

# 闸控感潮河段重金属迁移转化规律研究

陈奇良<sup>1</sup>, 韩龙喜<sup>1</sup>, 李小虎<sup>2</sup>, 袁燕<sup>1</sup>, 王琰<sup>1</sup>

(1. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省环境科学研究院, 江苏 南京 210036)

**摘要:**以长江感潮江段的某入江河道为典型案例,根据闸控条件下的水文特征、污染物迁移转化特性分别建立了由入江河道及长江相关河段构成的动态二维水力及重金属数学模型,模拟分析了闸门控制下入江河道的水流运动规律、点源连续排放的重金属浓度随时间变化及二维平面分布特征。模拟结果表明:在长江潮汐、水闸控制影响下,入江河道内重金属浓度在一定范围内呈现周期性波动的现象,重金属浓度整体呈增大趋势,随着污水排放时间的推移,河道内各断面处重金属浓度最大值和波动区间均趋于稳定;典型超周期内,河道内落潮流污染带长度大于涨潮流。重金属在潮汐河道内的变化是一个非常复杂的过程,对这一过程的模拟,可以为河道水质治理和污染防治提供技术依据。

**关键词:**感潮河段; 重金属; 非稳态; 二维数值模拟; 迁移转化

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)02-0222-04

## Study on rule of heavy metal transport and transformation in tidal section of river controlled by gate

CHEN Qiliang<sup>1</sup>, HAN Longxi<sup>1</sup>, LI Xiaohu<sup>2</sup>, YUAN Yan<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China)

**Abstract:** Taking one tributary of tidal reach of the Yangtze river as typical example, according to the hydrological and pollutant transport characteristics of tidal rivers controlled by gate, the paper established a two-dimensional dynamic hydrodynamic and mathematical model of heavy metals, simulated and analyzed the hydrodynamic rule of the tributary of the Yangtze river in the control of gate, and time-varying characteristics and two-dimensional plane distribution of the concentration of heavy metal in the tributary with discharge of point source continuous. The simulation results show that under the influence of the tide and gate of the Yangtze river, the concentration of heavy metal in the tributary appears cyclical fluctuations in a certain range and with the trend of increase. Along with the elapse of sewage discharge time, The maximum concentration and fluctuation interval of heavy metals in river tends to be stable; in a typical super cycle, the spatial distribution of polluted area at low tide is more than that at high tide. The variation of heavy metals in tidal river is a very complex process. The simulation for this process can provide a technical basis for the management of river water quality and the prevention of pollution.

**Key words:** tidal river; heavy metal; unsteady; two-dimensional numerical simulation; migration and transformation

## 1 研究背景

平原感潮河网地区河道、湖泊纵横交错,感潮河流受区间径流、下游潮汐的双重影响,水流运动特征随潮汐运动呈周期性变化<sup>[1-2]</sup>。对于闸门控制条件下的潮汐河道,水流运动还同时受到闸门启闭的叠加影响。对于闸控感潮河网内以点源形式排放的重金属类污染物,由于其迁移载体水文、动力学特征的

复杂性,加之纳污水体稀释、水流紊动扩散、泥沙吸附解吸、随泥沙沉降悬浮等的综合效应,污染物迁移转化规律十分复杂。

曾有不少学者对闸门控制条件下感潮河流污染物迁移转化特征进行研究,取得了一系列成果。阮燕云等<sup>[4]</sup>通过物理试验,研究闸门控制条件下的明渠内污染物迁移,初步分析了闸门影响下污染物浓度的波形分布特征;毕春娟等<sup>[5]</sup>通过跟踪监测的方

法对长江口崇明东滩近岸水体中颗粒态重金属的潮周期变化特征及其影响机制进行了研究;黄清辉等<sup>[6]</sup>基于长江口春、夏季的现场观测资料,探讨了长江河口处溶解态重金属在潮汐等水动力因素作用下的分布行为。目前的研究成果主要集中于通过物理试验和水文水质资料监测分析的方法对感潮河流污染物迁移转化特征进行研究,本文对受点源排放影响的闸控感潮河段重金属污染特征进行全过程数值模拟研究。

