

黄河呼和浩特段水动力与降雨径流耦合模型的构建

冯利忠¹ 裴国霞^{1*} 吕欣格² 张琨² 王超² 赵文佳²

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古自治区环境科学研究院, 呼和浩特 010010)

摘要 针对目前黄河呼和浩特段污染日趋严重,没有合理、完善的水动力模型为流域水环境污染物迁移、扩散和降解模拟提供基础模型的问题,基于 MIKE11 水动力模块、降雨径流模块构建了黄河呼和浩特段水动力与降雨径流耦合模型,对黄河呼和浩特段降雨径流、水位、流量进行模拟分析,结果表明:降雨径流模型纳什系数 $E \leq 0.8$ 的占 2.19%, $E \leq 0.9$ 的占 7.39%,其余为 $E > 0.9$,相对误差 σ 为 0.04%~19.88%,黄河呼和浩特段水动力与降雨径流耦合模拟纳什系数 $E \geq 0.99$,相对误差 σ 为 0.23%~1.54%;01—06 月降雨径流量 0.46~8.36 m³/s,10 月达到全年最大值,为 26.16 m³/s;10 月之后呈线性下滑趋势,并到 12 月初出现急剧下降状态;头道拐、河口镇、喇嘛湾断面 02—03 月各断面温度开始逐渐回升,且具有一定的突变现象,水位和流量突变范围分别为 2.5~3.5 m 和 1 380~1 400 m³/s,04—12 月和 1 月黄河呼和浩特段水位和流量相对平稳,变化范围分别为 1.8~1.3 m 和 790~800 m³/s,并在 07—09 月出现了一年当中的丰水期,水位和流量最大值可达 988.6 m 和 1 162.5 m³/s。

关键词 黄河;河网构建;边界条件;降雨径流模型;水动力模型

中图分类号 TV 148

文章编号 1007-4333(2016)07-0113-08

文献标志码 A

Hydrodynamic and rainfall-runoff coupling model construction of the Yellow River at Huhhot

FENG Li-zhong¹, PEI Guo-xia^{1*}, LV Xin-ge², ZHANG Kun², WANG Chao², ZHAO Wen-jia²

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China;

2. Inner Mongolia Environment Sciences Academy, Huhhot 010010, China)

Abstract Aiming at the problem of water environment pollution of Yellow River at Huhhot, a hydrodynamic and rainfall-runoff coupling model of the Yellow River Hohhot section was constructed to simulate and analyze the rainfall-runoff, water level and discharge based on MIKE11 hydrodynamic and rainfall-runoff models. The results showed that: 1) 2.19% of the Nash-Sutcliffe coefficient of rainfall-runoff model were lower than 0.8, 7.39% were lower than 0.90, and the rest was more than 0.90. The relative error was ranged from 0.04% to 19.88%. The Nash-Sutcliffe coefficients of hydrodynamic and rainfall-runoff coupling model in the Yellow River at Hohhot was over 0.99 and its relative error was 0.23% - 1.54%; 2) From January to June, the rainfall-runoff discharge was 0.46 - 8.36 m³/s, and reached the maximum value in October, which was 26.16 m³/s. The linear declined after October, with a sharp fell in early December; 3) From February to March, the temperature of Toudaoguai, Hekouzhen and Lamawan sections began to rise gradually and displayed a mutation phenomenon. And the water level and discharge separately were 2.5 - 3.5 m and 1 380 - 1 400 m³/s, respectively. From April to December and January, the water level and discharge remained relatively stable, which were 1.8 - 1.3 m and 790 - 800 m³/s, respectively. From July to September, the high water season of a year appeared and the water level and discharge separately were 988.6 m and 1 162.5 m³/s respectively.

