

黄河什四份子弯道冰下环流特性研究

王 骁¹, 罗红春¹, 冀鸿兰¹, 李扒拴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. 呼和浩特市托县乡村振兴统筹发展中心, 内蒙古 托克托 010200)

摘要:为分析弯道冰下水流结构与环流分布特征,利用声学多普勒流速剖面仪(ADCP)对什四份子弯道的冰下流场进行了测量,通过测量弯道的冰厚、水深、流速,分析了弯道断面冰情与冰下环流分布情况。结果表明:弯道冰下水流并不完全呈现双螺旋结构,冰封期环流集中在弯顶凹岸侧和弯顶后凸岸侧,易产生在相邻冰塞之间或是冰塞与河岸之间;环流区域环流旋度沿水深线性增大,非环流区域环流旋度则线性减小,同一位置的不同流层环流旋度大小分布基本一致,弯道后半段大于前半段,弯顶前凹岸侧大于凸岸侧,最大环流旋度位于弯顶凹岸侧,约为0.91。

关键词:冰盖; 弯道水流; 横向环流; 环流旋度; 什四份子

中图分类号:TV133 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)04-0031-06

Experimental study on characteristics of subglacial circulation for Shisifenzi bend flow in Yellow River//WANG Xiao¹, LUO Hongchun¹, JI Honglan¹, LI Bashuan² (1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Hohhot Togtoh County Rural Revitalization Coordinated Development Center, Togtoh 010200, China)

Abstract: In order to analyze the subglacial flow structure and circulation distribution characteristics in a river bend, the flow field in the Shisifenzi bend was measured using acoustic Doppler current profiler (ADCP). By measuring the ice thickness, water depth and velocity of the bend, the ice condition and the distribution of the subglacial circulation in the bend section were analyzed. The results show that the flow under the ice in the bend does not completely present a double helix structure. During the freezing period, the circulation is concentrated on the concave side of the bend top and the convex side of the bend top, which is easy to occur between adjacent ice jams or between ice jams and river banks. The circulation curl in the circumfluence region increases linearly along the water depth, while the circulation curl in the non-circulation region decreases linearly. The distribution of circulation curl in different flow layers at the same position is basically the same. The circulation curl in the second half of the bend is larger than the first half and its value in the concave bank side is larger than the convex bank side, with the maximum circulation curl value of about 0.91 located in the concave bank side of the bend.

Key words: ice cover; bend flow; transverse circulating current; circulation curl; Shisifenzi

冰下弯道水流运动一直是河冰研究者关注的课题之一。水流经过弯道时,受离心力作用,平衡状态改变,产生垂直于河岸的横向环流。明渠条件下,横向环流可以表征为上层流体流向凹岸,下层流体流向凸岸^[1]。覆冰条件下,近冰流与近床流流向凸岸,而冰盖和河床之间的水流流向凹岸。当横向环流与纵向水流结合,便产生了螺旋流。弯曲河道的横向环流与螺旋流运动引起的横向输沙不平衡会影响弯道河床的演变与发展。

明渠条件下弯道环流研究较为成熟,檀会春

等^[2]、罗平安等^[3]基于模型试验分别剖析了弯道、连续微弯弯道环流的形成机理与水力特性;易雨君等^[4-5]、严培等^[6]分别开展了弯道水流二维、三维的数值模拟研究,模拟得到弯道环流水力特性、横向输沙特性及弯道河床冲淤变形;孙东坡等^[7-9]将弯道横向流速公式与泥沙横向输移结合起来,建立了横向输沙的计算公式。然而关于冰盖下弯道环流研究鲜有涉及。Urroz 等^[10]通过弯道冰塞模型试验,发现冰盖下出现了镜像对称的螺旋流,其流动方向相反;Sui 等^[11]在黄河石窑卜弯道的野外观测证实了冰盖

基金项目:国家自然科学基金项目(51969020,52169017);2018 自治区应用技术与开发资金项目(201802104)
作者简介:王骁(1999—),男,硕士研究生,主要从事河冰动力学研究。E-mail:416642010@qq.com
通信作者:冀鸿兰(1970—),女,教授,博士,主要从事寒区河冰过程与河流泥沙动力学研究。E-mail:honglanji@sina.com

下有两个横向环流;Demers 等^[12]基于小型连续弯道的原型观测,验证了 Urroz 等^[10]和 Sui 等^[11]的结论;Lotsari 等^[13]通过连续两年冰封期观测,发现弯道双螺旋结构并非一直出现;李明康等^[14]通过数值模拟,得出流凌的存在会影响环流发展的结论。由于弯道水流复杂多变的三维模式,对于冰封期弯道水流特性的研究较少,天然弯道冰下水流特性特别是冰下环流特性尚不明确,因此,冰封期弯道环流的时空分布及影响因素仍有待进一步研究。

黄河什四份子弯道为黄河内蒙古段一处典型急弯河段,本文依据原型观测所得数据,对该弯道冰封期的环流时空分布及特性进行了研究,以探究冰封期弯道环流对该河段水流特性的影响。

