

# 汾河入黄口水流特性与污染物扩散模拟

李娟<sup>1,2</sup>, 冯民权<sup>1</sup>, 刘淑文<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 山西中部引黄水务开发有限公司, 山西 太原 030012; 3. 山西水利职业技术学院 水利工程系, 山西 运城 044004)

**摘要:** 为探讨交汇口污染物入河后的迁移转化规律, 对汾河入黄口水流特性与污染带(化学需氧量, COD)分布进行了模拟。根据黄淤 59—60 断面之间实测高程值, 利用插值法补充地形, 并采用非结构网格划分地形。建立二维水动力水质模型, 采用交替方向隐式迭代法(ADI)对水流连续性方程及动量守恒方程进行积分。结果表明, 模型验证结果与实测资料吻合较好, 用此模型对 50%, 75%, 90% 频率年汾河入黄口处进行模拟, 得到了入黄口处的流速分布和污染物浓度分布结果。随着水文频率年的增大, 形成的河口滩面积减小, 且分别经过 2.35, 3.00, 4.20 km 的距离后 COD 值才能达标。

**关键词:** 汾河入黄口; 非结构网格; 水动力水质模型; 污染带分布

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2014)06-0189-04

中图分类号: X522

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.041

## Simulation on Water Flow Characteristics and Pollutant Diffusion at Estuary of Fenhe River into Yellow River

LI Juan<sup>1,2</sup>, FENG Min-quan<sup>1</sup>, LIU Shu-wen<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi Province, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. The Central Shanxi Province Yellow River Water Development Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030012, China; 3. Department of Water Conservancy Engineering, Shanxi Conservancy Technical College, Yuncheng, Shanxi 044004, China)

**Abstract:** Water flow characteristics and distribution of polluted belt of chemical oxygen demand(COD) at estuary of Fenhe River into the Yellow River were simulated to discuss its migration and transformation law. According to the measured elevation values of section 59—60, interpolation method was used to supplement the terrain data and unstructured grid was used to divide the terrain. A two-dimensional hydrodynamic and water quality model was established, and alternating direction implicit method(ADI) was adopted to give an integral of the flow's continuity and momentum conservation equation. The result showed a high match between the simulation and the actual measurement. In addition, the velocity distribution and contaminant concentration distribution were given by simulation of COD in 50%, 75%, 90% hydrologic year types in the estuary of Fenhe River into the Yellow River. Moreover, as the increase of hydrologic frequency years, the area of river mouth beach formed was reduced, and the COD value reached the standard over the distance of 2.35, 3.00, 4.20 km.

**Keywords:** estuary of Fenhe River into Yellow River; unstructured grid; hydrodynamic model for water quality; distribution of polluted belt

汾河是黄河的一级支流, 汾河入黄口属于干、支流交汇的河段。天然河流中干支流交汇处由于干、支流两股水流相互顶托, 交汇区内水流紊动掺混作用强烈, 能量损失很大, 可能形成河口浅滩或江心滩(洲)。因此, 在干支流汇合口流段, 无论是水流现象、污染物浓度分布都具有复杂多变的特点。冯镜洁, 李然<sup>[1]</sup>等采用  $k-\epsilon$  双方程模型和 VOF 模型模拟流场, 自由

面, 研究了分离区的出现和几何尺度。得出分离区出现在汇口下游主流右侧, 形状随着入汇角的减小而变得狭长, 尺寸随着入汇角度和汇流比的增大而增大。李霞<sup>[2]</sup>等研究了当入汇角为  $60^\circ$  时, 汇流比对水位, 流速以及泥沙淤积的影响。河口与海岸环境中的水体流动具有明显的空间三维特性, 且三维模型不仅能反映真实的水流运动, 而且可以从三维计算结果中提取

收稿日期: 2013-05-23

修回日期: 2013-07-20

资助项目: 高等学校博士学科点专项科研基金博导类项目“基于随机游动理论的污染物迁移扩散规律研究”(20126118110015); 中央财政支持地方高校发展专项特色重点学科项目(106-00X101; 106-5X1205)

