

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.04.014

# 黄河大柳树—沙坡头河段典型弯道水流运动平面二维数值模拟

景何仿<sup>1 2</sup> 李春光<sup>1</sup>

( 1. 北方民族大学数值计算与工程应用研究所,宁夏 银川 750021 ; 2. 宁夏大学土木与水利工程学院,宁夏 银川 750021 )

**摘要** :建立了适体坐标系下的平面二维紊流水流数学模型,对黄河在宁夏回族自治区中卫市境内的大柳树—沙坡头河段典型弯道的水流运动进行数值模拟。为了反映弯道环流的影响,对动量方程进行修正,紊流模型采用修正的 RNG  $k-\epsilon$  模型。通过对黄河大柳树—沙坡头河段连续弯道水流运动数值计算结果与实测结果的对比分析,表明该模型能够准确地模拟具有复杂地形的天然河流弯道中的水流运动。利用所建立的模型计算了 4 种典型工况下水面的纵比降和横比降,得到一些有益的结论。

**关键词** :RNG  $k-\epsilon$  模型 ; 平面二维模型 ; 数值模拟 ; 黄河大柳树—沙坡头河段

**中图分类号** :TV131.4      **文献标识码** :A      **文章编号** :1006-7647(2011)04-0060-05

**Two-dimensional numerical simulation of flow motion in typical bends of Daliushu-Shapotou Reach of Yellow River**//JING He-fang<sup>1,2</sup>, LI Chun-guang<sup>1</sup>( *Research Institute of Numerical Computation and Engineering Applications, North University for Nationalities, Yinchuan 750021, China* ; 2. *School of Civil Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China* )

**Abstract** : A two-dimensional turbulent model in body-fitted coordinates was established to simulate the flow motion in some typical bends of Daliushu-Shapotou Reach of Yellow River in Zhongwei City of Ningxia Hui Autonomous Region. In order to reflect the circulation currents in the bends, the momentum equations in the model were improved by adding an additional term, and a modified RNG  $k-\epsilon$  model was adopted for the turbulent flows. The numerical results and the measured data for the flow motion in the consecutive bends of Daliushu-Shapotou Reach were compared and analyzed. The results indicate that the proposed model can accurately simulate the flow motion in bends of natural rivers with complicated topography. Some useful conclusions are drawn based on the longitudinal slopes and transverse gradients of water surface in four typical cases calculated by means of the present model.

**Key words** : RNG  $k-\epsilon$  model ; two-dimensional model ; numerical simulation ; Daliushu-Shapotou Reach of Yellow River

天然河流的水流运动一般为紊流,关于紊流的数值模拟方法较多,其中  $k-\epsilon$  紊流模型在工程领域应用较为广泛<sup>[1]</sup>,但使用标准  $k-\epsilon$  模型对高应变率及流线弯曲程度较大的流动现象进行模拟时会产生一定的失真<sup>[2]</sup>。针对这种现象,人们以  $k-\epsilon$  模型为基架提出了多种改进方案,其中 RNG  $k-\epsilon$  模型<sup>[3]</sup>对标准  $k-\epsilon$  模型做了部分改进,可以更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动,在近年来受到重视<sup>[4]</sup>,但利用 RNG  $k-\epsilon$  模型对天然河流弯道水沙运移数值模拟方面的文献尚不多见。

河流一维数学模型只能给出水力要素沿河道方向的变化,不能反映其沿河宽的变化,其计算结果对河宽变化剧烈的河段及弯曲河段而言可靠性较差。由于大多数天然河流的水平尺度远大于垂直尺度,

因此沿水深平均的平面二维水流数学模型是目前研究水流运动使用较为广泛的数学模型。弯道水流由于受离心力的影响,与顺直河道中的水流运动具有不同的特性<sup>[5]</sup>。一般的平面二维水流数学模型没有考虑弯道离心力的影响,对于宽深比较小、曲率半径较小及复式断面的弯道而言,模拟误差较大。针对这种现象,文献[6-8]对沿水深平均的平面二维数学模型进行了不同改进,并对弯道水流运动进行了数值模拟。这些模型对于规则的实验室弯道水流运动模拟效果较好,但缺乏天然河流复杂弯道水沙实测资料的系统验证。

