cdot DP \quad (19)$$

式中,  $V_m$  为死亡浮游植物的瞬时矿化因数;  $U_d$  为腐屑的沉降速率 ( $\text{m/d}$ ), 腐屑的矿化率与温度和溶解氧的饱和度有关,  $\mu_m$  为  $20^\circ\text{C}$  时的最大矿化率 ( $\text{d}^{-1}$ ),  $\theta_D$  为碎屑矿化的温度系数,  $MDO$  为水中溶解氧半饱和浓度.

1.2.3 无机盐 水体中无机盐包括无机氮 (IN) 和无机磷 (IP), 无机氮的变化主要考虑浮游植物的吸收、腐屑的矿化、浮游植物的矿化以及底泥释放 4 个过程.

$$\begin{aligned} F(\text{IN}) = & \mu_m \cdot \theta_D^{(T-20)} \cdot DO^2/(DO^2 + MDO) \cdot DN + V_m \cdot \mu_d \cdot F_2(\text{N}, \text{P}) \cdot PN \\ & - K_{\text{SN}} \cdot \theta_M^{T-20} \cdot DO/(DO + MDO) \cdot (U_d/h \cdot DN + U_s/h \cdot F_2(\text{N}, \text{P}) \cdot PN) \\ & - V_{\text{kn}} \cdot \text{IN}/(\text{IN} + K_{\text{PN}}) \cdot PC \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} F(\text{IP}) = & \mu_m \cdot \theta_D^{(T-20)} \cdot DO^2/(DO^2 + MDO) \cdot DP + V_m \cdot \mu_d \cdot F_2(\text{N}, \text{P}) \cdot PP \\ & - K_{\text{SP}} \cdot \theta_M^{T-20} \cdot DO/(DO + MDO) \cdot (U_d/h \cdot DP + U_s/h \cdot F_2(\text{N}, \text{P}) \cdot PP) \\ & - V_{\text{kp}} \cdot \text{IP}/(\text{IP} + K_{\text{PP}}) \cdot PC \end{aligned} \quad (21)$$

式中,  $K_{\text{SN}}$ 、 $K_{\text{SP}}$  分别为  $20^\circ\text{C}$  时的 N、P 矿化的比例因数,  $\theta_M$  为底泥矿化的温度系数.

1.2.4 溶解氧 水体中溶解氧浓度随时间的变化主要与浮游植物产氧、矿化和呼吸过程耗氧、大气复氧相关. 具体关系表示为:

$$\begin{aligned} F(\text{DO}) = & V_o \cdot \mu - V_o \cdot \mu_m \cdot \theta_D^{(T-20)} \cdot DO^2/(DO^2 + MDO) \cdot DC \\ & - V_o \cdot K_{\text{MSC}} \cdot \theta_M^{T-20} \cdot DO/(DO + MDO) \cdot (U_s/h \cdot F_2(\text{N}, \text{P}) \cdot PC + U_d/h \cdot DC) \\ & - V_m \cdot V_o \cdot \mu_d \cdot F_2(\text{N}, \text{P}) \cdot PC + K_{\text{RA}} \cdot (C_s - DO) \end{aligned} \quad (22)$$

式中,  $V_o$  为浮游植物产氧过程中的氧碳质量之比 ( $\text{gO}_2/\text{gC}$ ),  $K_{\text{MSC}}$  为  $20^\circ\text{C}$  时氧化条件下的比例因数,  $K_{\text{RA}}$  为大气复氧系数 ( $\text{d}^{-1}$ ),  $C_s$  为溶解氧的饱和浓度 ( $\text{g/m}^3$ ).

### 1.3 数值计算方法

在空间上采用有限体积法对方程进行离散求解, 在水平方向采用非结构化网格, 垂向采用结构化网格. 计算变量储存在网格中心, 在计算出通过每个控制体边界沿法向输入 (出) 的流量和通量后, 对每个控制体分别进行水量、动量和物质质量平衡计算. 法向数值通量的计算采用近似黎曼解的 Roe 格式, 用网格中心估算边界值采用二阶线性重构, 采用 Van Leer 限制器以保证 TVD 性. 时间积分采用二阶 Runge Kutta 方法.