作者简介: 李娟(1987—), 女(汉族), 陕西省榆林市人, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境模拟与污染控制。E-mail: juanligood@126.com。

通信作者: 冯民权(1964—), 男(汉族), 山西省永济市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水环境模拟与污染控制方面的研究。E-mail: mqfeng@xaut.edu.cn。

某断面或者某层的结果作为二维结果,因此很多学者对三维模型展开了研究。刘明<sup>[3]</sup>用 ADI 三维潮流模型,模拟和预测河口处的流场,并建立污染物的输运模型,模拟污染物的现状分布和预测污染物的变化。Isabel<sup>[4]</sup>等研究了不同流动状态对葡萄牙杜若河口污染物扩散的影响。Ng<sup>[5]</sup>等提出了由 GIS 和三维水动力,泥沙和重金属运输的集成模型,动态演示水动力变化和污染物扩散过程,并很好地应用于实例计算。对于水平尺度远大于垂向尺度的宽浅型河口,或者窄深型的河口可以将三维模型简化为二维模型。韩龙喜<sup>[6]</sup>采用非稳态浅水方程和垂向平均的二维对流扩散方程建立水动力及水质耦合模型;王昆<sup>[7]</sup>在详细分析辽东湾沿岸各重点排污口排污现状基础上,建立了辽东湾海域污染物输移的对流扩散模型;徐明德<sup>[8]</sup>在矩形网格系统下建立二维水动力水质模型。万清华<sup>[9]</sup>对瓯江河口区域建立了 Delft 3 维水动力和 WASPS 水质耦合模型。这些学者采用所建立的模型模拟了不同工况下的流速分布,并探讨排污口尾水排放对河口污染物的迁移转化的影响。侯建华<sup>[10]</sup>等采用矩形网格划分地形,研究了 50%,75% 频率条件下汾河入黄口的水流水质特性。本研究将汾河看作源相汇入黄河,结合入黄口处的复杂地形环境,采用非结构三角网格来划分地形,更能适合形状不规则的区域,并在侯建华<sup>[10]</sup>的基础上增加 90% 频率年的计算条件,更加全面地考虑不同工况下,入黄口处的水流特性和 COD 的分布情况。同时分析入黄口处不同汇流比对形成的河口滩面积的影响。

## 1 模型建立

### 1.1 基本方程的建立

模型的数学基础是雷诺平均化的 N-S 方程,  $k-\epsilon$  混合模型作为计算工具。

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ v_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] \tag{2}$$

在对水体水质模拟时,在质量及动量方程的基础上还需要加一个浓度的对流扩散方程。形式为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (C u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( E_i \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) - k_1 C \tag{3}$$

$k-\epsilon$  混合模型形式为:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + v_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \epsilon \tag{4}$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left[ v_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] - c_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \tag{5}$$

式中:  $x_i$ ——坐标系统;  $u_i$ —— $x_i$  方向的流速分量;  $t$ ——时间;  $\rho$ ——水的密度;  $p$ ——压力;  $v_t$ ——紊动黏性系数,  $v_t = \frac{c_\mu k^2}{\epsilon}$ ;  $c_\mu$ ——经验常数;  $\delta_{ij}$ ——Kronecker 函数;  $k$ ——紊动动能;  $\epsilon$ ——紊动能耗散率;  $g_i$ ——重力加速度在  $x_i$  方向的分量;  $C$ ——浓度 (mg/L);  $E_i$ ——浓度混合扩散系数 (m<sup>2</sup>/s);  $k_1$ ——污染物降解系数;  $c_{\epsilon 1}, c_{\epsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ ——经验常数(表 1)。

表 1 特征参数值<sup>[10]</sup>

$c_\mu$	$c_{\epsilon 1}$	$c_{\epsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

