

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0171

孙亚楠, 叶磊, 吴剑, 等. 基于一维水动力模型的洪水顶托影响分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 194-201. SUN Y N, YE L, WU J, et al. Analysis of backwater effects of flood based on one dimensional hydrodynamic model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 194-201. (in Chinese)

基于一维水动力模型的洪水顶托影响分析

孙亚楠¹, 叶磊¹, 吴剑¹, 彭勇¹, 冯艳², 黄旭²

(1. 大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 松辽委水文局 信息中心, 长春 130000)

摘要: 干支流洪水遭遇易发生顶托现象, 导致河道行洪不畅, 极大增加了河道防洪风险。以第二松花江(简称二松)洪水对嫩江洪水的顶托作用为工程背景, 采用一维水动力学方法模拟计算不同洪水组合下嫩江受二松洪水顶托情况, 并基于模型模拟结果进一步量化分析嫩江受顶托距离、顶托程度等。结果表明: 嫩江受二松洪水顶托距离情况较为复杂, 与两江洪水的相对大小密切相关, 两江洪水量级相当时, 顶托距离为距三岔河口32 km左右; 二松洪水相对越大, 受顶托距离越远且顶托程度越大; 在嫩江10年一遇、二松50年一遇洪水组合下, 嫩江受顶托最远到达距三岔河口55 km处, 顶托影响高度达2.14 m。

关键词: 松花江流域; 水动力学; 顶托影响; 大赉站; 水位流量关系

中图分类号: TV 122 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of backwater effects of flood based on one dimensional hydrodynamic model

SUN Yanan¹, YE Lei¹, WU Jian¹, PENG Yong¹, FENG Yan², HUANG Xu²

(1. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Hydrology Bureau of Songliao Water Resources Commission (Information Center), Changchun 130000, China)

Abstract: The encounter between the flood from the mainstream and its tributaries can easily lead to the backwater phenomenon, causing poor drainage of river channel floods and greatly increasing the flood control risk of the river course. Taking the backwater effects of the second Songhua river flood on the Nen river flood as the project background, we adopted the one dimensional hydrodynamic method to simulate and calculate the backwater effects of the second Songhua river flood on the Nen river flood under different flood combinations, and further quantitatively analyzed the affected distance and height based on the model simulation results. The results showed that the affected distance of Nen river due to the second Songhua river flood is relatively complex, and is closely related to the relative sizes of the floods from the two rivers. When the floods magnitudes in the two rivers are equal, the affected distance is about 32 km away from the Sancha estuary. The greater the flood in the second Songhua river, the greater the affected distance and height. Under the combination of 10% frequency flood in Nen river and 2% frequency flood in the second Songhua river, the maximum affected distance of Nen river is 55 km away from the Sancha estuary, and the affected height reaches 2.14 m.

Key words: Songhua river basin; hydrodynamic; backwater effects; Dalai station; relationship of water level and discharge

收稿日期: 2018-05-13 修回日期: 2018-09-17 网络出版时间: 2018-09-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20180927.1032.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51709033; 51579027); 国家重点研发计划(2016YFC0402203)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51709033; 51579027); National Key Research and Development Program of China (2016YFC0402203)

作者简介: 孙亚楠(1993), 女, 河南新乡人, 主要从事水文与水资源方面研究。E-mail: dlutsyn@126.com

通讯作者: 叶磊(1989), 男, 湖北武汉人, 博士(后), 主要从事水文预报及不确定性分析研究。E-mail: yelei@dlut.edu.cn

松花江位于中国东北地区北部,是我国七大江河之一,有南北两源,分别是北源嫩江和南源第二松花江(以下简称二松),两江交汇后称松花江(以下简称松干)^[1-2]。嫩江河道地势平坦,而二松下游地势相对陡峭,因此,嫩江易受二松洪水顶托,历史上经常发生二松洪水顶托嫩江的情况。受顶托作用影响,河道洪水相互交织、相互作用,极易导致河道洪水下泄不畅,河道水位壅高。其中,嫩江大赉站的水位是蓄滞洪区分洪的一个主要指标,受顶托作用影响,使其水位失真,导致分洪判断指标不准。由此可见,洪水顶托增加了防洪风险,给防汛工作带来了极大的不确定性。

洪水顶托分析涉及水文学、水力学等多学科,目前研究方法主要分为历史资料分析法和水动力学模型模拟法。历史资料分析法是基于历史实测水文资料的分析方法,盛滨龙^[3]、瞿月平^[4]等通过对实测流量比、水位比降等指标的变化情况进行详细分析,分别挖掘了嫩江大赉站及汉江洪水的顶托规律。然而,历史资料分析法受实测水文资料限制,且只能关注极个别水文站,不能对受洪水顶托影响的区域进行全面分析。因此,尽管水动力学建模耗时耗力,利用水动力学模型进行顶托影响分析仍然是一种常用方法。段士可^[5]、周苏芬^[6]、Michael等^[7]基于二维水动力模型模拟分析不同来水量级、汇流比下的回水区顶托情况,探讨了松花江、长江等流域的洪水顶托规律。水动力学方法采用模拟计算水位、流量进行顶托分析,常用的河道洪水演进模型以一维、二维为主,二维模型计算精度高但效率受限,且对资料精度有较高要求;一维模型搭建简单,计算速度快、精度较高,适用于长距离、多工况河道洪水演进模拟分析计算。

