

冰期河流弯道冰水动力学行为研究

罗红春¹, 冀鸿兰¹, 牟献友¹, 郜国明², 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. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450000)

摘要: 以黄河什四份子弯道为研究对象, 基于2019-2020年度的凌情监测影像及现场试验数据, 分析了河流弯道冰水动力学行为特征。结果表明: 上宽下窄的河道形态是造成弯道卡冰的主要原因, 流凌-封河阶段, 弯顶节点工程对水流的顶托作用促进了上游回流区的形成; 受弯道离心力作用, 河冰聚集于河道凹岸一侧, 并在回流区堆积形成冰桥, 从而缩小了断面过冰面积, 河道逐渐封冻; 弯顶下游流速大且来冰量少, 形成清沟, 主流向河中发展; 冰塞堆积于弯顶上游凹岸主河槽内, 水流被挤压至凸岸非冰塞区, 弯道主流易位; 在稳封期, 河道冰水动力特征基本不再变化, 在解冻开河期, 凸岸非冰塞区流速较大, 主流区冰盖优先解冻且沿主流输移, 回流区冰盖最后消融, 河道主流逐渐恢复至畅流阶段, 整体呈复归式。

关键词: 冰期; 河冰; 冰水动力学行为; 什四份子弯道; 黄河

中图分类号: TV875; TV133

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)04-0149-07

Behavior analysis of ice and water flow dynamics in a river bend during freezeup period

LUO Hongchun¹, JI Honglan¹, MOU Xianyou¹, GAO Guoming², ZHANG Baosen²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Based on the monitored images and field experiment data of 2019-2020, the behavior characteristics of the ice and water flow dynamics of the Shisifenzi Bend in the Yellow River was analyzed. Results show that the main reason for the ice jam in the bend is the morphology of the river channel, which is wide at the upstream and narrow at the downstream. During the open flow to freezeup period, the project at the bend apex promoted the formation of upstream backflow area by supporting the water flow. Affected by the centrifugal force of the bend, the river ice accumulated on the concave bank of the river and formed an ice bridge, which reduced the ice area of the river, then the river gradually froze up. In the downstream of the bend apex, the flow velocity was larger and lack of adequate ice, so the open flow area formed and the mainstream developed towards the middle of the river. The ice jam accumulated in the main channel of the concave bank of the bend apex, so the flow was squeezed to the non-ice jam area of the convex bank, and the mainstream of the river channel changed its path. The hydrodynamic characteristics of the river ice basically did not change during the stable freezeup period. During the breakup period, the non-ice jam area on the convex bank had a high flow velocity and gave priority to thawing, then the ice transported along the mainstream line, the ice cover in the backflow area melted the last, and the mainstream of the river gradually returned to the free-flowing status, showing a regression trend.

Key words: freezeup period; river ice; behavior of ice and water flow dynamics; Shisifenzi Bend; the Yellow River

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-07-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508401); 国家自然科学基金项目(51969020); 2018年自治区应用技术与开发基金项目(201802104)

作者简介: 罗红春(1993-), 男, 湖北潜江人, 博士研究生, 研究方向为河冰水力学及泥沙运动力学。

通讯作者: 冀鸿兰(1970-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为河冰水力学及泥沙运动力学。

1 研究背景

我国北纬 30° 以上的河流在冬季都会面临河冰问题^[1],河冰引起的凌汛灾害方式主要有冰塞及冰坝两种,而冰塞和冰坝的高发区具有典型的河道特性,如河流弯道、桥梁、水库回水末端等^[2]。在黄河干流内蒙古巴彦高勒—头道拐河段,较大的弯道就有近70处,随着上游大中型水库对水量的调匀,黄河内蒙古河段淤积明显,平滩流量显著减小^[3],流量的坦化致使河冰在弯道等处更易堆积而演化成冰塞和冰坝,对凌情极为不利。

