

## 基于 EFDC 模型的深圳水库富营养化模拟<sup>\*</sup>

唐天均<sup>1</sup>, 杨 晟<sup>1</sup>, 尹魁浩<sup>1</sup>, 邹 锐<sup>2\*\*</sup>

(1: 深圳市环境科学研究院国家环境保护饮用水水源地管理技术重点实验室, 深圳市饮用水水源地安全保障重点实验室, 深圳 518001)

(2: Tetra Tech, Inc., Fairfax VA USA 10306)

**摘 要:** 基于 EFDC 模型构建了深圳水库三维水动力和富营养化定量模拟模型. 分别用 2009 年和 2010—2011 年流量、水位和水质等观测数据对模型进行了校正和验证, 准确地反映了深圳水库的水动力和水质变化过程. 在此基础上, 假定支流污染减排、水库调度和降低东江引水污染负荷 3 种情景进行深圳水库富营养化数值模拟, 3 种情景下库中 Chl. a 峰值浓度分别降低 1.0%、16.4% 和 46.3%, 平均浓度分别降低 1.3%、29.8% 和 29.9%. 深圳水库具有良好的交换能力, 尚未出现水华暴发, 但入库营养盐负荷高, 存在较大的富营养化风险; 在目前沙湾河污水已经减排的基础上再实施支流污染控制, 对水质改善和藻类控制作用已不明显; 水库调度和削减东江引水污染负荷对深圳水库水质和富营养化改善明显, 能够有效降低水华发生的风险.

**关键词:** 水动力; 水质; 富营养化; 深圳水库; EFDC 模型

## Simulation of eutrophication in Shenzhen Reservoir based on EFDC model

TANG Tianjun<sup>1</sup>, YANG Sheng<sup>1</sup>, YIN Kuihao<sup>1</sup> & ZOU Rui<sup>2</sup>

(1: *Shenzhen Academy of Environmental Science, State Environmental Protection Key Laboratory of Drinking Water Source Management and Technology, Shenzhen Key Laboratory of Drinking Water Source Safety Control, Shenzhen 518001, P. R. China*)

(2: *Tetra Tech, Inc., Fairfax VA 10306, USA*)

**Abstract:** The three-dimensional hydrodynamic and eutrophication model of Shenzhen Reservoir was developed based on EFDC framework. Model calibration and validation were conducted with two sets of independent observed data of water flows, water levels, and water quality in 2009 and 2010—2011. The model represented the hydrodynamic processes and the spatial and temporal distributions of water quality satisfactory. Subsequently, three scenarios were configured to provide decision makings for eutrophication control, included removing 100% nutrients from all tributaries, increasing by 50% of water flows, and removing 50% nutrients from Dongjiang. As shown by the modeling results, the maximum chlorophyll-a concentrations were decreased by 1.0%, 16.4% and 46.3%, respectively, the average chlorophyll-a concentrations were decreased by 1.3%, 29.8% and 29.9%, respectively. Therefore, there is no water bloom in Shenzhen Reservoir so far because water has been exchanged quickly, although there has been eutrophication threats because of the large numbers of nutrients entering into the reservoir from Dongjiang. Increasing water flows and removing nutrients from Dongjiang can significantly improve water quality and effectively reduce the risk of water bloom in the reservoir.

**Keywords:** Hydrodynamics; water quality; eutrophication; Shenzhen Reservoir; EFDC model

湖泊富营养化和水华发生是全世界共同面临的重大环境问题之一<sup>[1-4]</sup>. 在水华的发生机制、蓝藻生长与环境因子关系和抑制藻类的方法及环境效应等方面已有大量研究<sup>[5]</sup>. 目前湖泊治理注重具体的工程措施,

<sup>\*</sup> 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2009ZX07423-001-3, 2012ZX07206-004-1)资助. 2013-06-13 收稿; 2013-10-09 收修改稿. 唐天均(1984~), 男, 硕士, 工程师; E-mail: tangtianjun003@163.com.

