

# 变化环境下河流量水质联合模拟与评价

王建华, 肖伟华\*, 王浩, 柴增凯, 牛存稳, 李玮

中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038

\* 联系人, E-mail: xiaoweihua@iwhr.com

2012-06-13 收稿, 2012-08-16 接受, 2013-02-20 网络版发表

国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金(51021066)、国家重点基础研究发展计划(2006CB4034, 2010CB951102)和国家自然科学基金(51009150, 40830637)资助

**摘要** 变化环境下流域水循环和水资源状况发生了深刻的改变, 从而对河流水体水环境产生了显著的影响. 根据经济社会发展对水资源的要求, 水量与水质越来越成为水资源开发利用的核心制约. 从水资源数量与质量双重属性出发, 阐述了水量水质联合评价与模拟的研究进展与存在的不足, 进一步指出了传统评价单一水体质量的方法已经不适用于现代环境下水资源管理的需求, 并立足河网水流与污染物迁移转化过程, 开发了适用于河流水环境系统的河网与湖库水动力-水质耦合的数值模型, 通过验证结果表明, 模型计算的模拟值与实测值误差较小, 满足应用的要求, 实现了河流水环境系统水量与水质的联合动态模拟. 在此基础上, 完成了联合模拟模型在滦河流域的应用.

## 关键词

变化环境  
水量与水质  
联合模拟与评价  
滦河流域

伴随着世界上很多地区人口的增长, 对水资源的需求也不断增长. 这使得全球水资源面临着人口与消费、土地利用变化、城市化和气候变化等压力的单一和综合影响<sup>[1]</sup>, 这些压力正在改变着人类赖以生存的地球环境. 所有这些压力对水资源的质量和数量的变化都有所贡献, 许多研究预测指出气候变化会影响水资源供给与利用的数量与质量<sup>[2-4]</sup>; 并且, 土地利用、城市化、人口增长、能源利用和经济增长等人类活动压力对全球水循环的影响可能超过近期或预期气候变化的影响<sup>[5]</sup>, 从而影响水资源数量与质量. 鉴于全球变化环境下水资源的相互依存状况以及面临的全球压力充满不确定性, 河流水资源管理的目标主要是满足水量、水质与生态环境保护的需求<sup>[6]</sup>. 本文充分考虑变化环境下流域水循环<sup>[7-9]</sup>演化特性, 立足河网水流与污染物迁移转化过程, 开发了适用于河流水环境系统的河网与湖库水动力-水质耦合的数值模型, 并在滦河流域进行了应用.

## 1 水量水质联合模拟的背景

在自然界中, 水量与水质是一个统一的整体, 是水资源的两个基本属性, 两者互为依存, 缺一不可. 国内外许多学者针对水资源管理的需求, 做了大量关于水量水质评价与模拟方面的工作. Tetsuya 等人<sup>[10]</sup>构建了渭河流域水量水质综合模型, 并进行了应用. Xia 等人<sup>[11-13]</sup>总结了水量水质综合管理的障碍与方法, 提出了针对地表来水与用水状况的水量水质联合评价方法. Price 等人<sup>[14,15]</sup>将水资源配置与水质影响分析结合起来, 构建了水量水质一体化管理的决策支持工具. Chen 等人<sup>[16,17]</sup>研究了农业用水对黄河水质的影响进行了综合评价. Aertgeerts<sup>[18]</sup>提出了欧洲和中亚地区基于健康准则的河流水资源数量与质量管理情况. Dai 等人<sup>[19]</sup>针对排水区域提出了水量水质优化运行的模式. Paulo 等人<sup>[20]</sup>通过随机模糊神经网络提出了考虑水量与水质双重目标的水

**引用格式:** 王建华, 肖伟华, 王浩, 等. 变化环境下河流量水质联合模拟与评价. 科学通报, 2013, 58: 1101-1108

**英文版见:** Wang J H, Xiao W H, Wang H, et al. Integrated simulation and assessment of water quantity and quality for a river under changing environmental conditions. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-012-5622-0

库运行策略. Chaparro 等人<sup>[21]</sup>研究了 Orontes 河水量与水质的空间变异规律. Jochen 等人<sup>[22]</sup>研究了 THC-Tuyamuyun 水库工程运行调度对水量水质的动态影响. 谷照升等人<sup>[23]</sup>运用无单元法研究了密云水库总氮和总磷的季节变化特征. 曾光明等人<sup>[24-26]</sup>针对河流水质数值模拟开展了模型耦合与方法改进方面的研究. 还有很多学者<sup>[27-32]</sup>在地表河流水质水质联合评价理论与方法上开展了研究工作.

