

西湖总磷模型构建及内循环引水效果分析

滑 磊, 尤爱菊, 韩曾萃, 腾 辉, 朱军政

(浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

摘 要:调水是目前快速改善湖泊水质的有效方法之一,但是对于调水所能达到的最佳效果研究很少。以杭州西湖为例,利用环境流体动力学模型 EFDC 构建了西湖 TP 模型,对通过苏堤各桥孔的流量、外西湖分层流场和水质浓度进行了验证,分析了在现有外围调水情况下增加西湖内循环引水后西湖 TP 的时空变化。模拟结果表明,增加内循环引水,直接将低浓度区的水引至高浓度区,能够明显降低高浓度区的水质;低浓度区由于引水量的减小,区域内水质浓度会有一定的上升;全湖平均水质浓度基本不会发生改变。在没有增加外部引水的情况下,内循环引水可以使湖泊水体掺混更加均匀,对于防止高浓度区富营养化有很好的效果。增加内循环引水对西湖改善高浓度区水质有一定的指导意义,同时也可作为相似湖泊增加内循环引水措施提供借鉴。

关键词:总磷模型;内循环引水;西湖;EFDC 模型

中图分类号:X524

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)04-0027-06

水体富营养化是目前国内外湖泊面临的主要问题之一,采用调水工程对湖泊水体中污染物进行稀释是现在普遍用到的一种快速减低污染物浓度的行之有效的方法,如引江济太^[1]、杭州西湖引水工程^[2]、武汉东湖引水工程^[3]等。目前国内各主要引水工程主要根据控制进出水口的位置、流量和水质浓度来达到改善湖泊水质的效果。然而对于很多城市内湖,由于城市的发展、湖泊的特性及进出水口位置的限制,一般调水流量和进出水口位置很难再做改变,调水时湖泊中难免会形成一定的水质高浓度区,不能充分发挥调水的作用,目前对调水所能发挥的最佳效果的研究很少。湖泊水质的数值模拟为湖泊水环境污染治理、规划决策分析提供了重要依据^[4]。本文以杭州西湖为例构建了西湖三维水动力水质耦合模型,研究探讨了西湖现状引水方式下增加不同内循环布置后西湖 TP 浓度的空间变化,可为湖泊调水过程中提高调水效果提供一定的借鉴。

1 西湖概况

杭州西湖是主要的观赏性淡水湖泊之一,在我国的历史文化和风景名胜中占有重要地位。西湖总面积

约 6.38km²,主要进出水口位置见图 1。西湖以苏堤为界,苏堤以西为西里湖,苏堤以东为外西湖,西里湖与外西湖通过 6 个桥孔相连(见图 1),6 个桥孔宽约 5~10m,各桥孔两段有一定的水位差。自 2003 年西湖实施大规模引水以来,西湖日引水量为 40×10⁴t,其中小南湖进水为 27×10⁴t/d,长桥进水 3×10⁴t/d,其余 10×10⁴t 从黄蔑楼、乌龟潭、醉白楼三个进水口进入西湖,圣塘闸出水约为 20×10⁴t/d,岳湖泵站往外抽水为 10×10⁴t/d。北里湖引水工程实施后,每天从西里湖引水 2×10⁴t 至北里湖分四个出水口出水。

实施引水以来,西湖水质呈逐年好转的趋势。引水直接进入苏堤以西的西里湖,西里湖的水质明显好于外西湖(见图 2)。外西湖的水质仍然呈现出很强的季节性,TP 是西湖水质主要的超标因子,现状引水情况下 2013 年 3~6 月外湖、长桥两个常规监测点 TP 浓度都在 0.04mg/L 左右,然而 7~8 月两个监测点 TP 浓度迅速升高达到了 0.08mg/L 以上,9 月以后 TP 浓度逐渐下降。而西里湖 TP 浓度一直保持在 0.06mg/L 以下。因此西湖现状最突出的矛盾是水质时空分布不均匀,TP 同时也是西湖富营养化的主要限制性因子^[5]。本文着重分析增加内循环引水对外西湖 TP 的影响。

