

东江惠州段分布滞后水质模型的建立

李莹¹, 杨宜民¹, 张宇羽¹, 蔡楠², 张新政¹

(1. 广东工业大学 自动化学院 广东 广州, 510090; 2. 华南环境科学研究所 广东 广州, 510620)

摘要: 针对东江惠州段多排污口的实际情况, 根据现有的水文水质监测数据, 建立了其多组分布滞后水质模型, 进行了仿真研究, 给出了其最优控制曲线和符合实际情况的水质变化曲线。

关键词: 水质模型; 分布滞后; 污染控制

中图分类号: N945. 12; TP273

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2001)03-0012-05

世界上的淡水资源大部分来自河流, 作为河流水资源规划和管理、水环境影响评价和水质预测、以及污染治理和水资源利用的有效工具, 河流水质模型在环境问题中扮演着非常重要的角色且应用越来越广泛。国外一些在五六十年来曾经严重污染的河流, 如芝加哥河、泰晤士河、莱茵河以及特拉华河等, 利用所建立的水质模型进行水质规划和管理, 近年来水质有大幅度提高。我国利用河流水质模型在对苏州河进行综合整治、大汶河水污染控制、太湖流域河网水环境治理以及其它河流的水资源综合利用及管理等方面^[1-7]均取得了初步成效。

东江是珠江水系三大河流之一, 发源于江西省寻乌县, 自东北向西南流入广东省, 经虎门出海。干流全长 562 km, 其中广东省境内 435 km; 流域总面积 35340 km², 其中广东省境内 31840 km², 占流域总面积的 90%。东江不仅在防洪、发电、灌溉、航运等方面发挥重要作用, 而且是广东省的重要饮用水源。东江除供本流域作用之外, 还作为饮用水源通过东深供水工程供应流域外的深圳、香港以及广州的东部地区, 其中惠州段(惠州—东岸)河流水质直接影响着深圳和香港的淡水供应质量, 它对维持香港和深圳地区人民的正常生活、促进两地的经济繁荣和政治稳定具有重要意义。随着东江流域的社会、经济迅速发展, 人口的增长以及经济结构从以农业为主逐渐向以工业为主的转变, 东江水的纳污负荷愈来愈大, 排入东江的污染物逐年增加, 东江水质有明显的下降趋势。因此, 建立东江水质模型, 对预测水质变化趋势, 进行可持续利用和保护, 以及建立突发性污染事故的预测决策系统, 都是非常重要的。

本文按水流逐步扩散的实际情况, 建立了东江惠州段的多组分布滞后水质模型, 并按我国水质 II 类标准, 给出了排污控制仿真曲线。

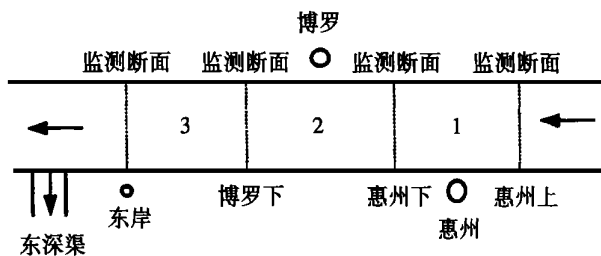


图 1 河道模型化示意图

收稿日期: 2000 06 21

作者简介: 李莹(1962), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为非线性动力学与智能控制。

1 惠州段分布滞后模型

选取生物耗氧量 BOD₅、化学耗氧量

COD 和溶解氧 DO 作为预测项目, 并将惠州段河流再划分为 3 个区段进行水质模型研究, 3 个区段从上游到下游依次排列为: 惠州上—惠州下—博罗下—东岸, 如图 1 所示.

假设每一区段为一个理想反应器模型且只有一个排污口, 文献[8]给出了只考虑 BOD₅-DO 指标的分段模型, 现增加 COD 指标, 可列出下列质量平衡关系式:

$$\begin{cases} \text{BOD}_5: \frac{dx_i}{dt} = -k_{1i}x_i + \frac{Q_{i-1}}{V_i}x_{i-1} - \frac{Q_i + Q_{Ei}}{V_i}x_i + \frac{u_{1i}Q_{Ei}}{V_i} \\ \text{COD: } \frac{dy_i}{dt} = -k_{2i}y_i + \frac{Q_{i-1}}{V_i}y_{i-1} - \frac{Q_i + Q_{Ei}}{V_i}y_i + \frac{u_{2i}Q_{Ei}}{V_i} \\ \text{DO: } \frac{dz_i}{dt} = k_{3i}(z_i^s - z_i) + \frac{Q_{i-1}}{V_i}z_{i-1} - \frac{Q_i + Q_{Ei}}{V_i}z_i - k_{1i}x_i - k_{2i}y_i - \frac{D_i}{V_i} \end{cases} \quad (1)$$

