

杭嘉湖一维河网水量水质联合数学模型及应用

裘骅勇 章宏伟 陈增奇

(浙江省水利水电勘测设计院 浙江 杭州 310002)

摘要 建立了能模拟杭嘉湖地区的一维河网水量水质联合数学模型,模型共选用了 30 个外部边界、100 余个内部边界和 2 个全局边界,以此来控制和体现杭嘉湖地区河网的水体流动及水质变化情况。模型计算分为验证计算和方案计算 2 种情况,由于计算目的不同,在计算边界的选择上也有所区别。从选择的 2005 年长兴(二)等 11 个水位站点、杨家埠等 5 个流量站点和杭长桥等 9 个水质站点的实测值和模型计算值的比较情况来看,所建立的杭嘉湖一维河网水环境数学模型较好地反映了杭嘉湖地区的水流运动状况和水质变化情况,表明本模型所选择的参数基本合理,模型系统可以用于对工程方案实施后河网水质变化的预测分析。

关键词 河网;一维水量水质联合数学模型;杭嘉湖地区;数值解法

中图分类号 X522 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2011)S1-0009-02

河网水量水质联合数学模型国内外已有广泛和深入的研究^[1-4],其中包括单河流模型及复杂的网状河流系统模型。为了分析杭嘉湖地区的水量水质变化规律,为制定杭嘉湖水环境治理与保护规划提供科学依据,进行了杭嘉湖地区一维河网水量水质联合数学模型研究,水质模型主要用于定量分析研究区域内污染物的输送和污染影响评价。

1 杭嘉湖一维河网水量水质联合数学模型

1.1 一维河网水动力模型方程及数值解法

一维水动力学模型控制方程为 Saint-Venant 方程组^[1-2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + Ag \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{C^2 R A} &= 0 \quad (1) \end{aligned}$$

式中: x 为空间坐标, m ; t 为时间坐标, s ; A 为断面面积, m^2 ; Q 为河道内任意断面的流量, m^3/s ; q 为旁侧入流流量, m^3/s ; R 为水力半径; g 为重力加速度, m/s^2 ; α 为动量校正系数; C 为谢才系数。

Mike11 采用 Abbott 六点隐式差分格式离散 Saint-Venant 方程组,该离散格式在每一个网格点并不同时计算水位和流量,而是按顺序交替计算水位或流量,该格式无条件稳定,可以在相当大的

Courant(克朗)数下保持计算稳定,可以取较长的时间步长以节省计算时间。对上述离散方程组采用传统的追赶法(即“双扫”算法)进行求解。

1.2 一维河网水质模型基本方程及数值解法

河网水质模型的控制方程为一维对流扩散方程^[1-2]:

$$\frac{\partial AC_1}{\partial t} + \frac{\partial QC_1}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C_1}{\partial x} \right) = -AKC_1 + C_2q \quad (2)$$

式中: C_1 为物质质量浓度, mg/L ; D 为纵向扩散系数, m^2/s ; C_2 为源/汇质量浓度, mg/L ; K 为衰减系数, $1/d$ 。

对流扩散模型可以模拟在水流和浓度梯度影响下,传输扩散过程中的溶解或是悬浮物质(如盐分、热量、沙土、溶解氧、无机物、有机物及其他水质组分)在时间和空间上的分布。为减少数值离散和保证质量守恒,Mike11 采用时间和空间中心隐式差分格式离散对流扩散方程,同水动力模型一样,上述方程组采用追赶法求解。

2 研究区域与边界条件

2.1 计算范围

杭嘉湖一维河网水环境数学模型计算范围涵盖了杭嘉湖地区的整个杭嘉湖(杭嘉湖区)东部平原和

基金项目 国家自然科学基金(40901016)

作者简介 裘骅勇(1973—),男,浙江杭州人,高级工程师,从事水资源规划研究。E-mail: qihuayong@sina.com

西部山区(浙西区)的中下游区域^[5-6]。

2.2 边界条件

边界条件是河网数学模型的主要约束条件。本模型考虑了3种边界属性,分别为外部边界、内部边界和全局边界。杭嘉湖一维河网水环境数学模型共选用了30个外部边界、100余个内部边界和2个全局边界,以此来控制和体现杭嘉湖地区河网的水体流动及水质变化情况。模型计算分为验证计算和方案计算2种情况,由于计算目的不同,在计算边界的选择上也有所区别。

模型验证计算选择2005年杭嘉湖地区的实测水文条件进行复演^[5-6]。验证计算时,北面与太湖相连的合溪新港、长兴港、杨家浦港、小梅港、长兜港、大钱港、罗、幻、濮、汤、古、太浦河等12个外部边界均采用2005年小梅口实测逐日水位过程,西北的合溪水库边界,采用2005年径流条件下经过径流调节的合溪水库(在建)下泄流量,泗安塘边界采用2005年天平桥水文站实测逐日水位过程;东苕溪边界采用2005年余杭水文站实测逐日水位过程,南边界各口门与钱塘江通过闸门连接,南排各闸门调度运行情况采用2005年实际调度运行情况进行控制;东面的米市渡边界,采用2005年米市渡水文站实测潮位过程。水质边界按2种情况处理:有实测资料的按实测数据赋值,无实测资料的参考临近的水质监测数据进行赋值。

