黄河内蒙河段水流数值模拟研究

罗全胜^{1,2}, 许新勇³

(1. 小流域水利河南省高校工程技术研究中心,河南开封 475003;2. 黄河水利职业技术学院,河南开封 475003;3. 华北水利水电大学,河南郑州 450045)

摘要:针对黄河内蒙河段孔兑较多、洪水变幅较大、水文监测站点较少的实际情况,采用数值模拟方法,建立了 内蒙河段水流数学模型,通过对模型的验证及孔兑入汇计算结果的分析,表明该模型可以真实反映内蒙河段孔 兑入汇的流态及相关水力要素变化,可以作为该河段河道规划整治的研究手段之一。黄河内蒙河段孔兑的大 流量入汇会对干流区的流态以及水位产生明显影响,使流向改变、水流上滩、水位壅高,因此区域防洪规划和河 道整治中应予以高度重视。考虑到内蒙河段孔兑入汇干流带来的影响,不仅体现在水流形态上,而且泥沙淤积 是河床演变的关键所在,加之短时段内又难以模拟水流的高含沙量过程,所以下一步工作将是在现有水流模拟 基础上模拟计算含沙水流过程。

关 键 词: MIKE21; 数学模型; 黄河内蒙河段; 水流运动; 孔兑; 人汇; 干流 中图分类号: P338 **文献标志码**: A **文章编号**: 1009-640X(2014)05-0095-05

孔兑众多、入汇过程变化较大是黄河内蒙河段的一大特点,内蒙河段河道整治必然要考虑孔兑入汇的影响^[1]。同时,黄河内蒙河段水文观测工作比较薄弱、基本资料比较欠缺也给系统研究内蒙河段、开展河道整治工作带来困难^[2]。针对孔兑众多、水文观测资料相对缺乏的问题,本文采用数学模型工具,根据内蒙河段 实际情况,建立了内蒙河段水流数学模型,同时,采用该模型对内蒙河段局部孔兑入汇对干流的影响进行计算分析,为河道整治提供技术支持和借鉴。

1 模型的建立及相关问题处理

1.1 控制方程及定解条件

数值模拟中采用如下二维浅水控制方程组:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h u}{\partial x} + \frac{\partial h v}{\partial y} = hS \tag{1}$$

$$\frac{\partial h\overline{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\overline{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h \overline{vu}^2}{\partial y} = f\overline{v}h - gh\frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial Pa}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial x} +$$
(2)

$$\frac{\tau_{sx}}{\rho_{0}} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_{0}} - \frac{l}{\rho} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + hu_{s}S$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^{2}}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_{0}}\frac{\partial Pa}{\partial y} - \frac{gh^{2}}{2\rho_{0}}\frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_{0}} - \frac{\tau_{by}}{\rho_{0}} - \frac{l}{\rho_{0}} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_{s}S$$
(3)

式中:t为时间;x,y,z为右手 Cartesian 坐标系;η为水面相对于未扰动水面的高度即通常所说的水位;h为静

收稿日期: 2014-03-10

作者简介:罗全胜(1970-),男,河南南阳人,副教授,硕士,主要从事水利水电工程教学与研究工作。 E-mail: 632818624@qq.com 止水深;u,v分别为流速在x,y方向上的分量;Pa为当地大气压; ρ 为水密度; ρ_0 为参考水密度;f为 Coriolis 参量;fv和fu为地球自转引起的加速度; $S_{xx}, S_{yy}, S_{yx}, S_{yy}$ 为辐射应力分量; $T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$ 为水平黏滞应力项; S为源汇项, (u_s, v_s) 源汇项水流流速。

本次计算并未考虑地球自转引起的加速度及源汇项。离散方法采用单元中心的有限体积法求解。模型 采用非结构三角形网格元,更有利于拟和复杂边界。利用干湿网格判断法处理移动边界,方便快捷。

(1)边界条件。开边界: $\eta_r = \eta_r(t)$ 或 $\bar{u}_r = \bar{u}_r(t)$ 或 $\bar{v}_r = \bar{v}_r(t)$,其中: $\eta_r, \bar{u}_r, \bar{v}_r$ 为开边界 r 上已知水位、流 速过程。闭边界: $\bar{u}=0$ 或 $\bar{v}=0$

(2)进口边界条件。进口开边界采用上游来流过程:Q(t)=Q_{in}(t),Q_{in}为开边界上流量。

出口边界条件采用下游的水位或水位-流量关系确定,本文采用水位。

陆地边界:根据流体固壁不可穿越的原理,在不考虑渗流的情况下,可以认为陆地边界上法向速度为零; 根据水流无滑动原理,水体在陆地边界上的切向流速也应为零^[3-5]。

(3)初始条件为 $\eta(x,y,t)|_{t=t_0} = \eta_0(x,y), \overline{u}(x,y,t)|_{t=t_0} = 0, \overline{v}(x,y,t)|_{t=t_0} = 0,$ 其中: η_0 为计算初始时刻 水位空间分布函数.

