

文章编号: 1000-5862(2013) 02-0216-05

QUAL 2K 模型在乐安河流域水质模拟中的应用

黄学平^{1,2}, 万金保^{1*}, 柯 颖³

(1. 南昌大学环境与化学工程学院, 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 江西 南昌 330047;

2. 南昌工程学院土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330099; 3. 南昌工程学院学报编辑部, 江西 南昌 330099)

摘要: 应用 QUAL 2K 综合水质模型对乐安河流域 COD_{Mn} 、 NH_3-N 进行了水质模拟. 模拟结果表明: QUAL 2K 模型具有较好的模拟精度, 可以定量地描述乐安河中 COD_{Mn} 、氨氮水环境质量变化过程.

关键词: QUAL 2K 模型; 乐安河; COD_{Mn} ; NH_3-N

中图分类号: X 524

文献标志码: A

0 引言

江西省境内的乐安河流域自东向西经婺源县、德兴市、乐平市、万年县、波阳县, 最后注入鄱阳湖. 乐安河河道长 279 km, 流域面积 8 534 km², 沿途支流有大坞河、泊水河等. 整个区域河流归属江西省饶河水系. 从 20 世纪 50 年代开始, 沿乐安河流域周边陆续开办了多家厂矿企业, 其产生的大量工业废水以及沿岸居民生活污水与非点源污废水的排放, 已导致乐安河流域遭受污染, 甚至已影响到鄱阳湖的水质、底泥^[1-3].

对乐安河进行水质现状分析, 分析结果表明乐安河的主要污染物为 COD_{Cr} 、 NH_3-N 与重金属污染物 Cu、Pb. 水体中的污染物, 其自净、稀释、扩散等机理不同, 需采用不同的水质模型进行研究^[4-5], 才能够建立适合于该河的水质模型. 本文运用 QUAL 2K 综合水质模型研究 COD_{Cr} 、 NH_3-N 在乐安河流域的水质模拟, 其中将 COD_{Cr} 换算为 COD_{Mn} 作为非保守性组份进行模拟.

1 模型概述

美国环保局的 QUAL 模型在河流水质模拟中使用得最为广泛^[6-7], QUAL 2K 模型(2003. 11 版) 是在 QUAL 2E 模型(Brown and Barnwell 1987 版) 的基础上经美国 Tufts 大学 Steve Chapra 和 Greg Pelletier

开发的^[8].

1.1 基本方程

QUAL 模型基本方程为 1 维平流-扩散物质迁移方程, 该方程综合考虑了平流扩散、稀释、水质组份自身反应以及相互作用、组份的外部源和汇对组份浓度的影响^[9-15].

对于任意一种水质组份, 有

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial(A_x D_L \frac{\partial C}{\partial x})}{A_x \partial x} - \frac{\partial(A_x \bar{u} C)}{A_x \partial x} + \frac{dC}{dt} + \frac{S}{V}, \quad (1)$$

其中 C 为污染物浓度, 单位为 $mg \cdot L^{-1}$; x 为河流纵向坐标, 单位为 m ; t 为时间, 单位为 s ; A_x 为河流过水断面面积, 单位为 m^2 ; D_L 为河流纵向离散系数, 单位为 $m^2 \cdot s^{-1}$; \bar{u} 为河流断面平均流速, 单位为 $m \cdot s^{-1}$; S 为外部的源和汇, 单位为 $g \cdot s^{-1}$; V 为计算单元的体积, 单位为 m^3 .

方程(1) 右边的 4 项, 分别代表扩散、平流、组份反应、组份的外部源和汇.

1.2 模型的求解

在每一个时间步长上, 对任一种水质组份, QUAL 模型在每个计算单元上列出形如(1) 式的水质方程; 对于复杂的河流系统, 方程(1) 很难求得其解析解, 可采用有限差分法求得其数值解^[16-18].

