

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.02.004

黄河内蒙古河段河道冲淤演变与凌情响应机制

张金良, 鲁俊

(黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:黄河上游内蒙古冲积性河道凌汛问题突出,研究河道冲淤演变与凌情响应机制可为该河段防凌减灾提供技术支持。根据内蒙古河段凌情、河道冲淤演变资料,分析凌情变化表征指标及与之密切相关的河道冲淤演变特征指标,研究河道冲淤演变特征指标与凌情变化表征指标的响应关系。结果表明:河道冲淤演变的特征指标平滩流量与凌情表征指标冰下过流能力、槽蓄水增量关系密切,冰下过流能力为平滩流量的1/5左右,随着平滩流量减小而减小,而槽蓄水增量随着平滩流量的减小而增大,有利内蒙古河段防凌的平滩流量宜不小于2 000 m³/s,槽蓄水增量宜不超过14亿m³。本研究成果可为内蒙古河段冰凌灾害防治提供参考。

关键词:冲积性河道;冲淤演变;平滩流量;槽蓄水增量;凌情;响应关系

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-6791(2021)02-0192-09

一些寒冷地区的河流,从低纬度流向高纬度,在冬季会出现明显的凌汛,如中国黄河的下游河段^[1]、宁蒙河段^[2-3]、罗马尼亚 Bistrita River^[4]、加拿大 Red River^[5]等。冲积性河道凌汛变化尤其复杂,河流两岸地区常常遭受凌汛灾害影响。研究河道冲淤演变对凌汛发展变化的影响对江河冰凌灾害防治具有重要意义。

影响冲积性河道凌汛发展的因素包括气温条件、水动力条件和河道边界条件等^[1-2]。其中,国内外河道边界条件特别是河道冲淤演变对凌汛发展变化的影响研究较少。已有参考文献的河道冰凌研究可概括为两大类。一类是研究河冰形态、河冰阻力、河冰输移、冰塞冰坝等,如 Wazney 等^[6]研究河流流冰封河过程,利用 RLAM 法研究冰塞水位变化;Chu 等^[7]利用遥感技术研究了加拿大西北部地区的河冰生消以及水流输冰影响;王军^[8]、茅泽育等^[9]研究了封冻河道冰盖下的水流流速分布和阻力计算。这些研究多集中在微观层面,以理论方法为主,可解释封冻河道冰水动力条件变化、计算河道、渠道的流冰输移等。另一类是研究冰凌模拟与预测,如 Wazney 等^[10]研究完善了二维河冰模型,模拟了气温条件改变对封冻过程的影响;Morales-Marin 等^[11]集成水文模型和气温模型得到了可用于预测冰凌洪水的一维数学模型;张防修等^[12]建立内蒙古河段一维河冰动力学模型,模拟了河冰生消及槽蓄水增量过程,杨开林等^[13]、茅泽育等^[14]等研究河道冰塞的数字模拟,这些研究很少涉及河道冲淤演变对凌情的影响。总体来看,对强冲积性河道,由于河床冲淤变化剧烈、断面不规则,以及河冰生消、冰水流态复杂等因素,已有研究成果中缺少大尺度普适性规律的研究总结。

本文以黄河上游内蒙古冲积性河段为例,利用大量实测资料进行计算分析,研究强冲积性河道冲淤演变与凌情的响应规律,研究结果对江河冰凌灾害防治、水库防凌调度等实践具有重要指导意义。

收稿日期:2020-06-19;网络出版日期:2020-11-18

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20201117.1758.006.html>

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC1508404)

作者简介:张金良(1963—),男,河南新安人,博士,教授级高级工程师,博士研究生导师,主要从事黄河流域重大水工程与水沙调控研究工作。E-mail: jlzhangyrec@126.com

通信作者:鲁俊, E-mail: 393956425@qq.com

1 研究区域与数据

1.1 区域概况

黄河内蒙古河段地处黄河流域最北端, 起自宁夏的石嘴山, 止于内蒙古伊克昭盟准格尔旗的马栅乡, 全长约 820 km, 其中巴彦高勒至头道拐约 520 km 河道为强冲积性河道(见图 1), 具有明显的滩槽。内蒙古河段冬季干燥寒冷, 气温在 0℃ 以下的时间可持续 4~5 个月, 几乎每年都会出现不同程度的凌汛, 河道一般从 11 月中下旬开始流凌, 12 月上旬封冻, 由于气温上暖下寒, 封河自下而上; 翌年 3 月中下旬解冻开河, 由于气温南高北低, 开河自上而下。1986 年以来, 内蒙古河段主要是巴彦高勒至头道拐河段堤防先后发生 7 次决口, 其中 6 次凌汛决口^[15], 给沿河两岸地区造成巨大经济损失。