Keywords Yellow River; river network construction; boundary conditions; rainfall-runoff model; hydrodynamic model

收稿日期: 2015-06-30

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目(20130427); 国家自然科学基金项目(51169018, 51369021)

第一作者: 冯利忠, 博士研究生, E-mail: fenglizhong1@sina.com

通讯作者: 裴国霞, 教授, 博士生导师, 主要从事水环境与水污染控制研究, E-mail: peiguoxia@126.com

呼和浩特市位于东经 $110^{\circ}46' \sim 112^{\circ}10'$, 北纬 $40^{\circ}9' \sim 40^{\circ}57'$ 。黄河呼和浩特段干流长 160 km, 主要支流有大黑河、小黑河、水磨沟等, 流域面积 $1\,380.9\text{ km}^2$, 沟长 68.2 km, 年平均流量 $580 \sim 1\,600\text{ m}^3$, 年平均径流量 $0.5 \times 10^8\text{ m}^3$ 。黄河呼和浩特段沿线分布有规模不同的化学原料、化学品制造业、电力热力生产供应业和生物制药业等。黄河流域呼和浩特段经济结构复杂、城镇众多、产业类型多、规模大小不一、所排污染物成分复杂, 使得水环境存在诸多问题^[1]。研究水环境污染问题的基础是建立合理、完善的水动力模型, 随着数学模型模拟系统的发展, 各类分布式、半分布式水文模型如: 海洋水动力模型 ROMS、浅水风浪模型 SWAT、暴雨洪水模型 HEC-HMS 等在流域水动力模拟上得到了广泛应用^[2-4], 但此类模型需要大量的水文数据而且在边界条件及各类参数的选取及确定上都存在不同程度的缺失或偏差, 也无法充分考虑构筑物、降雨、渗流、蒸发、风力等地域性特征因素, 所建立的水动力模型无法体现不同河道及所在区域的特性。本研究基于黄河呼和浩特段实地状况, 充分考虑“引黄入呼取水口”构筑物、季节性风力因素、河道冲刷引起的不同断面特征、沿线高程比降、地域性降雨径流等因素, 旨在建立符合当地实际情况且系统化的黄河呼和浩特段水动力与降雨径流耦合模型; 通过率定、验证, 模拟出黄河呼和浩特段水位、流量等水动力状况, 以为该段水污染物的输移、扩散、转化预测提供有利依据。

1 模型介绍

黄河呼和浩特段河道宽 $700 \sim 1\,300\text{ m}$ 、河道长 160 km, 水深较浅 ($2 \sim 7\text{ m}$), 流速 ($1 \sim 3\text{ m/s}$) 和流量 ($220 \sim 1\,790\text{ m}^3/\text{s}$) 较大, 且基本按一维坐标变化, 所有的流线均彼此平行, 与流线正交方向上的垂直分速度趋于零。因此, 对黄河呼和浩特段水动力的模拟遵循一维渐变流假定原则^[5-6]。通过模型对比并结合黄河呼和浩特地区特性及所考虑的特征因素, 选用丹麦水力研究所 (DHI) 研制的一维水动力 MIKE11 模拟程序构建黄河呼和浩特段水动力与降雨径流耦合模型^[7-8]。

1.1 MIKE11 简介

MIKE11 主要包括降雨径流模块 (NAM)、水动力模块 (HD)、对流扩散模块 (AD)、水质模块 (EcoLab) 等^[9]。本研究利用水动力模块 (HD) 和降

雨径流模型 (NAM) 的耦合模型对黄河呼和浩特段进行水动力模拟。

1.2 基本原理

1.2.1 水动力模块 (HD)

MIKE11 水动力模块 (HD) 中所描述的水流运动规律基于圣维南方程组^[10]:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{aQ^2}{A} \right) + Ag \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{Q | Q |}{C_k^2 R_h A} = 0 \quad (2)$$

式中: A 为断面面积, m^2 ; Q 为断面水流量, m^3 ; t 为水流流经断面时间, s ; x 为距离坐标, m ; Z 为水位, m ; q 为旁侧入流, m^3 ; R_h 为水力半径, m ; C_k 为谢才系数, $\text{m}^{1/2}/\text{s}$; a 为动量校正系数。利用 Abbott 六点隐式差分格式对方程 (1) 和 (2) 进行求解^[11-12]。

方程 (1) 为连续方程, 反映了河道中水量平衡; 方程 (2) 为运动方程, 第一项反映某固定点局地加速度、第二项反映对流加速度、第三项反映水深压力、第四项反映摩阻和底坡影响。

1.2.2 降雨径流模块 (NAM)

