

河流防凌安全流量分析方法初步探讨

贺顺德, 雷鸣, 李荣容

(黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:在不能改变河道边界条件和不利气候因素的前提下,通过防凌调度运用,调控河道上游来水量是缓解河道凌灾的重要手段。河流防凌安全流量是进行防凌调度的重要依据之一。通过分析河道凌情基本特点、有无灾害年份流量过程、探索冰凌形成和运动机理、采用理论方法分析河道冰下过流能力等多种方法,对河流的防凌安全流量分析方法进行了初步探索,分析确定的河流防凌安全流量可以作为防凌调度的基本依据。

关键词:防凌;安全流量;方法

中图分类号:TV875

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)02-0044-05

1 问题的提出

河道的凌汛灾害主要是由于河道内产生冰塞或冰坝、壅高水位造成的。一般情况下,引发冰塞或冰坝的因素主要有以下三个:一是容易形成冰塞或冰坝的河道形态条件;二是适宜形成凌汛的不利气候因素;三是适于产生大量流冰的水流动力因素。实践证明,在尚不能改变河道边界条件和不利的气候因素的前提下,依据短期较有效的气温预报和下游的凌情适时地调控上游来水量,使封、开河期上游来水均匀平稳,避免不利的动力条件和不利的气候条件相遭遇,是缓解河段凌情、减轻或避免凌灾的重要手段。

因此,河流防凌安全流量就是经适时调控后的上游来水量,是防凌调度一个重要基本参数。显而易见,河流防凌安全流量包含三个方面的内容:一是从何时开始调控,何时结束调控,即调控的开始时间和结束时间;二是调控的流量是多大,即凌汛期河道内维持多大的流量对于河道的防凌来说是比较安全的;三是调控的流量过程,即在调控的过程中维持怎样的流量过程,对河道的防凌来说是比较有利的。

河道的凌情影响要素较多,且相互制约和影响。除了热力条件、水动力因素等条件外,河道边界条件也是凌情发展并形成凌灾的重要因素。由于凌汛期河道安

全流量问题本身较为复杂,影响因素众多,鉴于篇幅所限,本次仅对河道边界条件不发生明显变化条件下防凌安全流量的分析方法进行初步探讨。对于河道边界条件发生明显变化的河段,还应分析河道冲淤引起的平滩流量和冰下过流能力变化等情况,该方法可以参考使用。

2 河流防凌安全流量的分析方法

2.1 分析河流凌情及凌灾基本特点

分析河流的凌情和凌灾基本特点是研究河流凌情演变规律的基础工作,该项工作的主要目的是为了对流域的凌情有初步的认识,并可以确定研究流域的凌汛期划分时间。主要包含以下几个内容:

(1)分析河流的自然地理和河道特点。包括流域的地理位置和河流走向、河道的纵横断面变化等基本特点。河道的边界条件对凌汛的影响是非常重要的,对动力条件有重要的制约作用。

(2)统计分析河道内凌情基本特征值。包括开始流凌时间、结束流凌时间、开始封冻时间、结束封冻时间、封冻长度、流凌密度等基本凌情参数,从而可以初步了解研究流域的凌情基本特点,并确定和划分河流的凌汛期。

(3)统计分析流域内凌汛期气温资料。包括多年

平均气温、极端最低气温、极端最高气温、累积负气温、气温变化曲线等,从而可以了解和认识凌汛期流域的气温变化规律以及气温与凌情的基本关系。

(4) 统计分析凌汛期河流的径流特点。包括凌汛期径流量、径流过程、径流地区分布规律。在此基础上,可以分析统计河道内各河段的槽蓄水增量。该项工作中,需要着重分析流域内大中型水利枢纽工程对凌汛期径流过程的影响。随着水利水电开发程度的逐步提高,很多流域内兴建的大中型水利枢纽工程具有较大的调蓄功能,往往在凌汛期发电运用,会对河道的凌情产生较大的影响。

(5) 在上述分析的基础上,总结河道内的凌灾基本特点和成因。凌灾的成因一般包括流域自然地理特点、热力因素、河道边界条件、水动力因素等几方面。通过分析,可以提出河道内凌灾的主要致灾因素。