以上关于顶托的研究受限于资料及模型计算效率等,仅对个别站点在少数来水量级及汇流比条件下的洪水顶托情况进行分析,且未能对顶托距离、程度等得出定量结论。本文针对嫩江受二松洪水顶托影响的复杂水动力学问题,通过合理设置嫩江、二松不同设计频率洪水组合,采用一维水动力模型模拟分析。在此基础上提取分析嫩江各断面的水位、流量变化过程及水面比降等,量化分析嫩江受二松洪水顶托的距离及顶托程度。研究成果可为松花江流域,尤其三岔河口上下游的防汛工作提供重要指导,具有较好的工程应用和科技支撑价值,对其它类似流域的洪水顶托研究也具有积极的推进作用。

1 区域概况及基础数据

1.1 区域概况

松花江流域河道地形复杂多变,嫩江中下游河段河网密度大,支流多,极易引发洪水灾害。嫩江与二松汇合口位于黑龙江省肇源县三岔河口处,汇合口处为低地平原,由于两江地势差异使得嫩江易受二松回水顶托。大赉站是嫩江下游关键控制站,位于距三岔河口45 km处,通过分析其历史实测资料可知,1956年、1957年、2010年、2013年均均为二松顶托嫩江的典型年,且历史上多出现二松顶托嫩江的情况,因此,本文重点关注嫩江受顶托情况^[8]。

由于嫩江、二松的水情变化直接决定三岔河口处的汛情变化,故将有长系列实测洪水资料的江桥站、扶余站作为区域来水的开边界,其中嫩江上游江桥站距三岔河口较远,不受顶托影响。文章重点在于研究嫩江下游受顶托情况,故取松干下游距离较近的肇源站作为区域出流边界,既可准确模拟分析嫩江受顶托情况,又提高了模拟效率。模型以国堤作为闭边界,模拟计算范围包括嫩江段277 km,二松段46 km,松干45 km。研究区概况见图1。

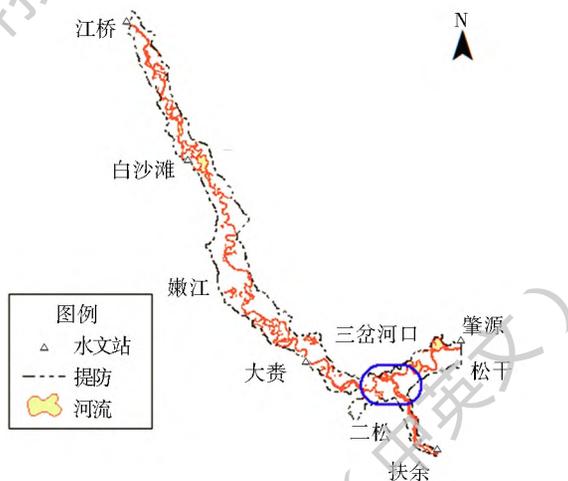


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 基础数据

本文采用的基础数据包括地理信息及水文数据,见表1。其中,地理信息数据用于模型构建,水文数据用于模型参数率定验证及设计工况模拟。

2 一维水动力模型构建

2.1 研究思路

本文所采用的 MIKE11 模型由丹麦水力研究所(DHI)开发,在多个国家均取得良好的应用效果。MIKE 11在河流动力和环境模拟等方面功能强大,尤

表 1 基础数据
Tab. 1 Basic data

分类名称	数据内容	详细内容
地理信息	DEM 数据	高程点、等高线等(1:5000)
	DLG 数据	线数据: 河网水系、河道两岸堤防等; 面数据: 主河槽水系面、湖泊等; 点数据: 水文测站等 河道断面数据: 江桥-大赉
水文数据	实测水位资料	大赉 2000、2011、2013 年(日尺度)
	实测流量资料	江桥扶余 2000、2011、2013 年(日尺度); 大赉 2000、2011、2013 年(日尺度)
	设计洪水过程	江桥、扶余站 2%、3.33%、5%、10% 设计频率洪水过程(日尺度)

其在河道洪水演进方面得到了广泛的应用^[9, 10, 11, 12, 13]。

MIKE11 模型以圣维南方程组作为描述河道洪水运动的基本方程, 公式如下:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2)$$

式中: Q 为断面流量; A 为过水断面面积; q 为侧向入流流量; x 为距离坐标; t 为时间坐标; h 为水位; C 为谢才系数; R 为水力半径; g 为重力加速度。

模型采用 Abbott 六点隐式格式对圣维南方程进行数值离散后应用“追赶法”求解差分方程^[14-15]。

本文利用 MIKE11 模型进行洪水顶托模拟分析的主要步骤有计算区域确定、资料选取与整理、模型构建、模型参数率定验证及模型模拟分析等。具体流程如图 2 所示, 首先, 根据已有资料选取模型计

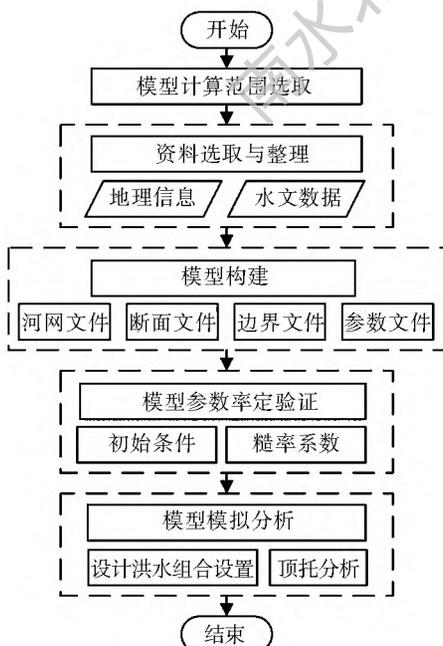


图 2 结构框图

Fig. 2 Structure diagram

算范围; 接着, 基于高精度的 DEM 及 DLG 数据构建模型; 然后, 结合历史实测资料率定验证模型参数; 最后, 对江桥、扶余站不同设计频率洪水组合进行模拟分析。