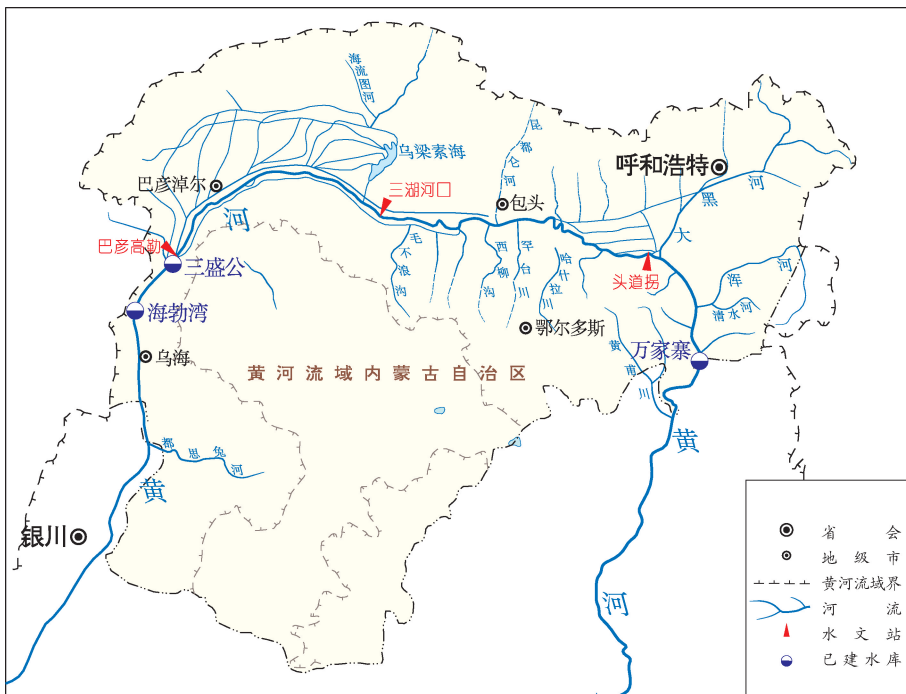


图 1 黄河内蒙古河段河道示意

Fig. 1 Schematic diagram of river course of the Upper Yellow River in Inner Mongolia

1.2 研究数据

黄河内蒙古河段, 自上而下布设石嘴山、巴彦高勒、三湖河口、头道拐等多个水文站(见图 1), 建站时间早(见表 1), 对水文站断面水位、流量、含沙量、冰情、水温、气温以及断面等进行了观测, 观测资料系

表 1 内蒙古河段干流水文站基本情况表

Table 1 Basic information of hydrological stations on main stream in the Inner Mongolia section

水文站	设站时间	距离河口/ km	流域面积/ km ²	年最大径流量/ 亿 m ³	年最大输沙量/ 亿 t	备注
石嘴山	1942 年 9 月	2 665	309 146	492.6	3.82	
巴彦高勒	1972 年 10 月	2 523	314 000	423.8	3.05	
三湖河口	1950 年 8 月	2 302	347 909	445.6	3.25	
昭君坟	1954 年 6 月	2 152	358 777	448.7	3.17	1995 年停测
头道拐	1952 年 1 月	2 002	367 898	437.2	3.16	

列除个别站点外均连续且较长,经黄河水利委员会水文局整编刊印,作为本次研究的数据。除此之外,黄河内蒙古河段间歇性的观测有河道测验断面(其中1962年、1982年、1991年、2000年、2012年、2018年等测次的断面一致性较好,且测量河段长),每年凌汛期由黄河防汛部门对冰凌情的发展变化进行跟踪,记录总结相关冰凌情,如内蒙古河段流凌时间、封河时间、开河时间、封冻长度、封冰厚度以及上游刘家峡水库防凌调度运用、区域气温等资料,也作为本次研究的数据。考虑总体资料序列与质量,主要采用1960—2018年数据资料开展研究。

2 研究方法

分析河道冲淤演变,研究河道冲淤演变过程中与凌情变化关系密切的特征指标。依据河冰生消发展变化过程进行凌汛期不同阶段划分,考虑实际应用需求,研究确定凌汛期凌情变化的重要表征指标。在此基础上,利用公式计算、相关分析等方法研究河道冲淤演变特征指标与凌情变化表征指标的响应关系,明确两者之间的响应规律。

