大柳树—沙坡头河段泥沙运移二维数值模拟

李春光、景何仿、吕岁菊、周炳伟

(北方民族大学 数值计算与工程应用研究所, 宁夏 银川 750021)

摘要:黄河大柳树—沙坡头河段位于宁夏境内,是由5个弯道组成的连续弯道,具有较为复杂的地形特征. 利用所建立的修正的平面二维 RNG *k-e* 紊流泥沙数学模型,对该河段水流运动及泥沙运移进行了平面二维数 值模拟研究.采用全沙模型,考虑不同粒径组悬移质和推移质运移对河床演变的影响.通过数值模拟结果与实 测结果的对比分析,表明该模型能够模拟具有连续弯道的天然河流水流运动及泥沙运移过程;建立了一种关 于泥沙数学模型中水流模块和泥沙模块的半耦合式算法,其计算量比耦合式算法较小,但计算精度比分离式 算法较高.

关 键 词: 泥沙运移; 全沙模型; 数值模拟; 连续弯道 中图分类号: TV147 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2011)04-0102-06

沿水深平均的平面二维泥沙数学模型是目前研究河床演变使用较广的数学模型. 窦国仁等^[1]曾提出不同的平面二维泥沙数学模型;黄远东等^[2]引入符合黄河下游河道水沙特点的水流挟沙力和河床曼宁系数的 计算公式,对黄河下游河床冲淤进行了平面二维数值模拟;Duan 等(2010)^[3]建立了平面二维水沙数学模型,对实验室弯道的河床演变进行了平面二维数值模拟研究. 但目前利用平面二维泥沙数学模型对黄河上 游河床变形进行平面二维数值模拟的研究罕见文献报道.

位于宁夏境内的黄河上游大柳树—沙坡头河段,地形复杂,河床高程变幅较大,弯道较多且不规则,床沙 粒径分布不均匀,含沙量变幅较大.本文建立了修正的平面二维 RNG k-*ε* 紊流泥沙数学模型,同时考虑了 不同粒径组推移质和悬移质运移及其引起的河床变形,分两种典型工况对黄河大柳树—沙坡头河段的水沙 运移及河床变形分别进行了数值模拟,研究了含沙量分布及河床演变的特点,吸取了水沙模型中水流模块 与泥沙模块耦合式算法及分离式算法各自的优点,建立了一种半耦合算法,计算量较小,精度较高.

数学模型

沿水深平均的平面二维泥沙数学模型可分为水流模块和泥沙模块两个子模块,以下分别进行介绍.其 中水流模块采用修正的平面二维 RNG *k*-*ε* 紊流模型,可以考虑弯道环流的影响,已在参考文献[4]中进行了 详细介绍,这里不再重复.

1.1 泥沙模块^[5]

(1) 非均匀悬移质不平衡输沙方程

$$\frac{\partial hS_L}{\partial t} + \frac{\partial huS_L}{\partial x} + \frac{\partial hvS_L}{\partial y} = -\alpha_L \omega_L (S_L - S_L^*) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x h \frac{\partial S_L}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y h \frac{\partial S_L}{\partial y} \right), L = 1, 2, \cdots, N_S$$
(1)

收稿日期:2011-08-12

- **基金项目:** 国家自然科学基金项目(10961002); 宁夏自然科学基金项目(NZ1057); 宁夏高等学校科学研究项目 (2009JY002); 北方民族大学科研项目(2011Y026)
- **作者简介**: 李春光(1964-),男,河南正阳人,教授,博士,主要从事计算流体力学、数值代数等研究. E-mail: cglizd@ hotmail.com 通信作者:景何仿(E-mail: jinghef@163.com)

式中: S_L^* , S_L , ω_L , α_L 为第L组悬移质泥沙含量、水流挟沙力、沉速及恢复饱和系数; N_s 为悬移质泥沙分组粒径数; ε_x , ε_y 分别为x,y方向的扩散系数.

(2)非均匀悬移质河床变形方程
$$\gamma'_{s} \frac{\partial Z_{s,L}}{\partial t} = \alpha_{L} \omega_{L} (S_{L} - S_{L}^{*})$$
 (2)

式中: Z_{s.L} 为第 L 组粒径悬沙产生的冲淤厚度;γ',为泥沙干密度.