其有限差分方程为

$$(C_i^{n+1} - C_i^n) / \Delta t = [(A_x D_L)_i (C_{i+1}^{n+1} - C_i^{n+1})] / (V_i \Delta x) - [(A_x D_L)_{i-1} (C_i^{n+1} - C_{i-1}^{n+1})] / (V_i \Delta x) -$$

收稿日期: 2012-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(41261097, 51209115), 江西省科技计划课题(20121BBF60052) 和南昌大学鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室开放基金(13005875) 资助项目.

通信作者: 万金保(1952-), 男, 江西南昌人, 教授, 博士生导师, 主要从事水污染控制及资源化技术研究.

$$(Q_i C_i^{n+1} - Q_{i-1} C_{i-1}^{n+1}) / V_i + r_i C_i^{n+1} + I_i + S_i / V_i, \quad (2)$$

其中 $V_i = A_{xi} \Delta x$ 为内部的源和汇, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$.

本文研究的污染指标 COD_{Mn} (作为非保守性组份进行模拟)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 其表达式为

(i) $\text{NH}_3\text{-N}$ 的增长率^[19-20]:

$$\frac{d[\text{NH}_3\text{-N}]}{dt} = \beta_3 N_0 - \beta_1 [\text{NH}_3\text{-N}] + \frac{\sigma_3}{D} - F_1 \alpha_1 \mu A, \quad (3)$$

其中 $[\text{NH}_3\text{-N}]$ 为氨氮浓度, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; N_0 为有机氮浓度, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; α_1 为藻类生物量相当氨氮的部分; μ 为藻类比生长率, 单位为 d^{-1} ; A 为藻类的生物量, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; F 为藻类吸收氮转变为氮的比例; σ_3 为水底生物对氨氮的反应速率, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; β_1 为氨氮氧化到亚硝酸盐氮的耗氧速率, 单位为 d^{-1} ; D 为河流平均水深, 单位为 m ; β_3 为有机氮氧化到氨氮的耗氧速率常数, 单位为 d^{-1} .

(ii) 非保守性组份:

$$\frac{dR}{dt} = -k_6 R - \sigma_6 R + \frac{\sigma_7}{H}, \quad (4)$$

其中 R 为非保守性组份浓度, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; k_6 为非保守性物质耗氧系数, 单位为 d^{-1} ; σ_6 为非保守性物质沉积速率, 单位为 d^{-1} ; σ_7 为水底生物对非保守性物质的影响速率, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; H 为河流平均水深, 单位为 m .

1.3 模型的假设条件

QUAL 2K 模型主要的假设条件有: 河流水的流态相对恒定; 河流的水文过程、物理和化学过程与生物化学过程等为稳态; 底泥的泛起仅跟流量有关; 沉降过程、生物转化反应为一级反应; 入河区域排放污水流量、水质指标浓度恒定.

2 模型的应用

2.1 乐安河流域河段及计算单元划分

应用 QUAL 2K 模型进行河流水质模拟, 需先将河流体系作概念化, 并进行河段的划分、确定计算单元的长度, 建立河流水质模拟系统^[21-22].

本文根据乐安河的地形地貌、地表水系及水文地质等条件和特点, 在模型限定的范围内, 对乐安河流域进行河段划分. 从海口到下游龙口共长 229 km, 将其划分成 12 个河段(见图 1): 从海口到沽口为第 1 河段; 从沽口到中洲为第 2 河段; 从中洲到香屯为第 3 河段; 从香屯到戴村为第 4 河段; 从戴村到虎山为第 5 河段; 从虎山到接渡为第 6 河段; 从接渡到韩家渡为第 7 河段; 从韩家渡到镇桥为第 8 河段; 从镇桥到石镇街为第 9 河段; 从石镇街到蔡家湾为第 10 河段; 从蔡家湾到双港为第 11 河段; 从双港到龙口为第 12 河段.

