

黄河内蒙古段

河冰生消演变特性及数值模拟技术

River Ice Evolution of Yellow River in Inner Mongolia and
Its Numerical Simulation

李畅游 李超 史小红 张生 著



科学出版社

黄河内蒙古段河冰生消演变特性 及数值模拟技术

李畅游 李 超 史小红 张 生 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书通过对黄河内蒙古段河冰的野外观测和分析,研究了黄河内蒙古段河冰的生消演变过程的影响因素和特性,并模拟了热力-动力耦合作用下天然河道河冰发展过程,讨论了研究区内河冰过程与河道水力、泥沙之间的相应关系。全书共分为 8 章,主要内容包括:绪论,研究区概况,黄河内蒙古段河冰特性及分析,典型年份河冰过程野外观测及分析,河冰热力过程及数值模拟,弯道处河冰动力过程的数值模拟,典型河段河冰热力-动力耦合作用数值模拟,冰封期河道水力特性及泥沙输移特性分析。

本书可供水力学及河流动力学、泥沙运动力学及工程水力学等相关研究方向的研究生及从事水利专业的科研、教学和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄河内蒙古段河冰生消演变特性及数值模拟技术/李畅游等著. —北京:科学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-03-056239-5

I. ①黄… II. ①李… III. ①黄河流域—冰情—数值模拟—研究—内蒙古
IV. ①P343.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 003469 号

责任编辑:何雯雯 王希挺 / 责任校对:刘凤英

责任印制:李 冬 / 封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京科信印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018 年 1 月第一次印刷 印张:9 1/2

字数:240 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



李畅游 内蒙古农业大学教授，博士生导师。现任中国高等教育学会常务理事、内蒙古水利学会副理事长、教育部高等学校水利类专业教学指导委员会副主任、中国水利教育协会高等教育分会副理事长、中国农业工程学会副理事长、《农业环境科学学报》编委。

多年来一直从事水环境系统规划及管理、水资源最优化配置教学和科研工作。先后主持和参加了 40 余项国家和省部级重大科研项目，其中主持国家自然科学基金项目 8 项（包括重点项目 1 项）、国际合作项目 3 项。1993 年获“内蒙古自治区优秀青年知识分子”荣誉称号，1994 年被自治区授予“优秀科技工作者”荣誉称号，1996 年获“内蒙古自治区有突出贡献的中青年专家”荣誉称号，2012 年获国务院特殊津贴。1995 年获国家科技进步三等奖，2001 年与 2009 年分别获得国家级教学成果二等奖，2013 年获得内蒙古自治区教学成果一等奖，2013 年获得内蒙古自治区自然科学二等奖。发表论文 200 余篇，其中 30 余篇被 SCI 或 EI 收录。拥有国家专利 6 项。以第一作者身份撰写出版专著 4 部。



李超 内蒙古农业大学副教授，博士，从事河冰水力学和泥沙运动力学方面的研究。主要与美国克拉克森大学、黄河水利委员会黄河水利科学研究院、四川大学、内蒙古自治区水利科学研究院等高校和科研院所合作致力于研究黄河河冰生消演变机理、凌汛防治措施、泥沙输移及河道演变。先后主持国家自然科学基金项目 1 项、内蒙古自然科学基金项目 1 项、其他省部级科研项目 3 项，参加国家自然科学基金项目和省部级项目 5 项。获得内蒙古自治区科技厅项目结题验收优秀项目 1 项。发表学术论文 24 篇，其中 4 篇被 SCI 或 EI 收录，3 篇被 ISTP 收录。拥有国家专利 1 项。编写教材 1 部。



史小红 教授，博士，主要从事水环境与水资源相关的研究与教学工作。针对我国北方高纬度、高海拔的寒旱地区河流与湖泊特征进行环境演化、水文过程等机理研究。2012 年起担任国家林业总局生态定位研究站网的乌梁素海湿地生态站站长，负责生态站建设、研究及监测工作。先后主持国家及省部级项目 8 项，其中国家自然科学基金项目 3 项。2006 年获得内蒙古自治区科学技术一等奖，2013 年获得内蒙古自治区科学技术二等奖。以第一作者身份撰写和发表论文 11 篇，以通讯作者身份撰写和发表论文 6 篇；其中 5 篇被 SCI 或 EI 收录。获得国家发明专利 1 项，实用新型专利 2 项。撰写专著 2 部，参编 2 部。



张生 工学博士，教授，博士生导师。1983 年毕业于内蒙古农牧学院；2002 年毕业于以色列本古里昂大学，获工学硕士学位；2008 年毕业于英国谢菲尔德大学，获博士学位。现任内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院院长，主要从事水环境工程、水文水资源工程、地下水及土壤污染控制与修复研究。主讲 FORTRAN 语言与程序设计、水文地质学、水环境系统模拟、环境土壤物理学、地下水环境工程等本科生和研究生课程。主持国家自然科学基金项目 2 项，水利公益性行业科研专项经费项目 2 项，横向项目 4 项。2015 年入选内蒙古自治区“草原英才”工程人选。获得高等教育自治区级教学成果一等奖 2 项、二等奖 1 项，获得中国水利水电科学研究院科学技术奖特等奖。发表论文 110 余篇，其中 14 篇被 SCI 或 EI 收录。参编由联合国教科文组织与国际水文协会联合推出的科学发展系列指导丛书（Urban Groundwater Pollution, A.A. Balkema Publishers）专著 1 部。

