

# 黄河下游凌汛

黄河水利委员会工务处 编著  
清华大学水利工程系

科学出版社

# 黄河下游凌汛

黄河水利委员会工务处  
清华大学水利工程系 编著

科学出版社

1979

## 内 容 简 介

本书根据黄河下游历年来有关凌汛资料，并引用了一些我国北方河流和国外河流的冰情资料，较系统地叙述了冬季河流凌汛的成因、冰情演变过程，影响凌汛的主要因素以及防治冰害的措施等；并对冰期河流中有关水力因素变化的一般规律进行了分析。

本书可供黄河等北方河流的防凌工作人员、进行河道规划设计的技术人员、有关科研人员以及水利院校水文专业的师生参考。

## 黄 河 下 游 凌 汛

黄河水利委员会工务处 编著  
清华大学水利工程系

科学出版社出版  
北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1979年4月第一版 开本：787×1092 1/16  
1979年4月第一次印刷 印张：7 1/2 插页：4  
印数：0001—3,220 字数：169,000

统一书号：12031·5  
本社书号：1377·12

定价：1.35元

## 前 言

凌汛是黄河下游的一种自然现象，它经常威胁着下游两岸广大人民生命和工农业生产的安全。解放后，在党的领导下，战胜了多年的严重凌汛威胁，取得了连续二十余年凌汛未决口的史无前例的成就。但是，目前凌汛对人们的威胁尚未完全解除。因此，研究凌汛的规律，完善防凌的措施，进而征服凌汛是一项艰巨而有意义的科研任务。

沿河治黄部门和军民在与凌汛的长期斗争中，创造了许多宝贵的经验，积累了十分丰富的资料。为了使这些经验和资料能更好地为防治冰害服务，我们将其汇编成此册。但是，研究和分析凌汛的规律是一个较新而复杂的课题；由于我们经验不足，水平有限，在本书里无论对资料的选取、内容的安排和分析论证等方面，缺点或错误在所难免，欢迎读者提出批评指正。

在编写本书的过程中，得到了沿河治黄部门，特别是山东黄河河务局、惠民修防处及其所属修防段等单位的大力帮助。内蒙古自治区水利局、水利电力部第十一工程局、水利电力部东北勘测设计院、黑龙江省水利局、山东和河南气象局等单位也提供了宝贵的意见或资料。在此我们一并表示感谢。

参加黄河下游凌汛研究和编写本书的有黄河水利委员会工务处高克昌、蔡琳和清华大学水利工程系惠遇甲、王蜀南、李玉樑、李一深、孙肇初、翟大潜等；本书由孙肇初、翟大潜和蔡琳执笔。黄河水利委员会总工程师室专门组织方宗岱、陈赞廷和俞文俊等对本书进行了审查。

编著者

1978年1月

# 目 录

|                         |         |
|-------------------------|---------|
| 前言                      | ( iii ) |
| 第一章 黄河下游凌汛概况            | ( 1 )   |
| 第二章 黄河下游凌汛的成因及冰情演变      | ( 4 )   |
| 第一节 黄河下游凌汛的成因           | ( 4 )   |
| 第二节 产生凌汛威胁的基本条件         | ( 8 )   |
| 第三节 冰的生成及其影响因素          | ( 9 )   |
| 第四节 黄河下游冰情的演变过程         | ( 12 )  |
| 第三章 影响黄河下游凌汛的主要因素及其相互关系 | ( 23 )  |
| 第一节 黄河下游地区冬季气温变化的一般规律   | ( 23 )  |
| 第二节 黄河下游河道冬季流量变化的特点     | ( 35 )  |
| 第三节 气温和流量在影响凌汛过程中的相互关系  | ( 39 )  |
| 第四节 黄河下游河道形态的特征及其对凌汛的影响 | ( 43 )  |
| 第四章 黄河下游冰期的水流形态及河槽蓄水量分布 | ( 50 )  |
| 第一节 冰期河道流速的变化           | ( 50 )  |
| 第二节 冰期河道水位的变化           | ( 62 )  |
| 第三节 冰下过流能力的分析           | ( 66 )  |
| 第四节 黄河下游冰期槽蓄量的变化及分布     | ( 72 )  |
| 第五章 黄河下游的防凌措施           | ( 77 )  |
| 第一节 调节凌汛期河道的水量          | ( 77 )  |
| 第二节 破冰与堤防护守             | ( 87 )  |
| 第三节 冰期水文、气象预报           | ( 92 )  |
| 参考文献                    | ( 114 ) |

## 第一章 黄河下游凌汛概况

黄河，是我们伟大祖国的第二条大河。它发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓的约古宗列渠，在山东垦利县注入渤海，全长 5464 公里。

黄河流域界于北纬  $32.5^{\circ}$ — $41.7^{\circ}$  与东经  $96^{\circ}$ — $119^{\circ}$  之间。跨青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东九省(区)，流域面积 75.2 万平方公里。

黄河自河源至内蒙古自治区的托克托是上游；托克托至河南省荥阳县的桃花峪为中游；桃花峪以下是下游。

黄河下游河道长 700 余公里。据统计，每年平均进入下游河道的泥沙有 16 亿吨，而年平均水量只有 480 亿立方米，因此年平均含沙量大到每立方米 30 公斤以上，为世界河流之冠。由于下游河势平坦，流速变缓，能输送入海的泥沙量，年平均约 12 亿吨，淤积于下游河道的年平均泥沙量竟达 4 亿吨之多。这样年复一年，河床逐渐抬高，目前河床比堤外地面一般高出 3—5 米，个别河段甚至高出 10 米以上。于是黄河下游河道就成为淮河、海河两大水系的天然分水岭，是世界上闻名的“地上河”(见图 1.1 和 1.2)。