但是, 随着环境变化对地表水体质量的长期积累效应逐渐放大, 造成很多水域不能满足水资源开发利用的要求. 总体上来看, 目前的河流水质模拟与评价方法存在着以下几个方面的不足: (1) 分离式评价. 河流水质相互影响的作用机制不明确, 还是分离式评价. (2) 静态评价. 水质水质联合评价通常只能评价静态水体, 不能考虑时间与空间变化特性. (3) 时空尺度的局限. 受数据资料的限制, 水质水质联合模拟与评价的尺度不一致的问题还不能很好地解决. (4) 评价对象单一. 目前大多数水质水质评价只是针对河流、湖库的某单一水体, 对河流多属性水体的综合评价研究不足.

为了解决以上问题, 需要结合我国现代水资源综合评价方法<sup>[33]</sup>, 充分考虑污染物伴生于水循环的产流、汇流、开发利用和排放等过程, 揭示不同水体水量与水质相互影响的作用机制, 采用动力学方法模拟, 从而建立河流水质水质联合模拟与评价的新科学体系, 为水资源管理与水环境保护提供有力的支撑.

## 2 河流水质水质联合评价模型方法

河流水环境系统中主要有河网水流水体和河道水库水体. 水体在赋存空间内不断流动, 污染物伴随着自然水体流动发生迁移、扩散、降解、吸附和沉降等一系列物理、生物和化学过程, 这些过程都受到水文与水力学因素的直接影 响. 因此, 通过构建河流水环境系统水动力与水质模型的方法模拟水量与水质的动态变化过程, 可以更全面地了解河流水体的水质分布状态.

### 2.1 河网水力水质数学模型方程

(1) 一维非恒定流方程. 应用圣维南方程组<sup>[34]</sup>刻画水体在河流水体流动的形态, 其基本方程为连续方程

$$B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = q, \quad (1)$$

动量方程

$$g \frac{\partial z}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Q}{A} \right) + \frac{Q}{A} \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{Q}{A} \right) + g \frac{|Q|Q}{AC^2R} = 0, \quad (2)$$

式中,  $Q$  为流量,  $m^3/s$ ;  $z$  为水位,  $m$ ;  $t$  为时间,  $s$ ;  $s$  为河渠长,  $m$ ;  $q$  为旁侧入流,  $m^3/s$ ;  $B$  为水面宽度,  $m$ ;  $A$  为断面面积,  $m^2$ ;  $C$  为谢才系数,  $m^{1/2}/s$ ;  $R$  为水力半径,  $m$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ .

(2) 一维水质模型方程. 基于河湖水体水动力学模型, 纵向一维水质控制方程<sup>[35]</sup>为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( E \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \sum S_i, \quad (3)$$

式中,  $C$  为  $x$  处河渠水流中污染物浓度,  $mg/L$ ;  $x$  为离排污口处( $x=0$ )的河水流动的距离,  $m$ ;  $t$  为时间,  $h$ ;  $u$  为河渠水流断面的平均流速,  $m/s$ ;  $E$  为河流离散系数,  $m^2/s$ ;  $S_i$  为污染物的源汇项,  $mg/(L \cdot h)$ . 其中, 源汇项包括侧向入流污染物汇入、污染物的降解与合成等.

在考虑多个水质变量的综合水质模型中, 方程的时变项、迁移项和扩散项基本相同. 因此, 在考虑多个水质变量(如  $NH_3-N$ ,  $COD_{Mn}$ ,  $TN$ ,  $TP$  和  $DO$  等)时, 各个变量之间的物理、化学和生物的影响关系反映在源汇项中.

(3) 汉点方程. 在河网水力模型方程中, 汉点方程的建立基于两个假定: ① 汉点处各个汉道断面的水位相等, 即:  $z_i = z_j = \dots = \bar{z}$ . 其中,  $i, j$  表示通过汉点各个汉道断面的编号,  $\bar{z}$  为汉点处的平均水位. ② 汉点处的蓄水量为零, 流进汉点的流量等于流出汉点的流量, 即:  $\sum Q_i = 0$ .

在河网水质模型方程中, 认为流入交叉口水体中的污染物在交叉口充分混合, 水质达到均匀状态, 所有交叉口出流断面的污染物浓度相等. 在汉点方程中, 不考虑汉点的蓄水量, 并且汉点处水流平缓, 不存在水位突变.

