

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2013.06.005

# 基于 SCE-UA 算法的河网水系水闸调度模拟

邢宝龙<sup>1</sup>, 薛联青<sup>1</sup>, 陈奕<sup>2</sup>, 段小兰<sup>2</sup>, 王思琪<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 福州市规划设计研究院, 福建 福州 350003)

**摘要:**建立福州市江北城区内河水系水动力水质耦合模型,利用 SCE-UA 算法对水闸调度参数进行优化。结果表明,SCE-UA 算法可用于水文模型参数的率定和河网水系水闸调度系统优化参数的识别。在待优化的区域单独建模,将生态补水规划模拟计算结果为优化区域提供边界,结果使模型计算时间大大减少。将优化后的参数代入原模型进行检验,效果令人满意。

**关键词:**水闸调度;参数优化;SCE-UA 算法;福州内河;MIKE11 模型

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2013)06-0026-05

## Simulation of river network with sluice operation based on SCE-UA algorithm

XING Baolong<sup>1</sup>, XUE Lianqing<sup>1</sup>, CHEN Yi<sup>2</sup>, DUAN Xiaolan<sup>2</sup>, WANG Siqi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Fuzhou Planning Design and Research Institute, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** A coupled hydrodynamic and water quality model was established for the urban inland river network of Fuzhou City. The SCE-UA algorithm was used for the optimization of the sluice operation parameters. The optimization results show that the algorithm can be used to calibrate hydrologic model parameters and recognize the optimized parameters of the river network's sluice operation system. The region to be optimized can be modeled individually, using the boundaries provided by ecological replenishment planning simulation results, and the optimization time was reduced greatly. The results of the test of the optimized parameters in the original model were satisfactory.

**Key words:** sluice operation; parameter optimization; SCE-UA algorithm; inland river network of Fuzhou City; MIKE11 model

## 1 研究背景

引清调度过程中,需要利用水工建筑物对水流进行调控,如通过闸门保持一定的开度,使过闸流量得到限制,或通过修建景观水闸,可使得河道保持一定的景观水位且水质满足要求。分流口分流量的不同,河道会有不同水动力条件,通过在分流口分配合理的流量,使得引清效果达到最大。这些都可以通过建立相应的系统优化模型来求解<sup>[1-7]</sup>。然而在系

统优化过程中需要频繁地调用模型计算系统的输出,要耗费大量的时间。采用神经网络拟合相应的模型,通过优化算法调用神经网络进行求解,可大大减少模型计算时间,但是在拟合复杂模型时能力尚显不足,且无有效的误差分析方法。SCE-UA 算法最早应用于水文模型的参数率定<sup>[8-10]</sup>,文献[11]将 SCE-UA 算法与遗传算法、单纯形算法进行比较,结果显示,SCE-UA 算法在水文模型参数率定过程中具有明显的优势。由于水闸调度参数的优化与水文

基金项目:水利部公益项目(201001057, 201001066);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项(2011585512, 2009585512);中央高校基本科研业务费专项(2009B06814);江苏高校优势学科建设工程资助项目;河海大学创新人才计划资助项目

作者简介:邢宝龙(1988—),男,硕士研究生,研究方向为生态水文学及生态水力学。E-mail: xingbaolong8888@126.com

模型参数的率定过程具有相似性,本研究尝试利用 SCE-UA 算法对水闸调度优化参数进行识别。

## 2 水动力水质耦合模型简介

河道一维水动力模型的控制方程为圣维南方程组:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{q}{B} \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left( gA - \frac{BQ^2}{A^2} \right) \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} - \frac{gQ|Q|}{c^2 AR} \quad (2)$$

式中: $Z$  为水位,  $m$ ;  $Q$  为流量,  $m^3/s$ ;  $A$  为过水断面面积,  $m^2$ ;  $B$  为过水断面宽度,  $m$ ;  $q$  为河道旁侧入流单宽流量,  $m^2/s$ ;  $R$  为水力半径,  $m$ ;  $c$  为谢才系数,  $c = R^{1/6}/n$ ,  $n$  为糙率系数;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $x, t$  分别为位置和时间的坐标。