国内外已在河冰研究领域取得了长足的进展^[4],内容涉及河冰的热力过程^[5]、预测预报^[6]、数值模拟^[7]、观测技术^[8]及破冰防凌^[9]等多个方面,但是对于天然河道冰凌的动力输移过程的研究还不够透彻,因地形与水流的差异性,弯道河冰运动往往更为复杂。Urroz等^[10-11]采用聚乙烯材料模拟冰块,在室内开展了弯槽冰塞堆积试验,发现了弯道冰塞的两种主要机制,并得出了沿凸岸的冰盖厚度最大的结论,后续被Sui等^[12]通过物理模型试验所验证;Wang等^[13]通过设定不同的流量条件,研究了弯道堆冰的现象和机理,发现了沿凸岸堆积的冰通常比沿凹岸的更厚,弯道下游的最大冰厚出现在靠近凸岸的滩地区域;李红芳等^[14]、李超等^[15]通过对三湖河口流凌至封河期间的冰情观测,分析了弯道卡冰机理,在流凌期,大片岸冰在凸岸附近生成,卡冰封河出现在凸岸顶端下游束窄断面处;赵水霞等^[16]通过监测黄河什四份子弯道冰情,研究了弯道河冰生消及冰塞的形成过程,得出了弯道凹岸处冲积岸冰及凸岸静态岸冰的生长造成河面宽度显著减小,从而成为弯道卡冰位置的结论。

冰盖与河床共同构成了河道的双边界条件,极大地改变了水流结构,而水流的变化又会引起河冰运动的相应调整,这种相互影响的复杂过程在目前的研究中还鲜有体现。Sui等^[17]在黄河石窑卜河段进行了冰塞的现场观测和实验室模型研究,发现了冰下存在两个横向环流;Demers等^[18-19]在加拿大内盖特河的弯曲河段进行了实地调查,发现了天然河道冰盖下的双螺旋流结构,这些结果与早期Urroz等^[11]的室内模型试验结果具有一致性;Lotsari^[20]通过对普尔曼基河中的3个弯道进行冰期野外试验,得出了冰期弯道水流高速区随断面变化而变化的规律。目前,虽然在弯道河冰研究方面取得了一定的进展^[21],但考虑到天然河道与室内弯槽的差异性,

对天然弯道整个冰期的河冰输移演变规律的认识还需进一步加深,同时,已有研究多关注单个时间点的冰下水流流速,缺乏对冰期弯道水动力结构调整的描述。

因此,为掌握冰期弯道的输移演变过程及水动力特征,选择黄河内蒙古段什四份子弯道为研究对象,通过收集野外监测影像,绘制不同时期的河道冰图,结合稳封阶段的现场试验,分析冰期弯道冰水动力学的行为过程,研究结果可为黄河防凌提供一定的理论依据。

2 研究区概况及数据来源

2.1 研究区概况

什四份子弯道位于黄河内蒙古段下游的呼和浩特市托克托县段($40^{\circ}17'39''N, 111^{\circ}2'53''E$)。河道走势为由上游西北向急剧转为下游东南向,呈“几”字形分布,进出口方向夹角为 120° ,河道比降约 0.1% ,河宽约200~600m。图1展示了什四份子弯道及野外试验设定的断面位置与部分测点的细节。什四份子河段所在区域属于典型的大陆性季风气候,历年凌汛时间多出现在11月下旬至次年3月中下旬,冰期持续超过100d。多年(1986-2020年)平均流凌、封河及开河日期分别为11月22日、12月11日、3月17日,且最大凌峰流量(头道拐水文站实测值,位于什四份子弯道下游约4km)基本出现在开河期。在冰封期,什四份子弯道两岸岸冰的生长束窄了河面宽度,降低了水流的输冰能力,因此容易卡冰封河,且该弯道常成为内蒙古河段的首封位置;弯顶附近断面束窄,冰下过流能力减小,加之冰盖分布的不均匀性,极大地改变了水流流速分布;同时,该弯道上宽下窄的河道形态为冰塞的形成创造了有利的地形条件。

2.2 数据来源

2019-2020年度的河冰监测影像来源于定点式全天候凌情动态数据监测采集装备^[22],该装备于2019年11月在什四份子弯道安装,监测装备系统获取的监测影像及系统界面如图2所示。该装备同时具有实时监测冰厚、水温、水位等的功能,实现了视觉河流与监控数据的无缝衔接。