1.2 计算河段及网格划分

选取三湖河口至昭君坟河段为典型河段,该河段为过渡型河段,河长 126.4 km,河宽 2 000 ~7 000 m,平 均宽约 4 000 m,主槽宽 500 ~900 m,平均宽约 710 m,河道纵比降为 0.12‰,弯曲率 1.45。采用三角形网格 对计算区域进行剖分(见图 1(a))。根据地形高程数据内插网格节点高程,生成三维地形如图 1(b)所示。 其中,孔兑沟槽地形直接参照地形散点数据差值获得。







1.3 糙率系数的选取及动边界处理

糙率系数实际上是一个综合系数,它反映了河道水流阻力、河道平面形态变化、河道地形概化等多个因素,本文中的糙率系数由实测水文资料反求,并根据局部地形,按单元分块调试^[6]。

采用"切削"技术,即将露出单元的河床高程"切削"降至水面以下,并预留薄水层水深,同时更改其单元的糙率(n取10的量级),使得露出单元 u,v 计算值自动为0,以保证数模计算的连续和正常进行。此方法可以较好体现不同流量、边界位置的变化。

2 模型验证

模型参数率定参照内蒙河段物理模型试验资料进行,采用三湖河口1594 m³/s恒定流量下的水位与物理模型水位观测资料的比较,经比选后确定河槽糙率 n = 0.013,滩地糙率取 n = 0.02 ~ 0.03。选取沿程5个测点(测点位置见图2),数模计算结果与物模试验结果水位





对比如表1所示。5个测点两种模型水位结果的差值最大0.131m,结果吻合较好,符合水力计算规范要求。

在此基础上,选用较小流量 632 m³/s 和较大流量2 100 m³/s的来流作为验证方案,验证结果(见表1)表明,两种流量下水位的最大差值为0.140 m。在不同水位或流量下,各个水位观测点的数学模型试验结果与物理模型试验结果吻合较好,这表明该模型对模拟区域流场阻力是比较合适的。

$Q = 1594 \text{ m}^3/\text{s}$				$Q = 632 \text{ m}^3/\text{s}$			$Q = 2 \ 100 \ \mathrm{m^3/s}$		
测针位置	物模水位	数模水位	差值	物模水位	数模水位	差值	物模水位	数模水位	差值
三湖河口	1 018.675	1 018.59	0.085	1 016.464	1 016.59	0.126	1 018.675	1 018.59	0.085
208 险工	1 017.411	1 017.28	0.131	1 015.157	1 015.28	0.123	1 017.411	1 017.28	0.131
乌兰十队	1 010.906	1 010.96	0.054	1 007.989	1 007.96	0.029	1 010.906	1 010.96	0.054
打不素	1 007.720	1 007.59	0.130	1 005.477	1 005.59	0.113	1 007.730	1 007.59	0.140
三岔口险工	1 006.626	1 006.75	0.124	1 003.927	1 003.79	0.137	1 006.626	1 006.75	0.124

表 1 内蒙河段数模水位与物模水位比较 Tab. 1 Comparison between stages adopted by numerical model and physical model for Inner Mongolia reach

3 模型应用

采用孔兑入汇流态计算分析作为模型应用的实例。选取 1989 年 7 月发生的洪水过程,"89.7 洪水"毛 不拉孔兑和西柳沟同时发生洪水入汇,毛不拉孔兑洪峰流量为 5 600 m³/s,西柳沟洪峰流量为 6 600 m³/s,此 次洪水两大孔兑都具有峰高流急、陡涨陡落、历时很短的特性,具有支流孔兑的一般特性^[7],同时又具有极 强的灾害性,是有实测水文资料以来最不利的情况。模型计算采用概化的"89.7 洪水",孔兑采用的流量过 程如表 2 所示,交汇时干流流量采用 800 m³/s,下边界采用出口断面的水位流量关系。