位于黄河上游的大柳树—沙坡头河段为由连续弯道组成的具有复杂地形的天然河流,其水沙运移具有较复杂的特点。本文建立了曲线坐标系下的沿

基金项目 :国家自然科学基金(10961002);宁夏自然科学基金(NZ1057);宁夏高等学校科学研究项目(2009JY002)

作者简介 :景何仿(1970—)男,甘肃肃县人,副教授,博士,从事计算水力学研究。E-mail :jinghef@163.com

通讯作者 :李春光(1964—)男,河南正阳人,教授,从事计算水力学研究。E-mail :cglizd@hotmail.com

水深平均的平面二维紊流模型,即修正的 RNG  $k-\epsilon$  模型。为了反映弯道离心力的影响,参考有关文献<sup>[6-8]</sup>的做法,对动量方程进行了修正。另外,建立了确定糙率系数的自适应算法,可以大幅度缩短程序调试的时间。

## 1 数学模型

### 1.1 控制方程

在适体坐标系下,平面二维标准  $k-\epsilon$  紊流模型可写为以下通用形式<sup>[1]</sup>。其中通用变量  $\Phi$ 、扩散系数  $\Gamma_\Phi$  及源项  $S_\Phi$  在连续性方程中分别代表 1、0 和 0,在  $x$  方向动量方程中分别代表  $u$ 、 $\nu_t$  和  $S_u$ ,在  $y$  方向动量方程中分别代表  $v$ 、 $\nu_t$  和  $S_v$ ,在湍动能方程( $k$ -方程)中分别代表  $k$ 、 $\nu_t/\sigma_k$  和  $S_k$ ,在湍动能耗散率方程( $\epsilon$ -方程)中分别代表  $\epsilon$ 、 $\nu_t/\sigma_\epsilon$  和  $S_\epsilon$  ):

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial t}(H\Phi) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi}(HU\Phi) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta}(HV\Phi) = \\ &\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{\alpha H \Gamma_\Phi}{J} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi}\right) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{\nu H \Gamma_\Phi}{J} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta}\right) + S_\Phi(\xi, \eta) \end{aligned} \tag{1}$$

其中

$$\begin{aligned} \sigma_k &= 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \\ S_k &= H(P_k + P_{kv} - \epsilon) - \frac{HC_\mu k^2}{\nu_t} \\ \nu_t &= C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \\ U &= uy_\eta - vx_\eta \quad V = -uy_\xi + vx_\xi \end{aligned}$$

式中: $u$ 、 $v$  分别为  $x$  和  $y$  方向的流速; $k$ 、 $\epsilon$  分别为湍动能及其耗散率; $t$  为时间; $H$  为水深; $\nu$ 、 $\nu_t$  分别为水的运动黏性系数和紊动黏性系数; $U$ 、 $V$  为逆变流速分量;其他有关变量和参数的含义见文献[1]。

RNG  $k-\epsilon$  模型与适体坐标系下的平面二维标准  $k-\epsilon$  紊流模型(式(1))相比,变化主要体现在以下 3 个方面<sup>[9]</sup>:①常数  $\sigma_k$  和  $\sigma_\epsilon$  发生了变化, $\sigma_k = \sigma_\epsilon = 1/1.39$ 。② $\epsilon$ -方程的源项发生了变化。新源项  $S_\epsilon^* = S_\epsilon - C'_{1\epsilon} H(\epsilon/k) P_k$ ,其中  $C'_{1\epsilon} = \eta_1(1 - \eta_1/\eta_0)(1 + \beta_1 \eta_1^3)$ , $\eta_1 = \sqrt{P_k/\nu_t} k/\epsilon$ , $\eta_0 = 4.377$ , $\beta_1 = 0.012$ 。③标准  $k-\epsilon$  模型中其他有关参数的取值为: $C_\mu = 0.09$ , $C_{1\epsilon} = 1.44$ , $C_{2\epsilon} = 1.92$ ,而在本文 RNG  $k-\epsilon$  模型中相应的参数变为: $C_\mu = 0.0845$ , $C_{1\epsilon} = 1.42$ , $C_{2\epsilon} = 1.68$ 。

另外,经过数值模拟试验发现,利用上述模型计算的紊动黏性系数偏大。将用于计算  $P_{kv}$  的参数  $C_a$  由原来的 18.26 调整为 3.34 后,计算得到的紊动黏性系数比较合理,且计算结果与实测结果比较接近。将经过这样处理后的平面二维紊流模型称为修正的 RNG  $k-\epsilon$  模型。