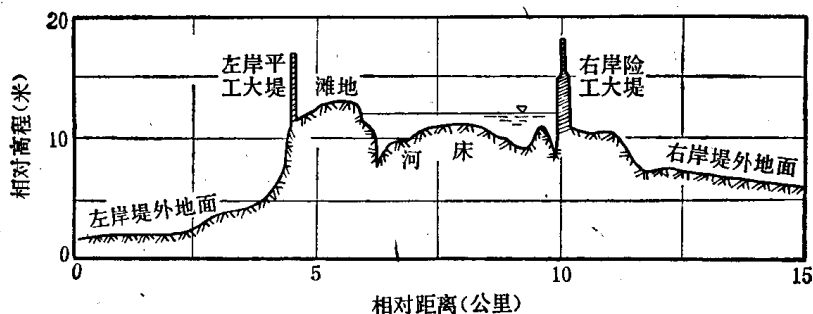


图 1.1 黄河下游中牟辛寨横断面图

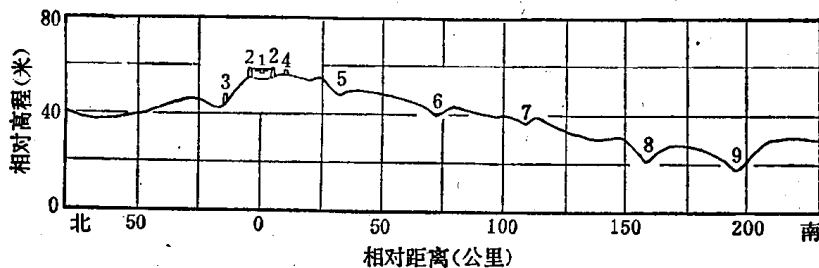


图 1.2 黄河下游两岸地势示意图

- 1—黄河 2—黄河大堤 3—金堤 4—陇海铁路 5—惠济河 6—涡河 7—贾鲁河  
8—沙河 9—淮河

随着河床日益抬高，河身日趋宽浅，主槽迁徙无常，行洪能力降低，一遇较大洪水，就

有漫堤溃决的危险。“中国之河患,历史悠久,为害酷烈者,无如黄河”<sup>1)</sup>。因为下游河道系“地上河”,一旦大堤漫溢或溃决,它所酿成的灾害则远重于我国其它河流。旧社会,由于社会制度黑暗、腐败及自然原因,曾造成了黄河下游有史记载以来的26次大改道和1593次决口漫溢的重大灾难,而凌汛灾害也是其中严重灾害之一。据历史资料的不完全统计,1883—1936年的54年中,黄河下游就有21年发生凌汛决口,口门多达40处,平均两年就有一次凌汛决口(见附表1)。

凌汛是河道里的冰凌对水流的阻力作用而引起的一种涨水现象,当河道里的冰凌严重阻塞水道时,涨水的速率快、幅度大,就会形成凌汛灾害。冰凌的危害可分为由静止的冰和运动的冰所形成的两种,静止的冰是通过结冰时冰体的膨胀力而形成危害,运动的冰是通过流动冰块的撞击或大量堆积而形成危害,后者的危害远大于前者。

黄河下游的凌汛灾害是由运动的冰所造成,它的危害一般有两种情况:

### (一) 封 河 期

冰花或碎冰阻塞水道断面,壅水漫滩,造成淹地围村的局部灾害。如1926年大公报记载:“十二月十日河流为冰流所阻,河水壅高,复由民埝决处漫溢横流,淹没汀河、辛庄、韩家垣、汪二河等村庄”。1968年凌汛期,山东利津张家圈河段封河,水位陡涨,右岸生产堤出水仅0.7米,左岸串水,13个村庄被淹。又如1970年1月初,河南开封夹河滩河段以下,因河势散乱,河床宽浅,上游大量碎冰阻滞于该河段,恰遇寒潮封河。封河后冰花及碎冰阻水严重,使上游河段水位迅速上涨,夹河滩水文站最高水位接近1958年20500立方米/秒时的相应洪水位,造成大面积的漫滩,淹没河南封丘县境滩地近万亩,七个村庄被冰水围困。此种危害在山东河段几乎每年封河初期都有所出现,一般对大堤内滩区威胁较大,由于封河初期不易卡冰结坝,故不致酿成重大灾害。

### (二) 开 河 期

解冻开河时,上游河道的大量冰水一齐拥向下游,行至尚未解冻的河段,或在弯曲、狭窄河段发生冰凌卡塞,导致上游河段涨水。轻者漫滩、淹没滩区耕地,冲毁或围困村庄、大堤假水或冰块压倒树木等(见照片1.1—1.5);重者在很短的时间内,几千万立方米的冰凌伴随几亿立方米的水,拥蓄于10—20公里的河道内。这些块大、质坚的冰凌,犹如岩石在河道里堆垒成一道天然的堤坝,拦截冰水的出路,促使上游河段水位猛涨(见照片1.6—1.8)。这时,大堤防不胜防,万一漫堤或溃堤失事,冰水流向堤外广大地区,切断树木、电杆,撞毁建筑物,广大农村城镇被淹,造成影响工农业生产的严重局面。

如1883年(清光绪九年)凌汛期,山东历城县的溆沟,齐东县的赵奉站,章丘县的九龙口,惠民县的清河镇,利津县的南北岭、韩家垣、左家庄和辛庄等八处均发生凌汛决口,“沿河十数州县,漫口林立。……口门大者数百丈,小者亦数十丈”<sup>2)</sup>。1912年以后,军阀连年混战,凌汛决口次数增多。1922年春初,河南开封、封丘、兰封、长垣等处,冰水泛滥成灾,仅河南一省成为泽国者,南北有三十余里,东西有四十余里<sup>3)</sup>。

1) 张含英编:黄河志。

2) 山东利津县续志,卷四。

3) 中国年鉴。

国民党反动统治时期，凌汛灾害更为严重，尤其是1928—1936年间，几乎连年凌汛决口。1928年2月初，利津棘子刘、王家院黄河大堤决口，河东一带的村庄尽成泽国<sup>1)</sup>。1929年2月中，利津扈家滩因冰凌壅塞，水无泄处，重演第三次决口(该处曾决口两次)，淹利津、沾化两县六十余村<sup>2)</sup>。据当时的记载：“扈家滩口门水势浩荡，冰积如山，附近各庄尽成泽国，房屋倒塌无算，淹毙人口、牲畜、财产难以数计。……风雪交加二十余日，凡在灾区人民，尚有恋守残室者，经此冰摧浪涌，房屋拥倒，冻馁而死者不计其数。穴居堤顶者，亦均饥寒交迫，嗷嗷之声，不绝于耳<sup>3)</sup>”。

