文章编号:1672-3031(2018)02-0130-11

黄河万家寨水库上游段水动力特性研究

袁博文[1]，牟献友[1]，冀鸿兰[1]，张宝森[2]
（1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018；
2. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院，河南 郑州 450003）

摘要：为深入研究万家寨水库上游河段冰期的冰情特征与演变规律，并为该河段的防凌减灾工作提供科学依据，依据实测的水位、流量、河道地形资料，通过HEC-RAS软件建立黄河干流万家寨水库上游坝址至头道拐段的水动力模型，模拟研究河段2013年4月—2014年3月的水动力变化过程，探究各典型时期水动力参数的时空分布特性。结果表明：(1)基于实测水位数据对模拟结果进行对比验证，模拟水位与实测水位的相对误差 < 13 %，吻合度较高，可以较好地模拟研究河段的水力要素随时间、空间的演变过程。(2)研究区域枯水期、汛期、流凌期、开河期模拟水位空间分布存在差异性。结合流量特征分析，各典型时期上下游河段的水位差与流量呈正相关关系。(3)通过分析各典型断面处的水深和流速变化过程，曹家湾河段在冰期易卡冰结坝、诱发冰凌灾害的主要原因为：该河段过水断面相对较小且水流经过此处流速明显降低。

关键词：时空分布；演变规律；HEC-RAS；水动力模拟；黄河干流
中图分类号：TV875 **文献标识码：**A **doi：**10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.02.007

1 研究背景

在冬季，我国高纬度地区的江河普遍存在冰凌问题[1]。冰凌与人民生活、社会经济、生态环境息息相关，特别是当出现冰塞、冰坝致使水位壅高时，有可能会诱发严重的凌洪灾害，给人民的生命财产造成巨大损失。

黄河内蒙段从宁夏石嘴山入境，至山西河曲出境[2]，全长约830 km，每年度冰期(从开始流凌至全线开河)从当年的11月中下旬开始至翌年3月份结束，冬季严寒而漫长，冰期长达4～5个月，极易出现冰凌灾害，其中又以巴彦高勒至托克托县一段最为危险[3]。

托克托县河段位于黄河内蒙段下端，下游有万家寨水利枢纽，为万家寨水利枢纽的库尾河段，受万家寨水库影响，该河段出现了一些特殊的冰情现象。基于此，学者们开展了大量的科学研究，积累了丰富的研究成果。可素娟等[4]基于实测资料和万家寨水库运用情况，对库区河道冰情进行分析，设计了初始封河期水库调度方案。马喜祥等[5]在现场观测的基础上，结合万家寨水库冰情资料，分析了库区河段冰情特点及封开河过程。康玲玲等[6]依据气温资料，对气温的时空分布特征及演变过程展开研究，建立了气温要素与凌情特征的关系式。朱钦博[7]基于野外原型观测，利用Mann-Kendall检验法与多段线性回归法，结合度-日法研究气候变化对冰盖生消的影响。陈守煜等[8]采用BP神经网络模型，综合分析黄河内蒙段凌汛成因，提出了适用于研究段的冰凌预报方法。雷冠军等[9]采用TOPSIS-模糊综合评判模型对预报因子进行识别，选出合理的预报因子进行预测，提高了预测精度。张防修等[10]基于实测冰情资料，建立河冰动力学模型，模拟河冰生消及槽蓄水增量过程，分析了槽

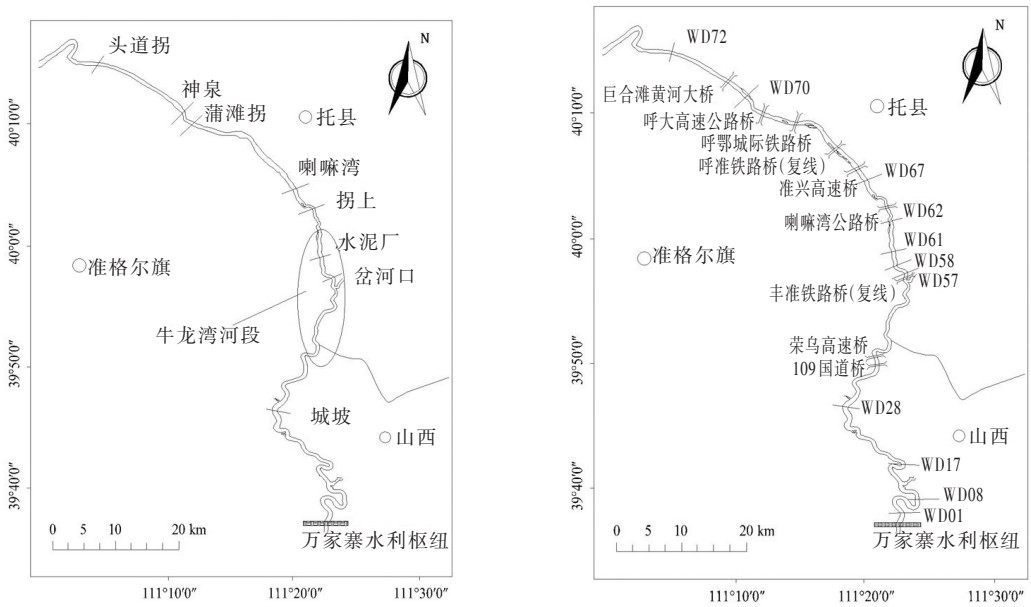
收稿日期：2017-10-11
基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFC0402501)；国家自然科学基金项目(51369017，51569020)；内蒙古自然科学基金项目(2015MS0515)
作者简介：袁博文(1994-)，男，内蒙古巴彦淖尔人，硕士生，主要从事水力学及河流动力学研究。
E-mail：15754856305@163.com
通讯作者：牟献友(1969-)，男，内蒙古赤峰人，教授，主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail：mouxianyou@163.com

蓄水增量的主要来源。王军等[11]运用数值模拟方法，通过求解冰塞面变形方程获得冰塞堆积厚度，对稳封期冰塞堆积情况进行了定量分析。赵水霞等[12]依据野外冰情监测及水文、气象资料，基于Landsat8遥感影像，针对什四份子弯道冰情演变过程进行研究。冀鸿兰等[2]通过对比分析万家寨水库建成前后水库上游河段的冰情特性，探究了水库上游河段的冰情变化规律及影响因素。

