



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.01.002

董飞, 刘晓波, 彭文启, 等. 水功能区水质响应系数计算研究[J]. 2016, 14(1): 10-17

DONG Fei, LIU Xiaobo, PENG Wenqi, et al. Calculating the water quality response coefficient of water functional zone [J]. 2016, 14(1): 10-17. (in Chinese)

水功能区水质响应系数计算研究

董飞¹, 刘晓波¹, 彭文启^{1,2}, 赵进勇¹, 左欣³

(1. 中国水利水电科学研究院 水环境研究所, 北京 100038; 2. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 水质响应系数是计算水环境容量, 进而明确排污责任主体的重要基础。以一维对流扩散方程为基础, 基于线性叠加原理, 推导了水质响应系数矩阵, 探讨了基于综合水动力水质模型的水功能区水质响应系数矩阵高效计算方法。基于 HEG-RAS 模型建立了辽河干流水动力水质模型, 据此计算了辽河干流水功能区水质响应系数矩阵。结果表明: 基于综合水动力水质模型的水功能区水质响应系数矩阵高效计算方法可显著提高计算效率, 而且 HEG-RAS 模型不仅在水动力模拟方面优势显著, 在水质模拟方面亦表现出良好特性。较之公式法, 基于综合水动力水质模型计算水功能区水质响应系数可以显著提高计算精度。

关键词: 水质响应系数; 水动力模型; 水质模型; HEG-RAS; 辽河

中图分类号: TV 131; X143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)01-0010-08

Calculating the water quality response coefficient of water functional zone

DONG Fei¹, LIU Xiaobo¹, PENG Wenqi^{1,2}, ZHAO Jinyong¹, ZUO Xin³

(1. Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research., Beijing 100038, China;
2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China;
3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: The water quality response coefficient is a critical foundation for both calculating water environmental capacity and identifying the responsible body. Based on 1D convection-diffusion equation and linear superposition principle, the water quality response coefficient matrix was established. Efficient calculation method of water quality response coefficient of water functional zone was studied, which based on comprehensive hydrodynamic and water quality model. Based on HEG-RAS, the hydrodynamic and water quality model of Lihao River was built. Then the water quality response coefficient matrix was calculated on the model. The results proved that it is an efficient method to calculate the water quality response coefficient matrix of water functional zone by the comprehensive hydrodynamic and water quality model. The HEG-RAS model could be used in water quality modeling. In addition, the calculation accuracy could be significantly improved by the method when calculate the water quality response coefficient of water functional zone.

Key words: water quality response coefficient; hydrodynamic model; water quality model; HEG-RAS; Liaohe River

收稿日期: 2015-05-15 修回日期: 2016-01-27 网络出版时间: 2016-02-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1637.014.html>

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07501-004); 国家自然科学基金(51209230; 51479219)

Fund: Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment of China (2013ZX07501-004); National Natural Science Foundation of China(51209230; 51479219)

作者简介: 董飞(1983-), 男, 山东淄博人, 工程师, 博士, 主要从事水环境数值模型、流域容量总量控制理论与方法等研究。E-mail: dongfei99999@163.com

通讯作者: 彭文启(1967-), 男, 湖南娄底人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水环境数值模型、河湖健康评估理论与方法等研究。E-mail: pwq@iwhr.com

污染负荷与水质的响应关系是指在一定的设计条件和污染物排放条件下,由一定的排污量所引起的特定水域污染物浓度增加或减少的数量关系。明晰接纳水体对各污染负荷输入的水质响应关系有助于确定污染根源及责任主体,是建立流域统筹的水污染控制规划、流域水质目标管理体系及水功能区限制纳污管理的核心技术之一^[1]。美国流域水环境管理实施的流域 TMDL (Total Maximum Daily Loads) 计划中,将污染负荷与水质响应关系作为整个 TMDL 计划实施中的关键技术步骤^[2]。实际计算中,污染负荷与水质响应关系一般通过水质响应系数表达。

根据基础数据丰裕程度、计算精度要求的不同,水质响应系数的计算可以选择不同的方法,例如,简单的水质解析模型(公式法),或者复杂的综合水动力水质模型(WASP, CE-QUAL-W2 等)^[3,4]。一般而言,采用解析模型求解水质响应系数时需采用较多的假定;而采用综合水动力水质模型求解水质响应系数时,由于综合考虑了计算条件的时空异质性特征等因素,故而计算结果较之解析模型有更高的计算精度^[3,5]。以往研究中,多是建立一般意义上的断面对污染源的水质响应关系,而没有专门建立水功能区控制断面对污染源的水质响应关系;未从流域整体性出发而导致计算结果存在河流上下游左右岸关系、局部与整体关系不协调等问题^[6]。本文基于一维对流扩散方程和线性叠加原理,推导水功能区水质响应系数矩阵;探讨基于综合水动力水质模型的水功能区水质响应系数矩阵高效计算方法;进而以我国环境保护重点治理的“三河三湖”之一的辽河为研究对象,从流域整体性出发,基于美国陆军工程师团(The U. S. Army Corps of Engineers)水文工程中心(The Hydrologic Engineering Center)开发的 HEC-RAS (Hydraulic Engineering Center-River Analysis System) 模型,构建了辽河干流水动力水质模型。在此基础上,计算了各水功能区控制断面对各污染源的水质响应系数矩阵,从而明晰了辽河干流水功能区控制断面对各污染源污染负荷输入的水质响应关系。

