

基于 EFDC 模型的河道型水库藻类生长对流域污染负荷削减的响应——以广东长潭水库为例^{*}

李一平¹, 王静雨^{1**}, 滑磊²

(1: 河海大学环境学院, 南京 210098)

(2: 浙江省水利河口研究院, 杭州 310020)

摘要: 将环境 (EFDC) 模型应用于广东梅州的河道型水库——长潭水库, 经过模型的验证, 建立长潭水库水生态数学模型, 模拟出水库在现状污染负荷下的藻类生长情况, 以叶绿素 a 浓度为指标, 研究水库在丰水年与枯水年富营养化改善程度对不同流域污染削减方案的响应关系. 结果表明: 现状污染负荷削减 10%, 在丰水年库尾、库中和库首点位的叶绿素 a 平均浓度分别降低 13.99%、12.00% 和 10.35%; 枯水年 3 个代表点位叶绿素 a 平均浓度分别下降 8.42%、5.63% 和 2.10%. 污染削减 20% 的情况下, 丰水年 3 个代表点位的叶绿素 a 浓度分别降低 26.78%、19.25% 和 17.04%, 枯水年对应的降低幅度分别为 11.72%、7.97% 和 5.12%; 库尾地区表现出河道的特征, 在污染负荷削减的情况下藻类生长能够受到有效遏制, 库首地区则表现出湖泊的特性, 枯水年这一特征表现更加突出, 污染削减 20% 的情况下, 叶绿素 a 的平均浓度仅降低 5.12%.

关键词: 河道型水库; 长潭水库; EFDC 模型; 污染削减; 藻类生长响应

Response of algae growth to pollution reduction of drainage basin based on EFDC model for channel reservoirs: A case of Changtan Reservoir, Guangdong Province

LI Yiping¹, WANG Jingyu¹ & HUA Lei²

(1: *College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China*)

(2: *Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, P. R. China*)

Abstract: The EFDC model has been used to study response of water quality to varying degrees of pollution reduction in Changtan Reservoir. After verification of the model, a water quality model of Changtan Reservoir was built. Algae growth was simulated under the present situation of pollution load. Pollution reduction scenarios based on two hydrologic years were simulated using the water quality model. The results indicated that overmuch nutrient could lead to eutrophication even in wet years. Under 10% reduction of pollution load, average chlorophyll-a concentrations in three areas (reservoir tail, middle and head areas) decreased by 13.99%, 12.00% and 10.35% in wet year and by 8.42%, 5.63% and 2.10% in dry year, respectively. Under the condition of pollution reduced by 20%, chlorophyll-a concentrations in three areas decreased by 26.78%, 19.25% and 17.04% in wet year and by 11.72%, 7.97% and 5.12% in dry year, respectively. The water in the reservoir tail area behaved flowing-water similar to rivers, while the water in the reservoir head area also behaved still-water similar to lakes, which has been more dramatic in dry year and the average chlorophyll-a concentration decreased by 5.12%.

Keywords: Channel reservoir; Changtan Reservoir; EFDC model; pollution load reduction; response of algae growth

随着我国三峡水库、小浪底水库等水利工程的修建完成, 对于水库的保护与管理工作也日益迫切. 河道型水库形成后, 其水动力学特征介于湖泊和河道之间^[1], 水体滞留时间变长, 水流变缓慢, 比河流更容易发生富营养化^[1], 加之水库与河流的不可分割性, 水库水质变差必然影响到下游河道的水质. 因此需要研究河

^{*} 水利部公益性行业科研专项经费项目(201101020)资助. 2014-07-28 收稿; 2014-12-29 收修改稿. 李一平(1978~), 男, 博士, 副教授; E-mail: liyiping@hhu.edu.cn.

^{**} 通信作者; E-mail: wjyhhu@126.com.

道型水库的富营养化特征与控制对策.

