

# 闸控河网水文-水动力-水质耦合数学模型

## ——I. 理论

陈炼钢<sup>1</sup>, 施勇<sup>1</sup>, 钱新<sup>2</sup>, 栾震宇<sup>1</sup>, 金秋<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 南京大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 针对流域级闸控大型河网水环境日常管理的应用需求与实际特点, 将资料适应性强的水文学方法与数据要求相对严苛的水动力-水质数值模型相融合, 构建了一维与二维嵌套、分块组合的闸控大型河网水文-水动力-水质耦合数学模型 DHQM (Hydrology, Hydrodynamics, and Water Quality Model for Impounded Rivers)。模型由河道径流模拟、闸坝调度过程模拟、河道水质模拟、区间入流及入河污染负荷估算和水质预警实时校正等 5 个模块组成。模型可服务于水环境实时预警和调度, 也可为闸坝水文环境效应的量化提供基础工具。

**关键词:** 环境水利; 水量水质耦合模拟; 模型集成; 多闸坝河网

**中图分类号:** X522; TV213.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2014)04-0534-08

第一次全国水利普查成果显示: 截至 2011 年, 中国共有水库 98 002 座、水电站 46 758 座、过闸流量  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  及以上水闸 268 476 座<sup>[1]</sup>。闸坝等水利工程在发挥防洪、供水、灌溉、发电和航运等巨大社会效益的同时, 由于其调蓄功能对河流水文情势的改变, 进而驱动物质输移、生境及生物群落发生演变, 导致河流生态环境系统出现一系列的负面效应<sup>[2-3]</sup>。为实现闸坝等水利工程的低环境影响利用, 迫切需要科学量化闸坝的胁迫效应; 而构建闸控河网水量水质耦合数学模型则是量化闸坝水文环境效应的基础工具<sup>[4]</sup>, 可为进一步制定闸坝生态调度方案提供科学依据, 同时也是进行河流水质预警预报的核心手段<sup>[5]</sup>。

然而, 纵观目前国际通用的河流水量水质耦合数学模型如 EFDC、WASP、MIKE、DELFT3D、MOHID、QUAL2K、EPD-RIV1、CE-QUAL-ICM 等, 方法上以水动力-水质为主, 缺乏资料适应性更强的水文学方法的参与, 流域级大型河网的模拟通常难以满足其严苛的数据要求; 此外, 这些模型的研发以服务于科研、规划和设计为目标, 通常没有考虑水环境日常管理的特点, 导致其无法直接应用到水环境实时预警和调度中。因此, 非常有必要交叉集成与河流水量水质模拟相关的水文、水动力、水质等多学科的多模型和多方法, 构建一个能服务于水环境日常管理、资料适应性强、可用于流域级大型闸控河网水量水质耦合模拟的数学模型。

## 1 模型框架

模型理论框架如图 1 所示, 分为水量模拟模型和水质模拟模型两部分, 采用单向松散耦合结构, 即水量模拟模型为水质模拟模型提供流场数据。水量模拟模型包括 3 个模块: 河道径流模拟模块、闸坝调度过程模拟模块和区间入流过程估算模块; 其中河道径流模拟是核心模块, 闸坝调度过程模拟和区间入流过程估算均为河道径流模拟服务。水质模拟模型也由 3 个模块组成: 河道水质模拟模块、区间入河污染负荷估算模块、水质预警实时校正模块; 其中河道水质模拟是核心模块, 区间入河污染负荷估算为其提供区间面源污染及分

收稿日期: 2013-09-24; 网络出版时间: 2014-05-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20140529.1802.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51209137); “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAB05B03)

作者简介: 陈炼钢(1981—), 男, 湖南长沙人, 高级工程师, 博士, 主要从事流域水量水质模拟及水环境预警研究。

E-mail: lgchen81@gmail.com

散点源等入河污染物的通量过程; 水质预警实时校正是在河道水质模拟的初始成果基础上, 依据实时的水质信息, 对模拟出的未来水质预报成果的误差进行校正, 以提高水质模拟的精度。