2.1 河道冲淤演变计算

根据内蒙古河段不同时期河道大断面资料,划滩地、河槽(中水河槽),按照锥体法计算相邻断面滩地、河槽冲淤量,之后累加得到不同时期不同河段的冲淤量。锥体法计算公式形式如下:

$$V = \frac{S_u + S_d + \sqrt{S_u S_d}}{3} L \quad (1)$$

式中: V 为相邻断面间河道冲淤体积, m^3 ; S_u 、 S_d 分别为上、下游相邻断面的冲淤面积, m^2 ; L 为相邻断面间距, m 。

内蒙古河段河道冲淤与来水来沙条件、侵蚀基准面、河床边界条件等影响因素有关^[16-18]。这些影响因素的变化使得河床在纵向、横向发生变形。河床变形导致河槽形态发生变化,使得河槽沿程的水面宽度、水深及过水面积等水力因子发生变化。根据式(2)可知,这些水力因子变化影响集中反应到河槽过流能力变化。

$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} A \quad (2)$$

式中: Q 为某条件下的过流量, m^3/s ; n 为河床糙率; J 为水面比降; A 为过水面积, m^2 ; R 为水力半径, m 。天然河道水面较宽,水面宽度是水深的数十倍甚至上百倍,水力半径一般可以直接用断面平均水深 H 代替,即 $R = A/B$ 。

河槽过流能力用平滩流量表示,可利用式(2)根据河槽断面资料进行计算。水文站断面观测资料丰富,平滩流量可以利用水文站断面水位、流量观测资料,根据水文站断面判断确定平滩水位后,从水位—流量关系曲线上读取得到。

2.2 凌情发展变化的表征指标计算

凌汛期一般划分为3个时期,即流凌期、封河期、开河期。流凌期,冰水混合物在河槽内流淌,流冰在行进中遇到弯道、分汊、浅滩、束窄断面发生卡堵、滞留,所受的阻力大于水流的输移力后,开始出现封河,而后继来的流冰连续堆积或平铺,最后冻结成冰盖。冰盖发展过程中,因为冰凌阻塞作用,一部分水(冰)增蓄在河道内,形成槽蓄水增量。封河完成后,因为冰盖的存在,冰下输水变成了有压流,直至气温转暖,槽蓄水增量释放、冰盖融化,进入开河期。在冰凌生消发展变化以及防凌实践过程中,将冰下过流能力(本文指封冻河道平滩水位下的过流量)和槽蓄水增量作为凌情变化的重要表征指标。

(1) 冰下过流能力计算。利用公式(2)进行计算,将式(2)中的 n 变为冰盖与河床综合糙率 n_b ,采用式(3)计算:

$$n_b = \left(\frac{n_j^{3/2} + n_i^{3/2}}{2} \right)^{2/3} \quad (3)$$

式中: n_j 为河床糙率; n_i 为冰盖糙率。同时, 因为凌汛期封冻后, 冰厚 (b_i) 占去了一部分过水面积, 需修正式(2)中的过水面积, 修正后的过水面积 A' 为

$$A' = B(H - 0.9b_i) \quad (4)$$

凌汛期封冻后, 考虑复式河道河槽多呈“U”型, 且水深相比水面宽小很多, 湿周计算时不考虑河槽两岸边壁, 湿周 $\approx 2B$, 水力半径计算则为

$$R = A' / (2B) \quad (5)$$

(2) 槽蓄水增量计算。根据水量平衡原理, 考虑水流传播, 计算封冻河段上下端断面的水量差, 并累计求和。

$$W_i = \sum_{i=1}^n (W_{u,i} + W_{d,i+m}) \quad (6)$$

式中: W_i 为某个河段凌汛期第 i 天的槽蓄水增量; $W_{u,i}$ 为某河段上端第 i 天水量; $W_{d,i+m}$ 为某河段下端第 $i + m$ 天水量, m 为某河段从上端到下端的水流传播时间。

3 河道冲淤与凌情的特征指标变化

计算内蒙古河段的冲淤量见表2。从全河段整体冲淤情况看, 1962—1982年和2012—2018年2个时段表现为冲刷, 年均冲刷量分别为0.009亿t、0.070亿t; 1982—1991年、1991—2000年、2000—2012年3个时段表现为淤积, 年均淤积量分别为0.379亿t、0.540亿t、0.385亿t。

从横向冲淤变化看, 滩地不同时期均表现为淤积, 河槽有冲有淤。1962—1982年和2012—2018年2个时段河槽为冲刷; 1982—1991年、1991—2000年、2000—2012年3个时段河槽为淤积, 且是淤积的主体, 河槽淤积量占全断面淤积的62.9%、87.5%、80.4%。