近年来,EFDC 模型被广泛地应用于湖泊、水库、河流、海湾等地表水的模拟与分析,可以定量模拟环境特征、污染负荷与湖泊水质间的动态响应关系,亦可用作湖泊、河道等水体富营养化控制的决策工具.李一平等利用 EFDC 模型建立太湖的水环境动力学模型,研究“引江济太”对于太湖水动力的调控效果^[2-3].卫志宏等利用 EFDC 模型建立洱海湖泊及海湾的三维水动力水质模型,研究洱海主要污染物允许排放量的控制分配^[4].李杰等利用 EFDC 模型,研究美国北卡罗来纳州 Falls Lake 水库内物质输运过程,模拟结果显示水库结构和径流分布是影响污染物滞留时间的重要因素^[5].陈异晖利用 EFDC 模型建立了滇池水质模型,研究了人工调水工程对于滇池的水质改善效果,但由于基础资料不足,建立的模型对于滇池水质模拟并不够精确^[6].李一平等利用 EFDC 模型研究了河道型水库水动力特征与气候条件的响应关系^[7],相关文献报道^[2-4]显示,EFDC 模型具有通用性好、数值计算能力强、数据输出应用范围广等特点,尤其对于水体水动力的模拟精度已达到相当高的水平.但目前国内还没有关于河道型水库藻类生长与污染负荷削减响应关系的研究.针对上述问题,本文选用环境流体动力学模型,以叶绿素 a 为指标,来模拟不同污染削减方案下长潭水库藻类生长情况,利用 EFDC 健全的模拟结果可视化功能及后处理功能,研究分析水库不同位置藻类生长的特征,探讨河道型水库控制藻类生长的对策.

1 长潭水库水环境数学模型构建

1.1 EFDC 模型简介

长潭水库水动力学模型采用 EFDC 模型构建,EFDC 是在美国国家环保署资助下由维吉尼亚海洋研究所(VIMS, Virginia Institute of Marine Science at the College of William and Mary)的 John Hamrick 等根据多个数学模型集成开发研制的综合模型,被用于模拟水系统一维、二维和三维流场,物质输运(包括温度、盐度和泥沙的输运),生态过程以及淡水入流等.与 POM、ECOM 模型相比,EFDC 模型的优势为:灵活的边界处理技术,通用的文件输入格式,能快速耦合水动力、泥沙和水质模块,省略了不同模型接口程序的研发过程.同时 EFDC 开发有完整的前、后处理软件 EFDC-Explorer,采用可视化的界面操作,能快速生成网格数据和处理图像文件.EFDC 自 1992 年发布以来,不断更新完善,随着 EFDC-Explorer 等前、后处理工具的出现,EFDC 得到了更加广泛的应用.

EFDC 模型垂向上采用 σ 坐标变换,能较好地拟和近岸复杂的岸线和地形;采用 Gelperin 等修正的 Mellor-Yamada 2.5 阶湍流封闭模式较客观地提供垂向混合系数,避免其人为选取造成的误差.动量方程、连续方程及状态方程为:

$$\begin{aligned} \partial_t(m_x m_y H u) + \partial_x(m_y H u u) + \partial_y(m_x H v u) + \partial_z(m_x m_y w u) - f_e m_x m_y H v = \\ - m_y H \partial_x(p + p_{atm} + \phi) + m_y(\partial_x z_b^* + z \partial_x H) \partial_z p + \partial_z \left(m_x m_y \frac{A_v}{H} \partial_z u \right) + \\ \partial_x \left(\frac{m_y}{m_x} H A_H \partial_x u \right) + \partial_y \left(\frac{m_x}{m_y} H A_H \partial_y u \right) - m_x m_y c_p D_p (u^2 + v^2)^{1/2} u \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \partial_t(m_x m_y H v) + \partial_x(m_y H v u) + \partial_y(m_x H v v) + \partial_z(m_x m_y w v) + f_e m_x m_y H u = \\ - m_x H \partial_y(p + p_{atm} + \phi) + m_x(\partial_y z_b^* + z \partial_y H) \partial_z p + \partial_z \left(m_x m_y \frac{A_v}{H} \partial_z v \right) + \\ \partial_x \left(\frac{m_y}{m_x} H A_H \partial_x v \right) + \partial_y \left(\frac{m_x}{m_y} H A_H \partial_y v \right) - m_x m_y c_p D_p (u^2 + v^2)^{1/2} v \end{aligned} \quad (2)$$

$$m_x m_y f_e = m_x m_y f - u \partial_y m_x + v \partial_x m_y \quad (3)$$

水质变量的质量守恒控制方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S_C \quad (4)$$

式中, u 、 v 、 w 分别为边界拟合正交曲线坐标 x 、 y 、 z 方向上的速度分量; m_x 和 m_y 分别为度量张量对角元素的平

方根, $m = m_x m_y$ 为度量张量行列式的平方根; A_v 为垂向紊动黏滞系数; Q_u 、 Q_v 分别为动量源、汇项; C 为水质变量浓度; K_x 、 K_y 和 K_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的扩散系数; S_c 为单位体积源汇项。

