

长江马鞍山段内河水水质二维预测计算模型

鲍自力¹, 朱爱平², 周安娜³, 张小勇³

(1. 中铁时代建筑设计院有限公司, 芜湖 241001; 2. 马鞍山市环境科学研究所, 安徽 马鞍山 243002;
3. 安徽工业大学 化学与化工学院 煤的洁净转化与综合利用省重点实验室, 安徽 马鞍山 243002)

摘 要: 长江马鞍山段是马鞍山市最重要的水源, 而又汇集全市工业废水和生活污水排放, 因此建立适合此江段水域的水质评价和预测模型, 预报排污对水质的影响就比较重要。本文通过建立适合长江马鞍山段内河水域的二维模拟预测模型, 预报排污对水质的影响范围和程度, 考察各排口污染物 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP、 F^- 在本江段的浓度分布。结果表明: 姑溪河的影响较明显, 但各污染物混合带宽度不超过 100m, 污染带对下游影响仅有 2 000 m 范围, 水质基本上能达到 II 类水质要求; 通过编制二维模拟预测模型计算软件, 可应用于污染控制措施、突发污染事件的预测防范以及沿江产业结构、布局调整等。

关键词: 水质; 二维模拟; 污染物; 长江马鞍山段

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)06-0105-04

Calculation model of two dimensional predict on inland water quality in Ma'anshan section of Yangtze River

BAO Zili¹, ZHU Aiping², ZHOU Anna³, ZHANG Xiaoyong³

(1. China Railway Shidai Architecture Design Institute Co., Ltd, Wuhu 241001, China; 2. Ma'anshan Institute of Environmental Science, Ma'anshan 243002, China; 3. Anhui Key Laboratory of Coal Clean Conversion and Utilization, School of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

Abstract: The Ma'anshan section of the Yangtze River is the most important water source of Ma'anshan and the section still collect city's industrial wastewater and domestic sewage. Therefore, it is more important to establish the evaluation and prediction model of water quality which can predict the effect of pollution discharge on water quality in Ma'anshan section of the river. The influence scope and extent of pollution discharge on water quality could be forecasted through establishing the two dimensional simulation and prediction model of inland waters in Ma'anshan section of the Yangtze River. The concentration distribution of pollutants $\text{NH}_3 - \text{N}$, TP and F^- in this section were investigated. The results showed that the influence of pollution discharge on Guxi river is obvious, but the mixing zone width of pollutants is less than 100m. The pollution band has the impact scope of a thousand meters on overall water quality in downstream of the river. The water quality can basically reach the requirements of class II in Ma'anshan section of the Yangtze River. At the same time, the prediction model of two-dimensional simulation has certain guiding significance for the measure of pollution control, forecast of major emergencies and adjustment of industry structure and layout along the Yangtze River.

Key words: water quality; two dimensional simulation; calculation model; pollutants; Ma'anshan section of Yangtze River

马鞍山市处于安徽东部, 长江下游的南岸, 位于东经 $118^{\circ}21'38'' \sim 118^{\circ}52'44''$ 和北纬 $31^{\circ}46'42'' \sim 31^{\circ}17'26''$ 之间。长江流经市区西部, 平均年过境径流

量高达 9794 亿 m^3 ^[1]; 其在马鞍山境内江域水面面积大约 21 km^2 , 也是马鞍山市饮用水的取水源地, 并且全市工业废水和生活污水也汇集排放入此

收稿日期: 2015-07-14; 修回日期: 2015-07-17

作者简介: 鲍自力(1961-) 男, 安徽芜湖人, 硕士, 高级工程师, 主要从事电气工程及电子工程中相关元器件材料方面研究。
通讯作者: 张小勇(1972-) 男, 四川开江人, 博士, 副教授, 主要从事膜分离技术及水处理应用研究。

江段,同时,还最终汇集了全市地表水和内河的水系。因此,对长江马鞍山段水域的水质进行分析预报和控制,建立适合长江马鞍山段水域的水质评价数学模型和预测模型,找出可能存在的污染隐患,预报排污对水质的影响范围和程度,提出污染控制措施和产业结构、布局调整建议,为政府投资决策和市民安全用水提供理论依据^[2-5]。