### 2.2 河道水库水力水质数学模型方程

河道型水库具有河流及水库的双重特性, 需要运用铅直二维数学物理方程<sup>[36]</sup>来描述水量与水质的变化过程. 铅直二维模型假定水温、污染物浓度等指标在横断面方向不变, 在水深方向和水平方向发生变化, 水库水体被沿水平、水深方向分成若干控制体, 通过计算每个控制体内部的水温、污染物、营养盐等物质

的收支情况达到模拟水体内部流动、物质传递的目的。  
连续方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

X 方向动量方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( A_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (5)$$

Z 方向动量方程

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g, \quad (6)$$

物质平衡方程

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \sum S_i, \quad (7)$$

式中,  $u, w$  分别为水流沿水平与垂直方向的流速,  $m/s$ ;  $C$  为物质浓度,  $mg/L$ ;  $A_x, A_z$  分别为  $x, z$  向的紊动扩散系数,  $m^2/s$ ;  $D_x, D_z$  分别为  $x, z$  向的离散系数,  $m^2/s$ ;  $\rho$  为水的密度,  $g/L$ ; 其他符号意义同前。

### 2.3 河流水环境系统联合模拟

目前, 一、二维模型耦合一般是在连接断面处, 根据两种模型模拟的水位、流量相等的条件, 实现联合求解。在连接断面处设置过渡单元实现这一耦合, 过渡单元为一维模型单元与二维模型单元的连接单元, 如图 1 所示。在连接单元处根据河流水深与水库水体分层厚度, 设置水动力与水质的连接条件。其中, 水动力连接要求水深、流速与进出水总量一致; 水质连接要求水质变量浓度和污染物总量一致。

## 3 河流量水质联合模拟模型验证

联合模拟模型可以模拟不同水体的水动力学参

数和不同的水质变量。根据模拟与评价目标水体的特征和已有监测资料的情况, 针对不同水体进行有区别的验证。如, 在现有条件下水库水体的水动力参数只能进行规律性分析, 且河流水体与水库水体关注的水质变量也不一致。

### 3.1 河网水力水质模型验证

本次河道水动力模型验证采用滦河干流的监测断面水位、流量过程进行验证。最后经过比较, 采用滦河干流郭家屯站和三道河子站 2006 年的实测资料进行模型验证, 模拟计算这两个河道断面的水位、流量过程。模拟结果与监测结果比较如图 2~3 所示。对比站点实测值, 郭家屯站、三道河子站分别有 85% 和 82% 的流量误差在 10% 以内, 三道河子站 90% 的水位误差在 10% 以内, 完全满足了模型应用的精度要求。

以水动力模型模拟的水体流动过程作为水质模型验证的输入, 并根据 2006 年统计的滦河干流段入河的污染源的量以及入河过程进行时程分配, 对郭家屯断面和三道河子断面 2006 年各月污染物指标—— $NH_3-N$  和  $COD_{Mn}$  进行模拟验证, 验证结果如图 4 所示。对比站点实测值, 郭家屯站、三道河子站分别有 83% 和 80% 的浓度误差在 18% 以内, 总体趋势一致, 满足了应用的要求。

### 3.2 水库水体铅直二维模型验证

潘家口水库在最高水位条件下, 库区可延伸至距坝 64 km 的车河口断面, 最高水深为 69 m, 从坝前至上游, 库底高程逐渐升高。水库水体铅直二维模型以水平方向 1 km, 垂向 1 m 为一个计算单元, 水平方向上最多有 64 个单元格, 垂向最深有 69 个单元格。根据实际地形, 确定最终计算单元格总计为 2246 个。

