

水动力条件对嘉陵江重庆主城段藻类生长影响的数值模拟

龙天渝, 蒙国湖, 吴磊, 张翔, 郭蔚华

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:为研究水动力条件对嘉陵江重庆主城段藻类生长繁殖和富营养化的影响,通过对现有藻类生长率计算式中的流速影响函数进行改进,引入表征藻类生长最佳流速与流速范围的参数,构建了二维非稳态藻类生长动力学模型,并用实测数据以及现有的实验成果对其参数进行率定与优化.针对三峡水库水华高发时段的气候条件和研究河段现有的营养盐状况,就不同水位下的叶绿素 a 浓度的时空分布进行数值仿真、对可能发生水华的位置和范围进行分析和预测.结果表明,对于嘉陵江重庆主城段,流速在 $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右最有利于藻类的生长繁殖.

关键词:嘉陵江;水动力;藻类;模拟;富营养化

中图分类号:X173 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)07-1498-06

Numerical Simulation for Effects of Hydrodynamic Condition on Algae Growth in Chongqing Reaches of Jialing River

LONG Tian-yu, MENG Guo-hu, WU Lei, ZHANG Xiang, GUO Wei-hua

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Area Ecological Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: By introducing two parameters which express the optimal velocity and the velocity range for alga growth, a new velocity factor was put forward for the formula of alga growth. The 2-D unsteady ecological dynamic model for algae growth was established to analyze the effects of hydrodynamic condition on algae growth in Chongqing reaches of Jialing River. The space-time distribution of concentration for Chl-a was simulated numerically for various water levels under climate condition in the period of high frequency for water blooms in Three Gorges Reservoir and nutrition condition at present. The corresponding location and area of water blooms were forecasted. The results stated that about $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ was the optimal velocity for algae growth.

Key words: Jialing River; hydrodynamic; algae; simulation; eutrophication

三峡水库蓄水后,库区河流水动力情势发生了根本性的改变,次级河流受干流水位顶托的影响,回水段流速变缓,水体的自净能力下降,为富营养化的发生与发展提供了有利条件,次级河流回水段出现藻类异常增殖的水华现象不断发生,并呈现加重的趋势.嘉陵江是库区最大的次级河流,嘉陵江重庆主城段是长江的入口段,其富营养化状况直接关系到重庆市乃至三峡库区的水环境安全,因此,开展对嘉陵江重庆主城段藻类生长状况以及富营养化问题的研究具有重要的意义.

研究表明,藻类生长繁殖主要与气候条件、水体中的营养盐浓度以及水动力条件等因素有关,嘉陵江重庆主城段营养盐浓度近年来基本处于较高水平,在气候适宜时,水动力条件成为影响藻类生长繁殖的重要因素.目前有关水动力条件对湖泊和河道型水库藻类生长繁殖影响的研究较多,但主要集中在局部断面的现场测试和模型试验^[1~13],而对整个

区域,特别是针对具有特殊水文情势的三峡库区次级河流藻类生长繁殖的时空分布的数值模拟研究尚不多见^[14~16].为分析研究水动力条件对嘉陵江重庆主城段藻类生长繁殖的影响,笔者构建了二维非稳态藻类生长动力学模型,在该模型中,依据现有的研究成果,对藻类生长率的计算式进行了改进,提出了新的流速影响函数.新的流速影响函数包含2个有明确物理意义的参数,分别表征对藻类生长最佳的流速和有利于藻类生长的流速范围.利用实测的水质数据以及现有的实验成果,对模型参数进行优化与率定、并对模型进行了验证.采用数值仿真方法,按目前该河段的总磷和总氮浓度,在气候条件适宜、

收稿日期:2009-09-21;修订日期:2010-01-26

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07104-002);中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-07);国家大学生创新性实验项目(CQUCX-G-2007-26)

作者简介:龙天渝(1960~),女,博士,教授,主要研究方向为环境模拟与污染控制,E-mail:longty128@yahoo.com.cn

库区次级河流水华的高发时段的春季,对不同上下游水位条件下的叶绿素 a 浓度的时空分布进行了数值预测,旨在为嘉陵江重庆主城段水环境的保护提供科学依据.相关研究成果也可三峡库区次级河流富营养化问题的研究提供参考.