稳封期弯道冰水情数据来源于现场实测,按照《河流冰情观测规范》(SL 59—2015)^[23]要求,2020年1月13日-20日在弯道顺水流方向依次布设了6个大断面(图1),其中断面1、2为完整断面,下游4个断面因清沟影响并未获得整个断面的数据。各

断面间平均间隔为 200 m,上游断面 1、2、3 之间的间距较大,下游断面 4、5、6 之间的间距较小。每个断面上每隔 10 m 用铁钎打一冰孔,主槽堆积冰部分则按间距 20 ~ 40 m 布设,断面 1 ~ 6 分别布设了 24、51、31、23、13、12 个冰孔,共计 154 个。采用声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 技术进行测流,通过下放 ADCP 至冰盖底部测量流速及水深。由于河道存在大量冰花,冰花主要分布在主槽内通过水流运输,逐渐堆积增厚,当遇到冰花层时,因冰花多浮在冰底且具有一定的厚度,同时,ADCP 需要穿过冰花才能获取水流流速,故可通过 ADCP 下潜的深度减去冰厚计算出冰花厚度;冰厚则通过“L”形量冰尺(可勾住冰盖底部)测量,进而可掌握冰盖底部的位

置,沿河宽方向测量可获得断面冰花分布。对每个断面的冰孔从弯道凹(左)岸至凸(右)岸进行编号。

3 结果与分析

3.1 冰期弯道河冰输移演变过程

根据河冰监测影像及野外实拍图像,通过 CAD 绘制成统一的冰情图,对比不同阶段的河冰分布,分析整个冰期(流凌-封冻-开河)什四份子弯道河冰输移演变的动力过程,如图 3 所示。其中,图 3(a)与图 3(b)为流凌期弯道冰凌分布情况;图 3(c)与图 3(d)为初封期弯道冰凌分布情况;图 3(e)与图 3(f)为稳封期弯道冰凌分布情况;图 3(g)与图 3(h)为开河期弯道冰凌分布情况。