<sup>\*\*</sup> 通信作者; E-mail: rz5q@yahoo.com.



EFDC 模型采用  $\sigma$  坐标下的三维水动力方程、动量方程、连续性方程、状态方程见公式(1)~(6)<sup>[14]</sup>;水质模拟的原理与 WSP5 类似,在水动力模块提供的物理条件并考虑泥水界面行为基础上,模拟 21 项水污染物的迁移转化.其水质组分的平衡方程见公式(7)<sup>[15]</sup>.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(mHu)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y Huu)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x Hvu)}{\partial y} + \frac{\partial(mwu)}{\partial z} - \left( mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) H v = \\ - m_y H \frac{\partial(g\zeta + p)}{\partial x} - m_y \left( \frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( mH^{-1} A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q_u \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(mHv)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y Huv)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x Hvv)}{\partial y} + \frac{\partial(mwv)}{\partial z} + \left( mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) H u = \\ - m_x H \frac{\partial(g\zeta + p)}{\partial y} - m_x \left( \frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( mH^{-1} A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + Q_v \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -gH \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = -gHb \quad (3)$$

$$\frac{\partial(m\zeta)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x Hv)}{\partial y} + \frac{\partial(mw)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(m\zeta)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H \int_0^1 u dz)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H \int_0^1 v dz)}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

$$\rho = \rho(p, S, T) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(m_x m_y HC)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y HuC)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x HvC)}{\partial y} + \frac{\partial(m_x m_y wC)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{m_y HA_x}{m_x} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{m_x HA_y}{m_y} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( m_x m_y \frac{A_z}{H} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + m_x m_y HS_c \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $z = (z^* + h)/(\zeta + h)$ ,  $z^*$  为垂向的物理坐标,  $h$  和  $\zeta$  分别为底面和自由水面高程,  $H = h + \zeta$  为总水深,  $u$  和  $v$  分别为曲线正交坐标系中  $x$  和  $y$  方向的速度分量,  $w$  为垂向速度分量,  $m_x$ 、 $m_y$  分别为度量、张量的对角元素的平方根,  $m = m_x m_y$  是雅克比行列式,  $p$  为大气压,  $\rho$  为水密度,  $T$  和  $S$  分别为温度和盐度. 动量方程中的  $f$  为柯氏力参数,  $A_v$  为垂向紊动或涡旋黏度,  $Q_u$  和  $Q_v$  分别为动量源、汇项. 水质变量输移方程中,  $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的紊动扩散系数,  $S_c$  是源汇项.

## 2 模型框架

### 2.1 研究区

“东深供水工程”是为解决深圳、香港地区居民生活用水,支持深港经济发展而兴建的大型跨流域调水工程.起点位于东江桥头泵站,经过深圳水库调节向深圳、香港地区供应原水.深圳水库是东深供水工程的终点调节水库,属中型水库,平均换水周期约 7 d,总库容  $4577 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,正常有效库容为  $3520 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,正常蓄水位 27.6 m,平均水深 7.0 m,最大水深 17.8 m,水面面积  $314 \text{ hm}^2$ . 水库主要补给为东深供水工程,平均入库流量为  $376 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,占总入流量的 95% 以上.本流域内降雨贡献率较低,主要支流包括沙湾河、梧桐山河和落马石河(图 2a).为保护深圳水库供水水质,在沙湾河河口建有截污闸坝,污水管道设计流量为  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ ,基本上可将沙湾河上游的污水拦截到污水处理厂,仅在发生强降雨时,超过流量的部分才进入水库.此外,在深圳水库库尾建有生物硝化处理工程,处理能力  $400 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,较大程度地解决了来水高氨氮问题.近年来,深圳水库的水体 100% 达到地表水Ⅲ类水质标准.