1 数据采集与处理

什四份子弯道(图 1(a))位于黄河内蒙古段托克托县境内(111°2'E,40°17'N),弯道呈“几”字形,为典型的急弯河段。弯顶上游宽阔,宽度约 600 m,在弯道入口至弯顶区间内于凹岸侧有心滩存在,枯水期心滩显露(图 1(b));弯顶后有一束窄卡口,约 250 m,极易卡冰封河,为多年黄河内蒙古段首封部位。

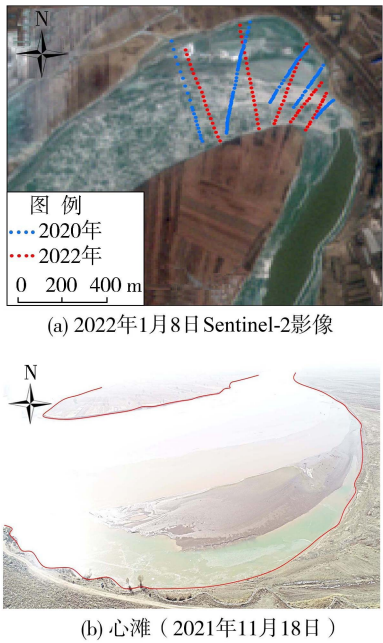


图 1 什四份子弯道冰封期观测断面及心滩位置

冰封期采样时间为 2020 年 1 月 13—19 日、2022 年 1 月 8—12 日,依据 SL59—2015《河流冰情观测规范》进行冰封期野外观测。通过人工打孔的方式,采用声学多普勒流速剖面仪(ADCP)测量流速、水深(水深小于 2 m 时,流速标准偏差为 1.6 cm/s;水深大于 2 m 时,流速标准偏差为 0.9 cm/s;水深标准偏差为 1 cm+千分之一水深),采用 RTK 对冰孔辅助定位,采用冰花尺、量冰尺测量冰

花厚和冰厚。观测断面从凹岸至凸岸依次编号,自上游到下游依次为 S1~S5 断面(图 1(a)),大部分冰孔间距 10~20 m。2020 年 S3~S5 断面因凸岸侧有清沟存在无法施测,为不完整断面,2022 年 S1~S5 均为完整断面。为了获得较好的流速数据,每个冰孔测流 120 s,使用 WinRiverII 进行流速后处理,剔除因冰花堵塞难以施测以及 ADCP 所测流速数据较差的冰孔,分别导出各冰孔纵向、横向、垂向流速进行处理和分析。

畅流期采样时间为 2021 年 4 月 17 日和 11 月 18 日,考虑到 11 月 18 日河道流量较小,凹岸侧心滩显露(图 1(b)),为保证各断面数据的连续性并与冰封期弯道流场分布进行对比,选取 2021 年 4 月 17 日实测数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 弯道冰情观测与横向流速

什四份子各断面弯道冰厚、冰花厚、水深分布如图 2、图 3 所示。两次野外原型观测前黄河内蒙古段封河流量均接近 800 m³/s,但什四份子弯道封河情形却并不相同。从清沟分布位置看,2020 年清沟位于 S3~S5 断面凸岸侧,2022 年清沟形成在 S5 断面下游凹岸侧。从冰花堆积分布来看,2020 年冰花在凹岸侧大量堆积且集中在 S1~S4 断面,与之相反,2022 年心滩与凹岸之间无冰花堆积,冰花主要分布在 S2~S5 断面但规模较 2020 年明显减小。造成这一现象的原因是 2022 年采样期间平均流量较 2020 年有所增大(增大约 63 m³/s),水流携带冰花过弯后堵塞以及河道形态的改变,使得冰花堆积沿水流方向较往年偏后且不连续。观察 2020 年和 2022 年断面河床高程的变化,2022 年较 2020 年什四份子弯道河床发生冲刷和淤积:在 S1、S2 断面,主槽向凸岸偏移约 200 m,深泓点抬高约 1.5 m,表现为凹岸淤积,中心线冲深;S3 断面则是主槽向凹岸偏移约 75 m,深泓点抬高约 2 m;S4 断面无明显变化,S5 断面凹岸主槽深泓点抬高约 2 m。河床冲淤变化位置受断面冰塞位置的影响很大。

图 4、图 5 为两次冰封期 S4 断面部分采样点横向流速分布(流速正值表示流向凸岸,负值表示流向凹岸)。由图 4 和图 5 可见,在河床底部的不规则性以及冰塞堆积的影响下,冰盖下近冰流和近床流向凸岸流动,冰盖与河床之间水流则向凹岸流动,即冰盖下横向流表现为双螺旋结构(图 4(b)采样点 B 和图 5(b)采样点 E),有时仅表现为一个横向流(图 4(b)采样点 C 和图 5(b)采样点 A),偶有表现出水体来回紊动特征(图 4(b)采样点 A),大部分则没有螺旋状流动存在(图 4(b)采样点 D、E 和