收稿日期:2014-06-09

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-007-005)

作者简介:滑磊(1986-),男,山西洪洞人,硕士,主要从事水环境数值模拟、河湖生态修复研究。E-mail:hualei1212@gmail.com

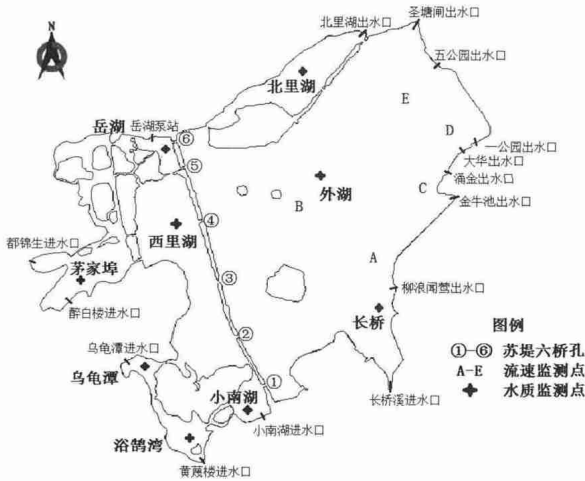


图1 西湖主要进出水口及监测点位置图

Fig.1 The main inlets and outlets, and monitoring points in the West Lake

2 西湖三维 TP 模型构建及验证

2.1 模型构建

采用环境流体动力学模型 EFDC (Environmental Fluid Dynamic Code) 构建,EFDC 模型最初由美国弗吉尼亚大学海洋科学研究所的 Hamrick^[6]开发,现由美国环境保护署(EPA)继续资助研发,用来模拟河流、湖泊、河口、水库、湿地、近岸海域的流场、物质传输和生物化学过程的模型。为精确模拟西湖水动力学过程,同时兼顾考虑模型计算时间,西湖网格采用曲线正交网格,共划分网格 18 578 个,网格距 2~30m 不等,各桥孔处对网格进行加密处理。根据西湖现场观测,西湖流场和浓度场存在垂向分层的现象,同时为了较好地模拟湖底地形,垂直方向采用 σ 坐标,平均分为 3 层,用湖底和表层水体厚度来定义垂向网格的高度。根据流体静力学连续性和避免产生 σ 坐标带来的压力梯度错误,应使湖底坡度小于 0.33^[1]。

模型模拟时间段为 2013 年 6 月 17 日~8 月 12 日(西湖 TP 浓度逐渐升高的时间段),模型初始水位采用常水位 7.1m。气象资料采用西湖周边 4 个气象站的逐日观测数据(包括风场、温度、降雨等)。各进出水口采用流量边界,根据实际进出水量进行控制。初始 TP 浓度采用 2013 年 6 月 17 日 10 个常规采样点(见图 1) TP 浓度内插得到。西湖主要进水口分布在西里湖西侧,流域产流也来源于同侧,由于缺乏西湖西侧降雨径流产磷资料,同时本次分析主要关注内循环对外西湖的影响,对边界条件进行简化处理,采用各进水口附近每月一次的实测常规采样点的水质数据作为模型的边

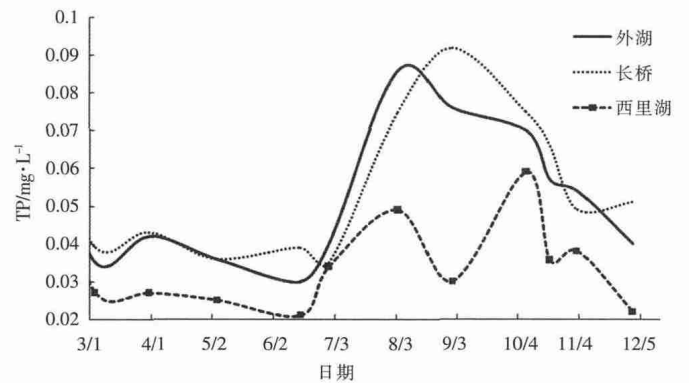


图2 2013 年 3~12 月外西湖和西里湖三个常规监测点 TP 浓度
Fig.2 TP concentration at the 3 conventional monitoring points in the West Lake from March to December, 2013