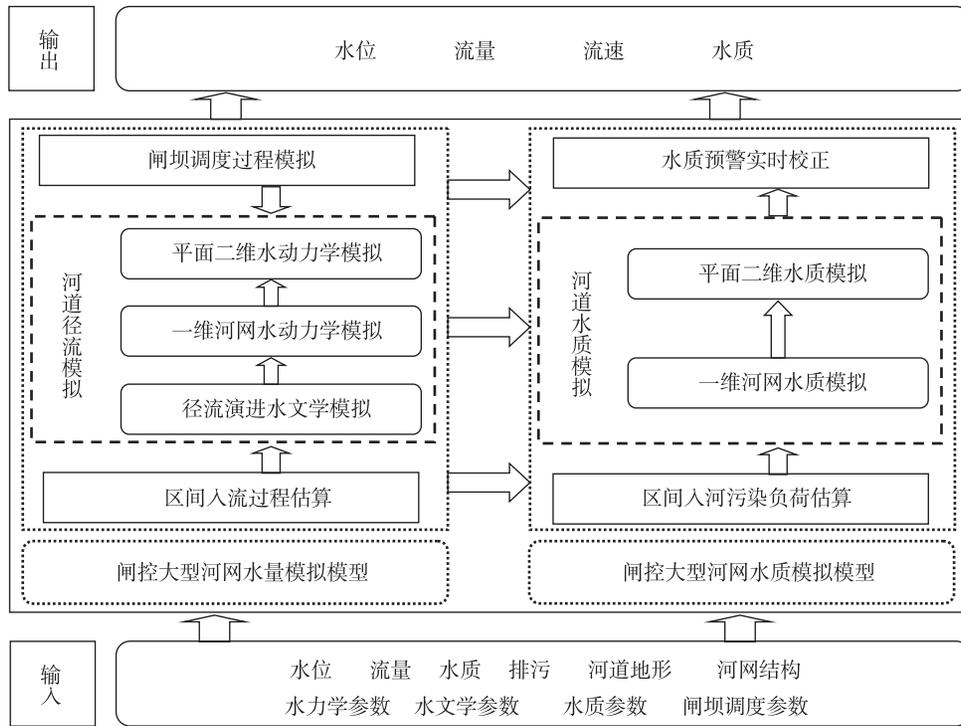


图 1 模型理论框架

Fig. 1 Theoretical framework of the model

针对流域级大型闸控河网的应用, 考虑到实际的应用需求及复杂的数据条件, 模型在实际应用时采用一维、二维嵌套的积木架构。其中全区域采用一维河网模型, 可快速模拟大范围的水量水质时空变化; 针对居民点、取水口、水生态保护区等局部重点河段, 建立平面二维水动力水质耦合数学模型, 嵌套入整体一维数值模型中, 更精确地模拟重点河段水量水质的时空变化过程。针对流域河网水系的组成情况, 模型可分割成若干个模块(积木), 在应用时可根据实际工作的需要和数据的情况进行灵活组合, 实现模型模拟范围的多变化。

## 2 模型理论方法

### 2.1 河道径流模拟

河道径流模拟包括 3 个子模块: 径流演进水文学模拟、一维河网水动力学模拟和平面二维水动力学模拟。其中, 径流演进水文学模拟采用中国水文作业预报中广泛应用的马斯京根河道流量演算法<sup>[6]</sup>, 适用于河道水下地形资料缺乏、无法进行高精度水动力学模拟的河流, 将上游实测流量过程演算得到河口的出流过程, 为一维河网水动力学模拟提供区间旁侧入流。一维河网水动力学模拟采用完全圣维南方程组描述非恒定往复渐变流在平原河网中的运动规律<sup>[7]</sup>, 适用于河道水下地形资料详实以及水位、流量等水文监测数据充分的河流。平面二维水动力学模拟针对局部重点河段, 采用守恒型二维浅水方程组来描述非恒定平面二维水流运动<sup>[8]</sup>, 其边界计算条件由径流演进水文学模拟模型和一维河网水动力学模拟模型提供。

### 2.2 闸坝调度过程模拟

闸坝调度过程的实质是根据闸上水情及其调度规则确定闸门的开度和开启孔数, 过闸水流为急变流, 且流态变化复杂, 分为自由堰流、淹没堰流、自由孔流和淹没孔流 4 种类型, 其模拟的关键是如何准确描述闸

坝过流能力和确定闸坝方程的数值计算格式<sup>[9]</sup>。过闸水流的控制方程遵循流量的连续性条件和能量守恒条件,计算公式如下:

$$Q_1 = Q_2 = Q \quad (1)$$

$$Z_1 + \zeta_1 \frac{U_1^2}{2g} = Z_2 + (\zeta_2 + \kappa) \frac{U_2^2}{2g} \quad (2)$$