目前已有的研究成果主要集中于库尾河段的冰情现象、河冰生消演变、封开河预报等方面，针对该河段畅流期、冰期的水位、水深、流量、流速等水动力参数的时空分布研究较少。因此，本文以万家寨水库上游坝址至头道拐河段为研究对象，依据历年实测资料，运用HEC-RAS软件对研究河段进行水动力模拟，重点分析水位、水深、流速等在畅流期(汛期和非汛期)、冰期(包括流凌期、稳封期、开河期)的分布特征及演变规律，揭示水动力因素对研究河段冰情的影响机制，为治理万家寨水库至头道拐河段的冰凌灾害提供理论依据。

2　研究区域概况

研究河段选定为万家寨水利枢纽上游坝址至头道拐河段，全长114 km[4,13]，如图1所示。研究河段按照河道类型可分为三段：头道拐以下至神泉全长15 km，属内蒙古平原性河道，断面宽浅，比降为0.1 ‰ ~ 0.4 ‰；神泉以下至拐上河道，平原向峡谷过度，比降逐渐增大，平均为1.2 ‰；拐上以下至坝址为万家寨库区，全长72 km，属峡谷型河道，河宽300 ~ 500 m，平均比降为1.4 ‰。尤其是在距坝53 ~ 60 km的牛龙湾河段，河道宽窄相间，最宽250 m，最窄仅有83 m，比降陡缓相间，最大为1.77 ‰，最小为0.43 ‰，冬季冰凌下泄不畅，极易出现卡冰结坝，发生冰凌灾害。研究区域冬季受蒙古高气压控制，气候干燥寒冷，首凌日期一般为每年11月中下旬，12月进入稳封期，次年3月解冻开河，冰期较长[14]。该河段畅流期为每年4月—10月，汛期一般为7月—9月。



(a) 研究区域河道　　(b) 布设断面位置

图1　研究区域河道及断面位置

3　数据选取与研究计算方法

3.1　数据选取　数据来源为万家寨水利枢纽公司和头道拐水文站的历年实测数据。河道地形数据选取万家寨水利枢纽公司每年的实测大断面数据，由于第二次(10月份左右)实测大断面数据反映的是

冰期前的河道地形且基本能够反映本年度河道地形状况，因此选取第二次实测大断面数据[15]。部分断面的位置如图1所示。研究区域由上游至下游沿程布设有主要的自记式水位计13个，头道拐水文站位于研究区域的最上端。本文选取麻地壕、蒲滩拐、拐上、水泥厂、岔河口、城坡、坝前码头7个自记式水位计的实测逐日水位数据，选取头道拐水文站实测逐日流量数据，水位计位置如表1所示。

表1　自记水位计位置

序号	站名	距坝里程/km	附近典型断面
1	坝前码头	0.7	WD01
2	城坡	28.3	WD28
3	岔河口	57.0	WD57
4	水泥厂	62.9	WD60
5	拐上	72.3	WD65
6	蒲滩拐	95.8	WD71
7	麻地壕	112.9	WD72

3.2　研究计算方法　HEC-RAS（Hydrologic Engineering Center River Analysis System）是由美国陆军兵工团水文工程中心研发的一款软件，主要用于恒定流、非恒定流的水动力模拟等计算。本文主要使用HEC-RAS软件中非恒定流模块，原理主要依据质量守恒及动量守恒[16-17]，具体控制方程如下。

连续性方程：

$$\frac{\partial A_T}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}-q_l=0 \tag{1}$$

动量方程：

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial QV}{\partial x}+gA\left(\frac{\partial z}{\partial x}+S_f\right)=0 \tag{2}$$

式中：A_T 为河道的过水断面面积，m^2；t 为计算时间，s；Q 为流量，m^3/s；x 为河道计算长度，m；q_l 为单位长度的侧向流量，m^3/s；g 为重力加速度，m/s^2；S_f 为阻力坡降；V 为流速，m/s。

离散方法采用隐式有限差分格式，控制方程的有限差分格式如下。

连续性方程：

$$\frac{\Delta Q_c}{\Delta x_c}+\frac{\Delta A_c}{\Delta t}=\overline{q_f} \tag{3}$$

$$\frac{\Delta Q_f}{\Delta x_c}+\frac{\Delta A_c}{\Delta t}+\frac{\Delta S}{\Delta t}=\overline{q_c}+\overline{q_l} \tag{4}$$

动量方程：

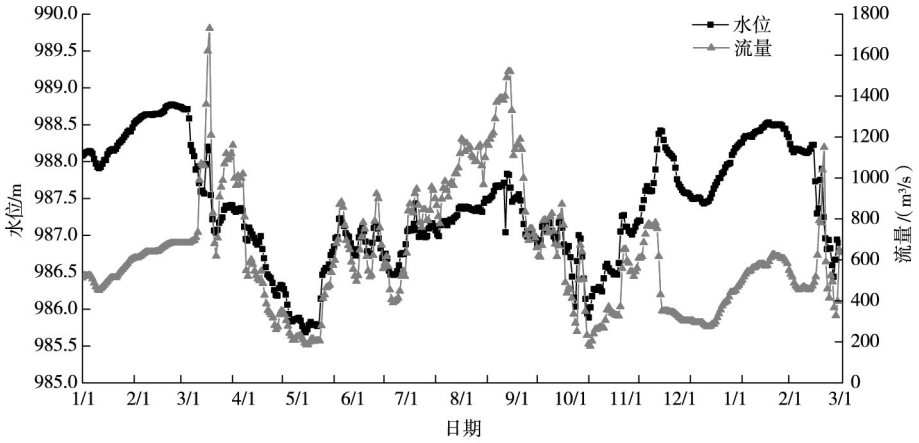
$$\frac{\partial Q_c}{\partial t}+\frac{\partial\left(V_C Q_C\right)}{\partial x_c}+g\,\overline{A_c}\left(\frac{\partial z}{\partial x_c}+\overline{S_{fc}}\right)=M_f \tag{5}$$

$$\frac{\partial Q_f}{\partial t}+\frac{\partial\left(V_f Q_f\right)}{\partial x_f}+g\,\overline{A_f}\left(\frac{\partial z}{\partial x_f}+\overline{S_{ff}}\right)=M_c \tag{6}$$