1947年，黄河下游花园口以下河道复由山东入海以后，也有两年凌汛期因凌情严重失事。其中一年凌汛期，气候奇寒，全下游大部河段封河，总冰量达一亿立方米左右。1月22日气温回升，京广线上河南境内的铁桥附近河段开河，于26日达山东境内；28日10时到济南洛口，凌洪流量增大到2000立方米/秒以上，18时开河达到杨房；29日，巨大的冰块堆叠在利津至王庄河段，形成了冰坝。这时，上游河段水位猛涨，冰坝上游26公里堤段均超过了保证水位，冰坝前缘附近大堤出水高度仅0.5米左右，形势极危，虽采用爆破、分水等各种措施，终因冰积如山，收效甚微。加之当时堤防隐患甚多，冻土数尺，防守十分困难，于29日23时抢堵失利而决口。故在群众中流传着“伏汛好抢，凌汛难防”之说。

旧社会的治河机构，都是有名的“油水衙门”。黄河下游有两句民谚：“黄河决口，黄金万斗”。黄河一决口，正是河官等一帮横征暴敛，大发横财的机会。他们常常“趁水打劫”，借堵口治河名义，搜刮民脂民膏，贪污自肥，而真正用于治河的经费却寥寥无几，不能修建必要的治河工程，以致溃决泛滥无宁岁。

解放后，党中央、毛主席和我们敬爱的周总理十分关怀治理黄河的工作。1952年10月，毛主席亲临黄河视察，发出了“要把黄河的事情办好”的伟大号召。周总理多次筹划着治黄黄河的宏图大略，并于1970年亲自过问凌汛，对黄河下游的防凌工作提出了更高的要求。

20余年来，人们在与凌汛作斗争的过程中，创造了许多宝贵的经验，积累了十分丰富的资料。解放初期，在人力、物力缺乏的情况下，首先对国民党反动派遗留下来的残缺不全的破烂堤防进行了加高培厚；同时以打冰撒土、打封口以及人工爆破、大炮弹、飞机炸等破冰措施来抗御凌洪。1960年黄河中游三门峡水库建成拦洪以来，进行防凌蓄水运用，结合破冰船压冰，沿黄涵闸分水，爆破等措施，对减轻下游凌汛威胁起了很大的作用。

1970年1月下旬，黄河下游济南河段出现了极其严重的凌汛威胁，为了确保济南市和附近地区人民生命财产的安全，中国人民解放军济南部队抽调了炮兵部队，协同当地县、市的人民群众，组织了一支万人以上的防凌大军，参加了防守大堤的战斗。经过三天三夜的奋斗，在堆满冰凌的河道里炸开了一条14公里长的溜道，为凌洪开辟了泄洪的通道，终于战胜了这场特大的凌洪。

在党的领导下，沿黄军民取得了连续20余年未出现凌汛决口的伟大成绩。但是，由于凌汛的复杂性，它对沿黄人民的威胁尚未完全解除，而且某些年份仍表现得相当严重。因此，研究凌汛的规律，完善防凌的措施，进而征服凌汛，是一项既有理论意义，又有实际价值的科研任务。

1) 山东河务特刊。  
2) 民国十八年各省灾情概况。  
3) 利津县续志，卷四。



## 第二章 黄河下游凌汛的成因及冰情演变

### 第一节 黄河下游凌汛的成因

黄河下游的伏秋大汛和凌汛均是一种涨水现象,但因其形成的原因有别,它们的涨水过程并不相同。

黄河下游的伏秋大汛是由于郑州花园口以上黄河流域在夏季和秋初的强度大、历时短,或强度小、历时长暴雨所形成。因为下游河道是“地上河”,水量几乎全部来自上、中游(山东汶河汇入的水量除外),所以在此期间由暴雨而汇集的洪水向下游传播时,经河槽的蓄水调节作用,自花园口向下,最大洪峰流量是一个递减的过程。如1958年的大洪水,花园口站最大洪峰流量为22300立方米/秒,到山东利津河段,最大洪峰流量已削减至10400立方米/秒。

黄河下游的凌汛是由于河道封冻以后,阻拦了一部分上游来水,使河槽蓄水量不断增加,水位上涨,待到解冻开河时,这部分被拦蓄的水量急剧地释放出来,向下推移,沿程冰

水越集越多,以致形成凌洪。因此,凌洪流量自上向下传播时,往往是一个递增的过程。如1972年凌汛期,黄河下游孙口站和洛口站的最大凌洪流量分别为672和1270立方米/秒,至利津站最大凌洪流量却增加到2230立方米/秒。同样,黄河内蒙古河段亦具有类似的情况(见图2.1)。所以这种由小而大的流量传播过程是解冻开河期流量沿程变化的一个特点。

就某一河流而言,当水位上升到一定高度,就会漫出河槽,而有堤防的河流则会导致堤防的漫溢或溃决,造成洪水灾害。所以,河道中洪水位的高低,才是反映洪水威胁的直接指标。一般情况下,洪量(洪峰期总水量)和洪峰流量大,洪水位也就高。但是,在冬季产生冰凌的河道里,由于冰凌施

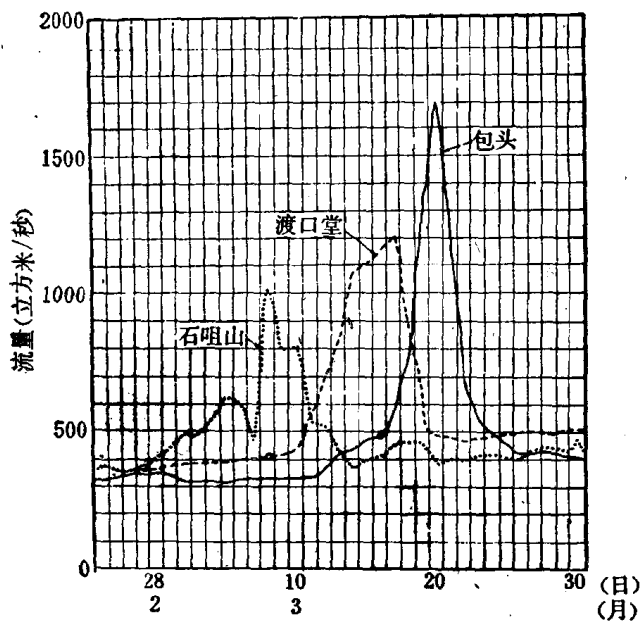


图2.1 1953年黄河内蒙古河段开河期沿程各站流量过程线

○ 为解冻日期

加给水流的阻力作用,不仅在流量相同时水位比无冰期时的水位高得多;而且有时在凌汛期流量虽比无冰期小得多,但其水位却比无冰期高。如1958年伏汛期,黄河下游利津河段的洪峰流量为10400立方米/秒时,其相应洪水位为13.76米;可是,1955年凌汛期,当利津河段的凌峰流量为1960立方米/秒时,其相应洪水位却为15.31米。凌汛期的凌峰