前 言

河冰是高纬度地区河流冬季典型的自然现象，在寒区水资源开发与利用中是重点考虑的因素之一。河道中的冰塞、冰坝可能会导致凌汛洪水的发生，危害河道及周边安全；同时，河冰会危害河工建筑物安全及影响水电站的正常运行，在有通航要求的河道上也会影响通航条件。河冰的存在会改变河道的水力条件，进而影响河道中泥沙输移和导致河道形态改变，对河道的水质变化、鱼类的生存条件及河道生态都会产生影响。尤其是冬季有输水要求的渠道，河冰更是渠道设计、运行重点考虑的因素。

对黄河的认识、开发和治理伴随着中华民族历史的进程而不断深入。从最开始的“壅防百川、堕高堙庳”到“疏川导滞”，从战国时期的“宽立堤防”到汉代的“贾让三策”，从宋代的“兴筑遥堤”到明清时期的“束水攻沙、以水攻沙”，尤其是新中国成立后“拦、用、调、排”四字治黄方略，基本上达到了人与黄河和谐发展的目的。但黄河流域气候差异大、地形地貌复杂，使得黄河的冰凌和泥沙问题并未得到彻底的解决，依然是人们关注和研究的热点。“桃、伏、秋、凌”四汛是导致黄河灾害的主要原因，四汛当中凌汛以突发性强、水位上涨快、破坏力大、抢险困难而成为最难防治的自然灾害。在历史上凌汛决口曾被认为是人力不可抗拒的，以致有“凌汛决口，河官无罪”之说。

黄河内蒙古段因其特殊的地理位置及河流走向而成为冰情严重、凌灾频发的地区之一。近年来，随着上游水库、水闸等控导工程发挥作用，凌洪灾害有所减轻，但防凌形势依然严峻，较大范围的凌灾淹没损失平均2年1次，特别是有些年份个别河段的凌洪灾害仍相当严重，国家和内蒙古自治区每年花费大量的人力、物力和财力用于黄河内蒙古段的防凌减灾。因此开展黄河内蒙古段冰情研究、探索河冰的消长演变和输移机理，分析冰盖、冰坝、冰塞的形成、发展过程，提出有效的防凌减灾措施，对保护人民生命、财产安全，保障地区经济发展起着至关重要的作用。

内蒙古农业大学河湖湿地水环境保护与修复团队河冰研究小组自2011年以来，通过对黄河内蒙古段河冰的野外观测、数据分析和数值模拟等方法研究河冰的生效演变特性及输移、堆积过程，本书是对上述黄河内蒙古段河冰研究理论、方法和成果的系统总结，是黄河内蒙古段河冰研究的进一步积累和拓展，凝聚了团队科研人员的智慧与见解。

全书由内蒙古农业大学李畅游教授和李超副教授设计，由李畅游教授、李超副教授、史小红教授和张生教授执笔。具体撰写内容安排如下：第1章和第8章由李畅游撰写，第2章和第3章由史小红撰写，第4章和第5章由张生、李超撰写，第6章和第7章由李超撰写。全书由李畅游、李超统稿，史小红、张生主审，科研团队中史新娟、宋本辉、李红芳、朱钦博、夏天、赵水霞、全栋、张璐、田野等研究生参与了辛苦的野外观测和大量资料分析工作，赵胜男、孙标、李国华、杜蕾在计算机录入、图表绘制和后期的校稿工作中

付出了辛勤的劳动。笔者向所有为本书出版作出贡献的同事和朋友们致以衷心的感谢。

本书由国家自然科学基金(51339002、51669024、51669022、51509133、51569019)、内蒙古自治区水利厅重点项目[黄河(内蒙古)河段冰凌数学模拟及可视化预警平台建设]、黄河水利委员会技术咨询项目(黄河宁蒙河段内蒙古段防凌减灾方案及河道过流能力演变研究)、内蒙古自然科学基金(2016MS0406)和内蒙古产业创新团队等项目联合资助。

河冰的现象繁多而复杂,河冰研究理论仍然有很多方面不完善,河冰的野外观测条件艰苦,数据的获取和量测难度大。在野外观测和研究中也是感慨万千:状况百出科研难,北风刺骨冷心间;日落黄河寒意起,外出作业何时还?

本书内容涉及河冰水力学、遥感分析、数值模拟、泥沙运动力学等学科和领域,笔者虽尽力而为,但在撰写的过程中限于知识水平以及对学科交叉知识的把握,书中错误及不足之处在所难免,诚恳希望同行和读者批评指正,提出宝贵意见。