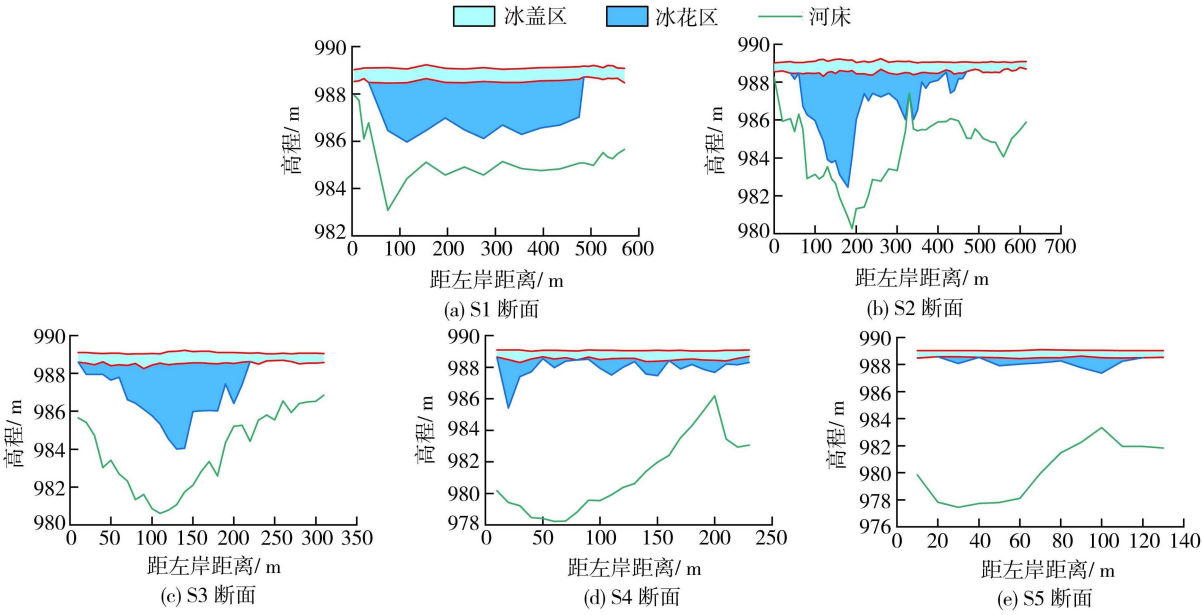


图 2 2020 年冰封期各断面冰厚、冰花厚及水深分布

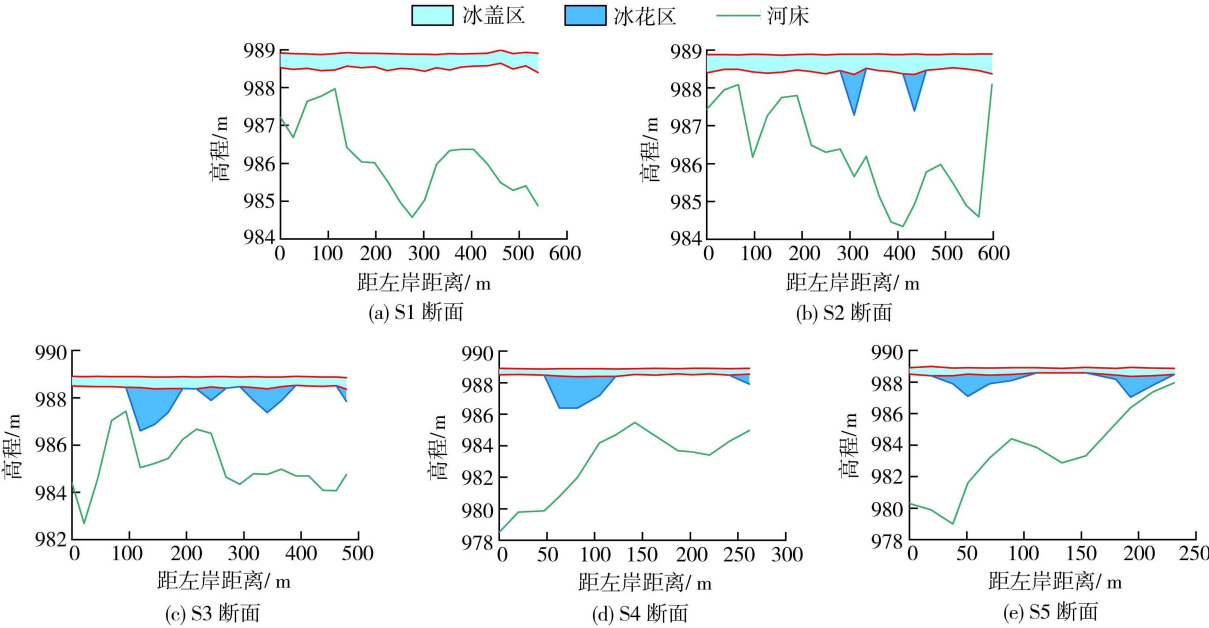


图 3 2022 年冰封期各断面冰厚、冰花厚及水深分布

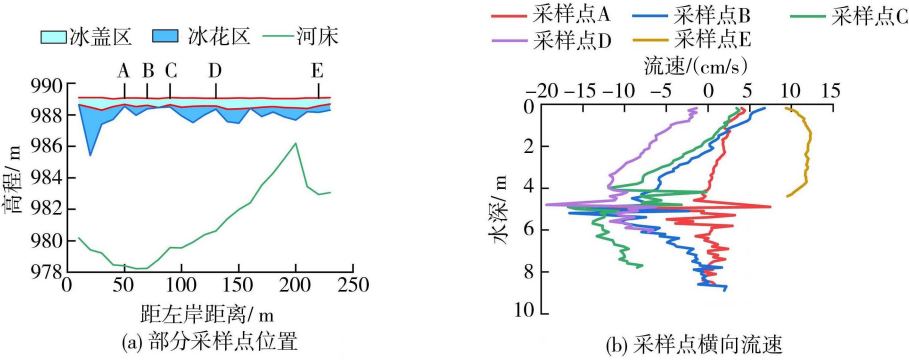


图 4 2020 年冰封期 S4 断面部分采样点位置及其横向流速示意图

图 5(b) 采样点 B、C、D)。分析横向流的位置可知，冰封期环流易产生于冰塞与冰塞之间或是冰塞与河岸之间，弯道冰下水流并不完全呈现双螺旋结构。

2.2 弯道环流流场及分布