水质模型的控制方程为一维对流扩散方程:

$$\frac{\partial A\rho}{\partial t} + \frac{\partial Q\rho}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left[ AD \frac{\partial \rho}{\partial x} \right] = -AK\rho + \rho_2 q \quad (3)$$

其中  $D = aV^b$   
式中: $\rho$  为污染物质量浓度;  $D$  为纵向扩散系数;  $K$  为线性衰减系数;  $\rho_2$  为污染源汇质量浓度;  $V$  为流速;  $a, b$  分别污染物扩散系数与指数。

对圣维南方程组采用 Abbott 六点隐式格式进行离散,形成河道方程。河道方程各节点处的水力要素可以表达为单一河道上下游端点的水位函数,将该函数代入有连续性条件得出的汉点方程组中,便可以得出由汉点水位构成的线性方程组。水工建筑物的河道方程由相应的水力学公式代替,并对其进行线性化处理,形成与上述方程类似的线性方程。污染物一维对流扩散模型采用时间和空间中心隐式差分格式离散,形成线性方程组。对上述方程组代入边界条件和初始条件,并用双扫法对其进行求解,便可以得到在计算时段内任意时刻各离散点的水位、流量及断面污染物的质量浓度。

## 3 SCE-UA 算法简介

SCE-UA 算法是一种全局优化算法,具体步骤<sup>[8-10]</sup>如下:

第 1 步:初始化。假定待优化问题为  $n$  维问题,选取参与进化的复合形个数  $p(p \geq 1)$  和每个复合形所包含的顶点数  $m(m \geq n+1)$ ,计算样本点数目  $s=pm$ 。

第 2 步:产生样本点。在可行域内随机产生  $s$  个样本点  $x_1, x_2, \dots, x_s$ ,分别计算每一点  $x_i$  的函数值  $f_i=f(x_i), i=1, 2, \dots, s$ 。

第 3 步:样本点排序。把  $s$  个样本点  $(x_i, f_i)$  按函

数值升序排列,排序后仍记为  $((x_i, f_i), i=1, 2, \dots, s)$ ,其中  $f_1 \leq f_2 \leq f_s$ ,记  $M = \{(x_i, f_i), i=1, 2, \dots, s\}$ 。

第 4 步:划分复合形群体。将  $M$  划分为  $p$  个复合形  $A_1, \dots, A_p$ ,每个复合形含有  $m$  个顶点,其中  $A^k = \{(x_j^k, f_j^k) | x_j^k = x_{k+p(j-1)}, f_j^k = f_{k+p(j-1)}, j=1, 2, \dots, m\}, k=1, 2, \dots, p$ 。

第 5 步:复合形进化。按复合形进化算法 (CCE) 分别进化各个复合形。

第 6 步:复合形混合。把进化后的每个复合形的所有顶点组合成新的点集,再次按函数值  $f_i$  升序排列,排列后仍记为  $M$ ,对  $M$  按目标函数升序进行排列。

第 7 步:收敛性判断。如果满足收敛条件则停止,否则返回第 4 步。

## 4 系统优化模型构建

河网水系水闸调度是一个多目标优化问题,其中每个目标点的评价函数可用公式(4)表示:

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2} \quad (4)$$

式中: $O_i$  与  $S_i (i=1, 2, \dots, n)$  分别为第  $i$  个目标值与模拟值的时间序列;  $R_{\text{RMSE}}$  为均方误差。

为了把多目标优化转化为单一目标,可以对不同的评价函数加一个权重。系统的目标函数如公式(5)的形式:

$$F_{\text{pool},i} = \sum_{j=1}^n w_j F_j \quad (5)$$

式中: $F_j$  为第  $j$  个评价函数,  $w_j (j=1, 2, \dots, n)$  为相应评价函数的权重,  $n$  为评价函数的个数。此次优化中,各评价函数的权重为 1。

水工建筑物调度参数的优选可以形成如下的非线性优化问题,如公式(6):

$$\begin{aligned} \min F(\theta), \theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \\ \text{s. t. } \theta \in R^n | \theta_{\min,i} \leq \theta_i \leq \theta_{\max,i}; \forall i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\theta_{\min,i}$  和  $\theta_{\max,i}$  分别为  $n$  个参数的取值上下限。