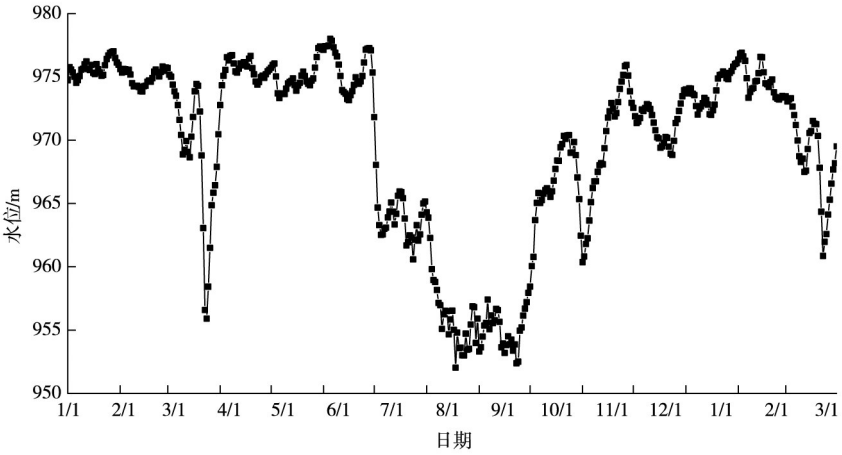
离散过程中采用时间和空间离散，计算方法采用Newton-Raphson迭代法。

在HEC-RAS软件中，从收集整理的数据中选取2013年10月的淤积测验的实测大断面数据，由上游至下游在Cross Section中按断面输入地形数据。其中，断面间主河槽及左右岸距离由实测数据及左右岸断面边界点的经纬度坐标确定；依据各自记式水位计的实测水位数据并结合经验值[18-21]进行糙率n值的率定；由测时水位数据及实际地形情况给出接点处的断面里程；束缩扩张损失系数主要通过经验确定：一般情况下渐变流取0.1和0.3，河道构筑物附近取0.3和0.5，急变流取0.8和0.5。

模型计算过程中，选择非恒定流计算模块（Unsteady Flow），以WD72断面为模拟计算上边界，WD01断面为下边界；利用头道拐水文站（距WD72断面6.1 km）2013—2014年实测流量数据及麻地壕自记式水位计（距WD72断面5.0 km）2013—2014年实测水位数据构建水位流量关系作为上边界条件，坝前码头水位计（距WD01断面690 m）2013—2014年实测水位数据作为下边界条件，边界条件如图2所示。时间步长选择1 d，给定一个初始流量作为初始条件，模拟计算从-90 d开始，给予一定的预热时间使得模拟计算至第一天达到稳定状态，减少初始条件对模拟计算的影响[22]。模拟计算时间为2013年4月1日—2014年3月31日，进行一个年度的畅流期、冰期的水动力模拟，计算步长同样选择



（a）上边界水位流量关系



（b）下边界水位变化过程

图2　模拟边界条件

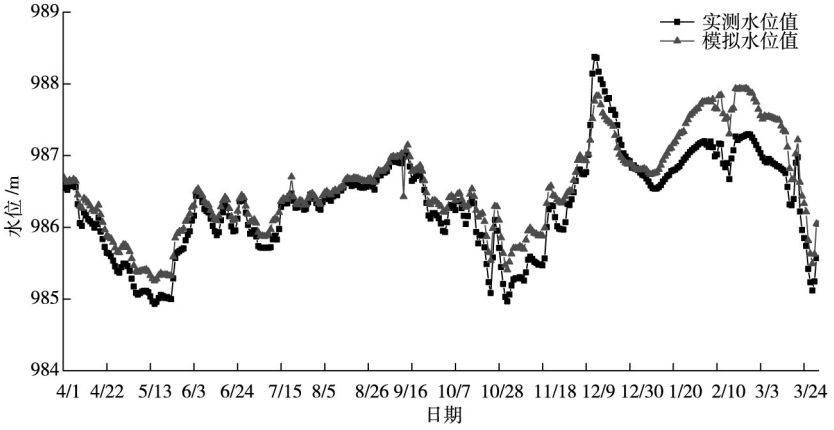
1 d。此外，为了避免水库调节影响水位变化从而导致模拟水位出现突变现象，选择WD60断面(研究河段全长114 km，WD57(距坝57 km)断面为研究河段的中间断面，但由于水位数据存在缺失，因此选择WD60断面)作为模拟河段的分界点，分段对研究河段进行水动力验证模拟，在验证模拟中，利用WD60断面附近水泥厂水位计实测水位数据构建第一段的下边界条件及第二段的上边界条件，并对糙率等模型参数进行适当调整。

同时，为更好的揭示研究河段冰期水动力参数时空分布特性及演变规律，进行2015—2016年度冰期(2015.11.1—2016.3.31)的水动力模拟计算，同2013—2014年度冰期的模拟结果进行横向对比，从而得到更准确、更符合实际情况的结论。

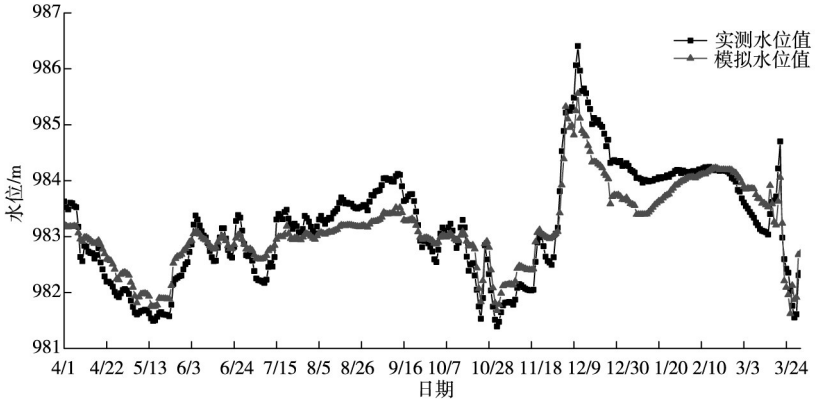
4　模拟结果分析

4.1　模拟结果验证　选取2013年4月1日—2014年3月31日蒲滩拐、拐上、岔河口、城坡水位计的实测数据分别与WD71、WD65、WD57、WD28的模拟水位结果进行对比验证，由于岔河口水位计的实测水位数据在2013年5月份存在缺失，因此所选择的实测数据从2013年6月1日开始。验证结果如图3所示，其中WD71与蒲滩拐对比，最大差值0.70 m，最大相对误差为12.95 %；WD65与拐上对比，最大差值0.85 m，最大相对误差为12.42 %；WD57与岔河口对比，最大差值1.14 m，最大相对误差为12.12 %；WD28与城坡对比，最大差值2.80 m，最大相对误差为11.83 %。相对误差均较小，模拟结果可靠。