2.2 分析对比有无凌灾年的流量过程

利用实测气温和流量资料分析确定河道凌汛期安全流量是常用的方法之一。该方法利用流域凌汛期的气温和流量观测资料,分析在大致相同的气温条件下凌灾年份和非凌灾年份的流量变化过程,分析流量与凌灾的基本关系,并重点研究凌汛灾害最为集中时段的流量变化情况,通过对比分析不发生凌灾时河道内实测安全流量,合理确定气温基本相似条件下,河道内不易发生冰凌灾害的河道安全流量及其过程。可见,该方法必须三个前提,一是河道的边界条件没有明显变化,二是流量的监测断面必须一致,三是有无凌灾年份的气温过程基本相似(包括气温变化趋势和累积负气温)。

2.3 分析河道冰下过流能力

一般情况下,河道冰下过流能力根据水文测站实测断面和流量资料综合分析确定,但往往河段内水文测站较少。所以,可以根据以往冰凌运动机理研究成果,选取多个代表断面进行数值分析计算,分析冰期的河道冰下过流能力。

根据国内外学者的研究,封冻冰盖稳定性即冰盖下安全流量符合傅汝德数所反映的临界稳定性准则。根据《凌汛计算规范》(SL428-2008),当冰盖前缘水流的傅汝德数 Fr 大于临界傅汝德数 Fr_c 时,或冰盖前缘水流流速 v 大于冰花下潜临界流速(也称第一临界流速) v_{01} 时,则冰花潜入冰盖底面;冰花潜入冰盖底面后,冰盖下由于阻力增大,流速减小,当其小于冰花堆积临界流速(也称第二临界流速) v_{02} 时,下潜冰花即发

生堆积,冰塞开始形成并逐渐发展,造成上游水位壅高、流速减小。当 $v < v_{01}$,冰花不再下潜,沿冰盖前缘平铺上延。 Fr 计算公式如下:

$$Fr = v_0 / (g \times H_0)^{1/2}$$

式中: v_0 为冰盖前缘的断面平均流速 (m/s); H_0 为冰盖前缘平均水深 (m); g 为重力加速度 (m/s²)。

冰花下潜临界流速的计算,国内外有不少观测研究成果,而且其结果比较接近,变化在 0.6~0.7m/s 之间。冰花在冰盖下面的堆积临界速度 v_{02} ,根据黄河刘家峡至盐锅峡及第二松花江白山河段观测资料,变化在 0.3~0.4m/s 之间。

根据不同河段冰花堆积的孔隙度分析, Fr_c 在 0.06~0.12 之间变化。原水电部西北院、北京院据黄河刘家峡至盐锅峡河段的观测资料分析, $Fr_c = 0.09$ 。通过野外观测和理论分析说明,当河段的 $Fr_c > 0.09$ 时,封冻冰盖前缘的流冰易潜入冰盖之下堆积,从而形成冰塞。

计算冰下过流能力时,采用水力学常用的曼宁公式。基本计算公式如下:

$$Q = A \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}}$$

式中: Q 为河道流量 (m³/s); A 为断面过流面积 (m²); R 为断面水力半径 (m); J 为水面比降; n 为综合糙率,计算时采用《凌汛计算规范》中的计算公式:

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

式中: n_b 为河床糙率,根据畅流期资料确定; n_i 为冰盖糙率,计算时参考《凌汛计算规范》表 B.1.1 中的取值。

封冻后,因冰厚占去了一部分过水断面,故冰盖下断面面积修正为:

$$A = B(H - 0.9t)$$

式中: B 为水面宽 (m); t 为冰厚 (m); H 为畅流期断面平均水深 (m)。

封冻后,冰下水流为一管流,其湿周 $\psi \approx 2B$,故封冻期的水力半径 $R = A/2B$ 。

根据以上计算的水位流量关系,分析各典型断面的傅汝德数与冰期流量的关系,得到冰期各典型断面不同傅汝德数与流速、流量的关系,分析傅汝德数为 0.9 左右时的河道过流能力,即可从理论上判断河道内不易产生冰塞的安全流量。

需要说明的是,目前,根据冰凌运动的基本原理,

采用傅汝德数来判断冰塞前缘不产生冰塞的合适流量,尚处于研究阶段,且计算过程中,傅汝德数与河道综合糙率和比降的关系较为敏感,往往需要综合分析选定。所以,该方法分析得到的冰下过流能力可作为不产生冰塞安全流量的参考指标之一。