作 者

2017年11月

于内蒙古农业大学

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	河冰研究背景及意义	1
1.2	河流冰情研究动态	2
第 2 章	研究区概况	9
2.1	地理位置	9
2.2	河道特征	9
2.3	气候特征	10
2.4	流域特征	13
2.5	河工建筑物概况	14
第 3 章	黄河内蒙古段河冰特征及分析	16
3.1	冰情特征	16
3.2	气候变化及人类活动影响下冰情新特征分析	21
第 4 章	典型年份河冰过程野外观测及分析	31
4.1	河冰过程的认识	31
4.2	观测断面布设	33
4.3	观测内容、方法及主要仪器	34
4.4	流凌期特征及分析	35
4.5	封河期特征及分析	41
4.6	开河期特征及分析	44
4.7	基于遥感技术的河冰大尺度观测	47
第 5 章	河冰热力过程及数值模拟	56
5.1	水-气交界面热量损失及水温模拟	56
5.2	岸冰的形成	63
5.3	冰厚热力增长及融化模型	65
第 6 章	弯道处河冰动力过程的数值模拟	70
6.1	二维河冰水动力学模型	70
6.2	人工弯道河冰过程数值模拟	77
6.3	天然河道弯道河冰动力过程模拟	79
6.4	桥墩附近水力特性数值模拟及对卡冰过程的影响	94

第 7 章	典型河段河冰热力-动力耦合作用数值模拟	103
7.1	模拟区域	103
7.2	网格划分	106
7.3	边界条件及初始条件	108
7.4	模拟结果	110
第 8 章	冰封期河道水力特性及泥沙输移特性分析	123
8.1	冰封期河道水力特性	123
8.2	冰封期泥沙输移特性分析	129
参考文献		137

第 1 章 绪 论

1.1 河冰研究背景及意义

河冰作为影响寒区水资源开发利用的重点因素，全世界的许多国家，包括加拿大、美国、俄罗斯、挪威、瑞典、芬兰、日本、中国等都有各种各样的河冰和湖冰问题，而中国的冰冻灾害尤为频繁和严重。我国有 70% 以上的地区受到冰冻、寒潮影响，其中，冰情较为严重的有东北地区、内蒙古、新疆北部和黄河流域中上游地区（蔡琳，2008）。内蒙古及黑龙江东北部冰期较长，可达 6 个月以上。

黄河既是孕育五千年灿烂的中华文明的河流，也是一条灾害频发的河流。宋代诗人王安石有诗为证，“派出昆仑五色流，一支黄浊贯中州；吹沙走浪几千里，转侧屋间无处求（邓全恩，2007）”。据统计，有历史记载的 2000 多年里，黄河决口泛滥 1590 多次，重要改道 26 次，因此历史上有“三年两决口，百年一改道”之说。“桃、伏、秋、凌”四汛是导致黄河灾害的主要原因，四汛当中凌汛以突发性强、水位上涨快、破坏力大、抢险困难而成为最难防治的自然灾害。关于河冰最早的记载为《吕氏春秋·冬纪》中“孟冬之月……水始冰，地始冻；……仲冬之月，……冰益壮，地始拆；……季冬之月，……冰方盛，水泽腹坚”。冰冻是高纬度地区特有的自然现象之一，也是该地区水资源开发与利用时需要考虑的重要因素。根据我国受冰冻、寒潮影响的范围，我国大部分地区属于严寒和寒冷地区，其中严寒地区主要有东北地区、内蒙古、新疆北部和黄河流域中上游地区，这些地区的最低气温低于 -20°C ，冬季持续时间长，冷空气活动剧烈。

黄河流域由于东西跨越 23 个经度、南北相隔 10 个纬度，加之特殊的河流走向及地理位置差别，冬春季受西伯利亚和蒙古一带冷空气的影响，导致黄河流域的中上游地区冰期往往持续时间长（4~5 个月）、冰情复杂且严重。冰情的存在除了对河道交通、供水、发电和水工建筑物有直接影响外，同时，河道冰盖的形成增加了河道糙率及湿周，降低过流能力，使得同流量情况下冬季河道水位较敞流期增加 1~1.5m。尤其是凌汛期河道中形成的冰坝、冰塞会显著减小过流断面面积，壅高上游河道水位，造成凌汛洪水决堤而泛滥成灾。

黄河上游的宁蒙河段和下游的河南、山东河段受特殊的河道走向及地理位置影响而成为凌汛灾害严重的两个河段。近些年，受气候变暖和人工控导工程的修建（三门峡水库、小浪底水库等），黄河下游河南、山东河段冰凌问题已经基本消除，未造成严重的凌汛灾害；而宁蒙河段，尤其是黄河内蒙古段依然是冰情严重、凌灾频发的地区之一。

据统计，黄河内蒙古段 1950~1968 年（刘家峡水库运用前）开河结坝达 236 处，平均每年 13 处，“文开河”、“武开河”及“半文半武开河”年份各占 1/3。1968~1990 年，由于水库控制运用，开河结坝共 84 处，平均每年 4 处，“文开河”年份占 68%，“武开

河”及“半文半武开河”占 32%（冯国华，2009）。1990~2010 年封开河期间结坝 36 处，平均每年 1.8 处（图 1-1）。总的来看，由于上游水库、水闸等控导工程的作用，凌汛灾害有所减轻，但防凌形势依然严峻，较大范围的凌灾淹没损失平均 2 年 1 次，特别是有些年份个别河段的凌汛灾害仍相当严重。例如，2008 年 3 月 20 日黄河内蒙古段三湖河口弯道附近的独贵塔拉镇发生了一场几十年未遇的黄河凌灾。受灾面积 106km²，受灾群众 3885 户、10241 人，水利、交通、通信等公共基础设施损毁严重，直接经济损失达 69120 万元。国家和自治区每年花费大量的人力、物力和财力用于黄河内蒙古段的防凌减灾。因此开展黄河内蒙古段冰情研究、探索河冰的生消演变特性和输移机理，分析冰盖、冰坝、冰塞的形成和发展过程，提出有效的防凌减灾措施，对保护人民生命、财产安全，保障地区经济发展起着至关重要的作用。