图 1 黄河内蒙古段什四份子弯道及断面测点布置



图 2 定点式全天候凌情动态数据采集装备监测影像及系统界面

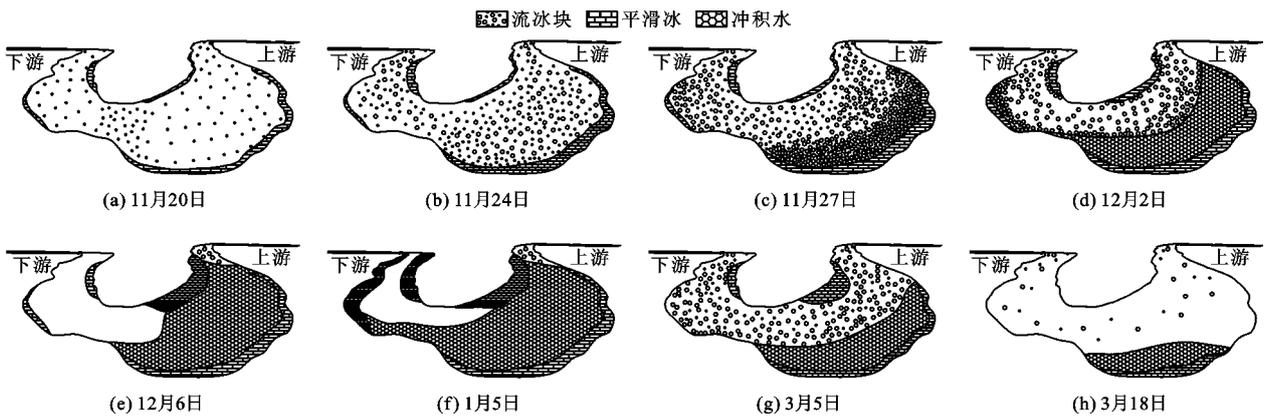


图 3 2019 - 2020 年度黄河内蒙古段什四份子弯道河冰演变过程

由图3(a)可以看出,气温转负,水体与大气不断进行热交换,水体持续失热引起水流相变,冰晶开始生成,对于岸边的水体,由于水流流速较低,且岸边土壤失热过程比水流更快,因此河岸附近的冰块更容易生成,这些冰块主要是以热力形式生成的平滑岸冰;对于河道内的冰凌,冰晶相互黏连碰撞形成体积较大的冰盘并上浮至水体表面,至此,河道开始进入流凌期。流凌初始,河道内冰盘较少,个体也不大,冰盘直径约10 cm,随着气温持续下降,水体失热速度加快,冰盘逐渐增多;受弯道离心力作用,部分冰盘随水流向弯道凹岸一侧输移,因此,凹岸河槽的流凌密度相对较大;整体上,因流凌期的水体均处于敞露状态,河道每一处都在发生水-冰的相变转换,故冰盘基本覆盖整个河道;另外,考虑到什四份子弯道上宽下窄的河道形态,冰盘在弯顶附近输移会明显受阻,所以弯顶附近的冰盘分布更为密集。

由图3(b)可以看出,气温持续保持较低的水平,河道产冰量也逐渐增加,流凌密度增大至5%~10%;两岸岸冰也开始向河道内发展,凹岸河槽流速较大且冰凌相互挤压,易形成冲积岸冰,凸岸河槽流速较低,易形成平滑岸冰,岸冰发展速度及长度取决于气温及流速,根据Michel等^[24]的研究结果,当水流流速大于0.07 m/s时,平滑岸冰停止横向增长,介于0.07~0.40 m/s时,冲积岸冰形成,大于0.40 m/s时,冲积岸冰停止增长。因河道冰量的增多,增加了冰盘之间的碰撞几率,冰盘直径及面积也逐渐扩大,河道敞露水面的宽度逐渐被压缩,过冰面积逐渐缩小;此阶段的冰盘也基本覆盖整个河道,且部分集中于河道凹岸侧。

由图3(c)可以看出,当流凌密度达到一定规模时(如50%以上),由于运输冰凌的水流动能有限,河道输冰能力开始降低,此时的冰盘均为大冰盘,由于体积较大,推动冰盘所需的能量较大,因此,冰盘更容易在低速区停留。由于什四份子弯道弯顶节点工程对水流的顶托作用,在弯顶上游形成明显的回流区,冰盘容易受离心力影响在该回流区停留或回旋,流动的冰盘逐渐与岸冰摩擦接触,最终衔接形成冰桥,河道逐渐封冻;当河道凹岸停留的冰盘较多时,过流面积减少,输冰能力减弱,上游来冰更容易发生溯源堆积,该时期内,可明显观察到弯道凹岸相当数量的冰盘,且冰盘基本呈弧形向上游堆积发展。

由图3(d)可以看出,随着上游来冰量的增加,冰盘之间相互碰撞挤压,河道凹岸原有的已停留的冰盘被上游的冰盘挤压,出现明显的紧冰作用,至

此,冰体之间的强度开始逐渐增大,冰盘与岸冰之间的衔接也更为紧密。当水流流速较大时,冰盘的流速也较大,冲量较大,有时会将已封冻的岸冰撞起形成参差交错的冲击岸冰,因此,不同年份的岸冰形状会有所不同。

由图3(e)可以看出,弯顶上游凹岸的冰面面积逐渐增加,一方面缩小了河道的过流/过冰面积,另外则增加了水流阻力,河道输冰能力进一步降低;随着上游来冰的持续供给,冰盘发生堆积的几率进一步增大,当凹岸堆积的冰盘与凸岸逐渐扩大的平滑冰相连时,河冰覆盖整个河道断面,至此,河道开始进入稳封期。封冻的河道阻碍了上游来冰继续向下游输移,故从稳封期开始,弯顶下游主河道内基本不出现流动的冰盘,但是在敞露的区域,水体降温过程中还是会生成部分水内冰,只是很难在短距离内汇集成较大的冰盘,因此,水面上基本不见明显的流冰现象。对于封河上首,上游来冰会在水力条件作用下发生下潜,下潜的冰块/冰花会继续向已封冻的区域输移,当条件合适时,河道内会出现冰塞现象,进一步削弱输冰能力。