2.4 河流防凌安全流量的分析确定

在分析确定河道凌汛期安全流量时,在分析河道凌汛期流量、冰下过流能力的同时,往往还需要考虑到凌汛期河道的其他用水要求,比如灌溉、生态基流等约束条件。

综合以上河流凌情及凌灾基本特点、有无凌灾的流量过程、冰下过流能力、以及凌汛期安全流量的其他约束条件,经过多方面综合比选平衡,可以确定河流的防凌安全流量。

2.5 方法的适用条件

本次在分析河流凌情和凌灾基本特点的基础上,分析对比有无凌灾年份的流量过程,结合河道冰下过流能力,初步探讨了分析河道防凌安全流量的基本方法。但是,由于影响河流凌情的因素众多,针对不同的凌灾成因可以采用不同的防凌措施。本次所探讨的河道防凌安全流量方法也有一些适用条件:

(1)在河道防凌措施的选择方面,若可以利用上游水库适时调节河道流量过程,改善河道凌情的水动力条件,从而达到缓解和减轻河道凌灾的严重程度的目的,可以参考使用该方法,分析河道防凌安全流量,作为水库防凌调度的依据之一。

(2)该方法适用于凌汛期河道内可以形成稳定冰盖、维持较为稳定的冰下过流能力的河段。

(3)对于河道边界条件变化明显的河段,应分析河道冲淤引起的过流能力变化情况,并参考该分析方法,综合分析确定合理的河道防凌安全流量。

3 举例

下面以北方凌汛灾害较为严重的AA河为例,分

析该河的防凌安全流量。

3.1 凌情和凌灾基本特点

AA流域位于高纬度严寒地区,河流走向从低纬度至高纬度,气候严寒,低温持续时间长,宽浅散乱的河道边界条件以及桥梁等阻水建筑物的影响,上游水库发电期间加大流量下泄造成的不利水动力条件等各种因素相互影响,使得该河的冰凌灾害成因非常复杂。一般情况下,AA河冬季11月下旬开始流凌,12月上旬开始封河,翌年2月底开河,翌年3月上旬结束流凌。从凌情基本特点可以分析确定该河的凌汛期为11月1日至翌年的3月31日。

3.2 有无凌灾年流量过程

一般情况下,需要选择多年的气温特点相似的有无灾害年份,综合分析其凌汛期流量过程。由于篇幅所限,本次仅列出冰凌灾害较为严重的1987~1988年为典型年,采用气温较接近、无冰凌灾害的1977~1978年进行对比分析。两个有无灾害典型年的选择满足前述的三个前提,即河道的边界条件没有明显变化,流量的监测断面基本一致,有无凌灾年份的气温过程基本接近。详细见表1和图1、图2。

从1987~1988年等多个典型年份及其相应的对比年份的气温和流量过程分析,在气温条件比较接近的情况下,有、无灾年份的流量过程共同具有以下几个方面的特点:

(1)从凌汛期的流量过程来看,有灾年份流量过程没有固定的变化规律,忽大忽小,无灾年份的流量过程表现为从11月份至翌年2月份逐渐递减的过程,至3月又逐渐回升的特点,这种变化特点也与流域的气温变化特点基本吻合。

(2)从凌汛期的流量大小来看,有灾年份凌汛期流量偏大,凌汛期平均流量基本上均大于 $200\text{m}^3/\text{s}$,无灾年份凌汛期平均流量相对较小,特别是凌情集中发生的12月至翌年2月,有灾年份的平均流量在 $200\text{m}^3/\text{s}$ 左右,无灾年份的平均流量一般在 $150\text{m}^3/\text{s}$ 左

表1 AA河流典型年气温及平均流量表

Table1 The temperature and mean flow of typical year on AA river

项目	类别	典型年	累积负气温/ $^{\circ}\text{C}$	凌汛期各月流量/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$					平均
				11月	12月	1月	2月	3月	
月平均流量	有灾年	1987 1988	-734.1	225	214	182	160	180	185
	无灾年	1977 1978	-776.9	200	169	136	140	182	148
最小日流量	有灾年	1987 1988	-734.1	214	174	193	157	139	157
	无灾年	1977 1978	-776.9	182	134	112	111	159	111