图 6 为不同时期什四份子弯道纵向流速 u 和横向流速 v 的平面流场。由图 6 可以看出畅流期弯道

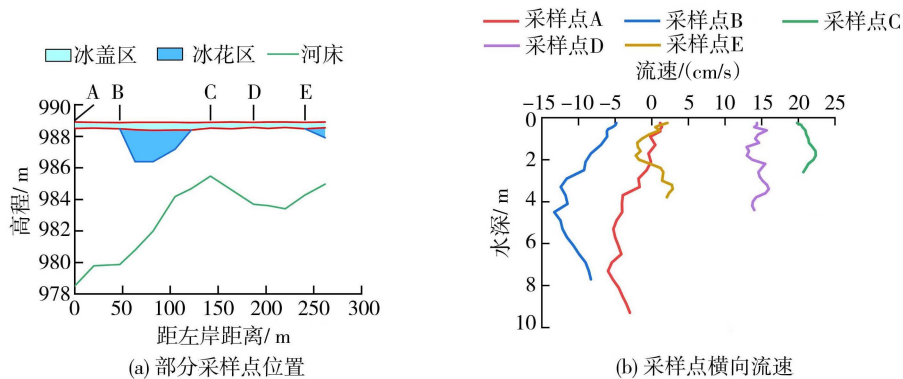


图5 2022年冰封期S4断面部分采样点位置及其横向流速示意图

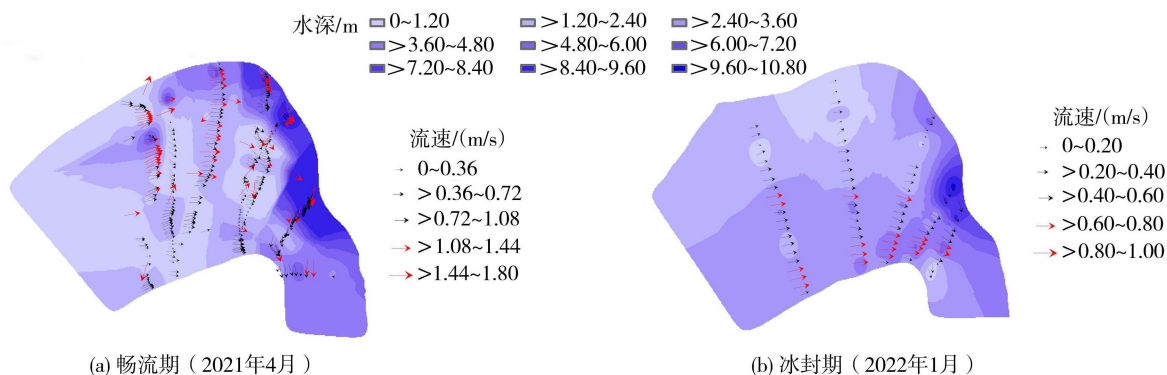


图6 什四份子弯道流场

环流分布在凹岸弯顶险工段上游,水流呈现逆时针环流,凸岸侧则在弯顶处呈现顺时针环流,凸岸侧环流规模较凹岸侧小,但凸岸侧水流流速较大,二者相差可达3~4倍。这与野外踏勘过程中观测到的现象一致:凸岸侧水流急,凹岸侧水流缓慢,水面均呈涡旋状。畅流期水流主流线在入弯前位于河道中间偏向凹岸侧,出弯后主流贴近凹岸,在出弯后向河道中心线发展。