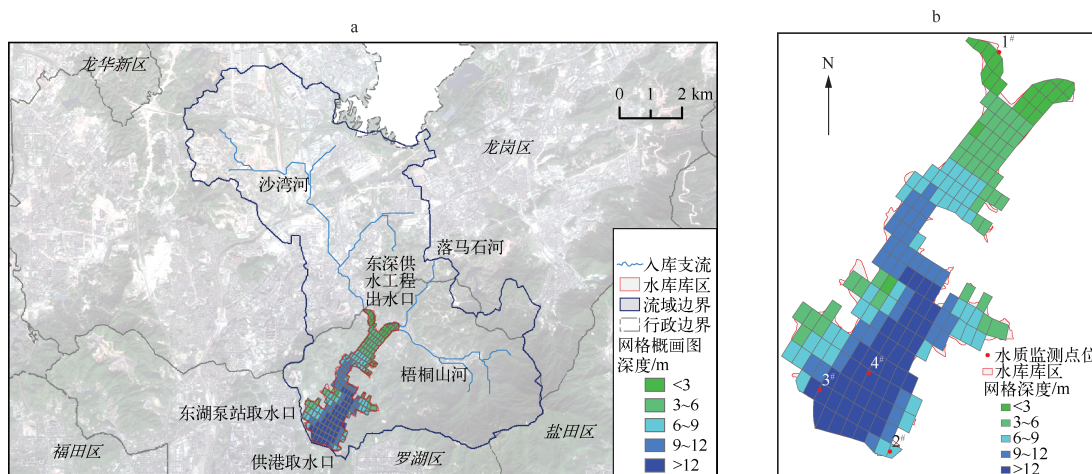


图2 深圳水库示意图(a)和网格概化图(b)

Fig. 2 Schematic diagram (a) and grids sketch (b) of Shenzhen Reservoir

## 2.2 模型构建

**2.2.1 网格生成** EFDC 是基于有限差分求解的数值模拟系统,因此首先要对深圳水库进行网格概化.为表征其复杂的几何特征和满足研究目标的需要,本研究采用三维网格.在水平方向采用正交曲线贴体网格,由EFDC自带的网格生成程序生成,共划分197个网格,各网格的水深根据水库水下地形插值计算而得(图2b).垂向采用标准 $\sigma$ 坐标系,分为10层,各层所占水深比例均为0.1.

**2.2.2 初始条件** 本研究模拟时段从2009年1月1日至2011年12月31日.初始水位设为2009年1月1日的观测值,为28.13 m.3个方向的初始速度分量均设为0 m/s.初始水质参数设为2009年1月初深圳水库4#监测点实测值,水温为17℃,总磷(TP)、总氮(TN)和氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )浓度分别为0.05、1.95和0.14 mg/L.

**2.2.3 边界条件** 模型边界条件包括动力边界和气象边界条件.动力边界条件为各入库支流、东深供水工程和各取水口水文及水质状况.水文资料采用广东粤港供水有限公司提供的每日水文监测数据,包括水库的库容和水位、东深供水工程及各支流流量、各取水口取水量等;水质数据采用深圳市环境监测中心站每月初常规饮用水监测数据,监测指标包括温度、溶解氧(DO)、营养盐和叶绿素a(Chl. a)等30项指标.东江引水氮、磷营养盐负荷分别为3515、120 t/a,分别占总负荷的95%、83%.气象边界条件包括气压、气温、相对湿度、降雨量、风向风速、云量等逐时数据,来源于深圳市气象局深圳水库自动站2009年1月1日至2011年12月31日自动监测逐时数据;研究区没有直接的太阳辐射观测资料,采用气候学计算方法获取<sup>[16]</sup>.

## 3 模型校正和验证

模型校正和验证是建立水动力和水质模型中至关重要的过程.本研究选择2009年作为校正期,2010—2011年作为验证期.模拟时间步长为15 s.用于校正和验证的变量包括水位、DO、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP和Chl. a.