式中  $Q$  为流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Z$  为水位,  $\text{m}$ ;  $U$  为流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\zeta$  为动能修正系数;  $\kappa$  为局部水头损失系数; 下标 1、2 表示闸上断面、闸下断面。

### 2.3 河道水质模拟

污染物在水体中复杂的物理、化学、生物过程可拆分为 2 个子过程: ①对流扩散过程; ②源汇变化过程。其中, 对流扩散是物理过程, 而源汇变化则描述了水质组分之间复杂的相互作用, 是水质模型研究的重点, 总体上源汇变化量  $S$  由 3 个部分组成:  $S = S_s + S_R + S_o$ ,  $S_s$  为悬浮与沉降所致的内部源汇量,  $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;  $S_R$  为生化反应所致的内部源汇量,  $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;  $S_o$  为点源、面源、污染事故等所致的外部源汇量,  $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。不同水质因子源汇变化的动力学过程皆不相同, 受篇幅所限本文重点阐述中国河流水质常用控制指标——氨氮和高锰酸盐指数(锰法 COD)的源汇变化过程, 如图 2 所示<sup>[10]</sup>。

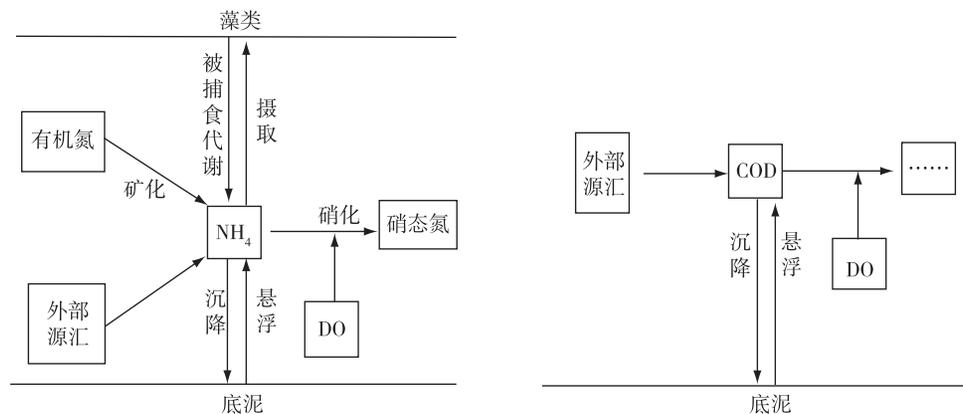


图2 氨氮和高锰酸盐指数的源汇变化过程

Fig. 2 Source and sink variation of  $\text{NH}_4$  and COD

现阶段中国还未对河流藻类、溶解性有机氮及底泥开展常规监测, 缺乏相关的数据来描述氨氮和高锰酸盐指数完整的源汇变化过程(图2)。因此, 需进行相应简化, 其中, 氨氮的源汇变化和高锰酸盐指数的源汇变化如下式:

$$\frac{\partial C_{\text{NH}_4}}{\partial t} = -K_{\text{Nit}} C_{\text{NH}_4} + S_{\text{NH}_4} \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_{\text{COD}}}{\partial t} = -K_{\text{COD}} C_{\text{COD}} + S_{\text{COD}} \quad (4)$$

式中  $K_{\text{Nit}}$  为氨氮的硝化系数,  $\text{s}^{-1}$ ;  $S_{\text{NH}_4}$  为硝化作用外的其他源汇变化项,  $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ , 包括藻类、溶解性有机氮及底泥等所致的内部源汇与点源、面源及污染事故等所致的外部源汇;  $K_{\text{COD}}$  为 COD 的生化降解系数,  $\text{s}^{-1}$ ;  $S_{\text{COD}}$  为生化降解外的其他源汇变化项,  $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ , 包括底泥所致的内部源汇与点源、面源及污染事故等所致的外部源汇。

### 2.4 区间入流及入河污染负荷估算

区间入流及入河污染负荷是河道内水流及污染物质的一个重要来源, 对河道内水量水质的影响不可忽略。流域级闸控大型河网属于人类活动剧烈的区域, 在水质管理的重点时段——洪水以外的无雨期, 人类侧枝水循环非常活跃, 由此导致的进出主干河网的水量及污染物质量对河道内水量水质的影响非常大。然而,

