

# 河流水质模型( RWQM1 )介绍及实例分析

樊立萍<sup>1</sup>, 于海斌<sup>2</sup>, 袁德成<sup>1</sup>

(1. 沈阳化工学院信息工程学院 辽宁 沈阳 110142 ;

2. 中国科学院沈阳自动化研究所 辽宁 沈阳 110016)

**摘要** :以河流水质为目标对城市污水系统进行集成管理,是改善河流水质、保护生态环境的有效途径。介绍了国际水协河流水质 1 号模型( RWQM1 ),该模型采用与标准活性污泥模型类似的描述方式,用化学需氧量作为有机物度量描述有机物与营养物,选择表征碳、氢、氧、氮、磷循环的水质成分和模型状态变量,描述河流中好氧与缺氧条件下物质的循环变化过程。该模型可直接与活性污泥模型相连接,用于集成城市污水处理系统的设计规划与监视控制。

**关键词** :河流 ;水质模型 ;RWQM1 ;集成城市污水系统

**中图分类号** :X32      **文献标识码** :A      **文章编号** :1004-693X(2005)04-0004-04

## Introduction and case studies of river water quality model No. 1( RWQM1 )

FAN Li-ping<sup>1</sup>, YU Hai-bin<sup>2</sup>, YUAN De-cheng<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Shenyang Institute of Chemical Technology, Shenyang 110142, China ; 2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China )

**Abstract** :It is an effective approach to improve river water quality and to protect ecological environment by integrated management of urban wastewater with the view of better water quality. The river water quality model No. 1( RWQM1 ) developed by the International Water Association ( IWA ) were introduced, which was described like the standard Activated Sludge Model( ASM ). Organic matter and nutrients were characterized by COD. Water quality constituents and model state variables characterizing circling of carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen, and phosphorous were selected in the model to describe the cycling process under aerobic and anaerobic conditions. Connected directly with ASMs, the model can be used in the decision, planning, monitoring of the integrated urban wastewater system.

**Key words** :river ; water quality model ; RWQM1 ; integrated urban wastewater system

城市污水处理系统由排水管网、污水处理厂和受纳水体三个子系统组成。传统的城市污水系统各子系统的设计、管理与控制一直都是分别进行的,不考虑彼此间的相互影响。实际上,城市排水管网的污水溢流和污水处理厂的排放物直接影响受纳水体(如河流、湖泊、海洋等)的质量,各子系统性能的最优不能保证受纳水体质量的最优。将城市污水系统作为一个控制系统进行集成规划与控制,根据受纳河流水质要求,控制城市排水管网的污水溢流以及城市污水处理厂的组合运行状况,可以在降低运行

代价的同时,实现水生态环境的改善。城市污水处理系统集成化管理是城市污水处理的发展趋势和实现城市可持续发展的有效途径<sup>[1]</sup>,也是建设信息化城市、构建城市信息资源系统的一个不可缺少的重要组成部分。

城市污水处理系统的研究重点一般集中在污水处理厂,河流水质问题一直没有引起足够的重视。2000年,欧盟开始实施水框架指令( Water Framework Directive )规定以河流为目标,实施河流流域管理计划,以保护所有水资源不受污染,实现“良好水状态”。

欧盟水框架指令的采纳使河流成为城市污水处理系统关注的焦点,河流水质建模也显得更加重要。

河流水质模型研究已有 70 多年的历史。从第一个水质模型 Streeter-Phelps 到 20 世纪 90 年代的标准水质模型 QUAL2E,由于始终将河流作为独立系统研究,所建立的河流水质模型在状态变量选择、有机物表示等方面均与污水处理实际工程与科学研究中广泛采用的标准模型活性污泥模型(ASM)<sup>[2]</sup>存在不同,如 ASM 对有机物采用 COD 表示,而河流模型则采用 BOD 表示,给系统的集成带来了不便。1997 年,国际水协会(IWA)专门成立了河流水质建模任务组,以建立标准、一致的河流水质模型,并使它们可与标准活性污泥模型直接相连。2001 年,IWA 发布河流水质 1 号模型(RWQM1)<sup>[3]</sup>。该模型采用与活性污泥模型 ASM 类似的描述方式,描述河流中 24 种组分的 23 个循环变化过程。该模型可较好的模拟河流水质变化,为河流研究提供了方便,并可直接与 ASM 系列模型相连接,用于集成化城市水系统的设计规划与实时控制。