由图3(f)可以看出,由于累积负气温作用持续加强,弯顶下游的岸冰面积也逐渐发展扩大,同时,局部封冻冰面的冰缘处冰厚不大,冰水交界处继续进行着热交换,水体相变过程仍然在发生;同时,冰盖开始朝三维方向发展:纵向发展长度、横向发展宽度、垂向发展厚度;随着冰面面积的继续扩大,弯顶下游的明流区(清沟)开始缩小,其面积大小主要取决于水力条件,即水流流速越大,清沟越不容易形成冰面,其面积越大,反之,清沟面积越小,但清沟的变化过程较为缓慢。稳封期,由于外界热力条件与河道水力条件基本稳定,所以河道冰情不会再发生较大的变化,除非稳封期内的气温或流量剧烈波动,河道可能会多封多开。

由图3(g)可以看出,进入开河期,气温逐渐转正,冰盖开始消融,因岸冰主要是由热力条件形成,故其消融速度较快;对于封冻区域,由于热力条件一致,故消融速度主要取决于水流流速,在主流区,河冰消融速度较快,冰块的结构强度在太阳辐射影响下显著降低,且结合上游来冰的冲击作用,冰块更容易破坏解体,冰裂缝成型速度加快,冰强度明显降低;弯顶上游中部和右侧河道内的冰盖解体速度最快,并迅速随水流输移至弯顶明流区,河道敞露面积增大,输冰能力增强,已解体的冰块沿开通的主河道向下游输移。

由图 3(h)可以看出,随着气温持续上升,河冰消融速度逐渐加快,冰水出现相变转换,加之滩地的冰盖也消融成水并注入主河道内,河道槽蓄水量得到充足释放的同时,冰盖转化成大量的河道水量,河道流量激增形成明显的凌峰,流速明显增加,冰盖解体速度明显加快,输冰能力显著增强,岸冰消失,河道内仅剩零星的冰块及凹岸低速区较为完整的冰面。

整个冰期内,什四份子弯道弯顶下游冰面面积较小,冰盖多为平滑冰,基本以热力形式生长或消融;在弯顶上游,河道封开河径向顺序基本相反,即凹岸河槽最先封冻,中右侧河槽最后封冻,但中右侧河槽最先解冻,而凹岸河槽最后解冻。

3.2 冰封期弯道水动力特性

根据实测结果,断面 1~3 区域存在局部冰塞,冰塞趾部位于断面 2 附近^[25],因冰花密实,ADCP 不易施测,故冰塞区的流速未能测取。选取弯道典型断面的垂线平均流速进行分析,如图 4 所示。

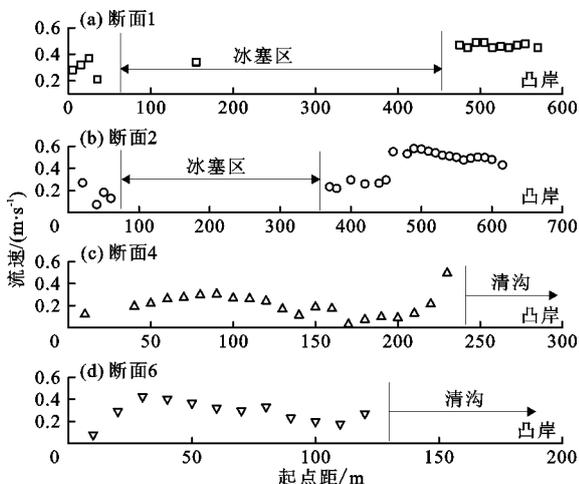


图 4 冰封期什四份子弯道典型断面的垂线平均流速径向分布

由图 4(a)、4(b)可以看出,断面 1 和 2 冰花堆

积严重,冰塞在凹岸主槽堆积后,水流阻力增大,主槽近岸区域水流流速降低(平均 0.16 m/s);同时,过流面积减小,冰封期的水流受冰塞挤压影响,主流逐渐向凸岸逼近,故凸岸侧水流流速较大(平均 0.48 m/s)。这实际也是水流能耗的自我调整过程,在行进过程中,为减小自身能耗,水流会避开有明显阻力的冰塞区域,因此,水流集中于无冰塞的凸岸河槽一侧,弯道主流易位。