降雨径流模型和面源污染模型难以描述无雨期人类侧枝水循环导致的区间入流及入河污染负荷的变化; 并且其对数据的要求非常高, 在实际应用中常常无法满足, 另外其计算成果的可信度离实时预报的要求还相距甚远<sup>[11]</sup>; 因此其不适合用来计算剧烈人类活动影响下的区间入流及入河污染负荷过程。本文从质量守恒这一基本原理出发, 基于马斯京根流量演算法来估算区间总的入流过程, 并借鉴该法思想推导出污染物质通量演算法用来估算区间总的入河污染负荷过程, 然后再分配到区间汇入主干河网的小河道上。其中, 区间入流估算和区间入河污染负荷估算见下式:

$$\begin{aligned}
 Q_s &= Q_d - Q_{uo} \\
 Q_{uo} &= (C_0 Q_u^t + C_1 Q_u^{t-\Delta t} + C_2 Q_{uo}^{t-\Delta t}) \\
 C_0 &= \frac{\Delta t - 2KX}{2K - 2KX + \Delta t}, \quad C_1 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K - 2KX + \Delta t}, \quad C_2 = \frac{2K - 2KX - \Delta t}{2K - 2KX + \Delta t} \\
 S_p &= P_d - P_{uo} \\
 P_{uo}^t &= D_0 P_u^t + D_1 P_u^{t-\Delta t} + D_2 P_{uo}^{t-\Delta t} \\
 P_u &= C_u Q_u, \quad P_d = C_d Q_d \\
 D_0 &= \frac{\Delta t - 2KX - \lambda KX \Delta t}{2K - 2KX + \Delta t + \lambda K(1-X)\Delta t}, \quad D_1 = \frac{\Delta t + 2KX - \lambda KX \Delta t}{2K - 2KX + \Delta t + \lambda K(1-X)\Delta t} \\
 D_2 &= \frac{2K - 2KX - \Delta t - \lambda K(1-X)\Delta t}{2K - 2KX + \Delta t + \lambda K(1-X)\Delta t}
 \end{aligned} \tag{5}$$

式中  $Q_s$  为区间入流,  $m^3/s$ ;  $Q_d$  为下游断面的实测流量,  $m^3/s$ ;  $Q_u$  为上游断面的实测流量,  $m^3/s$ ;  $Q_{uo}$  为上游入流在下游断面的计算出流,  $m^3/s$ ;  $S_p$  为区间入河污染负荷,  $g/s$ ;  $P_d$  为下游断面的实测污染物质对流通量,  $g/s$ ;  $P_u$  为上游断面的实测污染物质对流通量,  $g/s$ ;  $P_{uo}$  为上游污染物质对流通量演算至在下游断面的对流通量,  $g/s$ ;  $\lambda$  为污染物的生化降解系数,  $s^{-1}$ ;  $\Delta t$  为计算时段长,  $h$ ;  $X$  为流量比重因子,  $K$  为蓄量常数,  $h$ ;  $t$  为时间。

## 2.5 水质预警实时校正

由于水质因子的测验误差、资料代表性误差、点源面源误差、人类社会经济活动误差以及模型方法误差的存在, 特别是其中的点源面源误差、资料代表性误差以及测验误差较大, 导致传统确定性水质数学模型精度无法满足实时水质预警的要求。此外, 依据历史实测水文水质资料所构建的水质模型, 仅代表着模型所在区域河网水流水质的一般性规律; 在应用到具体的一次水质过程预警时, 由于一般与特殊的差异, 需要依据最新的实时信息对模型的预报结果进行滚动校正<sup>[12]</sup>。本文采用状态变量校正和误差校正两种方法, 将实测水质信息和模型计算结果通过数据同化来进行水质预警的实时校正, 可有效提高水质模型的计算精度。

状态变量校正将计算区域内各监测断面的水质组成状态向量, 将其实测值直接修正状态量, 然后回代到各自所属的河段中计算各微段的水质, 实现全网所有断面的校正<sup>[13]</sup>。该法的实质是将各监测断面水质因子的实测值作为模型的内边界, 将整个计算区域分解成由监测断面分割而成的若干单一计算河段进行独立求解, 因此每一个断面水质的预报成果仅由其所在河段上游监测断面的实测水质及区间入河污染负荷决定, 这样模型误差的传递空间限制在单一河段内, 阻止了其在整个计算域上的逐级传递和累积, 有效地提高了模型精度。该法要求水质监测频次较高, 能基本反映水质真实的变化过程。