其中各符号的含义如下:

V_i ——第 i 段的水容量, T/d ;	x_i, x_{i-1} ——第 i 段及第 $i-1$ 段的 BOD ₅ 浓度, mg/L ;
Q_{Ei} ——第 i 段的污水流量, T/d ;	y_i, y_{i-1} ——第 i 段及第 $i-1$ 段的 COD 浓度, mg/L ;
Q_i, Q_{i-1} ——第 i 段及第 $i-1$ 段的流量, T/d ;	z_i, z_{i-1} ——第 i 段及第 $i-1$ 段的 BO 浓度, mg/L ;
k_{1i} ——第 i 段的 BOD ₅ 衰减系数, $1/d$;	z_i^s ——第 i 段的 DO 饱和值, mg/L ;
k_{2i} ——第 i 段的 COD 衰减系数, $1/d$;	u_{1i} ——第 i 段污水排放 BOD ₅ 浓度, mg/L ;
k_{3i} ——第 i 段的 BO 补给率, $1/d$;	u_{2i} ——第 i 段污水排放 COD 浓度, mg/L ;
D_i/V_i ——第 i 段底部沉渣造成的 DO 变化率, mg/Ld^{-1} .	

为了准确描述河流污染的实际扩散情况, 假定每一区段都可以按分布延时方式分离开来, 当传输时间分布延时范围是 r_1 到 $r_s, j = 1, 2, \dots, s$ 时, 对 $i-1$ 区段在 $t-r_j$ 时刻的 BOD₅、COD 和 DO 浓度为:

$$\begin{cases} x_{i-1}(t) = \sum_{j=1}^s a_j x_{i-1}(t-r_j) \\ y_{i-1}(t) = \sum_{j=1}^s a_j y_{i-1}(t-r_j) \\ z_{i-1}(t) = \sum_{j=1}^s a_j z_{i-1}(t-r_j) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\sum_{j=1}^s a_j = 1, r_1 < r_2 < \dots < r_s$, 因此, 对上述三区段分布延时系统, 其状态方程可写为

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -k_{11}x_1 + \frac{Q_0}{V_1}x_0 - \frac{Q_1 + Q_{E1}}{V_1}x_1 + \frac{u_{11}Q_{E1}}{V_1} \\ \frac{dy_1}{dt} = -k_{21}y_1 + \frac{Q_0}{V_1}y_0 - \frac{Q_1 + Q_{E1}}{V_1}y_1 + \frac{u_{21}Q_{E1}}{V_1} \\ \frac{dz_1}{dt} = k_{31}(z_1^s - z_1) + \frac{Q_0}{V_1}z_0 - \frac{Q_1 + Q_{E1}}{V_1}z_1 - k_{11}x_1 - k_{21}y_1 - \frac{D_1}{V_1} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dt} = -k_{1i}x_i + \frac{Q_{i-1}}{V_i} \sum_{j=1}^s a_j x_{i-1}(t-r_j) - \frac{Q_i + Q_{Ei}}{V_i} x_i + \frac{u_{1i} Q_{Ei}}{V_i} \\ \frac{dy_i}{dt} = -k_{2i}y_i + \frac{Q_{i-1}}{V_i} \sum_{j=1}^s a_j y_{i-1}(t-r_j) - \frac{Q_i + Q_{Ei}}{V_i} y_i + \frac{u_{2i} Q_{Ei}}{V_i} \quad i=2,3 \\ \frac{dz_i}{dt} = k_{3i}(z_i^s - z_i) + \frac{Q_{i-1}}{V_i} \sum_{j=1}^s a_j z_{i-1}(t-r_j) - \frac{Q_i + Q_{Ei}}{V_i} z_i - k_{1i}x_i - k_{2i}y_i - \frac{D_i}{V_i} \end{cases}$$

根据东江 1998、1999 年的实测数据,可推算出东江惠州段的模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -0.73x_1 + 0.43x_0 + 0.05u_{11} \\ \dot{y}_1 = -0.7y_1 + 0.43y_0 + 0.05u_{21} \\ \dot{z}_1 = -0.25x_1 - 0.22y_1 - 0.75z_1 + 0.43z_0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = 0.43 \sum_{j=1}^3 a_j x_1(t-r_j) - 0.73x_2 + 0.05u_{12} \\ \dot{y}_2 = 0.43 \sum_{j=1}^3 a_j y_1(t-r_j) - 0.7y_2 + 0.05u_{22} \\ \dot{z}_2 = 0.43 \sum_{j=1}^3 a_j z_1(t-r_j) - 0.25x_2 - 0.22y_2 - 0.75z_2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = 0.43 \sum_{j=1}^3 a_j x_2(t-r_j) - 0.73x_3 + 0.05u_{13} \\ \dot{y}_3 = 0.43 \sum_{j=1}^3 a_j y_2(t-r_j) - 0.7y_3 + 0.05u_{23} \\ \dot{z}_3 = 0.43 \sum_{j=1}^3 a_j z_2(t-r_j) - 0.25x_3 - 0.22y_3 - 0.75z_3 \end{cases} \quad (6)$$

式中 $a_1 = 0.2$, $a_2 = 0.6$, $a_3 = 0.2$, $r_1 = 0(d)$, $r_2 = 0.5(d)$, $r_3 = 1(d)$.

