



维持黄河下游排洪输沙 基本功能的关键技术研究

姚文艺 等/著



科学出版社
www.sciencep.com

The background of the cover is a stylized, painterly illustration of a yellow river landscape. The river flows from the top left towards the bottom right, with a bridge visible in the distance. The colors are warm, dominated by shades of yellow and orange, creating a hazy, atmospheric effect.

维持黄河下游排洪输沙 基本功能的关键技术研究

姚文艺 李 勇 张原锋 胡春宏 张金良 著

科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是“十五”国家科技攻关计划重大项目“水安全保障技术研究”的课题“维持黄河下游排洪输沙基本功能的关键技术研究”成果集成,共分8章。研究成果主要包括:界定了黄河下游河槽排洪输沙基本功能的内涵,并提出了表征指标;析出了影响河槽排洪输沙基本功能的主导因子,建立了相应的判别指标;提出了洪水分类方法,建立了洪水过程与河床形态调整的响应关系;首次提出了泥沙量频率的概念,定量界定了水沙丰平枯组合类型;分析了洪水期河道冲淤平衡的分组泥沙来沙系数及其与淤积量之间的定量关系;提出了维持黄河下游河槽排洪输沙基本功能的水沙调控指标体系;基于三门峡、小浪底等水库对水沙的调节作用和入库水沙过程的初始条件,研究了黄河中游水库群水沙联合调度关键技术,生成了水库群水沙调控方案集。

本书体系科学,结构合理,资料丰富,注重理论分析与实践应用相结合,不少内容属于创新。本书可供从事泥沙、地理、生态与环境、水文、河流地貌等方面的科研工作者、高等院校师生、河流管理及治理的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

维持黄河下游排洪输沙基本功能的关键技术研究/姚文艺等著. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-018379-8

I. 维… II. 姚… III. ①黄河—下游河段—分洪—研究 ②黄河—下游河段—水力输沙—研究 IV. TV882.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第011331号

责任编辑:李 敏 张 震 李久进 / 责任校对:宋玲玲

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:中飞时代

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007年5月第一次印刷 印张:17 1/4 插页:2

印数:1—1 500 字数:406 000

定价:80.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

前 言

黄河下游河道排洪输沙功能的衰退是目前黄河治理所面临的严峻挑战。自 20 世纪 80 年代中期以后,由于来水来沙条件发生非协调性变异,黄河下游河道发生严重萎缩,中水河槽及主河槽(或称主槽)宽度缩窄,平滩流量下过水面积及过流能力下降,平滩流量减小,“小洪水高水位大漫滩”的水沙灾害频繁发生。研究表明,水沙过程是塑造河槽形态的重要动力因素,合理的水沙过程对于维持或塑造较大排洪输沙作用的河槽横断面形态具有重要的作用。因此,在黄河下游河道严重萎缩和水资源高度紧张的情况下,深入研究有利于塑造具有较高排洪输沙能力的河槽横断面形态的水沙过程,并利用黄河干流水库的水沙调控能力进行水沙调节,以此提高和维持黄河下游河槽的排洪输沙基本功能,是黄河治理及水资源合理开发利用中迫切需要解决的重大课题。对此,国家给予了高度关注,中华人民共和国科学技术部在“十五”国家科技攻关计划重大项目“水安全保障技术研究”(2004BA610A)中专门列出了“维持黄河下游排洪输沙基本功能的关键技术研究”(2004BA610A-03)的课题。自 2004 年 4 月起历时两年,黄河水利科学研究院、中国水利水电科学研究院、清华大学、华北水利水电学院等单位联合开展了攻关研究。本书即是对该课题研究成果的系统总结。

本研究以提出满足黄河下游河槽排洪输沙基本功能的水沙过程及相应的水量,形成水沙调控支撑技术方案作为攻关目标,主要研究内容包括通过黄河下游河道排洪输沙能力主导因子分析和排洪输沙基本功能的界定,建立排洪输沙基本功能的判别指标体系;根据不同水沙条件下河槽断面形态的调整分析,提出黄河下游不同水沙过程与河床形态调整的关系;依据排洪输沙功能判别指标体系及河床断面形态响应函数,结合排洪输沙功能恢复目标的方案分析,提出恢复和维持黄河下游河槽排洪输沙基本功能的水沙调控指标体系;基于上游来水来沙过程、下游调控指标体系和三门峡水库、小浪底水库基本运用模式的三维约束,并注重近期河槽排洪输沙能力的提高,提出水库群水沙调控技术方案。通过上述内容研究,提出水沙调控支撑技术方案,包括概化径流过程,以及含沙量过程、水沙过程历时和水沙搭配关系等技术指标。力求通过水沙调控技术方案实施,能够有效减少黄河下游河槽淤积、改善和维持河槽排洪输沙基本功能。

在研究过程中,紧密结合治黄生产实践,通过对黄河勘查,采用原型观测资料分析、理论研究、实体模型试验和数学模型计算等多种手段,经过潜心研究,取得了一些重要创新成果,提出了为维持黄河下游河槽排洪输沙基本功能的水沙调控指标体系及水库实施的水沙调控技术。