覆冰条件下的水流与明渠条件下截然不同。冰盖下水流流线向凸岸倾斜但不明显,并无明渠条件下明显的流向改变现象。弯道入口至弯顶段,平均流速越靠近凸岸越大,过弯后,中心线偏凸岸侧流速最大。冰封期冰花主要堆积在入弯至弯顶区间,冰塞厚度沿程逐渐减小。横向上,冰塞主要分布于凹岸至中心线区域,并与主河槽贴近。在冰塞堆积处,横向过流面积束窄,断面输水能力降低,水流难以穿透冰塞并受冰塞挤压偏向于无冰塞区域。由于弯道凹岸侧有心滩存在,因此弯道主流区逐渐向凸岸发展,流速逐渐增大,最终形成主流区,与明渠相反。

图7、图8为冰封期不同断面沿水深方向的速度矢量(横向流速 v 和垂向流速 w 合成的 yOz 平面上的速度矢量,图中箭头表示流向,纵坐标采用相对水深, y 为距离水面的深度, h 为水深)。

由图7、图8可知, yOz 平面2020年与2022年

冰封期弯道水流结构变化规律基本一致。①入弯段S1断面,水流向凹岸偏转,断面流线略微向底部弯曲,偏转角度平均在 $2^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 之内,初步判断是受弯道水流作用及冰盖的影响形成折冲水流;②S2断面,水流特征与S1断面基本一致,横向环流尚未完全成型,在相邻冰塞之间,近冰流向下偏转明显,这是因为受冰塞堵塞的影响,近冰流的横向流速趋近于0,在 yOz 平面中合成的速度矢量由原来横向流速主导变为垂向流速主导或者是横向流速、垂向流速二者共同作用;③S3断面,凹岸侧50m内横向流速由北向转为东向,其余测点横向流速仍是北向,因此在凹岸侧流向产生了变化;④S4束窄断面凹岸侧100m内近冰流区域形成顺时针环流,近床区形成逆时针环流,凸岸侧在2022年形成“上顺下逆”的环流,受断面清沟的影响,2020年无流速数据;⑤过弯后S5断面,环流范围减小,凹岸水流流向凹岸,凸岸水流流向凸岸,并在凸岸侧底层水流有明显的转向,偏离主流指向指向凸岸下游,这一微弱环流结构表示水流出弯后,受惯性的影响,尽管失去离心力的作用,环流仍具有一定的强度并影响到下游一定距离。同时从各断面 yOz 平面流场可看出,冰下弯道环流结构总体上并不明显,仅在S4断面凹岸侧100m范围内表现出明显的环流特征。因此,天然弯道冰下横向环流受水深、冰塞位置的影响,主要集中在弯顶