流量虽不及伏汛期洪峰流量的五分之一，但其水位竟高出 1.55 米。这就是有些年份，凌汛期的凌洪威胁大于伏汛期洪水威胁的原因之一。

北方的河流在冬季一般会出现封冻现象，但有的河流在封冻和解冻过程中并不产生凌汛威胁。黄河下游多数年份都要封河并产生凌汛，这是由它的特定的地理、气象、水文条件决定的。

产生黄河下游凌汛的自然条件是：

### (一) 上段河道的气温较下段河道高

黄河下游河道自兰考东坝头转向东北以后，沿程纬度不断增高。东坝头以上的河南河段，地处北纬  $34^{\circ}50'$ ，而河口入海处为北纬  $38^{\circ}10'$ （1976 年河口人工改道前情况），两地相差  $3^{\circ}20'$ （见图 2.2）。由于纬度上的差异，使上段河道的气温明显的高于下段河道的气温。这又决定了黄河下游冰凌的产生和消融过程具有下述三个特点：

(1) 封河时，往往是下段河道早于上段河道；

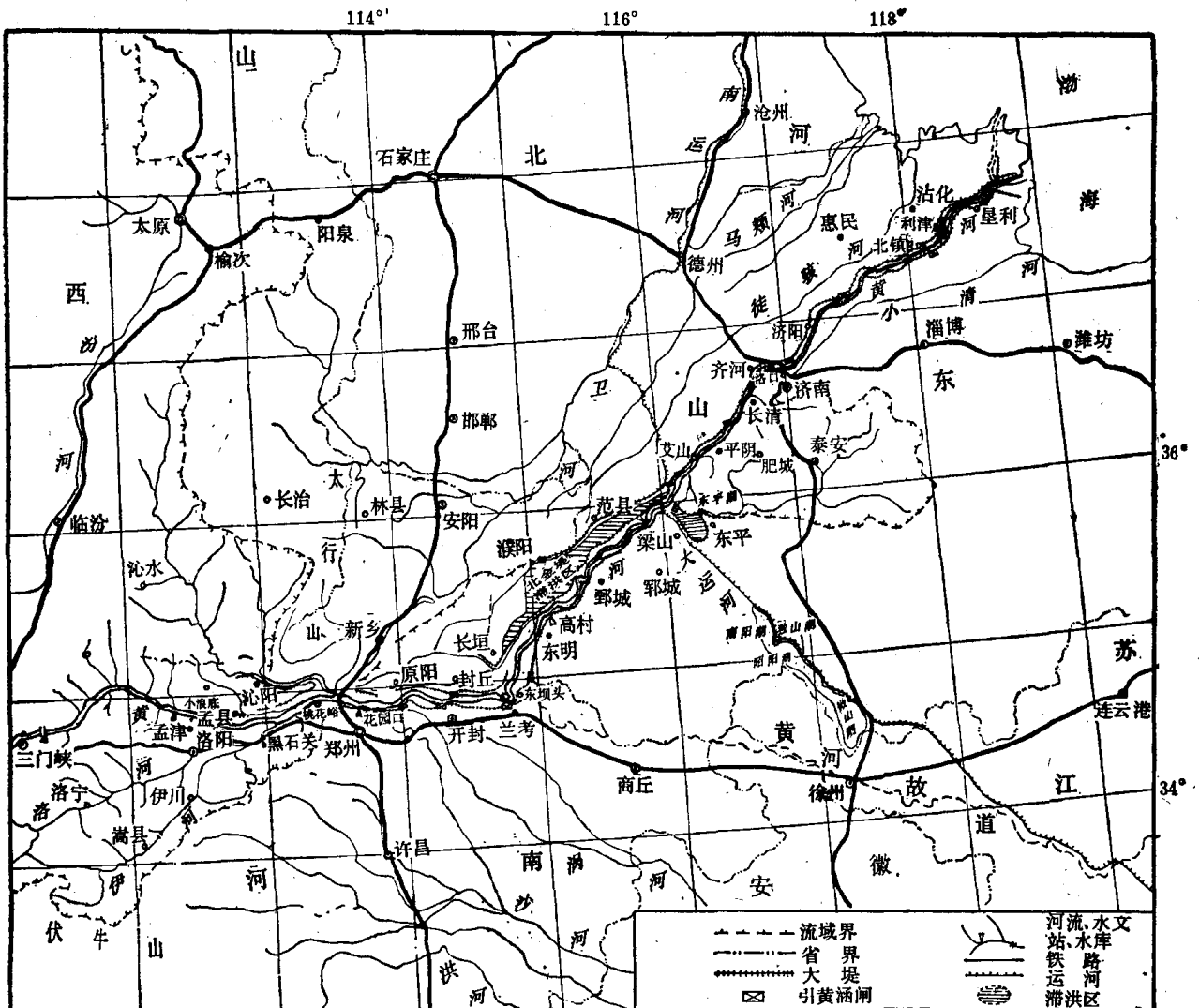


图 2.2 黄河下游地理位置图

(2) 开河时,下段河道则晚于上段河道;

(3) 冰盖厚度,一般是下段河道大于上段河道。

冬季气温下降时,纬度较高的下段河道首先封河,这时因冰凌阻水作用,河道泄流不畅,使上游来水量中的一部分蓄存在河槽中。当气温回升而构成开河条件时,往往是上段河道首先开河,这时由于冰凌下移,解除了封冻时冰盖所施加给水流的阻力,而河槽中在封冻期拦蓄的那部分水量,就被释放出来,伴随冰凌一起下泄。因此,已解冻开河河段的水位下降,而下段尚未解冻河段的水位却反而上涨,增强了促使开河的水力作用,加快了解冻开河的速度;解冻开河的速度加快,河槽中冰水释放的速度也相应加快,水力作用会更强,这又促使开河速度进一步加快。这样连锁地反应下去,冰水越聚越多,流速越来越快,终于形成了来势凶猛的凌洪。此时,如果下段河道的气温尚低( $0^{\circ}\text{C}$ 以下),冰厚与冰的强度较大,水力作用尚不能促使该河段解冻开河,就容易卡塞流冰,阻碍上游大量冰水的下泄,迫使河道水位急剧上升,出现严重的凌汛威胁,甚至危害成灾。

