

国家自然科学基金委员会、水利部黄河水利委员会黄河联合研究基金项目(50339020)

模型黄河建设 理论与方法

高 航 主编



黄河水利出版社

国家自然科学基金委员会、水利部黄河水利委员会黄河联合研究基金项目(50339020)

模型黄河建设理论与方法

高 航 主编

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书集成了作者及其他学者从事黄河动床模型试验工作的主要研究成果,不仅从水力学基本理论、泥沙运动基本理论和实体模型相似到黄河实体模型的设计及制作等方面进行了探讨,而且还结合黄河动床模型试验的实例,详细介绍了黄河动床模型试验的方法和经验。

本书资料丰富,机理阐述清晰,浅显易懂,是一部涉及水力学、河流动力学、河流模拟方面的科技专著。本书可供广大治黄工作者、河流泥沙研究人员及大专院校有关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

模型黄河建设理论与方法/高航主编. —郑州:黄河水利出版社,2007. 12

国家自然科学基金委员会、水利部黄河水利委员会黄河联合研究基金项目(50339020)

ISBN 978 - 7 - 80734 - 322 - 6

I. 模… II. 高… III. 黄河 - 水工模型 IV. TV882.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 187972 号

组稿编辑:岳德军 手机:13838122133 E-mail:dejunyue@163.com

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:0371 - 66026940、66026550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclbbs@126.com

承印单位:河南第二新华印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:26.5

字数:610 千字

版次:2007 年 12 月第 1 版

印数:1—1 000

印次:2007 年 12 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978 - 7 - 80734 - 322 - 6/TV · 532

定价:98.00 元

《模型黄河建设理论与方法》 编委会

主 编:高 航

副 主 编:江恩惠 张俊华 陈书奎 苏运启 李远发

审 定:张俊华

编写人员:

李书霞 王大川 张林忠(第一章 黄河流域概况)

张林忠 王大川 王艳平(第二章 水力学基本理论)

赵连军 马怀宝(第三章 泥沙运动基本理论)

李书霞 石标钦(第四章 河工模型相似律)

刘 燕(第五章 实体模型设计)

王艳平 许 智(第六章 黄河基本概念及模型制作)

陈孝田(第七章 模型试验)

曹永涛 陈书奎(第八章 典型模型试验实例)

高 航(附录)

前 言

2001年11月7日,黄河水利委员会党组从黄河治理开发及国民经济发展的重大需求出发,提出了21世纪要加大治黄科技含量,着力建设“三条黄河”,即建设“原型黄河”、“数字黄河”和“模型黄河”的科学治黄新理念。其中“模型黄河”工程建设是促进治黄科技水平不断提升的重要保障措施之一,也是建设其他两条“黄河”的科技支撑。“模型黄河”是对“原型黄河”所反映的自然现象进行反演、模拟和试验,从而揭示“原型黄河”内在的自然规律。建设“模型黄河”(主要包括黄土高原模型、水库模型、河道模型及河口模型),一方面直接为“原型黄河”提供治理开发方案,另一方面为“数字黄河”工程建设提供物理参数。通过“数字黄河”与“模型黄河”的联合运用,确保各种治理开发方案在“原型黄河”上实现技术先进、经济合理、安全有效的目标。为尽快实施“模型黄河”建设,作为“模型黄河”主要依托单位的黄河水利科学研究院编制完成了《“模型黄河”建设规划》,并于2003年8月25日在北京通过了水利部的审查。

几十年来,黄河水利科学研究院的科研工作者一直在从事黄河实体模型的研究工作,利用实体模型开展了大量泥沙学科的基础理论研究和治黄科研的应用研究。实体模型在水利工程规划与建设、河床演变与河道整治方面的基础研究、黄河下游洪水演进预报、黄河下游河道整治方案的论证、河道整治局部工程试验、河道整治工程新技术研究、挖河固堤试验研究、小浪底水库运用方式研究、黄河调水调沙试验以及数学模型研究等方面发挥了重要的作用。长期的研究,使黄河水利科学研究院在模型理论和模型建设方面积累了丰富的经验,造就了一大批实体模型试验专家。为更好地进行“模型黄河”建设,黄河水利科学研究院组织有关专家编写了本书。

全书共分八章。第一章简单介绍了黄河流域的基本情况;第二章至第四章分别从水力学基本理论、泥沙运动基本理论和河工模型相似律方面介绍了一般河工模型的建设理论;第五章详细介绍了黄河实体模型的设计方法;第六章重点介绍了黄河实体模型的制作方法;第七章介绍了黄河实体模型试验过程中的操作要点;第八章选取了一些典型实体模型设计、制作和试验的实例,以加深读者对本书内容的理解。全书由高航、江恩惠、张俊华、陈书奎、苏运启、李远发统稿。

本书为“模型黄河”建设人员的培训教材,也可供高等院校水利水电类专业师生和工程技术人员参考。限于作者水平,本书错误之处在所难免,热忱欢迎读者提出宝贵意见。

本书的出版,得到了水利部黄河泥沙重点实验室的大力资助;黄河水利科学研究院一些长期从事实体模型试验的老专家,从全书内容到表达方式,都提出了不少宝贵意见,在此谨致谢意。