### 3.1 模型校正

分析模型参数的敏感性,选定需要调整的参数,根据参数阈值范围,采用自动方法多次运行模型,使用既定的算法在较少的运行次数条件下找到全局最优解,以此确定参数值.模型校正包括水动力模块和水质模块参数校正,通过不断调整关键参数,使得上述变量模拟值与观测值之间差距最小.首先进行水动力模块校正包括水位和温度,深圳水库校正期水位和温度模拟值与观测值具有很好的一致性(图3),说明该模型能够准确反映深圳水库出入流量、降雨、蒸发等水文过程.水位最大绝对误差为0.65 m,决定系数( $R^2$ )为0.9874;温度最大绝对误差为2.2℃,决定系数为0.9413(图4).随后用所有站点表层和底层5项指标对水质模块进行校正,所有监测点表层和底层各项水质指标模拟值都能够较好地再现观测值的趋势,图4仅显示了位于库中的4#监测点表层各指标模拟值和观测值对比,其中DO、TP和TN指标的决定系数均大于0.9,

$\text{NH}_3\text{-N}$  模拟效果因个别误差导致  $R^2$  仅有 0.4827, 与模型和监测数据的不确定性有关. 通过模型校正后, 底部粗糙度取值为 0.02 m, 主要水质模块参数见表 1.

### 3.2 模型验证

为了进一步确定水动力和水质模型的可靠性, 在不改动已校正的模型参数情况下, 采用 2010—2011 年水文水质观测数据对模型进行验证. 对所有站点表层和底层 6 项指标进行对比分析, 所有指标都能很好地解释观测值的变化趋势, 位于库中的 4<sup>#</sup> 监测点表层各项指标模拟值和观测值对比表明, 水温、DO、TN、TP 依然具有较高的决定系