水质模型主要是描述各种水环境中物质混合、输移和转化规律数学模型的总称^[6-7]。水质模型在考察各种水环境所涉及到的化学、生物以及物理变化的基础上,依据三大基本守恒原理(质量、能量、动量),应用数学方法建立^[8-9],并利用建立的模型通过相应的计算模拟或分析水环境在不同时间或空间的变化规律,以此为相关决策部门在水污染防控、水质预报、环评影响等方面以及为水环境资源的控制、管理和规划服务^[10-12];若是对某一条实际江河进行相应的水环境模拟、预测时,首先就得收集此河段的基础数据,通过对相应数据的分析整理,并设置计算模拟的基本参数。因此,本文通过对长江马鞍山段内河河道的流量、形态、河段各断面面积、平均流速、排污口主要污染物及排污量等水质监测的基本数据,利用二维混合模型模拟各排污口排污对此江段水质影响,并编制相应的二维稳态混合预测模型计算软件,为控制此江段水的污染提供依据。

1 长江马鞍山段设计条件

1.1 水文条件

马鞍山长江段上游至下游主要有姑溪河、采石河、雨山河、慈湖河等河流汇入长江。长江自南而北偏西流经马鞍山西部,马鞍山长江段上起东、西梁山,下至慈湖和尚港、石跋河口,主航道长 36 km,其中采石矶至慈湖河口长约 16.5 km,江面最宽处达 8.3 km,最窄处只有 880 m。长江经过江心洲、小黄州分叉段,在小黄州尾汇合过猫子山。因此在长江马鞍山段各江段中为了模拟计算,特将长江经过江心洲的右汊分为第一段即内河段,起始点选在马鞍山段的第一个排污口扁担河;根据长江中下游气象水文条件,自然流域水体的产水量设计值、容量计算采用实测及 90% 水文频率条件下平均径流量为计算样本,因此,马鞍山长江内河段在枯水期 90% 保证率下流量 6730 m³/s。深度平均为 9 m,对应江宽平均为 2 256 m,流速平均为 0.51 m/s,水面坡降比取 0.306 × 10⁻⁴。

1.2 水质条件

上游本底值取自于和县太阳河口断面的实测值,具体取值选取对水质影响较大的 3 个特征因子:分别为 NH₃-N: 0.245 mg/L,TP: 0.086 mg/L,F⁻: 0.27 mg/L。

1.3 污染源排放条件

研究长江马鞍山江段内河共有 5 个入长江污水排放口,从上游到下游依次为 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#],其设计排放条件见表 1 所示。

表 1 长江马鞍山段江段入长江污水排放口位置

排污口	x/m	水文参数			地点名称
		$u/(m \cdot s^{-1})$	H/m	B/m	
1 [#]	0	0.5	8.5	500	扁担河
2 [#]	1990	0.5	8.5	500	红太阳
3 [#]	4490	0.5	8.5	500	姑溪河
4 [#]	6350	0.5	8.5	500	襄城河
5 [#]	14440	0.5	8.5	500	锁溪河

2 模拟计算项目及评价标准

依据长江马鞍山段的水污染特征项目,确定模拟计算的水质项目为氨氮、总磷和氟化物,本江段由于有马鞍山市的 3 个取水口,所以水质保护目标为 II 类水体。此 3 项目的评价标准分别为 NH₃-N: 0.5 mg/L,TP: 0.1 mg/L,F⁻: 1.0 mg/L;超过此标准的水域定为污染带。

2.1 水质模拟方法

(1) 模型选择。在本文模拟计算的水文条件下,长江马鞍山段江面宽 500 ~ 2 256 m,各种污染物从岸边排放入河道后,短距离内很难再达到均匀混合,沿江面东西方向上存在的浓度梯度较大,而对于一些降解周期长或难降解的有机有毒物质,而另外还具有非持久性污染物的计算模拟特点等,因此可选择二维稳态混合衰减流量模式(1)来进行计算模拟^[13-14]。

岸边排放

$$c(x, y) = \exp\left(-K_1 \frac{x}{86400u}\right) \left\{ c_h + \frac{c_p Q_p}{H \sqrt{\pi M_y x u}} \left[\exp\left(-\frac{uy^2}{4M_y x}\right) + \exp\left(-\frac{u(2B-y)^2}{4M_y x}\right) \right] \right\} \quad (1)$$

式中: x 为排放点的距离, m; y 为离排放口的横向距离(不是离岸距离), m; K_1 为污染物降解系数, d⁻¹;

c 为预测点 (x, y) 处污染物的浓度 mg/L ; a 为排放口离河岸距离 $(0 \leq a \leq B)$ m ; c_p 为排污废水中污染物的浓度 mg/L ; Q_p 为排污废水流量 m^3/s ; c_h 为本底浓度 mg/L ; H 为河流平均水深 m ; M_y 为河流横向混合系数 m^2/s ; u 为河流流速 m/s ; B 为河流平均宽度 m ; π 为圆周率。