建模范围包括小江调节坝下游至入汇口的小江河段和部分长江干流河段, 水平方向上共划分了 53419 个计算网格, 网格尺度为 30 m. 水动力模型的计算时间步长为 10 s, 生态模块的计算时间步长为 120 s.

## 2 小江富营养化模型构建与率定

### 2.1 初始和边界条件

各变量在陆地边界法向的通量均认为是 0, 即在边界处  $\partial\Phi/\partial n = 0$ ,  $\Phi$  为任一变量. 浅水方程和对流扩散方程的开边界均按第一类边界给出, 即给定边界处具体的水位或者流量. 采用实测水文和水质资料作为模型进出口水位和流量边界条件. 同时还考虑了风生流和降雨条件的影响, 采用流域最近的万州站的气象资料 (图 2). 营养盐浓度边界采用实测水质资料. 模拟时段为 2008 年 1 月 23 日—4 月 30 日.

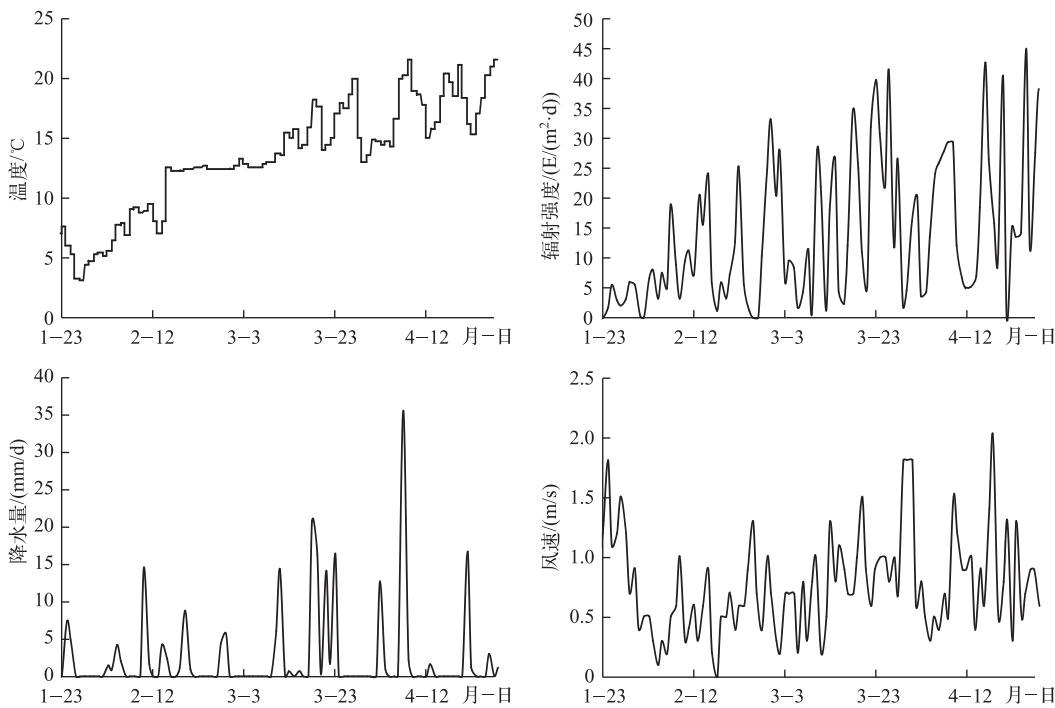


图 2 计算气象条件:水温、太阳辐射、降水量和风速

Fig.2 Weather conditions of calculation; water temperature, solar radiation, precipitation and wind speed

营养盐负荷包括点源和面源,其中主要城镇生活和工业污水排放视为点源,农业氮磷排放视为面源. 点源污染物主要有 COD、BOD、有机氮磷、无机氮磷、硫化物等,本文主要考虑可以被浮游植物直接吸收利用的无机氮(氨氮和硝态氮)和无机磷(主要考虑磷酸盐)的负荷. 点源流量为城镇生活污水和邻近工业污水的排放量之和,并假设点源以一个恒定的流量连续不断地进入周围水体. 小江面源污染主要来自回水区淹没耕地营养盐的释放<sup>[13]</sup>,其中淹没耕地释放的磷占小江总磷负荷的 40% 以上,甚至达 70% 以上,耕地释放负荷与回水长度和淹没土地面积密切相关. 三峡不同蓄水期间各类污染源对支流回水区的污染贡献不同,在小江春季水华暴发的时段为三峡水库消落期,以该时期 153.22 m 的平均水位计算耕地释放.