沿水深平均的平面二维水流模型一般在弯道处不能很好地反映弯道离心力对流速分布的影响<sup>[10]</sup>,笔者参考文献[8,10]的做法,在动量方程源项中添加了反映弯道离心力的项,新的源项变为

$$S_u^* = S_u - M_u, S_v^* = S_v - M_v \tag{2}$$

其中

$$\begin{aligned} M_u &= \frac{1}{J^2} \frac{u\sqrt{\nu}}{\sqrt{u^2 + v^2}} \frac{\partial}{\partial \eta}(|\bar{u}| \bar{u} \varphi) \\ M_v &= \frac{1}{J^2} \frac{v\sqrt{\nu}}{\sqrt{u^2 + v^2}} \frac{\partial}{\partial \eta}(|\bar{u}| \bar{u} \varphi) \\ \varphi &= \sqrt{\frac{\nu}{\alpha}} \frac{H^2}{r} k_{TS} \end{aligned}$$

式中: $\bar{u}$  为  $\xi$  方向的流速; $r$  为等  $\eta$  线的曲率半径; $k_{TS}$  为弯道环流引起的横向动量交换系数,可利用文献[8,10]中的公式进行计算。

### 1.2 数值计算方法

方程离散采用有限体积法。将适体坐标系下通用模型(式(1))在计算域的控制体上对空间和时间积分,采用一定的数值积分公式进行离散。对流、扩散及源项均采用全隐式的时间积分,扩散项采用中心差分格式,源项采用线性化方法处理。

对流项的离散若采用一阶迎风格式则精度较低。采用 QUICK 格式可以达到较高的精度,但离散后的方程组带宽较大,给求解带来一定困难。这里采用 Hayase 等<sup>[11]</sup>提出的改进的 QUICK 算法——延迟修正格式。这种格式是在一阶迎风格式的基础上再加上附加源项,一方面能保持 QUICK 格式的精度,另一方面离散后的差分方程组为五对角方程组,易于编程计算,可采用 TDMA 算法求解<sup>[12]</sup>。变量布置采用同位网格,即所有变量均布置在同一套网格上,同时为避免出现锯齿形压力场,流速采用动量插值法进行处理<sup>[1]</sup>。采用压力修正算法中的 SIMPLEC 算法来处理压力和速度的耦合问题<sup>[12]</sup>。

### 1.3 边界条件处理

在进口边界给定流速  $u$ 、 $v$  以及湍动能  $k$ 、耗散率  $\epsilon$ 。 $u$  和  $v$  可根据实测确定,或根据平均流速按抛物线分布规律进行处理, $k$  和  $\epsilon$  分别按式(3)、式(4)计算<sup>[13]</sup>:

$$k = 1.5 IU_{in}^2 \tag{3}$$

$$\epsilon = C_\mu^{0.75} \frac{k^{1.5}}{0.1R} \tag{4}$$

式中: $U_{in}$  为进口断面流速; $R$  为水力半径,取值可等同于水深  $H$ ; $I$  为紊动强度,一般可取为 10%。水位  $z$  在进口处的值不给定,可根据其相邻节点进行线性外插得到。本文曾对  $I$  取 3 个不同的值 5%、10%、15% 进行数值模拟,发现  $I$  的不同取值对水流进口附近(弯道 A)流速、水位、 $k$  及  $\epsilon$  的模拟结果有

一定影响,而对远离水流进口的区域(弯道 C 和弯道 D)影响甚微,可以忽略不计。由于本文的主要研究区域为弯道 C 和弯道 D,故  $I$  的微小变化对模拟结果的影响可以略去。

给定出口边界的水位  $u$  和  $v$  以及  $k$  和  $\epsilon$  均按充分发展边界条件处理。由于壁面附近流速梯度较大,需要布置较细的网格,会造成整个计算量的成倍增加。为了减少计算量且不对整个计算结果造成较大影响,采用壁面函数法<sup>[12]</sup>来处理壁面边界。