## (二) 河道上宽下窄

黄河下游两岸大堤的堤距,从河南河段的10—20公里逐渐减小到山东河段的1—2公里,最窄处尚不到0.5公里;而河流的主槽也相应地是上宽下窄。这又对黄河下游的凌汛带来了三个方面的影响:

(1) 封河期,河南河段增加的槽蓄水量一般较山东河段为大,致使槽蓄水量的大部分集中在上段河道,增加了山东河段在开河时排泄冰水的负担;同时开河一般从上段河道开始,大部分河槽蓄水量在开河初期就急剧地释放出来,使得开河尚未达到山东河段,就可能形成较大凌洪。

(2) 下段河道槽窄弯多,增加了来自上段宽河道大块流冰卡塞壅水的机率。

(3) 河道排洪能力的上大下小与凌洪流量上小下大的矛盾,进一步加重了山东河段的凌汛威胁。

## (三) 上游来水的不稳定

在天然条件下,黄河下游凌汛期的上游来水过程一般是一个由小到大的过程,并且是忽大忽小,这也是加重下游凌汛威胁的原因,它表现在:

(1) 在相同气温条件下,凌汛初期流量小就会早封河,而且冰盖低,冰下过流能力小,后期来水渲泄不畅,增大了河槽蓄水量,也易于造成冰凌卡塞。

(2) 小流量通过后,上游来水逐渐增大,水位的上升会使尚未封冻河段的大块岸冰脱岸,易在河势不顺的河段卡塞,形成封河。

(3) 河道稳定封河以后,一旦上游来水有较大幅度的增长,就会在气温尚低、冰质较强的情况下导致被迫开河的严重的凌汛局面。

有时黄河下游在一个凌汛期内会发生几封、几开的严重凌汛情况,除了气温多次大幅度升降以外,上游来水的不稳定也是原因之一。流量小时河道封冻;流量增大后,河道被迫开河,而当时气温尚低,往往开河不能达到河口,冰凌不能输送入海,卡塞在未开通的河段,造成严重阻水,当流量又减小时,冰凌将再从卡塞段继续向上游延伸,几经反复,必然形成严重的凌汛威胁。

综上所述，黄河下游河道在东坝头折向东北所造成的上段河道的气温高于下段河道的气温，是产生黄河下游凌汛的根本原因；而下游河道的上宽下窄，以及冬季上游来水的不稳定，则是进一步加重黄河下游凌汛威胁的重要条件。

黄河内蒙古河段和黑龙江上游河段，历年冬季也往往出现凌汛威胁，这些河段的自然条件，尤其是在地理位置和河流流向方面，具有与黄河下游河道类似的情况。

黄河内蒙古河段地处黄河流域最北端，它从宁夏石咀山市和内蒙古伊盟的拉僧庙附近进入内蒙古境内，至山西河曲县和伊盟准旗榆树湾出境。河道流向：从石咀山市至磴口县大致是西南流向东北，磴口县至包头市，基本是自西向东；包头市至清水河县喇嘛湾，由西北向东南；以下基本是由北向南（见图 2.3）。黄河进入内蒙古境内以后，河身逐渐由窄深变为宽浅，河道坡降减缓，浅滩弯道叠出，平面摆动较大，至包头市境内，已接近黄河下游河道的坡降。该河段虽地处黄河上游，但却具有黄河下游河床的特征。

黄河从上游的甘肃兰州至内蒙古河段，纬度相差  $4^{\circ}37'$ ，致使上下游的冬季月平均气温相差达  $5^{\circ}\text{C}$  以上。在自然情况下，包头河段的淌凌封冻比兰州早 20 多天，而解冻开河却晚一个多月。这种类似于黄河下游河道的地理位置和河道流向，使内蒙古河段同样产生了封冻时溯源而上，解冻开河时则由上而下的情况。加之内蒙古的冬季气温更为寒冷，构成了复杂的冰情现象，而河道的特性又为开河时卡冰结坝形成了有利条件，故黄河内蒙古河段的历年凌汛威胁亦极为严重<sup>1)</sup>。