界条件输入模型。长桥进水口的来水为引水与山溪的混合水,实际 TP 浓度保持在 0.025mg/L 左右,模型中直接取 0.025mg/L。

2.2 模型验证及主要参数选取

本次主要分析内循环引水对外西湖水质的改善效果,苏堤 6 个桥孔进出外西湖的流量对外西湖流场、水质空间分布有直接的影响,因此,对苏堤 6 个桥孔的流量经行验证。根据 2013 年西湖现场观测,正常引水时进出苏堤各桥孔的流量基本稳定,模型计算各桥孔流量与实测值对比见表 1。

表1 苏堤由南向北各桥孔流量实测值与计算值对比 m^3/s
Table1 Comparison between the observed and calculated flow at the 6 bridge openings under the Sudi dyke

桥孔	1	2	3	4	5	6
实测值	1.65	0.19	0.16	0.18	-0.14	-0.26
计算值	1.68	0.19	0.20	0.22	-0.13	-0.22

注:正值表示从西里湖进入外西湖,负值相反。

由表 1 可知,构建的西湖水动力模型进出苏堤各桥孔的流量基本与实际相符,误差绝对值在 0.04m³/s 以内。

根据多次西湖现场观测,小南湖与外西湖水位差在 4~7mm 之间,外西湖小南湖附近与圣塘闸出口附近水位差在 1mm 以内。模型中通过调整西里湖与外西湖底部粗糙高度来实现小南湖与外西湖的水位差,西里湖与外西湖底部粗糙高度分别为 0.05m 和 0.003m 时,小南湖、外西湖小南湖附近和圣塘闸附近水位分别为 7.1178m、7.1130m 和 7.1128m,水位差与实际观测基本接近。

根据夏新华^[7]等人的文献,外西湖重力场一般为 mm 级,有风场作用时能达到 cm 级。然而根据实际观测,即使在风速很小(<0.5m/s)的情况下,由于游船和波浪的影响,外西湖的流速仍在 1cm/s 左右,且存在垂向分层的现象。分层模拟可知,西湖整体流速为 cm 级,存在分层现象,各进出水口附近和桥孔处流速较大,外西湖大部分区域流速较小,在 1cm/s 左右。西湖模拟流场值与实测值见表 2,监测点(见图 1)流速大小与实测基本相符,但由于风场随机性较大和游船干扰,实测流向变化较大,模拟与实测差异较大,因此没有列出。

综上所述,本次构建的西湖水动力学模型能够很好的反映西湖的水动力过程。

表2 外西湖流场模拟值与实测值对比 (cm/s)
Table2 Comparison between the observed and calculated velocities in the West Lake (cm/s)

		点位 A	点位 B	点位 C	点位 D	点位 E
表层	实测	0.9	0.8	1.5	1.3	0.6
	模拟	1.25	0.57	1.49	0.94	0.84
底层	实测	1.1	1	1	0.7	0.4
	模拟	0.96	0.83	1.76	0.56	0.49

采用 6 月 24 日和 8 月 12 日西湖加密观测点的 TP 浓度对模型进行验证,单因子 TP 模型主要考虑 TP 的降解和底泥释放,调整模型 TP 降解系数为 0.14/d,底泥释放系数为 3.3mg/m²/d,模型所取降解系数和底泥释放系数在韩曾萃等人^[8]根据实验结果和经验公式推算出的两个系数的取值范围之内。由模拟结果(见图3)

可知,各监测点 TP 浓度误差基本在±0.01mg/L 以内,相对误差基本都在±20%以内,说明模型参数选取合理,构建的西湖 TP 模型能够反映西湖这段时间内 TP 的时空分布。