1 水功能区水质响应系数计算方法

1.1 水质响应系数矩阵推导

水质响应系数表征了水体某特定水域(断面)对上游各污染源(包括点源入河排污口,非点源入河支流口及背景污染物)排放污染负荷的响应关系。对于划定了水功能区的河流而言,一般包括多个水功

能区,亦即有多个控制断面,影响某一控制断面污染物浓度变化的除了区间排污口外,还包括水功能区起始断面(或计算河段起始断面)的背景污染物浓度。于是,将研究范围内各控制断面对各污染源及背景浓度的所有响应系数构成的集合称为水质响应系数矩阵。以一维水动力水质模型为基础,推导水质响应系数矩阵。

$$\frac{\partial}{\partial t}(AS) + \frac{\partial}{\partial x}(QS) = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial S}{\partial x} \right) - AKS + \frac{W_i}{DX} \quad (1)$$

式中: S 为污染物浓度; Q 为断面流量; A 为断面过流面积; D 为纵向离散系数; K 为污染物综合降解系数; $W_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 为第 i 个污染源的入河负荷量, $W_i = C_i \cdot q_i$, C_i 为第 i 个入河污染源的污染物浓度; q_i 为第 i 个入河污染源的入河流量。

在各污染源的水质响应过程所依托的水动力学场条件基本相同时,满足线性迭加原理:基于相同的水动力学场条件下,若干个污染源 W_i 共同作用下所形成的平衡浓度场,可以视为各个污染源单独影响浓度场的线性迭加。设 S_{ij} 为第 i 个污染源对第 j 个控制断面单独影响浓度场(即,第 j 个控制断面对第 i 个污染源的水质响应系数,量纲为 1), S_{b_j} 为水功能区起始断面(计算河段起始断面)对第 j 个控制断面的单独影响浓度场(第 j 个控制断面对水功能区起始断面(计算河段起始断面)的水质响应系数,量纲为 1),则在 N 个污染源与背景污染同时存在时,所形成的浓度场 $S(x, t)$ 应为:

$$S(x, t) = \sum_{i=1}^N S_{ij} + S_{b_j} \quad (2)$$

令 $P_{ij} = S(x, t)$, $j = 1, 2, \dots, M$, 则 P_{ij} 即为 N 个排污口、 M 个控制断面形成的水质响应系数矩阵。

$$P_{ij} = \sum_{i=1}^N S_{ij} + S_{b_j} \quad (3)$$

1.2 基于综合水动力水质模型的水质响应系数矩阵计算方法

从式(3)可以看出,所有对控制断面浓度有影响的胁迫因素可以分为两类,即背景浓度和排污口污染负荷。当研究区有 n 个排污口、 m 个控制断面,研究污染物有 x 种时,计算工况为 $x \cdot (C_m^n + 1)$ 种,计算将相当繁琐,耗时耗力。可见,采用综合水动力水质模型计算出所有胁迫因素对控制断面输入影响的水质响应系数矩阵时,必须设计恰当的计算方案,以提高计算效率。本研究基于经率定验证的 HEC-RAS, 提出如下计算方案:(1)分两类计算,即控制断面对背景浓度的响应系数为一类,而控制断面对污染源的响应系数为一类;(2)计算控制断面对背景

浓度的响应系数时, 将边界条件输入为 1, 而源汇项(污染物)输入均为 0; 每种污染物需设定 1 次参数, 计算 1 次, 当有 x 种污染物时, 需设定 x 次参数, 计算 x 次; (3) 计算控制断面对污染源的响应系数时, 每个污染源虚拟为 1 种污染物, 则模型可同时计算出所有污染源对所有控制断面的输入影响; 边界条件输入为 0, 各污染源在实际位置的源汇项输入为 1, 而在其他虚拟位置的源汇项输入为 0; 每种污染物需设定 1 次参数, 计算 1 次, 当有 x 种污染物时, 需设定 x 次参数, 计算 x 次。通过以上方案, 可以将计算工况从 $x \cdot (C_m + 1)$ 种降低至 $2x$ 种。

2 辽河干流水功能区水质响应系数计算

2.1 研究区域概况

辽河流域地处辽宁省中部, 地理坐标为东经 $121^{\circ}16' - 125^{\circ}12'$, 北纬 $40^{\circ}50' - 43^{\circ}29'$, 流域面积 $37\,927\text{ km}^2$, 流域范围内有沈阳、抚顺、阜新、铁岭、鞍山、锦州和盘锦等 7 个市。辽河干流全长约 538 km , 流经铁岭、沈阳、鞍山和盘锦等 4 个市所辖的昌图、开原、银州、铁岭、康平、法库、新民、沈北、辽中、台安、盘山、双台子、兴隆台和大洼等 14 个县(市、区)。辽河水系比较复杂, 仅干流就有 38 条一级支流(含排干, 不含东辽河、西辽河)。

