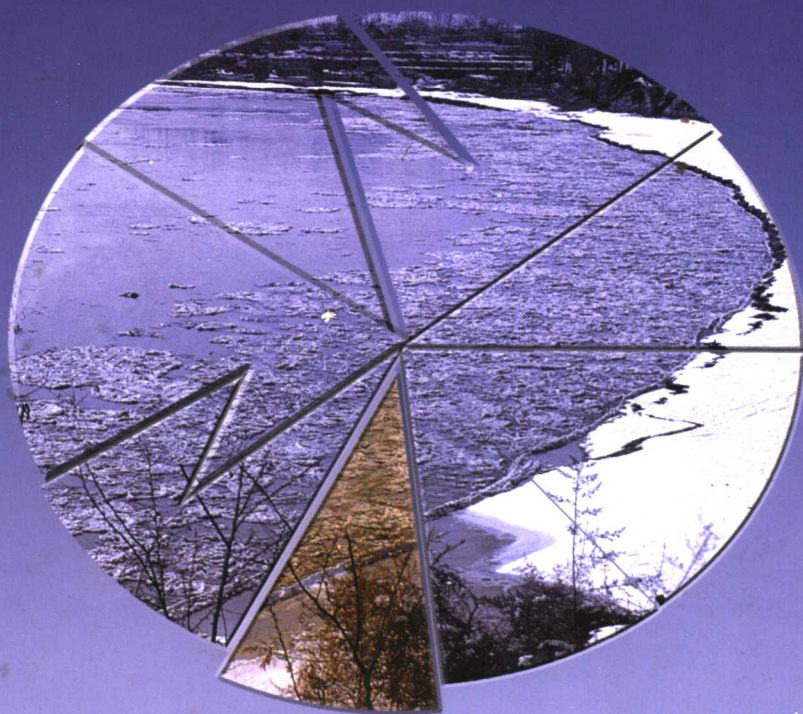


黄河冰凌研究

可素娟 王 敏 饶素秋 等编著



HUANGHE BINGLING YANJIU

黄河水利出版社

黄河冰凌研究

可素娟 王 敏 饶素秋 等编著

黄河水利出版社

图书在版编目(CIP)数据

黄河冰凌研究/可素娟等编著. — 郑州: 黄河水利出版社,
2002. 12

ISBN 7-80621-636-7

I. 黄… II. 可… III. 黄河-防凌-研究
IV. TV882.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 095344 号

出版社: 黄河水利出版社

地址: 河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码: 450003

发行单位: 黄河水利出版社

发行部电话及传真: 0371-6022620

E-mail: yrep@public2.zz.ha.cn

承印单位: 黄河水利委员会印刷厂

开本: 787 毫米 × 1 092 毫米 1/16

印张: 14.75

插页: 1

字数: 340 千字

印数: 1—1 500

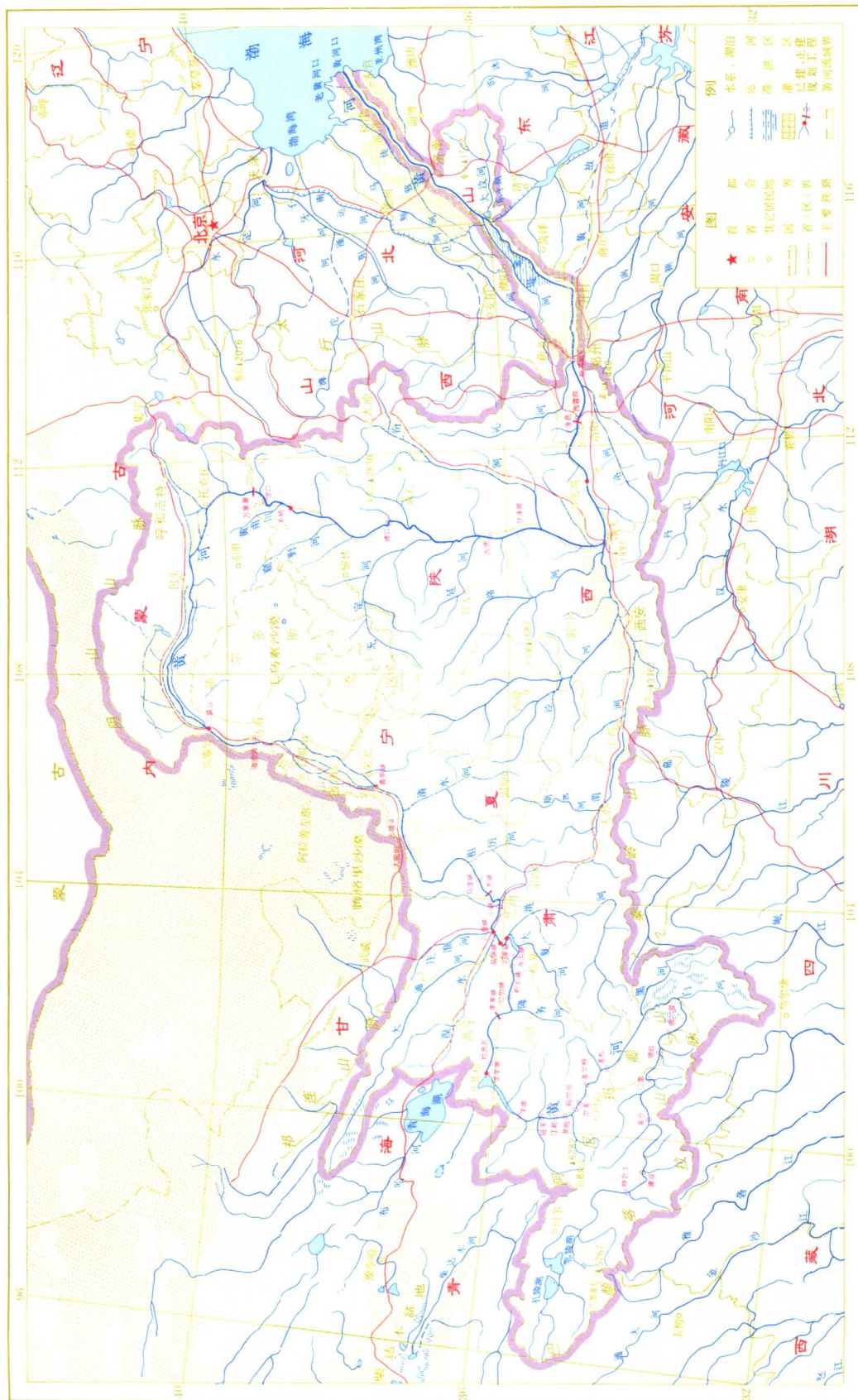
版次: 2002 年 12 月第 1 版

印次: 2002 年 12 月第 1 次印刷

书号: ISBN 7-80621-636-7/TV·297

定价: 35.00 元

黄河流域简图



序

黄河源远流长,孕育了中华民族5 000年的文明史,然而她又以水旱灾害频繁而著名。其中,凌汛灾害是黄河特有的最难防守的灾害之一,故素有“伏汛好抢,凌汛难防”、“凌汛决口,河官无罪”之说。人民治黄以来,尽管党和国家高度重视治黄工作,取得了50余年伏秋大汛岁岁安澜的辉煌成绩,但却仍在1951年和1955年的凌汛期,因为冰情严重,黄河下游出现两次大堤决口。因此,黄河冰凌问题是黄河治理中的重大问题之一。