1 藻类生长动力学模型

1.1 控制方程

应用水深平均的二维浅水方程,浅水流动与物质输移扩散方程为^[17]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(hu_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hu_i)}{\partial t} + \frac{\partial(hu_i u_j)}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -gh \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$-\rho C_f u_i \sqrt{u_j \cdot u_j} + \rho_a C_D \omega_{ai} \sqrt{\omega_{aj} \cdot \omega_{aj}} + F_{Ci} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hc_\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(hc_\varphi u_j)}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(hD_l \frac{\partial c_\varphi}{\partial x_j} \right) = Q_\varphi \quad (3)$$

式中,下标 $i=1,2$;下标 j 为求和指标,表示从 1 到 2 求和.

在方程组(1)~(3)中, ζ 为水位(m), h 为水深(m); u_i 为*i*方向的水深平均流速($m \cdot s^{-1}$); c_φ 为物质 φ 的浓度($mg \cdot L^{-1}$); ν_t 为紊动黏度($m^2 \cdot s^{-1}$); g 为重力加速度($m \cdot s^{-2}$); ρ 为水的密度($kg \cdot m^{-3}$); C_f 为河底无因次摩擦阻系数; ρ_a 为空气密度($kg \cdot m^{-3}$); C_D 为无因次风应力系数; ω_{ai} 为水面以上 10 m 处 *i* 方向的风速($m \cdot s^{-1}$); F_{Ci} 为*i*方向的科氏力, f 为 Coriolis 系数; D_l 为紊动扩散系数($m^2 \cdot s^{-1}$), Q_φ 为源汇项 [$m \cdot mg \cdot (L \cdot s)^{-1}$],包括生化反应项和岸边输入的点源项.

对于紊动黏度 ν_t ,采用 Smagorinsky 亚格子公式计算:

$$\nu_t = L^2 \left[\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中, L 为混合长度,取 $L = c_s \Delta x, c_s = 0.5$ ^[11].

河底摩擦阻系数 C_f 采用曼宁公式:

$$C_f = gn^2 h^{-1/3} \quad (5)$$

式中, n 为曼宁系数,对于研究河段,取 $n = 0.0348$ ^[11].

风应力系数 C_D 采用 Smith 和 Banke 的公式:

$$C_D = \begin{cases} f_0 & \omega_a = 0 \\ f_0 + \frac{\omega_a}{\omega_{a1}}(f_1 - f_0) & 0 < \omega_a \leq \omega_{a1} \\ f_1 & \omega_a > \omega_{a1} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $f_0 = 0.00063, f_1 = 0.002, \omega_{a1} = 30 m \cdot s^{-1}$.

Coriolis 系数 $f = 2\Omega \sin \varphi, \varphi$ 为纬度, Ω 为地球自转角速度, $\Omega = 0.12717 \times 10^{-5} (^\circ)/s$.

紊动扩散系数 D_l 采用^[11]:

$$D_l = 0.63hu_*$$

式中, u_* 为动力速度, $u_* = \sqrt{hgS}, S$ 为河底坡降.

1.2 物质输移扩散方程中的源汇项

本研究涉及到的输移扩散物质为总磷(TP)、总氮(TN)和叶绿素 a(Chl-a).

对于总磷,方程(3)中的 $c_\varphi = c_{TP}$,源汇项 Q_φ 主要包括藻类生长时的吸收与死亡时的释放、在水体中的沉降和点源输入等,可表示为:

$$Q_\varphi = Q_{TP} = -K_{TP}hc_{TP} + Q_s^{i,j}c_{TP}^{i,j} \quad (7)$$

式中, K_{TP} 为 TP 衰减系数; $Q_s^{i,j}$ 为(*i,j*)处点源单位面积上的流量; $c_{TP}^{i,j}$ 为点源处的 TP 浓度.