由图 4(c)、4(d)可以看出,断面 4 和 6 区域,冰花堆积程度减小,冰花层厚度沿程减小,同时断面清沟(亮子)宽度也逐渐增大,考虑到断面 4 凹岸河槽附近为回流区,故水流流速基本小于 0.2 m/s,但靠近清沟附近的水流流速显著增大。上游冰塞对弯顶附近的水流影响较小,弯顶主槽附近流速逐渐恢复(平均 0.35 m/s);沿河宽方向,水流流速均保持较大的水平,整体变幅不大,但在靠近清沟处,流速也开始增大,一方面,清沟内的水流流速本身比冰盖下的水流流速大,且靠近清沟处的冰盖厚度较薄,冰盖阻力较小;另外,清沟水流与附近的冰盖流存在动量交换,因此,冰盖越靠近清沟,冰下水流流速越大,增幅也越明显,这实质上也是局部冰盖促进冰下水流向明流区集中的结果。可见,较强的水动力条件是清沟不易封冻的主要原因,加之受上游冰塞及冰盖卡冰的影响,冰块难以被携带至下游,输冰量降低也是清沟形成的原因之一。

3.3 主流流线分布

冰盖及冰塞的存在,改变了河道的主流流线分布,主流流线亦即水动力轴线,反映了水流的最大动量所在位置,其变化对河床冲淤变化有重大影响^[26],对于含冰塞的河道,主流流线变化还能在一定程度上反映冰塞的堆积区域。畅流期与冰封期什四份子弯道的主流流线分布如图 5 所示。

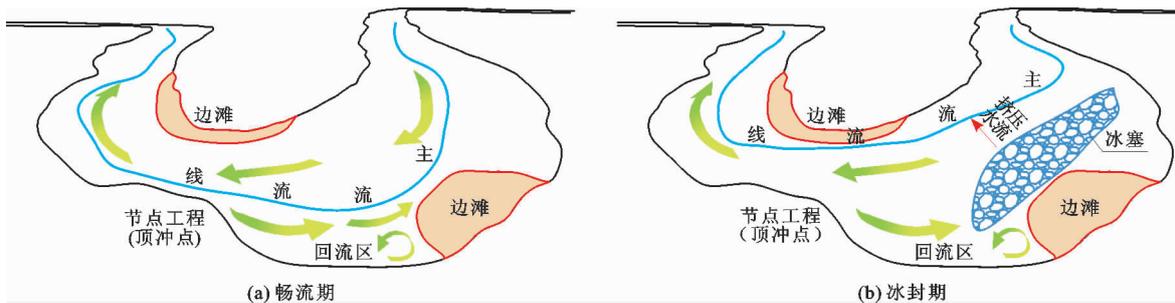


图 5 畅流期与冰封期什四份子弯道主流流线分布

由图 5(a)可以看出,畅流期,什四份子弯道进出口主流趋中;入弯一弯顶段,受弯道离心力作用,

水流逐渐向凹岸靠近;弯顶一出弯段,主流贴近凹岸,且在弯顶及其下游达到离岸边最近距离,该区域

属于高剪力区,也是最容易发生崩岸的部位,与畅流期实际观测的护岸工程崩塌后退现象吻合;由于弯顶节点工程对水流的顶托作用,弯顶上游出现较大的回流区,与主流相遇后,泥沙沉降在弯顶上游并逐渐形成浅滩,对于弯顶对应的凸岸区域,则因为弯道环流作用促使泥沙淤积在凸岸一侧,形成一定规模的浅滩,这些浅滩也是冰盖最容易附着的位置,具有加速河道卡冰封冻的作用。

由图5(b)可以看出,冰封期,由于冰盖的存在,湿周增加,水流阻力增大,加上流量减小,故水流流速也明显减小;在弯内,由于冰塞及清沟的存在,水动力轴线出现较大的调整,体现为:含冰塞的区域,过流面积减小,水流集中于无冰塞区,主流进一步向凸岸发展,凸岸附近的浅滩会受到水流的切割作用;弯顶及其下游的清沟区域,因水流流速较大,故主流也靠近凸岸一侧,在封冻期冰塞与清沟的综合作用下,最终导致弯道主流易位,由于弯顶下游无冰塞存在,凹岸有一定面积的冰盖,凸岸仅有少部分岸冰,清沟多分布于河道凹岸及河道中部,因此弯顶下游的主流变化不大,略有向河道中部集中的表现。