2.2 控制方程与数值格式

辽河干流水动力水质模型基于 HEC-RAS 构建。从国内外文献看, 一般将 HEC-RAS 视为水动力模型, 而非水动力水质模型^[8,9], 原因可能是由于 HEC-RAS 的理论文件中有关于水动力理论及操作的《HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual.》说明文件, 而没有关于水质的独立文件, 仅在使用手册《HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference User's Manual》中有说明^[10]。从目前发表的文献看, 国外文献中对 HEC-RAS 的水动力模块和水质模块均有研究应用, 而国内文献一般只研究应用其水动力模块^[11,12]。

在水动力部分, HEC-RAS 模型不仅可以进行自然河流的模拟, 而且可以进行受人类活动干扰明显的河流(例如河道上建有水库、拦河闸、泵站、堤防、桥梁等改变河道水动力特征的水利工程)的模拟, 不仅可进行单一河道的模拟, 而且可以进行复杂河网水系的模拟。所计算的水动力参数包括: 各类流态(急流、缓流或两种流态的混合)下的流量、流速、Froude 数、临界水位、河道水面线、总水头线、水力坡降等。除河流一般模拟外, 还可以进行洪水分

析、水工建筑物影响分析、河道整治分析、淹没分析、桥梁局部冲刷与桥梁壅水分析、渠道设计、河道输沙计算、水库淤沙计算、冰封河流水力计算、溃坝分析、决堤分析等特定情形。在水质部分, HEC-RAS 模型可以进行温度模拟, 营养物质模拟、溶解态磷模拟、藻类模拟、CBOD、DO 模拟, 以及用户自定义的任意保守及非保守物质等多种水质参数的模拟。本文首先采用 HEC-RAS 的水动力模块建立辽河干流的水动力模型, 进而应用 HEC-RAS 的水质模块建立辽河干流的水质模型, 水动力计算结果作为水质模型的基础。

2.2.1 水动力模型

非恒定流水动力模型的控制方程为 Saint Venant 方程组, 即

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (4)$$

$$\text{动量方程} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Qv)}{\partial x} + gA \left[\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right] = 0 \quad (5)$$

数值方法采用有限差分法, 数值格式采用 Preissmann 隐式格式, 即在每一个结点上同时求出流量和水位。

基本的有限差分形式为

$$\text{时间导数} \quad \frac{\partial f}{\partial t} \approx \frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{0.5(\Delta f_{j+1} + \Delta f_j)}{\Delta t} \quad (6)$$

$$\text{空间导数} \quad \frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{\Delta f}{\Delta x} = \frac{(f_{j+1} - f_j) + \theta(\Delta f_{j+1} - \Delta f_j)}{\Delta x} \quad (7)$$

$$\text{函数值} \quad f = f = 0.5(f_j + f_{j+1}) + 0.5\theta(\Delta f_j + \Delta f_{j+1}) \quad (8)$$

式中: θ 为可变加权因子($0 < \theta < 1$), 当 $\theta = 0$ 时, 成为显式格式, 为使差分方程保持无条件稳定, 须使 $\theta \geq 0.5$; $f_j = f_j^i$; $\Delta f_j = f_j^{i+1} - f_j^i$ 。

分别对主槽与滩地的连续方程和动量方程各项进行离散, 并分别将主槽与滩地两部分方程相加, 得离散方程为

连续方程

$$\Delta Q + \frac{\Delta A_c}{\Delta t} \Delta x_c + \frac{\Delta A_f}{\Delta t} \Delta x_f + \frac{\Delta S}{\Delta t} \Delta x_f - Q_l = 0 \quad (9)$$

动量方程

$$\frac{\Delta(Q_c \Delta x_c + Q_f \Delta x_f)}{\Delta t} + \Delta(V_c Q_c) + \Delta(V_f Q_f) + g(A_c + A_f) \Delta z + gA_c S_{fc} \Delta x_c + gA_f S_{ff} \Delta x_f = 0 \quad (10)$$

式中: Q_l 为平均侧向入流。

2.2.2 水质模型

水质模型的控制方程为一维对流扩散方程, 即

$$\frac{\partial}{\partial t}(CA) + \frac{\partial}{\partial x}(CQ) = \frac{\partial}{\partial x} \left[(DA) \frac{\partial C}{\partial x} \right] = -AKC + \sum S_i \quad (11)$$

式中: C 为污染物浓度; D 为纵向离散系数; K 为污染物综合降解系数; S_i 为源汇项, 其余符号意义同前。

数值方法采用有限体积法, 数值格式为 QUICK-EST-ULTIMATE 显式格式^[13-15]。QUICKEST 即 Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics with Estimated Streaming Terms, ULTIMATE 即 The Universal Limiter for Transient Interpolation Modeling of the Advective Transport Equation。详见参考文献[13-15]。