2.3 不同内循环方案模拟

由模拟所得 8 月份西湖 TP 浓度空间(见图 3 b)分布可知,从小南湖和长桥到圣塘闸和岳湖泵站,TP 浓度逐渐增加。由于引水主要通过圣塘闸和岳湖泵站排出,其他出水口出水流量有限,外西湖东侧和北侧水体与引水交换较差,TP 浓度普遍比较高,全湖 TP 浓度差异很大,现状的西湖引水工程对外西湖东侧和北侧水体的改善效果较差。因此,西湖引水分配不合理,现状引水存在高浓度区^[9]是西湖现状面临的主要问题。同时,结合西湖实际情况,增加其他出水口的出水流量的方案不可行。因此,增加西湖内循环,将小南湖进水口附近和西里湖水质较好的水直接抽至高浓度区,达到掺混均匀是一个可行的方案。

为便于分析增加内循环对水质的改善效果,将外西湖分为三个区域(见图 4),A 区为现状水质较好的区域,B 区为外西湖北侧水质较差的区域,C 区为外西湖东侧水质较差的区域。考虑在现状基础上分别从小南湖和西里湖通过水管道引水至高浓度区(见图 4),针对西里湖向 B 区引水和从小南湖向 C 区引水分别设计了三种工况:工况 1,分别引水 10 000 t/d;工况 2,分别引水 20 000 t/d;工况 3,分别引水 30 000 t/d。分析现状基础上增加内循环后西湖 8 月份 TP 的空间分布。

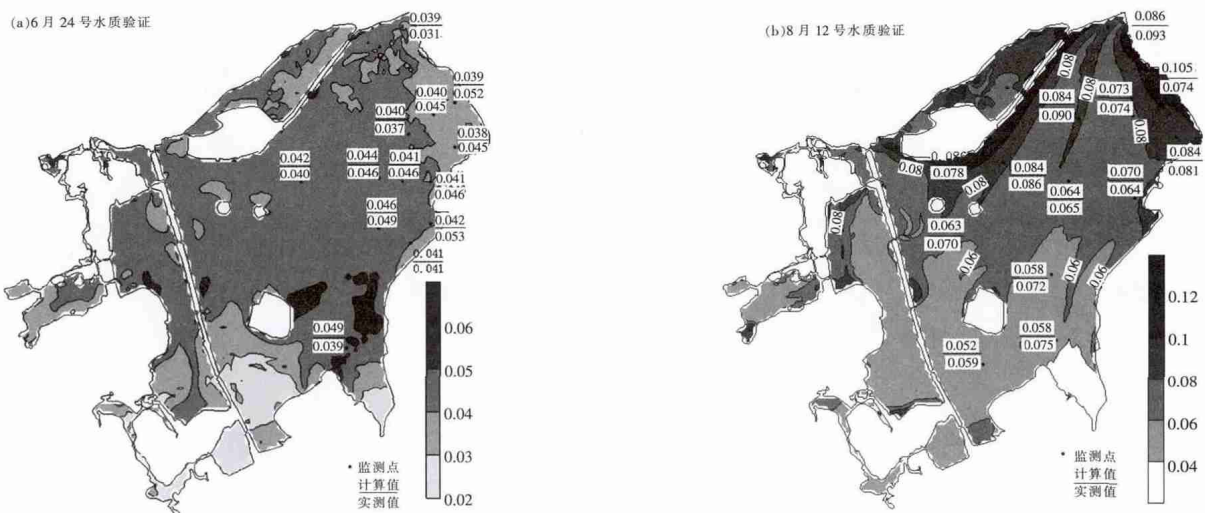


图3 西湖各监测点 TP 浓度验证;a. 6月24日;b. 8月12日 (单位:mg/L)
Fig.3 The verification of TP concentration in the West Lake: a. June 24th; b. August 12th

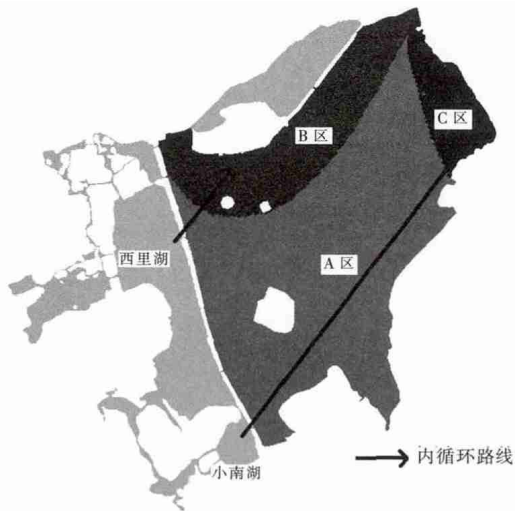


图4 外西湖分区及内循环引水线路
Fig.4 The partitions and internal circulation water transfer lines in the West Lake