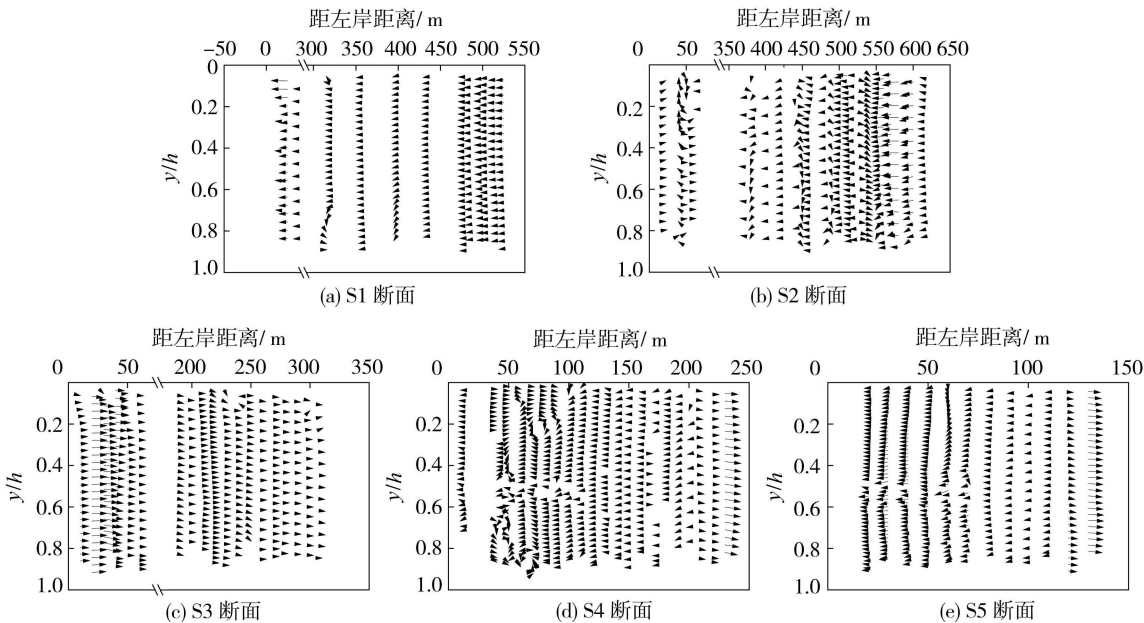


图 7 2020 年冰封期各断面速度矢量

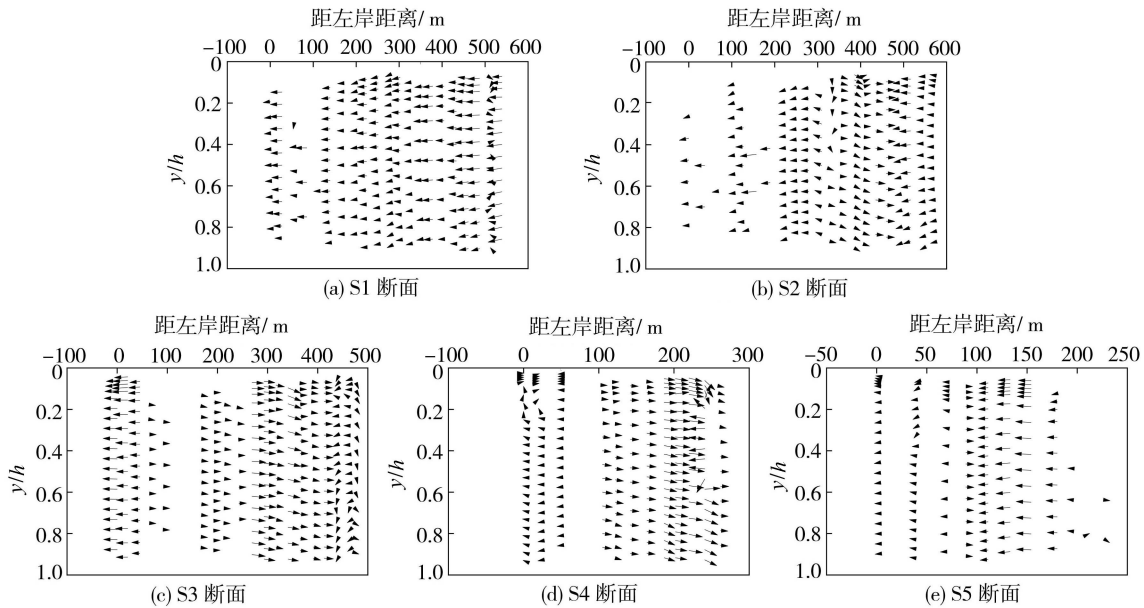


图 8 2022 年冰封期各断面速度矢量

凹岸侧,在弯顶凸岸侧有微弱的环流。

2.3 环流旋度

环流强度的衡量标准较多,与纵向流速、水深及流线曲率半径有关。本文选取环流旋度 v/u (横向流速 v 凸岸指向凹岸为正,纵向流速 u 向下游为正) 作为环流强度的指标,来定量反应螺旋流的强弱^[15]。依据冰封期 5 个断面流速数据,沿水深方向剖取 $y/h=0.2,0.4,0.6,0.8$ 共 4 个流层平面,并采用 Arcgis 软件进行插值处理。

图 9 为 2022 年弯道环流旋度分布图。总体结果显示,同一流速下表层旋度较大,但同一位置不同流层环流旋度在平面上分布基本一致。环流旋度正值分布在 S1~S3 断面两岸及 S5 断面近底面,环流旋度负值分布在入弯至弯顶段中心线及弯顶后中心

线和凸岸近冰面。环流旋度绝对值最大值分布在弯顶凹岸侧,约为 0.91。进一步分析整个弯道环流旋度沿水流方向的变化过程可知,环流旋度沿程先增后减,弯道两岸在 S3 断面达到最大,中心线在 S4 断面达到最大,但弯道后半段大于弯道前半段。从各流层的旋度沿程平面分布来看,弯道入口段凹岸侧旋度大于凸岸,此现象一直保持至 S4 断面。S4 断面束窄,最大旋度值位于河中心。可见什四份子弯道冰下水流在弯顶断面中部产生的环流旋度大,随后环流旋度逐渐减小,这与河道断面束窄有关。

环流旋度沿水深各点也发生变化(图 10),环流区域环流旋度沿水深线性增大(图 10(a) S4 断面,图 10(c) S4 和 S5 断面),非环流区域环流旋度沿水深近似呈线性减小,且各垂线环流旋度变化不大,说