## 2 模拟结果

### 2.1 大柳树—沙坡头河段基本情况

模拟河段为黄河在宁夏回族自治区中卫市境内的大柳树—沙坡头河段,河段较长(全长 13.4 km),河床地形复杂。靠近拟建的大柳树水利枢纽的部分河段位于水流湍急的峡谷区域,河面较窄,而靠近已建的沙坡头水库大坝的部分河段水面较宽,水流较缓。图 1 为黄河水利委员会在该河段预设的 20 个实测断面,断面编号为 SH1~SH15,SHJ1~SHJ5。水流方向为从断面 SH15 至 SH1 的方向,其中出口断面 SH1 距离沙坡头水库大坝为 0.9 km,进口断面 SH15 距离大坝 14.3 km。该河段由 5 个弯道组成,分别是:弯道 A(SH15~SH13)、弯道 B(SH13~SH11)、弯道 C(SH11~SH7)、弯道 D(SH7~SHJ2)、弯道 E(SHJ2~SH1)。相邻的 2 个弯道之间没有明显的顺直过渡段。

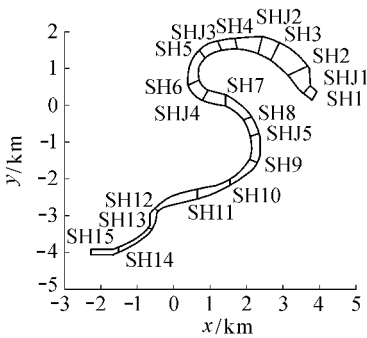


图 1 大柳树—沙坡头河段平面示意图

由于断面 SH1 位于流场变化剧烈处,为避免在出口段出现回流而影响计算的稳定性,在出口断面 SH1 外添加了 40 m 长的顺直河段,该河段可看成是断面 SH1 沿其外法线方向平移 40 m 后得到的。

### 2.2 模拟工况

为了验证数值模拟结果并对其进行分析,笔者就 4 种典型工况分别进行计算。表 1 给出了 4 种典型工况下的流量、进口断面平均流速、出口边界水位、 $k$  和  $\epsilon$  值。从表 1 看出,工况 1~4 流量逐渐增大,进口断面流速也依次增大。

表 1 4 种典型工况在进、出口边界处的参数模拟结果

| 工况 | 流量/<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 进口断面<br>平均流速/<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 出口边界<br>水位/<br>m | $k$ /<br>( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) | $\epsilon$ /<br>( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ ) |
|----|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 1  | 513.50                                      | 1.03                                                | 1239.68          | 0.0160                                        | 0.0011                                               |
| 2  | 900.00                                      | 1.54                                                | 1240.65          | 0.0269                                        | 0.0013                                               |
| 3  | 1500.00                                     | 1.81                                                | 1241.50          | 0.0378                                        | 0.0016                                               |
| 4  | 2000.00                                     | 2.06                                                | 1242.00          | 0.0492                                        | 0.0020                                               |

### 2.3 网格剖分

沿水流方向( $\xi$  方向)有 161 个节点,河宽方向( $\eta$  方向)有 31 个节点,共计  $161 \times 31 = 4061$  个网格节点、 $160 \times 30 = 4800$  个网格单元。

### 2.4 数值模拟结果与实测结果的比较分析

#### 2.4.1 水位比较

笔者采用一种自适应算法来选取曼宁系数,基本思想可归结如下:①根据实测水位等资料将模拟河段分为几个子河段,各个子河段水面坡降不同,给出各子河段  $n$  的猜测值。②若子河段水面坡降的计算值小于实测值,则  $n$  加上一定值(如 0.001);反之,则  $n$  减去一定值(如 0.001)。为避免出现计算过程的不稳定,可每隔若干时间步(如 30 步)修正 1 次  $n$  的值。③经过若干步计算后,若  $n$  的值趋于稳定,则确定  $n$  为曼宁系数的取值。

上述算法不但可以节约大量运算量,还可以根据实测结果在不同的子河段选取合适的曼宁系数值,使计算水位尽可能地接近实测值。现以工况 2 为例,分 2 种方法对全河段水位进行模拟。取时间步长为 12 s,经过 1500 个时间步, $n$  的值基本达到稳定。

方法 1 全河段采用同一个曼宁系数值。水面坡降  $J = 1.55 \times 10^{-4}$ 。利用上述算法得到  $n = 0.034$ 。

方法 2 将全河段分为 2 个子河段:子河段 1(从 SH15 至 SH11)和子河段 2(从 SH11 至出口断面),其水面坡降分别为  $3.32 \times 10^{-4}$  和  $8.76 \times 10^{-5}$ 。利用上述算法可得相应的曼宁系数分别为  $n_1 = 0.0355$ ,  $n_2 = 0.0330$ 。