作 者

2007年12月

目 录

第一章 黄河流域概况	(1)
第一节 自然环境	(2)
第二节 社会经济	(4)
第三节 河道特性	(5)
第四节 黄河防洪建设	(7)
第五节 黄河洪水	(14)
第六节 黄河设计洪水	(39)
第七节 黄河冰凌洪水	(52)
参考文献	(55)
第二章 水力学基本理论	(56)
第一节 水流运动的基本概念	(56)
第二节 水流运动基本方程	(57)
第三节 液流型态	(62)
第四节 水流的流态	(66)
第五节 作用于流体的力	(67)
参考文献	(69)
第三章 泥沙运动基本理论	(70)
第一节 河流泥沙的来源及组成	(70)
第二节 泥沙的基本特性	(76)
第三节 河流泥沙的运动形式与泥沙起动	(88)
第四节 沙波运动与动床阻力	(96)
第五节 推移质输沙率	(102)
第六节 悬移质运动基本概念及含沙量沿垂线分布	(113)
第七节 水流挟沙力	(122)
第八节 高含沙水流问题	(128)
第九节 异重流	(147)
参考文献	(160)
第四章 河工模型相似律	(163)
第一节 基本相似准则	(164)
第二节 河工模型相似律研究	(169)
第三节 黄河泥沙模型相似律	(195)
参考文献	(204)

第五章 实体模型设计	(205)
第一节 实体模型设计的前期工作	(205)
第二节 实体模型设计资料的收集与选择	(219)
第三节 实体模型设计过程	(220)
第四节 实体模型设计实例	(227)
参考文献	(242)
第六章 黄河基本概念及模型制作	(243)
第一节 黄河基本概念	(243)
第二节 模型制作前的准备	(261)
第三节 模型制作	(263)
第四节 模型制作实例	(281)
第五节 小 结	(290)
参考文献	(290)
第七章 模型试验	(291)
第一节 模型试验概述	(291)
第二节 模型的制作、验证和试验成果的整理	(294)
第三节 动床模型进出口控制条件及有关模拟操作技术问题	(302)
第四节 动床模型的供水加沙设备和测试仪器	(313)
第五节 试验资料整理	(317)
参考文献	(329)
第八章 典型模型试验实例	(331)
第一节 小浪底水库动床模型试验研究实例	(331)
第二节 小浪底至苏泗庄河段河道动床河工模型试验研究实例	(371)
参考文献	(406)
附 录	(407)
附录 I 黄河泥沙实验室模型制作细则	(407)
附录 II 黄河泥沙实验室模型试验细则	(409)
附录 III 仪器设备的控制与管理程序	(410)
附录 IV 试验工管理条例	(413)

第一章 黄河流域概况

黄河是我国的第二大河,源远流长,历史悠久,千百年来,日夜不息地奔流在我国中部辽阔的大地上。

黄河从青藏高原巴颜喀拉山北麓海拔 4 500 m 的约古宗列盆地发源,出昆仑,穿峡谷,跃龙门,越平原,沿途汇纳百川,流经世界最大的黄土高原,挟带大量泥沙,集成滚滚洪流,一泻万里,东流入海,塑造了华北平原,又不间断地填海造陆,增加国土面积。

黄河流域土地广阔,地形复杂,气候变化较大。年降水量较少,大部分地区年平均降水量为 400 ~ 600 mm。流域分别属于半湿润、半干旱和干旱三个地带。黄河多年平均天然年径流量为 580 亿 m^3 ,仅占全国河川年径流总量的 2.1%,流域人均水量 593 m^3 ,约为全国人均水量的 23%,耕地亩^①均水量 324 m^3 ,相当于全国亩均水量的 18%。

黄河中游流经著名的黄土高原,其土质疏松,地形破碎,沟壑纵横,每遇暴雨,水土流失严重,大量泥沙泻入黄河,使黄河年输沙量之多和含沙量之高,都居世界河流之首。黄河突出的特点是水少沙多、下游河道淤积严重,这是黄河洪水长期危害的主要根源。

黄河流域水旱灾害频繁,历史上曾经多次发生遍及数省,连续几年的严重旱灾,造成赤地千里,饿殍遍野。但更为严重的灾害还是水灾,主要表现为下游堤防决口所造成的洪水泛滥。黄河每次决口和改道,都给两岸人民的生命和财产造成巨大的损失,带来深重的灾难。

黄河流域自然资源丰富,大部分地区气候温和,光热充足,土地资源比较丰富,是我国农业经济开发最早的地区。流域中、下游盛产小麦、玉米、棉花、烟叶、油料及其他农产品,是我国主要粮棉产区之一。流域内矿产资源丰富,其中稀土、铀、石膏、铝土矿、煤、钼等具有全国性优势。黄河流域的能源资源在全国占有极其重要的地位,享有乌金之称的煤炭资源遍布流域境内,其中晋、蒙两省(区)的储量占全国总储量的 60% 以上,石油资源在沿黄的甘肃、河南、陕西、山东均有分布。黄河的水力资源蕴藏量在全国七大江河中仅次于长江,居第二位。

黄河是伟大祖国的母亲河,对中华民族的繁衍、成长、发展有过重大贡献。黄河流域在历史上的较长的时期内是我国政治、军事、经济、文化中心。但长期以来,由于自然和社会的原因,黄河的洪水灾害一直危害两岸人民,成为中华民族的心腹之患。新中国成立后,党和政府十分重视黄河的防洪工作,在黄河上、中、下游修建了大量的防洪工程,特别是对防洪问题突出的下游,投入了巨大的财力和人力,建成了比较完整的防洪工程体系和非工程措施,从而战胜了历年洪水和凌汛,基本上扭转了以往黄河经常决口的险恶局面,保卫了黄淮海平原人民财产的安全和社会主义建设的顺利进行,取得了巨大的社会效益和经济效益。