## 1 RWQM1 介绍

### 1.1 模型构成

河流生态生态系统由一些在一个水文整体内彼此相关的生物和非生物成分组成。发生在这些成分内和成分间的过程是复杂的,但可以用一系列物理化学、水文形态学和生物学参数描述。流动水体生态系统结构见图 1。河流水质模型包括两个基本组成部分:水力过程和生化转化过程。水体中任一组分的浓度变化特性可由下列质量平衡方程描述:

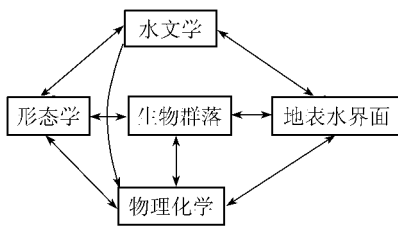


图 1 流动水体生态系统结构

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} - v \frac{\partial c}{\partial y} - w \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + r(c, p) \quad (1)$$

其中  $-u \frac{\partial c}{\partial x} - v \frac{\partial c}{\partial y} - w \frac{\partial c}{\partial z}$  为对流项,  $\frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)$  为扩散项,  $r(c, p)$  为反应速率项。

式中:  $c$  为浓度;  $t$  为时间;  $x, y, z$  为空间坐标;  $u, v,$

$w$  为与  $x, y, z$  方向相应的速度;  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  分别为对应  $x, y, z$  方向的紊流系数。

模型具体形式可通过以下过程决定:

a. 确定系统时间常数。不同的水质过程在不同的时间尺度上描述。

b. 确定模型空间维数。可能的维数包括水体长度、深度、宽度。对于河流,长度是最重要的一维。所建立的模型可能是一维、二维或三维,如果水体用一个或多个完全混合反应池表示,则模型为一维。

c. 确定混合表示方法。如果模型空间维数小于 3,混合表示为基于速度梯度的弥散过程;如果考虑三维模型,则紊流扩散是水体主要的混合机理。

d. 确定平流表示方法。根据建模研究目的,考虑采用 de Saint Venant 方程或概念模型表示。

e. 确定生化反应项。选择模型组分与反应过程。

f. 确定边界条件。确定模型中每一方向和每种组分的边界条件。

RWQM1 确定了一套详尽的生化过程方程来描述河流水质变化。它采用与活性污泥模型 ASM 类似的描述方式,两者的矩阵描述形式相同。河水中各种组分的浓度变化可能会受大量不同过程的影响,采用矩阵描述形式可以快速方便地确定每种组分的变化特性。完整的 RWQM1 模型的  $23 \times 24$  定性化学计量矩阵、过程速率表述及化学计量参数表可参见文献[3]。化学计量系数根据元素与离子转化原理,从化学计量参数与组元质量分数计算而来。