## 2 研究区域概况

长江河口段水流呈显著的双向流潮汐特征,潮位每日两涨两落,涨潮流平均历时4 h,落潮流平均历时8 h多,平均潮流期为12 h 50 min,潮汐特点为非正规半日浅海潮型。该江段两岸的平原河网,由于与长江的水力连通,水流运动受到长江潮汐的强烈影响,因此具有潮汐河流的基本特征。本文以该区域某闸控入江河道丹华港为典型案例,其相邻水域水系见图1。

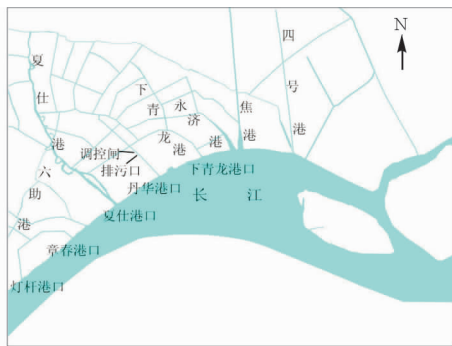


图1 丹华港周边水系图

丹华港东与长江相接,受到长江潮汐的影响,为典型潮汐河流。该河道长4 700 m,河口宽35 m,底宽10 m,底高-1.0 m,平均水深1.5 m。电镀行业废水经集中处理后从图示位置排入丹华港。为控制污水中重金属污染物在涨潮时向内部河网迁移扩散,拟在污水排口上游200 m处建节制闸,按汛期排洪,非汛期挡潮的原则进行调度。因此,除汛期闸门短时开启向长江排洪外,其他时段闸门均处于关闭状态。由于非汛期闸门关闭情况下,丹华港水体流动性较差,污染程度相对较重,因此闸门关闭状态下纳污河流丹华港内重金属的迁移扩散、浓度空间分布及随时间变化特征是水体水质保护需要关注的重点内容。闸门关闭情形下,纳污河流虽然流动性减弱,但仍然具有潮汐河流的基本水动力及污染物输运特征,即在长江涨

潮期,由于长江水位的升高,水流自入江口向内河方向流动,污染物随水流向内河方向迁移扩散;而落潮时则相反。采用非稳态的水动力、水质模型可以动态模拟浓度场的时间变化及空间分布特征。

## 3 数学模型

由于纳污河道宽深比较大,因此采用平面二维水动力、水质模型耦合模拟重金属的迁移转化特征。由于进入到水体中的重金属,以颗粒态(吸附在泥沙颗粒表面)、溶解态两种形式存在。根据污染物输移传质理论,两种形式的重金属在水体中的对流、扩散特征相同,即颗粒态、溶解态重金属的对流运动速度等于所在空间点的水质点运动速度,紊动扩散、弥散满足费克扩散定律。不同的是,颗粒态的重金属会随着泥沙的沉降、床面的冲刷在水相、沉积物间迁移,但从长时段来看,河床总体处于冲淤平衡状态,同时从对水环境影响的安全预测角度分析,故不考虑重金属随泥沙的沉降迁移。

### 3.1 二维水动力数学模型

采用非稳态的深度平均二维水流连续方程及动量方程描述水流流场,忽略风应力的二维非恒定浅水运动方程如下:

$$h_t + (uh)_x + (vh)_y = 0 \quad (1)$$

$$u_t + (uu)_x + (uv)_y + gh(h+z_y)_x -$$

$$fv + gn^2 \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} u = \varepsilon \nabla u \quad (2)$$

$$v_t + (vu)_x + (vv)_y + gh(h+z_y)_y + fu +$$

$$gn^2 \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} v = \varepsilon \nabla v \quad (3)$$

式中: $t$ 为时间坐标; $x, y$ 分别为纵向、横向坐标; $g$ 为重力加速度; $f$ 为柯氏系数; $z_y$ 为床面高程; $h$ 为垂线水深; $z$ 为水位; $u, v$ 分别为 $x, y$ 方向的垂线平均流速; $n$ 为河床糙率; $\varepsilon$ 为紊动粘性系数。

### 3.2 二维水质数学模型

污染物垂线平均的二维对流分散方程如下:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - KC + S \quad (4)$$