2.3 模型概化

辽河流域水系复杂, 根据模型需求与资料完备程度对支流、入河排污口、河湖取水口等进行概化。

根据资料完备程度与数据分析, 辽河干流共有 38 条一级支流(含排干), 其中清辽河、英守河、平顶堡河、梅林河、南窑小河、赵圈河等 7 条河流为小型河流, 主要为雨季山水下泄, 平时无水, 故模型中作合并概化处理(将清辽河、英守河、平顶堡河、梅林河、沙河、中固河等距离较近的 6 条支流概化为一条支流—中固河, 不考虑南窑小河、赵圈河)。和平小河为季节性小型河流, 平时流量仅为 0.01~0.02

m^3/s , 模型中不予考虑。最终, 模型考虑的一级支流有 28 条。辽河干流上的取水口共有 21 个, 均为规模以上取水口, 辽河干流上共有 9 个入河排污口, 其中规模以上 4 个, 规模以下 5 个。

辽河干流水利工程多, 整体上可分为闸、坝、堤、桥等四类, 对于以上四类水利工程作如下概化: (1) 辽河干流现有提防 659.2 km, 河势控导工程 33 处, 共 17.3 km, 提防影响在设置河道地形时予以考虑; (2) 辽河干流建有公路桥、铁路桥等各类跨河桥梁 27 座; 由于资料条件限制, 加之桥梁主要对河道局部壅水有影响, 而对河道整体水动力特征影响不大, 故模型中未予考虑; (3) 辽河干流上现有 16 座橡胶坝, 以及石佛寺水库、盘山闸 2 座大型控制性建筑物, 均在模型中予以考虑。

2.4 边界条件与初始条件

2.4.1 上边界条件

水动力上边界条件取福德店水文站 2011 年逐日流量过程线。水质上边界条件取上边界条件采用福德店水质站 2011 年逐月实测数据, 见图 1。

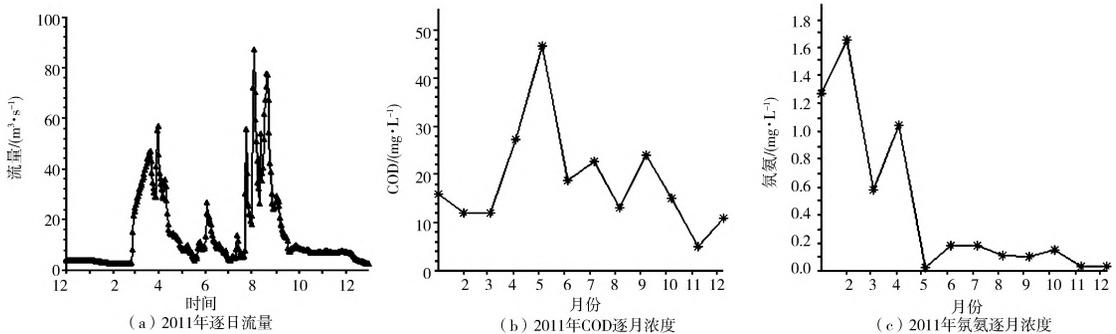


图 1 模型上边界条件

Fig. 1 Up boundary condition of the model

2.4.2 下边界条件

水动力下边界条件分析盘山站水文资料可知, 盘山站没有连续长系列水位、流量资料, 且缺少 2011 年、2012 年数据。采用 1986 年 7 月 15 日至 9 月 30 日流量水位监测资料, 建立流量水位关系作为下边界条件, 见图 2。

2.4.3 源汇项

考虑模型水量平衡, 支流入流、排污口入流、取水口取水均作为源汇项输入, 其中: (1) 支流 17 条, 无实测数据的支流采用水文比拟方法计算其流量; (2) 排污口 10 个, 对距离较近的排污口进行概化, 概化后的排污口共 8 处; (3) 取水口共 26 个, 对距离较近的取水口进行概化, 概化后的取水口共 20 处。计算简图见图 3。