表 2 干支流流量组合

al	o. 2	Disc	harge	of	mainstream	and	brancl	ł
----	------	------	-------	----	------------	-----	--------	---

Т

历时/ min	毛不拉流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	西柳沟流量/(m ³ ⋅s ⁻¹)	历时/ min	毛不拉流量/(m ³ ·s ⁻¹)	西柳沟流量/(m ³ ⋅s ⁻¹)
$0 \sim 6650$	0	0	6 930 ~ 7 070	2 500	3 000
$6\ 650 \sim 6\ 800$	1 200	1 500	7 070 ~ 10 690	2 500	0
6 800 ~ 6 930	5 600	6 600			

3.1 支流洪水对干流水位的影响

毛不拉孔兑洪峰汇入干流时水位的变化如图3所示,图中正值表示水位升高,偏于蓝色部分表示水位升高幅度不大,偏于黄色青色部分说明水位升高幅度大,干流水位最大变化量为2.19m。在入汇的开始时刻, 交汇口附近上下游的水位变化最为明显,交汇口门水位急剧增大给防洪带来很大压力。

以毛不拉孔兑入汇口门处为坐标原点,设沿河道向上游为负,向下游为正,并取不同时刻分别绘制入汇 区水面线如图4所示。图中横坐标是沿河道距离入汇口门处长度。以50min为一个时间段,分别提取第 133时刻、135时刻、138时刻、146时刻、166时刻水位计算结果,绘制出5条不同时刻的毛不拉孔兑入汇口 门区域水面线。由图4可以看出:(1)133时刻支流入汇还未发生,干流流量为800m³/s。(2)135时刻支流 入汇洪水开始进入干流,并引起干流入汇口门处水位抬高。此时上游受入汇水流顶托作用尚不明显,形成壅 水区域不大,壅水高度也不大。(3)138时刻支流入汇洪峰到达干流,干流入汇口门处水位达到最大值,并且 上游水位受到洪峰的顶托作用,水位壅高达到最大值,影响范围也达到最大。(4)在146时刻、166时刻过程 中,洪峰逐渐传播到下游,入汇洪峰的影响逐渐减弱,入汇口门附近水位逐渐下降到入汇前状态。(5)距入 汇口门上游约9000m处,所有时刻的水位基本一致,说明毛不拉孔兑洪峰入汇对上游干流的顶托影响范围 在距入汇口门上游约9000m处。

m



Fig. 3 Stage change before and after inflow flood of Maobula



Fig. 4 Water surface profile change during inflow flood of Maobula

3.2 支流洪水对干流流场的影响

毛不拉孔兑入汇洪峰流量为5600 m³/s,是干流流量800 m³/s的7倍,孔兑入汇水流具有"峰高流急,洪水陡涨陡落,历时很短"的特点。在毛不拉孔兑入汇区,由于洪峰水流入汇状态下的水力条件与原干流小流量下水力条件相比发生了很大变化,流场也随之发生变化。没有支流入汇情况下,干流在800 m³/s流量下水流都在主槽里。

在有支流洪峰入汇时,计算得入汇区域流场见图 5 所示,分析流速分布可见:(1)洪峰入汇后分为 3 个 流带,支流河槽 1 个流带,两侧滩地各有 1 个流带,两侧滩地的水流最终汇入干流。(2)由于支流洪水对干 流上游的顶托作用,上游来流在入汇口门上游附近从左岸上滩。(3)支流右侧滩地水流在入汇口下游附近 并入干流,此后该区域水流从干流左岸滩地上滩并趋向大堤。

为反映支流入汇区域流场的变化情况,以入汇区流速变化增量为指标,绘制出入汇区流速改变增量的分布(见图 6)。图中蓝色--红色变化区域表示流速增加区(正值),蓝色--紫色变化区域表示流速减小区(负值)。由图可以清楚看出毛不拉孔兑入汇水流使入汇口下游水流流速普遍增大,流速增加最大值为1.67 m/s;入汇水流的顶托作用使入汇口上游水流流速减小,流速减小最大值为1.05 m/s。





Fig. 6 Velocity field change caused by Maobula flood inflow into mainstream

4 结 语

本文运用 MIKE21 软件,根据黄河内蒙河段的实际情况建立了水流数学模型。通过对模型的验证以及 孔兑入汇计算结果的分析表明,该模型可以真实反映内蒙河段孔兑入汇的流态以及相关水力要素变化,可以 作为该河段河道规划建设的研究手段之一;内蒙河段孔兑的大流量入汇会导致干流区的流态以及水位发生 明显改变,流向改变、水流上滩、水位壅高是其直接结果,区域防洪规划和河道整治中应对此情况予以重视。