3 结果与讨论

3.1 TP 空间分布模拟结果

从模拟的最后一天结果来看(见图5),在现状基础上增加小南湖和西里湖至外西湖的内循环引水以后,外西湖 TP 的空间分布趋于均匀,高浓度区(TP 浓度大于 0.08mg/L)范围明显较小,且随着引水流量的增加,浓度大于 0.1mg/L 的区域基本消失,说明增加内循环对减低西湖高浓度区水质浓度有一定的效果。

由现状及各工况 A、B、C 三区 TP 浓度范围占各自区域的面积比可知(见表3),增加西湖内循环引水以后,随着引水流量的增加,A 区低浓度区的范围逐渐减小,高浓度区逐渐增加;而 B 区和 C 区与 A 区正好相反。以 C 区为例,现状情况下,TP 浓度都在 0.06mg/L

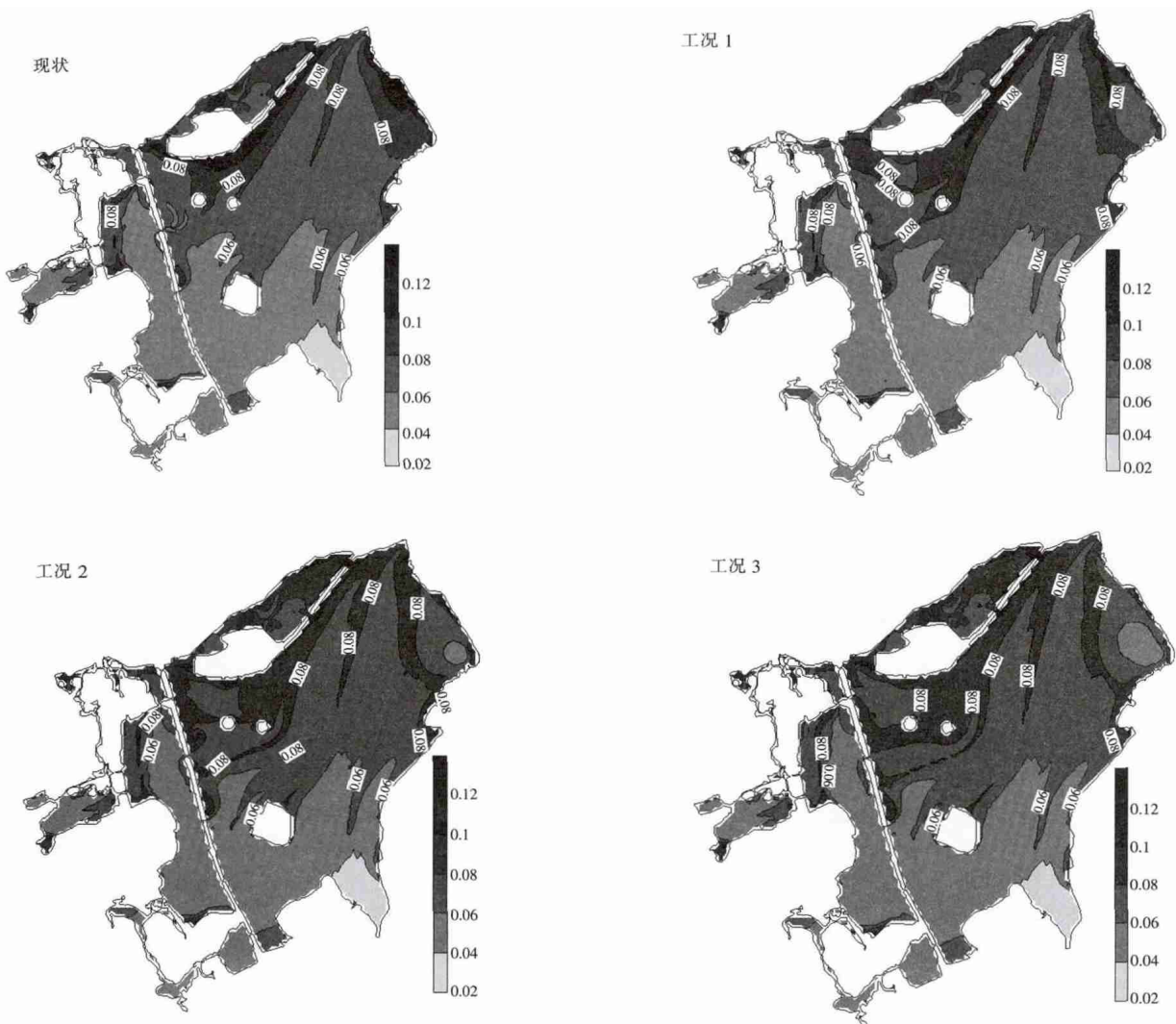


图5 现状及各工况模拟最后一天(8月12日)TP空间分布(单位:mg/L)
Fig.5 TP concentration distribution in the different cases

以上,且TP浓度大于0.08mg/L的区域占该区域面积的86%。增加内循环后,C区随着引水量的增加,TP低浓度区(TP浓度小于0.08mg/L)逐渐增加,高浓度区逐渐减小。内循环引水分别为10000t/d、20000t/d、30000t/d时,低浓度区所占面积比由现状的14%分别增加至30%、57%和75%,高浓度区所占面积比由现状的86%分别减小至70%、43%和25%,增加内循环引水后,C区水质得到明显改善。

3.2 内循环影响分析