2.2 模型构建

本文基于松花江流域河流矢量数据概化生成河网, 基于高精度 DEM 数据提取河道横断面, 根据水文资料生成时间序列作为模型的边界, 其中水文资料包括江桥、扶余水文站多年日尺度水位、流量数据及不同频率设计洪水过程。

经概化后的河网如图 3(a) 所示, 嫩江段总长 275 km, 二松段总长 46 km, 松干段总长 45 km。设置计算断面时, 对下游受顶托段及河道地形复杂多变的河段适当加密。综合考虑模型的稳定性及精度等, 该模型共设置 89 处断面, 如图 3(b) 所示, 包括嫩江段 52 处, 二松段 25 处, 松干段 12 处。模型断面如图 3(c) 所示, 河道狭窄而河滩宽阔。模型边界文件(图 3(d))中两个上游开边界分别输入江桥站和扶余站的流量过程, 下游开边界给定肇源站水位流量关系。

由于研究区域范围广且地形沿程变化大, 故糙率值差异也比较大, 因此分段给定河床糙率。参考靳宏伟^[16]的研究成果, 模型的具体糙率值设置见表 2。

表 2 研究区各河段糙率值

河道名	河段起止点	糙率值	
		主河槽	滩地
嫩江	江桥-白沙滩	0.035	0.043
	白沙滩-三岔河口	0.020	0.026
二松	扶余-三岔河口	0.017	0.023
松干	三岔河口-肇源	0.025	0.033

2.3 模型率定及验证

在利用 MIKE11 模型对设计洪水组合模拟计算时, 首先需要对反映河床对水流阻力大小的糙率系数进行率定。本模型选用 2000 年江桥站、扶余站的实测水文数据作为边界, 提取大赉站模拟水位、流量过程用于率定。经多次调整, 模型率定的糙率范围主河槽为 0.017~0.03, 滩地为 0.022~0.04。模拟结果与实测过程对比分析见图 4 和表 3, 可知两者的水位、流量变化趋势一致, 拟合较好。

表 3 模型率定结果

Tab. 3 Model calibration results

年份	洪峰水位/m		水位相对误差(%)	洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)		流量相对误差(%)
	实测	模拟		实测	模拟	
2000	127.8	127.7	0.08	1380	137	0.29