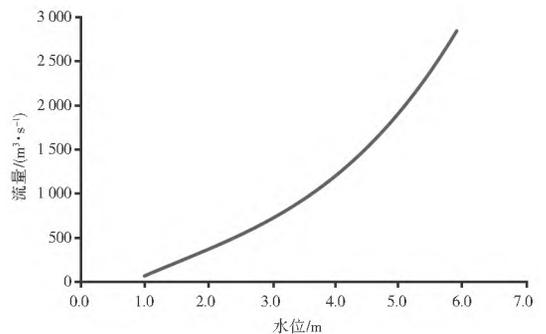


图 2 模型下边界条件

Fig. 2 Down boundary condition of the model

2.4.4 初始条件

采用热启动方式设置初始条件。模拟时段为 1 年, 在模拟时段之前虚拟 1 个月数据, 虚拟值为模拟时段初始值。

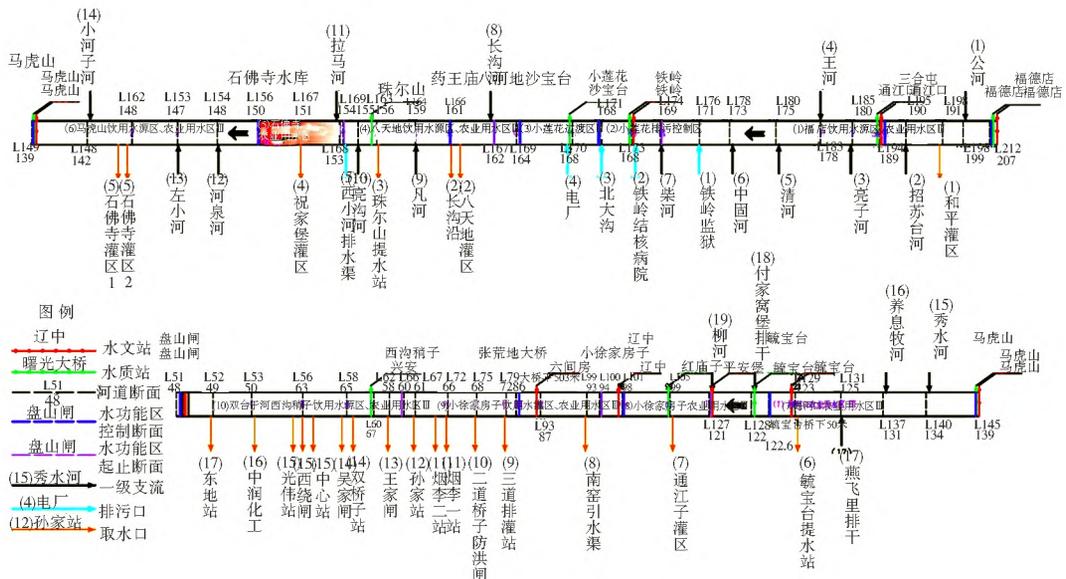


图 3 辽河干流水动力水质模型计算简图

Fig. 3 Sketch of the Liaohe hydrodynamic and water quality model

2.5 参数率定

考虑模型计算稳定性要求及计算时间要求, 时间步长取 3~ 5 min, 空间步长取 500~ 800 m, 采用 2011 年数据进行率定。水动力模型的参数率定主要是针对糙率 n , 本论文采取先经验取值后模型率定的方法。辽河现有河滩地已进行了系统的清淤整治, 河道自然封育后现有农耕地退耕还河, 滩地植被与现状辽河主行洪区内滩地状况相近, 参照《水力计算手册》^[6] 中天然河道糙率表进行初步取值最终率定结果为: 主槽 0.022~ 0.031, 滩地 0.035~ 0.12, 详见表 1。采用 2011 年实测逐月数据进行综合降解系数的率定的结果为: COD 常温降解系数范围为 0.16~ 0.28/d, 氨氮常温降解系数范围为 0.11~ 0.25/d, 详见表 2。

表 1 辽河干流糙率率定结果

Tab. 1 Roughness coefficient of Liaohe River

河段	糙率	
	主槽	滩地
福德店- 通江口	0.022	0.035
通江口- 铁岭	0.025	0.050
铁岭- 马虎山	0.030	0.100
马虎山- 毓宝台	0.025	0.080
毓宝台- 辽中	0.030	0.120
辽中- 六间房	0.028	0.120
六间房- 盘山闸	0.031	0.110

2.6 模型验证

2.6.1 水动力模型验证

采用 2012 年实测数据进行验证。选取通江口站、铁岭站两个水文站作为流量、水位的验证站。

表 2 辽河干流污染物综合降解系数率定结果

Tab. 2 Comprehensive degradation coefficients of Liaohe River

代表断面	综合降解系数(20 °C, 1/d)	
	COD	氨氮
通江口	0.20	0.11
铁岭	0.28	0.23
沙宝台	0.21	0.25
珠尔山	0.27	0.24
马虎山	0.21	0.25
毓宝台	0.20	0.23
辽中	0.18	0.22
盘山闸	0.16	0.18

采用平均误差、平均绝对误差、均方根误差和相对误差等 4 项统计参数进行模拟结果的验证分析。流量、水位验证图见图 4 和图 5, 统计结果见表 3。

通过表 3 可知: 两个站点流量模拟的相对误差分别为 22.6% 和 19.6%; 水位模拟的相对误差分别为 1.2% 和 1.1%, 模拟结果良好。从图 5 可以看出, 除枯水期(1 月- 2 月和 12 月)流量、水位模拟值偏小外, 其他时段模拟值与实测值吻合良好。枯水期模拟值偏小, 可能与模型源汇项输入时将取水口的取水流量全年取同一值, 而实际在枯水期取水量小于模型输入值有关。

2.6.2 水质模型验证

选取三合屯站、马虎山站两个水质站作为水质模拟的验证站, 采用 2012 年实测数据的平均误差、平均绝对误差、均方根误差和相对误差等 4 项统计参数进行模拟结果的验证分析, 验证结果见图 6 和图 7, 误差分析见表 4。