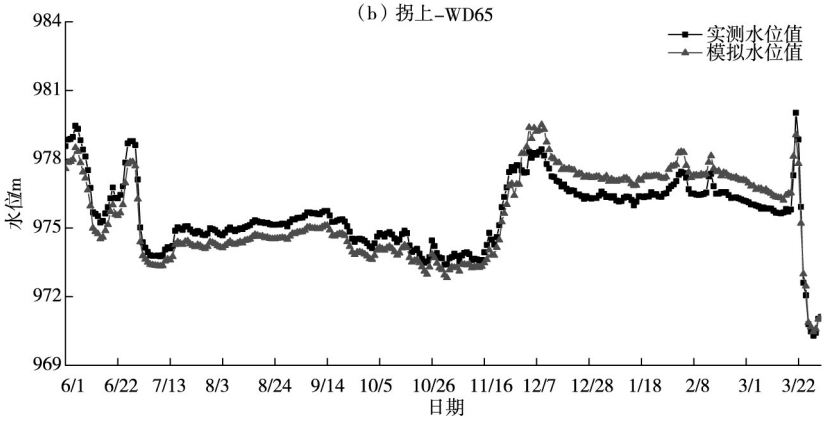
4.2　流量、水位模拟结果分析　由岔河口冰情站的统计资料：研究河段2013—2014年度冰期首凌时



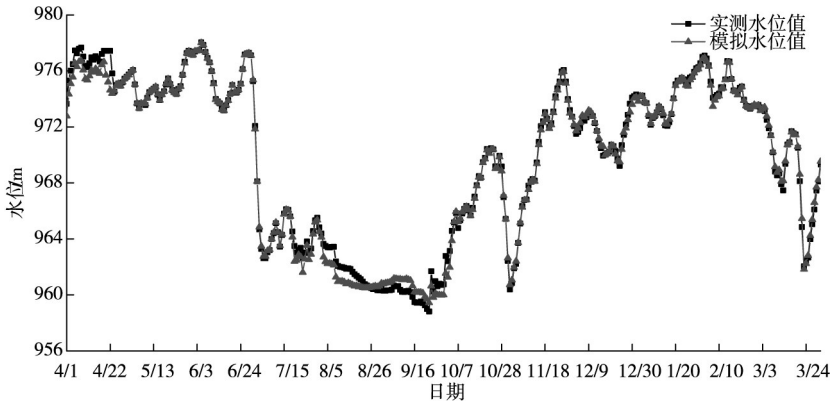
（a）蒲滩拐-WD71



（b）拐上-WD65



（c）岔河口-WD57



（d）城坡-WD28

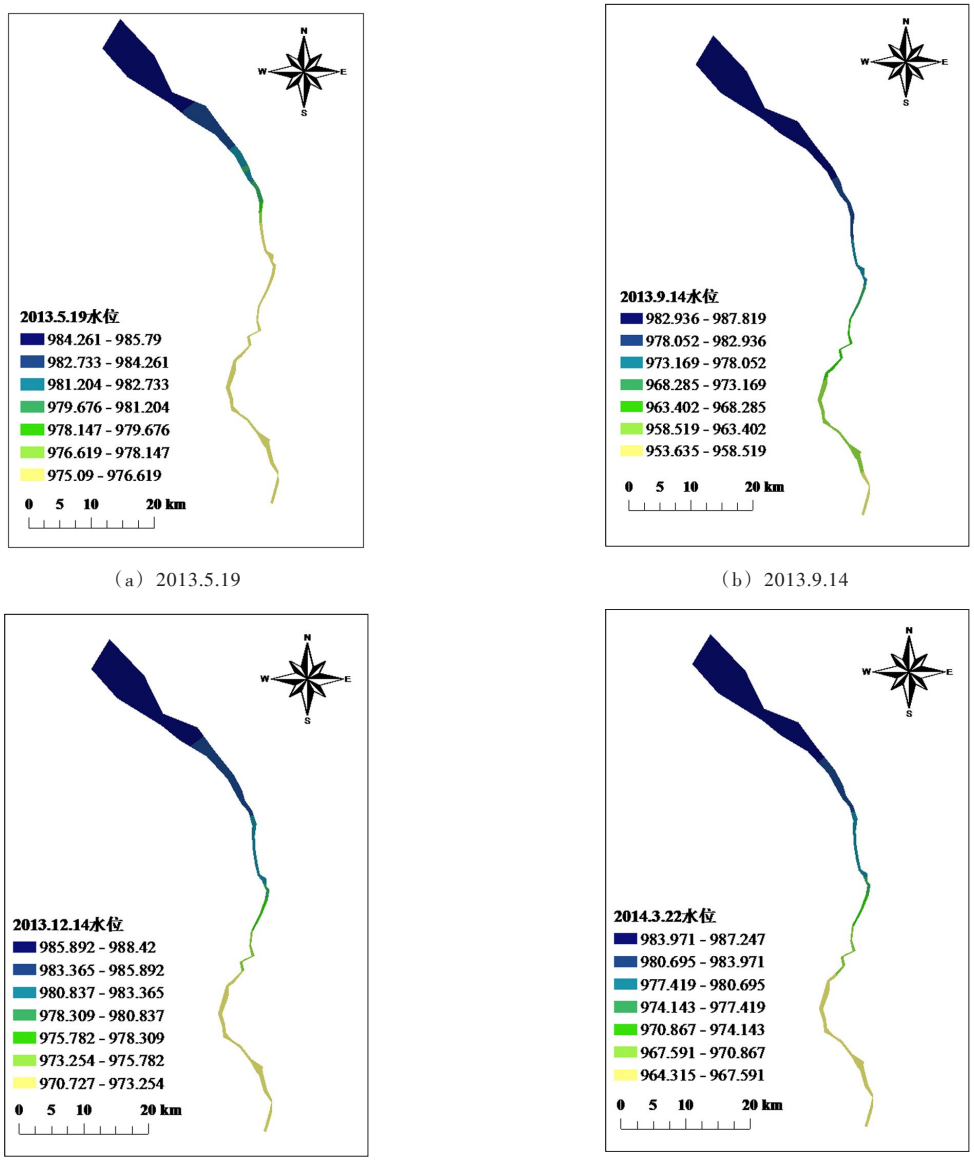
图3　水动力模拟结果验证

间为2013年11月27日，于12月15日全线封河进入稳封期，流凌历时19 d，封冻天数为93 d；河段2014年3月15日首开，并于3月23日全线开通，开河历时9 d。