另外,对于一些如氟化物、铜、砷等无机污染物,它们在江段中主要就是一个混合扩散过程,降解过程可以忽略,因此选择计算模式二维稳态混合模式(2):

岸边排放

$$c(x, y) = c_h + \frac{c_p Q_p}{H \sqrt{\pi M_y x u}} \left\{ \exp\left(-\frac{uy^2}{4M_y x}\right) + \exp\left[-\frac{u(2B-y)^2}{4M_y x}\right] \right\} \quad (2)$$

式中参数同上所示。

(2) 参数确定。水质模型参数是决定水质模拟、预测精度的重要因素。国内外用于获得水质模型参数的方法主要有现场实测法、室内模拟试验法、经验公式法等。水质模型参数主要依据各种河道的水文条件、物理特征和气象条件等变化而变化。然而,实测法往往费时费力,确定的参数却有限。在研究水体污染的控制中,研究对象主要是那些降解周期长或难降解的有机有毒物质。

二维稳态混合模型中参数只有 K_1 和 M_y 两个需要确定,根据文献资料,在马鞍山长江段常规的污

染物降解系数如 COD 、 $\text{NH}_3\text{—N}$ 等,均有数据可以选取,一般 $K_{\text{COD}} = 0.3$ 、 $K_{\text{NH}_3\text{—N}} = 0.15$ 、 $K_{\text{TP}} = 0.08$,该参数值的确定主要是考虑污染物在水体中的生物降解。

横向混合系数(3) 主要按照各排污口的实际平均江宽来求得:

$$M_y = \frac{0.058H + 0.0065B}{\sqrt{gHI}} \quad (3)$$

式中: M_y 为河流横向混合系数 m^2/s ; H 为河流平均水深 m ; B 为河流平均宽度 m ; g 为重力加速度; I 为河流坡降(此段长江一般取 0.306×10^{-4})。

2.2 模型验证与参数率定

(1) 模拟区域。本文研究水域位于长江马鞍山饮用工业用水区内,该功能区上起东西梁山,下至慈湖和尚港、石跋河口,全长 36 km,因此在该功能区内选取一定长度的河道范围作为计算长度范围,宽度为整个河宽。现状水质Ⅱ类,水质管理目标Ⅱ类。

(2) 计算区域的网格化。区域网格的划分主要考虑二维水质模拟稳定性条件。将马鞍山长江段通过有结构或无结构网格对计算所涉及区域进行剖分,主要是为了准确地描述此江段岸边形状及水下地形,江段网格单元的横向最小边长 10 m,沿江为纵向一般取值为 50 m。

(3) 参数取值。本区段选取的模型各项参数取值与各排污口污染物参数见表 2、表 3。

表 2 模型参数取值

右汉江				上游江段本底值			系数		
平均流速 u / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均水 深 H / m	江宽 B / m	平均流量 Q_h /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$C_{h(\text{NH}_3\text{—N})}$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$C_{h(\text{TP})}$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$C_{h(\text{F}^-)}$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	M_y	$K_{1(\text{NH}_3\text{—N})}$	$K_{1(\text{TP})}$
0.51	8.5	500	1945	0.245	0.086	0.27	0.19	0.15	0.08

注: u 为右汉江平均流速; H 为右汉江平均水深; B 为右汉江平均江宽; Q_h 为右汉江平均流量; $C_{h(\text{NH}_3\text{—N})}$ 为上游江段 $\text{NH}_3\text{—N}$ 本底值; $C_{h(\text{TP})}$ 为上游江段 TP 本底值; $C_{h(\text{F}^-)}$ 为上游江段 F^- 本底值; M_y 为横向混合系数; $K_{1(\text{NH}_3\text{—N})}$ 为 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的降解系数; $K_{1(\text{TP})}$ 为 TP 的降解系数。

表 3 各排污口污染物参数取值

排污口	x / m	$C_{p(\text{NH}_3\text{—N})}$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$C_{p(\text{TP})}$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$C_{p(\text{F}^-)}$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Q_p / ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	地点名称
1 [#]	0	0.616	0.039	0.44	0.95	扁担河
2 [#]	1990	0.489	0.05	10.4	0.212	红太阳
3 [#]	4490	0.452	0.099	0.25	317	姑溪河
4 [#]	6350	1.33	0.077	0.60	0.33	襄城河
5 [#]	14440	0.464	0.084	0.37	2.487	锁溪河