水质变量的质量守恒方程包括物理输运、平流扩散以及生态动力学过程, 式(4) 等号左边后 3 项为平流输运项, 等号右边前 3 项为扩散输运项。这 6 项和物理输运项类似, 数值解法和水动力模型中盐度质量守恒方程相似。等号右边最后 1 项表示每个状态变量的动力学过程和外部负荷。

藻类是模型模拟的一个重要变量, 模型考虑蓝藻、硅藻和绿藻 3 种藻类。下标 x 表示藻的种类。模型考虑的源汇项包括: 生长、基础代谢、捕食、沉降以及外部负荷。描述这 3 种藻的动力学方程基本相同, 只是方程中的参数取值不同。动力学方程为:

$$\frac{\partial B_x}{\partial t} = (P_x - BM_x - PR_x)B_x + \frac{\partial}{\partial z}(WS_x \cdot B_x) + \frac{WB_x}{V} \quad (5)$$

式中, B_x 为 x 种类藻的生物量 (g/m^3), P_x 为 x 种类藻的生产率 (d^{-1}), BM_x 为 x 种类藻的基础代谢率 (d^{-1}), PR_x 为 x 种类藻的被捕食率 (d^{-1}), WS_x 为 x 种类藻的沉降速率 (m/d), WB_x 为 x 种类藻的外部负荷 (g/d), V 为模拟单元。

1.2 研究区域概况

长潭水库 ($24^{\circ}42'2'' \sim 24^{\circ}50'15''\text{N}$, $116^{\circ}4'8'' \sim 116^{\circ}8'1''\text{E}$) 位于广东省梅州蕉岭县蕉城镇西北约 6 km 的石窟河长潭峡谷中, 是以发电、供水、防洪为主要功能的大(二)型水库。长潭水库长兴电站坝址至长潭水库坝址之间全长约 22 km, 宽 100 ~ 350 m, 平均水深 30 m, 库容 $1.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 水面面积 4.3 km^2 , 属于典型的河道型水库。

长潭水库入库河流有石窟河干流(中山河)、中赤河、查干河。石窟河是韩江一级支流, 又名石窟溪、蕉岭河, 源于福建武平县东留, 流经平远、蕉岭、梅县等县市, 于梅县丙村镇东州坝注入梅江。石窟河干流长 178 km, 流域面积 3777 km^2 。

长潭水库于 1978 年 3 月开始建设, 1987 年开始蓄水发电, 1991 年 3 月竣工。水库设计洪水位为 151.50 m, 正常库容为 $1.145 \times 10^8 \text{ m}^3$, 死库容为 $0.5985 \times 10^8 \text{ m}^3$, 设计正常高水位为 148.00 m, 汛期防洪限制水位为 144.00 m, 死水位为 136.50 m, 属季节调节水库。长潭水库多年平均流量为 $55.59 \text{ m}^3/\text{s}$, 多年平均径流量为 $17.85 \times 10^8 \text{ m}^3$, 多年平均径流系数为 0.52。

目前, 广东省梅州市城区的供水水源来自清凉山水库, 根据梅州城区需水预测结果, 到 2020 年, 梅州城区需水总量将达 $9.305 \times 10^7 \text{ m}^3$, 大大超过清凉山水库供水工程现有的年供水能力, 显然不能满足梅州城区的需水要求。因此, 长潭水库作为梅州城区的后备水源地成为必然的趋势。

然而, 据当地有关部门反映, 长潭水库一年中发生数次类似蓝藻水华的事件。根据水环境调查情况^[8], 长潭水库上游及闽粤省界水体富营养化污染较重, 浮游植物以蓝、绿藻为优势种, 长潭水库总氮、总磷超标严重, 目前水库水质为 IV ~ V 类水, 不满足集中式生活饮用水地表水源地水质所需要满足的 III 类水 (GB 3838—2002 标准规定) 的要求。水库主要是受到上游福建省境

