

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2010.06.002

基于平面二维水质模型的潮汐河流污染源反演

常文婷¹,王冠²,韩龙喜³

(1. 杭州市环境保护科学研究院,浙江 杭州 310014;2. 浙江省水利河口研究院,浙江 杭州 310020;3. 河海大学环境学院,江苏 南京 210098)

摘要 根据潮汐河流的水动力及污染物输运特点,采用二维非稳态水动力、水质模型构造污染源控制反问题,在确保控制点水质达标的前提下,通过对污染源进行反演控制,实现总负荷量最大与污染负荷最优分配的目标。以长江小河口—十二圩段为例,对反演方法进行验证。结果表明,反问题计算结果是可信的。

关键词 潮汐河流;二维水质模型;污染源控制;反问题

中图分类号:X26 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2010)06-0005-04

Inverse study on pollution source in tidal river on the basis of 2D water quality model

CHANG Wen-ting¹, WANG Guan², HAN Long-xi³

(1. Hangzhou Academy of Environmental Science, Hangzhou 310014, China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China; 3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Considering characteristics of water dynamics and pollutants traveling in a tidal river, an inverse problem of water pollution source control was established on the basis of two-dimensional unsteady hydrodynamics and a water quality model. On the condition that the water quality meets the standards at the control points, the maximization of total discharged pollutant loads and the optimal distribution of pollutant loads can be realized simultaneously by inverse control of water pollution sources. The reach of the Yangtze River from Xiaohokou to Shierwei was taken as an example to validate the method.

Key words: tidal river; 2D water quality model; pollution source control; inverse problem

随着我国经济的持续发展,水体受污染程度日趋严重。为了有效控制水污染源排放,各地环境部门对水环境进行了功能划分,并制定了相应的水质目标。因此,如何根据划定的河道水质目标值,科学、准确地核定各污染源污染物的排放量,对水环境保护具有重要的理论和现实意义。

目前,我国多是采用稳态水质模型来计算某一设计条件下水体的环境容量与各排污口的允许排放量,但这类方法对水文要素随时间变化显著的水体并不适用;虽然部分研究涉及潮汐河流或者海域^[1-12],但将二维非稳态水质模型应用于潮汐河流

污染源反演的还不多见。因此,笔者在前人的工作基础上,提出了基于平面二维水质模型的潮汐河流污染源控制反问题及求解方法,并以长江小河口—十二圩段为例,对反演方法进行了验证。

1 研究方法

任何反演问题的计算都是建立在正演基础之上的。笔者采用二维非稳态水动力、水质模型构建潮汐河流污染源控制的正问题,在此基础上,构造水污染源控制反问题。

作者简介:常文婷(1983—),女,安徽涡阳人,助理工程师,硕士,主要从事污染物质在天然水体中的迁移转化规律、环境系统规划等研究。

E-mail: hhwct@126.com

1.1 二维非稳态水动力、水质模型

二维非稳态水动力、水质模型的控制方程如下：

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Hu)}{\partial t} + u \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + v \frac{\partial(Hu)}{\partial y} = fvH - gH \frac{\partial z}{\partial x} + \\ \frac{\tau_{xw}}{\rho'} - \frac{\tau_{xb}}{\rho'} + \frac{\partial}{\partial x} \left(H\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H\nu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Hv)}{\partial t} + u \frac{\partial(Hv)}{\partial x} + v \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = -fuH - gH \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\tau_{yw}}{\rho'} - \\ \frac{\tau_{yb}}{\rho'} + \frac{\partial}{\partial x} \left(H\nu_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial(H\rho)}{\partial x} + v \frac{\partial(H\rho)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x H \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y H \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) - kH\rho + W \end{aligned} \quad (4)$$