降雨径流模型通过连续计算积雪储水层、地表储水层、土壤或植物根区储水层、地下水储水层之间相互影响的储水层含水量来模拟产汇流过程^[13-14], 并与水动力模型进行耦合, 从而可以模拟出叠加降雨、渗流、蒸发后的黄河呼和浩特段水位、流量、流速等的水动力计算结果。

1.3 构筑物处理

1.3.1 “引黄入呼”取水口

黄河呼和浩特段 146.36 km ($x=77.648\text{ km}$, $y=4\,370.780\text{ km}$) 处设有“引黄入呼”取水口, 取水口属于河床式取水构筑物的进水部分。经实地调查, “引黄入呼”取水口位于河道岸边, 利用泵进行抽取, 取水量约 $3\text{ m}^3/\text{s}$, 为保证取水, 在水深低于 1.7 m 时需清挖淤泥, 总体上要保证当水位最低时也能使水源进入取水口泵房。

黄河呼和浩特段流量为 $220 \sim 1\,790\text{ m}^3/\text{s}$, 水深为 $2.4 \sim 5.0\text{ m}$, 基准高程 966 m , 基本可以满足“引黄入呼”取水口的正常取水, 且流量远大于取水量, 水深也可满足最低取水要求, 因此, “引黄入呼”取水口所取水量不会对黄河造成较大影响。结合 MIKE11 水动力模型与“引黄入呼”取水口的实际情况, 并为了保证模型运行的稳定性, 将“引黄入呼”取水口设置为开边界, 恒定出流约 $3\text{ m}^3/\text{s}$ 。

1.3.2 黄河大桥

黄河呼和浩特段上横跨的黄河大桥桥墩长约 5.5 m,宽约 4 m,经查阅有关文献和实地勘察,桥墩对水流的阻力影响约为 0.02~0.2 m/s^[15],但该段流速约 1.5 m/s,大于最大影响力 6 倍以上。所以,黄河大桥桥墩对黄河呼和浩特段水动力条件影响极小,此构筑物不予以考虑。

2 模型构建

2.1 河网构建

所构建的黄河呼和浩特段水动力与降雨径流耦合模型河网以河道特征等实际情况为主,并结合河网概化原则:将相近的、面积较小的支流进行合并;将除洪水期外平时流量较小的、甚至干涸的大比降支流不予以考虑。河流沿线走向依据黄河流域内蒙古段水系图、Google 地图及目前河道实际情况进行综合绘制。构建后的黄河呼和浩特段河网主要包括 1 条黄河

主干流及大黑河、哈拉沁沟、水磨沟和什拉乌素河 4 条支流,总计分布有 595 个概化点^[16-17](图 1 和表 1)。

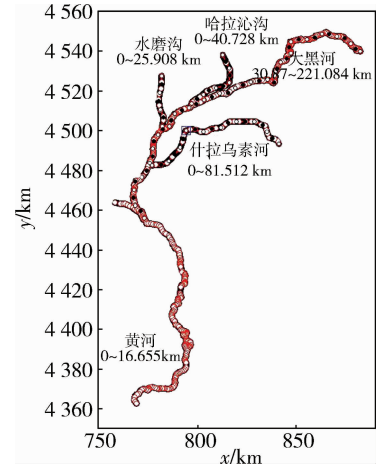


图 1 黄河呼和浩特段河网构建

Fig.1 Construction of hydro networks of the Yellow River at Huhhot

表 1 黄河呼和浩特段河网衔接信息

Table 1 Information of hydro networks cohesion of the Yellow River at Huhhot

河道名称 Branch name	上游里程/km Upstream	下游里程/km Downstream	下游河道 Downstream branch	下游连接里程/km Downstream connect chainage
黄河呼和浩特段	0	160.66	黄河呼和浩特段	0
大黑河	30.87	221.08	黄河呼和浩特段	16.56
哈拉沁沟	0	40.73	大黑河	148.66
水磨沟	0	25.91	大黑河	164.47
什拉乌素河	0	81.51	大黑河	187.87

2.2 断面选取

将黄河呼和浩特段河道的端点和河道与河道之间的交点设置为节点,两个节点之间的河道称为河

段。每条河段设置 1~2 个断面^[18],构建后的断面包括:头道拐、河口镇(表 2)和喇嘛湾 3 个干流断面,大黑河、哈拉沁沟、水磨沟和什拉乌素河 4 个支流断面。