内蒙河段孔兑入汇对干流的影响不仅体现在水流形态上,泥沙淤积更是河道演变的关键所在,短时段高 含沙量过程的模拟是其中难点,在下一步的工作中将在现有水流模拟基础上实现对含沙水流过程的计算模拟。

参考文献:

- [1] 侯志强,王义安,陈一梅. 支流入汇对干流航道影响分析[J]. 现代交通技术, 2006(4): 70-73. (HOU Zhi-qiang, WANG Yi-an, CHEN Yi-mei. Influence on main waterway because of the confluence of branches [J]. Modern Transportation Technology, 2006(4): 70-73. (in Chinese))
- [2] 刘同宦, 王协康, 郭炜, 等. 支流水沙作用下干流床面冲淤特征试验研究[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(2): 9-12.
 (LIU Tong-huan, WANG Xie-kang, GUO Wei, et al. Experimental research and study on the characteristics of scouring and silting of river bed under action of branch [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research, 2006, 23(2): 9-12. (in Chinese))
- [3] 陈月华. 干支流交汇河段水流特性计算研究[D]. 南京:南京水利科学研究院, 2007. (CHEN Yue-hua. Calculation and research on flow characteristics in the confluences section [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007. (in Chinese))
- [4] 苗风清, 王晓星, 张光庆, 等. 黄河内蒙段治理"悬河"的新思路-水沙置换[J]. 内蒙古水利, 2010(1): 13-15. (MIAO Feng-qing, WANG Xiao-xing, ZHANG Guang-qing, et al. Regulation of "perched river" reach of the Yellow River in Inner Mongolia—new idea of water and sediment exchange[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2010(1): 13-15. (in Chinese))
- [5] 龙虎, 杜宇. 黄河宁蒙段河道淤积和萎缩及其对凌汛的影响[J]. 人民黄河, 2007, 29(3): 25-26. (LONG Hu, DU Yu. The Yellow River siltation and atrophy and its influence on the ice flood within Ningxia and Mongolia reach[J]. Yellow River, 2007, 29(3): 25-26. (in Chinese))
- [6] 冯国华,朝伦巴根,高瑞忠,等. 黄河内蒙古段防凌对策研究[J]. 水文, 2009, 29(1): 47-49. (FENG Guo-hua, CHAOLUN Ba-gen, GAO Rui-zhong, et al. Research on ice flood control strategy for Inner Mongolia reach of the Yellow River [J]. Hydrology, 2009, 29(1): 47-49. (in Chinese))
- [7] 陈飞. 黄河内蒙河段支流入汇对干流影响的数值模拟研究[D]. 郑州: 华北水利水电学院, 2012. (CHEN Fei. Numerical simulation of influence by tributary inflow on the main stream of the Yellow River in Inner Mongolia[D]. Zhengzhou: Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2012. (in Chinese))

Flow numerical simulation for Inner Mongolia reach of the Yellow River

LUO Quan-sheng^{1,2}, XU Xin-yong³

 University Engineering Technology Research Center of Small Watershed Conservancy of Henan Province, Kaifeng 475003, China;
 Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475003, China;
 North China University of Water Resources and Electronic Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: In the light of the real conditions of Inner Mongolia reach of the Yellow River, a mathematical model is established based on the case of the flood variation, tributaries, and insufficient hydrologic monitoring stations. The confluence analysis and calculation results show that the numerical model can truely reflect the flow regime in the Inner Mongolia river reach from the tributaries and the related changes in hydraulic elements, which can be used as one of the research methods for regalation of this river reach. The large inflow discharge from the tributaries in Inner Mongolia into the mainstream of the Yellow River can give considerable influence on the flow regime and water level in the mainstream zone, and result in changes in flow direction, water flow over the beach, rise of stage, so those problems concerned should be paid much attention to and be taken into account in the regional flood control planning and river regulation. Considering the tributary inflow into the mainstream of the Yellow River in the Inner Mongolia reach has impacts not only on the flow pattern, but also on river channel process, it is difficult to simulate the flow process of high sediment concentration within a short period, so the next step is to simulate the process of sediment-laden flow on the basis of the existing flow.

Key words: MIKE21; mathematical model; Inner Mongolia reach of the Yellow River; water movement; tributaries; inflow; main stream

99