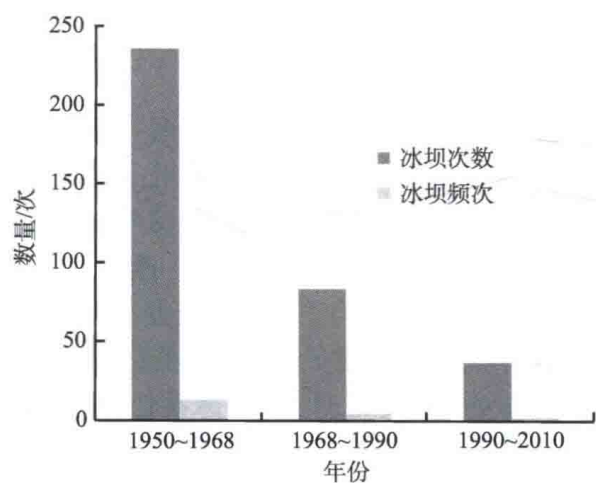


图 1-1 黄河内蒙古段冰灾统计图

1.2 河流冰情研究动态

河冰对河道安全、水电站运行、内陆航运、调水及对环境、生态和河床演变等都有重要影响。国内外学者针对河冰问题开展了野外观测、模型试验、数值模拟及数据分析预报等方面的研究。1970 年以前，人们对河冰的理解主要是定性的，工程师们往往依靠经验法来处理河冰问题。早期苏联科学家在封冻、开河过程的研究成果以及 Pariset 和 Huasser（1961）的经典冰凌理论对河冰研究起到了重要的推动作用。水利部黄河水利委员会也积累了大量管理黄河河冰问题的经验。20 世纪 70 年代以后，冰凌、冰塞问题引起了美国和加拿大研究人员的关注（Ashton，1987；Beltaos，1987；Shen，1996），取得了显著和丰富的河冰理论成果。

1.2.1 河冰研究方法及动态

1) 野外观测

野外观测主要通过对气温、水力要素及冰情的分析，研究特定河段上的冰情现象，

得出一些定性规律,并通过计算得到特定地域和情况的一些定量关系用于解决特定条件下的问题。国外的河冰观测研究起步较早。Parkinson (1982) 在 1980 年至 1981 年开河期间,对纳尔逊河、利亚德河、马更些河上的气温、冰厚、流速、流量等数据进行了观测,分析冰坝的成因及其影响因素,指出稳封期冰盖最薄而且流速最大的地方其水温和热通量是最高的 (Marsh, 1987); 而在冰塞形成的过程中,最主要的影响因素是风速和气温的变化 (Morse, 2003); 在流量突变的情况下,冰坝及冰塞会首先在河道比降小、水流流速降低及河面宽度减小的位置生成 (Shen, 2003); 经过河冰野外现场观测得出的研究结果是,当整个断面的平均流速超过 0.4m/s 时,岸冰就不会再增长 (Matousek, 1984)。

我国的河冰野外观测可以追溯到 20 世纪 60 年代初,我国在黄河甘肃河段上游的刘家峡河段对大型冰塞的观测研究持续了 3 年;1982 年在冰塞发生严重的黄河山西河曲段进行了历时较长、参与人员多、成果较多的原型观测。1986 年左右,在冰塞发生严重的黄河内蒙古段巴彦高勒河段展开了为期较长的原型观测。20 世纪 80 年代到 90 年代,孙肇初等 (1990) 与国外沈洪道教授合作在黄河河曲段进行了大型河冰原型观测,不仅获得了 60 万个以上的数据,而且首次建立了流冰量与冰塞厚度的数学模型。隋觉义 (1992, 1994) 通过对设置的 22 个断面冰期冰盖下冰塞的变化及河床变化情况的分析,发现冬季河道中会出现底冰,底冰的存在会降低整个河道的输沙率。此外他还发现,冰塞下水内冰的运动与河床中的泥沙运动相似,会随着水流条件的改变而变化;而冰塞体的大小也与床面冲淤有此消彼长的关系:当冰塞体增大时,河床冲刷,反之亦然。在观测河段封冻冰盖前缘处 30 次冰块临界下潜条件的观测中,发现冰块的大小、密度以及冰块的堵塞程度等均是影响冰块在冰盖处下潜的主要因素;并且建立了临界状态下水浸冰的弗汝德数与冰块尺寸、冰块的堵塞程度及冰块的密度等因素的关系式 (隋觉义, 1993)。

汪德胜等 (1993) 通过研究黄河河曲段 6 年的观测资料,发现在不同的河段,临界流速的值不同;而且即使在同一河段的不同时间,临界流速的值也不尽相同。他认为单用临界流速或临界弗汝德数来确定冰塞的变化是有缺陷的,所以应用泥沙推移质理论来解释水内冰在冰盖下的运动,并用观测数据很好地印证了这一概念,通过结合实测数据,把推移质的输沙公式推广应用于冰盖下水内冰的输移。