表 2 河口镇断面概化

Table 2 Simplified section of Hekou Town

断面要素 Section elements	河道左岸 Left bank of river				河道最低点 Lowest of river		河道右岸 Right bank of river			
河宽/m River width	0	55.5	340	480	530	540	580	684.3	768	
断面高程/m Section height	989.57	989.12	985.43	984.93	984.03	984.23	984.23	987.79	992.6	

2.3 边界条件确定

构建后的大黑河、哈拉沁沟、水磨沟、什拉乌素河4条支流上游均与黄河呼和浩特段总干流衔接

(表3),黄河呼和浩特段上游设置为流量边界,下游设置为水位边界,从而使水量在干流与支流的整体传输过程保持水量平衡^[19]。

表3 黄河呼和浩特段水动力模型边界设置

Table 3 Hydrodynamic boundary setting of the Yellow River at Huhhot

河道名称 Branch name	所在河道里程/km River chainage	边界类型 Boundary type	边界所用数据类型 Data type used by the boundary	取值范围 Value range
黄河呼和浩特段	0	开边界	流量	141~1 820 m ³ /s
水磨沟	0	开边界	流量	0.001~12.500 m ³ /s
哈拉沁沟	0	开边界	流量	0.032~0.570 m ³ /s
大黑河	30.87	开边界	流量	0.001~1.440 m ³ /s
什拉乌素河	0	开边界	流量	0.001~1.070 m ³ /s
黄河	799.63	开边界	水位	968.44~970.06 m

2.4 水文资料收集

利用2003—2010年头道拐、河口镇、喇嘛湾、大黑河、哈拉沁沟、水磨沟和什拉乌素河断面的流量、水位、风力、降雨、蒸发等统计资料作为黄河呼和浩特段水动力与降雨径流耦合模型的初步率定数据;利用《黄河流域(内蒙古段)水环境风险调查及防范措施研究》项目中的水文资料作为黄河呼和浩特段水动力与降雨径流模型模拟的主要数据源,并选取2011和2012年逐年逐月的水文资料作为水动力及降雨径流参数率定数据,选取2013年逐年逐月的水文资料作为耦合模型率定结果检测数据。

2.5 模型精确性评估

为了使水动力与降雨径流耦合模型的模拟结果可以较为客观的表达出黄河呼和浩特段流量和水位等实际情况,利用纳什系数(式(3))判断出模型质量的可信程度,利用相对误差(式(4))定量计算出模型模拟误差。通过对模型进行纳什系数及相对误差的交互验证,从而定性和定量的分析黄河呼和浩特段水动力与降雨径流耦合模型的精确性^[20]。

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_t^o - Q_t^m)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_t^o - \bar{Q}_0)^2} \quad (3)$$

式中: Q_t^o 为观测值。 Q_t^m 为模拟值。 t 为时间点。 \bar{Q}_0 为观测值的平均值。 E 为纳什系数, E 值接近1,模型质量可信度高; E 接近0,模型质量总体可信; E 远远小于0,模型质量不可信。

$$\sigma = \frac{|L^t - L^m|}{L^t} \quad (4)$$

式中: L^t 为观测值; L^m 为模拟值; σ 为相对误差。

2.6 降雨径流模拟

通过对黄河呼和浩特段降雨径流模型中地表储水层含水量和根区临界值等参数的反复调试(表4),最终率定后的模型纳什系数 E 为0.13~0.99,其中 $E \leq 0.8$ 的占2.19%, $E \leq 0.9$ 的占7.39%,其余的 $E > 0.90$,相对误差 σ 为0.04~19.88%,说明该模型质量可信度高,模拟过程误差较小^[21]。

表4 黄河呼和浩特段降雨径流率定参数

Table 4 Rainfall-runoff parameter calibration of the Yellow River at Huhhot

参数名称 Parameter name	参数值 Parameter value
地表储水层最大含水量	11.4
根区储水层最大含水量	267
坡面流系数	0.355
壤中流系数	951.3
生成坡面流的根区临界值	28.8
生成壤中流的根区临界值	0.987
坡面流时间常数	0.989