### 1.2 模型求解

模型采用交替方向隐式迭代法 (ADI) 对水流连续性方程及动量守恒方程进行积分。具体离散用半隐式, 求解采用追赶法。

### 1.3 模型验证

采用 2010 年 2 月份黄河和汾河实测的流量数据, 选取两个断面, 并将模拟值和实测值比较来验证模型的可靠性。两个断面分别为入黄口上游断面和入黄口下游断面。两断面的高程、水位、流速变化的模拟结果如图 1—5 所示。由图 1—5 可知, 入黄口上游断面贯穿了黄河以及汾河, 但此时黄河没有江心洲, 两条河水位和流速最大的部分主要分布河道中心, 局部偏左或偏右。入黄口下游断面只贯穿黄河, 由于江心洲的影响, 水深和流速最大值分布在江心洲两侧。两断面水位模拟的平均绝对误差分别为  $\pm 0.0146$  和  $\pm 0.0002$  m, 相对误差分别为  $\pm 4.09 \times 10^{-5}$ ,  $\pm 8.9 \times 10^{-6}$ ; 两断面流速模拟的平均绝对误差分别为  $\pm 0.03$  和  $\pm 0.009$  m, 相对误差分别为  $\pm 9.4\%$  和  $\pm 3.6\%$ 。因此模拟结果与实测资料相吻合, 故建立的二维水动力模型是可靠的。