对黄河冰凌的科学研究主要起始于20世纪五六十年代,经过黄河水文工作者50多年的艰苦探索,黄河冰凌的观测和研究取得了很大的进展,并逐步建立了较为完整的冰情预报方法体系,预报精度也逐渐提高。尽管在黄河冰凌研究方面已做了大量工作,但是研究成果比较分散,没有将其提炼综合,使之形成体系。该书几位作者都是长期从事黄河冰凌研究和冰情预报的工作者,他们在认真系统总结以前研究成果的基础上,进行综合和提高,在新世纪之初,适时地完成了《黄河冰凌研究》一书。尽管该书还有不完善和不成熟之处,但毕竟使黄河冰凌研究工作向前迈进了一步。这对黄河防汛、黄河水文,特别是黄河冰凌研究领域来说,无疑是一件可喜可贺之事。

该书深入系统地分析了冰凌的演变过程、黄河冰凌的特点及水利工程运用对冰情的影响、黄河冰凌灾害情况及防护措施,并在冰情预报现状的基础上进一步深入研究了冰情预报数学模型,在热交换计算方法和封、开河预报数学模型研究等方面均取得一定的进展。

该书资料翔实,分析系统深入,研究方法严谨,对了解黄河冰凌特点、演变规律以及防凌减灾等方面都具有重要的参考价值。面对21世纪,随着人类活动的影响、气候的变异、万家寨和小浪底等水利工程的全面运用,再加上黄河河道条件处于不断的冲淤演变中等因素,黄河冰凌仍然非常严重,新的问题将会不断出现,这就需要黄河水文工作者继续努力,加强黄河冰情观测,研究掌握冰情规律,做好冰情预报,为确保黄河安澜作出更大的贡献。

是以为序。

牛 2.12.
2002.9.12.

前 言

黄河由于其所处的地理位置和河流走向,再加上河道冲淤多变,上游宁夏、内蒙古河段和下游河南、山东河段冰情严重,灾害损失惨重。由于我国冰凌研究起步比较晚,黄河凌情复杂,以及当前气象预报精度和预见期等因素的制约,对黄河冰凌的研究至今还不能完全满足黄河防凌的需要。黄河凌汛问题仍然是黄河治理中的重大问题之一。

20 世纪 90 年代以来,我们先后承担和参加了治黄基金项目“黄河下游实用冰情预报数学模型及优化水库防凌调度的研究”,治黄专项“黄河上游实用冰情预报数学模型及优化水库防凌调度的研究”,治黄专项“万家寨水库防凌调度运用方式研究”,国家自然科学基金重点项目“河冰、海冰的形成机理、危害及防护措施”等项目。为了系统地总结已取得的成果,使其能在黄河防凌中发挥出更大的作用,同时也更好地与国内同行交流,在新世纪之初,我们将已做的研究工作整理提炼,并编著成书。

全书共分六章,主要内容如下:

第一章为冰凌的形成及演变,主要对冰凌演变的几个阶段及冰塞和冰坝的成因进行了分析,并根据冰凌演变过程简要分析了影响冰凌的因素。

第二章为黄河凌情特点及其变化成因分析,主要分析了黄河干流上冰情比较严重的河段的凌情特点,并通过影响冰凌的主要因素分析凌情特点变化的原因。

第三章为黄河凌汛灾害及防御措施,主要分析了黄河历史上及新中国成立后的典型灾害和目前主要的防凌措施。

第四章为黄河冰凌观测概述,简要说明了黄河上冰凌观测站网、观测项目、观测手段等,并对专项观测中的冰塞和水内冰的观测进行了分析。

第五章为黄河冰情预报研究,主要论述了黄河冰情预报方法的发展和冰情预报现状,并在冰情预报现状的基础上对封、开河预报模型进行了深化研究。

第六章为黄河流域典型年凌情特点分析,主要对比较典型的冰情年度特别是近几年凌情变化比较大的凌情特点及成因进行了分析。

本书第一章由王玲编写;第二章由饶素秋编写;第三章和第四章由王敏编写;第五章由可素娟编写;第六章第一节至第四节由杨特群编写,第五节由王敏编写。全书由可素娟统稿,陈赞廷、吕光圻审核。

感谢黄委水文局局长、教授级高级工程师牛玉国为本书作序。

书中引用和参考了许多以前的研究成果,详见参考文献,在此对有关成果的作者表示感谢。

黄河冰凌受河道条件、水力条件和热力条件的影响,演变非常复杂,并且随着气候变迁、水利工程的运用及河道的冲淤演变等,黄河冰凌出现了很多新问题和新情况,需要进行进一步深入研究,加之作者的阅历有限,书中难免有不妥之处,敬请各位专家批评指正。

作 者

2002 年 9 月于郑州

目 录

序

牛玉国

前言

第一章 冰凌的形成及演变	(1)
第一节 冰凌演变	(1)
第二节 冰塞和冰坝	(20)
第三节 影响冰情变化的因素	(40)
第二章 黄河凌情特点及其变化成因分析	(50)
第一节 概述	(50)
第二节 河道、水文和气象条件	(56)
第三节 凌情特点	(69)
第四节 水库运用对凌情的影响	(81)
第三章 黄河凌汛灾害及防御措施	(97)
第一节 黄河凌汛灾害	(98)
第二节 黄河凌灾防御措施	(105)
第四章 黄河冰凌观测概述	(114)
第一节 观测站网	(114)
第二节 观测项目及观测工具	(115)
第三节 专项冰凌观测	(115)
第五章 黄河冰情预报研究	(126)
第一节 概述	(126)
第二节 指标法	(127)
第三节 经验相关法	(129)
第四节 冰情预报数学模型	(146)
第六章 黄河流域典型年凌情特点分析	(175)
第一节 1996~1997 年度黄河凌情	(175)
第二节 1999~2000 年度黄河凌情	(188)
第三节 20 世纪 90 年代黄河上游凌情	(199)
第四节 2000~2001 年度黄河下游凌情	(203)
第五节 2001~2002 年度黄河凌情	(215)
参考文献	(226)

第一章 冰凌的形成及演变

冰凌是冬季的一种水文现象,具有发生、发展及消失的复杂过程。不同的河段所处的地理位置及影响因素不同,冰凌的形成和演变特点也不相同,其演变过程及规律取决于热力因素、水力因素及河道形态特点等,人类活动在不同程度上也能改变冰凌的演变规律。

黄河冰凌比较严重并具有危害的河段主要是上游的内蒙古、宁夏河段和下游的山东、河南河段以及北干流部分河段,黄河主要冰凌河段见图1-1。这些河段的冰期一般为3~5个月,在冰凌演变过程中往往会发生冰塞、冰坝等各种冰凌灾害,轻者淹没滩地村庄,妨碍引水工程、水电站正常运行;重者破坏桥梁、水工建筑物,甚至破坏堤防,决溢成灾。因此,研究黄河冰凌的演变规律及其特点,分析其主要影响因素,总结防凌工作的经验,对今后的防凌具有重要的意义。

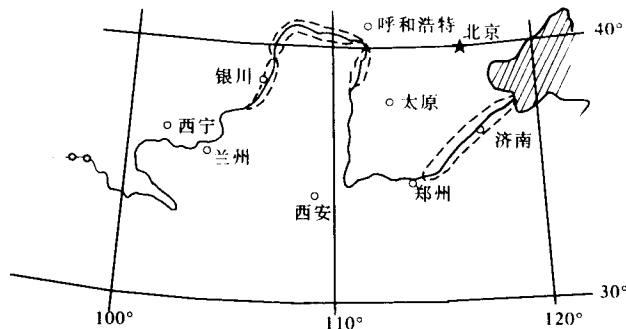


图 1-1 黄河主要冰凌河段示意图

第一节 冰凌演变

黄河处于我国北方河流具有冰情现象的过渡地带,加上部分河段呈西南—东北流向,因此黄河的冰凌演变规律十分复杂。根据冰情生消的发展过程,可以把冰凌演变划分为六个阶段,即成冰、流凌、初封、稳封、融冰、开河(见图 1-2)。

根据黄河的实际情况,习惯上又把冰凌演变分为三个时期,即结冰期、封冻期、解冻期。由于影响冰凌的热力因素、水力因素及河道边界条件的不同组合,黄河的冰凌不仅具有一般演变规律,还具有自己的独特规律,现按黄河冰凌演变的三个时期分述如下。