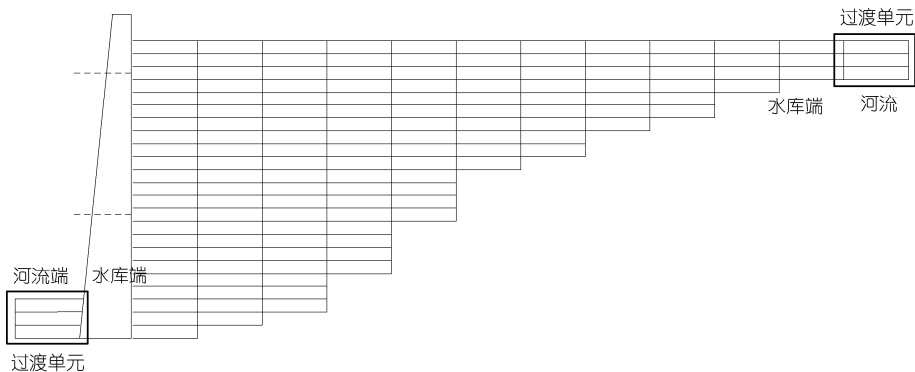


图 1 一维与二维连接设置示意图

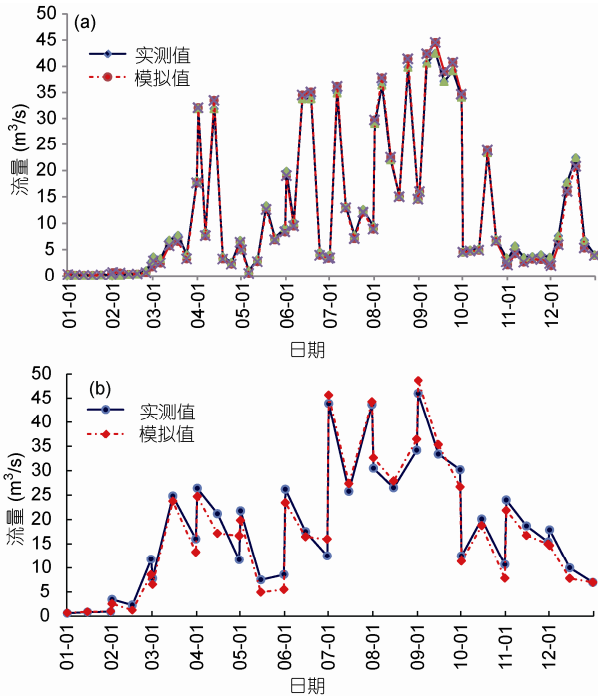


图2 滦河干流监测断面流量模拟值与监测值比较  
(a) 郭家屯站; (b) 三道河子站

根据2010年10月29日和31日现场分时实测数据和相应的模型计算结果分析,认为该模型计算结果能较好地反映水库的水流特性与运动规律;并针对水库水体特征,采用TN和TP的实测数据对模型进行

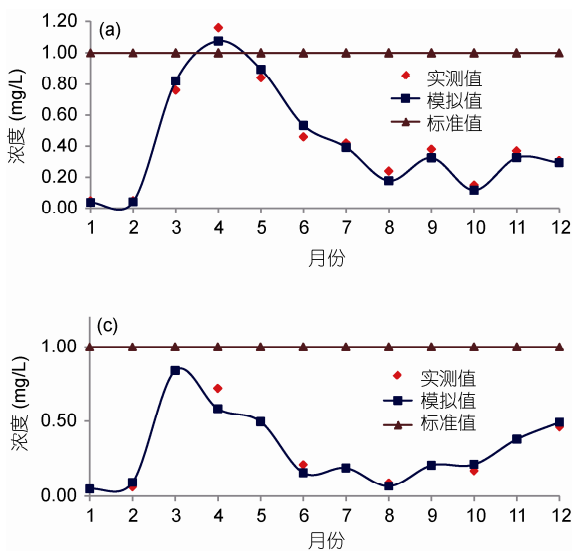


图4 郭家屯-三道河子站浓度模拟值与监测值比较  
(a) 郭家屯站氨氮; (b) 郭家屯站高锰酸钾; (c) 三道河子站氨氮; (d) 三道河子站高锰酸钾

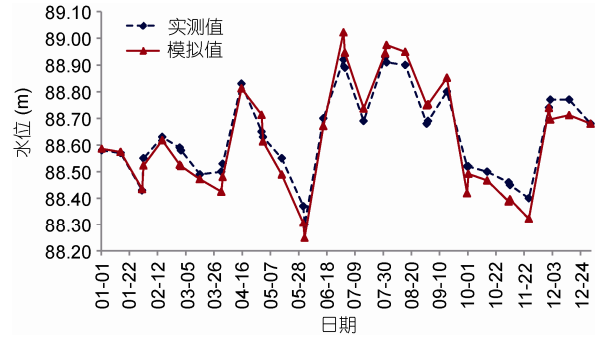


图3 滦河干流三道河子断面水位模拟值与监测值比较  
不考虑郭家屯站的日均水位验证,因为受丰宁电站的影响,除洪水外均失去代表性

了验证,验证结果如图5所示.

从TP和TN的实测值与模拟值对比分析可知,各断面平均误差分别为12%和9%.个别断面误差较大,但模型总体上满足了应用的要求.