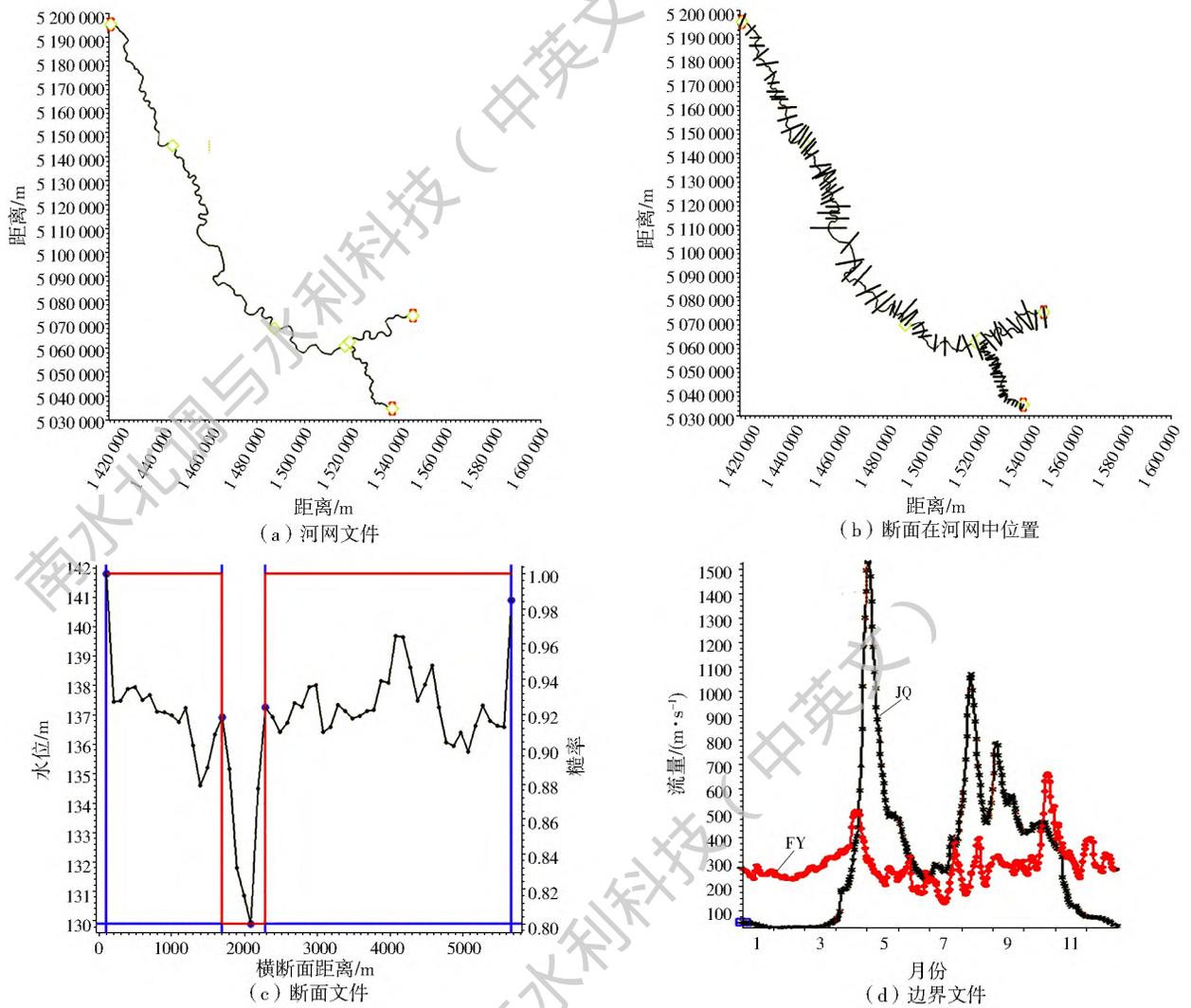


图3 模型文件

Fig. 3 Model files

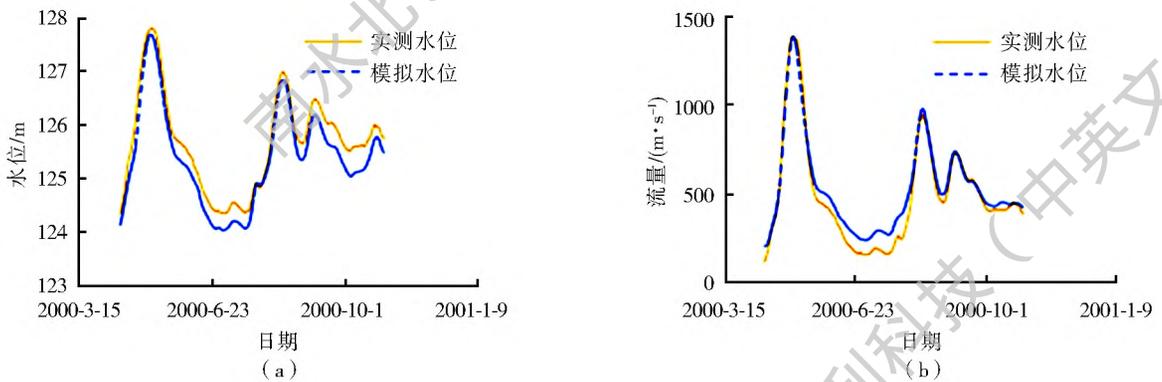


图4 2000年大赉站实测与模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of observed and simulated results of Dalai station in 2000

在模型率定的基础上,为确保模型的精度及适用性,需要对模型参数进行验证。本模型验证的方法是选取2010及2013年两个顶托典型年江桥站、扶余站的实测水文资料作为边界条件,提取大赉站的模拟结果,分析与实测值的误差。模型验证结果见图5及表4。

从图5可以看出,2010年及2013年的模拟水

位、流量变化过程与实测过程基本一致,由表4可知,洪峰水位及洪峰流量的实测值与模拟值相对误差均控制在合理范围内,且考虑到沿途水量损失等不确定性影响因素,可知模型模拟精度基本满足要求,模型选用的糙率值范围合理,可用于洪水顶托模拟研究。