一、结冰期

河流中的水形成冰,冰随着水流动,直至流冰在局部断面受阻封冻为止,我们称这一时期为结冰期。在结冰期内,既有冰的生成,又有冰的运动,为方便起见,我们把这一时期

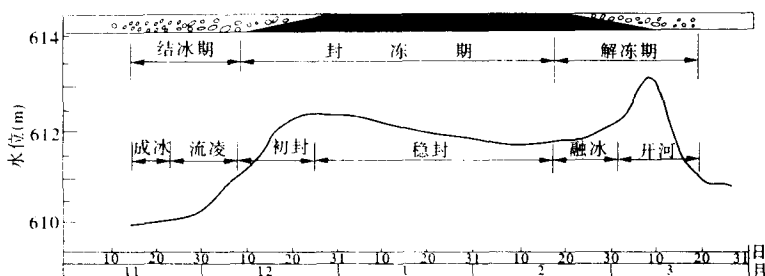


图 1-2 黄河冰凌演变过程示意图

分为两部分进行论述,即成冰和流凌。因为河道中的水是在流动过程中形成冰,同时,冰又是在水体运动过程中进行演变,因此也有学者把河流结冰期称为流凌期,把结冰过程融合在流凌过程中。

(一)成冰

水在 0°C 或略低于 0°C 时凝结成固体,称为冰。因此,冰是液态水在低温下物理变化的结果。

1. 水成冰机制

液态水分子是由氢氧原子构成的,在水温大于 0°C 时,水以单个分子形式活动,且分子间游移非常活跃;当水温下降到冰点 0°C 时,双水分子和三水分子比重增加,并达到饱和,水分子运动速度急剧下降,并以原子键的形式有规则地互相连接形成晶体。但是,在结晶的同时,释放出来的潜热一部分被水流带走或和大气交换被吸收掉,一部分则促使正在凝固的冰晶融化,所以水温在 0°C 时正处于形成冰晶的不稳定状态,在此温度下的水称为过冷却水。只有当水温略低于 0°C 时,结晶时释放的潜热大部分被冷空气吸收或被水带走,小部分潜热已不能使冰晶再融化。由此可见,水开始结冰的必要条件是水的过冷却。

河流水温的变化取决于水体与周界环境的热交换,其中包括水与大气热交换、水与河床的热交换,有冰盖后还有冰盖与大气的热交换,水与冰盖的热交换。水与河床的热交换量较小,因此水与大气的热交换起主导作用,当气温低于水温时,水面向大气散热,直至水温 $t \leq 0^{\circ}\text{C}$ 。

$$t = \frac{sbl}{qc\rho} \leq 0 \quad (1-1)$$

式中 t ——水温($^{\circ}\text{C}$);

s ——水面进入大气的热通量, W/m^2 ;

b ——水体宽, m ;

l ——水体长, m ;

q ——流量, m^3/s ;

c ——比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;

ρ ——水的密度, kg/m^3 。

对静水来说,这种热交换主要发生在水体的表层,因为水在 4°C 时比重最大,当表层水失热水温降到 4°C 左右时,下层水分子比重小,能上、下层对流。当表层水失热水温降

到 0°C 时,下层水分子比重大,上下层对流停止。因此,静止水的过冷却只能发生在表层附近。但是,对于流动的水来说,由于水体本身的紊动作用,能起到水体内热能量的扩散和混合作用。因此,流动的水不仅有水、气热交换,还有水体内紊流热交换。冬季河道水流的紊动作用既能加快水面的失热过程,又能促使混合层水体的过冷却,因此河流结冰不仅发生在水流的表面,同时亦发生在水体中间。

太阳辐射除了直接影响水体外,还有太阳辐射、散射、反射等的总和称为总辐射量,其辐射量能反映在地表大气的热能量中,而大气的热能量可以用气温来度量,因此在冰情研究中往往把冰凌现象与气温建立相关关系。水流紊动的大小可反映在流速或流量上,因此在冰情研究中又常把冰凌现象与流速或流量建立相关关系。

2. 结冰的形式

水有静水和动水之分,静水结冰发生在水体的表层,是水体表面失热达到过冷却状态,而深层水体仍保持高于 0°C 的温度。流动水体的失热,由于水流的紊动混合作用,不但能形成表层冰,同时亦能形成水内冰。河流中的水是流动的,但是在河流的岸边、库区却有一部分静水或接近于静水,因此河流结冰主要有两种形式,一是岸冰、库面冰,二是水内冰。

(1)岸冰、库面冰。岸冰指沿河道、水库等水体岸边冻结的冰带。由于沿岸边流速很小($<0.3\text{m/s}$),而且土壤的热容量比水体小,在低温下,土壤较水体失热快,故岸边水体特别在水表层易发生过冷却现象,容易形成针状冰结晶,随着气温的下降,冰晶冻结成薄冰层,形成一侧固结于岸边,另一侧浮于水面的宽窄不等的冰带(见图 1-3)。



图 1-3 黄河包头河段岸冰

黄河岸冰根据其成因可分为:①初生岸冰:当晚上气温下降至 0°C 以下时,沿岸边表层过冷却水形成透明针状冰结晶,冰晶相互冻结又形成薄冰或冰淤,到白天当气温回升到 0°C 以上时,岸冰就地融化或脱岸随水流漂移。②固定岸冰:初生岸冰形成后,气温一直稳定在 0°C 以下,岸冰发展成牢固的冰带,随着气温的下降,岸冰宽度和厚度逐渐增加。固定岸冰可以保持到整个冰期。若河流中部流速很大($>1.5\sim 2.0\text{m/s}$),岸冰的发展就会停止,若在宽浅河段,河流中部流速较小或河中流凌密度很大时,有利于岸冰向河中发展,