2000 年以后,我国对冰情的研究也日益增多。在 2002~2003 年度进行了对引黄济津冬季输水原型野外冰期观测,观测的内容主要有水温变化、水内冰生成、冰流量观测以及冰厚的变化。通过野外实测数据分析得出,在冰盖对水流的过流能力影响较大、水位相同的情况下,冰封期水流的过流能力比敞流期减小 $27\%\sim 34\%$ (郭海燕, 2004)。同时对引黄济津冬季输水进行了原型观测,主要观测指标有岸冰、冰流量等,主要对封冻期进行了连续性观测,并且详细描述了其特点,得出冰盖生成后水温由水面至水底呈逐渐递减的规律 (李根生, 2006)。2009 年冬季,黄河山东河段发生特大凌汛灾害,在进行了野外初冰、流冰、封冻、冰塞、开河、冰坝等观测后,通过自然因素、人为因素、河道地形等分析,得出了影响该河段冰情变化的因素和机制,其研究成果为冰情预报、防凌减灾等工作提供了一定依据 (郭立新, 2010)。2013~2014 年度, R-T 冰情检测传感器

在黑龙江漠河的野外检测中运用,获取了大量的冰厚度、雪厚度、冰温等数据,通过对数据的分析得出 R-T 冰情检测传感器可以对选定断面进行多点监测,为冰凌灾害防治工作及冰情预报工作提供了大量的、有效的数据(赵秀娟,2015)。在防治冰灾方面,炸药爆破冰坝或冰盖是有效解决危险凌情的重要手段之一(段元胜,2003;殷怀堂,2010;梁向前,2014),美国陆军工程兵团 Mellor (1982, 2002) 通过 10 余年冰下爆破试验得到系列爆破资料,运用回归分析开展爆破坑半径和冰盖厚度、炸药用量关系的研究。刘之平等(2017)通过黑龙江上游江段现场防凌爆破试验研究,提出了防凌爆破的可靠方法和关键技术,建立了黑龙江冰凌爆破中冰盖厚度、冰下水深、炸药用量同爆破坑半径之间关系的公式。

原型观测能够通过研究特定河段上的冰情现象,得出一些定性规律,并通过计算得到特定地域和情况的一些定量关系用于解决特定条件下的问题。但河冰过程是水动力影响下的复杂的热力、冰动力耦合作用过程,野外观测往往受观测实验条件、观测技术及仪器等方面的制约,难以理解各因子的作用关系和机理,通常得出的是经验关系,一般难以移用其他场所。

2) 试验研究

通过室内水槽试验可以定性或定量分析河冰水力学的一些问题。与原型观测相比,实验研究有要求条件简单、易控制等方面的优势。而且借助水槽试验有助于寻求一般性规律,并建立相关的理论体系。水槽试验主要的研究内容有:冰盖下的水流结构、有冰盖河道的输冰能力、弯道处冰塞和冰坝、综合糙率系数的确定等。

河冰的室内试验研究主要包括河冰的物理力学特性及输移堆积过程两个方面。在物理力学特性方面主要通过分析冰的压缩强度、抗拉强度、断裂韧度、弯曲强度等力学形态,研究冰的挤压、压曲、弯曲、劈裂或者组合的破坏方式(Moslet, 2007; 张丽敏, 2012; 李志军, 2011; 季顺迎, 2013)。河冰运动特性的试验研究中, Urroz 和 Ettama (1992, 1994) 利用聚丙烯材料模拟表面冰在 U 形水槽中的运动,发现冰塞在弯顶偏下的凹岸处厚度最大;冰塞厚度分布与水槽的床面形态类似;并指出有冰盖的弯槽中仍然存在螺旋流,但与明流一个大螺旋流不同的是,冰盖的出现导致螺旋流分为镜像对称的两个小螺旋流。随后他们利用大小不一的聚乙烯块搭配珠子进行冰输送试验,试验表明水槽边壁的粗糙度对卡冰封河有显著的影响,大块的浮冰较容易在弯道处滞留。同时, Urroz 和 Ettama (1994) 把顺直河道中冰盖下流速计算的理论引入弯道中,得出弯道冰盖下一维流速计算公式,并与水槽试验中的实测数据进行比对,认为该公式满足数量上的估算要求,但该公式并不适用于三维弯道的水流计算。Shen 等(1995)用不同形状的碎片模拟冰盖下水内冰的输移与冰塞变化的关系,在已有用推移质描述的输冰公式的基础上,通过研究不同水流条件下冰的输移率,得到了考虑颗粒形状大小的概化冰输移公式。陈建国等(1992)在玻璃水槽中研究了不同冰盖条件下的水深、流速分布,发现冰盖的输水能力比同深度的明流小,结合实验中推移质的输沙特性和悬移质的分布规律,给出了冰盖下泥沙起动的流速公式。王军等(2007)借助水槽试验,通过改变水流条件和冰流量条件,研究了弯槽段冰塞形成和厚度分布规律。结果表明,初始冰盖头部向下