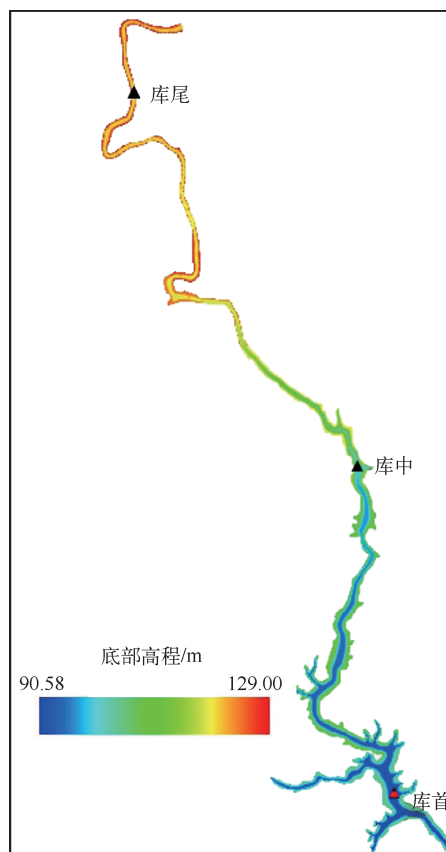


图 1 长潭水库水动力模型(底部高程)以及代表点位置

Fig. 1 The bottom elevation and representative points of Changtan Reservoir water dynamic model

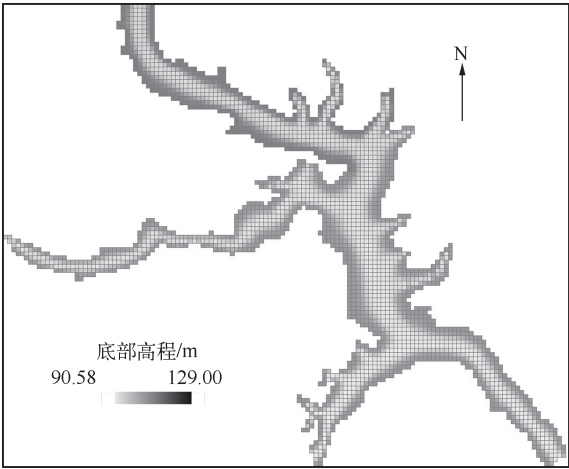


图2 长潭水库水动力模型(网格局部放大图)
Fig. 2 Enlarged view of local grids of Changtan Reservoir

内大量养殖废水和农业、生活面源污染,为了保证后备水源地的水质安全,治理污染势在必行,因此有必要开展长潭水库的水体富营养化与污染负荷削减之间的响应关系研究,为制定科学合理的治污措施提供参考.

1.3 模型的构建

1.3.1 网格生成 EFDC 是基于有限差分求解水动力方程的数值模拟系统,因此本研究需要进行网格概化.模型上边界始于长兴电站,下边界为长潭水库大坝坝址,共 22 km,模型范围内在平面上共划分为 11214 个正方形网格,网格距为 20 m,模型在垂向上采用 σ 坐标,平均分为 10 层,用库底和表层水体厚度来定义垂向网格的高度,垂向上分为 10 层,各层所占的水深比例均为 0.1.长潭水库水动力模型底部高程及局部放大图见图 1、图 2.

1.3.2 初始条件 本次模拟的初始条件设置为模拟时段第 1 d 长兴电站坝下水位的观测值,水质的初始参数设置为 2011 年 5 月长潭水库水质监测的实测值,水温设置为 20℃,总磷、总氮、铵态氮和硝态氮的浓度分别为 0.06、2.17、0.10 和 1.58 mg/L.

1.3.3 边界条件 模型边界条件包括水动力边界和气象边界条件,水动力边界条件包括 1 个主河道和 7 条主要入库支流,长兴电站的调度资料构成水动力上边界,长潭电站的水位资料构成水动力下边界.气象边界条件包括气压、气温、相对湿度、降雨量、风向、风速、云量等逐日数据,来源于梅州气象站.

1.4 参数选取与模型验证

表 1 为长潭水库水生态动力学模型中主要参数的含义与取值,EFDC 对水动力的模拟已经十分成熟,水动力的模拟中,大部分物理参数都未作改变^[6].以长潭水库水位、叶绿素 a、总氮、总磷浓度实测资料为对照,利用 2011 年的水质监测数据作为该模型的验证资料,比较模型的计算值与实测值之间的误差.长潭水库水生态动力模型水质参数的验证结果见图 3.可以看出,EFDC 模型模拟出的总氮浓度总体偏高,但与实测数据的趋势一致,模拟的总磷浓度在库库中上游地区偏低,下游拟合程度较好.模拟的叶绿素 a 浓度误差在 20% 以内,且与实测数据变化趋势一致.整体而言,建立的模型能够反映出水质变化的趋势,可以用来模拟预测长潭水库藻类生长情况.