模型方案计算是在模型验证取得较好结果的基础上进行的。方案计算选择典型年水文条件、现状或规划用水水平。其中,北面太湖边界、太浦闸下泄过程、东面米市渡边界过程(包括水位、流量和水质)均由太湖流域管理局水利发展研究中心提供;东、西苕溪边界及西部山区径流过程由实测流量扣除区域用水情况后给出,南面钱塘江潮位仍按2005年实测潮位过程给出。

3 模型率定与验证

3.1 典型年选择

本次模型计算的典型年选择。参照已审查批准的《太湖流域水资源综合规划》^[5-6]中所确定的5种典型年(20%丰水年至1989年,50%平水年至1990年,75%中等干旱年至1976年,90%枯水年至1971年、95%特枯水年至1967年),选择其中的枯水年1971年和平水年1990年2个典型年进行计算。

3.2 模型验证

本次杭嘉湖一维河网水环境数学模型验证的内容包括水动力验证和水质验证2部分。水动力主要验证断面的逐日水位、逐日流量和进出水量3项内

容。水质主要验证 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 指标。

3.2.1 水动力模型验证

a. 水位验证。杭嘉湖地区水位测站众多,为使模型计算结果能真实、全面地反映杭嘉湖地区水位变化的实际情况,在计算范围内共选择了11个较有代表性水位站点2005年1月1日至12月31日实测的逐日水位过程对模型进行验证。这里仅显示长兴(二)站2005年实测逐日水位与模型计算结果的对比情况(图1)。从逐日水位验证结果可以看出,模型计算的逐日水位变化曲线与实测逐日水位变化曲线吻合良好,峰值水位也基本接近,表明本模型较好地模拟了东、西苕溪、长兴平原和頔塘一带环湖港的水位变化情况。

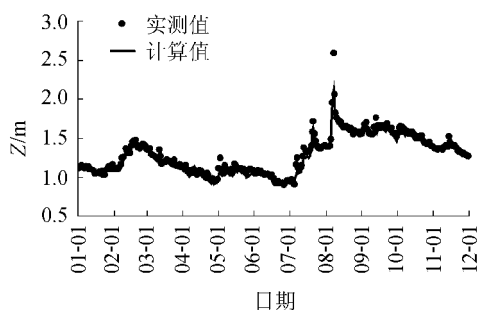


图1 长兴(二)站2005年逐日水位验证结果

b. 流量验证。杭嘉湖地区固定流量测站相对较少,主要位于环湖一线,选择长兴(二)站等5个流量站点2005年1月1日至12月31日实测逐日流量过程对模型进行验证。流量值为正表示水流出杭嘉湖地区(顺流),流量值为负表示水流流入杭嘉湖地区(逆流)。验证结果表明,模型计算的逐日流量变化曲线与实测逐日流量变化曲线吻合较好,峰值流量也较为接近,表明本模型计算结果基本能体现环湖一线的水流特点(图2)。

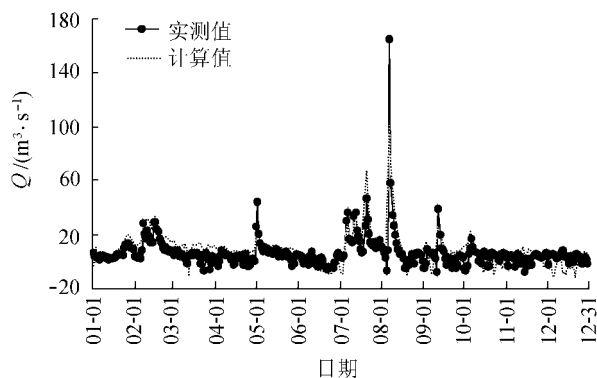


图2 长兴(二)站2005年逐日流量验证结果

3.2.2 水质模型验证

针对杭嘉湖地区地表水水质污染以有机型污染为主的特点,以 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 作为研究对象,模拟了2005年杭嘉湖地区河网内 (下转第25页)

[8] DL/T5105—1999 水电工程水利计算规范[S].

[9] 中华人民共和国水利部. 水库大坝安全鉴定办法[R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2003.

[10] 中华人民共和国水利部. 水库降等与报废管理办法(试行) [R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2003.

[11] 周之豪, 沈曾源, 施熙灿, 等. 水利水能规划[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.

[12] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报(长江、黄河) [R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2001.

[13] DL/T5015—1996 水利水电工程动能设计规范[S].