式中： z 为水位； t 为时间； H 为水深； u 、 v 分别为 x 、 y 方向的平均流速； f 为柯氏力系数； τ_{xw} 、 τ_{yw} 分别为沿 x 、 y 方向的风应力； τ_{xb} 、 τ_{yb} 分别为沿 x 、 y 方向的河床底应力； ρ' 为水体的密度； ν_t 为紊动黏性系数； ρ 为污染物垂线平均质量浓度； D_x 、 D_y 分别为纵、横向分散系数； k 为降解系数； W 为源项。

求解方程组(1)~(4)，可得到流场和浓度场，即为人们熟知的正问题。

1.2 水污染源控制反问题构建

在流速和扩散系数已知的前提下，对流-扩散方程可视为线性方程，满足叠加原理，因此，用线性叠加的方法求解某一点的浓度是可行的，笔者提出的水污染源控制反问题正是以该原理为基础进行构建的，其基本思路是：首先选取水质控制点，利用正问题模型求解各排污口对水质控制点的贡献度系数，然后以总负荷量最大为优化目标，以控制点的潮周期平均浓度达标和一定的水质达标率为约束条件，构造污染源控制反问题，采用最优化方法对反问题进行求解，即可得到总负荷量最大的优化方案，最后利用二维非稳态水质模型模拟该方案下的浓度场分布，通过检验控制点水质是否达标、混合区范围是否满足要求来论证反问题求解结果的可靠性。

反问题控制方程如下：

目标函数：

$$\max L = \sum_{j=1}^n x_j \quad (5)$$

约束条件：

$$\sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} x_j + \rho_{bi} \leq \bar{\rho}_i \quad (i = 1 \dots m) \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}^{\theta} x_j + \rho_{bi} \leq \bar{\rho}_i \quad (i = 1 \dots m) \quad (7)$$

$$x_j \geq 0 \quad (j = 1 \dots m)$$

其中：

$$\bar{a}_{ij} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T a_{ij}^t$$

式中： L 为总负荷量； x_j 为第 j 个排污口的负荷量，为决策变量； n 为排污口个数； m 为水质控制点个数； \bar{a}_{ij} 为潮平均污染贡献度系数； ρ_{bi} 为水质控制点的背景浓度； $\bar{\rho}_i$ 为控制点处的水质标准值； θ_i 为水质达标率； a_{ij}^{θ} 为满足 θ_i 达标率下的污染贡献度系数； T 为潮周期的时间长度； a_{ij}^t 为某时刻第 j 个排污口对第 i 个水质控制点的污染贡献度系数。

1.3 求解方法

a. 控制点选取。水质控制点的选择对计算结果影响比较大，选取时需遵循以下原则：①代表性原则；②边界性原则，主要在环境功能区边界、污染源影响边界（控制混合区范围）以及水环境保护目标上选取；③有限性原则，选取的控制点能反映断面水质即可。

b. 污染贡献度系数求解。贡献度系数 a_{ij}^t （ $i = 1 \dots m$ ； $j = 1 \dots n$ ）的求解是水污染源反演的关键，可假设在某一个排污口给1个单位负荷量，而其他排污口无污染物排出，然后用二维水质模型进行求解，可得到各个水质控制点的浓度值，即为 a_{ij}^t （ $i = 1 \dots m$ ）。改变排污口，重复以上步骤，就可以求出所有排污口的 a_{ij}^t 。对各个水质控制点的污染贡献度系数求潮周期平均值，可得潮平均污染贡献度系数 \bar{a}_{ij} 。假设每隔 Δt 输出一个贡献度系数，则共有 $\frac{T}{\Delta t}$ 个结果，按从小到大顺序进行排序，则第 $\frac{T}{\Delta t} \theta_i$ 个污染贡献度系数即为满足 θ_i 达标率下的污染贡献度系数 a_{ij}^{θ} 。

c. 方程求解。经分析，反问题式(5)~(7)可转换成单纯形法的标准形式，因此，笔者采用单纯形法对反问题进行求解。

2 实例研究

本研究实例位于长江下游（小河口—十二圩，见图1），属感潮河段。到2010年，该河段范围内只设3个污水排放口，其中1个排污口近期维持现状规模，因此，本次研究只将其余2个排污口作为控制对象进行反演。