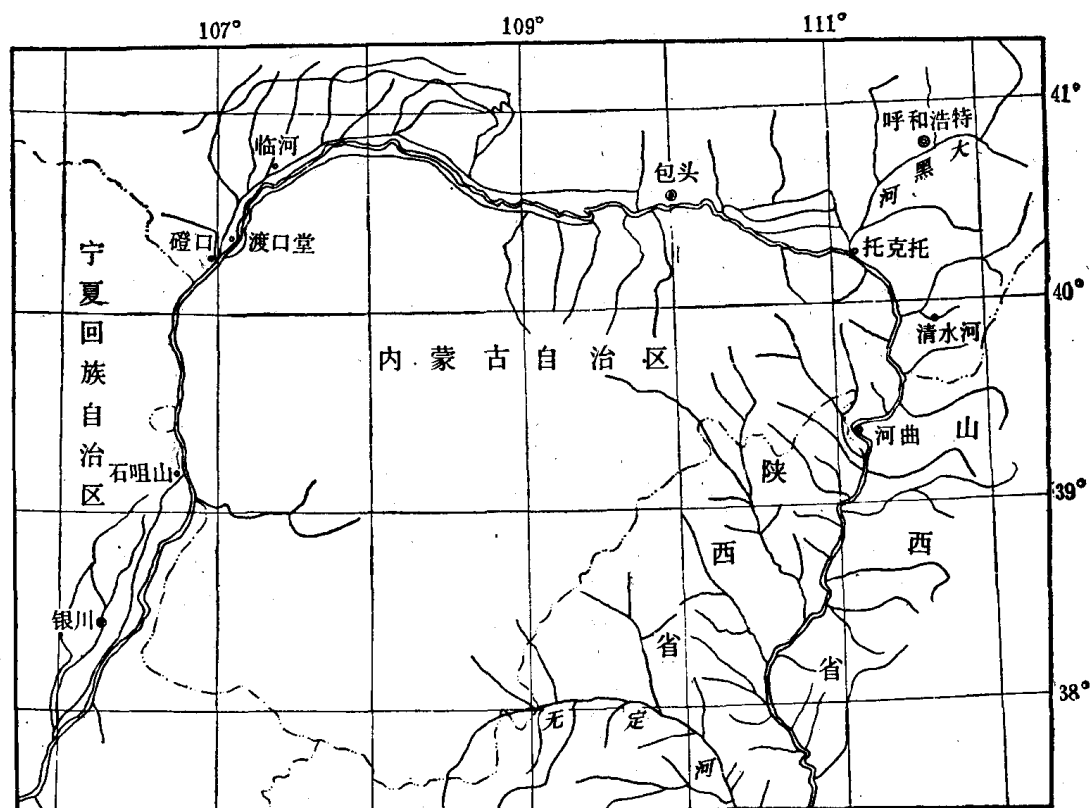


图 2.3 黄河内蒙古河段地理位置图

1) 内蒙古自治区革命委员会：内蒙古自治区黄河凌汛，1975。

地处我国北方边疆的黑龙江,其干流上游基本上是由高纬度向低纬度流动,南北纬度相差5度以上。一般来讲,融冰期受热程度,下游高于上游,下游解冻开河先于上游,不易于形成冰坝。但是,黑龙江上游的支流额尔古纳河、石克勒河和额木尔河,则由低纬度向高纬度流动。其中额尔古纳河的河源到与黑龙江汇流的河口,纬度差达7度左右,纬距700多公里。由于这些支流在地理位置上的差异及流向特点,使解冻开河期支流早于干流,往往产生了容易形成冰坝的“倒开江”局面。据1916年有水文资料记载以来的60多年中,黑龙江上游出现严重凌汛威胁10余次;1958年以来就出现过6次,其中尤以1960年特别严重<sup>1)</sup>。

## 第二节 产生凌汛威胁的基本条件

上节着重说明了河流流向,也就是河道的地理位置在形成凌汛威胁中的重要作用。但是,有些河流的实际情况并不完全如此,例如由北向南流的松花江支流嫩江有时却出现凌汛威胁;而位于黄河下游北岸,与黄河下游同流向的漳卫运河竟很少有凌汛威胁。这就说明,河流的流向并非是所有北方河流产生凌汛威胁的唯一条件或原因。

凌汛是河流的一种涨水现象,它是否形成威胁,或威胁的严重程度如何,均决定于涨水幅度的大小。一般情况下,只有在河流里出现冰塞或冰坝以后,才会使河水位大幅度的上涨,导致严重的威胁。因此,冰塞和冰坝是产生凌汛威胁的根本原因。

根据国内外有关资料的分析 and 总结,形成冰塞和冰坝的先决条件可以概括为:

### (一) 河流里有很大的流冰量

这是形成冰塞和冰坝的物质条件,其来源是:(1)水流内有源源不断的、大量的冰花和底冰的滋长;(2)由于风或其它原因引起的湖泊或支流出口上首的天然冰堆的崩溃,致使大量冰块突然释放到干流中来;(3)气温的突然升高或位于上游的大量热流的注入(如从电站流出的水等),使上游的冰盖解体,迅速转移到下游;(4)流量的突然增大使河水位上涨,鼓裂冰盖后大块的冰体急速向下流动。

### (二) 河流里有阻止流冰下泄的障碍

这是形成冰塞和冰坝的边界条件。它们是:(1)河道狭窄、急弯、桥孔距小、调节水流的建筑物、沙滩岛屿以及从河岸向外伸出的坚固岸冰;(2)极端的寒冷,由坚固的岸冰、底冰导致河流广泛的冻结和阻塞;(3)湖(或海)冰被强风驱进河口,并搁浅在比较浅的河段;(4)退潮时大块浮冰搁浅在河口的地方;(5)水面比降的突然变缓、河宽增加、水深减小以及流速降低等<sup>[2]</sup>。

对形成冰塞或冰坝条件的分析研究,仍是必须深入进行的一个课题,除去上面概括的情况外,无疑的还会有一些其它的水流特性的、水文的、气象和地形的条件会导致冰塞和冰坝的形成。

黄河下游沿程气温的差异,流量的不稳定,往往形成开河自上而下,冰凌越集越多的

1) 黑龙江省黑河地区水文分站:黑龙江上游冰坝成因分析及预报方法探讨,1974。

现象,是形成冰坝的物质条件;河道弯曲,上宽下窄,上游河段开河时下游河段仍处于固封状态等,则是形成冰坝的边界条件。松花江的支流嫩江,其流向虽与黄河下游不同,但有时受水文、气象变化的影响,也会出现自上而下的开河现象;并且局部河段亦具备卡塞冰凌的条件,所以在开河时也会形成冰坝,导致水位猛涨,产生凌汛威胁。

### 第三节 冰的生成及其影响因素

#### (一) 冰晶的形成

一切冰情现象都是由冰晶发展演变而形成的。冰晶是组成冰的最小单元,是水的固体形态。自然界的水具有三种物理形态——气态、液态和固态,在一定的温度和压力条件下,水的三种物理形态可以互相转化。水具有这种物理形态转化的性质,是由于水分子的结构及其分子在不同温度条件下运动的特点所致。水分子结构的特点是氢原子围绕氧原子的分布不对称,它们并不分布在通过氧原子中心的一条直线上。在水分子内,氢和氧的原子是按等腰三角形分布的,三角形的顶角为  $104\text{--}106$  度,氧原子位于顶角,而两个氢原子则位于两个底角(如图 2.4),致使水分子中电荷的分布不对称,且有两极的特性,氧原子一端带负电荷,而在氢原子一端则带正电荷。因此,在水分子周围就会形成如同磁石一样的力场,这就是水的极性分子(如图 2.5)<sup>[3]</sup>。