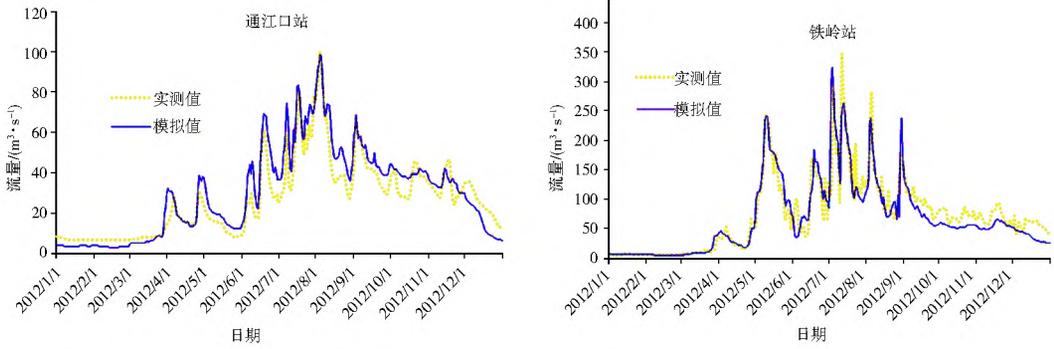


图 4 水动力模拟流量验证

Fig. 4 Flow verification of the hydrodynamic modeling

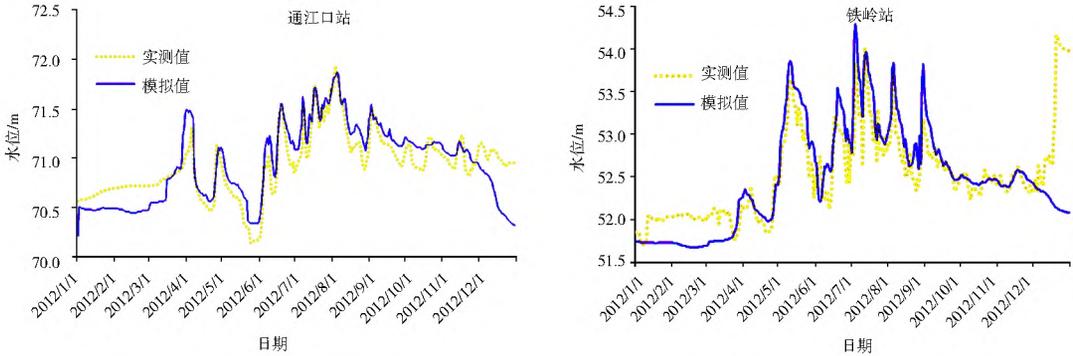


图 5 水动力模拟水位验证

Fig. 5 Water level verification of the hydrodynamic modeling

表 3 水动力模拟误差分析

Tab. 3 Error analysis of the hydrodynamic modeling

统计值	流量		水位	
	通江口	铁岭	通江口	铁岭
平均误差	- 2. 34	5. 88	1. 65	- 0. 03
平均绝对误差	6. 08	14. 41	1. 08	0. 56
均方根误差	7. 52	21. 64	1. 12	0. 64
相对误差(%)	22. 6	19. 6	1. 2%	1. 1

通过表 4 可知:两个站点 COD 模拟的相对误差分别为 21. 2% 和 20. 2%; 氨氮模拟的相对误差分别为 22. 6% 和 32. 5%, 模拟结果良好。从验证结果看,无论是 COD 还是氨氮,均存在着枯水期(1 月-2 月和 12 月)模拟值偏小的现象,而其他时段模拟

值与实测值吻合良好。枯水期模拟值偏小,原因可能于模型模拟时的降解系数全年采用了同一值有关。根据水温对污染物降解系数的一般规律,水温越低(对应枯水期)则降解系数越小,模型率定得到的降解系数可以较好的适用于丰水期和平水期,故对于枯水期而言相对较大。因此在进行进一步的情景模拟时需根据温度修正降解系数。

2.7 水质响应系数计算结果及分析

基于 1.2 节设计的计算方法及本研究建立的辽河干流水动力水质模型,计算得到辽河干流各排污口、支流口在各水功能区控制断面及起止断面的不同污染物(COD、氨氮)的水质响应系数,见图 8。