2 仿真研究

选取如下目标函数

$$J = \int_0^\infty [2 \sum_{j=1}^3 (x_j - x_j^*)^2 + 2 \sum_{j=1}^3 (y_j - y_j^*)^2 + \sum_{j=1}^3 (z_j - z_j^*)^2 + \sum_{j=1}^3 (u_{1j} - u_{1j}^*)^2 + \sum_{j=1}^3 (u_{2j} - u_{2j}^*)^2] dt$$

若在零时刻之前存在一个干扰,使式(4)所示系统的初始状态为 $x(0)$ 、 $y(0)$ 和 $z(0)$,则使目标函数 J 为极小就能保证:使系统状态回到目标值 x^* 、 y^* 和 z^* ,控制也回到稳态值 u_1^* 和 u_2^* ,且不会出现 BOD₅、COD、DO 或控制量的过大偏差.

鉴于东江的饮用水源功能,按我国水质 II 类标准,选取 BOD₅、COD 和 DO 的目标值及初始值分别为

$$\begin{aligned} x^* &= [2 \quad 4 \quad 2.85]^T & x(0) &= [9 \quad 5.42 \quad 4.48]^T \\ y^* &= [1.36 \quad 4.06 \quad 2.81]^T & y(0) &= [9.5 \quad 6.97 \quad 4.02]^T \\ z^* &= [8.2 \quad 6.3 \quad 3.1]^T & z(0) &= [7.5 \quad 6 \quad 2.96]^T \end{aligned}$$

选取控制量的稳态值为

$$u_1 = [57 \quad 54.8 \quad 54.8]^T \quad u_2 = [58 \quad 55 \quad 55]^T$$

图 2~ 图 6 示出了所求得的状态和控制曲线. 在图 5 和图 6 中,纵坐标分别为 BOD₅ 的变化量 ΔBOD_5 和 COD 的变化量 ΔCOD , $\Delta u_{1j} = u_{1j} - u_{1j}^*$, $\Delta u_{2j} = u_{2j} - u_{2j}^*$ ($j = 1, 2, 3$). 从这些图中可看出污染影响是沿河顺流而下逐渐减弱的,因此,采用分布滞后模型是符合实际情况的.