最终发展成冰桥或河道封冻。③堆积岸冰：流动的冰花、冰块受水流或风力的作用带到岸边积集冻结成冰带。这种岸冰多数是由冰块堆积而成的，表面起伏不平，少数是冰块平排而成。这种堆积岸冰的延伸亦可促成河道封冻(见图 1-4)。



图 1-4 黄河上游堆积岸冰

水库库区内的流速很小，尤其是靠近大坝处的水面流速接近于零，故水库库区水面在低气温且没有风浪情况下，很容易结成大面积的平滑库面冰。

(2)水内冰。水内冰是在河流水面以下水体中生成的一种海绵状的冰。黄河在冬季枯水期的流速虽小，但一般都大于 0.4m/s ，由于水流的紊动湍流作用，在负气温的影响下，水的过冷却现象不但发生在水体表面，同时亦发生在整个水体的混合层中，因此河流能在整个水体中形成冰晶。由此可见，水内冰是水与大气热交换和水流的紊动作用的产物。水内冰最初是生成细小的冰晶或冰淞，在水流作用下，互相冻结成片状、球状、菱状体，以后又逐渐粘结成海绵状的冰花，再扩大冻结成冰花团(见图 1-5)。



图 1-5 黄河河曲河段水内冰

在流动水体的表层，如果表层流速很大，同时受风力影响，有时成冰反而困难，即使表层形成细小冰晶，因剧烈的机械作用亦难凝结成较大的冰淞或冰花，只有悬浮到水体中，

在较小的流速区互相粘结增大体积发展成水内冰。正是由于水流的紊动作用,在水体中任何部位都有可能产生冰晶,黏附在河床上的冰叫“河底冰”,河底冰呈不连续状,故亦叫“锚冰”。锚冰体积不断向上扩张,形如一簇簇暗礁,亦称“冰礁”,冰礁受水流的冲击多呈蘑菇状(见图 1-6)。河底冰体积逐渐增大,当上浮力大于河底的黏着力时,底冰也会漂浮到水面。

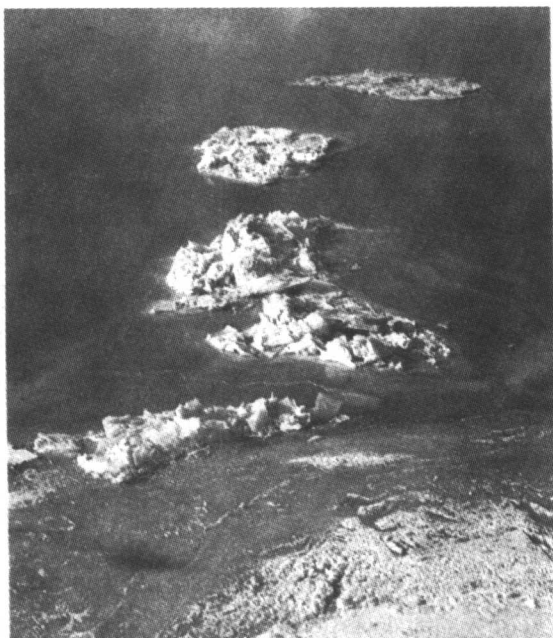


图 1-6 黄河包头河段冰礁

当水中含有泥沙或其他悬浮固态杂质时,容易形成以这些悬浮物为核心的水内冰,这是因为固态悬浮物比热小,在它的外壁有一层很薄的附着水,薄壁附着水分子只能沿悬浮体表面作平移活动,不能作三维空间活动,一旦附着水过冷却很容易成冰,成冰后表面又有附着水层,再结成冰,如此慢慢扩大。如以泥沙颗粒为核心凝结成的冰淤在黄河上是普遍存在的,故黄河水内冰都带有暗褐色。据观测,黄河上游在一个冬季,水内冰能挟带上千吨泥沙。金属导热性能强,故金属在水中凝结冰量最多。如在黄河上游,放在河中的直径 30cm 半圆形金属网,一夜之间可凝结 100 多公斤的冰屑(见图 1-7)。急流飞溅的水珠或蒸发的水汽在空气中冻结成冰晶,降落返回到水中后也可以成为冰的结晶核。

3. 冰的物理性质

河流结冰过程,是指由于水体失热处于过冷却状态,水面或水体内形成初始冰晶,随着气温继续下降,冰晶体发展成冰淤、冰花、冰块直至形成冰盖的冰情现象过程。单个冰晶的尺度为 1mm 左右,漂浮水面的冰花直径有几厘米到几十厘米,冰花团或冰块的直径有 0.5m 至 3~5m,甚至更大。

冰是具有晶体结构的固态物质,其强度和变形性质具有明显的方向性。冰的强度和冰温、冰密度、含盐量等有关。冰的密度大,温度低,含盐量少,则强度大,反之则强度小。纯冰在一个大气压力下,在 0℃ 时比重为 0.917。纯冰在 -4℃ 时体积最大,比重最小,能浮