2.3 二维稳态混合预测模型程序的编制

据二维稳态混合预测模型的计算方程进行程序

的编制,程序主要通过在长江马鞍山段内的特征污染物(氨氮、总磷与氟化物)来进行的,对于一些降

解周期长或难降解的有机有毒物质,还具有非持久性污染物的计算模拟特点等,可选择二维稳态混合衰减流量模式来进行计算模拟;另外对于一些如氟化物、铜、砷等无机污染物,它们在江段中主要就是一个混合扩散过程,降解过程可以忽略,因此选择计算模式二维稳态混合模式。具体的程序界面如图 1 与图 2 所示。

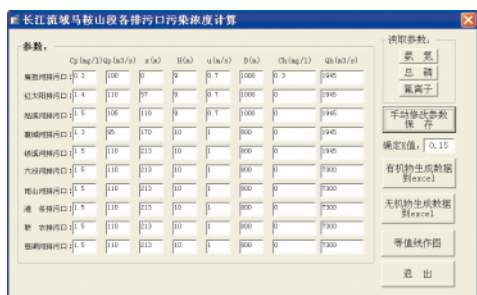


图 1 程序计算示意图

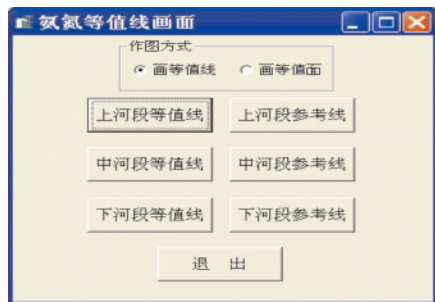


图 2 画等值线程序图

由各排污口下游 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、 F^- 预测浓度场分布结果见图 3~5。

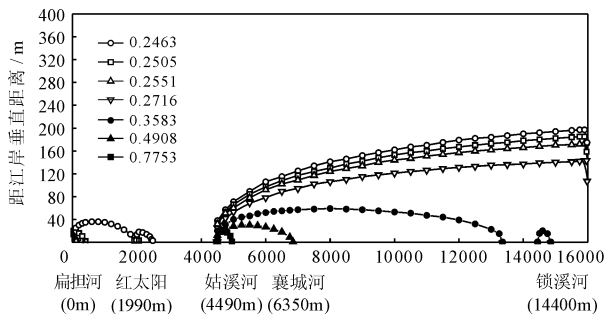


图 3 各排污口下游不同阶段 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度场分布

从各排污口污染物的浓度场分布图中可知,在河第一段内, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、 F^- 在除姑溪河外,由于其他排污口的排污量较小,对此江段整体水质影响有限,基本上能达到 II 类水质要求,而姑溪河由于水量比较大,导致对此江段的影响较明显, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 影响范围较远,并且两者的混合带宽度不超过 100 m,污染带对下游影响仅有 2 000 m 范围,其水质指标 $\text{NH}_3\text{-N}$

、TP 等的浓度控制在 II 类水质要求。因此,应用二维稳态混合模式预测了各排污口废水排放对河流水质的影响情况,通过在预测过程预测参数的选取,使预测结果能够反映各排污口对本江段的实际水质状况,从而为控制水的污染提供依据。

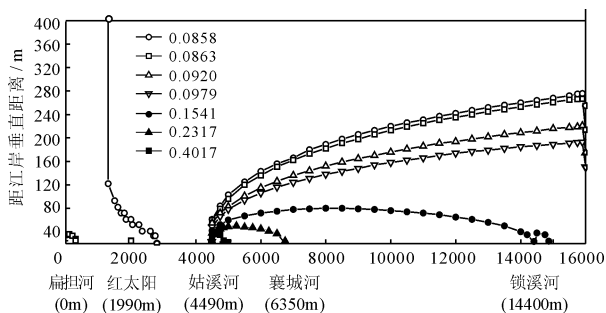


图 4 各排污口下游不同阶段 TP 浓度场分布

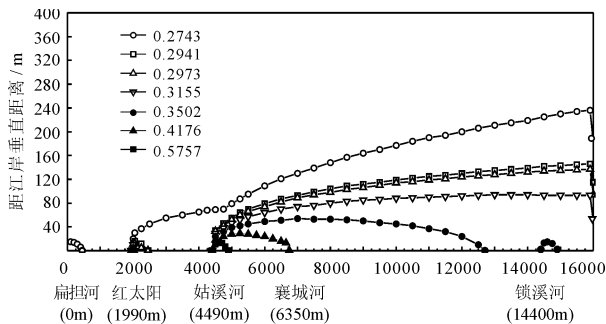


图 5 各排污口下游不同阶段 F^- 浓度场分布

3 结 语

本文通过对长江马鞍山段水环境资料数据的分析整理,采用二维稳态混合模型模拟各排污口排污对此江段水质影响,并编制相应的二维稳态混合预测模型计算软件;利用此预测模型软件模拟计算各排污口污染物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、 F^- 在本江段的浓度分布,得到以下结论:

(1) 各排污口在正常排污的情况下对此江段整体水质影响不大,而姑溪河由于水量较大且污染物浓度较高,对长江水质影响较明显,但其污染带沿江岸宽度不超过 100 m,对下游的影响仅有 2 000 m 左右,水质指标属于 II 类水,符合饮用水水质要求;

(2) 应用开发出长江流域马鞍山段多排污口污染浓度计算软件,可预测各排污口大量排污对水质的影响,另外对市区政府启动相关重大项目的环境影响评估等方面具有较好的参考价值作用;同时,对重大突发事件的预测防范、应急预案具有一定的指导意义。

(下转第 116 页)

- [5] 覃 晖. 流域梯级电站群多目标联合优化调度与多属性风险决策[D]. 武汉: 华中科技大学 2011.
- [6] 李克飞. 水库调度多目标决策与风险分析方法研究[D]. 北京: 华北电力大学 2013.
- [7] Deb , K , Pratap A , Agarwal S , et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA - II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation . 2002 , 6(2) : 182 - 197.
- [8] Bekele , EG and Nicklow JW. Multi - Objective Optimal Control Model for Watershed Management Using SWAT and NSGA - II [J]. World Environmental and Water Resources Congress , 2014: 1 - 10.
- [9] Baltar AM , Fontane DG. Use of multiobjective particle swarm optimization in water resources management [J]. Journal of water resources planning and management. 2014 , 134(3) : 257 - 265.
- [10] Li Chen , McPhee J , William W - G Yeh. A diversified multiobjective GA for optimizing reservoir rule curves [J]. Advances in Water Resources . 2007 , 30(5) : 1082 - 1093.
- [11] Liong Shie - Yui , Yu Xinying. Alternative decision making in water distribution network with NSGA - II [J]. Journal of water resources planning and management. 2006 , 132(2) : 122 - 126.
- [12] 丁胜祥,董增川,王德智,等. 基于 Pareto 强度进化算法的供水库群多目标优化调度[J]. 水科学进展, 2008 , 19(5) : 679 - 684.

(上接第 108 页)

参考文献:

- [1] 阎伍玖,陈飞星. 长江安徽马鞍山段水质评价研究[J]. 水土保持学报, 2000 , 14(4) : 104 - 107 + 116.
- [2] 赵 凯. 基于 GIS 的马鞍山长江段突发性水污染预警系统研究[D]. 安徽工业大学, 2010.
- [3] 赵前信. 四种水环境质量评价方法在六安市水库中的应用[J]. 环境工程, 2014 , 3(3) : 113 - 116 + 120.
- [4] 张小君,徐中民,宋晓谕,等. 几种水环境质量评价方法在青海湖入湖河流中的应用[J]. 环境工程, 2013 , 32(1) : 117 - 121.
- [5] 国家环保总局,国家质量监督检验检疫总局. GB3838 - 2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [6] 段德宏,王根霞,王 萍. 一维稳态河流水质的计算机模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2005 , 16(3) : 54 - 56 + 61.
- [7] 丁艳华,杨 俊,杨莉,等. 模糊数学在水环境评价中的应用[J]. 能源与环境, 2008(1) : 7 - 8.
- [8] Li - Chang Hsu. Applying the grey prediction model to the global integrated circuit industry [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2003 , 70(6) : 563 - 574.
- [9] 王守坤,张传珂. 沭河水质模糊综合评价模型建立与应用[J]. 环境科学与管理, 2013 , 38(2) : 63 - 66.
- [10] 李如忠. 水质评价理论模式研究进展及趋势分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005 , 28(4) : 369 - 373.
- [11] 王丹宁,赵 明,赵洪宾. 灰色关联属性识别模型在给水管网水质分析中的应用[J]. 环境与健康杂志, 2007 , 24(8) : 580 - 582.
- [12] 门宝辉,梁 川. 水质量评价的物元分析法[J]. 哈尔滨工业大学学报. 2003 , 35(3) : 358 - 361.
- [13] 孙培德,楼菊青. 环境系统数学模型及数值模拟[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [14] 王纪东. 内河危化品码头安全风险评估与应急管理研究[D]. 重庆交通大学, 2013.