对于总氮,方程(3)中的 $c_\varphi = c_{TN}$,源汇项 Q_φ 包含的内容与总磷相同,可表示为:

$$Q_\varphi = Q_{TN} = -K_{TN}hc_{TN} + Q_s^{i,j}c_{TN}^{i,j} \quad (8)$$

式中, K_{TN} 为 TN 衰减系数; $Q_s^{i,j}$ 为(*i,j*)处点源单位面积上的流量; $c_{TN}^{i,j}$ 为点源处的 TN 浓度.

对于叶绿素 a,方程(3)中的 $c_\varphi = c_{Chl-a}$,源汇项 Q_φ 可表示为:

$$Q_\varphi = Q_{Chl-a} = hF_{Chl-a} + S_{Chl-a} \quad (9)$$

式中, F_{Chl-a} 为生化反应项; S_{Chl-a} 为下雨等由河流两侧流入河中的 Chl-a; F_{Chl-a} 主要反映藻类的生长、衰亡与沉降,可表示为:

$$F_{Chl-a} = (\mu - R - K_d)c_{Chl-a} \quad (10)$$

式中, μ 为藻类的生长率; R 为藻类的死亡率; K_d 为藻类的沉降率.

根据藻类生长机制,藻类的生长与氮、磷营养盐、光照、水温和流速等因子有关,假定这些因子对藻类生长率的共同影响可表示为各因子单独影响的乘积,即:

$$\mu = F_1(T) \cdot \min\{F_2(c_{TN}), F_3(c_{TP})\} \cdot F_4(L) \cdot F_5(u) \quad (11)$$

式中, F_1, F_2, F_3, F_4 和 F_5 分别为水温、总氮浓度、总磷浓度、光照和流速对藻类生长率的影响函数; T, u, L 分别为水温、流速和水面光辐射强度.参考已有的研究成果^[17],取:

$$F_1(T) = \mu_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{2.3}{15} \times |T - T_{opt}|\right) \quad (12)$$

$$F_2(c_{TN}) = \frac{c_{TN}}{c_{TN} + K_N}, \quad F_3(c_{TP}) = \frac{c_{TP}}{c_{TP} + K_P} \quad (13)$$

$$F_4(L) = \begin{cases} L/LK & L \leqslant LK \\ 1 & L > LK \end{cases} \quad (14)$$

$$LK = \alpha \theta^{(T-20)} \quad (15)$$

式中, $\mu_{\max}$ 为藻类最大生长率; K_N 为氮的半饱和常数; K_P 为磷的半饱和常数; LK 为水温 $T(^{\circ}\text{C})$ 时光半饱和度; α 为 20°C 时光的半饱和度; θ 为光半饱和度的温度参数; T_{opt} 为藻类最佳生长温度。

藻类的死亡率 R 的计算式为^[18]:

$$R = \begin{cases} R_{\max} \cdot \exp\{-2.3(T_{\text{opt}} - T)/15\} \cdot \frac{c_{\text{Chl-a}}}{c_{\text{Chl-a}} + K_m} \cdot \frac{K_P}{c_{\text{TP}} + K_P} & T \leqslant T_{\text{opt}} \\ R_{\max} \cdot \frac{c_{\text{Chl-a}}}{c_{\text{Chl-a}} + K_m} \cdot \frac{K_P}{c_{\text{TP}} + K_P} & T > T_{\text{opt}} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $R_{\max}$ 为藻类最大死亡率; K_m 为藻类死亡率的半饱和常数。

1.3 流速影响函数

近年来有关对湖泊风生环流流速和河道型水库的平均流速对藻类生长的影响研究发现^[1,3,8,9,11,19,20],当营养充足、气候适宜时,藻类仅在某一流速范围内有明显的生长,并且在该流速范围内,存在对藻类生长的最佳流速,该流速接近于零但不等于零,当流速小于最佳流速时,随流速的增加,藻类的生长率增加,而当流速大于最佳流速时,随流速的增加,藻类的生长率减小,当流速超过某值时,流速对藻类的生长有明显的抑制作用,出现水华的机率极小,即存在适宜藻类生长的流速范围。由于影响最佳流速和适宜藻类生长的流速范围的因素复杂,且它们随地域、优势藻类的变化而变化,其影响机制仍在进一步研究中。