图 1-7 金属网凝结的冰屑

在水面。冰在一个大气压力下,融点为 0°C ,每增加一个大气压融点降低 0.0075°C 。在压力不变的条件下,冰的比热为 $2.04\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$,仅为水的一半(水温升、降 1°C 吸、放的热量)。

冰体中往往含有空气、溶液、盐分和固体杂质等,所以天然冰都属多相体。当冰体内含有空气时,容重就会比纯冰容重小;含有泥沙等固态杂质时,容重就会比纯冰的容重大。冰体能浮在水面或在水中漂移,甚至沉在水底,和水流紊动有关,亦和冰的容重有关。液态水在结晶过程中能排斥异类成分,故冰有淡化水质的作用。海水含有盐量,结冰点比纯水低,如含盐量为 18‰ 时,其冰点为 -1.77°C ,在其他条件相同时,江河入海口的冻结要比河道晚些。冰的线胀系数为 $52.7\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,体胀系数为 $153\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,即 10m 长的冰块,每降低 1°C 可增长 0.50mm (在 $0\sim 4^{\circ}\text{C}$ 之间),因此结冰会导致

容冰器破裂,引起水工建筑物破损,会引起冰盖沿岸边坡上爬甚至破坏防浪墙及护坡。

天然冰淤或冰花在水中呈悬浮状态,当其水力沉降速度小于紊动脉冲垂向分速时,冰花浮到水面。以固态杂质为核心的冰花,当冰花体积增大,固态杂质重量抵消不了冰体的上浮力时,冰花亦开始上浮到水面。

(二)流凌

流动的冰称为凌,冰在水面或水体中随水流动称为流凌。流凌可以分冬季结冰流凌和开春解冻流凌,前者流凌以冰花、冰淤为主,后者以碎冰块为主。这里介绍的是封冻前的结冰流凌。

岸冰脱落或水内冰上浮随水流动即开始流凌,流凌起始日期是指某河道的局部地段或断面首次出现流凌的日期。黄河上一般在岸冰或水内冰形成后的 $1\sim 2$ 天内就开始流凌。

1. 流凌日期

在大河上流凌出现的时间各不相同,流凌起始日期取决于气温。气温有地带性,高纬度地区气温比低纬度地区气温低,故处在高纬度的河流起始流凌日期早。如黄河上游内蒙古河段位于黄河最北端,冬季气温转负时间要比下游的山东河段早 1 个月左右,故内蒙古河段流凌时间要比山东河段提早 1 个月左右。对于同一河段,流凌起始日期不仅取决于气象因素,而且取决于河道的走向。如果河流是东西走向,和地理纬向一致,则全河段可能同时开始流凌,或者在很短的 $1\sim 2$ 天内全河段流凌,如黄河上游内蒙古的三湖河口至昭君坟河段、青海的玛多至唐克河段,基本上是同时开始流凌的。另一种情况是河流为南北走向,水流方向和地理经向一致,则处在高纬度的河段先于低纬度的河段流凌,如黄河下游高村至利津河段,上游银川至巴彦高勒河段,都是自西南向东北流向,亦即由低纬度流向高纬度,处在高纬度的利津断面和巴彦高勒断面比处在低纬度的高村断面和银川断面先流凌,然后逐渐向上游发展,形成全河段流凌,其上、下断面流凌时间平均可相差

2~5天。

某河道从开始流凌日起,到局部河段或断面封冻日止,称这一时段为流凌期。流凌期的长短,取决于气温的变化和流量的大小,其中气温是起主导作用的因素,而流量的大小可以提前或推迟封冻日期。气温和流量的不同组合使流凌期长短不一。黄河下游流凌期一般为10天,最短年份只有1天,最长的年份可达60天。如1954年黄河下游冬季冷得早,12月平均气温较常年同期偏低,尤其是中旬初的一次寒流侵袭,惠民12月14日气温为 -12.9°C ,下游河道普遍淌凌,15日海口四号桩至小沙一带插封,16日向上封至罗家屋子,18日插封至前左,从流凌开始到初封只有1天时间。如1979~1980年黄河下游凌汛期气温呈前期暖后期冷,淌凌时间长,封河时间晚。12月初有一次冷空气,但气温降幅不大,河口地区最低气温为 $-7\sim-9^{\circ}\text{C}$,12月1日艾山以下河道开始流凌,流凌后气温变幅不大,1月5日全下游普遍流凌,流凌密度为20%~40%,25日前后气温回升,流凌暂停。1月底开始连续二次大幅度降温,北镇降温幅度 11°C ,最低气温达 -16°C ,流凌密度开始增加,1月30日河口地区十八公里处首先插凌封河,此时西河口断面流凌密度为90%,惠民地区为60%~80%,2月2日封到刘家园,5日封至长清桃园。从开始流凌至首次插封前后共经历了60天。

2. 流冰来源与密度

流冰的来源有岸冰脱落而成的冰块,有水内冰、河底冰脱落上浮水面的冰花、冰淤,亦有降雪与水面冰晶、冰淤凝结在一起形成的冰花团。流冰的形状无一定的规律,小的有如卵石形的冰珠、冰粒,大的有棉花状的冰花团,还有互相碰撞成菱角状的冰块。黄河流凌期水面上形成的流冰其直径小的有0.1~0.5m,大的可达2~5m,其厚度在上游可达0.1~0.5m,下游则为0.05~0.2m。