式中: $C$ 为污染物浓度; $t$ 为时间坐标; $u, v$ 分别为纵向、横向流速; $E_x, E_y$ 分别为纵向和横向分散系数; $K$ 为自净系数; $S$ 为污染物源。

以Cr为重金属特征因子,长江中下游支流中Cr在颗粒物-水相间的分配系数定义为:

$$K_d = \frac{\text{重金属在固相介质中的浓度 (mg/kg)}}{\text{重金属在水相中的浓度 (mg/L)}}$$

相关研究成果<sup>[7-10]</sup>表明,lg  $K_d$  约为 4.38,长江下游实测多年平均含沙量为 0.437 g/m<sup>3</sup>,据此估算纳污水体中颗粒态和溶解态 Cr 的质量分配比例为 10.5:1。上述研究成果显示,水体中的重金属主要以颗粒态的形式存在,因此针对颗粒态重金属,分析浓度的空间分布及随时间变化的特征。

## 4 重金属浓度变化特征分析

### 4.1 水动力特征分析

(1) 网格布置。选取纳污河道自排污口上游 200 m 至入长江口约 2 000 m 的内部河道,及长江纳污河道入口上游 2 km 至入口下游 13 km,计 15 km 的长江河段为模拟范围。对研究区域采用三角形网格进行剖分,离散后的计算区域含 3 366 个计算单元,1 956 个计算节点。

(2) 定解条件及参数取值。对于长江采用 1 D 水动力模型模拟计算,提取枯水期设计水文条件下相应边界水动力要素时间变化过程作为边界条件。即上游边界条件为 90% 枯水保证率对应的流量变化程,用同期的潮位过程作为下边界条件。初始流量:  $Q = Q_0(x)$ , 初始水位:  $H = H_0(x)$ 。河道糙率根据当地河道水深情况,并参考以往研究成果加以确定。在计算中,长江主槽糙率取为 0.018 ~ 0.022,滩地糙率约为 0.0262。六价铬的综合沉降系数值取为 0.1 d<sup>-1</sup>。

(3) 模拟工况及水动力特征。以长江枯水期大潮过程为水文条件,以六价铬为典型污染因子,模拟电镀集中区污水处理厂正常排放时,丹华港内六价铬浓度分布及随时间变化的特征,见表 1。大潮涨、落急时刻流场见图 2、3。

表 1 模拟工况

表 1 模拟工况			t/d, d	
污水排放量	污染因子	排放浓度	水文条件	模拟时长
3000	六价铬	0.053	大潮	30

从图 2、3 可以看出,受长江涨落潮的影响,丹华港河道内水流往复震荡。在长江涨潮初期,由于江水上溯,丹华港河口与河道内形成水位差,江水向丹华港内流动,随着涨潮过程的推进,丹华港内水位逐渐升高,流速变化经历了一个从小到大再减小的时间过程;长江由涨潮转向落潮时,丹华港内涨潮时的积水开始流入长江,随着落潮过程的推进,丹华港内水位逐渐下降,流速变化经历了从从小到大再减小