① 1 亩 = 1/15 hm^2 ,下同。

第一节 自然环境

黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓海拔 4 500 m 的约古宗列盆地,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东等九省区,于山东垦利县注入渤海。干流河道全长 5 464 km,落差 4 480 m。黄河流域位于东经 $96^{\circ} \sim 119^{\circ}$ 、北纬 $32^{\circ} \sim 42^{\circ}$ 之间,东西长约 1 900 km,南北宽约 1 100 km,流域面积 79.5 万 km^2 (包括内流区 4.2 万 km^2),加上下游受洪水影响的范围共约 91.5 万 km^2 。

一、地形地貌

黄河流域西起巴颜喀拉山,东临渤海,北抵阴山,南达秦岭。横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和华北平原等四个地貌单元。流域地势西高东低,大致分为三级阶梯。第一级阶梯是流域西部的青海高原,位于著名的世界屋脊——青藏高原的东北部,海拔 3 000 ~ 5 000 m,有一系列的西北—东南向山脉,山顶常年积雪,冰川地貌发育。青海高原南沿的巴颜喀拉山绵延起伏,是黄河与长江的分水岭。祁连山脉横亘高原北缘,构成青海高原与内蒙古高原的分界。黄河河源区及其支流黑河、白河流域,地势平坦,多为草原、湖泊及沼泽。

第二级阶梯大致以太行山为东界,海拔 1 000 ~ 2 000 m。本区内白于山以北属内蒙古高原的一部分,包括黄河河套平原和鄂尔多斯高原,白于山以南为黄土塬、秦岭山地及太行山地。

河套平原西起宁夏下河沿,东至内蒙古托克托,长达 900 km,宽 30 ~ 50 km,海拔 900 ~ 1 200 m。地势平坦,土地肥沃,灌溉发达,是宁夏和内蒙古自治区的主要农业生产基地。河套平原北部的阴山山脉和西部的贺兰山、狼山犹如一道屏障,阻挡着阿拉善高原的腾格里、乌兰布和、巴丹吉林等沙漠向黄河流域腹地的侵袭。

鄂尔多斯高原位于黄河河套以南,北、东、西三面为黄河环绕,南界长城,面积约为 13 万 km^2 ,海拔 1 000 ~ 1 400 m,是一块近似方形的台状干燥剥蚀高原。高原内风沙地貌发育,北缘为库布齐沙漠,南部为毛乌素沙地,河流稀少,盐碱湖众多。高原边缘地带是黄河粗泥沙的主要来源区之一。

黄土高原西起日月山,东至太行山,南靠秦岭,北抵鄂尔多斯高原,海拔 1 000 ~ 2 000 m,是世界上最大的黄土分布地区。地貌类型有黄土塬、梁、峁、沟等。地表起伏变化剧烈,相对高差大。黄土层深厚,组织疏松,地形破碎,植被稀少,水土流失严重,是黄河中游洪水和泥沙的主要来源地区。黄土高原中的汾渭盆地,是地堑式构造盆地,经黄土堆积与河流冲积而成。汾渭盆地地面平坦,土地肥沃,灌溉历史悠久,是晋、陕两省的富庶地区。

横亘黄土高原南部的秦岭山脉,是我国亚热带和暖温带的南北分界线,也是黄河与长江的分水岭。对于夏季来自南方的暖湿气流、冬季来自偏北方向的寒冷气流,均有巨大的

障碍作用。耸立在黄土高原与华北平原之间的太行山,是黄河流域与海河流域的分水岭,也是华北地区一条重要的自然地理分界线。本区流域周界的伏牛山、外方山及太行山等高大山脉,是来自东南海洋暖湿气流深入黄河中上游地区的屏障,对黄河流域及我国西部的气候都有重要影响。由于这一地区的地形对水汽抬升有利,暴雨强度大,产汇流条件好,是黄河中游洪水主要来源之一。

第三级阶梯自太行山以东至滨海,由黄河下游冲积平原和鲁中丘陵组成。黄河下游冲积平原是华北平原的重要组成部分,面积达 25 万 km^2 ,海拔多在 100 m 以下。本区以黄河河道为分水岭,黄河以北属海河流域,以南属淮河流域。区内地面坡度平缓,排水不畅,洪、涝、旱、碱灾害严重。鲁中丘陵由泰山、鲁山和沂蒙山组成。一般海拔在 200 ~ 500 m 之间,少数山地 在 1 000 m 以上。

二、气候

黄河流域幅员辽阔,地形复杂,东临海洋,西居内陆高原,东西高差显著,流域内气候变化极为明显。从季风角度看,黄河上游兰州以上地区属青藏高原季风区,其余地区为温带和副热带季风区。从气候对农业生产影响的角度看,流域东南部基本属湿润气候,中部属半干旱气候,西北部属干旱气候。本流域冬季受蒙古高压控制,盛行偏北风,气候干燥严寒,降水稀少。夏季西太平洋副热带高压增强,暖湿的海洋气团进入流域境内,蒙古高压渐往北移,冷、暖气团相遇,多集中降水。