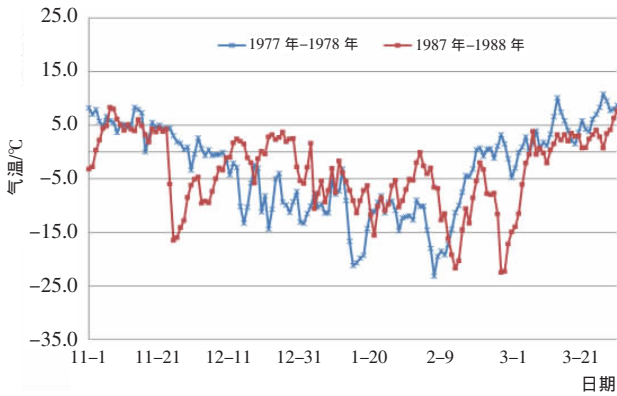


图1 1987~1988年凌汛期有无灾害年份气温过程对比图

Fig.1 The temperature process comparison of disaster and non-disaster year in ice flood season from 1987 to 1988

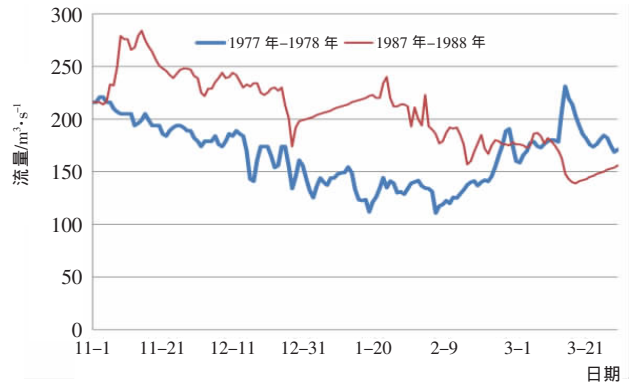


图2 1987~1988年凌汛期有无灾害年份流量过程对比图

Fig.2 The flow process comparison of disaster and non-disaster year in ice flood season from 1987 to 1988

右,有灾年份比无灾年份,该时段平均流量偏大 20% 以上,最大的偏大 60% 以上。

(3)从凌汛期的流量波动幅度来看,有灾年份的凌汛期流量波动幅度大,且波动频繁,波动幅度最大可以达到一倍以上;无灾年份的凌汛期流量过程比较平稳,日流量的递减和递增幅度均不大,一般变幅都在 20% 以内。

(4)从凌汛期的最小流量来看,有灾年份的凌汛期最小日流量一般要比无灾年份的大,一般偏大 20% 左右,无灾年份的最小日流量为 150~110m³/s。无灾年份的最小日流量与月平均流量比较接近。如果按月平均流量计算,12 月~翌年 2 月无灾年份的月平均流量为 150~130 m³/s。

综上所述,根据有无灾害年份的径流过程分析结果,AA 河干流凌汛期的流量过程维持在 150~130 m³/s,且从 11 月份至翌年 2 月份逐渐递减的流量过程时,发生冰凌灾害的几率较小,是相对比较安全的流量。

3.3 河道冰下过流能力

分析河道冰下过流能力时,应选择具有河道代表性的多个典型断面,进行理论分析计算,得到河道冰下过流能力,本次仅列出 AA 河几个代表断面的冰下过流能力和傅汝德数的关系表和典型断面的关系图,见表 2 和图 3。

从表 2 可以看出,傅汝德数为 0.09 时,各典型断面的冰下过流能力为 120~140 m³/s,平均流速 0.53~0.58m/s。按照前述的冰塞临界流速和临界傅汝德数的分析成果,冰盖前缘水流流速大于 0.6m/s,傅汝德数大于 0.9 时,冰盖前缘易产生冰塞。所以,AA 干流各典型断面冰盖前缘不产生冰塞的合适流量为 120~140 m³/s。

表2 典型断面不同傅汝德数和流量及流速的关系

Table2 The correlation of different Froude number, flow and velocity on typical sections

站点	不同傅汝德数时的流速和流量					
	0.08		0.09		0.10	
	流速 /m·s ⁻¹	流量 /m³·s ⁻¹	流速 /m·s ⁻¹	流量 /m³·s ⁻¹	流速 /m·s ⁻¹	流量 /m³·s ⁻¹
断面 1	0.56	65	0.57	125	0.64	200
断面 2	0.51	70	0.53	130	0.62	210
断面 3	0.57	70	0.58	120	0.61	200
断面 4	0.50	95	0.55	130	0.61	160
断面 5	0.52	105	0.55	140	0.65	160