方法 3 将全河段分为 4 个子河段,子河段 1(从 SH15 至 SH11)、子河段 2(从 SH11 至 SH7)、子河段 3(从 SH7 至 SH4)、子河段 4(从 SH4 至出口断面),水面坡降分别为:  $J_1 = 3.32 \times 10^{-4}$ ,  $J_2 = 1.23 \times 10^{-4}$ ,  $J_3 = 7.05 \times 10^{-5}$ ,  $J_4 = 5.67 \times 10^{-5}$ 。利用上述算法可得各子河段上曼宁系数分别取  $n_1 = 0.036$ ,  $n_2 = 0.034$ ,  $n_3 = 0.021$ ,  $n_4 = 0.019$ 。

将上述 3 种方法计算出的水位值和实测水位值进行比较,如图 2 所示。可以看出,方法 3 计算出的水位值更接近实测值,这说明在长河段水流数值模

拟时,将所研究河段适当地进行分段,各段采用不同的曼宁系数值可以使模拟结果更接近实测结果。

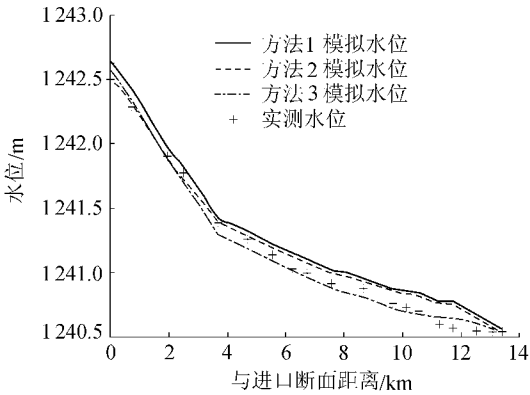


图2 水位沿程变化计算结果与实测结果比较

2.4.2 流速比较

对加入弯道修正项与不加修正项的计算结果与实测结果进行比较。图3给出了断面SH7处沿水深平均流速计算结果与实测结果的比较。可以看出,加入弯道修正项后,垂线平均流速沿横向的梯度变大,数值模拟结果与实测结果吻合较好,最大流速靠近凹岸,符合弯道水流的一般规律。

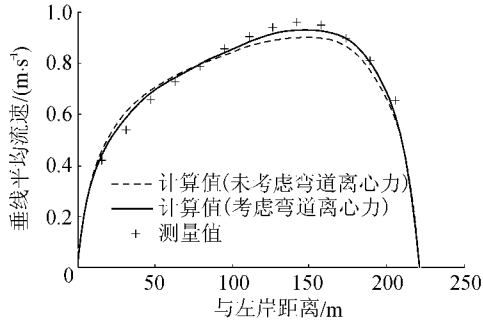


图3 断面SH7处水深平均流速计算结果与实测结果比较

2.5 流速场模拟结果

在工况2条件下,取时间步长  $dt = 10\text{ s}$ ,经过1800个时间步的迭代,流场趋于稳定。图4给出了从断面SH12到SH1之间的流速矢量图。从图4可以看出,模拟流场基本上符合弯道水流运动规律:在弯道进口处,主流、最大流速所在位置靠近凸岸,然

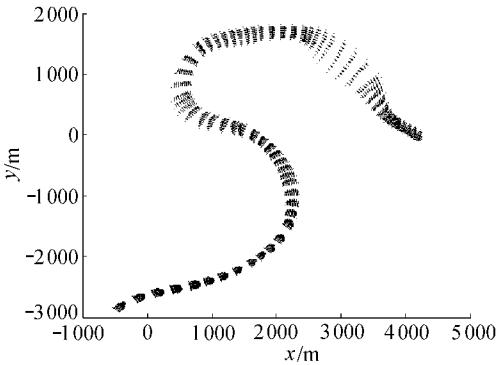


图4 断面SH12~SH1之间流场矢量图

后逐渐向凹岸过渡;在弯道出口处,主流靠近凹岸。

2.6 不同工况下水面纵比降与横比降的分析

关于弯道水面纵比降和横比降的计算,有不少理论公式,但许多公式将弯道分为进口直段、弯道段、出口直段分别进行计算,且公式中含有诸多参数。而所模拟河段的弯道为连续弯道,并不明显包含进口直段、出口直段,而且弯道不太规则,一些参数难以确定。为了与数值模拟结果进行对比,笔者采用谢才公式<sup>[14]</sup>来计算中轴线处的平均水面纵比降:

$$J_{\theta} = \frac{v_{cp}^2}{C^2 R} \tag{5}$$

式中: $v_{cp}$ 为垂线平均流速; $C$ 为谢才系数。

由于不同断面处流速及水力半径均不同,实际计算时可利用式(5)分别计算出各断面处的水面纵比降,再取平均值即可得到平均水面纵比降。

关于水面横比降的计算,利用罗索夫斯基公式<sup>[15]</sup>:

$$J_r = \left(1 + \frac{g}{\kappa^2 C^2}\right) \frac{v_{cp}^2}{gr'} \tag{6}$$

式中: $g$ 为重力加速度; $\kappa$ 为 von Karman 常数(可取为0.42); $r'$ 为弯道中心线曲率半径。

现就4种典型工况利用所建立的模型对黄河大柳树—沙坡头河段的水流运动进行数值模拟,并将各种工况下沿断面中心线处水面纵比降与横比降的数值模拟结果与上述理论公式计算结果进行比较(表2)。

表2 4种典型工况下平均水面比降理论值与模拟值比较

| 工况 | 水面纵比降                 |                       | 断面SH5水面横比降             |                        |
|----|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
|    | 模拟值                   | 理论值                   | 模拟值                    | 理论值                    |
| 1  | $1.16 \times 10^{-4}$ | $1.16 \times 10^{-4}$ | $-3.99 \times 10^{-5}$ | $-4.50 \times 10^{-5}$ |
| 2  | $1.52 \times 10^{-4}$ | $1.48 \times 10^{-4}$ | $-6.88 \times 10^{-5}$ | $-5.82 \times 10^{-5}$ |
| 3  | $2.32 \times 10^{-4}$ | $2.21 \times 10^{-4}$ | $-1.24 \times 10^{-4}$ | $-1.48 \times 10^{-4}$ |
| 4  | $2.87 \times 10^{-4}$ | $2.58 \times 10^{-4}$ | $-1.75 \times 10^{-4}$ | $-2.14 \times 10^{-4}$ |

从表1、表2可以看出:工况1到工况4进口断面平均流速从约1 m/s增大到约2 m/s,水面纵比降从  $1.16 \times 10^{-4}$  增大到  $2.87 \times 10^{-4}$ ,理论公式(5)计算结果与数值模拟结果在流量较小时吻合较好,随着流量的增大,理论值和计算值的偏差也随之增大。

从表2中断面SH5在4种典型工况下水面横比降的比较可以看出,对于同一断面,工况1条件下水面横比降的绝对值最小,工况4条件下水面横比降的绝对值最大,水面横比降的绝对值也随着流量的变大而变大;凹岸水位均高于凸岸水位,符合弯道水流的运动规律,断面SH5处的水面横比降理论值与模拟值相差不大,进一步反映了数值模拟结果的可靠性。

3 结 语

通过修正已有的  $k-\epsilon$  紊流模型,建立了修正的 RNG  $k-\epsilon$  紊流模型,对宁夏回族自治区中卫市境内的黄河大柳树—沙坡头河段的水流运动进行了平面二维数值模拟,并进行了一些算法上的改进,得到一些有益的结论:①对湍动能及其耗散率方程的部分参数进行了调整,并在动量方程中增加了体现弯道环流影响的项。通过对比发现,增加该项后数值模拟结果与实测结果吻合较好。②在弯道出口段添加了一小段顺直段,避免在出口段出现回流而影响计算的稳定性。③采用自适应算法确定不同子河段的糙率值,减少试算的工作量,提高了计算精度。④通过数值模拟发现,水面纵比降和横比降的绝对值均随着进口断面流量的增大而增大。

致谢:在本文完成过程中得到水利部黄河水利委员会宁蒙水文水资源局和沙坡头电厂的热心帮助,在此表示诚挚的谢意。

参考文献:

[ 1 ] 吴修广,沈永明,郑永红,等.非正交曲线坐标系下二维水流计算的 SIMPLEX 算法[ J ]. 水利学报,2003,34( 2 ): 25-30.