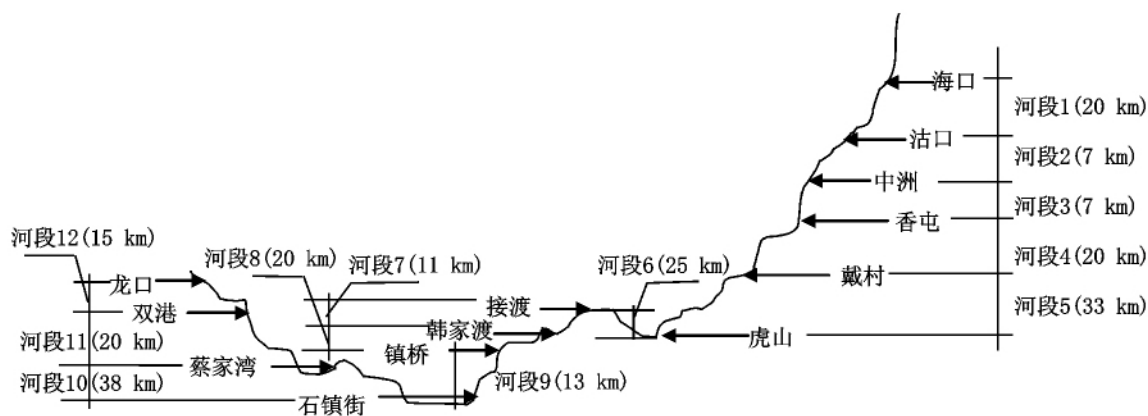


图1 乐安河干流河段划分图

模拟过程中将支流作为点源输入. 计算单元的长度选定为 1 km, 全程共有 229 个计算单元.

2.2 模型参数的确定

应用 QUAL 2K 模型对乐安河 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 进行水质模拟, 需确定的模型参数有 COD 耗氧系数 k_6 、 COD_{Mn} 沉积速率 σ_6 、水底生物对 COD_{Mn} 的影响速率 σ_7 及水底生物对氨氮的反应速度 σ_3 、氨氮氧化到亚

硝酸盐氮的耗氧速率常数 β_1 、有机氮氧化到氨氮的耗氧速率常数 β_3 、藻类生物量相当氨氮的部分 α_1 、藻类比生长率 μ . 本文采用室内模拟实验法和经验法确定各模型参数, 具体可参见文献[23].

2.3 水质模拟与验证

将乐安河各河段的初始条件、模型参数等输入到 QUAL 2K 综合水质模型, 对 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 进行

水质模拟,输出模拟结果.其流量沿河段的变化见图2,其水质沿河段的变化及与实测值比较见图3和图4,其中 d 表示河段长.

从图2可判断:水量的变化趋势是沿河段逐渐增大,这是由于沿河点源排放、径流量及支流流量汇入的结果.由于沿河受生活污水、工业废水、畜牧业废水等污染源的污染,而这些污染源沿河段的分布比较复杂,故 COD_{Mn} 、氨氮浓度沿河段的变化无明显规律.