根据过程的转化速率  $\rho_j$  与化学计量系数  $\nu_{j,i}$ ,可写出每种组分的生化转化速率

$$r_i = \sum_j \nu_{j,i} \rho_j \quad (2)$$

### 1.2 模型组分

RWQM1 所描述的 24 种组分分别为:

a. 有机物:易生物降解溶解有机物  $S_S$ 、惰性溶解有机物  $S_I$ 、粒子有机物  $X_S$ 、惰性粒子有机物  $X_I$ ;

b. 生物体:异养菌  $X_H$ 、亚硝化菌  $X_{N_1}$ 、硝化菌  $X_{N_2}$ 、藻类  $X_{ALG}$ 、浮游生物  $X_{CON}$ ;

c. 营养物质:氨氮  $S_{NH_4-N}$ 、氨态氮  $S_{NH_3-N}$ 、亚硝酸盐  $S_{NO_2}$ 、硝酸盐  $S_{NO_3}$ 、无机溶解磷  $S_{HPO_4}$ 、无机溶解磷  $S_{H_2PO_4}$ ;

d. 氧:溶解氧  $S_{O_2}$ ;

e. 无机物:粒子吸收磷  $X_P$ 、粒子无机物  $X_{II}$ 、溶解  $CO_2$  与  $H_2CO_3$  之和  $S_{CO_2}$ 、重碳酸盐  $S_{HCO_3}$ 、 $CO_3^{2-}$  根  $S_{CO_3}$ 、氢离子  $S_H$ 、氢氧根离子  $S_{OH}$ 、溶解  $Ca^{2+}$  离子  $S_{Ca}$ 。

RWQM1 采用了组元平衡概念,以有机物组元成

分与生化转化过程化学计量为基础,引入组元质量分数作为模型参数,建立水质模型。在RWQM1中,描述有机物的状态变量由C、H、O、N、P等5种成分组成。有机物成分用元素C、H、O、N、P的质量分数 $\alpha_C$ 、 $\alpha_H$ 、 $\alpha_O$ 、 $\alpha_N$ 、 $\alpha_P$ 唯一描述,其他元素的质量分数均忽略。1g有机物的分子式为 $C_{\alpha_C/12}H_{\alpha_H}O_{\alpha_O/16}N_{\alpha_N/14}P_{\alpha_P/31}$ 。有机物质量与 $\rho(\text{COD})$ 的转换关系为

$$\rho(\text{COD}) = 32 \left( \frac{\alpha_C}{12} + \frac{\alpha_H}{4} - \frac{\alpha_O}{32} - \frac{3\alpha_N}{56} + \frac{5\alpha_P}{124} \right) OM \quad (3)$$

式中: $\rho(\text{COD})$ 为COD的质量浓度; $OM$ 为有机物干重。

### 1.3 生化转化过程

RWQM1对各种组分在河流中所发生的生化反应过程进行了详细描述,考虑了异养菌的生长与呼吸,硝化菌的生长与呼吸,藻类的生长、呼吸与死亡,消费生物的生长、呼吸与死亡,水解,化学平衡,磷的吸收与释放等23个生化转化过程,具体过程如下:

异养菌的好氧生长:异养菌利用溶解有机物、溶解氧和营养物进行生长;

好氧内源呼吸:通过好氧内源呼吸损耗生物量;

异养菌缺氧生长:异养菌利用硝酸盐转化成亚硝酸盐或亚硝酸盐转化为氮产生的氧生长;

异养菌缺氧内源呼吸:利用硝酸盐进行内源呼吸损耗异养菌;

一阶段硝化菌生长:有机物氧化氮成亚硝酸盐进行生长;

二阶段硝化菌生长:有机物氧化亚硝酸盐成硝酸盐进行生长;

藻类生长:藻类通过原生物生长;

藻类或浮游生物死亡:藻类或浮游生物通过死亡、水解等转化为慢生物降解惰性有机物;

浮游生物的生长:浮游生物通过啃食海藻、粒子有机物和异养菌、自养菌生长,产生慢生物降解粒子有机物;

水解:慢生物降解粒子有机物分解为溶解有机物;

化学平衡: $\text{CO}_2$ 与 $\text{HCO}_3^-$ , $\text{HCO}_3^-$ 与 $\text{CO}_3^{2-}$ , $\text{H}_2\text{O}$ 与 $\text{OH}^-$ 和 $\text{H}^+$ , $\text{NH}_4^+$ 与 $\text{NH}_3$ , $\text{HPO}_4^{2-}$ 与 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 以及 $\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{CO}_3^{2-}$ 和 $\text{CaCO}_3$ 的平衡;