## 4 河流水量水质联合模拟模型验证

### 4.1 滦河流域概况

滦河流域位于华北平原东北部,北纬39°10'~42°35',东经115°40'~119°20'.发源于河北省丰宁县坝上骆驼沟乡小梁山南坡大古道沟,流经内蒙古、辽宁、河北的27个市县区,于河北省乐亭县兜网铺注入渤海,全长888 km,流域面积44900 km<sup>2</sup>,如图6(a)

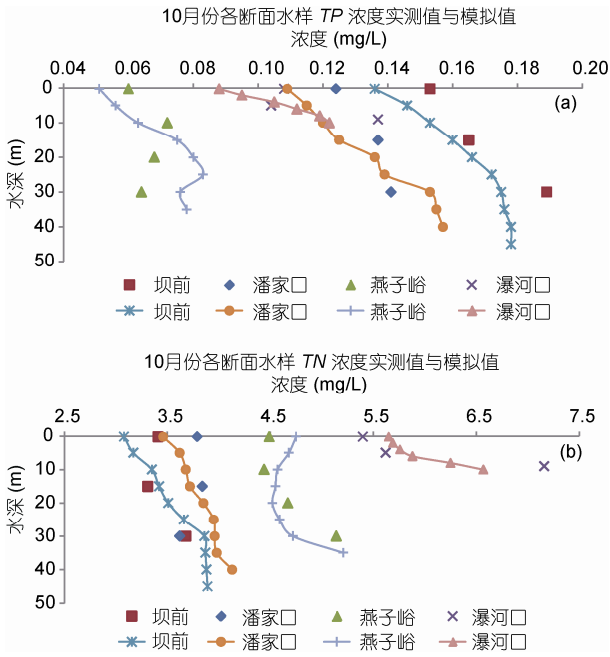


图5 模型 TP 和 TN 计算验证结果图

图中仅有数据标记的散点是实测值;平滑线带和数据标记的为模拟值。(a) TP; (b) TN

所示. 潘家口水库位于滦河中游迁西县的杨查子村, 水库以上控制流域面积 33700 km<sup>2</sup>, 占流域总面积的 75%以上, 如图 6(b)所示.

随着人类社会的经济结构和生产生活等活动的影响, 以及自然环境变异的作用, 自然因子的波动和人类活动的干扰也影响水循环各环节中水量、水的运动节律以及水质的变化. 相应的, 滦河流域水环境发生了比较深刻地变化, 主要表现为近 44 年来流域径流深减少<sup>[37]</sup>, 水环境逐渐恶化且污染物新型化和多样化, 如重金属和雌激素污染等<sup>[38]</sup>.

#### 4.2 河流水体量质联合模拟与评价

本次研究中, 滦河流域河流水环境系统主要是干流河道水体和潘家口水库水体的水量水质评价. 由于目标水体特性的不同, 模拟模型控制方程与数值解法存在差异, 如河网系统模拟中水流计算时间步长为 15 min, 水质计算时间步长为 1 h; 水库水体模拟计算的时间步长为 9 s. 因此, 河流水环境系统联合模拟与评价采用统一的结果输出间隔为 1 h,