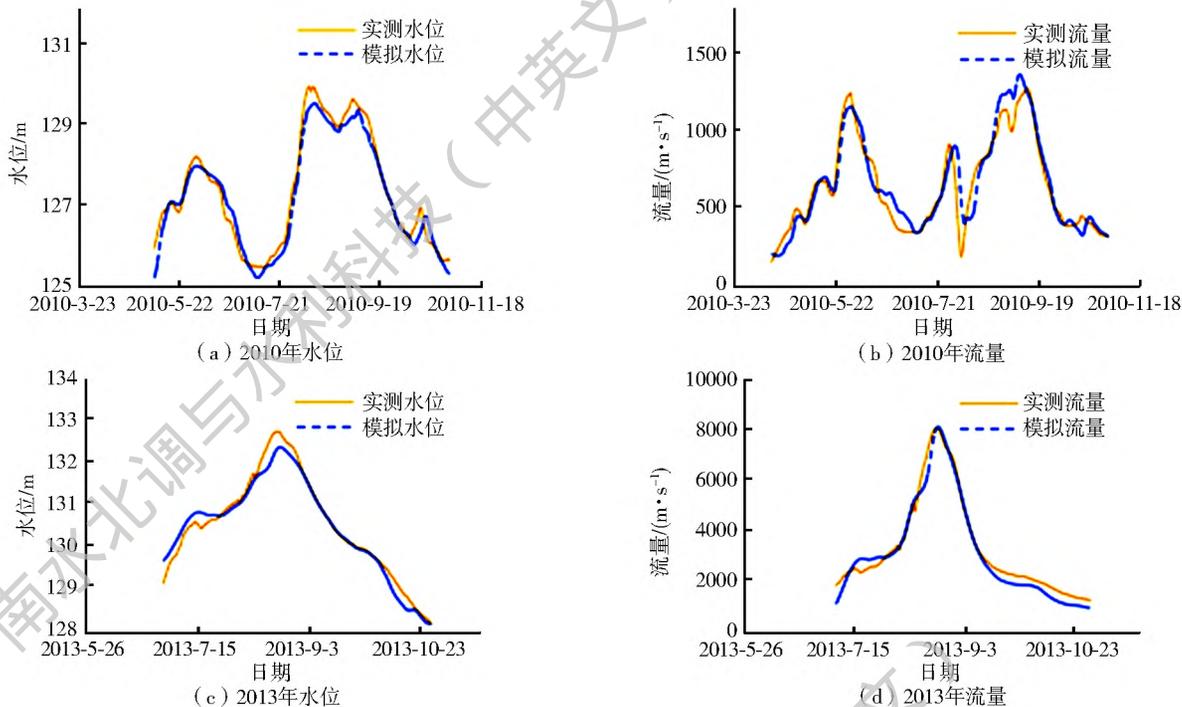


图 5 2010、2013 年大赉站实测与模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of observed and simulated results of Dalai station in 2010 and 2013

表 4 模型验证结果

Tab. 4 Model validation results

年份	洪峰水位/m		水位相对误差 (%)	洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)		流量相对误差 (%)
	实测	模拟		实测	模拟	
2010	130.0	129.5	- 0.38	1280	1256	- 1.9
2013	132.6	132.2	- 0.30	8070	8124	0.7

过程,下边界给定肇源站水位-流量关系。参考松花江流域防洪标准,洪水量级分别选定 10 年、20 年、30 年、50 年一遇,组合方案见表 5。

表 5 模拟洪水组合列表

Tab. 5 List of simulated flood combinations

洪水量级		洪水组合
嫩江江桥(X)	二松扶余(Y)	X+ Y
10 年一遇	10 年一遇	嫩江、第二松花江洪水随机
20 年一遇	20 年一遇	组合,如嫩江 20 年一遇遇
30 年一遇	30 年一遇	到二松 30 年一遇,则组合
50 年一遇	50 年一遇	编号为 2030 号工况

2.4 模拟工况设置

根据三岔河口处各种防洪保护对象的防洪标准,对两江的典型洪水随机组合,生成多种工况。模型上边界分别输入江桥、扶余站不同量级设计洪水

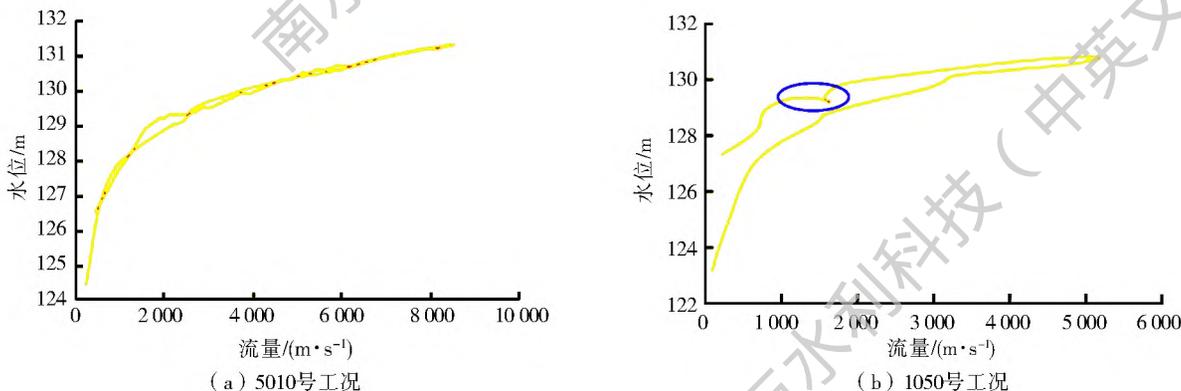


图 6 不同洪水组合下大赉站水位流量关系对比

Fig. 6 Relationship between water level and discharge in Dalai station under different flood combinations

3 模拟结果分析

3.1 河道断面洪水顶托识别

洪水顶托是一个复杂的水动力过程,受河底地

形、上游来水、局部流速等多种因素综合影响。本文采用定性与相对定量的方法,判断嫩江下游各河道横断面是否受洪水顶托影响。

以 5010 号及 1050 号工况为例从定性的角度说

明河道断面洪水顶托识别方法,图6分别为5010号及1050号工况下大赉站的水位流量关系图。可以发现5010号工况下大赉站模拟水位、流量变化趋势一致,关系单一;而1050号工况下模拟水位-流量关系呈顺时针绳套曲线,且出现了流量减小、水位上涨的现象。由于大赉站受二松来水顶托影响时,流速会有不同程度减小,水位流量关系呈多线性或不规则绳套状曲线^[17]。由此可以判断1050号工况下大赉站受二松来水顶托影响,5010号工况下大赉站不受顶托。

引入流量及水位日变化率作为判断顶托发生的指标,当水位变化率为正值、流量变化率为负值时该

河道断面明显受顶托影响。由模型计算结果可得到嫩江下游不同断面处的模拟水位、流量过程,通过分析各断面水位变化率及流量变化率的相对关系可以判断其是否受顶托影响。以1030号工况为例,图7为1030号工况下嫩江不同断面逐日水位、流量变化率图,可以看出,嫩江距三岔河口12 km处在7月23日至7月27日出现了流量变化率为负、水位变化率为正的情况,即流量减小、水位上涨现象;55 km断面处水位、流量日变化趋势一致。以此判断12 km断面处受顶托影响,而55 km处不受影响,二松来水对嫩江的顶托影响随着断面距三岔河口距离的增大而减小。