## 5 模型的实现

本研究采用 MIKE11 商业软件对河网进行建模,并利用 Auto-Calibration 工具耦合模型实现系统模型的构建,详细步骤可参考文献[12]。

## 6 应用实例

### 6.1 福州市江北城区内河水系模型

模型的计算区域为福州市江北城区内河水系(图1)。图1中,数字为相应河道的分流量( $m^3/s$ )。

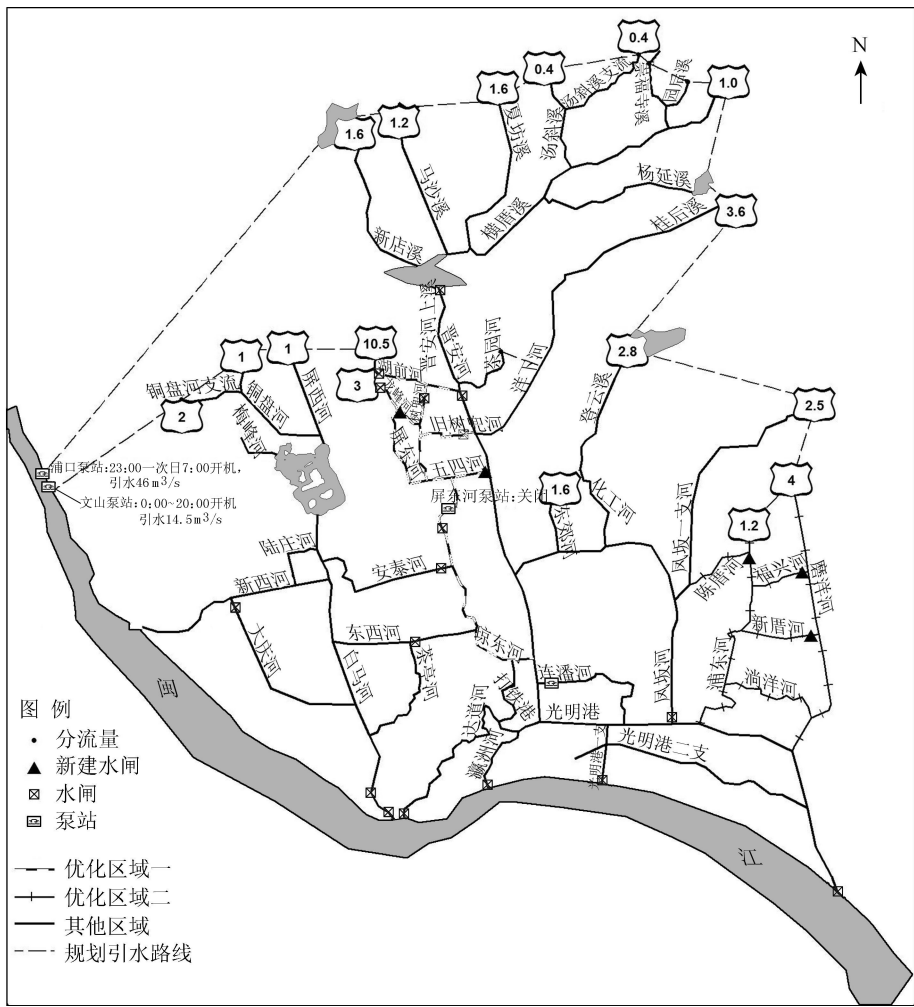


图1 福州市江北城区内河水系及规划生态补水线路

根据福州市江北城区生活污水以及截污率状况,计算面源污染量,依据河长平均分配到各河道,现状截污率约为 50%。由于实测结果显示氨氮超标最为严重,故而选取氨氮为模拟污染因子,并假定其衰减符合一级反应动力学规律。根据前人对该区域研究的结果<sup>[13-14]</sup>,对参数进行初步给定,并根据 2012 年 8 月与 10 月的实测资料(1:00—次日 0:00 为模型计算时段),对参数进行微调,使与实测值吻合。最后确定水动力学模型最为敏感的参数糙率  $n$  在 0.022 ~ 0.040 之间,氨氮的衰减系数  $K$  为  $0.1d^{-1}$ ,扩散系数推求经验公式中的系数  $a$  为 6,  $b$  为 0。模型的验证情况见图 2 和表 1。本研究采用福州市地方高程坐标系——罗零高程坐标系,单位为 m。