黄河流域的降水主要以降雨形式出现,降雪所占的比重不大。全流域多年平均年降水总量为 3 701 亿 m^3 ,只占全国年平均降水总量的 6%,折合降水深为 465 mm(包括内流区)。年降水量地区分布的总趋势是由东南向西北递减。降水最多的地区为秦岭北坡,多年平均降水量为 800 mm 左右,局部地区可达 900 mm 以上。降水最少的地区为宁蒙河套地区,年降水量只有 200 ~ 300 mm,特别是内蒙古杭锦后旗至临河一带,年降水量不足 150 mm。流域的大部分地区年平均降水量为 400 ~ 600 mm。降水年内分配很不均匀,以夏季(6 ~ 8 月)降水最多,占全年的 54.1%,最大月份为 7 月,占全年的 22.1%;冬季(12 月 ~ 翌年 2 月)降水量最少,占全年的 3.1%,最小月份为 12 月,占全年的 0.6%。年降水量的变差系数(C_v 值),全流域在 0.15 ~ 0.40 之间。

黄河流域气温,东南部高于西北部,高山低于平原。多年平均气温,上游为 1 ~ 8 $^{\circ}\text{C}$,中游为 8 ~ 14 $^{\circ}\text{C}$,下游为 12 ~ 14 $^{\circ}\text{C}$ 。月平均气温,以 7 月为最高,大部分地区在 20 ~ 29 $^{\circ}\text{C}$ 之间,洛阳市极端最高气温达 44.3 $^{\circ}\text{C}$ 。1 月为最低,绝大部分地区都在 0 $^{\circ}\text{C}$ 以下,青海玛多极端最低气温 -48.1 $^{\circ}\text{C}$ 。气温日较差大部分地区为 10 ~ 15 $^{\circ}\text{C}$ 。

三、水资源

黄河多年平均天然径流量为 580 亿 m^3 ,仅占全国河川径流总量的 2.1%,居全国七大江河的第四位。流域平均年径流深 77 mm,只相当于全国平均径流深 276 mm 的 28%,在全国七大江河中仅略高于辽河。流域人均水量 593 m^3 ,约为全国人均水量的 23%。耕地

亩均水量 324 m^3 , 相当于全国亩均水量的 18%。

黄河天然径流量的地区分布很不均匀。兰州以上地区流域面积占全河的 29.6%, 年径流量达 323 亿 m^3 , 占全河的 55.7%, 是黄河来水最为丰富的地区。兰州至河口镇区间流域面积虽然增加了 16.3 万 km^2 , 占全河的 12.5%, 但由于这一地区气候干燥, 河道蒸发渗漏损失较大, 河川径流量不但没有增大, 反而减少了 10 亿 m^3 。河口镇至龙门区间流域面积占全河的 14.8%, 来水 72.5 亿 m^3 , 占全河的 12.5%。龙门至三门峡区间流域面积占全河的 25.4%, 来水 113.3 亿 m^3 , 占全河的 19.5%。三门峡至花园口区间流域面积仅占全河的 5.5%, 但来水 60.8 亿 m^3 , 占全河水量的 10.5%, 是又一产流较多的地区。花园口至河口区间流域面积占全河的 3%, 来水量为 21 亿 m^3 , 占全河水量的 3.6%。黄河干流各站汛期(7~10月)天然径流量约占全年的 60%, 非汛期约占 40%, 汛期洪水暴涨暴落, 冬季流量很小, 上游兰州站 1946 年汛期实测最大洪峰流量达 $5900 \text{ m}^3/\text{s}$, 而非汛期最小流量仅 $335 \text{ m}^3/\text{s}$, 相差近 17 倍。中游陕县站 1933 年实测最大洪峰流量 $22000 \text{ m}^3/\text{s}$, 最小流量 $240 \text{ m}^3/\text{s}$, 相差近 91 倍。

随着国民经济发展及黄河流域大量蓄水、引水、提水工程的修建, 20 世纪 80 年代黄河河川径流年耗用量已达 $280 \text{ 亿} \sim 290 \text{ 亿 m}^3$, 其中城市工业及农村人畜耗水约为 11 亿 m^3 , 其余都为农业灌溉耗水。黄河径流的利用率约为 50%, 与国内外大江大河比较, 黄河水资源利用率已达到较高水平。同时, 由于黄河上游龙羊峡水库的调节作用, 黄河径流的年内、年际分配也有较大变化。

第二节 社会经济

黄河流域及下游防洪保护区共有人口 1.72 亿(流域内 9780 万), 占全国总人口的 15.1%, 耕地面积约 2.8 亿亩(流域内 1.8 亿亩), 占全国总耕地面积的 19.4%。黄河流域总土地面积 11.9 亿亩(含内流区), 占全国国土面积的 8.3%, 其中大部分为山区和丘陵, 分别占流域面积的 40% 和 35%, 平原区仅占 17%。流域内耕垦率为 15.1%, 耕地共 1.8 亿亩, 人均 1.83 亩, 约为全国人均耕地的 1.5 倍, 大部分地区光热资源充足, 农业生产发展潜力很大。流域内有林地 1.53 亿亩, 森林覆盖率为 12.9%。牧草地 4.19 亿亩, 占流域面积的 35.2%。全流域还有宜于开垦的荒地约 3000 万亩, 主要分布在黑山峡至河口镇区间的沿黄台地和黄河河口三角洲地区, 是我国开发条件较好的后备耕地资源。