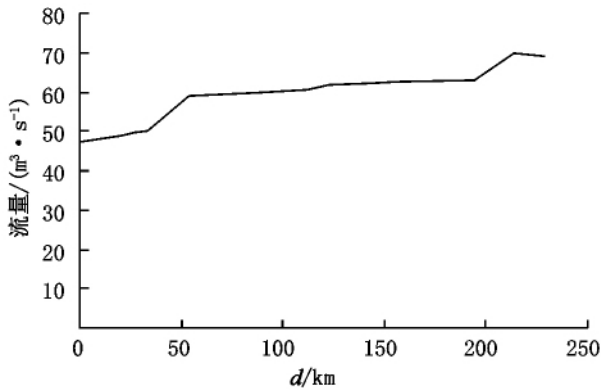


图2 乐安河流量沿河段变化曲线图

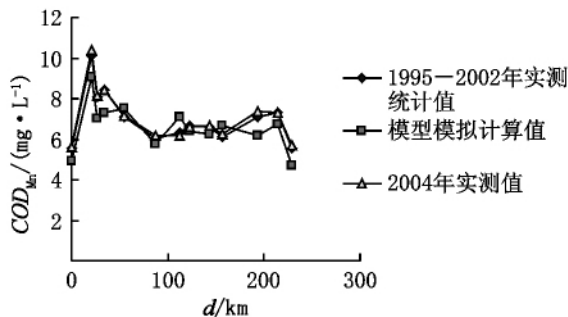


图3 COD_{Mn} 浓度计算与实测值对比

在进行水质模型计算及评价时,有机物水质指标采用高锰酸盐指数(COD_{Mn}),而研究各污染源时

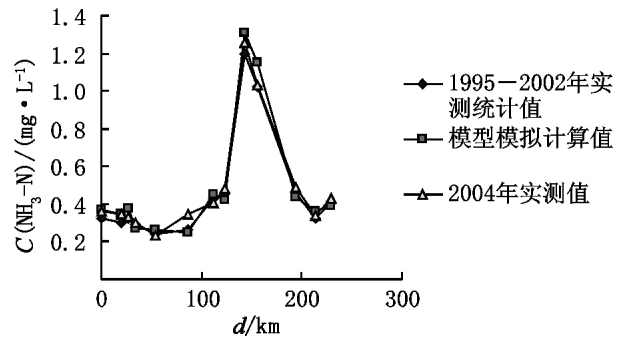


图4 氨氮浓度计算与实测值对比

有机物污染指标采用的是 COD_{Cr} 值.欲准确地建立排放量、污染源与水质变化间的响应关系,需明确 COD_{Cr} 与 COD_{Mn} 间的等量相关系数.通过对一系列的实测数据进行相关分析以及参照有关文献[24-25],得到乐安河流域 $R(COD_{Cr}/COD_{Mn})=3.2$.根据其等量相关系数,可由 COD_{Mn} 实测值与模型计算值推算河流中 COD_{Cr} 的相应浓度.

采用1995—2002年各环境监测部门对乐安河流域枯水期各河段的监测数据,对其进行统计并取平均值,与水质模型模拟计算值进行比较验证,其结果见表1.结果表明: COD_{Mn} 相对误差最小为-14.5%,最大值为11.3%;氨氮计算值与实测值相对误差最小为-6.9%,最大值为18.8%,均未超出此类模型所规定的最大误差 $\pm 20\%$.

采用2004年乐安河枯水期监测断面水质现状监测统计结果,与水质模型模拟计算值进行比较验证,其结果见表2.结果表明: COD_{Mn} 相对误差最小为-16.9%,最大值为13.8%,均未超出此类模型所规定的最大误差 $\pm 20\%$;氨氮计算值与实测值相对误差除虎山断面为-28.6%较高外,其它断面处均未超出此类模型所规定的最大误差 $\pm 20\%$.

表1 COD_{Mn} 、氨氮计算值与1995—2002年枯水期实测平均值比较

断面名称	COD_{Mn}			COD_{Cr}			氨氮		
	实测值/ ($mg \cdot L^{-1}$)	计算值/ ($mg \cdot L^{-1}$)	相对 误差/%	实测值/ ($mg \cdot L^{-1}$)	计算值/ ($mg \cdot L^{-1}$)	相对 误差/%	实测值/ ($mg \cdot L^{-1}$)	计算值/ ($mg \cdot L^{-1}$)	相对 误差/%
海口	5.52	4.88	-11.6	17.66	15.62	-11.6	0.32	0.37	15.6
沽口	10.09	9.03	-10.5	32.29	28.90	-10.5	0.30	0.35	16.7
中洲	8.10	6.99	-13.7	25.92	22.37	-13.7	0.32	0.38	18.8
香屯	8.42	7.28	-13.5	26.94	23.30	-13.5	0.29	0.27	-6.9
戴村	7.09	7.48	5.5	22.69	23.94	5.5	0.24	0.26	8.3
虎山	6.05	5.72	-5.5	19.36	18.30	-5.5	0.26	0.25	-3.8
接渡	6.35	7.07	11.3	20.32	22.62	11.3	0.43	0.45	4.7
韩家渡	6.66	6.36	-4.5	21.31	20.35	-4.5	0.45	0.42	-6.7
镇桥	6.60	6.24	-5.5	21.12	19.97	-5.5	1.20	1.31	9.2
石镇街	6.13	6.65	8.5	19.62	21.28	8.5	1.02	1.15	12.7
蔡家湾	7.12	6.21	-12.8	22.78	19.87	-12.8	0.46	0.44	-4.3
双港	7.29	6.73	-7.7	23.33	21.54	-7.7	0.32	0.36	12.5
龙口	5.52	4.72	-14.5	17.66	15.62	-14.5	0.41	0.39	-4.9