(3) 非均匀推移质输移方程
$$\gamma'_{s} \frac{\partial Z_{b,L}}{\partial t} + \frac{\partial g_{bx,L}}{\partial x} + \frac{\partial g_{by,L}}{\partial y} = 0, \quad L = 1, 2, \cdots, N_{b}$$
 (3)

式中: N_b 为推移质按泥沙粒径的分组数; $Z_{b,L}$, $g_{bx,L}$ 和 $g_{by,L}$ 分别为第L组推移质泥沙引起的冲淤厚度、x方向和y方向的单宽输沙率.

(4)床沙级配调整方程

$$\gamma'_{\rm S} \frac{\partial E_{\rm m} P_{\rm mL}}{\partial t} + \alpha_L \omega_L (S_L - S_L^*) + \frac{\partial g_{\rm bx,L}}{\partial x} + \frac{\partial g_{\rm by,L}}{\partial y} + \gamma'_{\rm S} [\varepsilon_1 P_{\rm mL} + (1 - \varepsilon_1) P_{\rm mL,0}] \left(\frac{\partial z_{\rm b}}{\partial t} - \frac{\partial E_{\rm m}}{\partial t} \right) = 0 \qquad (4)$$

式中: z_b 为河床高程; E_m 为混合活动层厚度; P_{mL} 为第L粒径组床沙在全部可动床沙中所占百分比,即混合活动层床沙级配; $P_{mL,0}$ 为原始床沙级配;当混合层在冲刷过程中涉及原始河床时 $\varepsilon_1=0$,否则 $\varepsilon_1=1$.

1.2 泥沙模块中一些关键问题的处理

现利用张红武水流挟沙力公式^[5]计算出总水流挟沙力 S^* ,然后利用黄河水利科学研究院模型方法^[6] 计算分组水流挟沙力.推移质单宽输沙率采用窦国仁公式^[1]进行计算,取泥沙扩散系数 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 与水流的紊 动扩散系数 ν_t 相同,恢复饱和系数采用武汉水利电力学院韦直林公式^[7].

2 数值计算方法及边界条件处理

2.1 数值计算方法

采用适体坐标变换,将所模拟的不规则物理区域变换为计算平面上的矩形区域,大大降低了区域离散的 复杂性.但同时控制方程也要做相应坐标变换,变换后的控制方程可参考文献[4].

采用有限体积法(FVM)对变换后通用控制方程进行离散,其中对流项采用改进的 QUICK 格式进行离散^[8]. 该格式利用延迟修正的思想,具有精度高(可达到三阶精度)、保持物理量守恒、能有效降低低阶格式 假扩散效应的优点,且离散后的差分格式为五点格式,便于求解.

采用同位网格系统来布置求解变量,同时为了解决不合理压力场问题,采用动量插值法^[9]来处理.利用 SIMPLEC 算法^[9]来解决压力和流速的耦合问题.离散后的方程组采用 TDMA 算法^[9]进行数值求解.

2.2 半耦合算法

平面二维水沙数学模型由水流模块和泥沙模块组成.本文结合目前关于水流模块及泥沙模块的耦合算 法及分离式算法的优点,提出一种半耦合算法.该算法中,泥沙模块一直工作,而水流模块则采用间歇式启 动的方式.在本文中,取时间步长为12 s,每隔3 600 个时间迭代步(即12 h)启动一次水流模块和泥沙模块 一起工作 300 个时间步(即1 h)后停止,依次循环.

一方面,半耦合算法根据河床冲淤的变化定期更新流速和水位,因而在计算精度上高于泥沙模块启动后 水流模块不参与工作的分离式算法;另一方面,水流模块的计算量在整个计算中所占比重很大,而该算法中, 水流模块为间歇式启动,且往往间歇时间比工作时间长得多,因此该算法比水流模块一直参与运算的耦合式 算法,计算量要小得多.

2.3 边界条件的处理

在进口边界给定流速 $U_{\rm m}$,各粒径组悬移质含沙量 S_L ,推移质输沙率 $g_{\rm b,L}$,紊动能 k 及其耗散率 ε . 对于 非恒定流,需要给定这些变量随时间变化的过程. $U_{\rm m}$, S_L 和 $g_{\rm b,L}$ 可根据实测值给定;k 和 ε 可按参考文献[10] 的方法进行计算. 由于所研究河段出口处位于突缩段,各种水力要素变化较为剧烈,如果直接应用充分发展边界条件,会导致计算过程不稳定.为了应用充分发展条件,在所研究河段出口处人为添加了一段长约80m的顺直段,可以看成是原出口边界沿其外法线方向平移得到.这样,新的出口边界位于各种水力要素变化较为平缓的顺直河道,在出口处除给定水位z的过程值外,其余水力要素均按充分发展边界条件处理.