表 1 各断面水质(氨氮)模拟验证结果

断面名称	实测值/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	计算值/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	相对误差 误差/%
新河 5 号	0.659	0.77	14.4
晋安河 2 号	0.736	0.70	5.1
光明港 1 号	1.460	1.74	16.1
洋下河	19.800	16.00	23.8
化工河	1.040	1.69	38.5
琼东河	2.210	2.20	0.5
白马河 1 号	1.980	2.00	1.0
打铁港	7.670	6.50	18.0
龙峰河	0.736	0.72	2.2
屏东河	2.180	2.60	16.2
树兜河	0.600	0.69	13.0
五四河	1.760	1.57	12.1
瀛洲河	10.500	5.70	84.2
湖前河	0.504	0.62	18.7
光明港一支	1.740	1.58	10.1
光明港二支	5.300	4.90	8.2

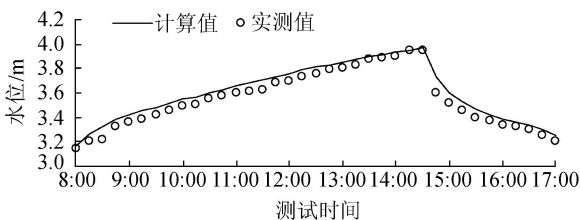


图 2 五孔水闸站水位验证结果

五孔水闸位于光明港入闽江处,水位受潮位影响明显。晋安河与旧树兜河交汇处位于晋安河上游,主要受引水的影响,流量变化不明显。从率定结果可知,计算值与实测拟合较好(图 3),可用于后续的实验研究。

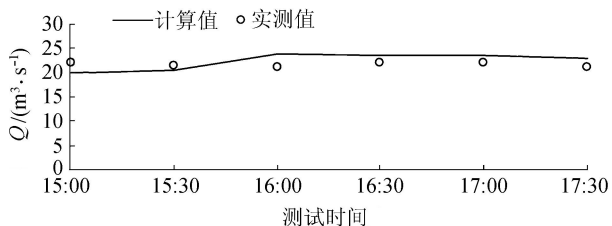


图3 旧树兜河与晋安河交汇处晋安河上流量验证结果

## 6.2 生态补水规划模拟及水闸优化调度

为了改善内河水质,对内河进行了生态补水。污水中氨氮质量浓度根据污水处理厂进水浓度设定,为30 mg/L。江北城区污水量统计结果见表2(以2020年为规划年份)。各内河水工建筑物的调控方式均按现状进行,以判别其调度方式是否需要优化。水动力模型初始水位为光明港3.2~3.5 m,其他河道为4 m,水质模型的氨氮初始质量浓度为2 mg/L。模型计算时段为一个引水周期,从1:00到次日1:00,共24 h。计算步长为5 s。

表2 福州市江北城区现状及规划污水量统计

年份	人口/万人	供水量/ ( $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	污水量/ ( $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )
2009	172.8	84.9	66.70
2015	172.0	85.4	67.08
2020	174.0	85.8	67.40

通过模拟发现,现状调度方式在规划状态下已经不再适用,需要利用现有水工建筑物和新建水工建筑物对水流进行调控,模型的优化区域见图1。在优化区域一中,通过利用树兜河水闸、旧树兜河水闸以及新建的龙峰河溢流闸和五四河溢流闸对该区域水流进行调控,使得屏东河、树兜河、旧树兜河以及五四河的氨氮质量浓度达到1.2 mg/L的目标,且琼东河水质达标。由于琼东河的水质由其上游水流状况决定,故在上游各河道分流状况确定的情况下,琼东河水质已经确定,因此选取屏东河、树兜河、五四河、旧树兜河的河道代表断面作为目标点,其中树兜河、旧树兜河、五四河的代表断面取在建筑物前侧临近断面,屏东河水质代表断面取在河道靠下游段的位置,因为这些断面为河道水质最差断面。在优化区域二中,陈厝河设计分流量为 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,福兴河设计分流量为 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,新厝河设计分流量为 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,此分流量通过调整浦东河、福兴河以及新厝河上的溢流闸的闸门控制高程获得。为了节省模型运行的时间,本研究把优化区域取出单独建模。模型的边界由生态补水规划模型得出,这里假定水工建筑物的调控对边界影响可以忽略不计(优化区域与周围河网的连接处即为优化区域的边界,见图1)。由于规划补水的方式非恒定,本研究选取引水量最大的时段10:00—18:00作为优化时段,其他时段可以参