黄河流域矿产资源十分丰富, 1990 年探明的矿产有 114 种, 在全国已探明的 45 种主要矿产中, 黄河流域有 37 种。具有全国性优势(储量占全国储量的 32% 以上)的有稀土、铌、石膏、玻璃硅质原料、煤、铝土矿、钼、耐火黏土等 8 种; 具有地区性优势(储量占全国总储量的 16%~32%)的有石油和芒硝两种; 具有相对优势(储量占全国总储量的 10%~16%)的有天然碱、硫铁矿、水泥用灰岩、钨、铜、岩金等 6 种。黄河流域成矿条件多样, 矿产资源既分布广泛又相对集中, 为开发利用提供了有利条件。流域内有 11 个矿产集中

区,可以形成各具特色和不同规模的生产基地,进行集约化开采利用。

黄河流域可开发的水电装机容量为 3 185 万 kW,年发电量 1 179 亿 kW·h,在全国江河中名列第二位。黄河流域的水电资源有 91% 分布在干流上,上游的龙羊峡至青铜峡河段和中游的北干流河段,梯级水电开发条件好,淹没损失小,技术经济指标优越,综合利用效益显著,分别是我国近期开发建设的 12 个水电基地的重要组成部分。

黄河流域大部分地区气候温和,光热充足,土地资源比较丰富,是我国农业经济开发最早的地区。上游宁蒙河套平原、中游关中平原、下游防洪保护区内的黄淮海平原,地形平坦,水源充足,灌溉方便,人口稠密,生产条件好,是我国主要农业生产基地,小麦、棉花、油料、烟叶等主要农产品在我国占有重要地位。1990 年全流域及下游防洪保护区农业产值共计 1 035 亿元,占全国的 13.7%,其中下游防洪区为 585 亿元,占全国的 7.6%;粮食总产量 6 335 万 t,占全国的 14.6%,其中下游防洪保护区为 3 324 万 t,占全国的 7.6%;棉花总产量为 176 万 t,占全国的 39%,其中下游防洪保护区为 154 万 t,占全国的 34%;油料总产量为 239 万 t,占全国的 14.8%,其中下游防洪保护区为 100 万 t,占全国的 5.4%。

新中国建立以来,黄河流域及下游平原地区的工业取得了长足的进步,建立和发展了多种部门的现代化工业,特别是能源、冶金、机械制造和纺织工业发展较快,并出现了西宁、兰州、银川、包头、呼和浩特、太原、西安、洛阳、郑州和济南等一大批新兴工业城市。近年来,各地调整产业结构,长期未受重视的轻工业和乡镇企业迅速发展,工业产值增长速度加快。1990 年黄河流域及下游防洪保护区工业总产值达到 2 695 亿元,占全国当年工业总产值的 11.3%,其中下游防洪保护区为 1 100 亿元,占全国的 4.6%。黄河流域能源和矿产资源十分丰富,上游地区的水电,中游地区的煤炭和天然气,下游地区的中原油田和河口三角洲的胜利油田,沿黄地带的铝土、铅、锌、铜、铀、稀土等在全国都占有重要的地位。沿黄地带是我国近期开发生产力布局中三条主轴线(沿海地带、沿长江地带、沿黄河地带)之一,近期将重点开发建设以兰州为中心的水电及有色金属冶炼基地、以山西为中心能源重化工基地、以山东半岛及黄河河口地区为主的石油和海洋开发基地。随着新的欧亚大陆桥的打通和交通运输的建设,也将为流域经济发展创造更为有利的条件。沿黄经济带的发展,对黄河防洪和治理开发必将提出更高的要求。

第三节 河道特性

黄河水系的发育,在流域北部和南部主要受阴山—天山和秦岭—昆仑山两大纬向构造体系控制,西部位于青海高原歹字形构造体系首部,中部受祁(连山)、吕(梁山)、贺(兰山)山字形构造体系控制,东部受新华夏构造体系影响,黄河萦回其间,从而发展成为今日的水系。其特点是干流弯曲多变,支流分布不均,河床纵比降较大。根据水沙特性和地形、地质条件,黄河干流分为上、中、下游(黄河干流各河段的特征值见表 1-1)。

表 1-1 黄河干流各河段特征值

河段	起始地点	流域面积 (km ²)	河长 (km)	落差 (m)	比降 (‰)	汇入支流 (条)
全河	河源—河口	752 443	5 463.6	4 480.0	8.2	76
上游	河源—河口镇	385 966	3 471.6	3 496.0	10.1	43
	1. 河源—玛多	20 930	269.7	265.0	9.8	3
	2. 玛多—龙羊峡	110 490	1 417.5	1 765.0	12.5	22
	3. 龙羊峡—下河沿	122 722	793.9	1 220.0	15.4	8
	4. 下河沿—河口镇	131 824	990.5	246.0	2.5	10
中游	河口镇—桃花峪	343 751	1 206.4	890.4	7.4	30
	1. 河口镇—禹门口	111 591	725.1	607.3	8.4	21
	2. 禹门口—三门峡	190 842	240.4	96.7	4.0	5
	3. 三门峡—桃花峪	41 318	240.9	186.4	7.7	4
下游	桃花峪—河口	22 726	785.6	93.6	1.2	3
	1. 桃花峪—高村	4 429	206.5	37.3	1.8	1
	2. 高村—艾山	14 990	193.6	22.7	1.2	2
	3. 艾山—利津	2 733	281.9	26.2	0.9	0
	4. 利津—河口	574	103.6	7.4	0.7	0