游移动的速度随水流的弗汝德数的增加而增加。通过用实验室模拟冰塞水变化情况与天然河道中冰塞水位变化性比较,表明冰塞越厚,水位壅高值越大,对于直槽段,冰塞水位的增值和冰塞厚度(或其后期增厚值)呈线性递增关系;而对于弯槽段,认为平衡冰塞水位的增值随区间冰塞平均厚度增值的增大而增大。

3) 数值模拟

随着计算机技术及数值方法的不断改进,数值模拟成为研究河冰越来越重要的手段。采用数值模拟技术可以模拟相互作用河流系统的各种河冰热力-动力过程(Shen, 2010)。

基于一维静态冰坝理论及 Uzuner 和 Kennedy (1976) 的研究成果,很多学者和机构开发了模拟冰坝的一维数学模型,如美国陆军工程兵团开发的 HEC-RAS 模型(Daly and Vuyovich, 2003)、ICEJAM 模型(Flato and Gerard, 1986)、加拿大 RIVJAM 模型(Beltaos and Wong, 1986)、采用有限元方法求解一维圣维南方程的 RIVER1D 模型(Hicks and Steffler, 1992),这些模型可以模拟冰坝形成后的水面线,但是对于冰坝的形成原因及过程尚不能模拟。Yapa 等(1986)考虑了冰盖对水流的阻力及冰盖厚度对过水断面的影响因素,建立了冰盖下水流的一维恒定流模型,并应用于圣劳伦斯河。模型边界条件包括计算区域上下游的水位、流量及冰盖覆盖面积。基于以上模型的不足,Shen (1991)开发了一维河冰模型 RICE,并通过不断的改进和完善成为可以模拟长时间河道非恒定流及冰坝形成过程的 RICEN 模型(Shen, 1995; Kandamby, 2010)。由于河冰现象及问题的复杂性,一维河冰模型无法满足人们对河冰机理的进一步认识,包含水动力和冰动力学耦合的二维河冰模型 DynaRICE 被开发出来(Shen, 2000),该模型中的水动力学子模型可以很好地处理跨临界流和床面干湿条件的转化。

河冰形成过程包括动力和热力过程,水流的过冷却、表面冰的形成、岸冰的形成、水内冰的生长及冰盖的热力增厚都与河冰的热力过程有关,Shen 等(1985)认为冰盖厚度的变化与气温有关,并提出了统一度日法用于模拟河冰冰盖随气温的变化,Knack (2011)应用拓展后的 DynaRICE 河冰模型模拟 St. Marys 河的热力增长、封冻、冰盖下水内冰输移和堆积,以及不同流量和水位下开河冰坝的形成。Huang (2012)通过二维的河冰模型模拟了不同形态岸冰、冰盖的形成及发展过程,并采用圣劳伦斯河上的观测数据进行了验证。Brayall (2012)应用 River 2-D 模型分析了 Hay River 三角洲处卡冰后不同来流条件下上游河道水位的变化。而冰盖的形成会影响河道的综合糙率和水流流速分布,Kolerski (2013)应用耦合的水动力学和冰动力学模型研究了 Coastal Lake 的拦冰栅对表面冰运动的阻挡作用,并分析了拦冰栅的受力情况。受开河期水力因素和热力因素影响,开河分为“文开河”和“武开河”,“文开河”时开河比较平稳,不会造成严重凌洪灾害;“武开河”时水鼓冰裂,大量流冰随水流下泄,可能在河道束窄或弯道处堵塞,造成凌洪灾害(Beltaos, 2013)。Wang (2014)通过分析桥墩周围的应力讨论了桥墩对冰坝稳定性的影响。Hopkins 等(2002)利用三维离散单元模型(DEM)来模拟矩形河道中设置拦冰栅的情况,并用物理模型实验进行了验证。实验结果表明,应用 DEM 方法模拟的拦冰栅的过程与实验过程相吻合,并分析了边壁糙率与拦冰栅和侧壁之间力

分布的关系。

国内河冰数值模拟研究起步较晚,最早出现的河冰数学模型是黄河水利委员会在美国克拉克森大学沈洪道提出的一维 RICE 模型的基础上开发的一维河冰模型。此后,杨开林等(2002)建立了一个改进的一维河冰冰塞发展数学模型,包括 7 个描述冰塞形成的发展模型,相比于以前的模型,该模型方程数量减少,除可模拟冰塞过程中流量、水深、浮冰盖输移等,还能够对河面流冰由冰盖前缘下潜至冰盖下并堆积形成冰塞的过程进行模拟。结合 1963-1964 年松花江流域白山河段的冰塞观测数据验证了模型的准确性。茅泽育等(2003)建立了非恒定一维冰水耦合动态模拟冰塞演变过程的数学模型,并与 1986 年至 1987 年黄河河曲段的实地观测资料吻合良好。随后应用适体坐标方法,把一维模型扩展成为二维河冰模型,并很好地应用在状况复杂、弯道繁多的天然河道。王军等(2008)根据河冰冰塞的三维性特征,提出了将三维贴体坐标变换技术应用于模拟河冰演变过程中,这项技术可以处理模型中的复杂边界,并将不规则的三维空间转化为规则的正方体区域进行数值计算,不仅简化了计算而且提高了精度。陈胖胖(2009)基于平面贴体坐标变换、竖向采用 σ 坐标变换,建立了三维模拟 U 形水槽中冰盖下水内冰的运动的数学模型。模型运用有限体积法对 $k-\varepsilon$ 紊流模型控制方程进行离散,采用非交错网格布置,为了避免压力场的波动,由动量插值导出控制体交界面流速公式,运用压力校正法耦合求解水深流速变量,计算结果与实测资料吻合较好。王晓玲(2009, 2011)采用三维非稳态欧拉两相流模型模拟引水流量对引水渠道中水内冰演变的影响,并模拟分析了不同转弯半径对弯道排冰的影响,从而实现了对弯道输排冰的布置形式进行合理的优化设计,以达到顺利输排冰,保证引水渠道冬季安全运行的目的。