磷的吸收:粒子物质对磷的粘附;

磷的释放:吸附在粒子物质上的磷释放。

水体中某种组分的浓度变化可能与多个转化过程相关。以硝酸盐 $S_{\text{NO}_3}$ 为例,该组分参与了5个转化过程:异养菌好氧生长(1b)、异养菌缺氧生长(3a)、异养菌缺氧呼吸(4)、硝化菌生长(7)和藻类生长(9b)。根据式(2),该组分总的生化转化速率为

$$\frac{dS_{\text{NO}_3}}{dt} = r_6 = v_{1b} \rho_{1b} + v_{3a} \rho_{3a} + v_4 \rho_4 + v_7 \rho_7 + v_{9b} \rho_{9b} \quad (4)$$

将相应的过程速率与化学计量系数代入上式,即可得到 $S_{\text{NO}_3}$ 的总转化速率。过程反应速率与组分浓度密切相关,如异养菌的好氧生长,当基质中没有足够的氮时,转化过程为消耗氮的好氧生长过程,对应的速率为 $\rho_{1a}$ ;而当氮浓度很低时,相应的过程变为消耗硝酸盐的好氧过程,对应的速率为 $\rho_{1b}$ ,其他过程如异养菌缺氧生长、藻类生长、浮游生物的生长等,也存在类似情况。

## 2 RWQM1 应用分析

城市污水处理系统组成如图2所示。组成城市污水系统的排水管网、污水处理厂、河流三个子系统彼此关联。作为污水排放最终容纳体的河流,其水质与排水管网和污水处理厂的运行情况密切相关。以河流水质为目标的集成化控制方案使河流成为城市污水处理系统的主体成分而得到更加广泛的关注。采用与活性污泥模型一致的建模方法建立的河流水质模型RWQM1克服了模型失配等缺点,方便了城市污水系统的集成建模与实时控制方案的研究<sup>[4~6]</sup>。

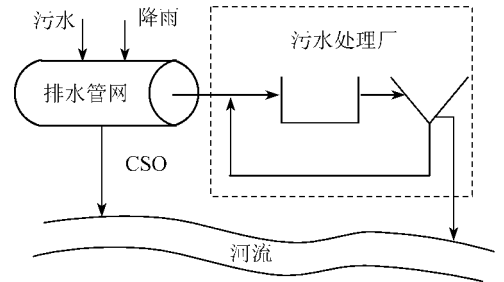


图2 城市污水处理系统

RWQM1对过程的描述全面而复杂,有助于对河流中复杂生化转化过程的深入理解。但模型的复杂性给计算带来很大困难,因此在许多场合很难直接应用,尤其对快速性有严格要求的实时控制系统。实际应用时可根据建模目的与控制要求对该模型进行简化。

笔者以浑河沈阳段为背景,建立了浑河水水质仿真模型,研究了RWQM1在河流水质监控中的应用。沈阳市汇水总面积186.67 km<sup>2</sup>,人口362万,浑河全长172.6 km,沈阳河段长56.96 km,日均流量138.67万 m<sup>3</sup>。其中城市段东至东陵大桥,西至浑河大闸,全长28.6 km,河道宽250~600 m,设计流量14.45 m<sup>3</sup>/s。以该河流位于城区的浑河青年桥至工农桥的5.7 km中心河段作为研究对象。该河段水深约30 m,每天接纳污水约50万 t。

为便于计算,水力动态采用连续搅拌反应池(CSTR)描述,方程(1)简化为如下形式:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{Q_{in}}{V}(C_{i,in} - C_i) + r_i \quad (4)$$

式中: $Q_{in}$ 为反应池进水流量; $V$ 为反应池体积; $C_{i,in}$ 为组分*i*进水浓度; $C_i$ 为组分*i*出水浓度; $r_i$ 为反应速率,由RWQM1简化模型确定。