[14] 中华人民共和国发展改革委员会, 中华人民共和国建设部. 建设项目经济评价方法与参数[M]. 3 版. 北京: 中国计划出版社, 2006.

[15] 李国英. 应研究和转变水库运行方式[J]. 治黄信息与科技, 2006(2): 12-13.

[16] SL252—2000 水利水电工程等级划分及洪水标准[S].

[17] 刘宁. 21 世纪中国水坝安全管理、退役与建设的若干问题[J]. 中国水利, 2004, 23: 27-31.

[18] EMBI A F. Control of sedimentation in small reservoirs[D]. Southampton: University of Southampton, 1986.

[19] OKADA T, BABA K. Sediment releasase plan at sakuma reservoir[C]//14th Congress on Large Dams, Rio de Janeiro: ICOLD, 1982.

[20] 周建军, 林秉南, 张仁. 三峡水库减淤增容调度方式研究——双汛限水位调度方案[J]. 水利学报, 2000(10): 1-11. (收稿日期: 2010-12-30 编辑: 方宇彤)

(上接第 10 页)

COD_{Cr}、NH₃-N、TP 质量浓度的时空分布情况, 并选择杭长桥等 9 个水质监测断面的实测资料对模型计算结果进行验证。从计算的 COD_{Cr}、NH₃-N、TP 质量浓度变化曲线与实测值的比较情况来看, 在大多数情况下, 模型计算值与实测值吻合较好, 各水质监测断面的计算值与实测值相对误差小于 30%, 在水质模型允许的误差范围内(图 3~5)。少数断面的个别时段计算值与实测值相对误差较大, 主要由 3 方面的原因造成: ①污染源排放位置难以完全准确定位, 在计算时将排污口沿河平均分布; ②水质监测值的取得存在一些随机因素的影响, 如杭长桥水质监测断面 2005 年 5 月 10 日的 NH₃-N 质量浓度为 2.75 mg/L(见图 4), 明显高于其余月份的监测值; ③河网概化和水流模拟与实际存在一定偏差, 对水质计算结果也会造成一定影响。总体来看, 在水流运动和水质变化相对较为复杂的杭嘉湖地区, 本模型的计算结果精度能够满足工程设计要求。

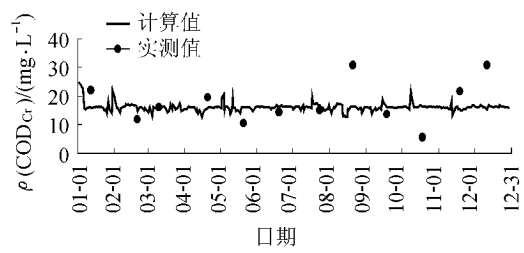


图 3 杭长桥 COD_{Cr} 质量浓度验证结果

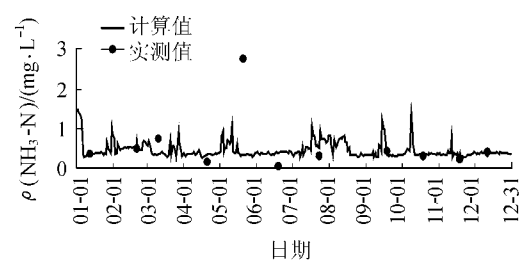


图 4 杭长桥 NH₃-N 质量浓度验证结果

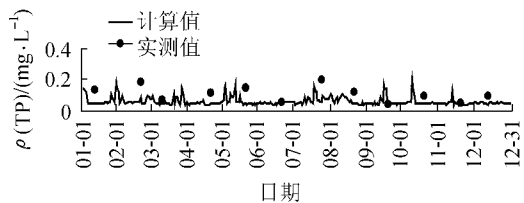


图 5 杭长桥 TP 质量浓度验证结果

4 结 语

从选择的 2005 年长兴(二) 站等 11 个水位站点、杨家埠等 5 个流量站点和杭长桥等 9 个水质站点的实测值和模型计算值的比较情况来看, 所建立的杭嘉湖一维河网水环境数学模型较好地反映了杭嘉湖地区的水流运动状况和水质变化情况, 表明本模型所选择的参数基本合理, 该模型系统可以用于对各工程方案实施后河网水质变化的预测分析。

参考文献:

[1] 傅国伟. 河流水质数学模型及其模拟计算[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987.

[2] 周雪漪. 计算水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.

[3] CHUNG T J. 流体力学的有限元分析[M]. 张二骏, 龚崇准, 王木兰, 译. 北京: 电力工业出版社, 1980.

[4] BAKER A J. Finite element computational fluid mechanics[M]. Washington, D. C.: Hemisphere Publishing Corporation, 1983.

[5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 太湖流域水环境综合治理总体方案[R]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2008.

[6] 浙江省发展和改革委员会. 浙江省太湖流域水环境综合治理实施方案[R]. 杭州: 浙江省发展和改革委员会, 2008.

(收稿日期: 2011-02-11 编辑: 高建群)