表 1 长潭水库水生态动力模型参数取值
Tab. 1 Parameters identification of the hydrodynamic and ecology model for Changtan Reservoir

参数	意义及单位	取值	参数	意义及单位	取值
Z_0	河道糙率高度/m	0.02	PM_c	蓝藻最大生长速率/d ⁻¹	1.8
AHO	水平动能或物质扩散系数/(m ² /s)	1.0	BMR _c	蓝藻基础代谢速率/d ⁻¹	0.01
AHD	无量纲水平扩散系数	0.2	PRR _c	蓝藻捕食速率/d ⁻¹	0.03
AVO	运动粘性系数背景值/(m ² /s)	0.001	WSc	蓝藻沉降速率/(m/d)	0.1
ABO	分子扩散系数背景值/(m ² /s)	10 ⁻⁹	TMR _c	蓝藻生长最适温度/℃	25
AVMN	最小动能粘性系数/(m ² /s)	10 ⁻⁴	KHN _x	藻类吸收氮的半饱和常数	0.6
ABMN	最小粘性系数/(m ² /s)	10 ⁻⁸	KHP _x	藻类吸收磷的半饱和常数	0.001
WSC	风遮挡系数	1.0	Keb	背景光消减系数	0.1

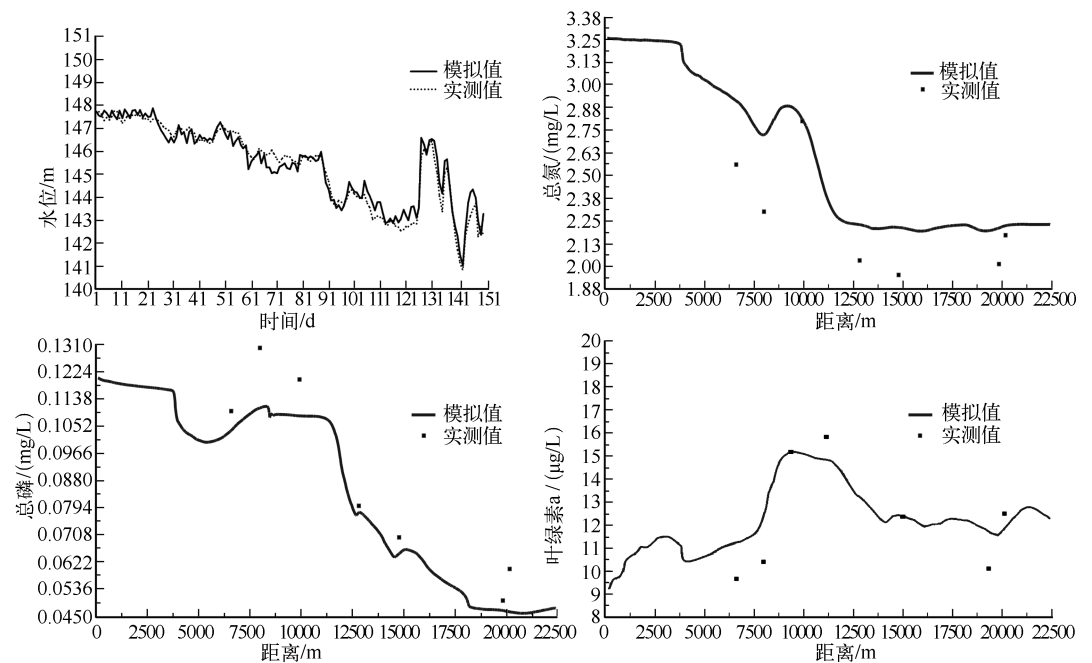


图3 长潭水库水位、总氮、总磷和叶绿素 a 浓度验证图
Fig.3 Verification of water level, total nitrogen, total phosphorus and chlorophyll-a concentrations of Changtan Reservoir

2 长潭水库藻类生长对污染负荷削减的响应关系

2.1 模拟方案

根据长潭水库污染源调查结果^[8],核算出现状污染负荷,长潭水库的氮、磷总负荷分别为 4324.18 和 65.53 t/a,其中长兴电站携带的上游流域氮、磷负荷分别为 2563.2 和 40.05 t/a,分别占水库污染总负荷的 59.3% 和 61.1%。依据《广东省“十二五”主要污染物总量控制规划》制定出两种污染削减方案,即现状流域污染负荷分别削减 10% 和 20%,研究在不同营养盐输入的边界条件下水库藻类生长的变化情况。

国内有研究表明,流量增加引起的流速加快对于水体中藻类生长作用显著^[9-11],因此有必要研究在不同入库流量下水动力条件对污染削减方案的配合作用。长潭水库的来水主要由上游长兴电站的下泄流量和长潭水库流域降雨汇流组成,其中长兴电站上游来水占水库来水总量的 85% 以上,根据长潭水库上游长兴电站的调度资料逐日变化图,选取 1992 和 2004 年分别作为丰水年和枯水年。相应的逐月平均流量见表 2。