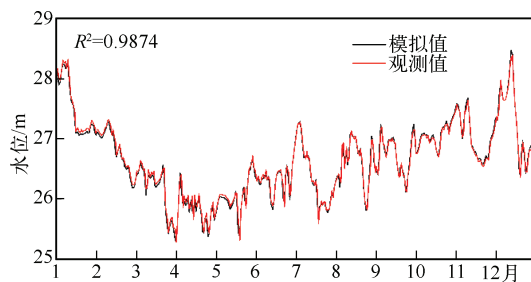


图 3 2009 年校正期水位模拟值和观测值对比

Fig. 3 Model calibration; simulated water level versus observed value in 2009

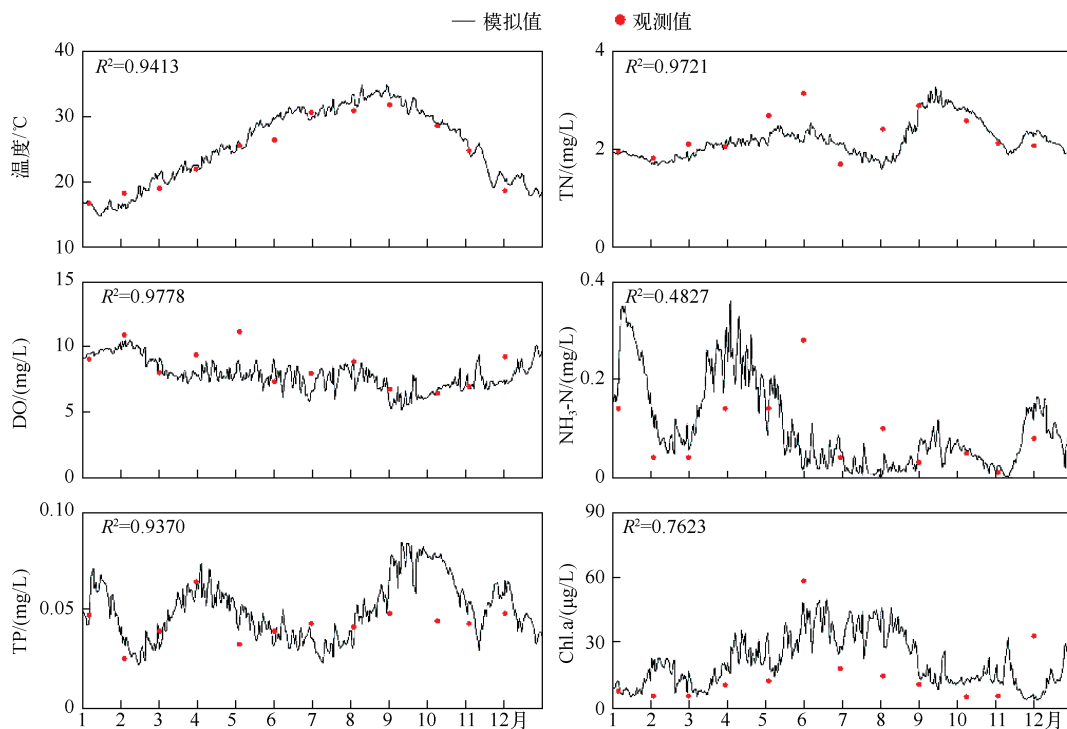


图 4 2009 年校正期 4<sup>#</sup> 监测点表层各项水质指标模拟值和观测值对比

Fig. 4 Model calibration; simulated water quality indicators versus observed value at 4<sup>#</sup> station in 2009

数, 2010 年 Chl. a 浓度模拟值比实测值偏高,  $\text{NH}_3\text{-N}$  在 2010 年 3 月和 7 月出现了明显偏差, 但总体趋势较好, 在 2010 年 1 月、2011 年 1 月和 3—4 月因枯水期东江引水浓度较高而形成明显的波峰(图 5). 总体来说, 经过校正和验证的模型能够准确地反映深圳水库的水动力和水质变化过程.

### 4 情景分析

模型通过校正和验证后, 定量分析一系列措施对水库富营养化的影响, 可为水环境管理提供依据. 本研究设置了 3 个情景: 情景一: 对深圳水库所有入库支流进行完全截排; 情景二: 通过水库调度, 在不超过东深供水工程负荷情况下增大引水流量 50% 并保持当前水质不变; 情景三: 东江引水水质改善, 氮、磷营养盐浓度削减 50%, 引水量不变.

表 1 校正模型后主要水质参数取值  
Tab. 1 Calibrated values for the key water quality parameters