4) 冰情预报

冰情预报属于水文预报的范畴,早期的冰情预报一般运用经验和半经验方法、水文模型方法和统计预报方法。随着科学技术的发展,神经网络理论、模糊数学、灰色系统理论、混沌理论、小波分析和遗传算法等新理论和方法用于冰情预报。冰情预报主要集中在封开河历时、封开河日期及其影响因子等方面。利用热交换原理和冰力学原理建立的模型已经在冰情预报中被广泛应用(Foltyn, 1986),这一方法已用于加拿大圣劳伦斯河蒙特利尔河段,预测精度较高。根据河水表面热量交换可以使水温降低的原理预报封河日期的方法已经成功运用到纽约马塞纳市和金斯頓市之间的圣劳伦斯河段。神经网络的运用很大程度上提高了预报精度,基于人工神经网络的预报模型在美国石油城的冰塞预报中精度较高(Massie, 2002),有效解决了预报精度低的问题。国内学者将神经网络与 GIS 相结合,用于黄河宁蒙河段冰情预报系统(王涛, 2005);同时,通过分析南水北调沿线气候和气温特点,用 Levenberg-Marquart 算法改进传统 BP 神经网络算法进行气温稳定转负日期的预报,并将该模型用于南水北调沿线各城市气温转负预报(王涛, 2009)。伊明昆(2006)研究了人工神经网络和多元线性回归方法在发生冰塞现象的河道中对水位变化的预测中的应用,将两种方法分别用于试验条件和黄河河曲段的实测条件下,通过与观测结果对比发现人工神经网络比多元线性回归精度更高,且误差率较低,并可推广到其他河流。郭力文(2007)基于传统 BP 人工神经网络、遗传算法优化神经

网络、多元回归分析以及支持向量机四种方法建立了实验室冰塞厚度和水位预测模型。卜松(2009)将多元线性回归、BP神经网络、粒子群法优化神经网络、蚁群算法优化神经网络用于冰塞水位及厚度的预测,实验室弯道试验和天然河道条件的预测结果表明,BP神经网络比多元线性回归的精度更高,而群智能优化的神经网络更适用于复杂条件的预测。袁波波(2014)通过建立的早期预警系统(EWS)来监测叶尔羌河冰湖溃坝洪水流量,有效地降低冰湖溃坝洪水灾害风险。

1.2.2 黄河内蒙古段河冰研究动态

《老残游记》第十二回《寒风冻塞黄河水,暖气催成白雪辞》写道,“老残洗完了脸,把行李铺好,把房门锁上,也出来步到河堤上,看见那黄河从西南上下来,到此却正是个湾子,过此便向正东去了。河面不甚宽,两岸相距不到二里。若以此刻河水而论,也不过百把丈宽的光景,只是面前的冰,插的重重叠叠的,高出水面有七八寸厚。再望上游走了一二百步,只见那上流的冰,还一块一块的漫漫价来,到此地,被前头的拦住,走不动就站住了。那后来的冰赶上他,只挤得嗤嗤价响。后冰被这溜水逼的紧了,就窜到前冰上头去;前冰被压,就渐渐低下去了。看那河身不过百十丈宽,当中大溜约莫不过二三十丈,两边俱是平水。这平水之上早已有冰结满,冰面却是平的,被吹来的尘土盖住,却像沙滩一般。中间的一道大溜,却仍然奔腾澎湃,有声有势,将那走不过去的冰挤的两边乱窜。那两边平水上的冰,被当中乱冰挤破了,往岸上跑,那冰能挤到岸上有五六尺远。许多碎冰被挤的站起来,像个小插屏似的。看了有点把钟工夫,这一截子的冰又挤死不动了”(刘鹗,1903)。该段小说精彩地描述了黄河河冰的形态与输移、堆积过程。中国的学者很早就关注了黄河的冰凌问题,而黄河的冰凌问题最严重的河段是内蒙古段。尤其是20世纪80年代以后,黄河上游龙羊峡、青铜峡、盐锅峡等各大中型水库运行及周边环境恶化,黄河内蒙古段来流量减少,河道淤积严重,使得河床抬升,黄河内蒙古段已成“悬河”之势,凌汛灾害亟须引起重视。