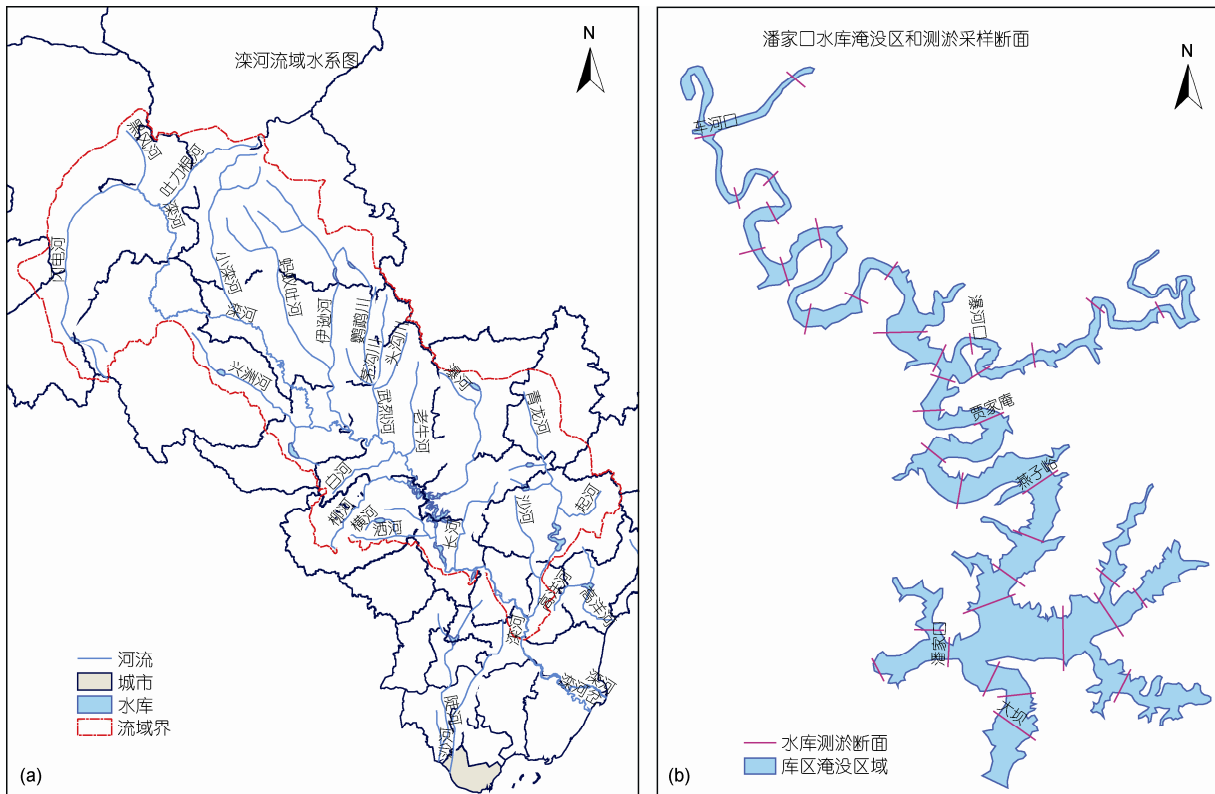


图6 滦河流域水系分布与潘家口水库库区示意图

(a) 滦河水系; (b) 潘家口水库库区

纵向模拟计算空间步长为 1 km, 满足过渡单元联合计算的要求.

根据实际资料要求, 模拟与评价的时段为 2006 年, 年实际降水量为 428 mm, 在滦河流域降水长系列资料排频中属于偏枯年份; 模拟范围包括滦河乌龙砬上游干流河道和潘家口水库. 采用河流水环境系统水量水质联合模拟与评价模型, 河道干流与水库水体均模拟计算了溶解氧、氨氮、高锰酸盐指数、总磷和总氮等 5 项水质指标, 实现河流水环境系统水量与水质联合模拟. 但河道干流水体水质类别的判断依据氨氮和高锰酸盐指数, 水库水体的水质类别判断依据总磷和总氮. 在此基础上, 按计算时段进行统计, 可得河道干流水体的各月不同水质类别的水量, 如表 1 所示. 滦河干流河道水体 I 类~劣 V 类的水量分别为 11.9%, 16.9%, 32.3%, 14.2%, 19.4% 和 5.4%; 从时间上看, 1 月份有 89.3% 的水量优于 III 类水质要求, 7 月份优于 III 类水质要求的水量最大为  $6040.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ .

依据地表水环境质量标准(GB3838-2002)中对水库水体不同水质类别水体的 *TN* 和 *TP* 浓度范围划定要求, 潘家口水库水质以劣于 IV 类的水体为主, 如图 7 和 8 所示. 伴随着气候变化和人类活动的影响, 潘家口水库水体营养物质富集, *TP* 和 *TN* 浓度偏高. 限于篇幅, 以 2006 年 6 月为例, 水体中 *TP* 的最低浓度

表 1 2006 年滦河干流水体各水质类别的水量 (单位:  $\times 10^4 \text{ m}^3$ )

月份	I	II	III	IV	V	劣 V
1	112.5	126.2	81.2	38.2	0.0	0.0
2	96.3	159.1	62.6	37.7	49.6	52.8
3	262.4	297.6	523.8	221.6	287.1	365.5
4	756.4	857.9	1510.2	638.9	1029.5	852.1
5	309.3	436.6	788.6	296.5	285.6	185.2
6	513.4	915.8	1614.0	643.2	878.4	0.0
7	817.5	1518.6	3704.2	1367.2	924.1	728.8
8	1165.4	1461.9	2925.6	1737.6	3122.1	523.1
9	555.1	783.6	1415.4	418.5	958.5	0.0
10	634.4	854.3	1162.5	536.8	788.8	0.0
11	583.0	864.1	1941.4	854.8	839.5	0.0
12	151.5	202.6	462.2	335.5	575.9	0.0

为 0.068 mg/L, *TN* 的最低浓度为 5.31 mg/L, 均超出了地表水水环境质量 III 类标准值 0.05 和 1.0 mg/L.