参数	描述	取值	参考范围 <sup>[17]</sup>
PM <sub>e</sub>	蓝藻最大生长速率/d <sup>-1</sup>	2.5	0.2 ~ 9.0
PM <sub>d</sub>	硅藻最大生长速率/d <sup>-1</sup>	2.2	0.2 ~ 9.0
BMR <sub>e</sub>	蓝藻基础呼吸速率/d <sup>-1</sup>	0.12	0.01 ~ 0.92
BMR <sub>d</sub>	硅藻基础呼吸速率/d <sup>-1</sup>	0.04	0.01 ~ 0.92
PRR <sub>e</sub>	蓝藻捕集速率/d <sup>-1</sup>	0.01	0.03 ~ 0.3
PRR <sub>d</sub>	硅藻捕集速率/d <sup>-1</sup>	0.02	0.03 ~ 0.3
WS <sub>e</sub>	蓝藻沉降速率/(m/d)	0.2	0.001 ~ 13.2
WS <sub>d</sub>	硅藻沉降速率/(m/d)	0.2	0.001 ~ 13.2
TMR <sub>e</sub>	蓝藻生长最适温度范围/℃	24 ~ 30	N/A
TMR <sub>d</sub>	硅藻生长最适温度范围/℃	15 ~ 21	N/A
KHN <sub>x</sub>	藻类氮吸收半饱和常数/(mg/L)	0.012	0.006 ~ 4.32
KHP <sub>x</sub>	藻类磷吸收半饱和常数/(mg/L)	0.001	0.001 ~ 1.52
KE <sub>b</sub>	背景消光系数/m <sup>-1</sup>	0.3	0.25 ~ 0.45
Ke <sub>CHL</sub>	悬浮叶绿素消光系数/(1/m per μg/L)	0.017	0.002 ~ 0.02
K <sub>RC</sub>	难溶颗粒有机碳溶解速率/d <sup>-1</sup>	0.001	0.001
K <sub>LC</sub>	易溶颗粒有机碳溶解速率/d <sup>-1</sup>	0.04	0.01 ~ 0.63
K <sub>DC</sub>	溶解有机碳降解速率/d <sup>-1</sup>	0.04	0.01 ~ 0.63
K <sub>RP</sub>	难溶颗粒有机磷水解速率/d <sup>-1</sup>	0.001	0.001
K <sub>LP</sub>	易溶颗粒有机磷水解速率/d <sup>-1</sup>	0.04	0.01 ~ 0.63
K <sub>DP</sub>	溶解有机磷矿化速率/d <sup>-1</sup>	0.04	0.01 ~ 0.63
K <sub>RN</sub>	难溶颗粒有机氮水解速率/d <sup>-1</sup>	0.001	0.001
K <sub>LN</sub>	易溶颗粒有机氮水解速率/d <sup>-1</sup>	0.03	0.01 ~ 0.63
K <sub>DN</sub>	溶解有机氮矿化速率/d <sup>-1</sup>	0.03	0.01 ~ 0.63
rNitM	最大硝化速率/(mg N/(L · d))	0.06	0.001 ~ 1.3
WS <sub>tp</sub>	难溶颗粒有机质沉降速率/(m/d)	0.8	0.02 ~ 9.0
WS <sub>lp</sub>	易溶颗粒有机质沉降速率/(m/d)	0.8	0.02 ~ 9.0

表 2 不同情景 Chl. a 浓度模拟结果对比  
Tab. 2 Comparing of simulated chlorophyll-a concentration between baseline and different scenarios

模拟情景	Chl. a 平均浓度/ (μg/L)	变化幅度	Chl. a 峰值浓度/ (μg/L)	变化幅度
对照模拟	22.23	—	80.39	—
情景一	21.94	-1.3%	79.59	-1.0%
情景二	17.12	-29.8%	69.05	-16.4%
情景三	17.11	-29.9%	54.95	-46.3%

图 6 和表 2 定量说明了不同情景下深圳水库库中 4<sup>#</sup> 监测点表层 Chl. a 浓度与现状模拟值的对比。其中情景一模拟的 Chl. a 平均浓度、峰值均与现状模拟值非常接近,说明在目前沙湾河旱季污水截排的基础上,即使采用最极端的条件,将深圳水库其他所有入库支流进行完全截排,也不会对目前营养化状况有明显改善。情景二模拟的 Chl. a 浓度与现状模拟值相比,平均浓度下降 29.8%,仅有部分时段峰值浓度有所下降,在短期内东江引水水质

未有明显改善的情况下,可采取水库调度的方式,加快水库水体交换,能够有效改善深圳水库富营养化状况。情景三模拟的 Chl. a 浓度整体下降明显,平均浓度下降 29.9%,且对于峰值改善有明显的效果,峰值浓度下降 46.3%,因此东江引水水质的改善能够更加有效地改善深圳水库富营养化状况,是防止藻类暴发和水华发生最有效的手段。