误差校正依据误差相关性理论, 对模型计算结果进行校正。该法最大的特点是无需假定误差来源、非常简单实用, 大量的实践证明其对提高短期预报精度非常有效<sup>[14]</sup>。设水质实测值为  $C_0(t)$ , 模型计算值为  $C_f(t)$ , 模型校正值为  $C_j(t)$ , 则误差  $E(t) = C_f(t) - C_0(t)$ , 对于该误差序列, 可建立如下的自回归模型和误差校正模型:

$$\begin{aligned}
 E(t) &= a_1 E(t-1) + a_2 E(t-2) + \dots + a_n E(t-n) \\
 C_j(t) &= C_f(t) - E(t)
 \end{aligned} \tag{7}$$

式中  $n$  为自回归的阶数, 一般低阶自相关系数较高, 随着阶数的增加, 自相关系数逐级减小;  $a_k (k=1, 2, \dots, n)$  为相应的回归系数。

### 3 模型数值算法

#### 3.1 一维河网模型数值算法

##### 3.1.1 水动力学模型数值算法

一维河网水动力学模型数值求解采用基于 Preissmann 四点偏心隐式差分的三级河网算法<sup>[15]</sup>。对于闸控河网, 其关键是如何将闸坝控制方程离散成与河段离散方程形式一致的数值计算格式<sup>[9]</sup>, 通过闸坝内边界条件计算闸坝离散方程的追赶系数, 然后联合河道河网方程组隐式联解包含闸坝调控的河网方程组, 从而模拟闸坝的调度控泄过程。

$$\begin{aligned} Q_1 &= \alpha + \beta Z_1 + \xi Z_2 \\ Q_2 &= \theta + \eta Z_2 + \gamma Z_1 \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\xi$ 、 $\theta$ 、 $\eta$ 、 $\gamma$  为追赶系数。

针对闸坝出流的 4 种流态, 可构造闸坝河段的数值计算格式:

自由孔流: 
$$Q = -\frac{MBe}{\sqrt{Z_1 - Z_B}} Z_B + \frac{MBe}{\sqrt{Z_1 - Z_B}} Z_1 \quad (9)$$

淹没孔流: 
$$Q = \frac{MBe}{\sqrt{Z_1 - Z_2}} Z_1 - \frac{MBe}{\sqrt{Z_1 - Z_2}} Z_2 \quad (10)$$

自由堰流: 
$$Q = -MB\sqrt{Z_1 - Z_B} Z_B + MB\sqrt{Z_1 - Z_B} Z_1 \quad (11)$$

淹没堰流: 
$$Q = -\sigma MB\sqrt{Z_1 - Z_B} Z_B + \sigma MB\sqrt{Z_1 - Z_B} Z_1 \quad (12)$$

将式(9)~式(12)与式(8)对比, 根据已知的闸坝运行水位流量资料、调度规则和闸坝设计参数等内边界条件可推求出相应的追赶系数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\xi$ 、 $\theta$ 、 $\eta$ 、 $\gamma$ , 详见表 1。

表 1 闸坝河段离散方程中追赶系数的计算公式

Table 1 Recursive coefficient formulas of impounded channel equation

追赶系数	$\alpha$	$\beta$	$\xi$	$\theta$	$\eta$	$\gamma$
自由孔流	$\frac{-Q}{Z_1 - Z_B} Z_B$	$\frac{Q}{Z_1 - Z_B}$	0	$\frac{-Q}{Z_1 - Z_B} Z_B$	0	$\frac{Q}{Z_1 - Z_B}$
淹没孔流	0	$\frac{Q}{Z_1 - Z_2}$	$\frac{-Q}{Z_1 - Z_2}$	0	$\frac{-Q}{Z_1 - Z_2}$	$\frac{Q}{Z_1 - Z_2}$
自由堰流	$\frac{-Q}{Z_1 - Z_B} Z_B$	$\frac{Q}{Z_1 - Z_B}$	0	$\frac{-Q}{Z_1 - Z_B} Z_B$	0	$\frac{Q}{Z_1 - Z_B}$
淹没堰流	$\frac{-Q}{Z_1 - Z_B} Z_B$	$\frac{Q}{Z_1 - Z_B}$	0	$\frac{-Q}{Z_1 - Z_B} Z_B$	0	$\frac{Q}{Z_1 - Z_B}$