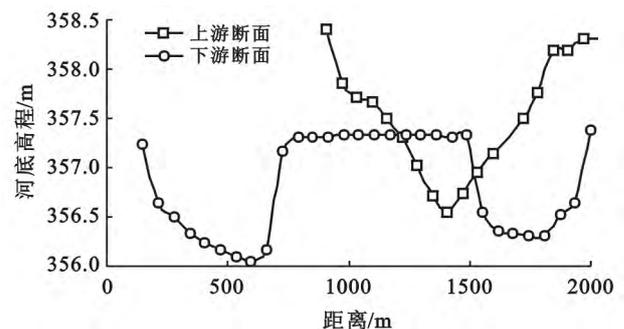


图 1 入黄口上游和下游两断面河底高程分布

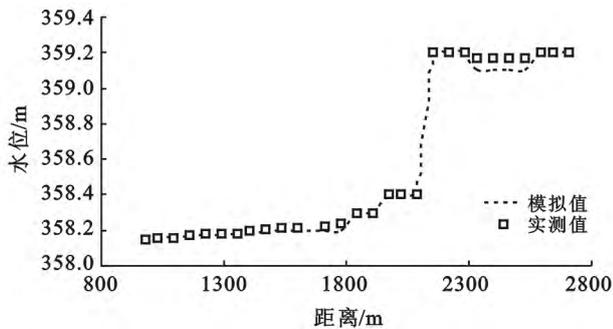


图 2 入黄口上游断面水位模拟结果

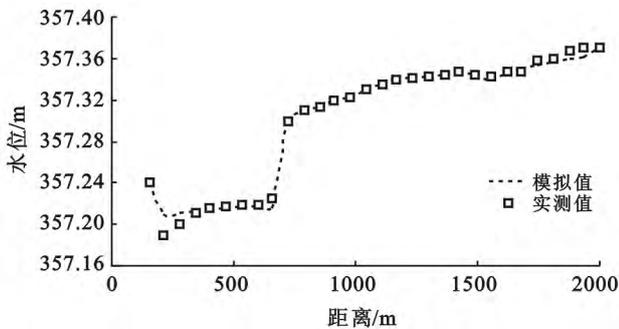


图 3 入黄口下游断面水位模拟结果

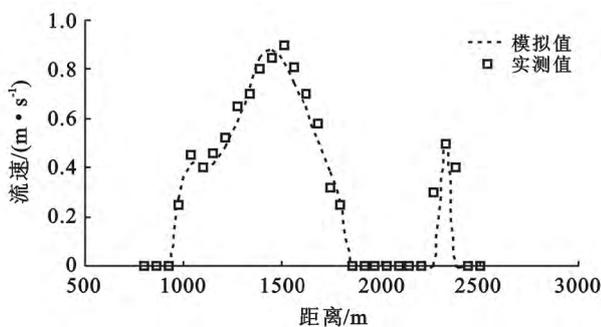


图 4 入黄口上游断面流速模拟结果

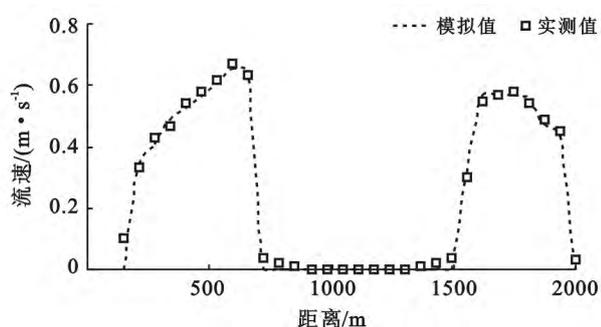


图 5 入黄口下游断面流速模拟结果

## 2 模型计算条件

### 2.1 计算区域

计算区域的上游边界设在黄淤断面 60 处,下游边界设在黄淤断面 60 断面与 59 断面之间,在入黄口下游的 4.5 km 处,计算区域面积约  $9.96 \times 10^6 \text{ m}^2$ 。

交汇口处黄河河宽与汾河河宽的比例约为 3:1,且河中心有江心洲,此时形成的平面区域不规则,采用三角网格能够更好地贴合边界。单个网格面积约为  $1000 \text{ m}^2$ ,对网格进行 100 次迭代光滑,以便达到较好的网格质量。

### 2.2 设计条件确定

2.2.1 水动力模型的初始条件和边界条件确定 模型定解条件包括初始条件和边界条件。对于初始条件,根据实际的高程值初始水位取值为 365 m,初始流速场采用“零启动”的方法给定,污染物浓度初始场采用全场均匀分布,并等于进口处浓度值的方式给定。对于边界条件,上游进口给定流量,下游出口给定水位,将汾河设为源项汇入黄河。根据黄河龙门水文站和汾河下游河津水文站所提供的 1988—2008 年的实测资料来计算 50%,75%,90% 频率年的流量、流速,并作为水文设计条件,此时黄河流量分别为  $503.6, 378.5, 303.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ;汾河的流量分别为  $9.54, 6.33, 4.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。3 种工况下,汇流比((支流流量与主流流量比值)分别为 0.018,0.016,0.014。

### 2.2.2 物质运输模型的初始条件和边界条件确定

物质运移模型稳定状态下运行,因此可不考虑初始值的设定。根据实测资料,2007 年龙门断面 COD 平均浓度为  $13.4 \text{ mg/L}$ ,随着 COD 的不断衰减与降解,计算可得到入黄口处浓度约值为  $10 \text{ mg/L}$ ,取  $10 \text{ mg/L}$  作为浓度背景值。按照山西省地表水环境功能区划结果,汾河入黄处汾河水质按 V 类水标准,即 COD 浓度取  $40 \text{ mg/L}$ 。从 2005—2010 年月平均实测 COD 值可得,汾河水质较好时,COD 浓度能够达到水功能区划的要求。根据黄河水功能区划,汾河入黄处的黄河的水质目标为 III 类,COD 的浓度为  $20 \text{ mg/L}$ 。以此来研究汾河入黄口以后混合区 COD 的输移扩散规律。通过对汾河运城段 20 多个排污口进行调查,给出 3 种工况下汾河排入黄河 COD 的量都为  $3276.631 \text{ t/a}$ 。

## 3 结果与分析

根据水文水质资料,采用二维水动力水质模型分别对 50%,75%,90% 频率条件下水流水质进行模拟。可得其流动特性为:支流受上游来流的挤压和河岸固壁的限制,在交汇口下游附近形成分离区。(1) 黄河与汾河交汇处入汇角约  $30^\circ$ ,受汾河来水的影响,入汇口水流总会趋于平缓,流速相对于主流其他河段较小,导致易在交汇口形成新的河口滩。(2) 交汇口处所形成分离区,能够影响泥沙沉积,分离区的尺寸与交汇形状、入汇角、干支流比和糙率等