由黄河呼和浩特降雨径流模型模拟结果(图2)可知,由于冬季降水极少和北方冻土等原因,01—03月降雨径流量为0.46~1.53 m³/s;随着春季开始降雨,土壤渗流系数增大,03—06月降雨径流量增加至1.11~8.36 m³/s;04—10月降雨径流量呈现线性增长态势,在10月达到全年最大值,为26.16 m³/s;10月之后呈线性下滑趋势,并到12月初出现急剧下降状态。

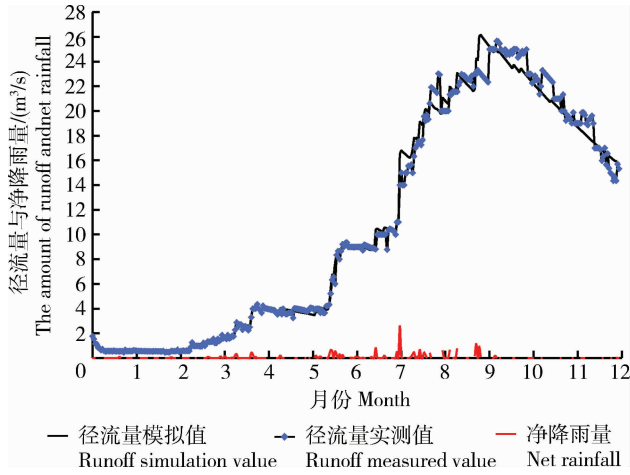


图 2 黄河呼和浩特段径流量模拟值、实测值及净降雨量

Fig. 2 Simulation and measured value of runoff and net rainfall of the Yellow River at Huhhot

2.7 水动力与降雨径流耦合模拟

将本研究已经建立的降雨径流模型与水动力模型进行耦合,构建黄河呼和浩特段水动力与降雨径流耦合模型。

在系统分析国内已有研究成果的基础上,综合考虑断面特征、河道构筑物、降雨、渗流、蒸发等因素

后经初步率定,结果显示,河道粗糙率是黄河流域内的主要综合率定因子。反复给出不同河段、不同时间及不同断面纵向及横向的不同粗糙率^[22-25],经率定后得到黄河呼和浩特段分段粗糙值(表 5)。率定后黄河主干流水位、流量模拟值与实测水位、流量基本吻合。

表 5 黄河呼和浩特段分段粗糙值

Table 5 Sectional rough value of the Yellow River at Huhhot

河段 Reach	对应河道里程/km Corresponding river chainage	横断面粗糙因数 Cross-section roughness coefficient	纵断面阻力因数 Longitudinal section friction coefficient
支流 Branch	水磨沟 0~25.91	0.025	0.1~1.6
	哈拉沁沟 0~40.73	0.020	0.1~1.5
	大黑河 30.87~221.08	0.026	0.1~1.7
	什拉乌素河 0~81.81	0.020	0.1~1.7
干流 Main stream	0~16.56	0.017~0.035	1.3~1.9
	16.56~45.03	0.018~0.030	0.9~1.7
	45.03~47.03(取水口) 47.03~16.07	0.023~0.033 0.020~0.030	0.8~1.6 0.1~0.7

经过对黄河呼和浩特段主要断面的水位和流量进行相对误差与纳什系数分析,头道拐:水位相对误差 $\sigma \leq 0.23\%$, 纳什系数 $E \geq 0.99$; 流量相对误差 $\sigma \leq 1.16\%$, 纳什系数 $E \geq 0.99$ 。河口镇:水位相对误差 $\sigma \leq 0.07\%$, 纳什系数 $E \geq 0.99$; 流量相对误差 $\sigma \leq 1.14\%$, 纳什系数 $E \geq 0.99$ 。喇嘛湾:水位相对误差 $\sigma \leq 1.54\%$, 纳什系数 $E \geq 0.99$; 流量相对误差 $\sigma \leq 0.92\%$, 纳什系数 $E \geq 0.99$ 。由此可