头道拐水文站为万家寨水库的入库站，因此，在不考虑支流汇入的情况下，头道拐2013—2014年的流量逐日变化过程基本上可以代表全河段的流量变化情况。由图2(a)可知，2013年4月1日—2014年3月31日，流量出现两次较高的峰值，分别出现在汛期(2013年9月)与开河期(2013年3月)；3次较低的谷值分别出现在枯水期(2013年5月)、流凌开始前(2013年10月)以及稳封期(2013年1月)。此外，上边界的流量与水位的日变化趋势基本一致，而坝前码头自计式水位计位于万家寨水库上游690 m，其水位变化受水库调解的影响大，通过图2(b)可以发现，为防止出现凌洪灾害，在汛期(主要指洪汛期)和开河期，经水库调节，水位明显降低。

因此针对2013—2014年度冰期特征及流量变化情况，选取2013年12月14日(流凌期，该日在流凌期内实测流量最小)、2014年3月22日(开河期，该日在开河期实测流量最大)作为典型日，选取汛期2013年9月14日(汛期该日实测流量最大)、枯水期2013年5月19日(枯水期该日实测流量最小)作为对比日，分析这4个典型时期的水位分布情况，各时期模拟水位在空间上的分布如图4。

由图4可知，4个典型时期的水位存在一定的差异性和特殊性。枯水期和流凌期的水位较高，整



(a) 2013.5.19　(b) 2013.9.14　(c) 2013.12.14　(d) 2014.3.22

图4　4个典型时期模拟水位空间分布

个河段的平均水位在977 m左右。反观汛期和开河期，由于降雨集中和冰盖消融，流量较大，但水位相对较低，河段平均水位分别为969.90 m、972.65 m。研究河段全长114 km，选择WD57断面(岔河口，距坝57 km)为分界界定上下游，流凌期上游平均水位984.42 m，下游平均水位972.97 m；开河期上游为982.21 m，下游为967.52 m；枯水期为980.64 m与970.11 m；汛期为981.92 m与962.85 m，上下游水位差分别为11.45、14.69、5.53和19.07 m，水位差与流量呈正相关关系，流量越大上下游水位差越大。在汛期与开河期，水库通过调节库水位，增大上下游的水位差，保证上游洪水或冰凌顺利下泄，防止灾害发生。

4.3　水深模拟结果分析　对WD71、WD65、WD57、WD28共4个断面的水深变化过程进行模拟分析，模拟水深逐日变化过程如图5所示。

枯水期(2013年5月)流量小，各断面水深出现明显降低，WD71断面5月水深相较4月最大降幅为1.45 m，WD65断面水深最大降幅为1.47 m，WD57断面与WD28断面的降幅分别达到了2.97 m与3.38 m。汛期8、9月降水集中，降水量骤增，流量急剧增大，两个月的平均流量为1085.03 m^3/s，最大流量可达1520 m^3/s，但万家寨水库为防止上游河段在汛期出现洪涝灾害，开闸放水，降低库水位，因此WD28断面水深在汛期明显降低，8、9月两个月的平均水深为8.53 m，较之5、6月的平均水深降低了14.41 m，WD57断面降低1.32 m，WD65与WD71断面由于距离水库较远，库水位调节对二者的影响程度较小，水深出现小幅上涨，分别上涨0.68 m与0.75 m。随着气温降低，河段出现流凌，流量增大，各断面的水深增大；进入稳封期后，河段封河，冰盖覆盖河面，各断面的水深均出现一定程度的降低，而在整个稳封期内，各断面的水深变化呈现先降后升再降的变化趋势。3月15日河段开河，由于冰盖融化等原因河段内流量逐步增大，各断面水深也逐步增加，但从3月20日开始，为保证冰凌顺利下泄，降低河道内出现卡冰结坝从而诱发冰凌灾害的概率，水库降低库水位。由图2(b)可知，坝前码头的水位在3月20日至23日这4天内，从970.34 m降低至960.86 m，降幅达到9.48 m，其余各断面水深也有不同程度的降低，WD71-WD28断面分别降低了0.59、1.42、2.93和8.76 m。

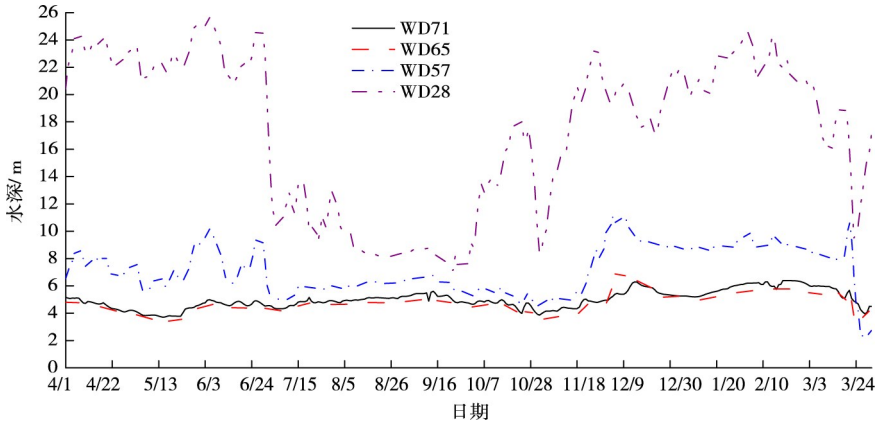


图5　4个断面模拟水深变化过程

通过统计分析，历年冰凌灾害多发生于距坝66 km处曹家湾河段，以2015—2016年度冰期为例：封河期12月9日，曹家湾河段上游出现冰塞现象，10日冰塞溃决下移，曹家湾河段由于过水断面小而发生强烈紧冰作用，冰凌挤压堆积，水位迅速上涨，水深增加，左岸沿黄公路漫凌受淹，形成灾害；开河期3月20日，曹家湾河段出现冰坝，随着上游来流量增大，水深迅速增加，左岸沿黄公路上水最深达1.5 m，沿岸多个村落受壅水威胁，在冰坝溃决过程中，曹家湾下游水泥厂处的自记式水位计钢架被冰凌摧毁。