的时间过程。由于污水排放流量较小,涨、落急时刻排污口周边流场主要受潮汐影响,水流流向顺直,基本平行于河岸,主河槽流速大于岸边流速。

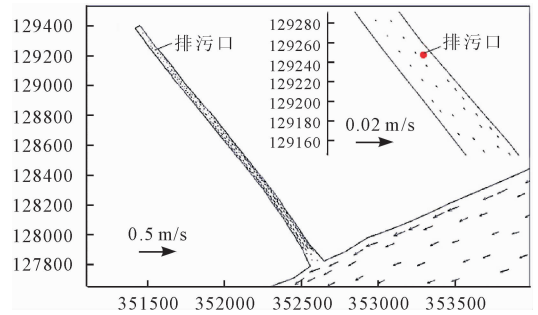


图 2 大潮涨急时刻流场

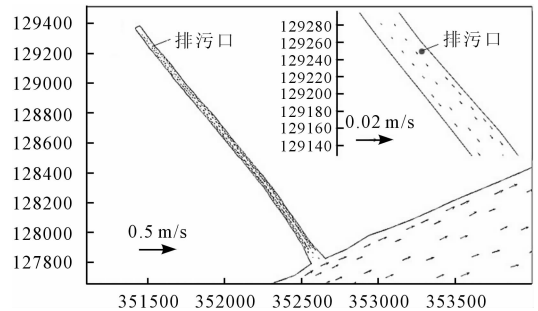


图 3 大潮落急时刻流场

### 4.2 重金属污染特征分析

设定入流边界重金属浓度为 0, 出流边界采用第二类边界条件。重金属初始浓度取为 0, 模拟因排污产生的重金属浓度增量的时间、空间分布规律。

(1) 六价铬浓度随时间变化过程。选取污水排出口上游 100 m, 下游 100 m 和下游 500 m 作为典型断面分析, 各典型断面六价铬浓度随时间变化过程见图 4~6。从图 4~6 可以看出, 受长江潮汐的影响, 丹华港内各断面六价铬浓度出现周期性来回波动现象, 六价铬浓度整体呈增大趋势。污水排放初期, 河道内六价铬浓度显著增大, 污水排放 24 d 后, 排口上游 100 m、下游 100 m 和下游 500 m 处六价铬最大浓度分别达到约 0.045、0.044 和 0.041 mg/L, 随后,