统计计算模拟时段内外西湖3个分区及全西湖每日的TP平均浓度(见图6)可知,直接将小南湖和西里湖低浓度区的好水引至外西湖高浓度区B区和C区,对改善外西湖高浓度区水质有明显效果。与现状相比,内循环引水流量分别为10000t/d、20000t/d、30000t/d时,B区和C区第56天(模拟最后一天)TP平均浓度都分别降低了0.004mg/L、0.008mg/L和0.01mg/L。从小南湖和西里湖直接引水至B区和C区,减少了小南湖和西里湖与A区的水量交换,A区TP的平均浓度有一定的上升,与现状相比,各工况A区第56天TP平均浓度分别升高了0.001mg/L、0.002mg/L和0.003mg/L。增加内

循环后A区TP浓度的升高幅度远小于B区和C区TP降低的幅度;同时现状情况下,B区和C区与A区的浓度差为0.022mg/L和0.025mg/L,内循环增加引水至30000t/d时,该浓度差为0.008mg/L和0.012mg/L,三个湖区TP浓度趋于均匀。由于现状及各工况西湖进出水格局没有发生变化,总体从小南湖和西里湖进入外湖的水量不会减小,从小南湖、西里湖和全湖TP浓度的平均值(见图6d、图6e、图6f)来看,现状及各工况模拟时段内TP平均浓度基本保持不变,因此增加内循环引水不会引起全湖及小南湖和西里湖TP平均浓度大的改变。

总体来说,通过对比西湖现状及增加内循环引水后TP空间分布结果可知,增加湖泊内循环引水,直接将低浓度的水引至高浓度区,对改善高浓度区的水质有很好的效果。虽然增加内循环引水对原来的低浓度区的水质有一定的影响,但是整体而言,内循环引水可使湖泊水体掺混更加均匀,对防止高浓度区富营养化有很好的效果。对于很多城市景观湖泊,由于城市的发展和湖泊引配水条件的限制,很难再做较大的工程实施大规模的引水来改善湖泊的水质,控制污染源是一个必要措施;同时,通过增加湖泊内部循环引水,将现有引水对水质的

表3 现状及各工况各区TP浓度范围所占该区域面积比
Table3 The area rate of the different TP concentration range in their own areas