曹家湾断面附近布设有WD62、63断面，对其两个年度冰期(2013—2014、2015—2016年度)的水深变化过程进行模拟分析，并与WD65号断面模拟水深值进行对比，结果如图6所示。由图6可以看出，在2013—2014年度冰期，WD62、WD63、WD65断面的平均水深分别为4.99、4.60和5.38 m；2015—2016年度冰期平均水深分别为2.55、3.22和3.24 m。在冰期，曹家湾河段附近各断面的水深低

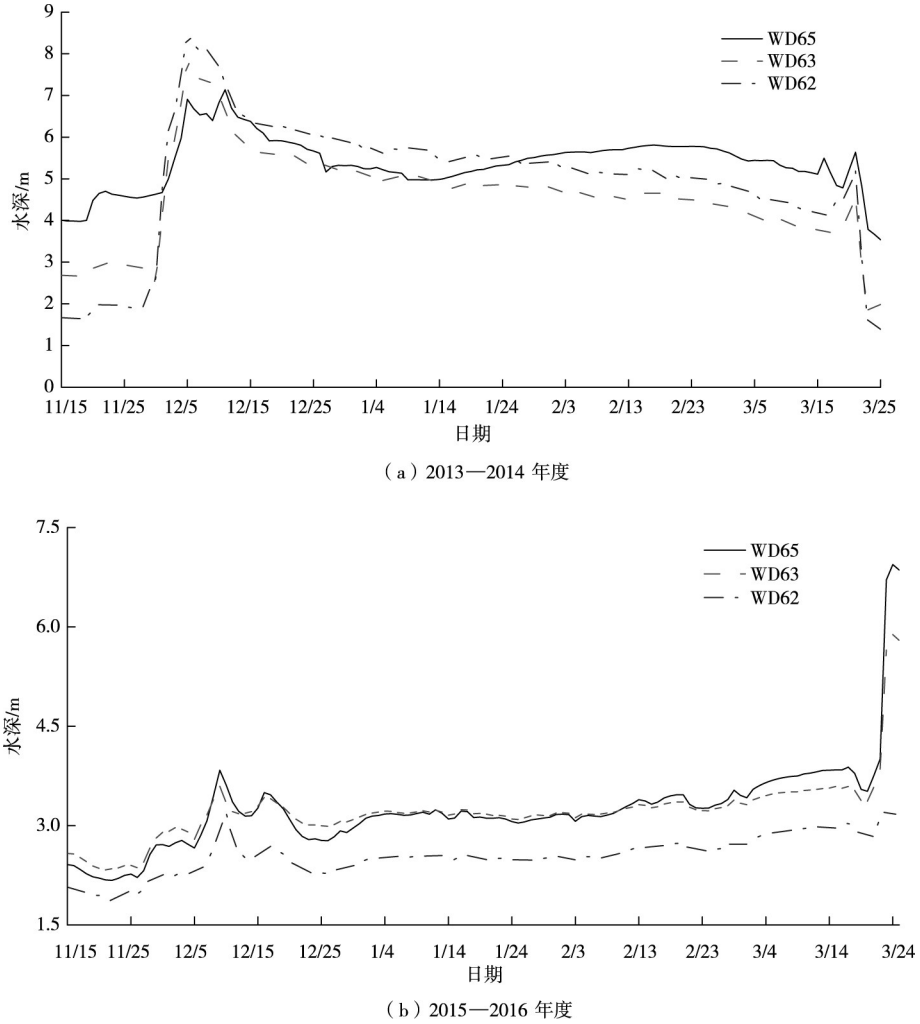


图6　冰期各断面水深变化过程

于上游断面，河流过水断面小，冰凌在此处下泄不畅，容易形成卡冰结坝，最终诱发冰凌灾害。

4.4　流速模拟结果分析　2013—2014年度的WD71、WD65、WD57、WD28断面模拟流速变化如图7所示。由图7可见，各断面模拟流速日变化差异较大，断面流速最大值出现在汛期，最小值出现在稳封期。WD71、WD65、WD57、WD28断面在汛期(2013年8、9月)的平均流速为1.06、2.29、1.05和1.15 m/s；稳封期(2014年1、2月)平均流速为0.29、0.50、0.21和0.09 m/s。4个断面中，WD65断面的流速明显大于其他3个断面，整年度的平均流速为1.42 m/s，其他3个断面的平均流速均在0.5 m/s左右。各断面的流速变化趋势比较一致，4、5月流速整体呈下降趋势；随着黄河内蒙段进入汛期，流量增大，各断面流速随之增大，并于9月中旬达到峰值，WD65断面最大流速达2.79 m/s，其余3个断面最大流速在1.35 m/s左右；汛期过后，流速逐渐降低，并且进入流凌期后，流速下降速率进一步加快；进入稳封期后，流速相对较小，变化较平稳，WD71、WD65、WD57、WD28断面的平均流速分别为0.28、0.50、0.20和0.11 m/s；进入开河期，各断面流速迅速增大直至全线开河。3月15日至3月23日，以WD65断面为例，流速从0.64 m/s增大至1.46 m/s。

进一步分析冰凌灾害易发的曹家湾河段附近流速变化，选取WD61、WD62、WD63断面与其上游的WD65断面进行对比，变化过程如图8所示。由图8可见，WD65与WD63断面的流速相差不大，平均流速分别为0.60与0.57 m/s，下游WD62、WD61断面流速明显小于二者，平均流速分别为0.46与0.25 m/s。因此，当上游冰凌以较大流速下泄至WD62、WD61断面，流速突然降低，冰凌极易在此处下沉堆积诱发冰凌灾害。