2.2 参数敏感性分析和模型率定

在富营养化模型参数中,按其性质可分成受水域环境影响较小和较大的模型参数两大类. 前者如温度影响系数、浮游植物吸收氮磷的半饱和浓度、饱和光强度等,这些参数对于不同的藻种存在较大差异,但同一藻类的这些参数受地域影响较小,可以借鉴已有研究成果确定. 后者如水体综合消光系数、大气复氧系数等参数受水域环境影响较大,在已有研究成果的基础上确定其取值范围,然后采用单纯形法对参数进行率定和优化,采用 2008 年春季的实测资料进行参数率定(表 1).

3 月份有 1 次持续时间较长的藻华过程,实测最大 Chl.a 浓度达到 60  $\mu\text{g/L}$ (渠马断面). 与实测资料对比,高阳和渠马段的 Chl.a 浓度与实测值比较接近,相对来说,黄石和双江站的峰值差别较大,原因可能是对下游段的营养盐输入存在偏差. 这点从 TP、TN 浓度的对比结果也能看出,黄石和双江河段的 TP、TN 浓度偏低,且变化幅度较小(图 3). 模拟结果总体上能够反映出计算河段的营养盐条件和浮游植物生产力水平.

3 水力调度

3.1 调度方案

小江调节坝是一座专门的生态调节坝,其主要目的是为了解决开县消落区的生态问题. 调节坝建成以



表 1 模型参数率定结果  
Tab.1 Calibration results of model parameters

参数描述(单位)	参数	取值	参数	单位	取值
藻类最大生长速率/ $\text{d}^{-1}$	$\mu_{\max}$	1.2	浮游植物沉降速率/ $(\text{m}/\text{d})$	$U_s$	0.5
藻类的死亡速率/ $\text{d}^{-1}$	$\mu_d$	0.032	藻类吸收氮的半饱和常数/ $(\text{g}/\text{m}^3)$	$K_{\text{PN}}$	0.03
藻类吸收磷的半饱和常数/ $(\text{g}/\text{m}^3)$	$K_{\text{PP}}$	0.026	最小叶绿素产量的光强决定系数/ $(\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}))$	$CH_{\min}$	0.06
最大叶绿素产量的光强决定系数/ $(\text{E}/\text{m}^2/\text{d})$	$CH_{\max}$	1.9	20℃下的饱和光强/ $(\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$	$\alpha$	23
饱和光照的温度影响系数	$\theta_i$	1.04	藻类生长的温度影响系数	$\theta_g$	1.05
浮游植物细胞内最小氮浓度/ $(\text{gN}/\text{gC})$	$PN_{\min}$	0.07	浮游植物细胞内最大氮浓度/ $(\text{gN}/\text{gC})$	$PN_{\max}$	0.17
浮游植物细胞内最小磷浓度/ $(\text{gP}/\text{gC})$	$PP_{\min}$	0.002	浮游植物细胞内最大磷浓度/ $(\text{gN}/\text{gC})$	$PP_{\max}$	0.03
死亡浮游植物的瞬时矿化因数	$V_m$	0.1	腐屑的沉降速率/ $(\text{m}/\text{d})$	$U_d$	0.1
20℃时的最大矿化率/ $\text{d}^{-1}$	$\mu_m$	0.05	碎屑矿化的温度系数	$\theta_D$	1.14
水中溶解氧的半饱和浓度/ $(\text{mg}/\text{L})$	$MDO$	2	20℃时的 $N$ 、 $P$ 矿化的比例因数	$K_{\text{SN}}、K_{\text{SP}}$	1
底泥矿化的温度系数	$\theta_M$	1.1	浮游植物产氧过程中的氧碳质量之比/ $(\text{gO}_2/\text{gC})$	$V_O$	3.5
20℃时氧化条件下的比例因数	$K_{\text{MSC}}$	1	大气复氧系数/ $\text{d}^{-1}$	$K_{\text{RA}}$	1.5

后,形成总库容为  $5591 \times 10^4 \text{ m}^3$  的汉丰湖水库. 因此可以考虑利用调节坝的调节作用,集中下泄一定的水量,增加下游河道流动性<sup>[11]</sup>. 采用水力调度控藻的作用主要体现在 2 个方面:一是通过集中加大泄量将藻类冲释并带向下游. 二是通过加大下泄流量增加下游河道流速,对下游的流场进行扰动,创造不利于藻类生长的流动环境,降低藻类初级生长率,抑制藻类生长. 本研究采用率定的水动力和藻类生长动力模型,针对小江春季水华进行水量调节计算,对比分析抑藻效果.