### 5 结论与讨论

变化环境下河流水资源数量与质量呈现出更加明显的一体化与动态变化特征, 需要建立河流水质联合模拟与评价的新科学体系. 本研究构建了河流系统水动力与水质联合模拟模型, 并对模型进行验证表明, 模型计算的模拟值与实测值误差较小,

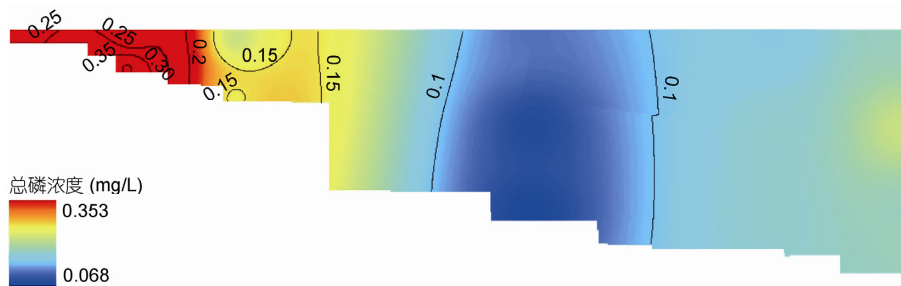


图 7 潘家口水库 2006 年 6 月份水体总磷浓度分布图

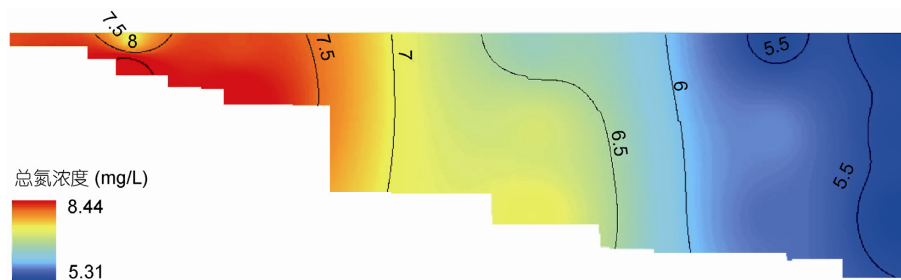


图 8 潘家口水库 2006 年 6 月份水体总氮浓度分布图

满足应用的要求, 实现了水量与水质的联合动态模拟。

在全球气候变化和高强度人类活动干扰下, 滦河流域水资源和水环境状况发生了深刻的改变。根据水资源数量与质量联合动态评价模型模拟结果, 2006 年滦河乌龙矾上游干流河道水体 I 类~劣 V 类的水量分别为 11.9%, 16.9%, 32.3%, 14.2%, 19.4% 和 5.4%; 潘家口水库水质以劣于 IV 类的水体为主。

水量水质联合模拟与评价是经济社会发展对水资源管理提出的双重要求。尽管在河流水环境系统中实现了联合模拟与评价, 但是陆域伴随水循环过程的污染源汇入及点源污染入河量的统计都还需要不断完善。另外, 现有水文与水质监测资料系列较短, 联合模拟与评价的结论对于变化环境下压力效应研究的支撑还有待加强。