壁面边界采用壁面函数法来处理. 流速采用无滑移固壁边界条件, 即 u = v = 0.

3 数值模拟结果及分析

3.1 模拟区域及网格剖分

模拟区域为黄河上游从拟建的大柳树水库坝址以下到已 建的沙坡头枢纽坝址附近长约13.4 km的区域,共设置20个 实测断面,由5个弯道组成:弯道A(SH15—SH13),弯道B (SH13—SH11),弯道C(SH11—SH7),弯道D(SH7—SHJ2)和 弯道E(SHJ2—SH1),如图1所示.

在计算区域上采用均分网格,沿水流方向(ξ方向)布置 161个节点,河宽方向(η方向)布置 31个节点,共计 161×31 = 4 991 个网格节点,160×30 = 4 800 个网格单元.

3.2 初始条件和边界条件



为了验证数值模拟结果并对数值模拟结果进行比较分析,本文就两种典型工况分别进行了数值模拟.工况1的进口断面平均流速为1.54 m/s,k为0.026 9 m²/s², ε 为0.001 3 m²/s³,出口边界水位为1 240.65 m; 工况2 的进口断面平均流速为2.06 m/s,k为0.049 2 m²/s², ε 为0.002 0 m²/s³,出口边界水位为1 242.00 m.

进口断面悬移质泥沙按粒径分3组,其代表粒径分别为0.01,0.05和0.25mm,其含量百分比(粒径级 配)分别为38%,53%和9%. 悬移质泥沙的中值粒径为0.0249mm. 初始河床高程选用2008年12月的实测结果. 现按粒径大小将床沙分为6组,初始时刻代表粒径分别为0.01,0.05,0.25,2.00,10.00和40.00mm,含量百分比(级配)分别为0.2%,3.8%,17.9%,12.7%,36.5%和28.9%.

3.3 数值模拟结果验证

模拟区域为断面 SH15 至 SH1 的整个河段区域,模拟时段从 2008 年 12 月 6 日至 2009 年 7 月 17 日,共 计 224 d. 在该时段始末,分别对该河段进行了实测,以对数值模拟结果进行对比分析. 时段始末的流量分别 为 513.5 和 833.7 m³/s,进口断面平均流速分别为 1.04 和 1.19 m/s, 悬移质含沙量分别为 0.51 和 3.53 kg/m³,出口边界水位分别为 1 239.68 和 1 240.10 m.数值模拟时,关于水流和泥沙模块的计算采用半 耦合算法,计算结果与 2009 年 7 月 17 日的实测结果进行对比.关于水流模块已在文献[4]中进行了相应验 证及对比分析. 这里仅验证泥沙模块.图 2 给出了断面 SHJ5 和 SH6 处河床高程的比较.





断面 SHJ5 位于弯道 C 的弯顶,其左岸(凸岸)附近河床淤积,右岸(凹岸)附近河床冲刷. 断面 SH6 位于 弯道 D 的弯顶处,断面不同位置处均出现不同程度的淤积,其右岸(凸岸)附近淤积量较大,左岸(凹岸)附近 淤积量较小,河道中心线附近淤积量最大.

3.4 不同工况下河床变形数值模拟结果分析

图 3 给出了工况 1 和 2 条件下在不同进口含沙量(分别为 0.51,3.53,10.00 和 20.00 kg/m³)下经过 10 d 后的河床高程.在工况 1 条件下,当进口含沙量较小(0.51 kg/m³)时,各断面出现微量冲刷,但由于冲刷厚度较小,河床高程与初始河床高程近似重合.当进口含沙量较大(大于 3 kg/m³)时,河床呈不同程度的 淤积状态,且随着进口含沙量的增大,淤积厚度有所增加.断面 SH10 中,主流线、深泓线及最大含沙量均位 于弯道中心线附近,一般来说,在深泓线附近淤积量较大;断面 SHJ5 中,深泓线、主流线靠近凹岸,但最大含 沙量靠近弯道中心线附近,与深泓线并不重合,淤积主要发生在凸岸附近.