照此时段进行动态优化。SCE-UA算法的参数取值,复合型个数为2个,初始种群由蒙特卡洛随机抽样选取,算法终止准则为:①水动力水质耦合模型的最大调用次数为200次;②最优个体的目标值改变量小于0.01,满足准则中的任一条,算法就会自动终止。各参数取值范围及其优化结果见表3,优化过程见图4。图4中,横坐标代数表示算法中复合型混合的次数,每混合1次,优化模型的目标函数值都会得到优化。对优化区域一,图4中纵坐标的单位为mg/L;对优化区域二,图4中纵坐标的单位为 $\text{m}^3/\text{s}$ 。为了检验调度参数的优化效果,把优化后的参数代入生态补水规划模型(此模型指整个江北城区的河网模型)进行检验,检验结果见图5~6。图5~6给出了污染物质量浓度过程线和流量分配过程线。从图5~6可知,优化后的参数满足水质调控的要求。

表3 参数优化结果及取值范围

参数	符号	优化值	取值范围
龙峰河溢流闸闸门顶高程	$\theta_1$	4.525	4.000~4.700
树兜河水闸闸门开度	$\theta_2$	0.003	0~0.5
旧树兜河水闸闸门开度	$\theta_3$	0.03	0~0.5
五四河溢流闸闸门顶高程	$\theta_4$	4.08	4.000~4.500
浦东河溢流闸闸门顶高程	$\theta_5$	5.262	4.800~5.300
福兴河溢流闸闸门顶高程	$\theta_6$	4.923	3.400~5.000
新厝河溢流闸闸门顶高程	$\theta_7$	4.671	3.800~5.000

注:表中闸门开度单位为m,闸门高程采用罗零高程。

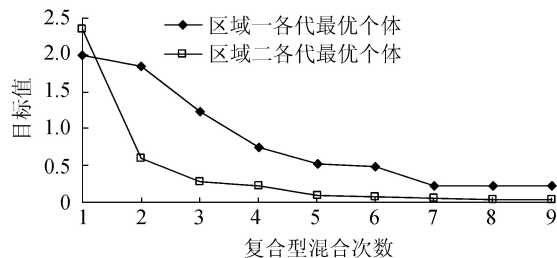


图4 优化过程

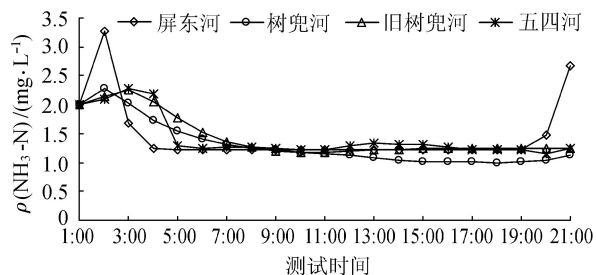


图5 区域一优化后氨氮质量浓度过程线

## 7 结论

a. SCE-UA算法不仅可以用于水文模型参数的率定,还可以用于河网水系水闸调度系统优化参数的识别。

b. 流量的优化结果较水质的优化结果好,可以

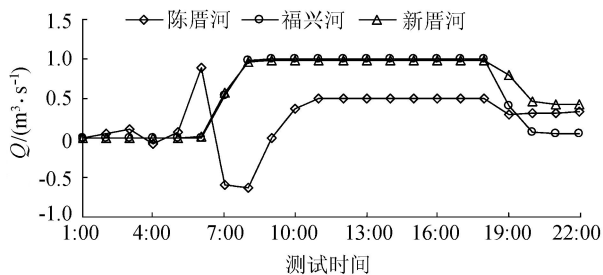


图6 区域二优化后流量分配过程线

考虑把引清调度的水质目标转化为流量目标来处理,这样或许可以达到更好的效果,这方面亟须后续研究。

c. 通过把优化后的参数代入原模型进行检验可知,将优化区域单独建模,利用生态补水规划模拟计算结果为优化区域提供边界,优化区域中水闸的调控对区域边界的影响可以忽略不计的假设是可行的。