表 2 长潭水库典型年份逐月入库平均流量(m³/s)
Tab.2 Monthly average flow rates in two hydrological years of Changtan Reservoir

典型年份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	频率
1992	12.5	60.5	178.0	170.0	125.0	148.0	77.9	37.2	36.1	18.5	16.8	13.3	20%
2004	13.4	12.3	11.9	69.1	58.5	28.0	35.9	28.8	35.2	11.4	11.7	8.6	90%

2.2 不同污染削减情景下长潭水库叶绿素 a 浓度模拟

根据长潭水库的调度资料,查得长潭水库典型年分别为:1992 年(丰水年)和 2004 年(枯水年)。由此制定相应的 2 种计算方案。以 2011 年污染源现状调查结果作为水质模型的边界条件,以现状污染负荷削减 10% 和 20% 为原则分别制定出相应计算方案,模拟出长潭水库在现状污染负荷的不同削减方案下不同水文

年水质的改善情况,考虑到蓝藻暴发多发生在夏季,制定的方案计算时间均为每年的6—8月,共92 d.长潭水库兼具河道和湖泊的特性,因此,分别选取库尾、库中和库首3个代表点位(图1),定性、定量地研究其藻类生长情况.

2.3 模拟结果分析

藻类生长受气温影响,普遍认为气温在26℃时藻类生物量增长最快,在水库中最易形成水华^[12],本文模拟的是夏季长潭水库藻类生长情况,当地气温十分适宜藻类生长,加之进入水库的氮、磷等污染源超标,在污染负荷不削减的情况下,水体内藻类迅速生长,丰水年长潭水库3个代表点位的叶绿素a浓度分别在模拟的第18、25和33 d达到峰值,枯水年3个代表点位的叶绿素a浓度分别在第22、29和30 d达到峰值.

在污染负荷削减之后,长潭水库3个代表点位处总氮、总磷浓度均呈现下降趋势,库尾、库中点位水流速度较快,污染物质不易停留,总氮、总磷浓度降低的幅度明显大于库首点位.在丰水年,污染负荷削减10%之后,长潭水库3个代表点位的总氮浓度降低15%左右,总磷浓度下降幅度更大,流速最快的库尾点位达到了25.24%.在枯水年,污染负荷削减20%后,库首点位总氮、总磷浓度分别为1.50和0.100 mg/L(表3、4),仍然面临富营养化的风险^[13].

表3 不同污染负荷削减方案下长潭水库3个代表点位总氮浓度平均值对比

Tab. 3 Comparison of simulated average total nitrogen concentrations of Changtan Reservoir among different scenarios

模拟情景		总氮浓度平均值		
		库尾	库中	库首
丰水年	污染负荷不削减	1.52 mg/L	1.47 mg/L	1.46 mg/L
	污染负荷削减10%	1.28 mg/L	1.24 mg/L	1.25 mg/L
	变化幅度	-15.8%	-15.6%	-14.3%
	污染负荷削减20%	1.13 mg/L	1.04 mg/L	0.98 mg/L
	变化幅度	-25.66%	-19.38%	-15.52%
枯水年	污染负荷不削减	2.41 mg/L	2.07 mg/L	1.68 mg/L
	污染负荷削减10%	2.22 mg/L	1.94 mg/L	1.64 mg/L
	变化幅度	-7.9%	-6.3%	-2.3%
	污染负荷削减20%	2.01 mg/L	1.81 mg/L	1.50 mg/L
	变化幅度	-16.6%	-12.6%	-11.7%

表4 不同污染负荷削减方案下长潭水库3个代表点位总磷浓度平均值对比

Tab. 4 Comparison of simulated average total phosphorus concentrations of Changtan Reservoir among different scenarios

模拟情景		总磷浓度平均值		
		库尾	库中	库首
丰水年	污染负荷不削减	0.210 mg/L	0.149 mg/L	0.115 mg/L
	污染负荷削减10%	0.157 mg/L	0.122 mg/L	0.096 mg/L
	变化幅度	-25.24%	-18.12%	-16.52%
	污染负荷削减20%	0.135 mg/L	0.109 mg/L	0.090 mg/L
	变化幅度	-35.71%	-26.85%	-21.74%
枯水年	污染负荷不削减	0.194 mg/L	0.149 mg/L	0.115 mg/L
	污染负荷削减10%	0.166 mg/L	0.132 mg/L	0.104 mg/L
	变化幅度	-14.43%	-11.41%	-9.57%
	污染负荷削减20%	0.146 mg/L	0.119 mg/L	0.100 mg/L
	变化幅度	-24.74%	-20.13%	-13.04%