为提高大型闸控河网水动力数值计算的稳定性, 宜采用“预估-校正”的柔性内边界处理模式来计算闸坝出流。“预估”为依据闸上水位流量模拟值与实测值或调度规则之间的关系, 按照闸坝调度的逻辑规则预估下一时步闸坝的调控流量; “校正”为将预估的闸坝调控流量代入上表中相应的公式计算闸坝河段离散方程追赶系数参与河网联解, 最终获得经全河网水力校正的过闸流量。这种柔性的内边界处理方式以牺牲闸坝河段局部最优为代价, 即闸坝局部河段模拟的水动力过程会稍微偏离实际过程; 但是大大提高了整个河网计算的稳定性, 可实现全局最优。

##### 3.1.2 水质模型数值算法

一维河网水质模型数值求解采用有限体积法<sup>[16]</sup>, 见式(13), 其中跨单元界面对流通量采用显隐结合的

一阶逆风格式, 扩散通量采用显隐结合的中心格式。其与一维河网水动力模型的空间耦合方式如图 3 所示, 其中  $i-1, i, \dots$  表示水动力模型的断面,  $j-1, j, \dots$  表示水质模型的控制体, 这种耦合方式具有如下优点: ①水动力模型微段断面与水质模型控制体单元界面一致, 流量、流速、过水断面面积等水力参数可直接传递给水质模型, 无需再进行二次空间插值, 保证了水质模型使用的流场与水动力模型流场完全一致; ②仅需对水质要素进行跨单元界面的空间插值, 计算量大为减少。

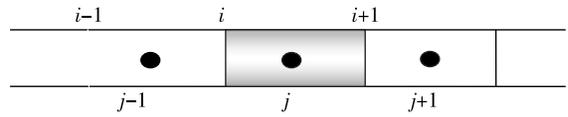


图 3 一维水质模型与水动力模型的空间耦合方式  
Fig. 3 1-D spatial coupling method between the water quality model and the hydrodynamic model

$$c_j^{k+1} = c_j^k \frac{V_j^k}{V_j^{k+1}} + \frac{(\bar{Q}_i \bar{c}_i - \bar{Q}_{i+1} \bar{c}_{i+1}) + \left( \bar{A}_{i+1} \bar{E}_{i+1} \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{i+1} - \bar{A}_i \bar{E}_i \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_i \right) + \bar{S}_j \bar{V}_j}{V_j^{k+1}} \Delta t \quad (13)$$

式中  $c_j^k$  为控制单元  $j$  时刻  $k$  的水质, mg/L;  $\bar{c}_i$  为控制单元界面  $i$  时段  $\Delta t$  内的平均水质, mg/L;  $V_j^k$  为控制单元  $j$  时刻  $k$  的蓄水量,  $m^3$ ;  $\bar{V}_j$  为控制单元  $j$  时段  $\Delta t$  内的平均蓄水量,  $m^3$ ;  $\bar{Q}_i$ 、 $\bar{A}_i$ 、 $\bar{E}_i$  为控制单元界面  $i$  时段  $\Delta t$  内的平均流量,  $m^3/s$ 、平均过水面积,  $m^2$ 、平均扩散系数,  $m^2/s$ ;  $\bar{S}_j$  为控制单元  $j$  时段  $\Delta t$  内的平均源汇变化速率,  $g/(m^3 \cdot s)$ 。

### 3.2 平面二维河段模型数值算法

平面二维水动力水质模型数值求解采用有限体积算法, 核心是跨单元界面法向数值通量的计算。其中, 水动力跨单元界面法向数值通量的计算采用高性能 Osher 格式, 详见文献[9]。Osher 格式具有物理基础且符合解的特征构造; 具有守恒性、逆风性、单调保持性、对间断的高分辨率以及保证数值解收敛于物理解等优良特性; 可应用于几何形状复杂的区域, 计算连续流、间断流、急流和缓流<sup>[8]</sup>。水质模型数值求解见式(14), 其中跨单元界面对流通量采用显隐结合的一阶逆风格式, 扩散通量采用显隐结合的中心格式<sup>[16]</sup>。

$$c^{k+1} = c^k \frac{V^k}{V^{k+1}} + \frac{-\sum_{j=1}^n \bar{q}_{LR} \bar{c}_{LR} + \sum_{j=1}^n \bar{A}_{LR} \bar{E}_{LR} \overline{\text{grad}(c)}_{LR} + \bar{S} \bar{V}}{V^{k+1}} \Delta t \quad (14)$$