河道流冰的多少可用流凌密度来表示。流凌密度是指在观测河段内流冰的水面面积和同水位畅流水面面积的比值,即

$$D = \frac{f}{F} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 D ——流凌密度;

f ——观测河段内流冰所占的水面面积;

F ——同水位畅流水面面积。

一般规定 $D < 30\%$ 时称“稀疏流冰”, $30\% < D < 70\%$ 时称“中度流冰”, $D > 70\%$ 时称“全面流冰”。

流凌密度的大小主要受气温的影响,在流凌期内,气温不断下降,水和大气、冰和大气继续进行热交换。通过热交换,一方面水体不断产生新的冰晶、冰淤体,另一方面冰体互相冻结,促使体积增大、强度增加。随着流冰的增多增大,水面不断被冰块充塞,水与大气的热交换机遇减小,冰与大气的热交换机遇增加。由此可见,流凌密度随气温的下降而增加,气温下降得快,密度增加得亦快。

在流凌期内,由于水内冰和水面冰的阻水作用,使流速减小,同流量的水位要比畅流期的水位增高。

二、封冻期

河道封冻是指某河段内出现横跨两岸的稳定冰盖,其敞露水面面积小于河段总面积的 20% 左右。河道封冻多数不是在全河段同时发生,它有一个封冻发展的过程,初始封冻可能先在某一断面或几个断面发生,然后向上、下游发展,逐渐形成全河段封冻。我们一般指的起始封冻日期是河段内某断面首次出现封冻现象的日期。全河段封冻后,表示进入稳定封冻期。稳封期是一个年度中气温最冷的时段。在黄河上把河段封冻过程分为两个阶段:即先在一个或几个断面开始封冻,发展到河段 80% 以上的水面封冻称为初封期;当河段达到 80% 以上封冻之日起到开始融冰解冻称为稳定封冻期。习惯上常常把某河段初封日期至全河段解冻开通之日所经历的时间称为封冻历时。

(一)初封期

大河流的封冻,除了少数河道流向和纬度一致,且在强寒流袭击下能全河段同时封冻外,多数河流的起始封冻是在水力、热力及河道边界条件的综合影响下先在某一个断面封冻,也可能在几个断面处先后封冻。黄河下游和上游宁蒙河段,河道走向是西南—东北向,即河段的下游处于高纬度低气温地区,故首封断面都发生在河段下游处,然后向河段上游发展,或者在河段下游的几个断面处先后封冻形成梯级封冻段。

1. 初始封冻形式

初始封冻根据不同的成因,有两种封冻形式:

(1) 由于漂浮水面的冰花、冰块达到一定的覆盖密度,当流冰所受的阻力大于水流的输移力时则开始封河,尤其是流冰在进行中遇到弯道、分叉、浅滩、束窄断面发生卡堵、滞留,而后继来的流冰连续堆积或平铺,最后冻结成冰盖,初始冰盖的形成表示该河段进入初封期(见图 1-8)。根据黄河的经验,当流冰密度达到 70% ~ 80% 以上,流速不超过 $0.4 \sim 0.6 \text{ m/s}$,负气温继续累加时就有可能封冻,这是初始封冻的必要条件。据调查,黄河上许多弯道、束窄断面或浅滩分叉道、回水末端是河流天然状态的卡封点,有 80% 左右的首封断面出现在这些卡封点。

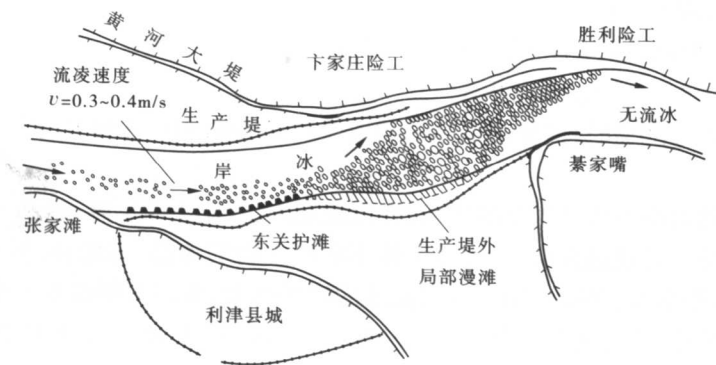


图 1-8 黄河利津河段初始封冻示意图

(2) 河道缓流区两岸生成岸冰,在冷空气影响下,岸边水流流速很小时($<0.2 \text{ m/s}$),岸冰可以自由发展,并向河心延伸,当河水流凌密度很大且输冰能力较小时,两岸延伸的

岸冰可以相互连接成一个或几个冰桥。冰桥是上下游为较长距离的流凌水面、中间为横跨断面的固定冰盖。冰桥沿水流方向的长度很短,在黄河上短的冰桥只有几百米,长的可达几公里,甚至十几公里(见图 1-9)。