知,该模型质量可信度高,模拟过程误差极小,可较为准确的分析模拟黄河呼和浩特段水位、流量等水动力因素。

3 结果与分析

由头道拐、河口镇、喇嘛湾断面水动力模型与降雨径流耦合模型模拟出的水位、流量结果(图 3、4 和 5)可知:02—03 月各断面开始逐渐回升,且具有一

定的突变现象,水位突变范围为 2.5~3.5 m、流量突变范围 1 380~1 400 m³/s;04—12 月和 01 月黄河呼和浩特段水位和流量相对平稳,水位变化范围 1.8~1.3 m、流量变化范围 790~800 m³/s;水位和流量在 07—09 月出现了一年当中的丰水期,流量最大可达 1 162.5 m³/s。

03 月份黄河呼和浩特段开河,上游河段流量加大,导致头道拐、河口镇、喇嘛湾断面水位迅速增大,最大水位依次为 989.70、984.82 及 984.82 m,最大

流量依次为 1 786.69、1 786.68 及 1 786.80 m³/s;由于夏季降雨量增加,导致 08—09 月水位、流量有所增加,但幅度不大,水位增加量依次为 1.3、1.1 和 1.2 m,流量增加量依次为 620、690 和 720 m³/s;其他时期较为平稳,但由于附近的化工业用水、排水量也相对增加,农田灌溉用水、径流量增加,相互之间的损失、补给造成一些小幅度的波动,影响了模型的稳定性,水位依次在 987、982 及 982 m 上下浮动,流量依次在 580、600 及 570 m³/s 上下波动。

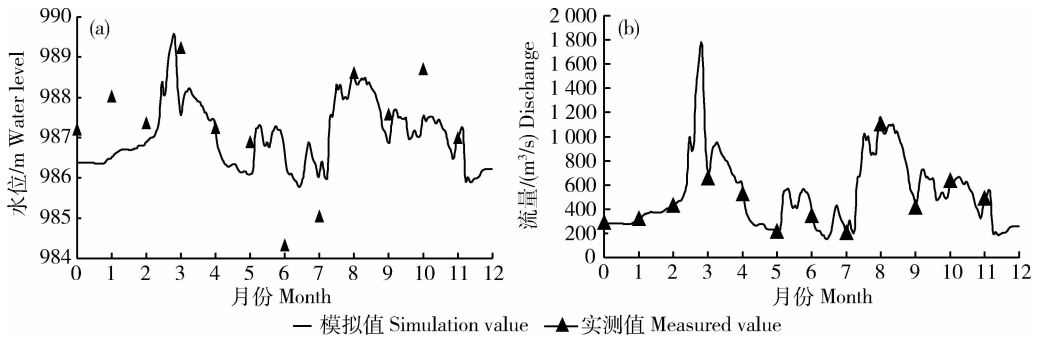


图 3 头道拐水位 (a) 和流量 (b) 模拟值和实测值

Fig. 3 Toudaoguai simulation and the measured values of water level (a) and discharge (b)

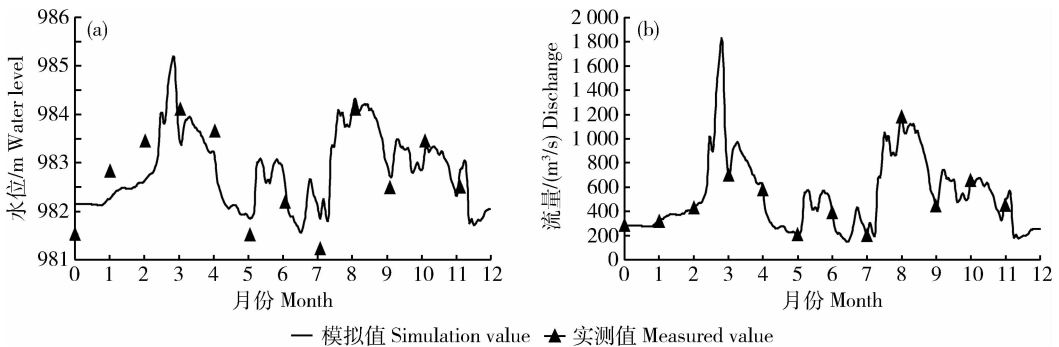


图 4 河口镇水位 (a) 和流量 (b) 模拟值和实测值

Fig. 4 Hekou Town simulation and the measured values of water level (a) and discharge (b)