4 结 论

根据2019-2020年野外原型观测,分析了什四份子弯道河冰输移演变的全过程,同时辨识了弯道冰盖及冰塞影响下的水流动力特征,得出以下结论:

(1)上宽下窄的河道形态是造成弯道卡冰的主要原因,弯顶节点工程对水流的顶托作用促进了上游回流区的形成,该回流区是冰块堆积、形成冰桥、促进卡冰封河、形成初始冰塞的重要区域。

(2)冰塞堆积于弯顶上游凹岸主河槽内,水流被挤压至凸岸非冰塞区,弯道主流易位;弯顶下游流速较大且缺乏足够的来冰量是形成清沟的根本原因,受岸冰束流影响,主流向河中发展。稳封期内,冰盖与水流变化幅度较小,河道冰水动力特征基本不再变化。

(3)解冻开河期,弯顶上游凸岸非冰塞区流速较大,冰盖优先解冻,冰块沿主流线输移;回流区流速很小,冰盖最后消融,河道主流逐渐恢复至畅流阶段,封开河时期的水动力学过程呈复归式。

参考文献:

[1] ROKAYA P, BUDHATHOKI S, LINDENSCHMIDT K E. Ice-jam flood research: A scoping review[J]. *Natural Hazards*, 2018, 94: 1439-1457.

[2] 黄强,李群,张泽中,等. 龙刘两库联合运用对宁蒙河段冰塞影响分析[J]. *水力发电学报*, 2008, 27(6): 142-147.

[3] 姚惠明,秦福兴,沈国昌,等. 黄河宁蒙河段凌情特性研究[J]. *水科学进展*, 2007, 18(6): 893-899.

[4] 杨开林. 河渠冰水力学、冰情观测与预报研究进展[J]. *水利学报*, 2018, 48(1): 81-91.

[5] BELTAOS S. Progress in the study and management of river ice jams[J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2008, 51(1): 2-19.

[6] GUO Xinlei, WANG Tao, FU Hui, et al. Ice-jam forecasting during river breakup based on Neural Network Theory [J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2018, 32(3): 04018010.

[7] SHEN H T. Mathematical modeling of river ice processes [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 62(1): 3-13.

[8] FU Hui, Liu Zhiping, GUO Xinlei, et al. Double-frequency ground penetrating radar for measurement of ice thickness and water depth in rivers and canals: Development, verification and application [J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2018, 154(10): 85-94.

[9] 刘之平,王涛,郭新蕾,等. 黑龙江防凌爆破试验研究[J]. *水利学报*, 2017, 48(3): 253-260.

[10] URROZ G E, ETTEMA R. Bend ice jams: Laboratory observations [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1992, 19(5): 855-864.

[11] URROZ G E, ETTEMA R. Small-scale experiments on ice jam initiation in a curved channel [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1994, 21(5): 719-727.

[12] SUI Jueyi, KARNEY B W, SUN Zaochu, et al. Field investigation of frazil jam evolution: A case study [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 128(8): 781-787.

[13] WANG Jun, Sui Jueyi, ZHANG Hongya, et al. Mechanisms of ice accumulation in a river bend—An experimental study [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2012, 27(4): 521-537.

[14] 李红芳,张生,李超,等. 黄河内蒙古段弯道河冰过程与卡冰机理研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(1): 107-112.

[15] 李超,李畅游,李红芳. 黄河(内蒙古段)弯道卡冰过程及数值模拟研究 [J]. *水力发电学报*, 2015, 34(10): 103-110.

[16] 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.

[17] SUI Jueyi, WANG Jun, BALACHANDAR R, et al. Accumulation of frazil ice along a river bend [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2008, 35(2): 158-169.