20世纪中后期,黄河的观测和研究更加系统和全面,相继在黄河宁夏、内蒙古段和下游及黑龙江等河流开展了预报,最初主要采用指标法,逐步建立了大量的相关图和关系式。除继续进行专项观测研究外,对已有的研究成果,结合有关资料进行了系统整理分析,编写各种专著。20世纪90年代后,黄河水利委员会先后在与芬兰 Atri-Reiter 公司、美国克拉克森大学的沈洪道合作的基础上,建立了适用于黄河下游的河冰预报模型,这对黄河防凌工作具有至关重要的作用(陈赞廷,1994)。气温在河冰研究中是必须考虑的重要因素之一,康玲玲等(2001)根据1951~1998年黄河下游代表站冬季气温资料,统计分析了约30年的平均气温和气温过程变化特点及其对凌情的影响,并在分析负气温演变特点及其与凌情关系的基础上,建立了气温-凌情相关关系式,同时利用20世纪70年代以来气温、凌情资料,计算分析了气温变化和其他因素对凌情的影响。可素娟(2000,2001,2002)对黄河(内蒙古段)河冰过程进行了大量的分析,建立了预报封河的一维数学模型,从水力条件、热力条件及河道边界条件三方面研究冰塞的形成原因、

条件和机理。陈守煜和冀鸿兰(2004, 2008)通过分析近几十年的气温、流量及冰情资料,总结了黄河内蒙古段影响冰情的主要因素,建立了基于模糊优选神经网络冰凌预报系统,通过已有的水文、气象资料对模型中的预报因子进行率定。并根据黄河内蒙古河段上巴彦高勒、三湖河口、头道拐三个水文站的冰期数据对模型进行验证。结果表明,模型可以较好地预报封河、开河日期。

随着河冰理论和数值模拟的不断发展,研究者已经能够模拟河冰形成、输移及堆积过程(李超, 2015),并对初始卡冰位置、原因及机理过程进行了详细的分析,指出岸冰的生长导致弯道顶下方河道变窄区域最易形成卡冰(李超, 2015; 李红芳, 2016);综合河冰的热力过程,模拟冰盖热力增厚、衰减及预报文开河日期(史新娟, 2013; 朱钦博, 2015);建立了基于“3S”技术的河冰观测方法及体系,实现了河冰过程大尺度、长序列的特性分析及规律研究(李超, 2016; 赵水霞, 2017)。

第 2 章 研究区概况

2.1 地 理 位 置

黄河流域位于北纬 $32^{\circ}\sim 42^{\circ}$ 、东经 $96^{\circ}\sim 119^{\circ}$ ，南北相差 10 个纬度，东西横跨 23 个经度，河道全长 5464km，流域面积约 $75.24\times 10^4\text{km}^2$ 。其源头位于青海省巴颜喀拉山的雅拉达泽峰，依次流经青藏高原、黄土高原、内蒙古高原、华北平原。蜿蜒曲折，最终在山东省注入渤海，黄河中上游以山区河流为主，下游以平原型河流为主。

黄河内蒙古段地处黄河流域最北端，介于北纬 $39^{\circ}\sim 41^{\circ}$ ，东经 $106^{\circ}\sim 112^{\circ}$ ，从宁夏的石嘴山入内蒙古境内，流经乌海市、阿拉善盟、鄂尔多斯市、巴彦淖尔盟、包头市、呼和浩特市等 6 个盟市的 17 个旗（县、区），于准格尔旗马栅乡榆树湾出境流入山西和陕西，其形状呈 $\cap$ 形大弯曲，全长 840km，占黄河干流总长度的 15.74%，落差 240m，约占黄河总落差的 5%。河道蜿蜒曲折，河道流向分别是石嘴山至巴彦高勒为由西南流向东北，巴彦高勒至包头市为自西向东，包头市至清水河县的喇嘛湾为由西北流向东南，喇嘛湾至出境为由北向南。图 2-1 给出了黄河内蒙古段地理位置图。

2.2 河 道 特 征

黄河内蒙古段大致呈“几”字形头部状。从石嘴山市入境至巴彦淖尔市磴口县河道流向大致是自西南向东北，磴口县至包头市是自西向东，包头市至清水河县则是自西北流向东南，清水河至出境自北向南。黄河内蒙古段上游流经鄂尔多斯高原北部沙地，河水含沙量剧增，使得河床抬升，河道逐渐由窄深变宽浅，浅滩弯道迭出，坡度变缓。内蒙古段从巴彦高勒水文站到头道拐水文站全长 521km，落差仅 64m，黄河内蒙古段虽然位于上游，但在包头市境内河道的比降已经接近黄河河口的比降。

黄河内蒙古段有 2 个峡谷区河段，一个是石嘴山至乌达公路桥峡谷区，位于黄河内蒙古段头部，该段黄河穿行于贺兰山与卓资山之间，长度约 30km，落差约 18m，河道比降 0.6‰；另一个峡谷区位于河口镇和山西河曲之间，位于黄河内蒙古段的尾部，习惯称为黄河托龙段，长度约 100km，落差约 130m，河道比降约 10‰。巴彦高勒-头道拐河段河宽坡缓，逶迤曲折，河道总长 521km，落差约为 64m，该河段平均比降约为 1/8000。按水文站布设位置将本河段纵向比降分为四段，即石嘴山-巴彦高勒段、巴彦高勒-三湖河口段、三湖河口-头道拐段和头道拐-府谷段。各段河道纵向比降如表 2-1 所示。