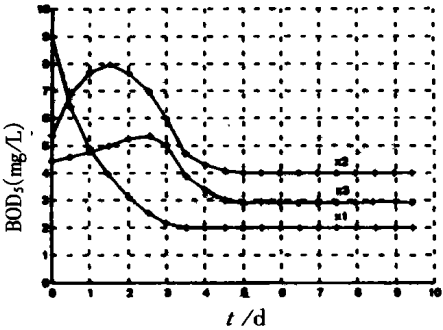


图 2 BOD₅ 变化曲线

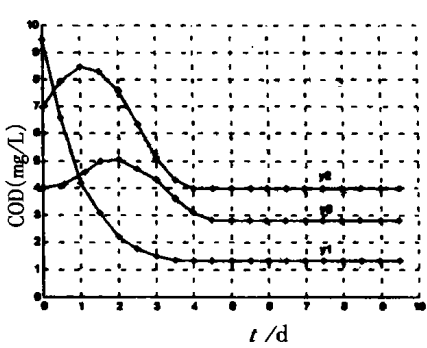


图 3 COD 变化曲线

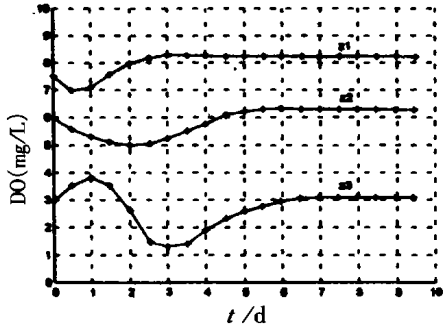


图 4 DO 变化曲线

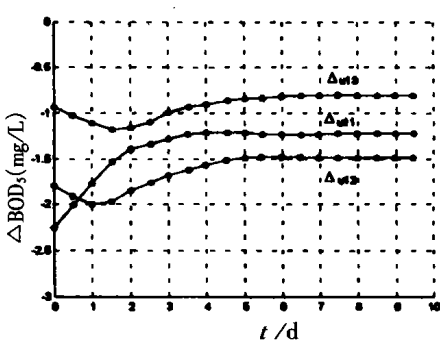


图 5 BOD₅ 控制曲线

3 结束语

水质模型是水资源可持续利用和保护的重要工具, 而我国由于受水文水质监测条件的限制, 大部分河流河段尚未建立水质模型, 仍处于凭经验管理的状态, 特别是对潜在的污染事故缺乏预测、决策能力. 因此, 研究如何有效地建立起符合河流水质迁移特性的水质模型是有意义的. 本文建立的东江惠州段分布滞后水质模型是符合污染物扩散的实际情况的, 可为污染总量控制提供一定的理论参考依据.

随着水质自动监测系统的广泛应用, 智能化建模是今后的必然发展趋势. 智能化建模的实质是采用人工神经网络、模糊逻辑等智能化处理手段而得到的 BOD₅-DO 耦合关系、水质迁移特性及各种水质因素的相关变化等关系. 它既适用于点源污染也适用于非点源污染情况, 既可用于建立河流水质模型, 亦可用于建立河口(潮汐和非潮汐的)、湖泊(水库)的水质模型. 它具有精度高、参数修正自动化等优点, 目前尚处于研究阶段, 应用性的模型很少. 这种模型基本上是基于数据的黑箱或灰箱模型^[9], 在监测数据不足的情况下很难应用. 我国只有北京、天津、上海很少几个地区建立了水质自动监测系统, 其它监测站点均采用人工数据采集与分析, 短时期内难以推广应用这种建模方法.

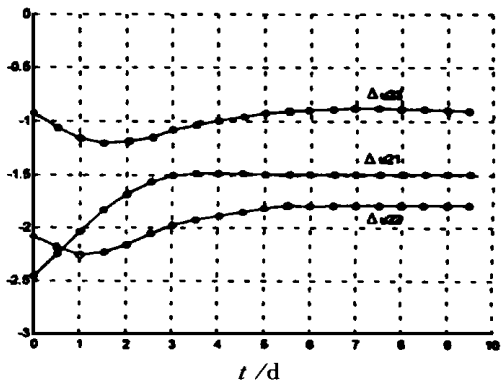


图 6 COD 控制曲线

广东省环保局正在建立东江干流水质自动监测系统, 该系统实施后, 可望在东江水质的智能化建模^[10]、流域规划、预测决策、污染控制等方面发挥积极作用。

参考文献:

- [1] 马蔚纯, 陈燕. 运用系统工程方法对苏州河进行整治[J]. 上海环境科学, 1998, 17(6): 7-8, 20.
- [2] 庞清江. 大汶河水污染控制系统规划研究[J]. 水资源保护, 1996, 3: 43-51.
- [3] 李清浮, 胡国华. 黄河孟花段水质模型的建立[J]. 水资源保护, 1997, 1: 16-19.
- [4] 王平, 雒文生. 沙颍河流域降雨径流污染预报模型的研究[J]. 上海环境科学, 1998, 17(7): 20-23.
- [5] 郭怀成, 邹锐, 徐云麟. 流域环境系统不确定性多目标规划方法及应用—不确定性模糊多目标规模模型[J]. 中国环境科学, 1998, 18(6): 510-513.
- [6] 姚琪. 水污染控制决策支持系统在南通河网的应用[J]. 水资源保护, 1997, 4: 8-11.
- [7] 丁训静, 姚琪, 毛永根. 太湖流域水质模拟研究[J]. 水资源保护, 1998, 4: 10-14, 62.
- [8] M G Singh, A Tidi. Systems: Decomposition, Optimisation and Control[M]. Peramon Press, 1978: 147-150.
- [9] H R Maier, G C Dandy. The Use of Artificial Neural Networks for the Prediction of Water Quality Parameters[J]. Water Resource Research, 1996, 32(4): 1013-1022.
- [10] 李莹, 邹经湘, 张宇羽, 等. 自适应神经网络在水质预测建模中的应用[J]. 系统工程, 2001, 19(1): 89-93.

Modeling of Distributed-Lag Water Quality For Huizhou Reach of the East River

LI Ying¹, YANG Yimin¹, ZHANG Yuyu¹, CAI Nan², ZHANG Xirzheng¹

(1. Faculty of Automation, GDUT, Guangzhou 510090, China;

2. Huanan Institute of Environment, Guangzhou 510620, China)

Abstract: According to the real pollution state of multi-sewage for Huizhou reach of the East River, and measuring data of hydrology and water quality, a multi-group distributed-lag model for the reach is established. The curves of optimal pollution control and water quality distribution are given. The simulation results show that the model is measure up to practical regime.

Key words: water quality model; distributed-lag; pollution control