有关流速对藻类生长率影响的量化研究,目前尚不多见^[15,16]。2005年李锦秀等^[15]为研究三峡库区大宁河水动力状况对藻类生长率的影响,首次在藻类生长率的表达式中增加流速影响函数,其形式为:

$$F_5(u) = \beta \gamma^u \quad (\beta \text{ 和 } \gamma \text{ 为参数}) \quad (17)$$

笔者根据目前有关的研究成果,通过对多种函数形式进行分析对比,最终将其流速影响函数改进为如下形式:

$$F_5(u) = e^{-\frac{(u-a)^2}{b}} \quad (a \text{ 和 } b \text{ 为参数}) \quad (18)$$

式(18)表示的流速影响函数与李锦秀等提出的流速影响函数式(17)相比,主要有两方面的改进。其一,式(15)的最佳流速 $u = 0$, 与现有研究不符,改

进为 $u = a$; 其二,分析式(18)可以发现,参数 b 决定着该函数的值接近最大值的区域大小,参数 b 越大,函数表示的曲线变化越缓,函数值接近最大值的区域越宽,即有利于藻类生长的流速范围越大;反之亦然。这说明参数 b 反映了有利于藻类生长的流速范围。

上述分析表明,修改后的流速影响函数中的参数 a 和 b 都有明确的物理意义,其值可由实测数据以及现有的实验成果率定与优化。

1.4 计算区域和网格

计算区域为嘉陵江重庆主城段——沙坪坝区磁器口到渝中区朝天门段,长度约 14 km。该河段自西北向东南,而后向东蜿蜒前行,最后与长江交汇于朝天门(图 1)。数值模拟采用 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的矩形网格。河床地形采用来自航道部门的实测数据。

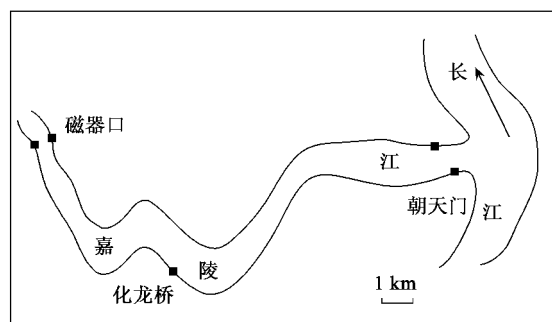


图 1 研究区域示意

Fig. 1 General sketch map of research area

1.5 定解条件

方程(1)和(2)的水动力初始条件以冷启动的形式给出,即全场 $u_i = 0$, 同时给出初始水位值;上游边界条件采用水文部门提供的逐日流量值、下游边界条件采用逐日水位值,通过插值得出计算时刻的值。

方程(3)的浓度初始条件和边界条件使用本研究组 2007 年的实测数据^[21],通过插值得出计算时刻的值。

研究河段沿岸排放的工业废水与生活污水按点源计算,各点源的位置和各点源的流量和总磷与总氮的浓度见文献^[22,23],沿岸输入的叶绿素 a 浓度忽略不计。

本研究设定干水深为 0.1 m ,湿水深为 0.3 m 。采用 ADI 法对控制方程进行离散求解^[17],计算时, Courant 数小于 20。

1.6 模型参数的率定与模型的验证

根据现有河流湖泊等富营养化的研究成

果^[11,14,15,18],确定出控制方程中各有关参数的取值范围,应用扰动分析法,根据2007年2月6日~5月26日对研究河段的实测数据,采用单纯形法对模型中的有关参数进行率定与优化,并对由扰动分析法确定出的敏感参数进行重点优化调

整,各参数率定与优化结果见表1.率定出的最佳流速为 $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,与刘信安等^[3]在春季对嘉陵江水进行的实验室模拟实验得出的“在 $0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的流速下总藻的细胞增长最明显”的结论基本吻合.