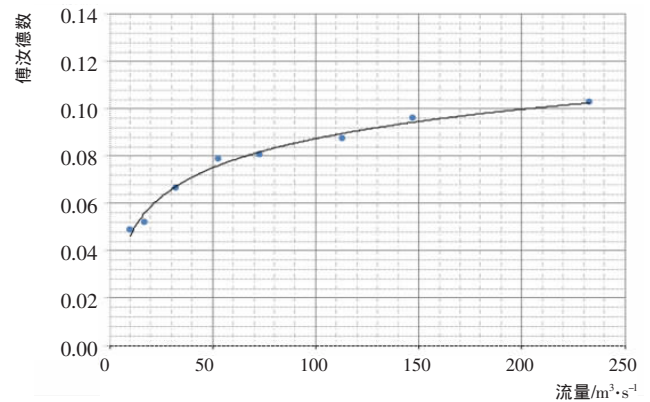


图3 典型断面傅汝德数~流量关系图

Fig.3 The correlation of Froude number and flow on typical sections

3.4 防凌安全流量拟定

根据前述 AA 流域干流凌汛期的流量过程变化特点分析,AA 干流流量较大且波动幅度变大是形

成冰凌灾害的重要原因,可以利用水库防凌的基本措施,调节凌汛期河道流量过程,创造良好的封开河形势。

根据凌汛期相近气温条件下,干流有无灾害年份凌汛期的流量过程分析,按照几个典型年的分析结果,12月至翌年2月无灾年份的河道流量比较平稳,最小流量为 $130\sim 150\text{m}^3/\text{s}$,河道流量过程维持在此流量范围内,可以有效减小凌灾的发生几率。

根据凌汛期冰下过流能力分析,AA河各典型断面冰期傅汝德数为0.9时,不发生冰塞的冰下过流能力为 $120\sim 140\text{m}^3/\text{s}$,河道内流量过程维持在此范围内,可以有效减少冰塞的发生几率。

根据AA干流凌汛期安全流量的其他约束条件分析,AA河最小流量不能小于生态基流 $120\text{m}^3/\text{s}$ 。

按照以上分析结果,考虑到AA河凌汛期不稳定封河期次数较多,冰期流量较大的特点,以控制河道流量过程,减小河道槽蓄水增量为目的,初步拟定AA河的河道安全流量为 $150\sim 130\text{m}^3/\text{s}$ 。

4 小结

河流防凌安全流量是进行防凌调度的重要依据之一。从分析河流凌情和凌灾基本特点、对比分

析有无凌灾年的流量过程、分析河道冰下过流能力等多个方面对河流防凌安全流量进行了初步探讨和分析。但是,由于影响河道凌情的因素较多,且相互影响,凌灾的成因非常复杂,河流防凌安全流量的分析确定是比较困难的。目前,分析河流防凌安全流量还是处于初步研究的阶段,以后应在逐步积累凌情资料和防凌调度经验的基础上,深入研究冰凌演变机理,采用更为科学合理的方法分析确定河流防凌安全流量,为流域的防凌调度提供技术依据。

参考文献:

- [1] 可素娟,王敏,饶素秋. 黄河冰凌研究[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2002. (KE Sujuan, WANG Min, RAO Suqiu. Yellow River Ice Research [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2002. (in Chinese))
- [2] 孙宗义, 罗万章. 黄河上游梯级水量调度与宁蒙河段冰情变化关系分析[J]. 水力发电, 1997, (7):43-47. (SUN Zongyi, LUO Wanzhang. The analysis for relationship between cascade reservoirs regulation of Yellow River upper reach and ice condition of Ning-Meng reach [J]. Water Power, 1997,(7):43-47. (in Chinese))
- [3] 蔡琳. 中国江河冰凌[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2008. (CAI Lin. Chinese River Ice Research [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2008. (in Chinese))

Discussion on Method for Safety Flow of Ice-flood Prevention

HE Shunde, LEI Ming, LI Rongrong

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

Abstract: In the condition without change of channel boundary condition and disadvantageous weather factors, the ice-flood prevention regulation and water volume control are important means of decreasing ice-flood disaster. Safety flow of ice-flood prevention is one of the most important bases for ice-flood prevention regulation. Some preliminary exploration on method of solving safety flow of ice prevention has been made, by analyzing the characteristics of ice-floods, comparing the flow processes in the disaster and non-disaster years, exploring the formation and motion mechanism of the ice, and studying the carrying capacity under river ice. The research result of safety flow can be used as basic foundation in ice-flood prevention regulation.

Key words: ice-flood prevention; safety flow; method