式中  $c^k$  为时刻  $k$  的单元水质, mg/L;  $V^k$  为时刻  $k$  的单元水量,  $m^3$ ;  $n$  为单元界面的数量;  $\bar{q}_{LR}$  为  $\Delta t$  时段内单元界面处的平均流量,  $m^3/s$ ;  $\bar{c}_{LR}$  为  $\Delta t$  时段内单元界面处的平均水质, mg/L;  $\bar{A}_{LR}$  为  $\Delta t$  时段内跨单元界面的平均面积,  $m^2$ ;  $\bar{E}_{LR}$  为  $\Delta t$  时段内跨单元界面的平均扩散系数,  $m^2/s$ ;  $\overline{\text{grad}(c)}_{LR}$  为  $\Delta t$  时段内跨单元界面的平均水质梯度,  $g/m^4$ ;  $\bar{S}$  为  $\Delta t$  时段内单元内的平均源汇变化速率,  $g/(m^3 \cdot s)$ ;  $\bar{V}$  为  $\Delta t$  时段内单元的平均水量,  $m^3$ ; 下标 LR 分别表示跨单元界面。

## 4 结 论

(1) 将水文学方法与传统水动力-水质模型融合, 构建了资料适应性强的水文-水动力-水质耦合数学模型 DHQM, 模型采用一二维嵌套、分块组合的灵活架构, 可用来模拟闸控大型河网水量水质的变化。

(2) 针对剧烈人类活动影响下闸控河网区水流水质问题的实际特点, 提出了资料要求低、计算简便且具有物理机制的、基于污染物通量演算的区间入河污染负荷估算模型。

(3) 针对现阶段点源面源误差、资料代表性误差以及测验误差较大导致传统确定性水质数学模型精度偏低的问题, 构建了包括状态变量校正和误差校正的水质预警实时校正模型, 通过水质实测数据与模型模拟数据的同化, 可有效提高水质模型的计算精度。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部,中华人民共和国国家统计局.第一次全国水利普查公报[M].北京:中国水利水电出版社,2013. (Ministry of Water Resources, P.R.China, National Bureau of Statistics, P.R.China. Bulletin of first national census for water [M]. Beijing: China Water & Power Press,2013. (in Chinese))
- [2] 毛战坡,王雨春,彭文启,等.筑坝对河流生态系统影响研究进展[J].水科学进展,2005,16(1):134-139. (MAO Zhanpo, WANG Yuchun, PENG Wenqi, et al. Advances in effects of dams on river ecosystem[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(1): 134-139. (in Chinese))
- [3] 杨娜,梅亚东,李娜.生态友好型水库调度及其研究进展[J].水利水电科技进展,2008,28(5):91-94. (YANG Na, MEI Yandong, LI Na. Operation of ecofriendly reservoirs and its research progress[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008,28(5):91-94. (in Chinese))
- [4] 夏军,赵长森,刘敏,等.淮河闸坝对河流生态影响评价研究:以蚌埠闸为例[J].自然资源学报,2008,23(1):48-60. (XIA Jun, ZHAO Changsen, LIU Min, et al. Impact assessment of dams & flood gates projects of Huaihe River on river ecosystem:A case study of the Bengbu Site[J]. Journal of Natural Resources, 2008,23(1):48-60. (in Chinese))
- [5] 计红,韩龙喜,刘军英,等.水质预警研究发展探讨[J].水资源保护,2011,27(5):39-42. (JI Hong, HAN Longxi, LIU Junying, et al. Study on water quality early warning[J]. Water Resources Protection, 2011,27(5):39-42. (in Chinese))
- [6] 芮孝芳. Muskingum 法及其分段连续演算的若干理论探讨[J].水科学进展,2002,13(6):682-688. (RUI Xiaofang. Some theoretical studies on the Muskingum method and its successive routing in subreaches [J].Advances in Water Science, 2002, 13(6): 682-688. (in Chinese))
- [7] 汪德耀. 计算水力学理论与应用[M].北京:科学出版社,2011. (WANG Deguan. Computational hydraulics theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [8] 谭维炎. 计算浅水动力学:有限体积法的应用[M].北京:清华大学出版社,1998. (TAN Weiyan. Computational hydrodynamics of shallow water:Finite volume method application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. (in Chinese))
- [9] 施勇,栾震宇,陈炼钢,等.长江中下游江湖水沙调控数值模拟[J].水科学进展,2010,21(6):823-831. (SHI Yong, LUAN Zhenyu, CHEN Liangang, et al. The numerical simulation of the control of stream and bedload in rivers and lakes at the mid-low valley of the Yangtze River[J]. Advances in Water Science,2010,21(6):823-831. (in Chinese))
- [10] JI Zhengang. Hydrodynamics and water quality: Modeling rivers, lakes, and estuaries [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [11] 曾思育,杜鹏飞,陈吉宁.流域污染负荷模型比较研究[J].水科学进展,2006,17(1):108-112. (ZENG Siyu, DU Pengfei, CHEN Jining. Capability comparison among watershed pollution loading models[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1):108-112. (in Chinese))
- [12] 施勇,栾震宇,陈炼钢,等.长江中下游实时洪水预报模拟[J].水科学进展,2010,21(6):847-852. (SHI Yong, LUAN Zhenyu, CHEN Liangang, et al. Simulation of real-time flood forecasting of the mid-low valley of the Yangtze River [J]. Advances in Water Science, 2010,21(6):847-852. (in Chinese))
- [13] 吴晓玲,向小华,牛帅,等.基于节点水位信息的复杂河网实时校正方法[J].水力发电学报,2013,32(5):153-157. (WU Xiaoling, XIANG Xiaohua, NIU Shuai, et al. Real-time correction method for complex flow in rivernetwork based on nodal water stage updating [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013,32(5):153-157. (in Chinese))
- [14] 李致家,孔凡哲,王栋,等.现代水文模拟与预报技术[M].南京:河海大学出版社,2010. (LI Zhijia, KONG Fanzhe, WANG Dong, et al. Modern hydrological modeling and forecasting techniques [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2010. (in Chinese))
- [15] 施勇. 长江中下游水沙输运及其调控数学模型研究[D].南京:河海大学,2006. (SHI Yong. Research on water-sediment transportation and its controlling mathematical model of middle and lower reaches of Yangtse River [D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [16] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method[M]. London: Pearson Education Ltd, 2007.