注:1. 汇入支流是指流域面积在 1 000 km² 以上的一级支流。

2. 落差从约古宗列盆地上口计算。

一、上游

内蒙古托克托县河口镇以上为黄河上游,河道长 3 472 km,水面落差 3 496 m,流域面积 42.8 万 km² (含内流区 4.2 万 km²),分别占全河的 63.5%、78% 和 53.8%。汇入的较大的支流(流域面积 1 000 km² 以上,下同)有 43 条。黄河干流青海省玛多以上属河源段,流经低山丘陵和湖盆草原地区,河段内的扎陵湖、鄂陵湖,水面面积分别为 526 km² 和 610 km²,平均水深分别为 9 m 和 17.6 m,蓄水量分别为 47 亿 m³ 和 108 亿 m³,是我国最大的高原淡水湖。玛多至玛曲河段,黄河穿行在巴颜喀拉山与积石山之间的古湖盆和低山丘陵地区,大部分河谷宽展,间有几段峡谷。玛曲至龙羊峡间,黄河流经高山峡谷,水流湍急,龙羊峡以上属高寒地区,人烟稀少,交通不便,经济尚待开发。龙羊峡至宁夏的下河沿,河长 794 km,河流川峡相间,水量丰沛,落差集中,是黄河水能资源开发的重点河段。下河沿至河口镇,黄河流经宁蒙平原,河道展宽平缓,两岸分布着大面积的引黄灌区,是宁夏、内蒙古自治区的经济发达地区。

二、中游

河口镇至河南郑州市附近的桃花峪为黄河中游。河道长 1 206 km,水面落差 890 m,区间流域面积 34.4 万 km²,分别占全河的 22.1%、19.9% 和 45.7%。汇入的较大支流有 30 条。

河口镇至禹门口为峡谷河段,两岸支流众多,绝大部分来自水土流失严重的黄土丘陵沟壑区,支流呈羽毛状汇入黄河,产汇流条件好,是黄河洪水泥沙的主要来源地区之一,特别是粗泥沙($d > 0.05$ mm)的主要来源地区。禹门口至三门峡间,黄河流经汾渭地堑,河谷展宽,其中禹门口至潼关河段是宽、浅、散、乱的游荡型河道,并有汾河、渭河两大支流相继汇入。三门峡至小浪底是黄河干流的最后一个峡谷河段,小浪底以下是黄河由山区进入平原的过渡地段,有洛河和沁河汇入。黄河中游来沙量占全河总沙量的 90%,河口镇至龙门、龙门至三门峡、三门峡至桃花峪区间,是黄河下游大洪水的三个主要来源地区。

三、下游

黄河干流自桃花峪以下为下游。河道长 786 km,落差 94 m,流域面积 2.3 万 km²,较大的人黄支流有天然文岩渠、金堤河及大汶河三条。黄河下游河道是在长期排洪输沙的过程中淤积塑造形成的,河床普遍高出两岸地面,是海河流域与淮河流域的分水岭。两岸引黄区面积约 3 000 万亩,是我国目前最大的自流灌区。黄河下游洪水、沙量沿程减小,河道堤距及河槽形态具有上宽下窄的特点。桃花峪至高村河段长 206.5 km,是冲淤变化剧烈,水流宽、浅、散、乱的游荡性河段。本河段防洪保护面积广大,是黄河防洪的重要河段。高村至艾山河段长 194 km,堤距及河槽逐渐缩窄,是由游荡性向弯曲性过渡的河段。艾山至利津河段长 282 km,是河势比较规顺稳定的弯曲性河段,由于堤距及河槽较窄,比降平缓,河道排洪能力较小,防洪任务也很艰巨。同时,冬季凌期时有冰坝堵塞,易造成堤防决溢灾害,威胁也很严重。利津以下的黄河河口段,河长约 104 km。随着黄河入海口的淤积—延伸—摆动,入海流路相应改道变迁。目前,黄河河口入海流路是 1976 年人工改道后的新河道,河口位于渤海湾与莱州湾交汇处,是一个弱潮多沙、摆动频繁的陆相河口。近 40 年间,黄河年平均输送到河口地区的泥沙约为 10 亿 t,滨海地区年均净陆面积 25 ~ 30 km²。

第四节 黄河防洪建设

一、下游防洪体系建设

下游防洪,一直是治黄的首要任务。新中国成立后 50 多年来,开展了大规模防洪工程建设。截至 1993 年,国家用于黄河下游防洪建设的投资达 47.6 亿元,共完成土方 10.1 亿 m³、石方 1 210 万 m³,初步建成了“上拦下排、两岸分滞”的防洪工程体系。此外,对防洪非工程措施的建设也不断加强和完善,为战胜洪水奠定了可靠的基础。

(一)堤防工程

对黄河下游两岸 1 400 km 大堤,新中国成立以来先后进行了 3 次全面加高,东坝头

以上堤防加高了 2~4 m,东坝头以下加高了 4~6 m。目前,堤防一般高 9~10 m,最高达到 14 m。堤防的设防标准为防御花园口站 22 000 m³/s 的洪水。考虑河道槽蓄削峰作用和堤距上宽下窄,下游各站设防流量渐次削减,艾山以下河段设防流量为 11 000 m³/s。