根据小江河段水流动力特征以及调节坝可调节性分析<sup>[23]</sup>,初步设计 3 组水力调度条件进行对比:(1)调度方案 1:调节坝上游水位下降 1 m,最大泄水流量为  $600 \text{ m}^3/\text{s}$ ,泄水历时 3.5 h,总下泄水量为  $741 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;(2)调度方案 2:调节坝上游水位下降 2 m,最大泄水流量为  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ ,泄水历时 4.5 h,总下泄水量为  $1791 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;(3)调度方案 3:调节坝上游水位下降 3 m,泄水流量为  $2450 \text{ m}^3/\text{s}$ ,泄水历时 3.0 h,总下泄水量为  $2691 \times 10^4 \text{ m}^3$ . 3 个方案均采用多次调度的方式,库水位恢复后再次集中下泄. 相当于形成一种洪水脉冲,对下游流场进行不定期的扰动. 下泄频率根据水位恢复情况确定,调节后的流量变化见图 4.

由于在 4 月中旬发生了 1 场洪水过程,为便于分析该洪水过程对于藻华的影响,调度时段控制在该洪水过程结束之后. 下泄流量过程如图 4 所示. 计算边界条件中仅来流量进行调整,其他边界条件均与未调节情况下一致.

3.2 调度结果

以养鹿、渠马、高阳、黄石和双江大桥 5 个典型断面上 Chl.a 浓度变化过程来分析调度效果,可以看出:

1) 未实施调节方案情况下,在模拟时段内有明显的藻类增殖过程,且整个河段均有发生. 高阳以上河段的 Chl.a 浓度变化幅度较大,出现多次 Chl.a 浓度峰值. 在 2—4 月,养鹿断面 Chl.a 浓度最大为  $85 \text{ }\mu\text{g}/\text{L}$ ,最小为  $15 \text{ }\mu\text{g}/\text{L}$ ;渠马断面同期 Chl.a 浓度最大为  $82 \text{ }\mu\text{g}/\text{L}$ ,最小 Chl.a 浓度为  $22 \text{ }\mu\text{g}/\text{L}$ ;高阳以下河段 2—4 月期间的 Chl.a 浓度也呈现增高趋势,变化趋势相对较为单一,基本上在 2 月中下旬达到浓度峰值,然后保持一个缓慢持续增长的趋势,在 4 月中旬达到峰值,4 月份洪水以后,浓度迅速下降.

2) 4 月中旬洪水发生以后,全河段的 Chl.a 浓度普遍下降. 据统计,4 月洪水过程历时 2 d,洪峰流量为  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,2 d 累计水量为  $11650 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,相当于小江调节坝正常蓄水位 168.5 m 对应库容的 2 倍. 水量足够把调节坝下游河段藻类直接冲释到长江干流,控藻效果明显. 而人造洪峰过程则无法达到这么大的水量,也就达不到这种抑藻效果.

3) 调节方案实施以后,各个方案作用下的整体趋势变化表现在:高阳以上河段总体藻类生物量有下降趋势,高阳以下河段生物量变化不明显,且部分时段有所增加. 主要原因是由于下泄水量有限,河段较长,且