从纵向冲淤变化看, 昭君坟以上河道1962—1982年和2012—2018年2个时段表现为冲刷, 年均冲刷量分别为0.124亿t、0.133亿t, 而昭君坟以下河段虽然河槽冲刷, 但河槽冲刷量小于滩地淤积量, 总体仍为淤积; 1982—1991年、1991—2000年、2000—2012年3个时段昭君坟以上和昭君坟以下均表现为淤积, 昭君坟以上淤积量大, 年均淤积量分别为0.280亿t、0.353亿t、0.292亿t, 分别占全河段淤积量的73.9%、65.4%、75.7%。

表2 内蒙古河段不同时期冲淤量计算成果

亿 t

Table 2 Calculation results of erosion and deposition in different periods of the Inner Mongolia section

河 段	1962—1982 年			1982—1991 年			1991—2000 年		
	河槽	滩地	全断面	河槽	滩地	全断面	河槽	滩地	全断面
巴彦高勒—三湖河口	-0.074	0.022	-0.052	0.057	0.040	0.097	0.103	0.017	0.120
三湖河口—昭君坟	-0.084	0.012	-0.072	0.119	0.064	0.183	0.206	0.027	0.233
昭君坟—头道拐	-0.023	0.138	0.115	0.036	0.063	0.099	0.164	0.023	0.187
巴彦高勒—头道拐	-0.181	0.172	-0.009	0.213	0.166	0.379	0.473	0.067	0.540
河 段	2000—2012 年			2012—2018 年			1962—2018 年		
	河槽	滩地	全断面	河槽	滩地	全断面	河槽	滩地	全断面
巴彦高勒—三湖河口	0.108	0.025	0.133	-0.136	0.055	-0.081	0.008	0.028	0.036
三湖河口—昭君坟	0.127	0.032	0.159	-0.073	0.022	-0.052	0.042	0.028	0.070
昭君坟—头道拐	0.059	0.035	0.093	-0.007	0.070	0.063	0.036	0.078	0.114
巴彦高勒—头道拐	0.293	0.092	0.385	-0.216	0.146	-0.070	0.085	0.134	0.219

利用不同时期河道断面计算内蒙古河段平滩流量变化见表3。可以看到,内蒙古河段冲淤纵向、横向变化使得河段沿程的平滩流量发生变化,1962年平均平滩流量在 $2\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 左右,至1982年由于河槽冲刷,平滩流量扩大至 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 左右,之后由于河槽持续淤积,平滩流量大幅减小,至2004年平滩流量减小到最小不足 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$,之后由于来水来沙条件改善,河槽过流能力逐渐恢复,2012年洪水后,平滩流量扩大至 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 左右,至2018年扩大到约 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 。但是还有一些卡口段,主要集中在毛不浪、西柳沟、东柳沟等支流汇入口附近。三湖河口水文站断面具有明显的滩槽,能够较好地反映内蒙古河段冲淤变化,作为代表断面,利用连续观测的水位、流量资料分析得到连续的平滩流量变化见图2。

表3 内蒙古河段不同年份平滩流量计算成果

 m^3/s

Table 3 Calculation results of bank-full discharge in different periods of the Inner Mongolia section

年份	巴彦高勒—三湖河口		三湖河口—昭君坟		昭君坟—头道拐	
	平均	最小	平均	最小	平均	最小
1962年	2 680	2 310	2 630	2 450	2 520	1 810
1982年	3 560	3 520	4 280	2 790	3 730	2 850
1991年	2 930	2 470	3 650	2 520	3 200	2 520
2000年	1 750	1 690	1 990	1 930	2 130	1 730
2004年	1 030	930	1 560	1 160	1 490	1 110
2012年	1 930	1 590	2 280	1 860	2 060	1 740
2018年	2 410	1 930	2 480	1 970	2 360	1 830

槽蓄水增量和冰下过流能力是凌情变化的重要表征指标,受河槽形态变化影响十分明显。图3是三湖河口水文站断面1970年和2005年的测量地形,河槽形态有明显差别,平滩水位 $1\,020\text{ m}$ 下的水面宽度和过水面积不同。图4是两个河槽形态条件下凌汛期水位—流量关系,可以看出,封河后,断面水位随着冰下过流量增大而增高。由于1970年中水河槽断面过水面积大、过流能力大,2005年中水河槽断面面积小、过流能力小,导致两者整个凌汛期水位包括封河期水位有较大的差别(同样的冰下过流量 $600\text{ m}^3/\text{s}$ 时,后者水位高了 1 m 多),1970年度凌汛期水面低于 $1\,020\text{ m}$ 的滩面高程,基本不出中水河槽,而2005年度凌汛期水面抬升超过 $1\,020\text{ m}$ 的滩面达 0.5 m 多,导致凌水漫滩,堤防供水浸泡,不利于防凌安全。1960年以来内蒙古河段年最大槽蓄水增量变化见图5。可以看到,20世纪90年代以前,内蒙古河段凌汛期年最大槽蓄水增量一般不超过 14 亿 m^3 ,平均为 9.84 亿 m^3 ;90年代以后,年最大槽蓄水增量呈增大趋势,最大接近 20 亿 m^3 ,平均为 14.22 亿 m^3 。