图 1-9 黄河中游河段冰桥

2. 影响封冻的因素

如果把河道边界条件作为稳定不变的常量考虑,则河段的封冻条件和流冰的疏密度,冰的几何特征,冰的孔隙率、气温、水深、流速、冰与河岸间的摩擦阻力等有关。流冰的疏密度、冰的孔隙率、几何特征等是气温的函数,水深、流速等是流量的函数。这样,河道的卡封条件变成主要和气温及流量有关。因此,在进行封冻日期预报时,可以用气温、流量作为预报根据与封冻开始日期建立关系。如黄河下游以封冻前平均流量及日平均气温转负后至流凌开始日的累积负气温,预报封冻日期;或以日平均气温转负日期及当日流量和上下河段气温转负的差等预报封冻日期。黄河下游多年平均的初始封冻日期为 1 月中旬,由于每年气温和流量不同,下游最早封冻日期发生在 12 月 4 日,最晚发生在 2 月 16 日,最早最晚可相差 2 个月左右。

3. 冰盖延伸机制

形成初始冰盖后,上游源源不断的流冰在冰盖前缘平铺使冰盖向上游延伸。冰盖前缘是指较长河段的敞流水面与封冻冰盖的边界,冰盖前缘延伸也即冰盖向上游扩展(见图 1-10)。冰盖向上游发展受两个条件的控制:一是冰盖有足够的抗压抗滑(摩阻力)强度,以抵抗流冰流水的冲击压力,否则冰盖就有可能滑动或者破裂;二是冰盖向上游延伸时受河床边界条件和水力条件变化影响。此影响又可能会出现两种冰情变化,一种是冰盖前缘流速较小,当流速小于某一临界值时,上游来的冰花只能平靠在冰盖前缘使冰盖向上游平铺延伸,这时封河增高的水位主要决定于冰盖增加的湿周和阻力,如果冰盖延伸过程中一直保持较小的流速,则封冻发展直至全河段封冻;另一种情况是在冰盖前缘向上游延伸时,遇到前缘附近的断面流速较大,如大于某一临界值,能促使流冰在冰盖前缘随水流下潜,并在冰盖底部输移,或者积聚冻结形成冰塞。冰塞是河流在初封期形成和发展的一种

特殊冰情现象,冰塞阻力能大幅度地抬高水位,是一种灾害性的冰情现象。

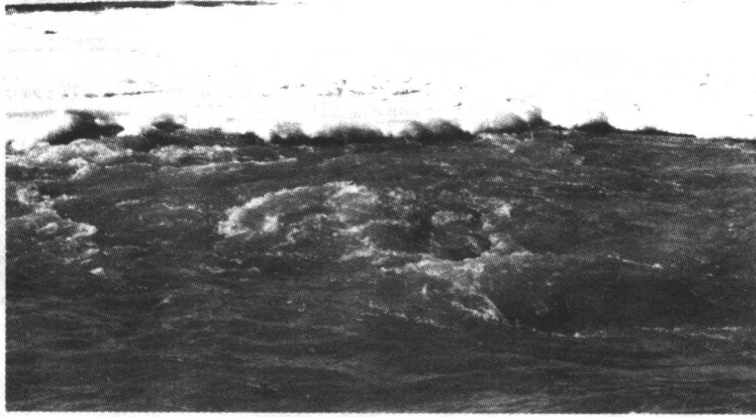


图 1-10 黄河河曲河段冰盖前缘

4. 初封期的热交换

从初封期的演变过程可以看出,初封期的河段是流动冰花和封冻冰盖同时存在。初封期是少部分河道水面封冻,大部分河道水面流凌,发展到后期是绝大部分河面被冰盖覆盖,少部分存在敞露水面(占总面积的 20% 左右),也就是说初封期发展过程就是冰盖逐步替代敞露水面,水与大气的热交换逐步被冰与大气的热交换替代。由于冰的温度比水温低和冰的反射率比水面反射率大,所以在同样气温条件下,冰与大气的热交换小于水与大气的热交换,而冰与大气的热交换也随冰厚的增加而减小。

5. 封冻的形态和清沟

河道封冻的形态受不同条件的影响,可分为平封和立封两种类型:

(1)平封就是封冻的冰盖表面比较平整(见图 1-11)。平封多发生在河道顺直、水流比较平缓的流凌河段上,在这种河段上形成初始封冻后,流冰在冰盖前缘受阻并徐徐平铺上溯,形成平封冰盖。平封的冰层厚度一般等于或稍大于流冰厚。有的河段两岸生成距离的岸冰,受强寒流的影响岸冰增宽增厚向河心延伸,互相连接成整河段的平封冰盖。在水库内库面流速很小,甚至趋近于零,在冷空气影响下水库水面能结成平滑的冰盖。

(2)立封指封冻冰盖表面犬牙交错,高低不平(见图 1-12)。立封多发生在流速较大或出现顺流大风的流凌河段上,在初始封冻前缘,上游流冰因流速较大,冰花、冰块倾斜地堆积、挤压、冻结并向上游延伸,冰盖表面形成起伏不平的冰块。立封的冰层厚度与冰块大小、堆积程度有关。在形成立封过程中,冰块很容易因流速大而下潜到冰盖底下形成冰塞,所以立封比平封具有较大的危害性。

河道封冻后,在局部地方存在狭长的敞露自由水面,称为清沟(见图 1-13)。清沟是在河边泉流、急流或废水汇入处出现的未冻结的狭长水沟,在梯级封冻的下游因流冰中断或流凌时大风把冰凌吹向一边等也会形成清沟。有的地方,群众称“亮子”或“封口”。在封冻初期形成的清沟会随气温下降或汇入温水流量减小而逐渐缩小,甚至完全消失,有的较大的清沟或温水源长期存在的清沟会存在于整个稳封期。河道封冻后因气温回升,