在现状污染负荷不削减的情况下,长潭水库库尾、库中和库首点位两种水文典型年叶绿素a的峰值浓度均超过50 μg/L,说明目前长潭水库接纳的污染物已经超过环境容量,即使是在水动力条件较好的丰水年,仍

有藻类暴发的可能;污染负荷削减 10% ,枯水年水库叶绿素 a 的平均浓度仅有小幅度的降低,说明目前长潭水库接纳的污染物超标较多,加之在枯水年,夏季的月平均入库流量仅为丰水年的 35% ,不良的水动力条件下,污染削减 10% 对于遏制藻类生长几乎没有作用. 污染负荷削减 20% 对于水质的改善作用仍然有限,库首点位叶绿素 a 的平均浓度仅降低 5. 12% . 相应地,在丰水年污染负荷削减 10% 后,水库 3 个代表点位的叶绿素 a 浓度均可以降低 10% 以上,污染削减力度增大至 20% 后,叶绿素 a 平均浓度普遍可以下降 20% 左右(表 5).

表 5 不同污染负荷削减方案下长潭水库 3 个代表点位叶绿素 a 浓度平均值对比

Tab. 5 Comparision of simulated average chlorophyll-a concentrations of Changtan Reservoir among different scenarios

模拟情景		叶绿素 a 浓度平均值		
		库尾	库中	库首
丰水年	污染负荷不削减	21. 05 μg/L	18. 35 μg/L	17. 65 μg/L
	污染负荷削减 10%	18. 10 μg/L	16. 15 μg/L	15. 82 μg/L
	变化幅度	- 13. 99%	- 12. 00%	- 10. 35%
	污染负荷削减 20%	15. 41 μg/L	14. 82 μg/L	14. 64 μg/L
	变化幅度	- 26. 78%	- 19. 25%	- 17. 04%
枯水年	污染负荷不削减	25. 74 μg/L	32. 88 μg/L	42. 28 μg/L
	污染负荷削减 10%	23. 57 μg/L	31. 03 μg/L	41. 39 μg/L
	变化幅度	- 8. 42%	- 5. 63%	- 2. 10%
	污染负荷削减 20%	22. 72 μg/L	30. 26 μg/L	40. 11 μg/L
	变化幅度	- 11. 72%	- 7. 97%	- 5. 12%

长潭水库是典型的河道型水库,库尾区域水深较浅,水流较快,表现出河道的特性,较大的流量产生的冲刷和稀释作用使藻类不能集中暴发^[14],因此污染负荷削减后,库尾区域的水质改善程度较好.但在丰水年污染负荷不削减的情况下,库尾区域叶绿素 a 的平均浓度最高,其原因是丰水年降雨量增多,库尾地区上游的养殖业废水随着地表径流直接进入水库,为藻类生长提供大量营养盐,也说明在营养盐过量的情况下水动力条件对藻类生长的作用不明显.相应地,库首区域水深变深,流速变慢,表现出湖泊的特性,污染负荷削减 20% 后,在枯水年叶绿素 a 平均浓度仅降低 5. 12% ,说明缓慢的流态是藻类大量生长的主要环境条件之一.

污染负荷削减 20% 后,在丰水年的水动力条件下,水库 3 个代表点位的叶绿素 a 浓度峰值表现出明显下降,但是在流量大幅度降低的枯水年,除库尾点位,库中和库首点位叶绿素 a 峰值浓度没有明显变化.其原因是水库库尾区域表现出河道的特性,流速相对较快,污染物质不易停留,大多积累在库首区域,造成了库首点位的叶绿素 a 峰值浓度相对库尾和库中点位始终偏高(表 6).