下游堤防为历代多次加修而成,基础条件复杂,隐患很多,新中国成立后,为了确保下游防洪安全,在三次加高的同时,还采取了一系列措施加固堤防。

主要措施一是采用“机械钻探,压力灌浆”的办法来探查和处理堤身裂缝、漏洞等隐患,这在黄河下游多年来一直反复进行,至 1992 年累计钻探灌浆 9 900 万眼。对巩固堤防起到了很好的作用。

二是根据黄河含沙量大的特点,利用黄河泥沙淤高大堤背河地面,解决堤基及堤身的渗透变形问题。放淤固堤(简称淤背固堤),20 世纪 60 年代以前,主要是结合灌溉引水自流沉沙或提水沉沙,淤高背河洼地。20 世纪 70 年代以后,开始采用简易吸(挖)泥船吸取河道泥沙,加宽堤身断面(堤后淤宽 50~100 m)。截至目前,在规定范围内淤背固堤的有效土方约 2 亿 m³,固堤长度 615 km。经过 1982 年大洪水考验,凡是背河淤高 3 m 以上的堤防,没有再发生渗水或管涌等情况。

此外,在部分堤段,还采用过修筑黏土斜墙,抽槽换土,砂石反滤,加筑前、后戗等办法加固大堤。

(二)河道整治工程

黄河下游主流游荡不定,常造成滩地坍塌,堤防生险,特别是洪峰落水期,河水归槽,坍塌坐弯,形成“横河”、“斜河”,主溜直冲大堤,如抢护不及时,就有决口的危险。新中国成立以前,黄河下游没有进行有计划的河道整治,河势得不到控制,使防洪长期处于被动状态。为了使防洪主动,新中国成立以来,在险工全部石化的同时,大力开展河道整治,兴建控导工程,护滩保堤,稳定河势。至 1992 年先后改建和新建险工和控导护滩工程 317 处,长 623 km。目前,陶城铺以下弯曲性河段,河势已经得到控制;高村至陶城铺过渡性河段,河势基本得到控制;高村以上的游荡性河段,缩小了游荡范围。经过 1982 年大洪水的考验,显示了河道整治工程对保证防洪安全的重要作用。

(三)干、支流水库工程

为了控制洪水,在黄河中游干、支流上先后修建了三门峡水库和伊河陆浑水库、洛河故县水库,这些水库在控制洪水、调节水沙方面已发挥了重大作用。

1. 三门峡水库

三门峡水利枢纽是 1955 年黄河规划选定的治理开发黄河的第一期骨干工程。1957 年开工兴建,1960 年 9 月基本建成,开始蓄水运用,由于库区严重淤积,从 1964 年起先后对枢纽工程进行增建和两次改建,加大了泄洪排沙能力。在运用上,从 1974 年起采用“蓄清排浑、调水调沙”的运用方式,根据黄河来水来沙特点,在来沙少的非汛期蓄水防凌与兴利,汛期降低水位防洪排沙,把非汛期淤积在水库的泥沙调节到汛期下排,以保持一定的有效库容供长期使用。目前,在防洪运用水位 335 m 下,有近 60 亿 m³ 防洪库容。

三门峡水库控制了黄河流域面积的 92%,处于调节下游洪水和泥沙的重要地位。但由于库区淤积影响和淹没损失较大,为了减轻库区淤积,目前三门峡水库主要担负防御大洪水的任务,中常洪水一般不拦洪。按照目前规定的运用方式,当三门峡水库以上发生大

洪水时,水库敞泄,但按目前泄流规模,下泄最大流量不超过 $15\,000\text{ m}^3/\text{s}$,可以显著减轻下游防洪威胁;当三门峡至花园口区间发生大洪水时,水库相机关门拦洪,对减轻下游防洪负担亦有很大作用。

2. 支流伊河陆浑水库和洛河故县水库

支流伊河陆浑水库和洛河故县水库的主要任务是配合三门峡水库削减三门峡至花园口区间的洪峰流量,以减轻黄河下游的防洪负担。

陆浑与故县两座支流水库共控制三门峡至花园口区间流域面积的 21.3% 。两座水库有防洪库容 13.5 亿 m^3 (近期),陆浑水库和故县水库运用后,对于 1958 年型千年一遇洪水,可削减黄河花园口站洪峰流量 $3\,410\text{ m}^3/\text{s}$;百年一遇洪水削减 $2\,070\text{ m}^3/\text{s}$ 。

(四)分滞洪工程

黄河下游河道上宽下窄,排洪能力上大下小。如遇大洪水,由于下游窄河段泄洪能力较小,不能完全宣泄,只有采用牺牲局部、保护大局的办法,选择适当地点分洪。因此,从 20 世纪 50 年代开始,先后在艾山以上开辟了北金堤滞洪区和修建了东平湖水库。为了减轻山东窄河段的凌汛威胁,从 1971 年起又修建了北岸齐河和南岸垦利两处堤距展宽工程。

1. 东平湖水库

东平湖水库是保障艾山以下河道防洪安全的重要措施,担负着分滞黄河洪水和调蓄汶河洪水的作用。东平湖原为黄河及汶河的自然滞洪区,1958 年改建为东平湖水库,1962 年后又确定为滞洪工程。东平湖滞洪区面积 627 km^2 ,中间有隔堤分成新、老湖区。滞洪区由 100 km 的围坝、5 座分洪闸和 3 座退水闸组成。目前,其有效分洪能力为 $7\,500\sim 8\,500\text{ m}^3/\text{s}$,当黄河发生较大洪水时,东平湖相机分洪,控制艾山下泄流量不超过 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。使用东平湖水库滞洪,基本上解决了黄河下游河道排洪能力上大下小的矛盾。