[18] DEMERS S, BUFFIN-BELANGER T, ROY A G. Heli-

- cal cell motions in a small ice-covered meander river reach[J]. *River Research and Applications*, 2011, 27(9): 1118 - 1125.
- [19] DEMERS S, BUFFIN - BELANGER T, ROY A G. Macro-turbulent coherent structures in an ice-covered river flow using a pulse-coherent acoustic Doppler profiler [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(9): 937 - 946.
- [20] LOTSARI E, KASVI E, KAMARI M, et al. The effects of ice cover on flow characteristics in a subarctic meandering river [J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2016, 42(8): 1195 - 1212.
- [21] WANG Jun, CHEN Pangpang, SUI Jueyi. Progress in studies on ice accumulation in river bends[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2011, 23(6): 737 - 744.
- [22] 张宝森. 定点式全天候凌情动态数据采集技术及装备[J]. *人民黄河*, 2021, 43(1): 2.
- [23] 中华人民共和国水利部. 河流冰情观测规范: SL 59—2015[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [24] MICHEL B, MARCOTTE N, FONSECA F, et al. Formation of border ice in the St. Anne River [C] // *Proceedings of the Workshop on Hydraulics of Ice-covered Rivers*. Edmonton, Canada, 1980.
- [25] 罗红春, 冀鸿兰, 郜国明, 等. 黄河什四份子弯道冰期水流及冰塞特征研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(9): 1089 - 1100.
- [26] 王卫红, 李舒瑶, 张晓华. 黄河下游游荡性河段主流线调整与水沙关系研究[J]. *泥沙研究*, 2006, 31(6): 37 - 43.

(上接第 148 页)

- [9] 闵毅松, 刘轶琨. 洪泽湖水污染事故起因与防范探讨[J]. *污染防治技术*, 2003(1): 57 - 59.
- [10] 郝达平. 洪泽湖水环境现状评价及水污染分析[J]. *江苏水利*, 2005(11): 32 - 34.
- [11] 叶春, 李春华, 王博, 等. 洪泽湖健康水生态系统构建方案探讨[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(5): 725 - 730.
- [12] 李为, 都雪, 林明利, 等. 基于 PCA 和 SOM 网络的洪泽湖水质时空变化特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(12): 1593 - 1601.
- [13] 崔彩霞, 花卫华, 袁广旺, 等. 洪泽湖水质现状评价与趋势分析[J]. *中国资源综合利用*, 2013, 31(10): 44 - 47.
- [14] 王霞, 沈红军, 刘雷, 等. 洪泽湖水质特征分析及评价[J]. *环境与发展*, 2019, 31(9): 11 - 13 + 15.
- [15] 徐亚东, 毛晓文. 洪泽湖北部主要入湖河道阵发性水质污染原因分析及预防措施[J]. *江苏水利*, 2020(11): 4 - 8.
- [16] YE Xuchun, ZHANG Qi, LIU Jian, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 494: 83 - 95.
- [17] 罗全胜, 许新勇. 黄河内蒙河段水流数值模拟研究[J]. *水利水运工程学报*, 2014(5): 95 - 99.
- [18] 李云良, 姚静, 李梦凡, 等. 鄱阳湖水流运动与污染物迁移路径的粒子示踪研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(11): 1748 - 1758.
- [19] 徐乐, 牧振伟, 李园园, 等. 基于 CCHE 的塔什米里克引水枢纽二维水流数值模拟[J]. *水利与建筑工程学报*, 2016, 14(2): 83 - 89.
- [20] 许泽星, 郑媛予, 关见朝, 等. 岷江都江堰河段交汇区水流运动特性数值模拟[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(3): 59 - 66.
- [21] 郝敏霞. 黄河宁夏四排口河段防洪工程丁坝附近流场的数值模拟研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [22] 刘鑫, 李春光, 兰斌, 等. 基于 MIKE3 的黄河宁夏四排口河段水动力模拟[J]. *人民珠江*, 2020, 41(7): 33 - 38.
- [23] 王飞, 王冬梅, 谢义林, 等. 基于 GPS 的湖泊巡查 GIS 研究[J]. *微型机与应用*, 2012, 31(14): 51 - 53 + 57.
- [24] 汪德耀. 计算水力学理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [25] 张书农, 华国祥. 河流动力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [26] HE Cheng, DROPPA I. Numerical modeling of fine particle plume transport in a large lake[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2011, 37(3): 411 - 425.
- [27] 程文辉, 王船海, 朱琰. 太湖流域模型[M]. 南京: 河海大学出版社, 2006.