表1 模型参数值

Table 1 Model parameter values

K_N	K_P	α	θ	T_{opt}	a	b	μ_{max}	R_{max}	K_m	K_d	K_{TP}	K_{TN}
$/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$/\text{kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$		$/^{\circ}\text{C}$	$/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$/\text{d}^{-1}$	$/\text{d}^{-1}$	$/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	$/\text{d}^{-1}$	$/\text{d}^{-1}$	$/\text{d}^{-1}$
0.22	0.020 5	12 318.57	1.05	25	0.04	0.15	1.27	0.185	18	0.05	0.01	0.015

为检验所构建的模型,对研究河段2007年6月10日~10月14日的TP、TN和Chl-a浓度的时空分布进行了模拟,并与实测值进行了比较,比较结果表明,模拟值与实测值比较吻合,其中,TP浓度的模拟值与实测值平均相对误差为7%;TN浓度的模拟值与实测值平均相对误差为8%;Chl-a浓度的模拟值与实测值平均相对误差为10%.位于河段中部的化龙桥断面距左岸2m处的模拟值与实测值的比较结果如图2.若将式(17)的流速影响函数替换笔者改进的式(18)的流速影响函数,采用相同的参数率定和模拟方法,得出 $f_5(u) = 0.65^{9.4u}$,其他部分参数

也有变化,模拟得出Chl-a浓度的模拟值与实测值的平均相对误差为14%,TP与TN浓度的模拟值与采用改进的流速影响函数模拟的结果基本相同.图3示出位于河段中部的化龙桥断面距左岸2m处采用不同的流速影响函数得出的Chl-a浓度的模拟值[图中模拟值1对应于改进的流速影响函数,即式(18),模拟值2对应于式(17)]与实测值比较,结果可以发现,采用改进的流速影响函数对三峡水库蓄水期低流速下的Chl-a浓度的模拟有明显的改进,改进的流速影响函数能更好地模拟流速对藻类生长的影响.