表 2 COD_{Mn} 、氨氮计算值与 2004 年枯水期实测值比较

断面名称	COD_{Mn}			COD_{Cr}			氨氮		
	实测值/ ($mg \cdot L^{-1}$)	计算值/ ($mg \cdot L^{-1}$)	相对 误差/%	实测值/ ($mg \cdot L^{-1}$)	计算值/ ($mg \cdot L^{-1}$)	相对 误差/%	实测值/ ($mg \cdot L^{-1}$)	计算值/ ($mg \cdot L^{-1}$)	相对 误差/%
海口	5.52	4.88	-11.6	17.66	15.62	-11.6	0.32	0.37	15.6
沽口	10.09	9.03	-10.5	32.29	28.90	-10.5	0.30	0.35	16.7
中洲	8.10	6.99	-13.7	25.92	22.37	-13.7	0.32	0.38	18.8
香屯	8.42	7.28	-13.5	26.94	23.30	-13.5	0.29	0.27	-6.9
戴村	7.09	7.48	5.5	22.69	23.94	5.5	0.24	0.26	8.3
虎山	6.05	5.72	-5.5	19.36	18.30	-5.5	0.26	0.25	-3.8
接渡	6.35	7.07	11.3	20.32	22.62	11.3	0.43	0.45	4.7
韩家渡	6.66	6.36	-4.5	21.31	20.35	-4.5	0.45	0.42	-6.7
镇桥	6.60	6.24	-5.5	21.12	19.97	-5.5	1.20	1.31	9.2
石镇街	6.13	6.65	8.5	19.62	21.28	8.5	1.02	1.15	12.7
蔡家湾	7.12	6.21	-12.8	22.78	19.87	-12.8	0.46	0.44	-4.3
双港	7.29	6.73	-7.7	23.33	21.54	-7.7	0.32	0.36	12.5
龙口	5.52	4.72	-14.5	17.66	15.62	-14.5	0.41	0.39	-4.9

3 结束语

将 QUAL 2K 水质模型应用到本文的研究工作中,结果表明其具有较好的模拟精度,能定量描述乐安河流域中 COD_{Mn} 、氨氮水环境质量的时空变化;由此进一步分析出乐安河的水量、污染负荷的输入与输出及其水体污染物的变化规律。

4 参考文献

[1] 黄学平,万金保. 乐安河水环境现状及其治理措施[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(6):770-774.

[2] 胡春华,李鸣,夏颖. 鄱阳湖表层沉积物重金属污染特征及潜在生态风险评价[J]. 江西师范大学学报:自然科学版,2011,35(4):427-430.

[3] 万金保,蒋胜韬. 鄱阳湖水质分析及保护对策[J]. 江西师范大学学报:自然科学版,2005,29(3):260-263.

[4] 暨仕臣. 环境水力学进展[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,1999.

[5] 齐丁民,刘军民. 安阳市水污染物总量控制目标确定方法研究[J]. 安阳师范学院学报,2002(2):92-95.

[6] 孙颖,陈肇和,范晓娜,等. 河流及水库水质模型与通用软件综述[J]. 水资源保护,2001,6(2):7-12.

[7] Seok Soon Park, Yong Seok Lee. A water quality modeling study of the Nakdong river, Korea [J]. Ecological Modelling, 2002, 152: 65-75.