综上所述,平滩流量变化反应了河道冲淤调整,是凌情变化的重要影响因子,确定河道冲淤演变中与凌情有密切关系的特征指标为平滩流量。

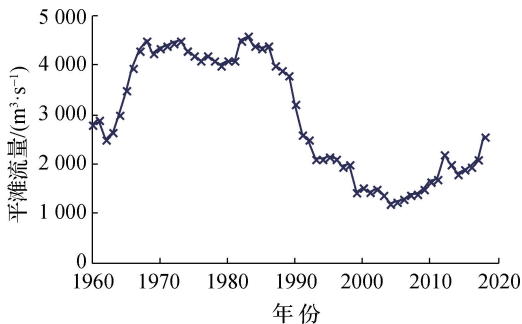


图2 三湖河口断面平滩流量年变化过程

Fig. 2 Annual change process in bankfull discharge on cross section at Sanhu Estuary

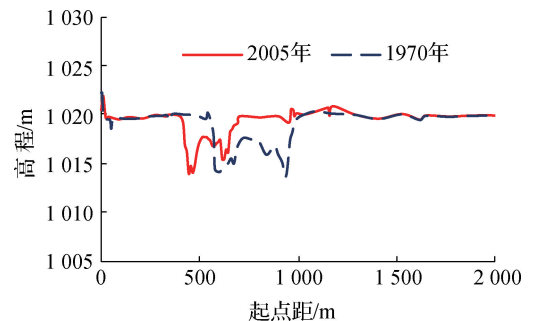


图3 三湖河口断面1970年与2005年断面地形

Fig. 3 Terrain on cross section at Sanhu Estuary in 1970 and 2005

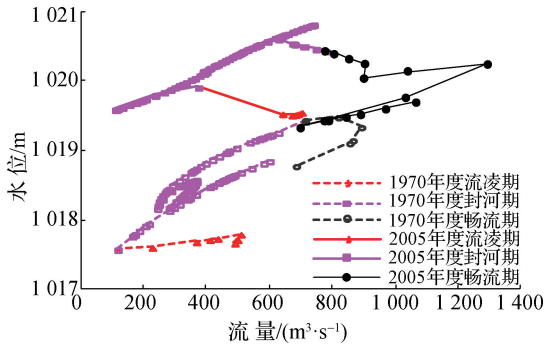


图4 三湖河口断面 1970 年度与 2005 年度凌汛期水位—流量关系

Fig. 4 Stage—discharge relationship on cross section at Sanhu Estuary in ice jam flood period in 1970 and 2005

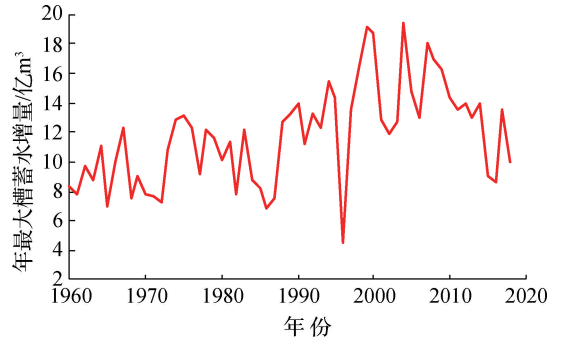


图5 内蒙古河段年最大槽蓄水增量历年变化

Fig. 5 Historical change in annual maximum channel detention increment in Inner Mongolia

4 河道冲淤演变与凌情响应关系

4.1 平滩流量与冰下过流能力的响应关系

利用式(2)计算三湖河口断面平滩水位相应平滩流量 Q_p 与冰下过流量 Q_b 的比值:

$$\frac{Q_b}{Q_p} = \frac{n_p}{n_b} \left(\frac{R_b}{R_p} \right)^{2/3} \left(\frac{J_b}{J_p} \right)^{2/3} \frac{A_b}{A_p} \quad (7)$$

式中: n_p 为畅流期糙率; J_p 、 J_b 分别为畅流期、封河期水面比降, 两者基本相同; A_p 、 A_b 分别为畅流期、封河期过水面积, m^2 ; R_p 、 R_b 分别为畅流期、封河期水力半径, m 。