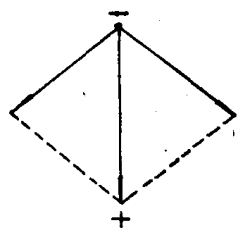
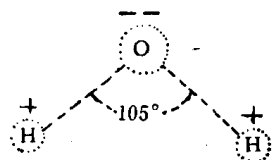
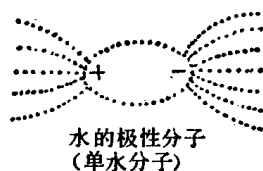
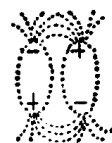


图 2.4 水分子的极性结构



水的极性分子  
(单水分子)



双水分子



三水分子

图 2.5 水分子的聚集

当水分子互相靠近到相当程度时,其力场就开始相互作用。这时,一个分子的带正电荷的极,与另一个分子带负电荷的极相吸引而成聚合物。未与其它分子聚合的单分子  $\text{H}_2\text{O}$ ,叫做单水分子;由两个分子聚合构成的水分子,即  $(\text{H}_2\text{O})_2$ ,叫做双水分子,它具有最大的稳定性;由三个分子聚合构成的水分子  $(\text{H}_2\text{O})_3$ ,叫做三水分子,它具有结构较疏松的特点(如图 2.5)。

单位体积水内所含各种水分子的百分比,随着水温的变化而不同(见表 2.1)。而在不同的水温下,不同物理形态的水的单位体积内所含各种水分子有一定的限度(饱和点),例如水温  $0^\circ\text{C}$  时所含三水分子的限度为  $37\%$ 。当水温升高时,水分子的运动速度随着温度的升高而加大,这时水分子之间的吸引力就难以保持分子之间的接近,因此水分子聚合物(双水分子、三水分子)的含量随着温度的上升而减少。在气态时,即温度高于  $100^\circ\text{C}$ ,水主要由单水分子所组成,水温降低时,水分子聚合体的含量又会增加。当水温降至  $0^\circ\text{C}$  时,一旦三水分子所占的比例超过饱和点  $37\%$ ,标志着水分子的运动强度急剧地减小,水便

由液态向固态过渡,出现了冰晶。

表 2.1 在不同温度下单位体积内各种水分子所占的百分比

| 物 理 形 态 | 水 温(°C) | 百 分 比 (%)             |                                      |                                      |
|---------|---------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|         |         | 单水分子 H <sub>2</sub> O | 双水分子 (H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub> | 三水分子 (H <sub>2</sub> O) <sub>3</sub> |
| 冰       | 0       | 0                     | 41                                   | 59                                   |
|         | 0       | 19                    | 58                                   | 23                                   |
| 水       | 4       | 20                    | 59                                   | 21                                   |
|         | 98      | 36                    | 51                                   | 13                                   |

冰晶的出现是结冰的开始。随着温度继续下降,冰晶也随之增多,并互相粘结,组成各种冰情现象,所以冰晶是产生一切冰情现象的基础。

### (二) 冰 的 结 构

在冰的结构中,水分子间构成的氢键起着很大的作用,每个氧原子被四个以四面体形式排列起来的其他氧原子所围绕着,而前者系通过四个氢原子才和后者相联结起来的。四个氢原子中的二个排列在该氧原子的近旁,生成了水的分子。其他两个氢原子用氢键同上述的那个氧原子相联结,它们是属于另外的水分子的组成的。

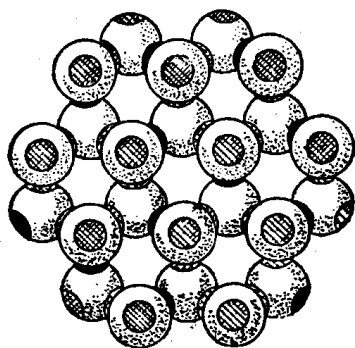


图 2.6 冰的结构

(图中有网线的圆圈是水分子的氢原子,黑色部分是水分子同邻近分子的氢原子所结成的键)

图 2.6 表示水分子在两邻接层中的排列情况,这种排列情况与分子最紧密的排列相差得很远。在最紧密排列的情况下,则冰的克分子容积将等于 9 毫升;而实际上冰的克分子容积等于 19.6 毫升,即后者比前者约大两倍。这是因为当分子排列成最紧密的结构时,这些分子就不能保持那种相互的规定的方向。然而这种方向是符合于氧原子四个键的四面体排列的方向的,并且它也是产生氢键所必须的方向。这就说明了冰的

松懈结构及冰轻于水和浮于水面的事实<sup>[4]</sup>。

### (三) 结 冰 的 程 序

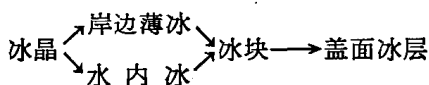
在静水(例如湖泊、河湾死水)中,冰的形成是:在天冷时水面上的气温较低,表层的水分子失去热量,水温降低,水分子的比重变大而下沉,下层较暖的水分子因其比重较小而上浮到水面,又与冷空气接触,失热后又下降,如此反复对流。由于水在 4°C 时密度最大,所以当上下层的水温都降至 4°C 时,因重力而造成的对流现象停止。以后上层水温继续冷却,上下层间的热交换则以传导的方式进行。如果水深较大时,水温沿着水深保持一定的梯度,深水底的水温仍在 4°C 上下。当上层水温继续下降至 0°C,聚集在水面的冷水分子将随之放出“潜热”(1 克水结冰时放出的热量为 79.7 卡)而凝成冰晶。由于冰的密度比水小(冰的密度在温度 0°C 时为 0.9167 克/厘米<sup>3</sup>),所以冰晶停留于水面,并在冷空气的

影响下,互相粘结,构成薄冰膜。其后,随着气温在 $0^{\circ}\text{C}$ 以下天数的增加,冰层继续增厚并成为完整坚固的盖面冰层。因此说,静水中冰的形成只限于从表面开始,其发展过程是:

冰晶 $\rightarrow$ 薄冰(多从岸边开始) $\rightarrow$ 盖面冰层

流水中的结冰程序与静水中有很大的区别。天然河道内水的流动,一般是紊流状态(水流质点或水团相互混杂,相互碰撞,水流质点的流动轨迹极不规则)。水流的紊动作用,使水内的热流主要以紊乱交换的方式进行,这就为整个过水断面的水温获得比较均匀一致的变化提供了有利的条件,因而冬季河流过水断面上下水温可以同时均匀地降到 $0^{\circ}\text{C}$ 左右。这时,全断面的任何地方都会有冰晶出现,而水的粘滞阻力(水分子相对运动时互相之间所产生的阻力)对于冰晶的形成,也起着重要的促进作用。