在RWQM1基础上,根据子模型选择基本原则<sup>[7]</sup>,假定转化过程只受悬浮细菌控制而与藻类及浮游生物无关,建立了包含12种组分11个生化反应过程河流简化生化反应模型。简化模型如表1所示。表1中, $S_{nh} = S_{NH_4} + S_{NH_3}$ ,  $S_{PO} = S_{HPO_4} + S_{H_2PO_4}$ ;其他各组分符号与前文定义相同。所有不为1的化学计量系数均只给出符号;“+”表示正的化学计量系数;“-”表示负的化学计量系数;“?”表示该系数的符号依赖于过程有机物成分与化学计量参数。

图3是污水溢流时河流水质变化仿真结果。

表1 简化RWQM1模型

过程 <i>j</i>	组分 <i>i</i>											
	$S_{NO_2}$	$S_I$	$S_{NH}$	$S_{NO_2}$	$S_{NO_3}$	$S_{PO}$	$S_O$	$X_H$	$X_{N_1}$	$X_{N_2}$	$X_S$	$X_I$
异养菌借助 $NH_4$ 好氧生长	-		?			?	-	1				
异养菌借助 $NO_3$ 好氧生长	-				-	?	-	1				
异养菌的好氧内源呼吸			+			+	-	-1				+
异养菌借助 $NO_3$ 缺氧生长	-			+	-	?		1				
异养菌借助 $NO_2$ 缺氧生长	-			-		?		1				
异养菌的缺氧呼吸			+		-	+		-1				+
一阶段硝化菌生长			-	+		-	-		1			
一阶段硝化菌好氧呼吸			+			+	-		-1			+
二阶段硝化菌生长				-	+	-	-			1		
二阶段硝化菌好氧呼吸			+			+	-			-1		+
水解	+		+			+	+				-1	