## 参考文献

- 1 Julie B Z, James R M, James S. Global stressors on water quality and quantity. *Environ Sci Technol*, 2008, 6: 4247-4254
- 2 Gleick P H. Water in crisis: Paths to sustainable water use. *Ecol Appl*, 1998, 8: 571-579
- 3 Arnell N W. Climate change and global water resources. *Glob Environ Change*, 1999, 9: S31-S49
- 4 Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 2006, 313: 1068-1072
- 5 Meybeck M, Vörösmarty C. The integrity of river and drainage basin systems: Challenges from environmental changes. In: Kabat P, ed. *Vegetation, Water, Humans and the Climate: A New Perspective on An Interactive System; International Geosphere-biosphere Programme Global Change Series*. Berlin: IGBP/Springer-Verlag, 2004
- 6 Jacques G. *Water Resources: Quantity and Quality*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009
- 7 王浩, 王成明, 王建华, 等. 二元年径流演化模式及其在无定河流域的应用. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2004, 34(增刊 I): 42-48
- 8 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法. *水利学报*, 2006, 37: 1496-1502
- 9 刘家宏, 秦大庸, 王浩, 等. 海河流域二元水循环模式及其演化规律. *科学通报*, 2010, 55: 512-521
- 10 Tetsuya K, Osamu H, Wang X, et al. Development of an integrated mathematical model on water quantity and quality and its application to the Weihe Basin. *ASAE Annual International Meeting Technical Papers*, 1998, 1-9
- 11 Xia J, Kuniyoshi T. Barriers to sustainable management of water quantity and quality. *Hydrol Sci J*, 1999, 44: 502-505
- 12 夏军, 王中根, 严冬, 等. 针对地表来用水状况的水量水质联合评价方法. *自然资源学报*, 2006, 21: 146-153
- 13 Huang G H, Xia J. Barriers to sustainable water-quality management. *J Environ Manage*, 2001, 61: 1-23
- 14 Pirie R L, Loe R C, Kreutzwisser R. Drought planning and water allocation: An assessment of local capacity in minnesota. *J Environ Manage*, 2004, 73: 25-38
- 15 Gabriel T A, Timothy K G, Darrell G F, et al. Integration of water quantity and quality in strategic river basin planning. *J Water Resour Plan Man-ASCE*, 2000, 126: 85-97
- 16 Chen J S, He D W. The response of river water quality and quantity to the development of irrigated agriculture in the last 4 decades in the Yellow River Basin, China. *Water Resour Res*, 2003, 39: 1047-1057
- 17 Xia X H, Yang Z F, Huang G H, et al. Integrated evaluation of water quality and quantity of the Yellow River. *Water Inter*, 2004, 29: 423-431
- 18 Aertgeerts R. Implementation of health-based guidelines for water supplies in Europe and Central Asia: Management considerations for municipal authorities regarding water quantity and quality. *NATO Science Series: Risk Assessment as a Tool for Water Resources Decision-making in Central Asia*, 2004, 34: 45-85
- 19 Dai T, Shao D G, Li H. Research on the regional optimal operation of water quantity and quality based on the decision drainage. In: *International Symposium on Sustainable Water Resources Management and Oasis-hydrosphere-desert Interaction in Arid Regions*, 2005. 393-403
- 20 Paulo C, Toshiharu K. Deriving reservoir operational strategies considering water quantity and quality objectives by stochastic fuzzy neural networks. *Adv Water Resour*, 2007, 30: 1329-1341
- 21 Odemis B, Sangun M K, Buyuktas D. Temporal variations in water quantity and quality of Orontes river, Turkey. *Asian J Chem*, 2007, 19: 711-723
- 22 Jochen F, Melanie B, Malika I, et al. Water quantity and quality dynamics of the THC-Tuyamuyun hydro-engineering complex and implications for reservoir operation. *Environ Sci Pollut Res*, 2007, 14: 435-442
- 23 谷照升, 杨天行, 徐清. 无单元方法在密云水库水质分析中的应用. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(增刊 I): 255-260
- 24 曾光明, 蒋益民, 袁兴, 等. 平原区二维复杂河流水质模拟计算. *环境科学学报*, 2000, 20: 603-607
- 25 李若男, 陈求稳, 蔡德所, 等. 水库运行对下游河道水环境影响的一维-二维耦合水环境模型. *水利学报*, 2009, 40: 769-775



- 26 席北斗, 秦肖生, 霍守亮, 等. 改进的有限单元法在河流水质数值模拟中的应用. 环境工程学报, 2007, 11: 128-132
- 27 Lon K. Water quantity and quality as related to the management of wild & scenic rivers. Technical Report of the Interagency Wild and Scenic Rivers Coordinating Council. 2003, 1-27
- 28 Márcia A M, Cai X M, Claudia R, et al. Joint water quantity and quality management analysis in a bio-fuel production area. International Food Policy Research Institute, 2009, 1-33
- 29 赵然杭, 陈守煜. 水资源数量与质量联合评价理论模型研究. 山东大学学报, 2006, 36: 46-50
- 30 夏星辉, 张曦, 杨志峰, 等. 从水质水量相结合的角度评价黄河的水资源. 自然资源学报, 2004, 19: 293-299
- 31 夏军, 王渺林, 王中根, 等. 针对水功能区划水质目标的可用水量联合评估方法. 自然资源学报, 2005, 20: 752-760
- 32 王西琴, 刘昌明, 张远. 基于二元水循环的河流生态需水水量与水质综合评价方法——以辽河流域为例. 地理学报, 2006, 61: 1132-1140
- 33 贾仰文, 王浩, 仇亚琴, 等. 基于流域水循环模型的广义水资源评价(I)评价方法. 水利学报, 2006, 9: 1051-1055
- 34 吴持恭. 水力学. 第2版. 成都: 成都科技大学出版社, 2002
- 35 傅国伟. 河流水质数学模型及其模拟计算. 北京: 中国环境科学出版社, 1987
- 36 高忠信, 张东. 水库水环境数值模拟. 北京: 地震出版社, 2005
- 37 李建柱, 冯平. 滦河流域产流特性变化趋势分析. 干旱区资源与环境, 2009, 23: 79-85
- 38 李永丽, 刘静玲. 滦河流域不同时空水环境重金属污染健康风险评价. 农业环境科学学报, 2009, 28: 1177-1184