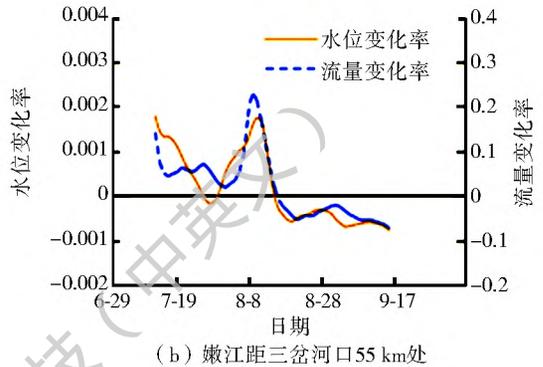
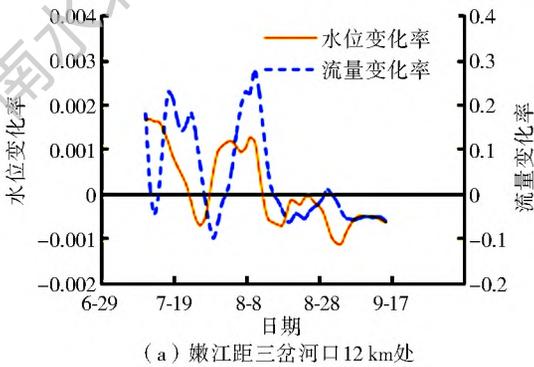


图7 1030号工况下嫩江不同断面逐日水位、流量变化率

Fig. 7 Daily water level and discharge change rate in different sections of Nen river under No. 1030 working condition

3.2 嫩江受顶托影响距离分析

利用3.1中判断顶托的方法,对各模拟工况下嫩江受顶托距离进行分析判断。图8为嫩江不同量级洪水下受顶托距离随二松洪水量级变化图。

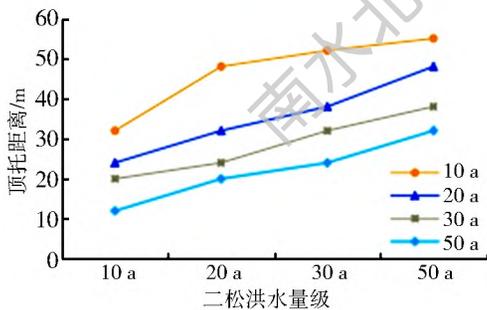


图8 不同洪水组合下嫩江受顶托距离

Fig. 8 The affected distance in Nen river under different flood combinations

可以看出,嫩江洪水量级一定时,嫩江段受顶托距离随着二松洪水量级的增大而增大,1050号工况下受顶托距离最远,达到距三岔河口55 km处。二松来水量级一定时,嫩江受顶托距离随嫩江洪水量级的增大而减小。当两江处于同一洪水量级下,嫩江受顶托距离不随洪水量级的变化而变化,均为距三岔河口32 km左右。说明嫩江受顶托距离的远

近与两江洪水的相对大小密切相关,且顶托距离随着二松洪水量级的增大而增大。在嫩江10年一遇、二松50年一遇洪水组合下,嫩江受顶托最远到达距三岔河口55 km处,此时,在分析顶托对嫩江洪水的影响时,只需重点考虑三岔河口至嫩江上游55 km处即可。

3.3 嫩江水面比降分析

水面比降指沿河流方向的水面高差与相应河流长度之比^[18]。嫩江段的水面比降一方面受上游来水的影响,一方面受二松来水顶托影响,当二松来水较大时将产生壅水作用,使得嫩江水面自下游向上游被逐渐抬高,比降减小。因此,可利用水面比降分析判断嫩江受顶托情况。

从3.2中对顶托距离的分析可知仅1020、1030、1050、2050四种工况下顶托到达大赉站,提取四种工况下大赉站及三岔河口处断面的日水位-流量过程,分析不同工况下大赉站受顶托最严重的时间,并利用该时间点两者的水位差值进行计算,得到嫩江下游的水面比降,计算结果见表6。可以看出,当嫩江上游来水处于某一洪水量级时,随着二松来水量级的增大,嫩江水面比降减小,说明嫩江受顶托程度随着二松来水量级的减小而减小;当二松来水

为某一洪水量级时,嫩江洪水量级增大,水面比降随之增大,说明随着嫩江自身来水的增大,二松对其顶托作用减弱。

表 6 不同洪水组合下嫩江水面比降
Tab. 6 The hydraulic slope in Nen river under different flood combinations

洪水组合	大赉-三岔河口水面比降(‰)
1020	0.0060
1030	0.0055
1050	0.0044
1050	0.0044
2050	0.0064

3.4 大赉受二松来水顶托的敏感性分析

弹性系数是因变量的变动比例与自变量变动比例之比,用来衡量一个变量的增幅对另一个变量增幅的依存关系,引入弹性系数作为二松来水对嫩江洪水位顶托影响的敏感性分析指标,它可以刻画大赉站洪水位与扶余洪水位的依存和影响关系^[19,20]。大赉站对扶余站水位的弹性系数定义如下:

$$\alpha = (dZ_{dl}/Z_{dl}) / (dZ_{fy}/Z_{fy}) =$$

$$(dZ_{dl}/dZ_{fy}) / (Z_{fy}/dZ_{fy})$$

式中: dZ_{dl} 、 dZ_{fy} 分别为大赉站、扶余站水位变化量。

对不同工况下大赉站对扶余站来水的弹性系数进行分析,计算结果见表 7。

表 7 大赉站对扶余站水位的弹性系数计算结果
Tab. 7 Elastic coefficients of Dalai station with respect to the water level of Fuyu station