工况2条件下当进口含沙量为0.51 kg/m³时,各断面均出现程度不同的冲刷,其中断面SH10在河道中 心线附近的河床冲刷厚度近10 cm,其他断面河床冲刷厚度较小,接近冲淤平衡状态;当进口含沙量为 3.53 kg/m³时,断面SH10处河床出现冲刷,断面SHJ5处河床为淤积.当含沙量较大(不小于10 kg/m³)时, 各断面含沙量也相应较大,在4个断面处均出现程度不同的淤积.含沙量越大,淤积越大.当含沙量为 10 kg/m³时,断面SHJ5河床最大淤积厚度为1m左右,而断面SH10的最大淤积厚度不足0.5 m;当进口含沙 量为20 kg/m³时,断面SHJ5河床最大淤积厚度均超过2 m,断面SH10处河床最大淤积厚度约为1.6 m.

3.5 推移质和悬移质运移产生的河床变形分析

本文所建立的平面二维全沙模型包含悬移质和推移质运移所引起的河床变形.为了反映悬移质和推移 质运移对河床变形的影响程度,现将2种典型工况下当进口悬移质含沙量均为3.53 kg/m³时,经过10 d的 河床冲淤变形,各断面在主流线处悬移质和推移质引起的河床冲淤厚度计算值进行比较(表1).可见,在工

m

况1条件下,由于流量较小,推移质引起的河床冲淤厚度较小,可以忽略不计.在工况2条件下,推移质输沙 率较大,这时推移质引起的河床变形相对较大,在一些断面处(如SH12),其冲淤厚度已接近悬移质泥沙引 起的冲淤厚度.

综合上述分析,可以得到这样的结论,在大柳树—沙坡头河段水沙运移数值模拟中,当流量较小(如小于1500 m³/s)时,可以忽略推移质泥沙引起的河床变形,对计算结果不会产生较大影响.但当流量较大时(如超过2000 m³/s),则应同时考虑悬移质和推移质运移引起的河床变形.

						5	1			
1	断面	工况 1		工况 2		断面	工况 1		工况 2	
	编号	推移质	悬移质	推移质	悬移质	编号	推移质	悬移质	推移质	悬移质
	SH15	0.003 9	-0.060 4	0.001 9	-0.140 5	SHJ5	0	0.5007	0.003 5	0.040 9
	SH12	-0.000 5	0.204 4	0.1257	-0.182 6	SH5	0	0.013 8	0.000 8	0.033 2
	SH10	0	0.5219	0.004 0	-0.102 8	SH1	0.0017	-0.079 5	0.0027	-0.052 6

表1 推移质和悬移质引起的河床冲淤厚度

Bed-deformation caused by bed load and suspended load

3.6 悬移质含沙量沿程分布比较

Tab 1

图 4 给出了 2 种典型工况下悬移质含沙量及各粒径组悬移质含沙量沿河道主流线分布.可以看出,无论 总体悬移质含沙量,还是分组含沙量,在 2 种工况下沿程均呈下降趋势.

在工况1条件下,含沙量沿主流线先升高,到断面 SH13 和 SH12 附近达到最大值,然后迅速下降,至断面 SH6 后趋于平缓. 一般而言,在流速较大的断面,含沙量也较大. 断面 SH13 和 SH12 附近河道比较窄深, 流速较大,水流挟沙力较大,因而含沙量也相应较大. 而断面 SH6 之后的河段,平均流速仅为断面 SH13 和 SH12 处流速的 1/3,水流挟沙力很小,因而含沙量也相应较小. 工况2条件下,水流进口含沙量为20 kg/m³, 大于断面 SH13 和 SH12 处的水流挟沙力,因此,工况1条件下含沙量在进口断面到断面 SH12 附近没有出现上升趋势,而是总体呈下降趋势,直到断面 SHJ1 处(靠近出口的倒数第2个断面),含沙量才开始上升. 这是因为出口断面 SH1 处的平均流速大于 SHJ1 处,相应水流挟沙力也较大. 分组含沙量中,第2粒径组(*d*=0.05 mm)的含沙量最大,其次是第1粒径组(*d*=0.01 mm),第3粒径组(*d*=0.25 mm)的含沙量最小,这与进口悬移质泥沙级配基本一致.