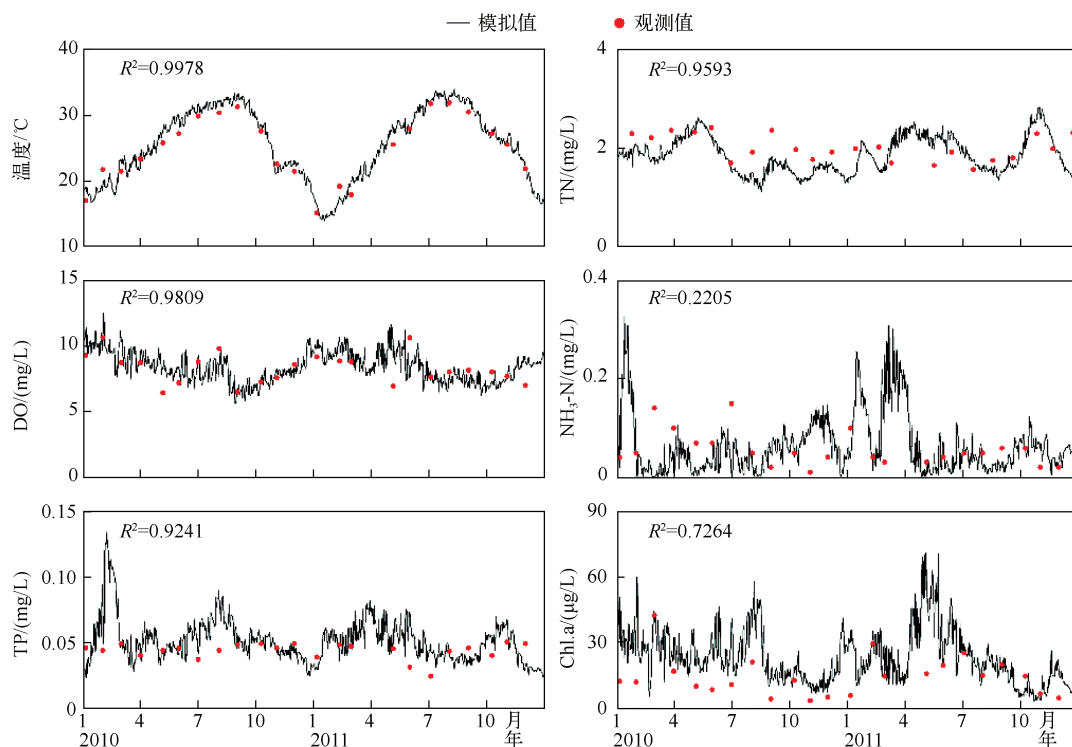
图5 验证期4<sup>#</sup>监测点表层各项水质指标模拟值和观测值对比(2010—2011年)

Fig. 5 Model validation: simulated water quality indicators versus observed value at 4<sup>#</sup> station during 2010 – 2011

## 5 结论

基于 EFDC 模型建立的深圳水库三维水动力和水质模型,通过本地化模型校正和验证,可以准确地定量反映深圳水库的水动力和水质变化过程.对深圳水库水环境管理和水质改善策略制定具有一定的参考价值.

1) 深圳水库具有较强的河流特征,水体交换能力强,目前尚未发生水华,但东江引水营养盐负荷高,具有较大的富营养化风险.

2) 仅针对深圳水库流域范围内污染控制,对水质改善和藻类控制作用并不明显,Chl. a 峰值浓度仅降低 1.0%;通过水库调度,增加东江引水流量,Chl. a 平均浓度下降 29.8%,峰值浓度下降 16.4%,可作为近期富营养化控制的有效手段;东江引水水质改善,氮、磷营养盐浓度削减一半,Chl. a 平均浓度下降 29.9%,峰值浓度下降 46.3%,能够对深圳水库营养状况起到明显作用.