[ 2 ] PEZZINGA G. Velocity distribution in compound channel flows by numerical modeling[ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1994, 120: 1176-1198.

[ 3 ] YAKHOT V, ORZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence: basic theory[ J ]. J. Sci. Comput., 1986, 1: 3-11.

(上接第 55 页)

[ 5 ] SIRIWARDENE N R, DELETIC A, FLETCHER T D. Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study[ J ]. Water Research, 2007, 41: 1433-1440.

[ 6 ] VIGNESWARAN S, RONILLO B S. A detailed investigation of physical and biological clogging during artificial recharge[ J ]. Water, Air & Soil Pollution, 1987, 35( 2 ): 119-140.

[ 7 ] 阎葆瑞,庞炳乾,汤亚伯.人工补给条件下地下水水质及微生物作用的初步研究[ J ]. 水文地质工程地质, 1983( 5 ): 29-33.

[ 8 ] 郭茹,贾海峰,井艳文,等.污水回用,大势所趋——关于北京市污水回用的思考[ J ]. 北京水利, 2001( 5 ): 42-43.

[ 9 ] 孙颖,苗礼文.北京市深井人工回灌现状调查与前景分析[ J ]. 水文地质工程地质, 2001( 1 ): 21-25.

[ 4 ] SPEZIALE C G, THANGAM S. Analysis of an RNG based turbulence model for separated flows[ J ]. Int. J. Engng. Sci., 1992, 30: 1379-1388.

[ 5 ] 赵小娥,钟杰,刘兴年,等. U 形弯道建闸对水流运动特性的影响试验[ J ]. 水利水电科技进展, 2010, 30( 3 ): 47-49.

[ 6 ] LIEN H C, HSIEH T Y, YANG J C, et al. Bend-flow simulation using 2D depth-averaged model[ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1999, 125( 10 ): 1097-1108.

[ 7 ] JIN Y C, KENNEDY J F. Moment model of non-uniform channel-bend flow[ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1993, 119( 1 ): 109-124.

[ 8 ] 刘玉玲,刘哲.弯道水流数值模拟研究[ J ]. 应用力学学报, 2006, 24( 2 ): 310-312.

[ 9 ] 王福军. 计算流体力学分析[ M ]. 北京:清华大学出版社, 2004.

[ 10 ] VRIEND H J D. Velocity redistribution in curved rectangular channels[ J ]. J. Fluid Mech., 2003, 107: 423-427.

[ 11 ] HAYASE T, HUMPHREY J A C, GREIF R. A consistently formulated quick scheme for fast and stable convergence using finite-volume iterative calculation procedure[ J ]. Journal of Computational Physics, 1992, 98: 108-118.

[ 12 ] 陶文铨. 数值传热学[ M ]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社, 2001.

[ 13 ] KANG H, CHOI S U. Reynolds stress modeling of rectangular open-channel flow[ J ]. Int. J. Numer. Meth. Fluids, 2006, 51: 1319-1334.

[ 14 ] 吴持恭. 水力学[ M ]. 3 版. 北京:高等教育出版社, 2003.

[ 15 ] 张玉萍. 弯道水力学研究现状分析[ J ]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33( 5 ): 35-49.

( 收稿日期 2010-01-08 编辑 高建群 )

[ 10 ] 武景堂.山前平原天然河道人工补给地下水试验研究[ J ]. 河北地质学院学报, 1993, 16( 1 ): 70-79.

[ 11 ] MARTIN T, MARTIN H S. Modeling of a microbial growth experiment with bioclogging in a two-dimensional saturated porous media flow field[ J ]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, 70: 37-62.

[ 12 ] 赵世平,刘建生,杨改强,等.粒径对土壤水分特征曲线的影响研究[ J ]. 太原科技大学学报, 2008, 29( 4 ): 332-334.

[ 13 ] 黄修东.地下水人工回灌堵塞特征及机理试验研究[ D ]. 南京:河海大学, 2009.

[ 14 ] 普洛特尼科夫.地下水人工补给译文集[ M ]. 汪熊麟,胡淑琴,译.北京:地质出版社, 1987.

[ 15 ] 王大纯,张人权,史毅虹,等.水文地质学基础[ M ]. 北京:地质出版社, 1995.

( 收稿日期 2010-11-19 编辑 方宇彤 )