曹家湾下游牛龙湾河段(距坝56 km左右)，由于河道宽窄相间、比降陡缓相间，同样为凌汛易发

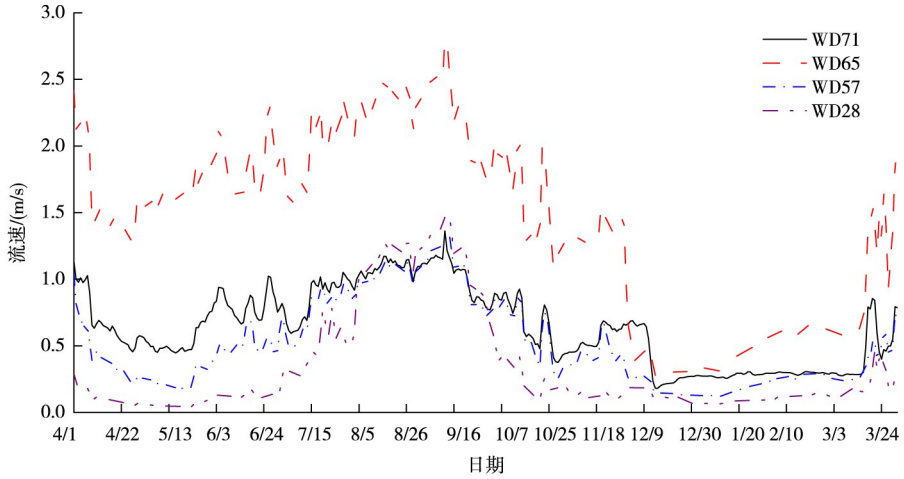


图7　各断面模拟流速变化过程

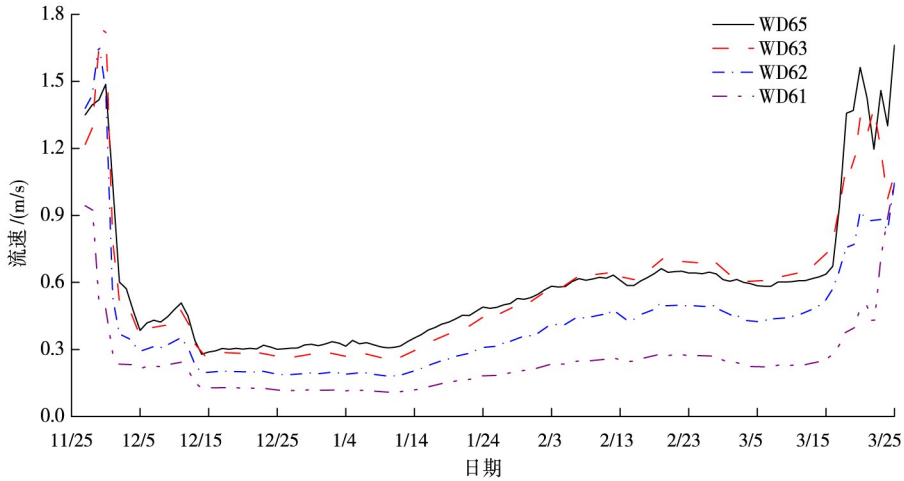


图8　曹家湾附近断面冰期模拟流速变化过程

河段。因此模拟分析牛龙湾河段附近断面(WD57、WD56、WD54、WD52)冰期流速变化，与曹家湾断面进行对比验证，变化过程如图9所示。由图9可以看出，WD57、WD56、WD54断面冰期平均流速在0.24 m/s左右，而其下游WD52断面冰期的平均流速为0.18 m/s，对比发现流速同样出现一定程度的减小，与曹家湾附近断面的流速变化规律存在相似性。

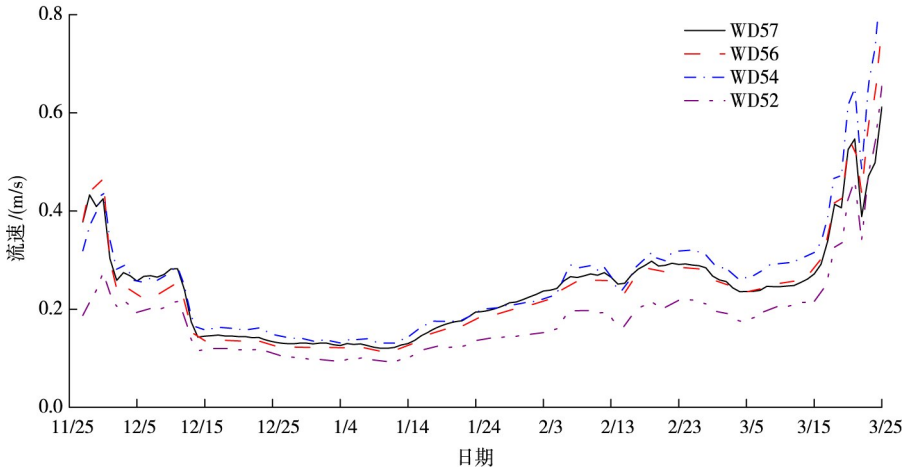


图9　牛龙湾附近断面冰期模拟流速变化过程

5　结论

本文基于实测数据及HEC-RAS软件对黄河干流万家寨水库上游坝址至头道拐河段进行水动力模拟研究，并对该河段水位、流量、水深、流速的时空分布特征进行定性定量分析，得到以下结论：(1)针对研究河段，应用HEC-RAS软件进行水动力模拟计算，并根据实测水位数据对模拟水位进行验证，模拟值与实测值相对误差 < 13%，吻合度较高。结果表明运用HEC-RAS软件可以准确系统的反映研究河段的水动力因素时空分布特性。(2)选取典型日，模拟计算了4个典型时期(流凌期、开河期、枯水期、汛期)水位分布情况，得到了模拟水位在研究区域的空间分布特性，各典型时期的上、下游水位分别为984.42与972.97 m、 982.21与967.52 m、981.92与962.85 m、980.64与970.11 m，水位差分别为11.45、14.69、5.53和19.07 m。结合流量变化特征，研究河段大流量主要出现在汛期和开河期，因此水位差与流量呈正相关关系，流量越大上下游水位差越大。(3)2013—2014年度流凌期各断面水深涨幅最大，WD71、WD65、WD57断面的水深涨幅分别为1.49 、2.59和3.08 m，WD28断面的水深有所下降，降幅为5.25 m，系水库调节影响。进入开河期，各断面水深先增大，后在水库影响下迅速减小，3月20—3月23日，各断面水深平均降低3.43 m。2013—2014年度各断面流速变化差异较大，流速最大出现在汛期，4个断面平均流速为1.39 m/s，流速最小出现在稳封期，4个断面平均流速为0.27 m/s。研究河段在整个冰期内的流速相对较小，4个断面平均流速为0.32 m/s。4个断面中，WD65断面的流速最大、水深最小。(4)针对曹家湾河段，造成其易发生凌汛灾害的主要原因有：①在冰期，曹家湾河段与其上下游河段的水位相差不多，但水深在此处有所降低，说明该河段淤积问题相对严重，河底地形在此处有所抬高，过水断面较小，冰凌易出现阻塞，造成壅水现象；②曹家湾上下游河段的流速差较大，其上游WD65断面冰期平均流速为0.60 m/s，下游WD61断面冰期平均流速为0.25 m/s，水流经过曹家湾河段流速突然降低，上游来冰易在此处下沉堆积，诱发冰凌灾害。此外，由于曹家湾河段的过水断面较小，一旦出现卡冰结坝现象，河段就会发生强烈的紧冰现象，造成水位迅速上涨，凌灾迅速产生，给抢险救灾造成一定的困难。