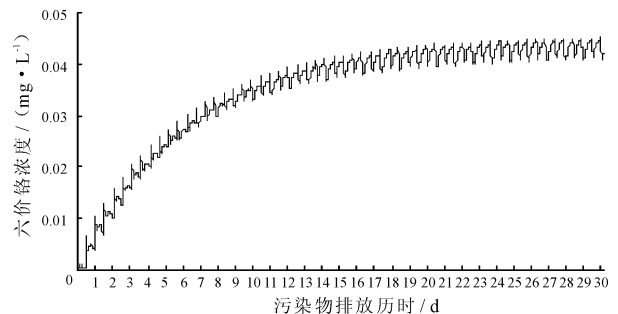


图 4 排污口上游 100 m 处六价铬浓度随时间变化过程

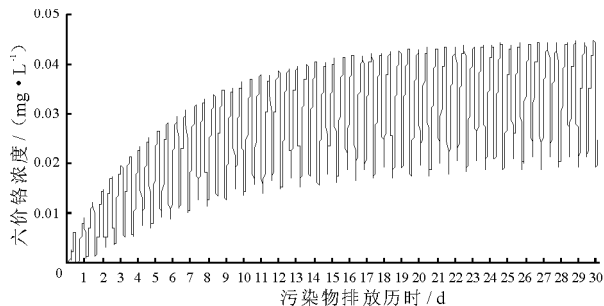


图 5 排污口下游 100 m 处六价铬浓度随时间变化过程

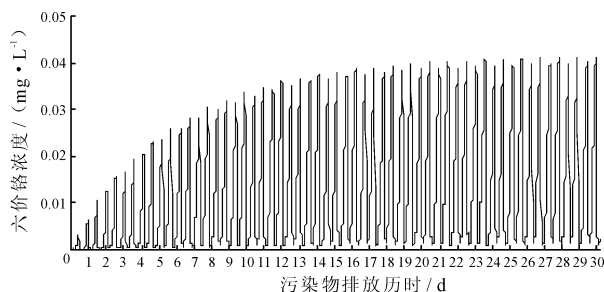


图 6 排污口下游 500 m 处六价铬浓度随时间变化过程

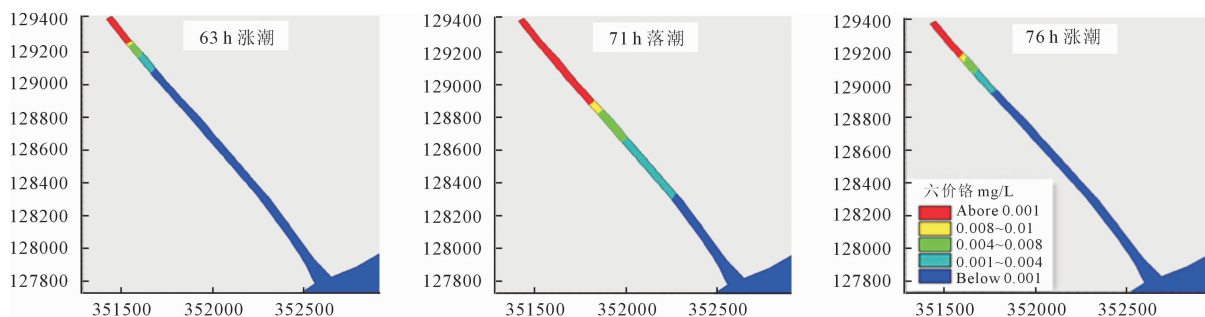


图 7 典型潮周期内丹华港河道污染带分布

## 5 结 语

(1) 建立了由长江相关河段及入江河道构成的动态二维水动力及重金属数学模型, 模拟分析了闸门控制下入江河道的水流运动规律、重金属浓度随时间变化及二维平面分布特征。

(2) 污水排放初期, 在长江潮汐、水闸控制影响下, 入江河道内重金属浓度出现在一定范围内周期性波动的现象, 重金属浓度整体呈增大趋势。

(3) 污水排放 24 d 后, 入江河道各断面处六价铬浓度最大值和波动区间均趋于稳定。

(4) 长江涨潮和落潮时, 丹华港内污染带分布情况不同。典型潮周期内, 长江由涨潮过渡到落潮, 污染带长度由 180 m 增大到 810 m; 长江由落潮过渡到涨潮, 污染带长度由 810 m 减小到 240 m。

### 参考文献:

[1] 韩龙喜, 陆冬. 平原河网水流水质数值模拟研究展望[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 127-130.

各断面处六价铬浓度最大值和波动区间均趋于稳定。同一时刻, 排污口上游 100 m 处六价铬浓度略大于下游 100 m 处, 六价铬浓度波动区间小于下游; 排污口下游 100 m 处六价铬浓度大于下游 500 m 处, 六价铬浓度波动区间小于下游 500 m 处。

(2) 典型潮周期内污染带分布特征。为研究长江涨落潮对丹华港内污染带分布的影响, 选取一个典型潮周期内(模拟时间 63 ~ 76 h)不同时刻污染带分布情况进行分析, 见图 7。从图 7 可以看出, 长江涨潮和落潮时, 丹华港内污染带分布情况不同。污水排放 63 h 时, 长江处于涨潮状态, 污染带长度为 180 m, 当长江由涨潮过渡到落潮(63 ~ 71 h), 丹华港内水流由港内流向长江, 河道内水量不断减少, 对污染物的稀释能力减弱, 污染带长度由 180 m 增大到 810 m。当长江由落潮过渡到涨潮(71 ~ 76 h), 大量江水上溯流入丹华港, 河道内水量不断增大, 污染物被稀释, 污染带长度由 810 m 减小到 240 m。

[2] 李小虎, 韩龙喜, 吴云波, 等. 潮汐河流排污口设置对水质的影响[J]. 水资源保护, 2011, 27(6): 88-91+96.

[3] 徐祖信, 林卫青. 上海市浦西地区和苏州河水系水环境改善方法研究报告[R]. 2001.

[4] 阮燕云, 张翔, 夏军, 等. 闸门对河道污染物影响的模拟研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(5): 673-676.

[5] 毕春娟, 陈振楼, 许世远, 等. 河口近岸水体中颗粒态重金属的潮周期变化[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 132-136.

[6] 黄清辉, 沈焕庭, 茅志昌. 长江河口溶解态重金属的分布和行为[J]. 上海环境科学, 2001, 20(8): 372-374+377.

[7] 霍文毅, 陈静生. 我国部分河流重金属水-固分配系数及在河流质量基准研究中的应用与流域的风化过程[J]. 环境科学, 1997, 18(4): 10-13.

[8] 李云峰, 袁旭音, 李兵, 等. 长江下游重金属在水相-悬浮物中的分布与输移[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(6): 3098-3101+3124.

[9] Horowitz A J. A primer on sediment-trace element chemistry[M]. Leais Publishers, 1991.

[10] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报 2010[M]. 武汉: 长江出版社, 2011.