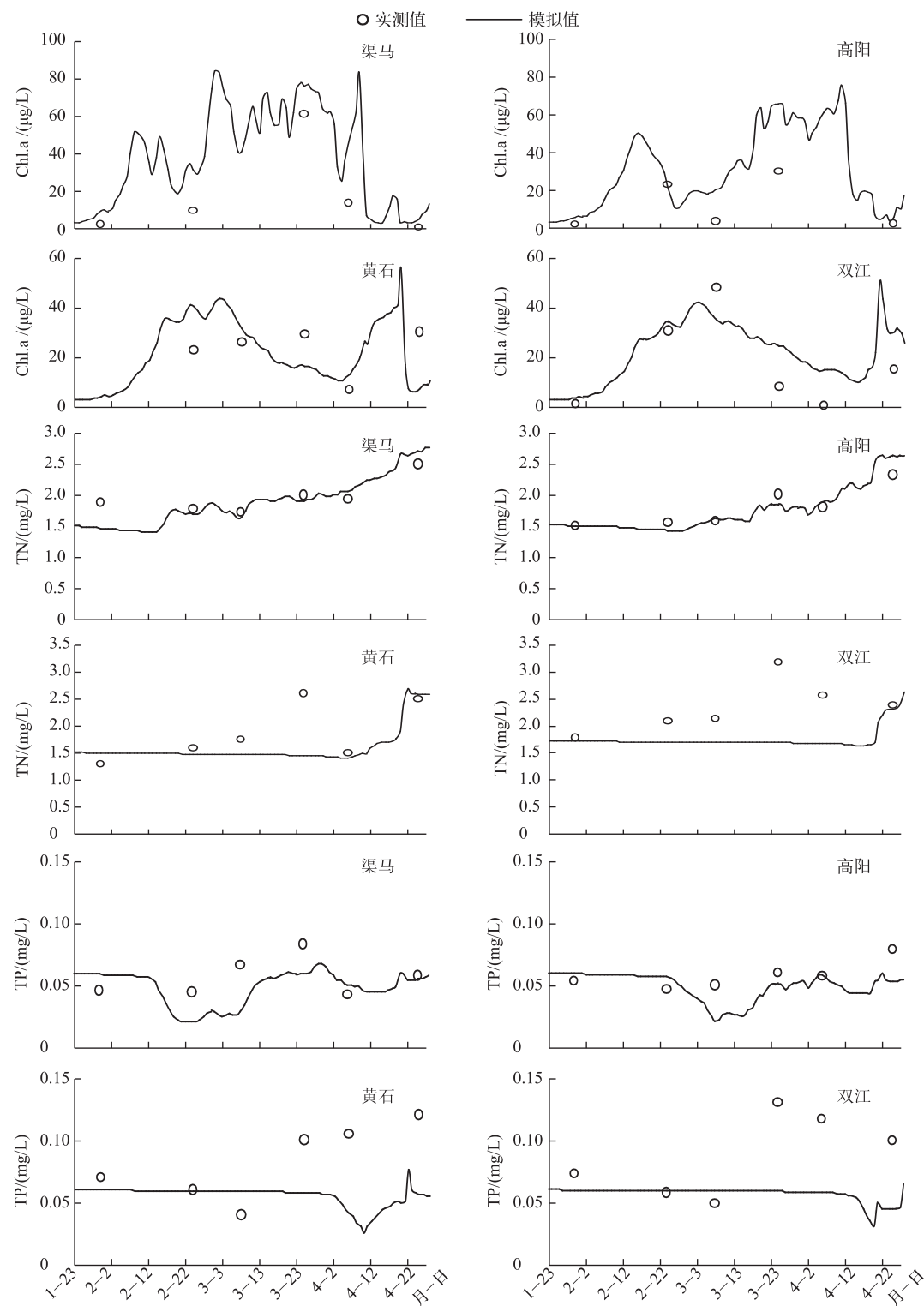


图 3 叶绿素 a、TN 和 TP 浓度验证结果

Fig.3 Verification of chlorophyll-a, total nitrogen and total phosphorous concentrations