## Hydrology, hydrodynamics, and water quality model for impounded rivers: I: Theory\*

CHEN Liangang<sup>1</sup>, SHI Yong<sup>1</sup>, QIAN Xin<sup>2</sup>, LUAN Zhenyu<sup>1</sup>, JIN Qiu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** In order to satisfy the requirements of water environment daily management on large-scale impounded river network, the Hydrology, Hydrodynamics, and Water Quality Model (DHQM) is designed based on the cross-integration of multiple methods. DHQM adopts a modular structure as well as one- and two-dimensional nesting frameworks. DHQM includes 5 parts: River runoff simulation, sluice scheduling simulation, river water quality simulation, local inflow and river pollution load estimation, and water quality real-time correction. DHQM demonstrates a fair data robustness and flexibility in application, which boosts its applicability for the real-time early warning and regulation of water environments as well as for quantifying the hydrological and environmental effects of dams and sluices.

**Key words:** environmental hydraulics; coupling simulation of water quantity and quality; integration of multiple models; river network with multi-sluices

---

### 著作权使用声明

本刊所登论文的中、英文摘要或全文同时被有关文摘刊物、检索系统、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社等有关网上期刊转载、传播,作者将稿件交本刊登载的同时也将数字化汇编权、数字化复制权、数字化制品形式(包括光盘、互联网出版物)发行权、信息网络传播权等著作权授予本刊编辑部,作者著作权使用费随本刊稿酬一次性给付。凡有不同意见者,可另投他刊。2010年1月起,《水科学进展》许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社独家使用上述中文版著作权,任何其他第三方不得使用。

作者来稿文责自负,不得一稿多投。收到本刊收稿通知后3个月未收到稿件处理意见者,若无其他约定,可自行处理稿件。论文出版后,按国家有关规定酌付稿酬,并赠阅当期期刊两份。受编辑部人力所限,退稿稿件恕不返审稿意见,敬请谅解。

《水科学进展》编辑部

---

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51209137) and the National Key Technologies R&D Program of China during the 12th Five-year Plan Period (No. 2013BAB12B03).