TP 浓度	A 区				B 区				C 区			
	现状	工况 1	工况 2	工况 3	现状	工况 1	工况 2	工况 3	现状	工况 1	工况 2	工况 3
<0.06	44%	42%	40%	38%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	10%	23%
0.06~0.08	53%	53%	51%	50%	37%	41%	43%	44%	14%	28%	47%	52%
0.08~0.1	3%	5%	9%	12%	42%	43%	46%	46%	56%	54%	35%	22%
>0.1	0%	0%	0%	0%	21%	16%	11%	10%	30%	16%	8%	3%

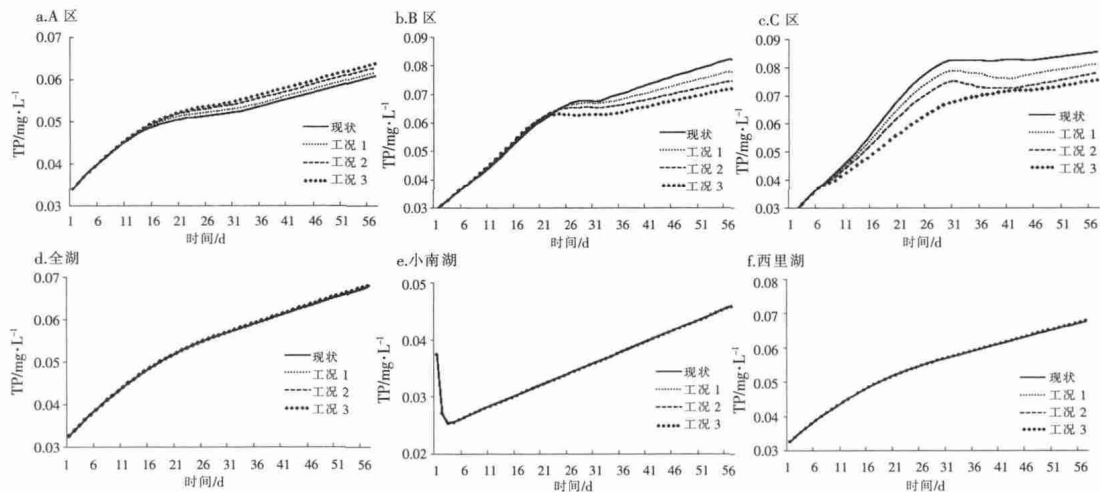


图6 现状及各工况模拟时段内TP平均浓度
a.A区; b.B区; c.C区; d.全湖; e.小南湖; f.西里湖

Fig.6 TP average concentration during the simulation time frame in different cases

改善效果发挥到最大,也是改善湖泊水质的一个有效途径。内循环引水可充分发挥湖泊内在的潜力,在不增加外部调水的情况下对目标区域的水质进行改善,既不会对周边环境产生影响,同时具有一定的经济性。

4 结论

本文以西湖为例,利用 EFDC 模型构建了西湖 TP 模型,对通过苏堤各桥孔的流量、外西湖分层流场和水质浓度进行了验证,验证结果表明,构建的模型能很好的反映西湖 6~8 月份 TP 的时空变化情况。利用该模型模拟了三种工况下增加西湖内循环引水后西湖外湖区的 TP 时空分布情况,得出如下结论:

(1)增加内循环引水,直接将低浓度区的水引至高浓度区,能够明显降低高浓度区的 TP 浓度。

(2)增加内循环引水,低浓度区由于引水量的减小,区域内水质浓度会有一定上升。

(3)增加内循环引水后全湖平均水质浓度基本不会发生改变;但是内循环引水可以使湖泊水体掺混更加均匀,对于防止高浓度区富营养化有很好的效果。合理的内循环引水可以使现有的调水发挥更大效果,在没有增加外部引水的情况下达到改善高浓度区水质的目的。

参考文献:

- [1] Li YP, Acharya K, Yu ZB. Modeling impacts of Yangtze River water transfer on water ages in Lake Taihu, China [J]. *Ecological Engineering*, 2011,37:325-334.
- [2] 朱军政, 韩曾萃. 西湖 TP 浓度对引水配置布局的响应 [J]. *水文*, 2013,33(5):34-38. (ZHU Junzheng, HAN Zengcui. Response of total phosphorous concentration to water diversion allocation in West Lake[J]. *Journal of China Hydrology*, 2013,33(5):34-38. (in Chinese))
- [3] 余成,任宪友,班璇,等. 二维水质模型在武汉东湖引水工程中的应用[J]. *湖泊科学*, 2012,24 (1):43-50. (YU Cheng, REN Xianyou, BAN Xuan, et al. Application of two-dimensional water quality model in the project of the water diversion in East Lake, Wuhan [J]. *Journal of Lake Science*, 2012,24(1):43-50. (in Chinese))
- [4] 王金保,李媛媛. 湖泊水质模型研究进展[J]. *长江流域资源与环境*, 2007,16(6):805-809. (WAN Jinbao, LI Yuanyuan. Progress in the research of lake water quality model [J]. *Resources and Environment in the Yangtza Basin*, 2007,16(6):805-809. (in Chinese))
- [5] 张志兵,施心路,刘桂杰,等. 杭州西湖浮游藻类变化规律与水质的关系 [J]. *生态学报*, 2009,29 (6):2980-2988. (ZHANG Zhibing, SHI Xinlu, LIU Guijie, et al. The relationship between planktonic algae changes and the water quality of the West Lake, Hangzhou, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009,29(6):2980-2988. (in Chinese))
- [6] Hamrick J. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: theoretical and computational aspects [A]. Special Report 317 [C]. College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, 1992.
- [7] 夏新华,曹飞凤,楼章华. 引水工程前后西湖流场的数值模拟研究 [J]. *上海环境科学*, 2008,27(3):99-103. (XIA Xinhua, CAO Feifeng, LOU Zhanghua, et al. A study on the numerical simulation of flow field in West Lake in response to diversion works [J]. *Shanghai Environmental Science*, 2008,27(3):99-103. (in Chinese))
- [8] 韩曾萃,朱军政,江影,等. 杭州西湖总磷模型及其治理应用(I) [J]. *环境污染与防治*, 2005,27 (2):139-141. (HAN Zengcui, ZHU Junzheng, JIANG Ying, et al. Total phosphorus model and management application in West Lake (I) [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2005,27(2):139-141. (in Chinese))
- [9] 韩曾萃,朱军政,江影,等. 杭州西湖总磷模型及其治理应用(II) [J]. *环境污染与防治*, 2005,27 (3):181-183. (HAN Zengcui, ZHU Junzheng, JIANG Ying, et al. Total phosphorus model and management application in West Lake (II) [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2005,27(3):181-183. (in Chinese))

Total Phosphorus Model Construction and Analysis of Internal Circulation Water Transfer in West Lake

HUA Lei, YOU Aiju, HAN Zengcui, TENG Hui, ZHU Junzheng

(Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 301120, China)

Abstract: Water transfer is an effective approach to improve water quality in the lake. However, there is almost no research focusing on optimum efficiency of water transfer. As a case study of West Lake in Hangzhou City, total phosphorus (TP) model with environmental fluid dynamic code (EFDC) was built. And the water quantity across Sudi, velocities in different layers and water quality were verified. The spatial and temporal distributions of TP concentration with and without internal circulation water transfer were analyzed. The results show that, after increase the internal circulation water transfer, the water in low concentration area was transferred to the high concentration area, which can decrease the TP concentration in high concentration area. Because of the decrease of water quantity in low concentration area, TP concentration was increased in low concentration area. However, the average concentration in the whole lake was remained fairly static. In the condition of same external diversion, the concentration of water quality is more evenly distributed after increase internal circulation water transfer, which has an advantage to avoid the eutrophication in high concentration area. Increase of internal circulation water transfer has a guiding significance for improving the water quality in West Lake, and provides a reference for the similar lakes.

Key words: total phosphorus model; internal circulation water transfer; West Lake; EFDC model