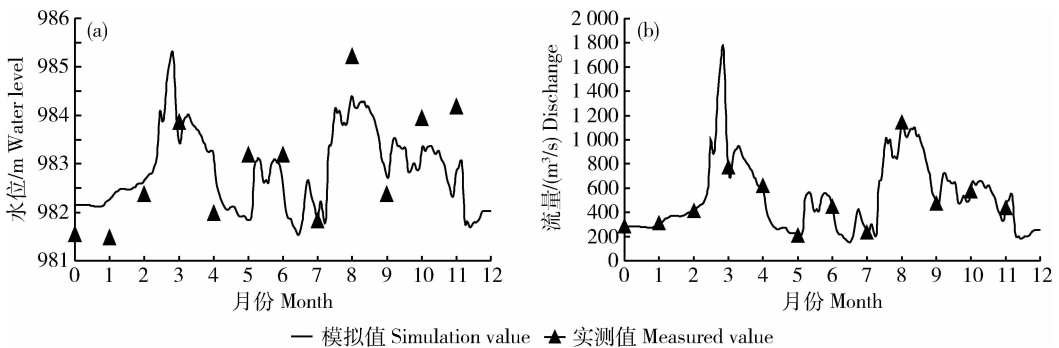


图 5 喇嘛湾水位 (a) 和流量 (b) 模拟值和实测值

Fig. 5 Lamawan simulation and the measured values of water level (a) and discharge (b)

4 结 论

本研究对黄河呼和浩特段进行实地考察与分析,利用 MIKE11 水动力模块(HD)、降雨径流模块(NAM)对黄河呼和浩特段进行河网构建、断面概化、边界条件分析、构筑物分析、降雨径流模拟,对水动力模型与降雨径流模型进行耦合、率定、验证。结果表明:1)耦合模拟纳什系数 $E \geq 0.9$,最大相对误差 $\sigma \leq 1.54$,基本反映了黄河呼和浩特段的水力特征。2)开河期 02—03 月和丰水期 08—09 月水位、流量变化幅度较大。3)1 月份、04—07 月和 10—12 月均保持稳定,水位变化范围为 1.8~13 m、流量变化范围 790~800 m³/s。为使以后模型构建精度更高,应对各河道详细水文信息作进一步的收集,对于特定年份的暴雨、洪水进行特定分析,并进行客观的耦合模拟。