3) 东江引水污染负荷对深圳水库贡献最大,存在直接导致藻类暴发的营养盐污染问题.全面

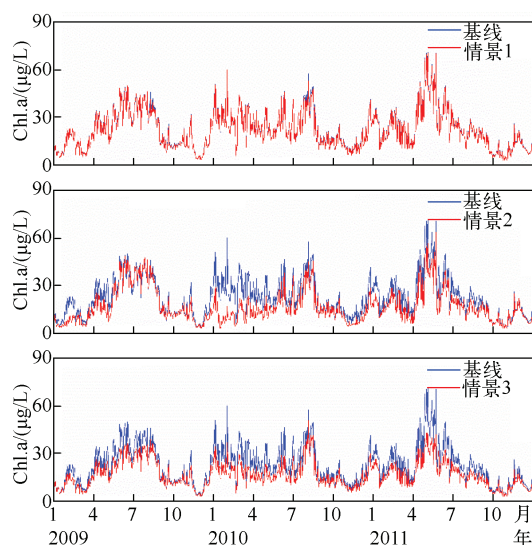


图6 不同情景 Chl. a 浓度模拟结果对比

Fig. 6 Comparing of simulated chlorophyll-a concentration between baseline and different scenarios

推动东深供水工程上游流域的管理和污染负荷控制才是有效保障深圳水库水质的长远措施.

## 6 参考文献

- [ 1 ] Conley DJ, Paerl HW, Howarth RW *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science*, 2009, **323**: 1014-1015.
- [ 2 ] Martins G, Ribeiro DC, Pacheco D *et al.* Prospective scenarios for water quality and ecological status in Lake Sete Cidades (Portugal): the integration of mathematical modelling in decision processes. *Applied Geochemistry*, 2008, **23**(8): 2171-2181.
- [ 3 ] Smith VH, Schindler DW. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology and Evolution*, 2009, **24**(4): 201-207.
- [ 4 ] 孔繁翔, 马荣华, 高俊峰等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践. *湖泊科学*, 2009, **21**(3): 314-328.
- [ 5 ] 邹 锐, 周 璟, 孙永健等. 垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1540-1548.
- [ 6 ] Li YP, Acharya K, Yu ZB. Modeling impacts of Yangtze River water transfer on water ages in Lake Taihu, China. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(2): 325-334.
- [ 7 ] Luo F, Li RJ. 3D Water environment simulation for North Jiangsu offshore sea based on EFDC. *Journal of Water Resource and Protection*, 2009, **1**(1): 41-47.
- [ 8 ] Peng S, Fu GYZ, Zhao XH *et al.* Integration of Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC) model with Geographical Information System (GIS) platform and its applications. *Journal of Environmental Informatics*, 2011, **17**(2): 75-82.
- [ 9 ] Seo D, Sigdel R, Kwon KH *et al.* 3-D hydrodynamic modeling of Yongdam Lake, Korea using EFDC. *Desalination and Water Treatment*, 2010, **19**: 42-48.
- [ 10 ] Shi JH, Li GX, Wang P. Anthropogenic influences on the tidal prism and water exchanges in Jiaozhou Bay, Qingdao, China. *Journal of Coastal Research*, 2011, **27**(1): 57-72.
- [ 11 ] Wu GZ, Xu ZX. Prediction of algal blooming using EFDC model: case study in the Daoxiang Lake. *Ecological Modelling*, 2011, **222**(6): 1245-1252.
- [ 12 ] Hamrick JM. A Three-Dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and Computational Aspects. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science. *Special Report*, 1992, **317**: 1-63.
- [ 13 ] 季振刚. 水动力学和水质——河流、湖泊及河口数值模拟. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [ 14 ] Tetra Tech, Inc. The Environmental Fluid Dynamics Code Theory and Computation Volume 1: Hydrodynamics and Mass Transport. Fairfax VA, 2007.
- [ 15 ] Tetra Tech, Inc. The Environmental Fluid Dynamics Code Theory and Computation Volume 3: Water Quality Module. Fairfax VA, 2007.
- [ 16 ] 高国栋. 气候学教程. 北京: 气象出版社, 1996: 82-88.
- [ 17 ] Wang Z, Zou R, Zhu X *et al.* Predicting lake water quality responses to load reduction: a three-dimensional modeling approach for total maximum daily load. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2013. doi: 10.1007/s13762-013-0210-7.