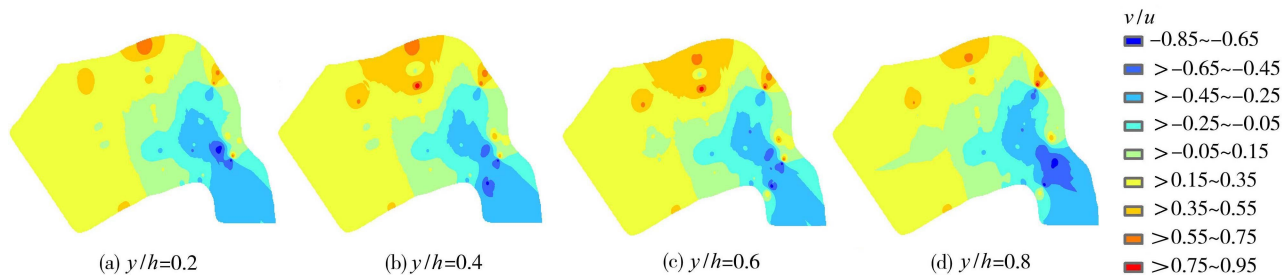


图9 冰封期不同剖面环流旋度分布

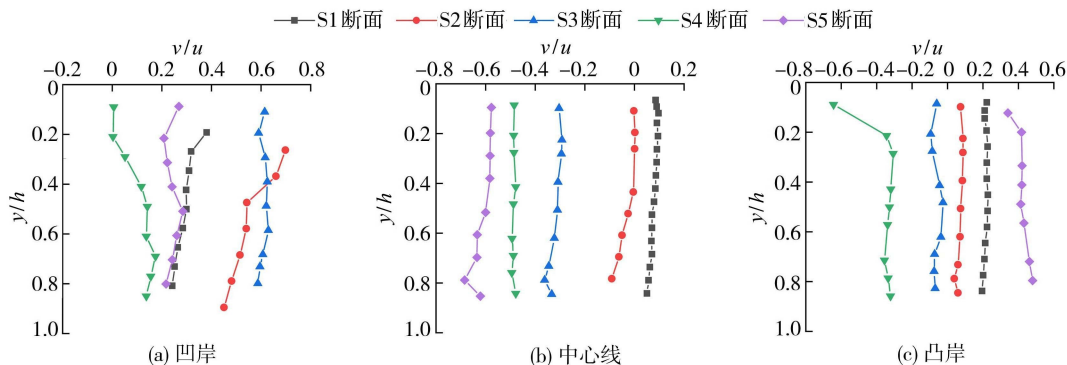


图10 冰封期环流旋度垂线分布特征

明冰盖下纵向流速与横向流速在垂线分布上具有一致性。此外结合横断面河床形态(图3)与流场分布(图6(b))可知,沿河宽不同测点下环流旋度是不同的,在深槽及主流区附近,环流旋度较小。

3 结 论

a. 什四份子弯道冰下水流并不完全呈现双螺旋结构,冰盖下环流受水深、冰塞位置及横向流速的影响,多分布在冰塞与冰塞或是冰塞与河岸之间,并集中在弯顶凹岸侧和弯顶及以后的凸岸侧,这与畅流期弯道环流位置基本相同,但冰封期环流结构较畅流期规模要小。

b. 弯道同一位置不同流层环流旋度分布基本一致,弯道后半段大于前半段,弯顶前凹岸侧大于凸岸侧,最大环流旋度位于弯顶凹岸侧,约为0.91,环流旋度的大小在弯道内沿程改变,与水深、纵向流速等因素有关。

c. 在弯道水深范围内,环流区域环流旋度沿水深线性增大,非环流区域则是线性减小,垂线分布整体上较为均匀;在深槽及主流区附近环流旋度较小。

参考文献:

[1] 姚仕明,赵占超,渠庚,等. 弯曲河道水流泥沙运动研究进展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(6):73-79. (YAO Shiming, ZHAO Zhanchao, QU Geng, et al. Research progress of flow and sediment movement in curved channel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong

University (Natural Science), 2021, 40 (6) : 73-79. (in Chinese))

[2] 檀会春,张华庆. 弯道横向环流试验及分析[J]. 水道港口, 2010, 31 (1) : 30-35. (TAN Huichun, ZHANG Huaqing. Experiment and analysis of transverse circulation in curved channel [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2010, 31 (1) : 30-35. (in Chinese))

[3] 罗平安,李觅. 连续微弯弯道水力特性试验及模拟研究[J]. 长江科学院院报,2019,36(1):55-59. (LUO Ping'an, LI Mi. Hydraulic characteristics of continuous micro-bend channel: flume experiment and numerical simulation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36 (1) : 55-59. (in Chinese))

[4] 易雨君,王兆印,张尚弘. 考虑弯道环流影响的平面二维水沙数学模型(I):模型的建立[J]. 水力发电学报,2010,29(1):126-132. (YI Yujun, WANG Zhaoyin, ZHANG Shanghong. Two-dimensional sedimentation model of channel bend (Part 1) : development of the model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29 (1) : 126-132. (in Chinese))

[5] 易雨君,王兆印,张尚弘. 考虑弯道环流影响的平面二维水沙数学模型(II):模型的验证[J]. 水力发电学报,2010,29(1):133-136. (YI Yujun, WANG Zhaoyin, ZHANG Shanghong. Two-dimensional sedimentation model of channel bend (Part 2) : verification and application [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29 (1) : 133-136. (in Chinese))