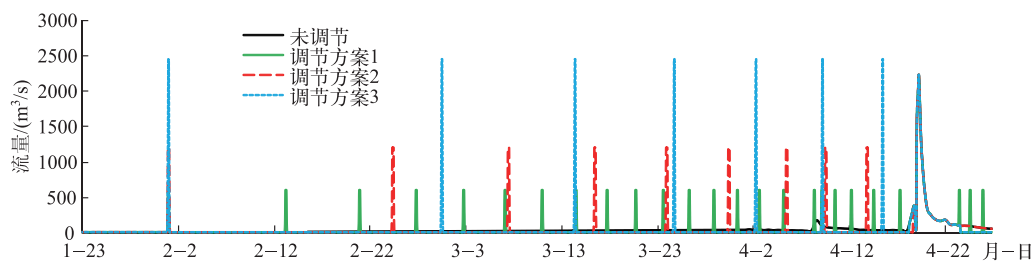


图4 小江调节坝泄水量方案

Fig.4 Discharge schemes of Xiaojiang River dam

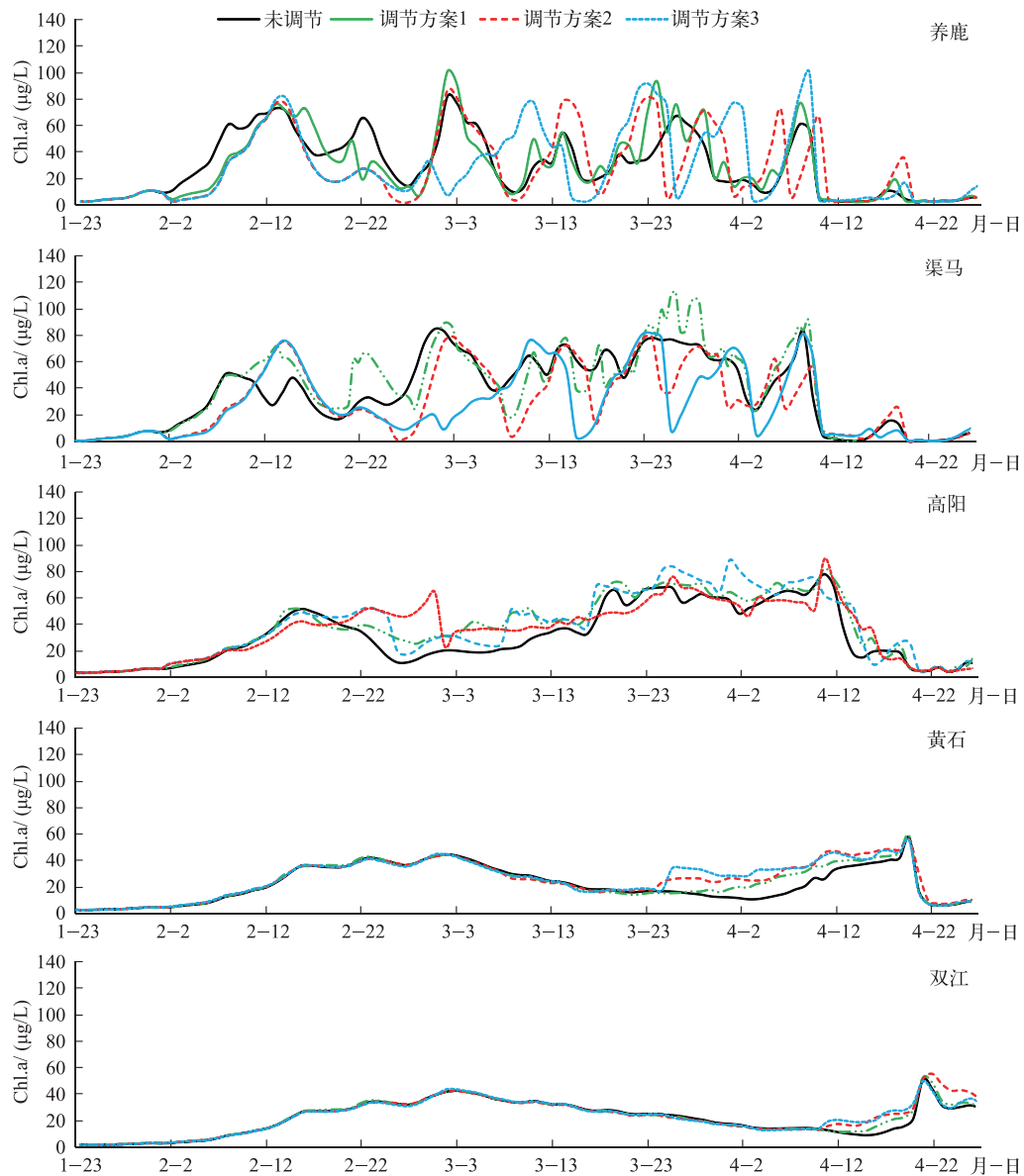


图5 不同泄水方案下的叶绿素 a 浓度变化

Fig.5 Changes of chlorophyll-a concentrations with different discharge schemes



高阳以下河段的水深较大,下泄水量在该河段的影响很微弱,因此高阳以下河段的 Chl.a 浓度变化不大。

4)以养鹿和渠马2个断面为代表统计各个方案下藻类生物量的变化规律,在2008年2—4月,养鹿断面上3个方案藻类总体生物量分别变化了-0.8%、-4.4%、-3.7%,渠马断面上5个方案藻类总体生物量分别变化了+7.1%、-16.6%、-22.6%。相对来说水下泄水量越大,控藻效果相对越明显。

5)从养鹿和渠马2个断面的 Chl.a 浓度变化来看,每次下泄均带来 Chl.a 浓度的下降,最低 Chl.a 浓度要低于未调节的情况,但是调节过后藻类继续增殖,最大 Chl.a 浓度与未调节情况下基本相同,也有部分时段出现 Chl.a 浓度增加的情况。

6)从敏感时段上来看,2月控藻效果不明显,抑藻效果明显的时段为3月,以方案3(库水位下降3m)效果最为明显,渠马段的月平均生物量降低32%。

整体来看,采用集中下泄方式对于藻类生物量的下降有一定调节作用,主要体现在时段平均的藻类总生物量有所减少。在集中下泄的最初时段内释放的大量清水对下游水华的稀释作用明显,藻类密度有明显下降。由于下游的部分河段的流速增加,藻类生物量的增长速度有所减缓。但是也有部分河段存在藻类生物量增加的情况,应该是由于下泄带来更多的营养物质或藻类种群,在水流减缓以后重新聚集生长。因此调度时段和时间间隔的选取对于控制下游藻华十分关键。

#### 4 结论

小江调节坝建成以后,支流水体动力变得复杂,受三峡回水影响很大。当三峡水库低水位运行时,调节坝下游河段既有部分河段表现出河流特征,也有部分河段表现出湖库特征。

通过对比分析表明,本研究建立的模型能够较好地模拟出小江调节下游河段的藻类增殖过程,较准确地反映出该河段的水体动力和环境要素指标。从设计的控藻调度方案模拟结果来看,对于小江河段的春季藻华总体上具有一定的控制抑藻效果,但作用程度有限。调节作用主要体现在时段平均的藻类总生物量有所减少。受调节坝水量调节作用明显的河段为调节坝至高阳河段,其中渠马河段的效果相对较好。高阳以下河段受三峡水库回水影响,水量调节带来的水体动力特征变化微弱,控藻效果不明显。

小江调节坝形成的水库可调节水量有限,综合考虑抑藻效果以及水量调节对坝上游消落区的影响,建议可以针对下游水华制定相应的应急调度方案,发挥小江调节坝的生态调度作用。水体的动力减弱是大型水库建成以后的必然趋势,对于由此引起的水体富营养化问题,仍然应当以营养盐输入控制为主。

#### 5 参考文献

- [1] Kelly VJ. Influence of reservoirs on solute transport: a regional-scale approach. *Hydrological Processes*, 2001, **15**: 1227-1249.