表 6 不同污染负荷削减方案下长潭水库 3 个代表点位叶绿素 a 浓度峰值对比

Tab. 6 Comparision of simulated peak chlorophyll-a concentrations of Changtan Reservoir among different scenarios

模拟情景		叶绿素 a 浓度峰值		
		库尾	库中	库首
丰水年	污染负荷不削减	56. 71 μg/L	58. 36 μg/L	58. 72 μg/L
	污染负荷削减 10%	51. 59 μg/L	53. 03 μg/L	55. 56 μg/L
	变化幅度	- 9. 03%	- 9. 13%	- 5. 38%
	污染负荷削减 20%	47. 54 μg/L	50. 29 μg/L	51. 07 μg/L
	变化幅度	- 16. 17%	- 13. 83%	- 13. 03%
枯水年	污染负荷不削减	60. 30 μg/L	61. 43 μg/L	61. 23 μg/L
	污染负荷削减 10%	57. 35 μg/L	58. 48 μg/L	60. 58 μg/L
	变化幅度	- 4. 89%	- 4. 80%	- 1. 06%
	污染负荷削减 20%	53. 18 μg/L	55. 53 μg/L	56. 08 μg/L
	变化幅度	- 11. 80%	- 9. 60%	- 8. 41%

3 结论

本文利用 EFDC 模型建立了河道型水库——长潭水库的水动力水生态数学模型,利用水位、水质实测资料对模型进行校核,实现了模型的本地化,模拟出了长潭水库藻类生长对于流域污染削减方案的响应,对于长潭水库防治富营养化提供了指导性的对策,对于河道型水库的管理与水质改善也具有参考意义。

1) 长潭水库是典型的河道型水库,库尾区域具有河道的特性,水体交换程度好,污染物不易停留。库首区域表现出湖泊的特性,水体流动缓慢,污染物质容易滞留,在适宜的环境条件下容易暴发蓝藻水华。

2) 现状污染负荷削减 10% 可以对藻类生长产生一定程度的抑制作用,但在水动力条件较差的枯水年,库首点位叶绿素 a 的峰值浓度仅降低 1.06%;增大污染负荷削减的力度并且通过水库调度增加入库流量,可以明显改善库尾区域水质情况,叶绿素 a 的平均浓度可以降低 26.78%,峰值浓度可以降低 16.17%。

3) 长潭水库上游养殖业产生的废水对污染负荷贡献最大,营养盐超标的情况下即使增加长兴电站的下泄流量也难以改善库首地区的富营养化状况,因此大力治理养殖业排污才是保障长潭水库水质安全的长远措施。

4) EFDC 模型对水质基础资料的完整性要求较高,由于没有环保监测断面,长潭水库缺少长系列的水质实测资料,若要更加精确地预测水库富营养化,还需开展更深入的资料收集工作。

4 参考文献

- [1] 张远,郑丙辉,富国等.河道型水库基于敏感性分区的营养状态标准与评价方法研究.环境科学学报,2006,26(6):1016-1021.
- [2] 郝文彬,唐春燕,滑磊等.引江济太调水工程对太湖水动力的调控效果.河海大学学报:自然科学版,2012,40(2):129-133.
- [3] Li YP, Achary K, Yu ZB. Modeling impacts of Yangtze River water transfer on water ages in Lake Taihu, China. *Ecological Engineering*, 2011, 37: 325-334.
- [4] 卫志宏,唐雄飞,杨振祥等.洱海主要污染物允许排放量的控制分配.湖泊科学,2013,25(5):665-673. DOI 10.18307/2013.0507.
- [5] 李杰,林晶,吴增茂. FallsLake 水库内溶解物输运模拟.水科学进展,2011,22(3):413-420.
- [6] 陈异晖.基于 EFDC 模型的滇池水质模拟.云南环境科学,2005,24(4):28-30.
- [7] 李一平,滑磊,王沛芳等.河道型水库水动力特征与气候条件的响应关系.湖泊科学,2013,25(3):317-323. DOI 10.18307/2013.0301.
- [8] 王超,高超越,王沛芳等.广东长潭水库富营养化与浮游植物分布特征.湖泊科学,2013,25(5):749-755. DOI 10.18307/2013.0518.
- [9] 李锦秀,杜斌,孙以三.水动力条件对富营养化影响规律探讨.水利水电技术,2005,36(5):15-18.
- [10] Lei Z, Yu ZL, Rui Z. A Three-dimensional water quality modeling approach for exploring the eutrophication responses to load reduction scenarios in Lake Yilong(China). *Environmental Pollution*, 2013, 177: 13-21.
- [11] Guo ZW, Zong XX. Prediction of algal blooming using EFDC model: case study in the Daoxiang Lake. *Ecological Modelling*, 2011, 222:1245-1252.
- [12] 华锦彪.洋河水库“水华”发生的实验研究[学位论文].北京:北京大学,1991.
- [13] 王焕校.污染生态学.北京:高等教育出版社,2000:147.
- [14] 梁培瑜,王烜,马芳冰等.水动力条件对水体富营养化的影响.湖泊科学,2013,25(4):455-462. DOI 10.18307/2013.0401.