根据水质现状、污染源特征等因素，确定水质控制因子为COD。

2.1 水动力与水质模拟

根据沿线排污口位置及模型计算的需要，选择约18 km江段作为计算范围。考虑到潮汐大小的周

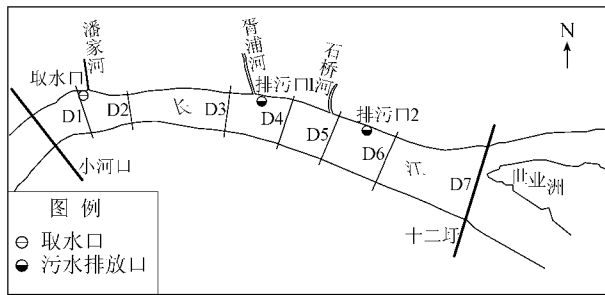


图1 排污口位置及水质控制断面

期性变化,选择90%保证率下的大潮和小潮2组水流条件作为本次研究的计算水文条件。

分别采用二维非稳态水动力、水质模型来模拟该河段的流场和浓度场,采用有限体积法对方程进行离散,计算网格采用正交曲线网格,共计481(纵向)×64(横向)个节点,平均空间步长为40m×20m,考虑到排放口附近浓度梯度较大,对排放口附近网格适当加密。网格布置见图2。

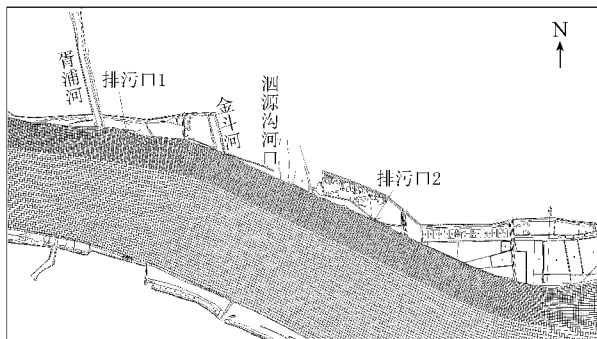


图2 计算网格布置

2.2 水质控制点

综合考虑水环境功能区划、混合区范围(由于目前国家尚未对混合区允许范围作出规定,笔者设定潮汐河流混合区以排污口上下游各1km为限制长度,宽度不超过河宽的1/3)、取水口位置等因素,选取水质控制断面,共设7个水质控制断面(见图1和表1)。

根据浓度场模拟结果,选取排污口在控制断面上的最大浓度增量点作为水质控制点。

2.3 污染贡献度系数与背景浓度

分别计算2个排污口对7个水质控制点的贡献度系数,对污染贡献度系数求潮周期的平均值,可得

表2 各水质控制点的污染贡献度系数

控制点 编号	COD		污染贡献度系数(大潮)				污染贡献度系数(小潮)			
	$\bar{\rho}_i$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	ρ_{bi} ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	\bar{a}_{i1}	\bar{a}_{i2}	a_{i1}^{θ}	a_{i2}^{θ}	\bar{a}_{i1}	\bar{a}_{i2}	a_{i1}^{θ}	a_{i2}^{θ}
1	15	11.1	0.004	0.000	0.023	0.002	0.001	0.000	0.007	0.001
2	15	11.1	0.010	0.001	0.032	0.005	0.003	0.000	0.014	0.001
3	20	12.3	0.011	0.001	0.036	0.002	0.004	0.000	0.016	0.001
4	20	12.3	0.113	0.016	0.157	0.035	0.156	0.011	0.235	0.016
5	20	10.8	0.059	0.032	0.085	0.070	0.088	0.031	0.110	0.100
6	20	10.8	0.043	0.055	0.057	0.079	0.060	0.077	0.072	0.106
7	15	11.8	0.019	0.021	0.040	0.042	0.027	0.031	0.052	0.060