- [2] Patel D, Gugesarajah K, Thake B. Modelling diatom growth in turbulent waters. *Water Research*, 2004, **38**: 2713-2725.
- [3] Deng Chunguang ed. Study on eutrophication in Three Gorges Reservoir. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2007: 18 (in Chinese). [邓春光. 三峡库区富营养化研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 18.]
- [4] Zhang H, Huang GH, Wang DL et al. An integrated multi-level watershed-reservoir modeling system for examining hydrological and biogeochemical processes in small prairie watersheds. *Water Research*, 2012, **46**: 1207-1224.
- [5] Wang Lingling, Dai Huichao, Cai Qinghua. Simulation of eutrophication in branch of channel-type reservoirs. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2009, **41**(2): 18-23 (in Chinese with English abstract). [王玲玲, 戴会超, 蔡庆华. 河道型水库支流库湾富营养化数值模拟研究. 四川大学学报: 工程版, 2009, **41**(2): 18-23.]
- [6] Huisman J, Sommeijer B. Population dynamics of sinking phytoplankton in light-limited environments: simulation techniques and critical parameters. *Journal of Sea Research*, 2002, **48**: 83-96.
- [7] Lewis DM, Elliott JA, Lambert MF et al. The simulation of an Australian reservoir using a phytoplankton community model: PROTECH. *Ecological Modelling*, 2002, **150**: 107-116.
- [8] Huisman J, Sharples J, Stroom JM et al. Changes in turbulent mixing shift competition for light between phytoplankton species. *Ecology*, 2004, **85**(11): 2960-2970.