### 参考文献:

[1] 李大勇,刘凌,董增川,等.改善张家港地区水环境引水方案的对比研究[J].水利水电科技进展,2004,24(6):17-20. (LI Dayong, LIU Ling, DONG Zengchuan, et al. Comparative analysis of water diversion schemes for improvement of water environment in Zhangjiagang district [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2004, 24(6):17-20. (in Chinese))

[2] 程曦,张明旭,孙从军.综合调水前后苏州河下游水体耗氧特性比较[J].上海环境科学,2001,20(5):215-217. (CHEN Xi, ZHANG Mingxu, SUN Congjun. Comparison of deoxygenation characteristics of Suzhou creek before and after integration low-flow augmentation project [J]. Shanghai Environment Sciences, 2001, 20(5):215-217. (in Chinese))

[3] 林高松,李适宇,陈璟璇.混合智能算法在引水冲污方案优选中的应用[J].水资源保护,2009,25(4):31-36. (LIN Gaosong, LI Shiyu, CHEN Jingxuan. Application of a hybrid intelligent algorithm in scheme optimization of water diversion to flush out pollutants [J]. Water Resources Protection, 2009, 25(4):31-36. (in Chinese))

[4] MCKINNEY D C, LIN M D. Genetic algorithm solution of ground water management models [J]. Water Resource Research, 1994, 30:1987-1906.

[5] BURN D H, YULIANTI J S. Waste-load allocation using genetic algorithm [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2001, 127(2):121-129.

[6] CHEN H W, CHANG N B. Water pollution control in the river basin by fuzzy genetic algorithm based multi-objective programming modeling [J]. Water Science and Technology, 1998, 37(3):55-63.

[7] CHO J H, SUNG K S, HA S R. A river water quality

management model for optimising regional wastewater treatment using a genetic algorithm [J]. Journal of Environmental Management, 2004, 73(3):229-242.

[8] DUAN Q Y, GUPTA V K, SOROOSHIAN S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization [J]. Journal of Optimization Theory and Application, 1993, 76(3):501-521.

[9] DUAN Q Y, SOROOSHIAN S, GUPTA V K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models [J]. Journal of Hydrology, 1994, 158(3/4):265-284.

[10] DUAN Q Y, GUPTA V K, SOROOSHIAN S. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall runoff models [J]. Water Resources Research, 1992, 28(4):1015-1031.

[11] 宋星原,舒全英,王海波,等. SCE-UA、遗传算法和单纯形优化算法的应用[J]. 武汉大学学报:工学版, 2009, 42(1):6-9. (SONG Xingyuan, SHU Quanying, WANG Haibo, et al. Comparison and application of SCE-UA, genetic algorithm and simplex method [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(1):6-9 (in Chinese))

[12] Danish Hydraulic Institute (DHI). Auto calibration and parameter optimisation tool user guide [R]. Denmark: DHI, 2007.

[13] 陈虹,朱明栓,雷少青,等.福州白马河水系水动力水污染数值模拟及应用[C]//吴有生,刘桦,许唯临,等.第九届全国水动力学学术会议暨第二十二届全国水动力学研讨会论文集.北京:海洋出版社,2009:938-943.

[14] 陈虹,朱明栓.福州内河河网精细水流水质数学模型研究[J].环境科学与管理,2010,35(5):66-68. (CHEN Hong, ZHU Mingquan. The research on fine water quality mathematical model for tidal-effect river network in Fuzhou river networks [J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(5):66-68. (in Chinese))

(收稿日期:2013-02-27 编辑:彭桃英)