冬季河流中,在气温降低到 $0^{\circ}\text{C}$ 以下时,初成的冰晶相互聚集,首先在岸边流速缓慢的地方形成较薄的“岸冰”,与此同时,在全断面上也有水内冰形成。水内冰漂浮于水面或悬游于水内,随时互相粘结或与漂浮着的薄冰结并,体积逐渐增大,形成冰块。这些冰块就是最后形成河流封冻的物质基础。因此,流水中结冰的发展过程是:



#### (四) 水内冰的形成

水内冰是一种悬浮在水中,附着在河底或其他水内物体上的多孔而不透明的冰体,它由水内冰晶结成,呈海绵状、饭团状或羽毛状,形似浸透了水的湿雪,在多数情况下,其中混有各种杂质,如沙粒、水草等(见照片 2.1 和 2.2)。

关于形成水内冰的原因,迄今尚无一致的结论,一般认为需要具有下列的两个条件:

第一、水的过冷却状态(即水温略低于 $0^{\circ}\text{C}$ ,如零下千分之几度至百分之几度)的持续存在。水的过冷却是形成冰晶的条件,正如前述,由于水流的紊动,整个断面可以同时实现水的过冷却,因此冰晶可以形成于水流的任何深度。由水开始形成冰晶时,必然要释放出一定量的潜热,这种热量不断地被周围的流水带走,并最终消散于冷空气中,使冰晶再与新的过冷却水流接触,继续形成更多、更大的结晶。当全河封冻以后,水体与冷空气被表面冰层隔离,使结冰释放出来的热量不能直接消散于冷空气中,或由于其他原因(例如有温度较高的地下水的加入),水的过冷却作用受到阻碍,水内冰晶的形成即行终止。水的过冷却状态的持续存在,使得大量的冰晶连续不断地产生,并相互粘结,体积逐渐增大,进而发展成为水内冰。

第二、在河底或其他水下固体物表层有不很流动的水层,它存在于:(1)水流平稳时,受液体表面张力控制的表层中;(2)任何流速时,在由直接覆盖在不平河底的水膜所组成的底层中;(3)水下固体物表层不平整所形成的近层水膜中。在流动的水层中,冰晶的结构极易遭受破坏,而不很流动的水层是冰晶形成的场所,这种环境也便于冰晶相互粘结,逐渐发展为水内冰。

水内冰在河流的冻结过程中有着重要的作用,当水内冰大量形成后,一部分上升到水面,成为“冰花”;另一部分,则固结在河底的不平或突起处,称为“底冰”。随着底冰体积的增大,其上浮力大于与河底的粘着力时,底冰也会向上漂浮。这些就构成封河前流凌的主要部分,也成为形成盖面冰层、致使河流封冻的物质条件。



## （五）影响河流冰情的因素

影响河流冰情的因素较多,但可以归纳概括为两个方面,即热力因素和水力因素。

冰情的变化有量与质的变化以及形态变化两种。从开始结冰到最大冰厚出现,而后开始融冰直到冰凌全部消融为止,是量与质的变化过程,它是水体热量变化的产物。从冰块开始流动(淌凌),冰块静止(封冻),到冰块复又流动(开河),是冰的形态变化过程,它是水体热量和水力作用共同变化的产物。

作用于河水的热力因素主要有太阳辐射、水体与大气间的热对流、有效辐射及由于蒸发而引起的水体热量变化等四个方面。此外,地下水的加入,降水、河床与水体之间的热交换也影响着水体的增热或冷却过程。从定性方面分析,太阳辐射对水体永远起着加热作用,而蒸发与有效辐射则总是引起水体热量的散发,只有水体与大气间的热对流作用是随着水的物理特性及气象条件的变化为负或为正。对流热的正负和大小取决于气温和水温的差别。从整个冰情时期来看,成冰时段中的水温常高于气温,水与空气的热对流使水体得到负热量,而在融冰时段的后期,水温常低于气温,水与空气的热对流使水体得到正热量。

冬季,由于太阳辐射的减弱,尤其是伴有强劲北风的冷气团的侵入,往往使气温迅速地、大幅度地下降,这时水体与大气之间的热量转移便成为水体冷却的主要原因。在北方的河流或水池中,每年首次出现冰凌的时间多在初冬的早晨,这些冰凌的产生,在很大程度上是由于大量的对流热散发所致,因为在冬季的凌晨,气温比水温低得很多,因此水体中的热量便向冷空气中大量散发(对流),使水温迅速下降,当水温降到 $0^{\circ}\text{C}$ 时,就会很快地凝结成冰。

热力因素与冰质的强弱有着密切的关系。根据多年的观察总结,沿黄群众认为冰质随热力因素变化的过程一般可以分为三种情况:

- (1) 当气温和水温均低于 $0^{\circ}\text{C}$ 时,冰块透明晶莹,冰质坚硬;
- (2) 当气温高于 $0^{\circ}\text{C}$ ,但水温低于 $0^{\circ}\text{C}$ 时,上层冰面开始变色,出现竖丝;下层由于水温尚低,冰质尚硬;
- (3) 当气温和水温均高于 $0^{\circ}\text{C}$ 时,冰块上下均消蚀变成灰黑色冰面,随着气温的继续上升,竖丝上下沟通,冰质酥脆。

水流对水情的影响包括水流对冰块的搬运作用和水流因素动而加速水流内部热传导两个方面。流速的大小,反映表面水流搬运能力的强弱,流速较大的河段上,虽然也具有相当多的冰量,由于水流的搬运能力比较强,河面上流动的冰块就较难静止下来。另外,流速的大小也显示水体内部因素动而产生热转移的强度。流速小,水体内部的热转移较为迟缓,表层水体较易冷却而结冰,所以,水力作用的大小往往直接影响到河流封冻和开河日期的延迟或提前,也是影响冰情变化的一个因素,特别是影响冰情形态变化的主要因素。

## 第四节 黄河下游冰情的演变过程

“小雪不耕地(地冻),大雪不行船(封河)”,“过了惊蛰无凌丝”。这是黄河下游的老船