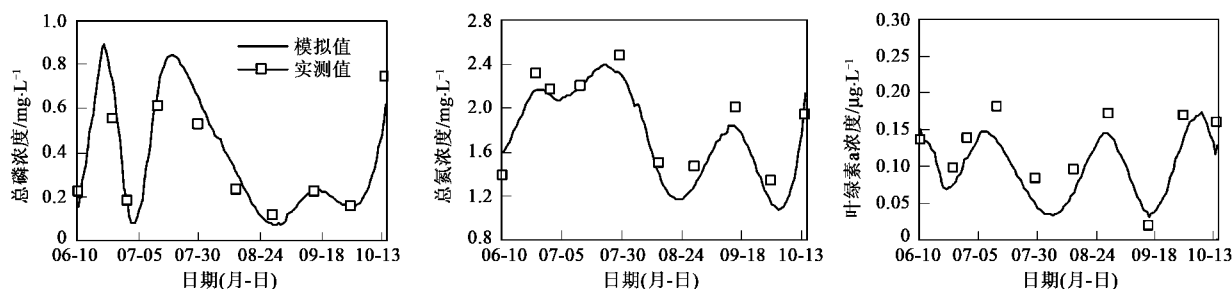


图2 模拟值与实测值的对比

Fig.2 Comparison between Simulated and observed values

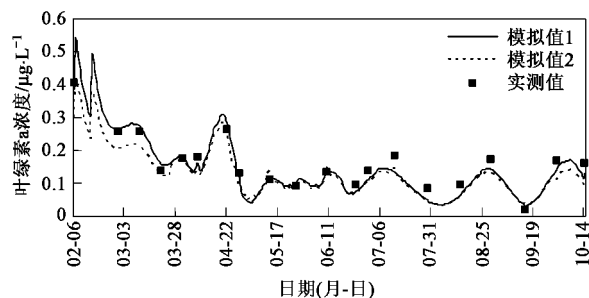


图3 2种不同的流速影响函数模拟结果的对比

Fig.3 Comparison of simulated results using different velocity factors

2 数值仿真

嘉陵江重庆主城段的综合营养指数近年来处于35~60之间,属中营养和轻度富营养^[24],水体中有充足的营养满足藻类的生长繁殖,因此,气候条件与水动力条件成为影响嘉陵江重庆主城段藻类生长繁殖的关键因素.三峡水库蓄水后对库区次级河流水质状况的监测与分析结果表明^[25],通常3、4月为气候条件与水动力条件最适宜藻类生长繁殖的时段,为库区次级河流水华的高发时段.为此,笔者在分析2008年3、4月气候条件的基础上,选用对藻类生长

相对有利的 2008 年 4 月 1~15 日的气候(光照、风速和水温)条件,根据研究河段 2008 年和历年 3、4 月的水动力情况和近年的水质情况,确定出 3 种不同的水位方案进行数值仿真,研究不同的水动力条件对藻类生长繁殖的影响.3 种水位方案为:①取上下边界水位为 2008 年 3、4 月所对应的平均水位,即:上边界水位 $H_{\text{上}} = -21.3 \text{ m}$,下边界 $H_{\text{下}} = -24.9 \text{ m}$;②上边界 $H_{\text{上}} = -21.3 \text{ m}$, $H_{\text{下}} = -23.9 \text{ m}$;③上边界 $H_{\text{上}} = -21.3 \text{ m}$,下边界 $H_{\text{下}} = -21.9 \text{ m}$;

m;水位标高以海拔高度 186 m 为基准面.3 种方案对应的上边界和初始时刻 3 种物质的浓度分别为: $c_{\text{TP}} = 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $c_{\text{TN}} = 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $c_{\text{Chl-a}} = 1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,岸边点源浓度均采用模拟时段的实测值.

图 4 表示方案 1、方案 2 和方案 3 在模拟时段中藻类生长最旺时刻研究河段中的 Chl-a 浓度分布,图 5 为相应的流速分布图,可以看出,即使是在蓄水期,嘉陵江重庆主城段流速整体来说仍不太低,通常情况下大部分区域的水动力条件都不利于藻类生