Fig. 4 Grouped suspended load concentration distribution along the main stream line

4 结 语

本文利用修正的平面二维 RNG k-ε 紊流泥沙数学模型,对黄河上游大柳树—沙坡头河段连续弯道的泥 沙运移及河床变形进行了平面二维数值模拟.通过数值模拟结果和实测结果的对比,反映了所建立水沙数学 模型的合理性. 在两种典型工况下,计算并分析了由悬移质和推移质运移引起的河床变形及各粒径组悬移 质含沙量沿程分布等. 结合关于水流模块与泥沙模块的分离式算法和耦合式算法的优点,建立了半耦合式 算法,计算精度上高于分离式算法,而计算时间上比耦合式算法有所减小.

参考文献:

- [1] 窦国仁,赵世清,黄亦芬.河道二维全沙数学模型的研究[J].水利水运科学研究,1987(2):1-12. (DOU Guo-ren, ZHAO Shi-qing, HUANG Yi-fen. Study on two-dimensional total sediment transport mathematical model[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1987(2):1-12. (in Chinese))
- [2] 黄远东,张红武,赵连军,等.黄河下游平面二维非恒定输沙数学模型[J].水动力学研究与进展:A辑,2003,18(5):
 638-646. (HUANG Yuan-dong, ZHANG Hong-wu, ZHAO Lian-jun, et al. A two-dimensional mathematical model for unsteady sediment transport in the Lower Yellow River[J]. Journal of Hydrodynamics(SerA), 2003, 18(5): 638-646. (in Chinese))
- [3] DUAN J G, JULIEN PY. Numerical simulation of meandering evolution [J]. Journal of Hydrology, 2010, 391: 34-46.
- [4] 景何仿,李春光. 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[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31 (4): 61-64. (JING He-fang, LI Chun-guang. Two-dimensional numerical simulation of flow motion in typical bends of Daliushu-Shapotou reach of Yellow River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(4): 61-64. (in Chinese))
- [5] 王光谦, 张红武, 夏军强. 游荡型河流河床演变及模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (WANG Guang-qian, ZHANG Hong-wu, XIA Jun-qiang. Wandering river deformation and numerical simulation [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [6] 朱庆平, 芮孝芳. 基于 GIS 的黄河下游二维水沙数学模型水沙构件设计[J]. 人民黄河, 2005, 27(3): 44-46. (ZHU Qing-ping, RUI Xiao-fang. Design of flow and sediment components in the 2D sediment mathematical model about the Lower Reach of the Yellow River based on GIS[J]. Yellow River, 2005, 27(3): 44-46. (in Chinese))
- [7] 钱意颖,曲少军,曹文洪,等. 黄河泥沙冲淤数学模型[M]. 郑州:黄河水利出版社, 1998. (QIAN Yi-ying, QU Shaojun, CAO Wen-hong, et al. Sediment mathematical models of the Yellow River[M]. Zhengzhou: The Yellow River Conservancy Publishing House, 1998. (in Chinese))
- [8] HAYASE T, HUMPHREY J A C, GREIF G. A consistently formulated QUICK scheme for fast and stable convergence using finite volume iterative calculation proceeding[J]. Journal of Computational Physics, 1992, 98: 108-118.
- [9] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995. (TAO Wen-quan. Numerical heat transformation[M]. Xi' an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995. (in Chinese))
- [10] KANG H, CHOI S U. Reynolds stress modeling of rectangular open-channel flow [J]. Int J Numer Meth Fluids, 2006, 51: 1319-1334.

Two dimensional numerical simulation of the sediment transport in Daliushu-Shapotou reach of the Yellow River

LI Chun-guang, JING He-fang, LV Sui-ju, ZHOU Bing-wei

(Research Institute of Numerical Computation and Engineering Applications, North University for Nationalities, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Being located in Ningxia Hui Autonomous Region and composed of five bends, the Dalushu-Shapotou reach of the Yellow River has complex topography. The developed and modified two dimensional RNG k- ε turbulence closure model is used to simulate the flow and sediment transport in the reach. Total load mathematical model is adopted, in which the bed deformations caused by various fractions of the particle size of suspended load and bed load are considered. The numerical result and the measured data are compared and analyzed, indicating that the model can be used to simulate flow and sediment transport in natural rivers with continuous bends. In addition, on the basis of the coupled and separated algorithms about flow and sediment modules, a semi-coupled algorithm is developed, which needs less calculation time than the coupled algorithm, and is more accurate than the separate algorithm.

Key words: sediment transport; total load mathematical model; numerical simulation; continuous bends