2. 北金堤滞洪区

北金堤滞洪区是防御超标准洪水的工程措施,位于黄河下游由宽到窄过渡段的北岸,在临黄大堤与北金堤之间。1951 年,在河南省长垣县临黄大堤兴建石头庄溢洪堰,辟为临时滞洪区。1975 年 8 月淮河大水后,为落实防御特大洪水措施,废堰建闸,在濮阳渠村新建分洪闸,设计分洪流量 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$,滞洪区面积为 $2\,316\text{ km}^2$,围堤长 123.3 km ,有效滞洪水量为 20 亿 m^3 。当预报花园口站发生大于 $22\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的大洪水,采取其他措施难以解决时,启用北金堤滞洪区分洪。

3. 齐河和垦利展宽工程

山东省境内黄河的部分窄河段,在凌汛期间容易卡冰,形成冰塞或冰坝,致使上游水位急剧抬高,威胁堤防安全。为此,20 世纪 70 年代在济南上首的北岸齐河和河口地区南岸垦利修建了两处堤距展宽工程。两处展宽区的总面积达 229.3 km^2 ,围堤长 76.4 km ,有效库容为 5.0 亿 m^3 。该两处展宽工程的修建,对于保护济南市和河口地区胜利油田的安全具有重要意义。

经过 40 余年的努力,防洪工程的抗洪能力已有很大增强。历史上,每当洪水流量超过 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,黄河下游就要决口泛滥;流量 $6\,000\sim 10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时有一半年份要决口成灾。新中国成立以来,发生流量大于 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水 12 次, $6\,000\sim 10\,000\text{ m}^3/\text{s}$

的洪水 20 次,都没发生决口,充分反映了防洪建设的成效。

(五)防洪非工程措施建设

完整的防洪体系必须是工程措施和非工程措施的结合。非工程措施虽不改变洪水特征,不改变自然环境,但通过洪水预报、洪水调度系统和报警系统,分(滞)洪区的安全建设与管理等措施,可以减轻洪水灾害造成的损失,同时可把各工程措施有效地组合起来,充分发挥工程措施的效益。

新中国成立以来,连续取得 50 多年抵御伏秋大汛决口伟大胜利,除了依靠防洪工程体系外,人民防汛队伍也发挥了巨大威力,特别是对防洪工程体系还很不完善,堤防十分薄弱的 1949、1958 年大洪水,就是依靠广大军民奋力抢护,才一次又一次战胜洪水,保证了安全。“人防”在黄河下游有优良的传统和严密的组织,每年汛期,在黄河防汛总指挥部领导下,河南、山东两省及沿河各地(市)、县(区)均建立防汛指挥部,实行统一指挥和分级分段防守责任制,组建和培训了 10 000 余人的治黄专业队伍,同时每年还发动组织沿河群众组成 200 万人左右的人民防汛大军。人民解放军每年都积极参加黄河抗洪抢险,形成军民联防,成为战胜洪水的突击力量。

新中国成立后,水情站网得到了较快的发展,水情站由 1949 年的 11 处,经过逐年充实完善,增加到目前由 500 多处的雨量站、水文站和水位站组成的水情站网,其中三门峡至花园口区间的站网密度已基本满足防洪需要。传递水情的手段由电报、电话发展到三门峡至花园口区间的自动测报系统,并可自动译电、自动打印水情信息和绘制雨量图。

三门峡至花园口区间产生的洪水,对下游防洪威胁最大。20 世纪 80 年代初开始引进国外先进技术,建设包括 200 多个遥测站、4 个数据收集中心的实时遥测洪水预报系统,该系统已基本建成,这样可根据自动遥测的暴雨资料,直接预报出花园口的洪峰流量,以达到增长预见期的目的,为黄河下游防洪争取了主动。

新中国成立初期,黄河下游就开展了洪水预报工作。50 多年来有了很大的发展,由最初用简单的洪峰流量、水位相关进行下游部分干流站的短期洪峰预报,逐渐发展为河道洪水演算、水库调洪演算、流域降雨径流相关、产汇流计算、分散式流域水文模型等。同时,中长期径流预报和冰情预报也相继展开,并且结合洪水和冰情预报开展了降雨和气温预报,以增长预见期。近几年又配备了卫星云图接收设备、自动填图仪器,加强了天气预报。计算机技术已在各项预报中广泛应用,初步形成了一个具有黄河特色的水文预报系统。

为了适应防洪需要,黄河的通信建设也有很大发展,从有线到无线,逐步走向现代化。为吸取淮河 1975 年 8 月特大暴雨洪水时电讯遭到严重破坏,水情不能及时传递,防汛指挥失灵的教训,于 1976 年开始建设无线通信网,经过十余年的努力,目前上至三门峡,下到垦利已建立了包括郑州—三门峡、郑州—济南微波干线的覆盖黄河中下游重点防洪地区的无线通信网,加上原有的有线通信,形成了有线无线综合通信网。在历年的防汛、防凌斗争中对及时传递水情、工情,交流信息,指挥调度等方面发挥了重要作用。

二、黄河上、中游防洪建设

(一)黄河上游防洪建设

上游地区防洪是黄河防洪的组成部分。黄河在兰州以上,河道穿行于青藏高原和高