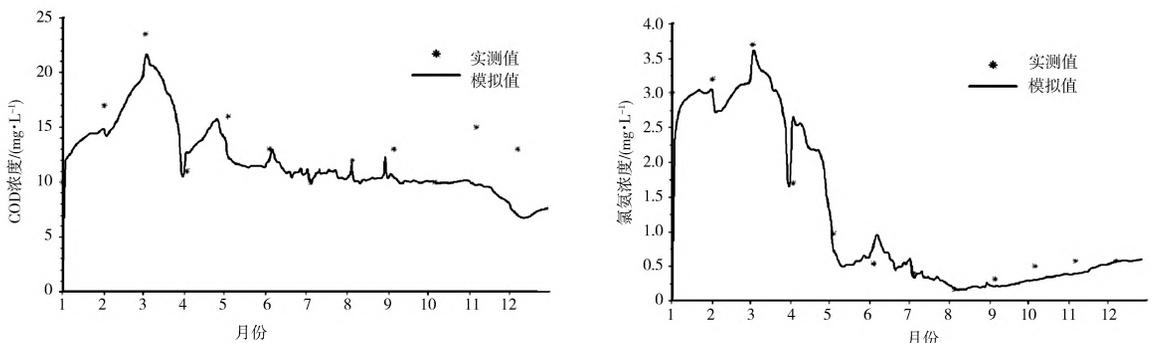


图 6 三合屯站水质模拟验证结果

Fig. 6 Verification of the water quality modeling of Sanhetun

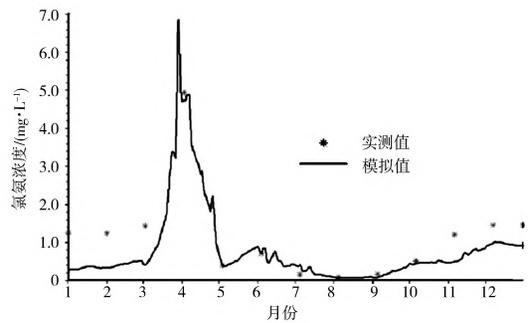
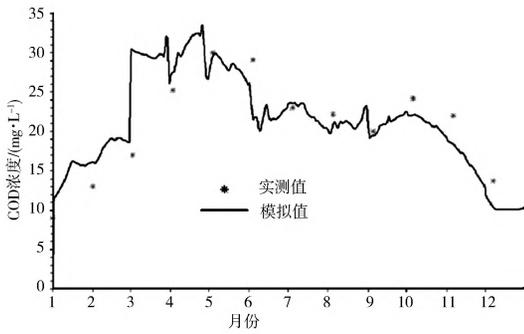


图 7 马虎山站水质模拟验证结果

Fig. 7 Verification of the water quality modeling of Mahushan

表 4 水质模拟误差分析

Tab. 4 Error analysis of the water quality modeling

统计值	COD		氨氮	
	三合屯	马虎山	三合屯	马虎山
平均误差	4.26	5.14	0.54	0.69
平均绝对误差	2.92	4.08	0.30	0.36
均方根误差	3.55	5.58	0.60	0.53
相对误差(%)	21.1	20.2	22.6	32.5

通过图 8 可以看出: (1) 在水功能区控制断面上, COD 水质响应系数最大值为 0.28, 氨氮水质响应

系数最大值为 0.29, 均为通江口断面对入河支流招苏台河的响应值; (2) 整体而言, 产生较大响应系数的入河支流为招苏台河、清河、柴河及泛河, 而结燕飞里排干、亮沟河、拉马河、中固河和亮子河产生的响应系数较小, 可以直观地反应出不同入河支流对干流的水质影响; (3) 水功能区控制断面对其下游的部分入河支流或排污口的响应系数不为零, 而若采用简单水质解析模型, 由于忽略了扩散的影响, 则断面对下游的响应系数必然为零, 说明采用综合水动力水质模型较之简单水质解析模型更接近真实物理情况。

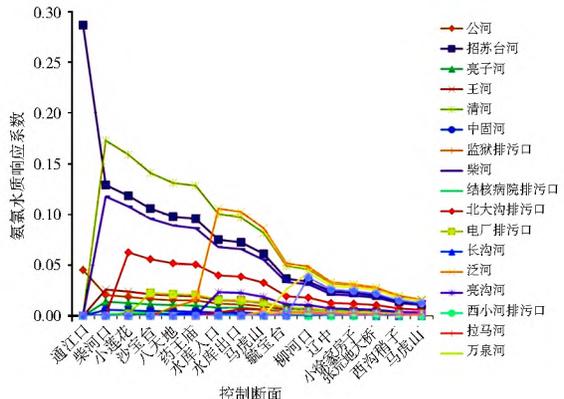
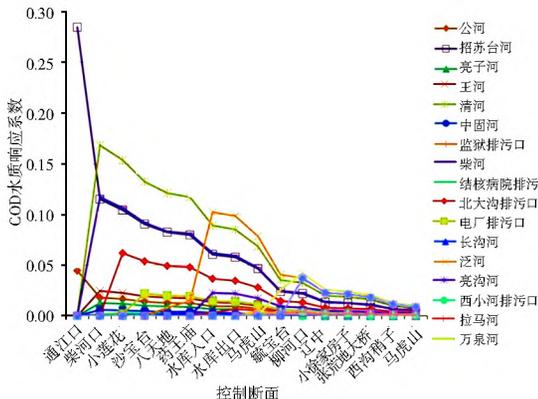


图 8 辽河干流水功能区水质响应系数

Fig. 8 The water quality response coefficient of water functional zone in Liaohe River

3 结论

(1) 本文基于一维水动力水质模型方程推导了水质响应系数矩阵, 适用于河流水功能区水质响应系数的计算; 对于湖库水功能区水质响应系数的计算, 需另外推导。

(2) 基于 HEC-RAS 模型建立了辽河干流水动力水质模型, 采用统计分析方法对模型进行了验证分析, 两个站点流量模拟的相对误差分别为 22.6% 和 19.6%, 水位模拟的相对误差分别为 1.2% 和 1.1%, COD 模拟的相对误差分别为 21.2% 和 20.2%, 氨氮模拟的相对误差分别为 22.6% 和 32.5%。这表明 HEC-RAS 模型不仅具有优良的水