- [ 9 ] Berman T, Shteinman B. Phytoplankton development and turbulent mixing in Lake Kinneret (1992 – 1996). *Journal of Plankton Research*, 1998, **20**(4): 709-726.
- [ 10 ] Wang Hua, Pang Yong. Numerical simulation on hydrodynamic character for algae growth. *Environmental Science*, 2008, **29**(4): 884-889 (in Chinese with English abstract). [王华, 逢勇. 藻类生长的水动力学因素影响与数值仿真. 环境科学, 2008, **29**(4): 884-889.]
- [ 11 ] Wang Lingling, Dai Huichao, Cai Qinghua. Numerical simulation of the ecological operation schedule in Xiangxi River. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2009, **37**(4): 111-114 (in Chinese with English abstract). [王玲玲, 戴会超, 蔡庆华. 香溪河生态调度方案的数值模拟. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2009, **37**(4): 111-114.]
- [ 12 ] Wu L, Long TY, Cooper WJ. Temporal and spatial simulation of adsorbed nitrogen and phosphorus nonpoint source pollution load in Xiaojiang watershed of Three Gorges Reservoir area, China. *Environmental Engineering Science*, 2012, **29**(4): 238-247.
- [ 13 ] Wu L, Long TY, Li CM. The simulation research of dissolved nitrogen and phosphorus non-point source pollution in Xiaojiang watershed of Three Gorges Reservoir area. *Water Science & Technology*, 2010, **61**(6): 1601-1616.
- [ 14 ] Long TY, Wu L, Meng GH *et al.* Numerical simulation for impacts of hydrodynamic conditions on algae growth in Chongqing Section of Jialing River, China. *Ecological Modelling*, 2011, **222**: 112-119.
- [ 15 ] Li Jinxiu, Yu Xuezhong, Xing Zhiguo. Eutrophication model for the branch of Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2005, **16**(6): 777-783 (in Chinese with English abstract). [李锦秀, 禹雪中, 幸治国. 三峡库区支流富营养化模型开发研究. 水科学进展, 2005, **16**(6): 777-783.]
- [ 16 ] Li Z, Wang S, Guo JS *et al.* Responses of phytoplankton diversity to physical disturbance under manual operation in a large reservoir, China. *Hydrobiologia*, 2012, **684**: 45-56.
- [ 17 ] Pringle C. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important. *Hydrological Processes*, 2003, **17**(13): 2685-2689.
- [ 18 ] Zhang JJ, Jørgensen SE, Mahler H. Examination of structurally dynamic eutrophication model. *Ecological Modelling*, 2004, **173**: 313-333.
- [ 19 ] Magilligan FJ, Nislow KH. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, 2005, **71**: 61-78.
- [ 20 ] Verspagen JMH, Passarge J, JoHnk KD *et al.* Water management strategies against toxic *Microcystis* blooms in the dutch delta. *Ecological Applications*, 2006, **16**(1): 313-327.
- [ 21 ] Li Zhe, Fang Fang, Guo Jingsong *et al.* Spring algal bloom and nutrients characteristics in Xiaojiang River backwater area, Three Gorge Reservoir, 2007. *J Lake Sci*, 2009, **21**(1): 36-44 (in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2009.0105. [李哲, 方芳, 郭劲松等. 三峡小江回水区段 2007 年春季水华与营养盐特征. 湖泊科学, 2009, **21**(1): 36-44.]
- [ 22 ] Guo Jinsong, Chen Jie, Li Zhe *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 (in Chinese with English abstract). [郭劲松, 陈杰, 李哲等. 156 m 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.]
- [ 23 ] Yang ZH, Yang SC. Ecological operation scheme of the Xiao-jiang Reservoir. Proceedings 2011 International Conference on Business Management and Electronic Information, 2011, 4: 832-835.