根据内蒙古河段水文站实测水文资料统计分析, 封河期冰盖下的过水面积约占冰面以下面积的 80% ~ 90%, 取 85%, 即 $A_b/A_p = 0.85$, 按照式(5)推算得到平滩水位水位下 $R_b/R_p = 0.43$ 。内蒙古河段畅流期河槽河床糙率在 0.012 左右; 封河期冰盖糙率与封河时长、冰厚、冰盖特征等因素有关, 内蒙古河段资料研究表明, 在有冰花堆积的情况下, 冰盖糙率随着封河时间增长逐渐减小, 封河初期 10 d 内, 冰盖糙率从流凌封河的 0.1 下降至封河完成后的 0.05 左右, 封河稳定 50 d 后进一步下降至 0.03 左右, 之后趋于稳定。按照式(3)计算冰盖下的综合糙率范围为 0.034 ~ 0.022, 则 n_b/n_p 的范围 2.83 ~ 1.83。综合上述计算分析数据, 利用式(7)计算得到 Q_b/Q_p 的比值范围为 0.17 ~ 0.26。即表明封河期由于冰盖影响、输水阻力变化, 同样水力因子条件下的冰下过流量减小。

进一步利用内蒙古河段实测资料分析中水河槽过流能力与冰下过流能力关系, 点绘三湖河口大、中、小不同中水河槽过流能力条件下汛期和封河期实测水位—流量关系, 见图 6。可以看到: 三湖河口断面水位 1 020 m 条件下, 汛期过流能力在 4 500 m^3/s 左右, 封河期水位不超过 1 020 m 的冰下过流能力约 750 m^3/s , 约是相应水位下汛期过流能力的 1/6, 见图 6(a); 汛期过流能力在 2 500 m^3/s 左右, 封河期水位不超过 1 020 m 的冰下过流能力约 500 m^3/s , 约是相应水位下汛期过流能力的 1/5, 见图 6(b); 汛期过流能力在 1 500 m^3/s 左右, 封河期水位不超过 1 020 m 的冰下过流能力约 300 m^3/s , 是相应水位下汛期过流能力的 1/5, 见图 6(c)。

综上所述, 内蒙古河段中水河槽过流能力越大, 冰下过流能力也越大, 反之也越小。总的来看, 封河期冰下过流能力为平滩流量的 1/5 左右。

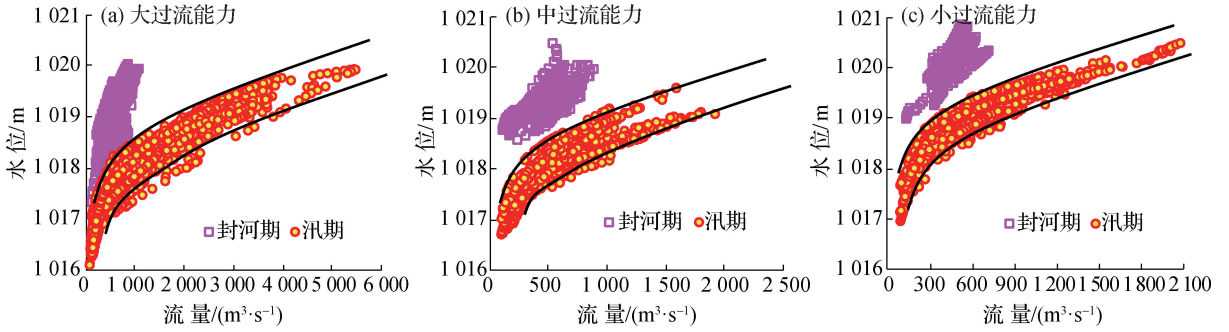


图6 三湖河口断面凌汛期、汛期水位—流量散点关系

Fig. 6 Scatter diagram of stage—discharge relationship in ice jam flood period and flood period on cross section at Sanhu Estuary

4.2 平滩流量与槽蓄水增量的响应关系

点绘内蒙古河段平滩流量与槽蓄水增量的散点关系见图7，图中呈现出平滩流量 $3\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 以下散点带和 $3\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ 以上散点带，从2条带状的散点关系看，平滩流量越大，槽蓄水增量越小，平滩流量和年最大槽蓄水增量表现出明显的负相关。