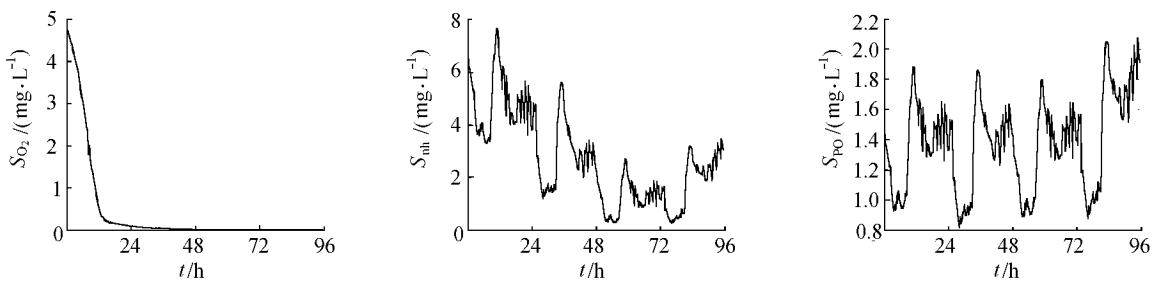


图3 组合污水溢流对河流水质的影响

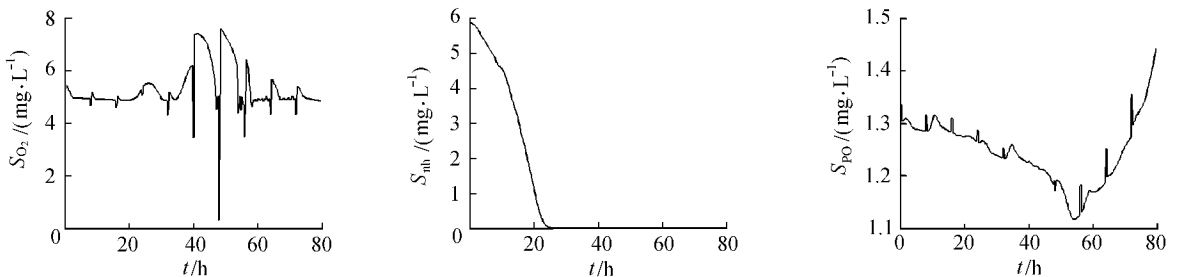


图4 采用曝气控制时河流水质变化情况

图4是采用曝气控制时纳污河流的水质变化情况。仿真结果表明,污水直接排放造成河流水质严重污染;采用适当控制策略可有效改善河流水质。简化模型较好地模拟了河流水质的实际变化状况,且运算速度远远高于完整的RWQM1模型,更方便用于河流水质控制研究。

### 3 结 语

RWQM1总结70多年国际河流建模研究成果,以著名的河流水质模型QUAL2E为基础,引入活性污泥模型ASM的过程描述方式,建立标准一致的河流水质模型,以实现河流水质模型与污水处理模型ASM的连接与匹配,方便集成污水系统的构建与规划管理。RWQM1与ASM1号模型(ASM1)的某些状态变量是相同的,如 $S_S$ 、 $S_I$ 、 $S_O$ 、 $X_S$ 、 $X_I$ 、 $X_H$ ( $X_{BH}$ ),但两个模型在状态变量方面仍存在一些差别。ASM1

表3 2001年现状水质同步监测结果与模拟结果

分区	实测值/(mg·L <sup>-1</sup> )			水质类别	模拟值/(mg·L <sup>-1</sup> )			水质类别
	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N	DO		BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N	DO	
老河口段	0.82	0.07	7.8	I	0.84	0.06	6.9	I
襄阳县段	0.89	0.10	7.8	I	0.78	0.12	7.6	I
襄樊市区段	1.96	0.26	7.4	I	1.74	0.26	7.9	I
宜城段	1.44	0.31	7.4	II	1.68	0.28	7.3	II

## 6 结论

a. WASP6 应用于汉江的水质模拟能够取得较满意的结果, BOD<sub>5</sub> 模拟的平均相对误差为 10.7%, NH<sub>3</sub>-N 模拟的平均相对误差为 11.0%, DO 模拟的平均相对误差为 5.6%。

b. 水质模型中几个重要参数率定结果为: 复氧系数  $k_2 = 0.15 \text{ d}^{-1}$ ; 20℃ 时硝化速度系数  $k_{12} = 0.1 \text{ d}^{-1}$ ; 20℃ 时 BOD 衰减速度系数  $k_d = 0.16 \text{ d}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 谢永明. 环境水质模型概论 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- [2] 贾海峰, 程声通, 杜文涛. GIS 与地表水质模型 WASP5 的集成 [J]. 清华大学学报, 2001(8): 125 ~ 128.
- [3] Tim A W, Robert B A, James L M, et al. Water quality analysis simulation program (WASP) version 6.0 draft: user's manual [M]. Atlanta: US Environmental Protection Agency, 2000.

(收稿日期 2004-05-30 编辑 徐娟)

需要率定的参数包括生物、化学常数、颗粒态物质的沉降速度。由于模型系统很复杂, 无法用一元线性回归、多元线性回归等方法进行参数估值, 同时由于涉及参数太多, 现在还无法进行多参数同时自动寻优。因此, 在本研究中, 首先选用经验数据为一组参数, 然后在经验数据的基础上分性质进行参数率定。