参 考 文 献

- [1] 李云生,张震宇,刘伟江.黄河中上游流域“十一五”水污染防治规划研究报告[M].北京:中国环境科学出版社,2008:1-23
Li Y S, Zhang Z Y, Liu W J. *Research Report of the Yellow River in the Upstream Watershed “Eleventh Five-year” Plan of Water Pollution* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008: 1-23 (in Chinese)
- [2] Lim H S, Kim C S, Park K Soon, Shim J S, Chun I. Down-scaled regional ocean modeling system (ROMS) for high-resolution coastal hydrodynamics in Korea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(9): 50-61
- [3] Galvan L, Olias M, Izquierdo T, Ceron J C. Rainfall estimation in SWAT: An alternative method to simulate orographic precipitation[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 509(13): 257-265
- [4] 徐宗学,程磊.分布式水文模型研究与应用进展[J].水利学报,2010,41(9):1009-1017
Xu Z X, Chen L. Progress on studies and applications of the distributed hydrological models [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(9): 1009-1017 (in Chinese)
- [5] Nopparat P. A numerical computation of a non-dimensional form of stream water quality model with hydrodynamic advection-dispersion-reaction equations [J]. *Nonlinear Analysis*, 2013, 3(4): 666-673
- [6] 李哲,郭劲松,方芳.三峡水库澎溪河(小江)回水区一维水动力特征分析[J].重庆大学学报,2012,35(3):143-150
Li Z, Guo J S, Fang F. 1D hydrodynamic model on Pengxi (Xiaojiang) River backwater area in the Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2012, 35(3): 143-150 (in Chinese)
- [7] Danish Hydraulic Institute (DHI). MIKE11: A modeling system for river and channels user guide[R]. Denmark: DHI Press, 2002: 2-8
- [8] Ferdous A. A hydrodynamic model for the Lower Rideau River [J]. *Natural Hazards*, 2010, 55(1): 85-94
- [9] Danish Hydraulic Institute (DHI). MIKE11: A modeling system for rivers and channels reference manual [R]. Denmark: DHI Press, 2002: 1-30
- [10] Bulatov O V. Analytical and numerical Riemann solutions of the Saint Venant equations for forward- and backward-facing step flows [J]. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2014, 54(1): 158-171
- [11] 詹涌强.解抛物型方程的一族六点隐式差分格式[J].安徽大学学报,2012,36(4):26-29
Zhan Y Q. A class of implicit difference schemes of six points for solving the parabolic equations [J]. *Journal of Anhui University*, 2012, 36(4): 26-29 (in Chinese)
- [12] Ma M S, Wang X F. A high-order accuracy implicit difference scheme for solving the equation of parabolic type [J]. *Chinese Quarterly Journal of Mathematics*, 2000, 15(2): 94-97
- [13] 李立青,尹澄清.雨、污合流制城区降雨径流污染的迁移转化过程与来源研究[J].环境科学,2009,30(2):369-375
Li L Q, Yin C Q. Transport and sources of runoff pollution from urban area with combined sewer system [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(2): 369-375 (in Chinese)
- [14] Sun S F, Deng H P. A study of rainfall-Runoff response in a catchment using TOPMODEL [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(1): 87-95
- [15] 吴飞,甘盟.桥墩组中轴线与水流方向夹角过大对河流流场影响的数值模拟研究[J].华北水利水电学院学报,2009,30(1): 11-14
Wu F, Gan M. Numerical simulation research on the effect by the bigger angle between the middle-line of the piers G and the river flow [J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2009, 30(1): 11-14 (in Chinese)
- [16] 李大鸣,林毅,刘雄,周志华.具有闸、堰的一维河网非恒定流数学模型及其在多闸联合调度中的应用[J].水利水电技术,2010,41(9):47-51
Li D M, Lin Y, Liu X, Zhou Z H. Numerical model of one-dimensional unsteady flow for river networks with sluices and weirs its application to combined-regulation of multi-sluices [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2010, 41(9): 47-51 (in Chinese)
- [17] 黑龙江,李适宇.珠江三角洲河网一维水动力模拟的有限元法[J].热带海洋学报,2008,27(2):7-11
Long J, Li S Y. Finite element method in 1-D hydraulic mathematical modeling of river network in Zhujiang River Delta [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2008, 27(2): 7-11 (in Chinese)
- [18] 孙大勇.河网地区多功能河道断面研究[D].南京:河海大学,

- 2005
Sun D Y. Study on multifunctional river section[D]. Nanjing: Hohai University, 2005 (in Chinese)
- [19] 张志林, 陈永明, 夏姗姗, 吴珂. 基于混合模型的河网输水能力计算[J]. 河南大学学报, 2010, 38(2): 143-148
Zhang Z L, Chen YM, Xia S S, Wu K. Calculation of water transport capacity of river networks based on mixed models [J]. *Journal of Hohai University*, 2010, 38(2): 143-148 (in Chinese)
- [20] Ying Y, Fei Y. General relative error criterion and M-estimation[J]. *Frontiers of Mathematics in China*, 2013, 8(3): 695-715
- [21] Vanessa S, Nabin K. Model calibration and current usage in practice[J]. *Urban Water Journal*, 2009, 6(1): 360-364
- [22] 胡玮, 董增川. 太湖流域河网水流运动模拟研究[J]. 水文, 2008, 28(2): 43-48
Hu W, Dong Z C. How to simulate flow motion in river network of the Taihu Lake Basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(2): 43-48 (in Chinese)
- [23] 杨松彬. 嘉兴市区河网汇流数值模拟[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2007
Yang S B. Numerical simulation of concentrated flows from rivers networks in Jiaxing urban district [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2007 (in Chinese)
- [24] 彭钜新. 天然河流流量模数计算方法的探讨[J]. 水运工程, 2003, 357(10): 40-42
Peng J X. An approach to hydromodulus calculation methods of natural rivers[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2003, 357(10): 40-42 (in Chinese)
- [25] Lian Y, Chan I C, Singh J, Demissie M, Knapp V. Coupling of hydrologic and hydraulic models for the Illinois River Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 334(3): 210-222

责任编辑: 刘迎春