动力模拟性能, 亦可成功应用于水质数值模拟。

(3) 当源汇项或水功能区控制断面超过一定数量时, 水质响应系数矩阵计算量巨大; 而基于复杂水动力水质模型计算水质响应系数矩阵时, 设定合理的边界条件或源汇项, 可显著提高计算效率, 将计算工况从 $x \cdot (C_m + 1)$ 种降低至 $2x$ 种。

(3) 采用公式法计算水质响应系数时, 由于一般会忽略水流扩散作用, 会得出排污口对上游无影响的结果。本文计算结果表明, 水功能区控制断面对其下游的部分入河支流或排污口的响应系数不为零, 说明采用综合水动力水质模型计算水质响应系数时, 由于未忽略扩散作用, 可以得出较公式法更为理想的计算结果。

参考文献(References):

- [1] 孟伟,张远,张楠,等.流域水生态功能分区与质量目标管理技术研究的若干问题[J].环境科学学报,2011,31(7):1345-1351.(MENG Wei,ZHANG Yuan,ZHANG Nan,et al.Study on aquatic ecological function regionalization and water quality target management in the river basin[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2011,31(7):1345-1351.(in Chinese))
- [2] Haire M, Vega R, Koenig J, et al. Handbook for Developing Watershed TMDLs[R]. 2009:1938-6478.
- [3] 周刚,黑鹏飞,雷坤,等.赣江下游污染负荷与水质响应关系模型[J].水科学进展,2013,24(6):883-893.(ZHOU Gang,HEI Pengfei,LEI Kun,et al.Numerical modeling of the relationship between pollution loads and water quality in lower reach of Ganjiang River[J].Advances in Water Science,2013,24(6):883-893.(in Chinese))
- [4] 邹锐,董云仙,颜小品,等.基于多模式逆向水质模型的程海水位调控水质响应预测研究[J].环境科学,2011,32(11):3193-3199.(ZOU Rui,DONG Yunxian,YAN Xiaopin,et al.Multiple pattern inverse water quality modeling approach for predicting the water quality consequence of lake Chenghai water elevation control[J].Environmental Science,2011,32(11):3193-3199.(in Chinese))
- [5] 邢妍.清河水系氨氮污染负荷与水质响应关系模拟研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2011.(XING Yan.Modelling the relation between NH₃N pollution and the water quality of Qinghe watershed[D].Shenyang:Shenyang Ligong University,2011.(in Chinese))
- [6] 黄玉茹,韩燕劭,胡书良.污染源排放量与河流水质之间输入响应关系建立方法的探讨[J].环境保护,1997(9):15-17.(HUANG Yuru,HAN Yanshao,HU Shuliang.Establishing the input response relation between the pollution loads and the water quality of a river[J].Environment Protection,1997(9):15-17.(in Chinese))
- [7] Brunner G W. HEG-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual[R]. U.S. Army Corps of Engineers Institute For Water Resources Hydrologic Engineering Center,2010.
- [8] 张昭,倪立萍,张晓鹏. HEC-RAS 在柳川河二期工程水力计算中的应用[J].水科学与工程技术,2013(1):38-40.(ZHANG Zhao,NI Liping,ZHANG Xiaopeng.Application of HEG-RAS in Liuchuan river project phase 0 hydraulic computation[J].Water Sciences and Engineering Technology,2013(1):38-40.(in Chinese))
- [9] Shoemaker L, Dai T, Koenig J. TMDL model evaluation and research needs[M]. National Risk Management Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, 2005.
- [10] Brunner G W, CEIWR-HEC. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference User's Manual, Version 4.1[R]. U. S. Army Corps of Engineers Institute For Water Resources Hydrologic Engineering Center, 2010.
- [11] Drake J, Bradford A, Joy D. Application of HEC-RAS 4.0 temperature model to estimate groundwater contributions to Swan Creek, Ontario, Canada[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(3-4): 390-398.
- [12] Fan C, Ko C-H, Wang W-S. An innovative modeling approach using Qual2K and HEG-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(5): 1824-1832.
- [13] Leonard B P. A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1979, 19(1): 59-98.
- [14] Leonard B P. The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one dimensional advection[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1991, 88(1): 17-74.
- [15] Leonard B P. Universal limiter for transient interpolation modeling of the advective transport equations: The ULTIMATE conservative difference scheme[J]. NASA Technical Memorandum, 1988, 100916.
- [16] 李炜.水力计算手册[K].北京:中国水利水电出版社,2006.(LI Wei.Manual of hydraulic calculation[K].Beijing:China Water & Power Press,2006.(in Chinese))

《南水北调与水利科技》编辑部郑重声明

《南水北调与水利科技》自创刊以来,从未委托任何中介机构、网站及个人征稿,请广大读者、作者提高警惕,不要通过他人投稿,更不要向他人或不明机构缴纳任何费用。

编辑部投稿网址: www.nsbdkq.net, 电话: 0311-85020535, 85020639, 85020512。

《南水北调与水利科技》编辑部