(下转第51页)

Chinese))

[23] 郎尧明,王佳政,曹江涛,等. 基于改进 VMD 和 TWSVM 的多点泄漏检测方法[J]. 振动与冲击,2021,40(17): 271-278. (LANG Xianming, WANG Jiazheng, CAO Jiangtao, et al. Multi-point leak detection method based on improved VMD and TWSVM[J]. Journal of Vibration and Shock,2021,40(17):271-278. (in Chinese))

[24] MA Yu, SCLAVOUNOS P D. Support vector machines model of the nonlinear hydrodynamics of fixed cylinders [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering,2021,143(5):051701.

[25] WANG Zhen, SHAO Yuanhai, BAI Lan, et al. Twin support vector machine for clustering [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2015,26(10):2583-2588.

[26] 吴君凤. 基于孪生支持向量机的民用航空发动机故障诊断[J]. 电子测量技术,2020,43(22):132-136. (WU Junfeng. Fault diagnosis of civil aviation engine based on twin support vector machine[J]. Electronic Measurement Technology,2020,43(22):132-136. (in Chinese))

[27] 杜传阳,郑东健,陈敏,等. 基于 APPSO-RVM 与 APPSO-SVM 的大坝安全预警模型的应用比较研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33 (3): 45-49. (DU Chuanyang, ZHENG Dongjian, CHEN Min, et al. Application and comparison of SVM and RVM algorithm in dam safety modeling[J]. Water Resources and Power,2015,33(3): 45-49. (in Chinese))

[28] SHI Y, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer[C]//Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence. Anchorage:IEEE,1998:69-73.

[29] 刘华莹,林玉娥,齐名军. 求解约束优化问题的改进粒子群算法[J]. 大庆石油学院学报,2005,29(4):73-75. (LIU Huaying, LIN Yu'e, QI Mingjun, et al. An improved particle swarm optimization to handle constrained optimal problems [J]. Journal of Northeast Petroleum University,2005,29(4):73-75. (in Chinese))

[30] RATNAWEERA A,HALGAMUGE S K, WATSON H C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2004,8(3): 240-255.

[31] OH H S, KIM D, LEE Y. Cross-validated wavelet shrinkage[J]. Computational Statistics, 2009, 24 (3): 497-512.

(收稿日期:2022-06-27 编辑:俞云利)

+++++

(上接第 36 页)

[6] 严培,王鑫,刘瑞,等. 弯道水流三维数值模拟研究[J]. 泥沙研究,2018,43(3):68-74. (YAN Pei,WANG Xin, LIU Rui,et al. Three dimensional numerical simulation of bend flow [J]. Journal of Sediment Research, 2018, 43 (3):68-74. (in Chinese))

[7] 孙东坡,朱岐武,张耀先,等. 弯道环流流速与泥沙横向输移研究[J]. 水科学进展,2006,17(1):61-66. (SUN Dongpo, ZHU Qiwu, ZHANG Yaoxian, et al. Study of circulating velocity profile and lateral sediment transport in curved channels[J]. Advances in Water Science,2006,17(1):61-66. (in Chinese))

[8] 李志威,方春明. 弯道环流悬移质横向输沙公式研究 [J]. 人民黄河,2011,33(8):25-27. (LI Zhiwei, FANG Chunming. Suspended load transverse transportation formula induced bend circulation[J]. Yellow River,2011, 33(8):25-27. (in Chinese))

[9] 李志威,方春明. 弯道推移质横向输沙规律与床面平衡机理[J]. 水力发电学报,2012,31(3):119-125. (LI Zhiwei, FANG Chunming. Bedload transverse transport and bed equilibrium mechanism in river bends[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31 (3): 119-125. (in Chinese))

[10] 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.

[11] 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.

[12] DEMERS S,BUFFIN-BÉLANGER T,ROY A G. Helical cell motions in a small ice-covered meander river reach [J]. River Research and Applications, 2011, 27 (9): 1118-1125.

[13] LOTSARI E,KASVI E,KÄMÄRI M,et al. The effects of ice cover on flow characteristics in a subarctic meandering river[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2017, 42(8):1195-1212.

[14] 李民康,冀鸿兰,罗红春,等. 流凌条件下弯道水力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2021,41(3):41-49. (LI Minkang, JI Honglan, LUO Hongchun, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of curved channels under ice flow conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (3):41-49. (in Chinese))

[15] 唐洪武,黄淑君,袁赛瑜,等. 长江-鄱阳湖交汇处三维水流结构研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48 (2): 128-135. (TANG Hongwu, HUANG Shujun, YUAN Saiyu, et al. Three-dimensional flow structure at the confluence zone of Yangtze River and Poyang Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020,48(2):128-135. (in Chinese))

(收稿日期:2022-06-21 编辑:熊水斌)