参　考　文　献：

[1] 徐晶 . 基于可变模糊集理论的黄河内蒙段冰情预报方法研究[D] . 呼和浩特：内蒙古农业大学，2012 .

[2] 冀鸿兰，王晓燕，脱友才，等 . 万家寨水库建成后上游河段冰情特性研究[J] . 水力发电学报，2017，36(2)：40-49 .

[3] 潘进军，白美兰 . 内蒙古黄河凌汛灾害及其防御[J] . 应用气象学报，2008(1)：6-11 .

[4] 可素娟，钱云平，郝守英，等 . 万家寨水库凌情特点及初始封河期调度方案研究[J] . 冰川冻土，2002(2)：209-213 .

[5] 马喜祥，熊运阜，徐伟，等 . 万家寨水库冰情浅议[J] . 泥沙研究，2003(4)：66-72 .

[6] 康玲玲，王云璋，陈发中，等 . 黄河上游宁蒙河段气温变化对凌情影响的分析[J] . 冰川冻土，2001(3)：318-322 .

[7] 朱钦博 . 气候变化影响下黄河(内蒙古段)河冰特性研究[D] . 呼和浩特：内蒙古农业大学，2015 .

[8] 陈守煜，冀鸿兰 . 冰凌预报模糊优选神经网络BP方法[J] . 水利学报，2004(6)：114-118 .

[9] 雷冠军，殷峻暹，刘惠敏，等 . 基于TOPSIS-模糊综合评判的模糊推理模型在开河预报中的应用[J] . 南水北调与水利科技，2017，15(4)：7-12 .

[10] 张防修，席广永，张晓丽，等 . 凌汛期槽蓄水增量过程模拟[J] . 水科学进展，2015，26(2)：201-211 .

[11] 王军，陈胖胖，隋觉义 . 稳封期天然河道冰塞堆积的数值模拟[J] . 水利学报，2011，42(9)：1117-1121 .

[12] 赵水霞，李畅游，李超，等 . 黄河什四份子弯道河冰生消及冰塞形成过程分析[J] . 水利学报，2017，48(3)：351-358 .

[13] 袁学安，李林 . 万家寨水利枢纽冰情及其对电站效益的影响[J] . 水利水电工程设计，2001(3)：11-17 .

[14] 张璐. 黄河万家寨水库上游段封开河特征分析及模拟预报研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2016.
[15] 苏腾，黄河清，周园园. 黄河宁蒙河段水文-水温过程和河道形态变化对凌汛的影响[J]. 资源科学，2016，38(5)：948-955.
[16] 贺娟，王晓松. 基于HEC-RAS及HEC-GeoRAS的溃坝洪水分析[J]. 水利水运工程学报，2015(6)：112-116.
[17] CHANG H W . Application of HEC-RAS model in simulation of water surface profile of river[J]. Applied Mechanics and Materials，2014，3488(641)：232-235.
[18] PRABEER K P. HEC-RAS model for mannnig's roughness：a case study[J]. Open Journal of Modern Hydrology，2013，3(3)：97-101.
[19] 玛哈沙提·哈孜哈力，努尔夏西·曼斯尔. 天然河道的糙率确定方法分析[J]. 能源与节能，2017(4)：94-95.
[20] 李一平，唐春燕，余钟波，等. 大型浅水湖泊水动力模型不确定性和敏感性分析[J]. 水科学进展，2012，23(2)：271-277.
[21] 齐鄂荣，罗昌. 库区河道非恒定流糙率的选取及特性[J]. 武汉大学学报(工学版)，2003(2)：1-5.
[22] 王宏，刘硕，万鲁河，等. 冰雪消融期松花江哈尔滨段干流水动力模拟及其时空分布特征分析[J]. 冰川冻土，2015，37(5)：1275-1282.

Hydrodynamic characteristics upstream of Wanjiazhai Dam in the Yellow River during freezing period

YUAN Bowen[1]，MOU Xianyou[1]，JI Honglan[1]，ZHANG Baosen[2]

(1. *College of Water Conservancy and Civil Engineering*，*Inner Mongolia Agricultural University*，*Hohhot* 010018，*China*；
2. *Yellow River Institute of Hydraulic Research*，*Yellow River Conservancy Commission*，*Zhengzhou* 450003，*China*)

Abstract：In order to provide a scientific basis for preventing and reducing ice flood disasters upstream of Wanjiazhai Dam，the hydrodynamic characteristics and evolution of ice regime has been studied based on the measured data of water level，flow and river topography by using the HEC-RAS. The hydrodynamic process was simulated and the hydrodynamic parameters were given in typical periods in the reach of the Yellow River from Wanjiazhai to Toudaoguai from April 2013 to March 2014. The following conclusions are drawn on the basis of this study：(1) The relative error of the simulated water level with the measured water level is less than 13%，which shows that the method is feasible to simulate the spatial and temporal evolution of hydraulic factors in freezing period. (2) There are differences in the spatial distribution of the water levels at this reach in dry periods，flood periods，ice-flowing periods and break-up periods，and there are positive correlation between the flood peaks and flows of upstream-downstream combining with the characteristics of flows. (3) Through analyzing the process of water depth and flow velocity at the typical sections，it is found that the Section of Caojiawan is prone to form ice jams and cause ice disasters because of the smaller sectional area and lower flow velocity.

Keywords：space-time distribution；evolvement rule；HEC-RAS；hydrodynamic simulation；mainstream of The Yellow River

(责任编辑：李福田)