[8] Chapra S C, Pelletier G J. QUAL 2K: a modeling framework for simulating river and stream water quality: documentation and users manual [M]. Medford: Civil and Environmental Engineering Dept, Tufts University, 2003: 9-59.

[9] Steynberg M C, Venter S N, Wet C M E. Management of microbial water quality: new perspectives for developing areas [J]. Water Science Technical, 1995, 32(5/6): 183-191.

[10] Somlyódy L, Henze M, Koncsos L. River water quality modelling: III. Future of the art [J]. Water Science Technical, 1998, 38(11): 253-260.

[11] 郭永彬,王焰新. 汉江中下游水质模拟与预测: QUAL 2K 模型的应用 [J]. 安全与环境工程, 2003, 10(1): 4-7.

[12] Prakash R K, Seockheon L, Sushil R K, et al. Application of QUAL 2Kw for water quality modeling and dissolved oxygen control in the river Bagmati [J]. Environ Monit Assess, 2007, 125: 201-217.

[13] 方晓波,张建英,陈黄旭,等. 基于 QUAL 2K 模型的钱塘江流域安全纳污能力研究 [J]. 环境科学学报, 2007, 27(8): 1402-1407.

[14] 陈月. 西苕溪干流水环境容量研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2008.

[15] 唐伟. 基于 QUAL2K 模型的水质模拟研究 [D]. 南京: 南京大学, 2011.

[16] Linfield C, Brown, Thomas O, Barnwell Jr. The enhanced stream water quality models QUAL 2E and QUAL 2E-

- UNCAD: documentation and user manual [R]. Washington ,US ,1985: 3-4 ,11-14 ,16-17 ,74 ,81-85.
- [17] Andrea I P ,Stella M F ,Gabriela A S. Hydrochemistry and nutrients dynamic in the Suqul'a river urban [J]. Environ Earth Science 2011 ,3: 1-15.
- [18] Pelletier G J ,Chapra S C ,Tao H. QUAL-2Kw: a framework for modeling water quality in stream and rivers using a genetic algorithm for calibration [J]. Environ Model Software 2006 ,21: 419-425.
- [19] Ning S K ,Chang Nibin ,Yang L ,et al. Assessing pollution prevention program by QUAL 2E simulation analysis for the Kaoping River Basin ,Taiwan [J]. Environmental Management 2001 ,61: 61-76.
- [20] Cox B A. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in Lowland Rivers [J]. The Science of the Total Environment 2003(314/315/316) : 335-337.
- [21] 张俊. 大沽河干流青岛段水环境容量研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学 2003.
- [22] 李静. 德州地区岔河水环境容量研究 [D]. 青岛: 青岛大学 2007.
- [23] 黄学平. 乐安河水环境容量与总量控制研究 [D]. 南昌: 南昌大学 2005.
- [24] 柴群宇. 富春江流域水环境容量研究 [D]. 杭州: 浙江大学 2002.
- [25] 姚国金. 鉴江流域水环境容量及总量控制研究 [D]. 南京: 河海大学 1999.

The Application of QUAL 2K Model to Simulate Water Quality in Le'an River

HUANG Xue-ping^{1,2} ,WAN Jin-bao^{1*} ,KE Ying³

(1. Key Lab of Poyang Lake Environment and Resource Utilization ,Ministry of Education ,

School of Environment and Chemical Engineering ,Nanchang University ,Nanchang Jiangxi 330047 ,China;

2. Deptment of Civil Engineering and Architecture ,Nanchang Institute of Technology ,Nanchang Jiangxi 330099 ,China;

3. Journal Editorial Department ,Nanchang Institute of Technology ,Nanchang Jiangxi 330099 ,China)

Abstract: QUAL 2K model was used to simulate water quality about COD_{Mn} and NH_3-N in the Le'an river. The simulation results show that QUAL 2K has a good model of precision and can quantificationally describe water environment quality change about COD_{Mn} and NH_3-N in the Le'an river.

Key words: QUAL 2K model; Le'an river; COD_{Mn} ; NH_3-N

(责任编辑: 刘显亮)