洪水组合	弹性系数
1020	0.87
1030	0.84
1050	0.82
1050	0.82
2050	0.81

从表 7 中可以看出,大赉站对扶余站来水的弹性系数随着二松洪水量级的增大而减小,随着嫩江洪水量级的增大而减小。说明嫩江、二松小洪水量级下扶余站水位变化对大赉站水位的影响更明显。

3.5 大赉受顶托影响程度分析

壅水高度是反映河道某一断面处受顶托影响程度的直观判据,本文借助于大赉站水位流量综合关系线查算水位,以该水位作为模拟流量所对应的不受顶托水位,模拟水位与该水位的差值即大赉站受顶托影响高度^[21]。总结不同洪水组合下大赉站受顶托影响的程度,见表 8。

表 8 不同洪水组合下大赉站最大顶托量

Tab. 8 Maximum affected height at Dalai station under different flood combinations

洪水组合	最大顶托量/m	对应流量比(Q_F/Q_D)
1020	1.76	4.13
1030	1.93	4.79
1050	2.14	5.69
1050	2.14	5.69
2050	1.71	4.38

从表 8 可以看出,当嫩江洪水量级一定时,大赉站最大顶托量随二松洪水量级的增大而增大。对各工况下最大顶托量所在时刻扶余站与大赉站流量大小进行对比,可知当扶余站流量越大,大赉站流量相对越小时,其最大顶托量越大。说明大赉站的流速随着两站流量比的增大逐渐减小,洪水下泄变慢,水位壅高,顶托情况更为严重。二松洪水量级一定时,嫩江来水越大,大赉站最大顶托量越小,说明随着嫩江来水的增大,二松对大赉的顶托作用越来越弱。在嫩江 10 年一遇、二松 50 年一遇洪水组合下,二松来水对大赉站的顶托影响高度可达 2.14 m。另外,各工况下最大顶托量一般出现在扶余站涨水阶段,退水阶段则不再发生顶托现象。

4 结论

本文以二松洪水对嫩江洪水的顶托作用为例,构建了一维水动力模型对嫩江、二松不同设计频率洪水组合下的洪水演进情况进行模拟,突出分析嫩江下游各断面的水位流量关系、水面比降等,量化总结嫩江受二松洪水顶托的距离及顶托程度等,主要得出以下结论。

(1) 嫩江受顶托程度随二松来水量级的增大而增大,随嫩江上游来水的增大而减小;两江洪水量级较小时扶余站水位变化对嫩江的顶托影响更明显。

(2) 二松对嫩江洪水的顶托影响随着断面到三岔河口距离的增大而减小。受顶托距离的远近与两江洪水的相对大小密切相关,嫩江受顶托距离随着二松洪水量级的增大而增大。在嫩江 10 年一遇、二松 50 年一遇洪水组合下,顶托最远到达距三岔河口 55 km 处。此时只需重点考虑三岔河口至嫩江上游 55 km 段的洪水顶托影响即可。

(3) 当嫩江洪水量级一定时,大赉站最大顶托量随着二松洪水量级的增大而增大;二松洪水量级一定时,大赉站最大顶托量随嫩江上游来水的增大而减小。在嫩江 10 年一遇、二松 50 年一遇洪水组合下,二松洪水对大赉站的顶托影响高度可达 2.14 m。

参考文献(References):