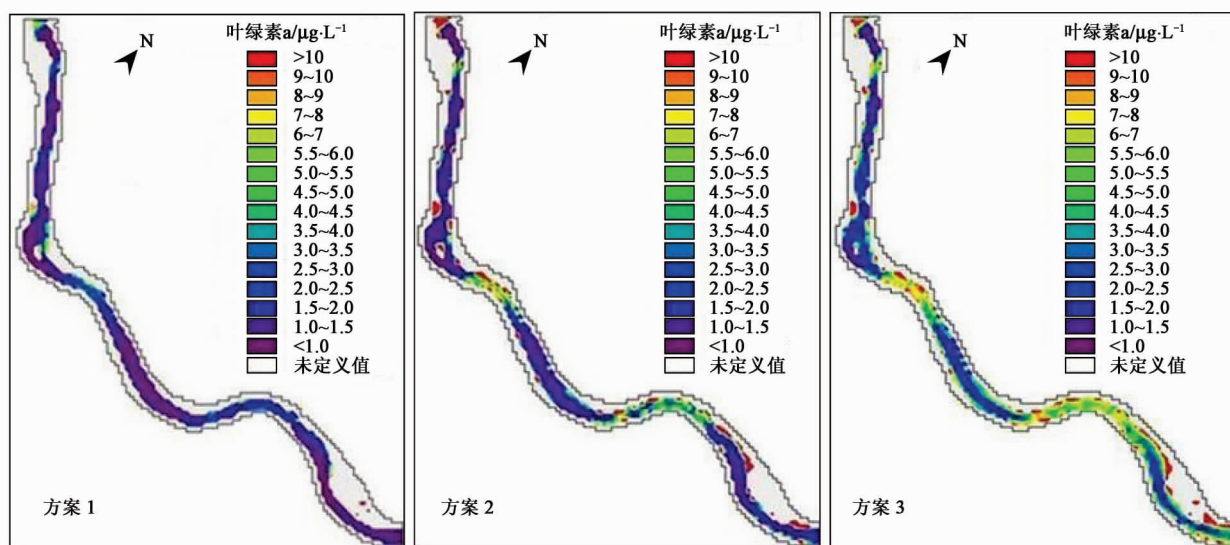


图 4 不同水位下的叶绿素 a 浓度分布

Fig. 4 Distribution of Chl-a concentration for various water levels

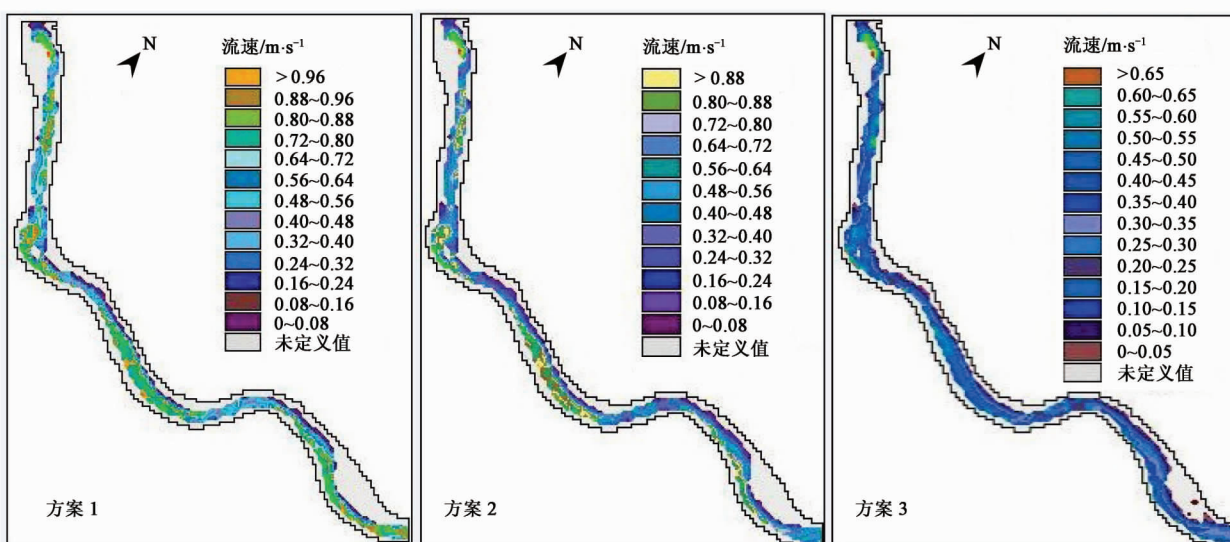


图 5 不同水位下的流速空间分布

Fig. 5 Distribution of velocity for various water levels

长,Chl-a 浓度偏低;Chl-a 浓度偏大的地方一般在岸边流速较小的地方.随着下游水位的提高,适合藻类生长的流速区域相应增加.根据文献[16],如果以叶绿素 a 浓度为 $10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 作为水华暴发的临界值,统计 3 种方案中发生水华的区域占总区域的比见表 2,可以看到,对于流速相对较高的嘉陵江重庆主城段,大面积发生水华的可能性极小,但在部分岸边流速极低的区域,存在发生水华的可能.

表 2 各方案下出现水华的面积比

Table 2 Area percent of bloom for each scenario			
方案	1	2	3
面积比/%	0.43	6.13	11.27

3 结论

(1) 提出了藻类生长率公式中的流速影响函数,该函数中包含 2 个参数,分别表征对藻类生长最佳的流速与流速范围;构建了嘉陵江重庆主城段藻类生长的数学模型,模拟值与实测值吻合较好.

(2) 水动力条件对藻类生长繁殖有明显的影响,嘉陵江重庆主城段流速在 $0.04\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右最有利于藻类的生长繁殖.