潮平均污染贡献度系数 \bar{a}_{ij} 结果列于表2。

表1 水质控制断面及水质目标

断面编号	断面名称	水质目标
1	取水口断面(D1)	II
2	某市工业用水区上游边界(D2)	II
3	排污口1混合区上游边界(D3)	III
4	排污口1混合区下游边界(D4)	III
5	排污口2混合区上游边界(D5)	III
6	排污口2混合区下游边界(D6)	III
7	某市工业用水区下游边界(D7)	II

由于计算范围内存在取水口等水环境保护目标,需要对水质严格控制,因此分 $\theta_i = 100\%$ 和 $\theta_i = 90\%$ 2种达标率进行计算,即要求D1断面控制点在一个潮周期内水质完全达标,D2-D7断面控制点达标率在90%以上。求得的满足潮周期达标率要求的污染贡献度系数 a_{ij}^{θ} (表2)。

严格来说,控制点处的背景浓度 ρ_{bi} 在每一点是不同的,为简化计算,各控制点的背景浓度采用附近监测断面的实测值(表2)。

2.4 反问题求解结果可靠性论证

根据以上计算条件,采用单纯性法对反问题式(5)~(7)进行求解,计算结果如表3所示。

表3 大潮、小潮两种工况下污染源反演计算结果 v/d

污染源编号	COD 污染负荷	
	大潮	小潮
排污口1	40.7	30.9
排污口2	37.4	26.5
总量	78.1	57.4

由表3可知,在小潮工况条件下,计算得出的总污染负荷较小,为不利水文条件,因此,选择小潮工况下的计算值作为最终优化方案,利用二维非稳态水质模型模拟该方案下的浓度场分布,检验控制点水质、混合区范围是否满足要求,验证计算结果的可靠性,结果见表4及图3。

由表4可知,各水质控制点COD的潮平均质量浓度值均能达标,也能满足水质达标率的目标要求。由图3可以看出,两排污口的混合区范围均能满足排污口上下游各1km的限制长度要求。可见,本方法计算得到的结果是正确合理的。

表 4 小潮工况条件下 COD 正演结果

控制点 编号	$\rho_i /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho_{\text{H}} /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	目标水质 达标率/%	实际水质 达标率/%
1	15	11.131	100	100
2	15	11.212	90	100
3	20	12.435	90	100
4	20	17.331	90	90
5	20	14.165	90	100
6	20	14.696	90	100
7	15	13.447	90	100

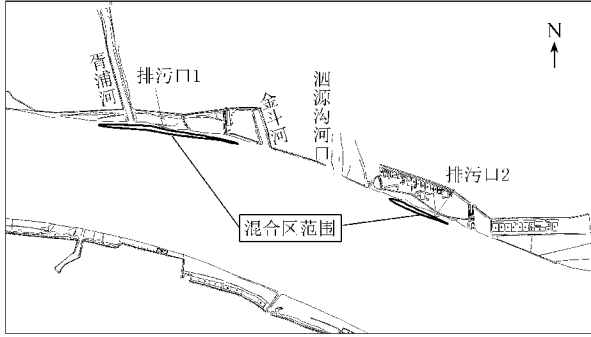


图 3 小潮工况下排污口的混合区范围

3 结 语

笔者针对潮汐河流的水动力及污染物输运特征,在平面二维水动力、水质数学模型的基础上,提出了污染源控制反问题及求解方法,该方法的计算结果更能反映潮汐河流的实际情况,且具有方法科学、计算效率高、工作量小的优点,实例研究也表明,反问题计算结果是准确可靠的。因此,本方法可应用于潮汐河流环境容量的求解和污染负荷的优化分配,为有效控

制水污染源排放和环境管理提供技术支持。

参考文献:

- [1] 韩龙喜. 河道一维污染源控制反问题[J]. 水科学进展, 2001, 12(1): 40-44.
- [2] 金忠青, 周志芳. 工程水力学反问题[M]. 南京: 河海大学出版社, 1998.
- [3] 杨志平, 孙伟. 潮汐河流动态水环境容量计算方法探讨[J]. 上海环境科学, 1995(6): 14-16.
- [4] 王佳鹤, 金忠青. 对流-扩散方程的控制论求解方法[J]. 水动力学研究与进展, 1996, 1(2): 230-237.
- [5] 李适宇, 李耀初, 陈炳禄, 等. 分区达标控制法求解海域环境容量[J]. 环境科学, 1999(4): 96-99.
- [6] 林高松, 李适宇, 江峰, 等. 考虑污染源强随机变化的感潮河流环境容量优化[J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 317-322.
- [7] 郑英铭, 高建群. 潮汐河流水环境容量的研究[J]. 环境科学, 1990(3): 63-69.
- [8] 陈燕华, 李彦武, 牟海省, 等. 长江九江段水环境容量研究[J]. 环境科学研究, 1994(1): 24-29.
- [9] 徐贵泉, 褚君达, 吴祖扬, 等. 感潮河网水环境容量数值计算[J]. 环境科学学报, 2000(3): 263-268.
- [10] 曹芦林. 感潮河流水环境容量计算方法探讨[J]. 上海环境科学, 1998(1): 15-17.
- [11] 郑孝宇, 褚君达, 朱维斌. 河网非稳态水环境容量研究[J]. 水科学进展, 1997(1): 25-31.
- [12] 李开明. 潮汐河网水环境随机容量研究[J]. 环境科学研究, 1990(6): 19-23.

(收稿日期 2009-08-20 编辑 徐 娟)

· 简讯 ·

中国水利学会 2010 年学术年会在贵阳召开

2010 年 11 月 2—4 日, 中国水利学会 2010 学术年会在贵州省贵阳市隆重召开。本届年会的主题是“民生水利——理念与行动”。来自全国水利科研、设计、施工、管理、高校的专家学者和技术骨干, 学会九届理事会理事, 省级水利学会和学会分支机构代表, 以及韩国、日本、加拿大等国外友好学会来宾在内的 400 余人参加了会议。会上, 水利部胡四一副部长作了题为“小水电改善民生”的主旨报告。随后, 12 位专家学者就当前水利重点工作和水利学科的近期发展作了特邀报告, 分别是: 水利部规划计划司副司长段红东“国家‘十二五’规划及水利‘十二五’规划的特点”; 国家防汛抗旱总指挥部办公室副主任田以堂“舟曲特大泥石流灾害应对”; 水利部水资源司司长孙雪涛“最严格水资源管理制度的实践探索”; 贵州省水利厅厅长黎平“贵州省水利改革发展情况”; 中国长江三峡集团公司董事长曹广晶“从 2010 年长江洪水看三峡工程”; 国务院第一次全国水利普查领导小组办公室副主任庞进武“第一次全国水利普查实施方案及工作进展”; 水利部长江水利委员会副主任马建华“西南特大干旱的启示与对策”; 南京水利科学学院院长, 中国工程院院士张建云“中国历史大洪水调查”; 水利部农村水利司副司长倪文进“强化我国农村水利建设与管理的思考”; 中国水利水电科学研究院副院长胡春宏“鄱阳湖水利枢纽工程关键技术研究”; 清华大学土木水利学院副院长王忠静“河西走廊流域治理的科学问题及其思考”; 水利部水土保持司司长刘震“新时期我国水土保持的形式与任务”。年会共设 6 个分会场, 与会人员分别就水文气象与科学防灾、城市水战略、新时期我国农业水价政策、水利风景区建设与管理、水利标准化、水利国际合作等主题进行研讨和交流。 (本刊编辑部供稿)