- [1] 松辽委水文局. 松花江流域防洪规划[R]. 长春:水利部松辽水利委员会, 2007. (Hydrology Bureau of Songliao Water Resource Commission. Songhua River basin flood control planning[R]. Changchun: Songliao Water Resource Commission, 2007. (in Chinese))
- [2] 张桂芳. 胖头泡蓄滞洪区在哈尔滨市防洪体系中的地位与作用[J]. 黑龙江水利科技, 2016, 44(7): 177-178. (ZHANG G F. The status and role of the fat head flood storage and detention basin in Harbin flood control system[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2016, 44(7): 177-178. (in Chinese)) DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2016.07.065.
- [3] 盛滨龙, 盛长滨, 兰金生, 等. 松花江洪水对嫩江大赉站水位流量关系顶托影响分析[J]. 东北水利水电, 2012(10): 41-42, 72. (SHENG B L, SHENG C B, LAN J S. Jacking influence of Songhua River flood on stage discharge relation of Nenjiang Dalai station[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2012(10): 41-42, 72. (in Chinese)) DOI: 10.14124/j.cnki.dbslsd22.1097.2012.10.003.
- [4] 瞿月平, 黄勇, 何志高, 等. 长江回水顶托对汉江兴隆至汉川水沙过程的影响[J]. 中国水运, 2014(11): 62-64. (QU Y P, HUANG Y, HE Z G. Influence of backwater jacking in the Yangtze river on water and sediment processes from Xinglong to Hanchuan in Hanjiang river[J]. China Water Transport, 2014(11): 62-64. (in Chinese)) DOI: 10.13646/j.cnki.42-1395/u.2014.11.027.
- [5] 段士可, 褚裕良, 冯艳, 等. 松花江洪水对嫩江顶托特性的数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(23): 292-297. (DUAN S K, ZHU Y L, FENG Y. Numerical Simulation Study on the Backwater Effects of Songhua River Flood to Nen River[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(23): 292-297. (in Chinese))
- [6] 周苏芬, 叶龙, 刘兴年, 等. 嘉陵江与长江交汇水流顶托效应特性研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(51): 7-11. (ZHOU S F, YE L, LIU X N. Study on the Backwater Effects on Flow Characteristics at Confluence Zone Between Jialing River and Yangtze River[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(51): 7-11. (in Chinese)) DOI: 10.15961/j.jisu.2014.s1.002.
- [7] LAM B M P, NITTRUER J A, MCHRIG D, et al. Backwater and river plume controls on scour upstream of river mouths: Implications for fluvial deltaic morphodynamics[J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117, DOI: 10.1029/2011JF002079.
- [8] 李英士, 俞宏, 房公强. 哈尔滨洪水组成与上游水库调蓄作用分析[J]. 东北水利水电, 2014(5): 61-62, 67. (LI Y S, YU H, FANG G Q. Analysis of flood composition of Haerbin and regulation and storage function for upstream reservoirs[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2014(5): 61-62, 67. (in Chinese)) DOI: 10.14124/j.cnki.dbslsd22.1097.2014.05.054.
- [9] 吴天蛟, 杨汉波, 李哲, 等. 基于 MIKE11 的三峡库区洪水演进模拟[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 51-57. (WU T J, YANG H B, LI Z. Modeling of flood routing for Three Gorges reservoir area based on MIKE11[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 51-57. (in Chinese))
- [10] 陈德敏, 何建京, 陈鸣. 天然河道洪水演进数值模拟及动态可视化研究[J]. 人民长江, 2012, 43(2): 54-57. (CHEN D M, HE J J, CHEN M. Numerical simulation and dynamical visualization of flood routing in natural rivers[J]. Yangtze River, 2012, 43(2): 54-57. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2012.02.021.
- [11] 林波, 刘琪璟, 高鹤, 等. MIKE11/NAM 模型在挠力河流域的应用[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(5): 99-108. (LIN B, LIU Q J, SHANG H. Application of coupled MIKE11/NAM model in Naoli River Basin[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(5): 99-108. (in Chinese)) DOI: 10.13332/j.cnki.jbfu.2014.05.010.
- [12] 侯燕, 马山玉. 基于 MIKE 与 GIS 的城市洪水风险分析及应用[J]. 水电能源科学, 2016, 34(11): 72-76. (HOU Y, MA S Y. Urban flood risk analysis based on MIKE and GIS and its application[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(11): 72-76. (in Chinese))
- [13] 潘兴瑶, 李其军, 陈建刚, 等. 城市地区流域洪水过程模拟: 以清河为例[J]. 水力发电学报, 2015, 34(6): 71-80. (PAN X Y, LI Q J, CHEN J G. Urban area watershed flood simulation with hydraulic model: A case study of Qinghe river in Beijing[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(6): 71-80. (in Chinese))
- [14] 徐祖信, 卢士强. 平原感潮河网水动力模型研究[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(2): 176-181. (XU Z X, LU S Q. Hydrodynamic model for tidal river network[J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(2): 176-181. (in Chinese))
- [15] 谭毅源, 韩宗德, 李玉梁, 等. 基于 MIKE11 软件的复杂生态河道水面线计算[J]. 水利建设与管理, 2015(3): 30-32. (TAN Y Y, HAN Z D, LI Y L. Calculation of complex ecology river water surface line based on MIKE11 software[J]. Water Resources Development & Management, 2015(3): 30-32. (in Chinese))
- [16] 靳宏伟. 松花江流域中小洪水糙率分析[J]. 东北水利水电, 2008, 26(7): 33-34. (JIN H W. Roughness analysis of medium and small flood in Songhua river basin[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2008, 26(7): 33-34. (in Chinese))
- [17] 冯持, 张红艳, 孙建儒. 不同因素影响条件下的水位流量关系[J]. 东北水利水电, 2012(1): 48-49. (FENG C, ZHANG H Y, SUN J R. The relationship between water level and flow under the influence of different factors[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2012(1): 48-49. (in Chinese)) DOI: 10.14124/j.cnki.dbslsd22.1097.2012.01.004.
- [18] 姚允龙. 长江下游干流南京至镇江河段水面比降分析[J]. 水文, 2008, 28(2): 78-79, 29. (YAO Y L. Analysis of surface slope in Nanjing-Zhenjiang reach of the Yangtze River[J]. Hydrology, 2008, 28(2): 78-79, 29. (in Chinese))
- [19] 胡国建, 丁涛, 尤爱菊, 等. 钱塘江洪水顶托对浦阳江洪水位的影响研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(11): 11-14. (HU G J, DING T, YOU A J. Influence of Qiantangjiang estuary flood backwater on flood level of Puyang River[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(11): 11-14. (in Chinese))
- [20] 戴晓鹏. 弹性理论在《经济学》教学之外的创新应用[J]. 农村经济与科技, 2016, 27(17): 292-293. (DAI X L. The innovation of elasticity theory beyond the teaching of Economics[J]. Rural Economy and Science Technology, 2016, 27(17): 292-293. (in Chinese))
- [21] 吴根, 张亮, 同斌, 等. 岷、横江来水对向家坝水文站顶托影响分析[J]. 人民长江, 2014, 45(12): 59-61. (WU Y, ZHANG L, TONG B. Analysis on backwater effect of incoming water from Minjiang River and Hengjiang River on Xiangjiaba[J]. Yangtze River, 2014, 45(12): 59-61. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2014.12.005.