(3) 由于嘉陵江重庆主城段流速相对较高,大面积发生水华的可能性极小,在部分岸边流速极低的区域,存在发生水华的可能,其位置和范围取决于水动力条件.

参考文献:

[1] 颜润润,逢勇,陈晓峰,等.不同风扰对贫富营养下铜绿微囊藻生长的影响[J].环境科学,2008,29(10):2750-2753.

[2] 颜润润,逢勇,赵伟,等.环流型水域水动力对藻类生长的影响[J].中国环境科学,2008,28(9):813-817.

[3] 刘信安,张密芳.重庆主城区三峡水域优势藻类的演替及其增殖行为研究[J].环境科学,2008,29(7):1838-1843.

[4] 曹巧丽,黄钰玲,陈明曦.水动力条件下蓝藻水华生消的模拟实验研究与探讨[J].人民珠江,2008,4:8-10.

[5] Richard A P, Jonathan S C, Marjorie C W. Modeling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems [J]. Ecological Modeling, 2008, 213: 1-15.

[6] Sophia I P. Diatom ecological guilds display distinct and predictable behavior along nutrient and disturbance gradients in

running waters[J]. Aquatic Botany, 2007, 86: 171-178.

[7] Pannard A, Bormans M, Lagadeuc Y. Short-term variability in physical forcing in temperate reservoirs: effects on phytoplankton dynamics and sedimentary fluxes[J]. Freshwater Biology, 2007, 52: 12-27.

[8] 张毅敏,张永春,张龙江,等.湖泊水动力对蓝藻生长的影响[J].中国环境科学,2007,27(5):707-711.

[9] 高月香,张毅敏,张永春.流速对太湖铜绿微囊藻生长的影响[J].生态与农村环境学报,2007,23(2):57-60.

[10] 廖平安,胡秀琳.流速对藻类生长影响的试验研究[J].北京水利,2005,2:12-15.

[11] 钟成华.三峡库区水体富营养化研究[D].成都:四川大学,2004.

[12] Yamamoto T, Hashimoto T, Tarutani K, et al. Effects of winds, tides and river water runoff on the formation and disappearance of the *Alexandrium tamarense* bloom in Hiroshima Bay, Japan [J]. Harmful Algae, 2002, 1(2): 301-312.

[13] Arfi R. Seasonal ecological changes and water level variations in the Sélingué Reservoir (Mali, West Africa) [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30(6-7): 432-441.

[14] 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[J].四川大学学报(工程版),2009,41(2):18-23.

[15] 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[J].水科学进展,2004,16(6):777-783.

[16] 王华,逢勇.藻类生长的水动力学因素影响与数值仿真[J].环境科学,2008,29(4):884-889.

[17] 郑邦民,赵昕.计算水动力学[M].武汉:武汉大学出版社,2001.91-102.

[18] 刘元波,陈伟民.湖泊藻类动态模型[J].湖泊科学,2000,12(2):171-176.

[19] Mitrovic S M, Oliver R L, Rees C. Critical flow velocities for the growth and dominance of *Anabaena circinalis* in some turbid freshwater rivers [J]. Freshwater Biology, 2003, 48: 164-174.

[20] 黄程,钟成华,邓春光,等.三峡水库蓄水初期大宁河回水区流速与藻类生长关系的初步研究[J].农业环境科学学报,2006,25(2):453-457.

[21] 侯亚琴.嘉陵江重庆城区段藻类生长影响因素分析[D].重庆:重庆大学,2007.

[22] 黄真理,李玉梁.三峡水库水质预测和环境容量计算[M].北京:中国水利水电出版社,2006.130-180.

[23] 夏冰雪.基于GIS的三峡库区水质模拟研究[D].重庆:重庆大学,2007.

[24] 白薇扬,王娟,王英魁,等.嘉陵江重庆段水体富营养化现状分析[J].重庆工学院学报,2008,22(11):66-69.

[25] 邓春光.三峡库区富营养化研究[M].北京:中国环境科学出版社,2007.18.