因素有关。水流模拟过程中入汇角,糙率等因素不变,但是不同频率年的干支流比却不相同,因此,干支流比决定着河口滩面积的大小。随着三种工况下汇流比的减小,河口滩的面积逐渐减小及 50% 频率年形成河口滩大于 75% 频率年所形成的河口滩,而 90% 水文频率年下未形成新河口滩。(3) 由于支流的顶托作用,3 种工况下汇口上游主流发生壅水现象。

以流场分布特性为基础分别对 50%,75%,90% 频率年 COD 浓度分布进行模拟,可得混合带 COD 浓度沿程变化范围和变化幅度。COD 浓度分布规律大致为:(1) 随着水流的混掺运动,污染物不断混合稀释,而黄河河中间的江心洲,明显阻碍了 COD 的扩散稀释,因此三种频率年条件只给出江心洲左侧的 COD 分布情况。(2) 不同频率年的 COD 分布详见表 2。表 2 中纵向分布表示沿黄河的水流方向污染物从入黄处到达Ⅲ类水的起止坐标。随着水文频率的增大,在黄河纵向分别经过 2.35,3.00,4.20 km 的距离后水质达标。横向分布表示污染物在黄河横向扩散的范围,也由起止坐标来表示,即随着水文频率的增大分别经过约 0.5,0.6,0.7 km 后达标。水文频率变化对横向分布影响较纵向小。

以上分析结果可知,COD 迁移扩散过程中在纵向的迁移距离远大于横向距离,故而,COD 总体分布在一个狭长的区域内。污染物在河流扩散时,在横向扩散起主导作用,而在纵向既有对流又有扩散,且对流作用远大于扩散作用。模拟结果符合污染物迁移转化规律。

表 2 汾河入黄口不同频率年 COD 分布情况

频率年	纵向分布/m	横向分布/m
50%	500~2 850	1 700~2 200
75%	500~3 500	1 700~2 340
90%	500~4 700	1 700~2 400

## 4 结论

(1) 采用 ADI 法在非结构三角网格系统求解连

续方程及动量方程,可以较好地适用不规则的天然河道,并且保证水量、动量完全守恒。

(2) 通过对二维水动力验证,表明所采用的模型模拟效果良好,可以进行流场模拟和污染分布计算。

(3) 分别对 3 种频率年进行水流水质模拟,能够给出汾河水水质达标后 COD 在黄河分别经过约 2.35,3.00,4.20 km 的距离后,水质能够达到黄河水功能区划的要求。

### [参 考 文 献]

- [1] 冯镜洁,李然,王协康,等. 河流交汇分离区特性研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2009,24(3):320-325.
- [2] 李霞,侯极. 入汇角 60° 时入汇口泥沙淤积试验研究[J]. 水电能源科学,2011,29(8):75-77.
- [3] 刘明. 辽河口污染物扩散数值模拟及总量控制研究[D]. 辽宁 大连:大连海事大学,2006.
- [4] Isabel C A, Adriano A B, Pedro M D. Influence of river discharge patterns on the hydrodynamics and potential contaminant dispersion in the Douro estuary (Portugal) [J]. Water Research, 2010,44(3):3133-3146.
- [5] Sandy M Y N, Onyx W H W. Integration of a GIS and a complex three-dimensional hydrodynamic, sediment and heavy metal transport numerical model [J]. Advances in Engineering Software, 2009,40(6):391-401.
- [6] 韩龙喜,易路,刘军英,等. 连云港近岸海域污染物输移规律[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(3):248-253.
- [7] 王昆,王年斌. 辽东湾海域水体污染物输运的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2010,25(4):493-498.
- [8] 徐明德. 黄海南部近岸海域水动力特性及污染物输移扩散规律研究[D]. 上海:同济大学,2006.
- [9] 万清华. 瓯江平面二维水量—水质耦合模型研究及应用[D]. 江苏 南京:河海大学,2007.
- [10] Xing Xiaopeng, Hou Jianhua, Feng Minquan, et al. Research on Flow and Pollutant Diffusion at the Fen River Entrance into Yellow River [C] // Computer and Management (CAMAN), 2011 International Conference on IEEE, 2011: 1-4.