实际上，槽蓄水增量的形成和变化除了与河道条件有关外，还与来水、气温等诸多因素有关^[15]，图7中平滩流量 $3\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ 以上，主要发生在20世纪90年代以前，河道流冰封冻主要在中水河槽，基本不漫滩，槽蓄水增量形成于河槽；平滩流量 $3\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 以下，主要发生在1990—2010年，该时期平滩流量多数年份不足 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ ，凌汛期河道流冰从封河开始漫滩，漫滩历时长，使得槽蓄水增量形成于河槽和滩地，槽蓄水增量的形成模式发生了改变，图8给出的1970年、2005年槽蓄水增量形成过程可以充分反映这个改变。从图7还可以看到，内蒙古河段平滩流量大于 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 后，槽蓄水增量一般小于14亿 m^3 ，而平滩流量小于 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ ，随着平滩流量进一步减小，槽蓄水增量增大，最大接近20亿 m^3 ，对防凌十分不利。为了内蒙古河段防凌安全，中水河槽过流能力平滩流量宜不小于 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ ，槽蓄水增量宜不超过14亿 m^3 。截止到2018年，内蒙古河段平均平滩流量恢复到约 $2\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ ，为控制内蒙古河段槽蓄水增量提供了良好条件，但是局部河段平滩流量还比较小，保障防凌安全还需要进一步采取措施。

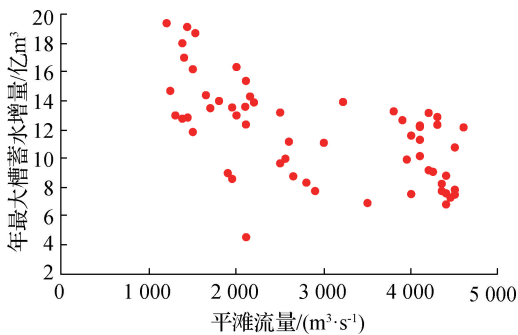


图7 三湖河口平滩流量与年最大槽蓄水增量的散点关系

Fig. 7 Scatter diagram of relationship between bankfull discharge and annual maximum channel detention increment in river channel at Sanhu Estuary

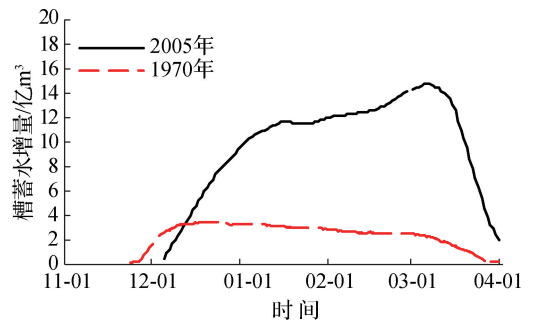


图8 内蒙古河段典型年份槽蓄水增量形成与释放过程

Fig. 8 Process of formation and release of channel detention increment in the river reach in Inner Mongolia for typical years

5 结 论

(1) 内蒙古河段由于特殊的地形地貌特点和气候条件, 成为强冲积性河道中凌汛灾害问题突出的一个典型。河道冲淤纵向、横向调整使得中水河槽沿程的水面宽度、水深及过水面积等水力因子发生变化, 集中反映到中水河槽过流能力平滩流量变化, 平滩流量与冰下过流能力、槽蓄水增量等凌情重要表征指标关系密切。

(2) 内蒙古河段凌汛期冰下过流能力随着平滩流量的减小而减小, 冰下过流能力为平滩流量的 1/5 左右。槽蓄水增量随着平滩流量的减小而增大, 当平滩流量减小到一定程度后, 将导致槽蓄水增量的形成模式发生改变, 由以河槽为主的槽蓄水增量模式改变为滩、槽兼有的槽蓄水增量模式, 对内蒙古河段防凌有利的中水河槽过流能力宜不小于 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$, 凌汛期槽蓄水增量宜不超过 14 亿 m^3 。

参考文献:

- [1] 董雪娜, 李雪梅, 林银平, 等. 黄河下游凌情特征及变化[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 882-887. (DONG X N, LI X M, LIN Y P, et al. Characteristics of ice regime in the Lower Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(6): 882-887. (in Chinese))
- [2] 姚惠明, 秦福兴, 沈国昌. 黄河宁蒙河段凌情特性研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(6): 893-899. (YAO H M, QIN F X, SHEN G C. Ice regime characteristics in the Ningxia-Inner Mongolia reach of Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(6): 893-899. (in Chinese))
- [3] 李超群, 刘红珍. 黄河内蒙古河段凌情特征及变化研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(3): 36-39. (LI C Q, LIU H Z. Characteristics and its changes of the ice floods in the Inner Mongolia section of the Yellow River[J]. Yellow River, 2015, 37(3): 36-39. (in Chinese))
- [4] RĂDOANE M, CIAGLIC V, RADOANE N. Hydropower impact on the ice jam formation on the upper Bistrita River, Romania [J]. Cold Regions Science & Technology, 2010, 60(3): 193-204.
- [5] WAZNEY L, CLARK S P. The 2009 flood event in the Red River basin: causes, assessment and damages[J]. Canadian Water Resources Journal, 2016, 41(1/2): 56-64.
- [6] WAZNEY L, CLARK S P, MALENCHEK J. Effects of freeze-up consolidation event surges on river hydraulics and ice dynamics on the Lower Dauphin River[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 158: 264-274.
- [7] CHU T, DAS A, LINDENSCHMIDT K E. Monitoring the variation in ice-cover characteristics of the Slave River, Canada using Radarsat-2 data; a case study[J]. Remote Sensing, 2015, 7(10): 13664-13691.
- [8] 王军. 封冻河道下流速分布和阻力问题探讨[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 28-31. (WANG J. Discussion of velocity distribution and resistance under ice cover[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(1): 28-31. (in Chinese))
- [9] 茅泽育, 马吉明, 余云童, 等. 封冻河道的阻力研究[J]. 水利学报, 2002, 33(5): 59-64. (MAO Z Y, MA J M, SHE Y T, et al. Hydraulic resistance of ice-covered river[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(5): 59-64. (in Chinese))
- [10] WAZNEY L, CLARK S P, MALENCHEK J, et al. Numerical simulation of river ice cover formation and consolidation at freeze-up[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 168: 102884.
- [11] MORALES-MARÍN L A, SANYAL P R, KADOWAKI H, et al. A hydrological and water temperature modelling framework to simulate the timing of river freeze-up and ice-cover breakup in large-scale catchments[J]. Environmental Modeling and Software, 2019, 114: 49-63.
- [12] 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. (ZHANG F X, XI G Y, ZHANG X L, et al. Simulation of channel-storage increment process in ice flood period[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 201-211. (in Chinese))
- [13] 杨开林, 刘之平, 李桂芬, 等. 河道冰塞的模拟[J]. 水利水电技术, 2002, 33(10): 40-47. (YANG K L, LIU Z P, LI G F, et al. Simulation of ice jam in river channels[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, 33(10): 40-47. (in Chinese))

- [14] 茅泽育, 吴剑疆, 张磊, 等. 天然河道冰塞演变发展的数值模拟[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 700-705. (MAO Z Y, WU J J, ZHANG L, et al. Numerical simulation of river ice jam[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 700-705. (in Chinese))
- [15] 陈冬伶, 刘吉峰, 谢晨, 等. 黄河内蒙古段凌汛期槽蓄水增量影响因素分析[J]. 人民黄河, 2017, 39(5): 32-35. (CHEN D L, LIU J F, XIE C, et al. Analysis on the influencing factors of water storage in the ice-flood season of Inner Mongolia reach of the Yellow River[J]. Yellow River, 2017, 39(5): 32-35. (in Chinese))
- [16] AN C H, LU J, QIAN Y, et al. The scour-deposition characteristics of sediment fractions in desert aggrading rivers: taking the upper reaches of the Yellow River as an example[J]. Quaternary International, 2019, 523: 54-66.
- [17] 安催花, 鲁俊, 钱裕, 等. 黄河宁蒙河段冲淤时空分布特征与淤积原因[J]. 水利学报, 2018, 49(2): 195-206, 215. (AN C H, LU J, QIAN Y, et al. Spatial-temporal distribution characteristic and course of sedimentation in the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(2): 195-206, 215. (in Chinese))
- [18] 鲁俊, 马莅茗. 黄河上游内蒙古河段塑槽输沙需水量分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 123-128. (LU J, MA L M. Analysis of water demand for channel forming and sediment transport in the upper reaches of the Yellow River in Inner Mongolia [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(12): 123-128. (in Chinese))

Response mechanism of ice floods to scour and silting evolution in the Inner Mongolian channel and reaches of the Upper Yellow River*

ZHANG Jinliang, LU Jun

(Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The alluvial river flooding problem in Inner Mongolia is prominent along the upper reaches of the Yellow River. Studying the scour and silting evolution of the river and the response mechanism of the floods can provide technical support for flood prevention and disaster mitigation in this river section. According to data on ice flood and scour and silting evolution, this paper produces the response relationship between a scour and silting evolution characteristics indicator and an ice flood condition change representation indicator based on formulaic calculations and related analyses. The results show that bankfull discharge, a characteristic indicator of river scour and siltation evolution, is closely related to the characterization indicators for ice flood sub-ice flow capacity and trough water storage increment. The under-ice flow capacity is about 1/5 that of bankfull discharge, and it decreases as bankfull discharge decreases. In addition, the channel detention increment increases as bankfull discharge decreases. The safety flow capacity in the main channel for ice flood control should not be less than 2 000 m³/s, and the increment in water storage should be kept below 1.4 billion m³ in the reach. The preliminary results can serve as a major guide for ice flood control in Inner Mongolian reaches.

Key words: alluvial river; scour and silting evolution; bankfull discharge; channel detention increment; ice flood; response mechanism

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No.2018YFC1508404).