WASP6 水质模型需率定的重要参数有: 复氧系数  $k_2$ 、20℃ 时硝化速度系数  $k_{12}$ 、20℃ 时 BOD 衰减速度系数  $k_d$ 。参照汉江中下游水质模拟已有的研究成果和 WASP6 用户使用手册, 经反复试算, 直到校验结果满意为止。最后确定参数如下: 复氧系数  $k_2 = 0.15 \text{ d}^{-1}$ , 20℃ 时硝化速度系数  $k_{12} = 0.1 \text{ d}^{-1}$ , 20℃ 时 BOD 衰减速度系数  $k_d = 0.16 \text{ d}^{-1}$ 。其他主要参数取值如下:  $a_{OC} = 32/12$ ;  $k_{1D} = 0.005 \text{ d}^{-1}$ ,  $k_{BOD} = 0.5 \text{ mg/L}$ ,  $k_{NO_3-N} = 0.1 \text{ mg/L}$ ,  $S_{SOD} = 0.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $G_{PI} = 0.3 \text{ d}^{-1}$ ,  $k_{IR} = 0.125 \text{ d}^{-1}$ 。

## 5 模拟结果与分析

2001 年现状水质实测结果与 2001 年现状模拟结果列于表 3。由表 3 计算得出, BOD<sub>5</sub> 模拟的平均相对误差为 10.7%, NH<sub>3</sub>-N 模拟的平均相对误差为 11.0%, DO 模拟的平均相对误差为 5.6%。WASP6 模型对现状水质的模拟误差较小, 符合水质模型模拟的要求。

(上接第 7 页) 的某些变量被分成多个变量, 如 ASM1 中的  $S_{NO}$  在 RWQM1 中被分成  $S_{NO_2}$ 、 $S_{NO_3}$ ,  $S_{NH}$  被分成  $S_{NH_3}$ 、 $S_{NH_4}$ ,  $X_{BA}$  被分成  $X_{N_1}$ 、 $X_{N_2}$ ; ASM1 中某些变量, 如  $S_{ND}$  (溶解有机氮),  $X_P$  (惰性粒子),  $X_{ND}$  (粒子有机氮) 在 RWQM1 中没有出现, 而 RWQM1 中也引入了如  $S_{HPO_4}$ 、 $S_{H_2PO_4}$ 、 $S_{Ca}$ 、 $X_{ALG}$ 、 $X_{CON}$ 、 $X_P$  (粒子吸收磷)  $X_{II}$  等在 ASM1 中不存在的变量。应用时必须注意两者的差别。根据建模目的与控制要求, 对 RWQM1 进行适当简化, 建立适合集成城市污水系统实时控制的模型, 解决集成系统中各子系统间的信息流传递问题, 是实现集成城市污水处理系统实时控制必须首先解决的问题。

参考文献:

- [1] Shanahan P, Borchardt D, Henze M, et al. River water quality model no. 1 (RWQM1): I. modelling approach [J]. Water Science Technology, 2001, 43(5): 1 ~ 9.
- [2] Henze M, Gujer W, Mino T, et al. Activated sludge model no.

2d ASM2d [J]. Water Science Technology, 1999, 39(1): 165 ~ 182.

- [3] Reichert P, Borchardt D, Henze M, et al. River water quality model no. 1 (RWQM1): II. biochemical process equations [J]. Water Science Technology, 2001, 43(5): 11 ~ 30.
- [4] Rauch W, Bertrand-Krajewski J L, Krebs P, et al. Deterministic modelling of integrated urban drainage systems [J]. Water Science Technology, 2002, 45(3): 81 ~ 94.
- [5] Meirlaen J, Huyghebaert B, Sforzi F, et al. Fast, simultaneous simulation of the integrated urban wastewater system using mechanistic surrogate model [J]. Water Science Technology, 2001, 43(7): 301 ~ 309.
- [6] Meirlaen J, Van Assel J, Vanrolleghem P. Real time control of the integrated urban wastewater system using simultaneously simulating surrogate model [J]. Water Science Technology, 2002, 45(3): 109 ~ 116.
- [7] Vanrolleghem P, Borchardt D. River water quality model no. 1 (RWQM1): III. Biochemical submodel selection [J]. Water Science Technology, 2001, 43(5): 31 ~ 40.

(收稿日期 2004-04-19 编辑 徐娟)