有关研究成果在 2004 年、2005 年黄河调水调沙方案制定等治理黄河实践中已得到应用,直接为利用小浪底水库调节合理的水沙过程、提高黄河下游河道排洪输沙能力,以及洪水调度和水资源综合规划等提供了重要的科学依据。减缓黄河下游河道淤积,维持河槽一定的排洪输沙基本功能将是一项长期的任务。因此,研究成果具有广阔的推广应

用前景。另外,本项研究以减缓河道淤积,维持河道排洪输沙能力,同时,兼顾减轻水库库区淤积为出发点,对水库水沙调控的关键技术进行攻关,在国内外均属于前沿性的课题。无疑,其研究成果对其他河流尤其是多泥沙河流的水沙调控及河道治理必将起到积极的科学指导作用。

课题组在黄河水利委员会国际合作与科技局的领导下,专门成立了常务咨询专家组。在研究的全过程中得到了陈效国、廖义伟、黄自强、胡一三、洪尚池、潘贤娣、翟家瑞、朱庆平、刘继详等教授的指导和帮助。另外,周文浩、陆中臣、赵业安、王德昌、王光谦等教授对本项研究也提出了很好的建议,其他还有不少专家都给予无私的帮助,对此,作者表示衷心感谢。本书研究成果是课题研究组全体人员团结协作、辛苦劳动的结晶,作者对参加研究的和为该项研究提供服务的所有人员表示真挚的感谢。参加本课题研究的人员包括:姚文艺、李勇、胡春宏、张金良、张原锋、苏运启、曲少军、张晓华、陈建国、余欣、王卫红、孙赞盈、戴清、吴保生、李永亮、魏军、郭庆超、胡健、尚红霞、梁志勇、董占地、张林忠、滕翔、赵咸裕、董年虎、刘大滨、李小平、黄金池、张治昊、韩巧兰、侯素珍、任伟、陈孝田、曹文洪、郑艳爽、孙东坡、袁玉萍、夏军强、季利、郜国明、杨明、周文浩、林秀芝、申冠卿、张建中、金鑫、王平、田玉青、汪峰、彭红、张青、侯志军、张敏、李昌治、张留柱、常晓辉、陈俊杰、张彦军、朱麦云、董其华、张川、周家胜、李萍、祁伟、万强、连惠君、黄鸿海、李军华、罗立群、陈书奎、马怀宝、赖瑞勋、王敏、张晓丽、陆琴、邓安军、杨益等。

虽然经课题组全体人员的共同努力,围绕攻关目标开展了深入研究工作,取得了不少突破性进展,但由于黄河问题的复杂性,一些问题仍有待进一步深入研究。

作者

2007年1月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的与意义	1
1.2 国内外研究进展	3
1.3 研究内容和攻关目标.....	12
1.4 技术关键点及技术路线.....	13
参考文献	16
第 2 章 模型设计原理及试验方案	18
2.1 泥沙数学模型原理及验证.....	18
2.2 实体动床模型设计及验证.....	35
2.3 实体模型试验方案设计.....	44
2.4 小结.....	50
参考文献	51
第 3 章 黄河下游河道横断面特征及洪水分类	52
3.1 黄河下游河道横断面特征.....	52
3.2 黄河下游河槽萎缩特征.....	57
3.3 黄河下游洪水分类.....	69
3.4 小结.....	78
参考文献	80
第 4 章 黄河下游河槽排洪输沙基本功能的内涵及判别指标	81
4.1 排洪输沙基本功能的内涵及表征指标.....	81
4.2 黄河下游河道排洪输沙基本功能的演化过程.....	85
4.3 排洪输沙功能因子分析.....	91
4.4 黄河下游河槽排洪输沙基本功能的判别指标	104
4.5 满足排洪输沙基本功能的未来径流和洪水条件分析	119
4.6 小结	125
参考文献.....	126
第 5 章 河槽横断面形态与水沙过程的响应关系	127
5.1 河槽横断面形态与汛期径流泥沙的响应关系	127
5.2 横断面形态与洪水的响应关系	132
5.3 有利于塑造河槽的洪水过程特征分析	151
5.4 小结	160
参考文献.....	163

第 6 章 黄河下游水沙调控指标体系	164
6.1 黄河泥沙量频率分析及水沙系列类型划分	164
6.2 水沙系列设计	178
6.3 水沙调控方案设计	180
6.4 数学模型方案计算结果及合理性分析	188
6.5 维持黄河下游主槽排洪输沙基本功能的水沙调控指标体系	206
6.6 小结	210
参考文献.....	211
第 7 章 水库水沙调控关键技术研究及应用	213
7.1 黄河中游水库群概况	213
7.2 三门峡水库对洪水水沙的调节作用	217
7.3 小浪底水库对洪水水沙的调节作用	226
7.4 黄河中游水库群联合调控水沙关键技术研究	235
7.5 黄河中游水库群水沙调控方案	241
7.6 水沙调控关键技术应用研究	247
7.7 小结	261
参考文献.....	263
第 8 章 结论与建议	264
8.1 主要成果	264
8.2 主要结论	265
8.3 几点建议	268
8.4 研究成果的应用前景展望	269

第1章 绪 论

1.1 研究目的与意义

黄河系多泥沙河流,其河流生命不仅表现于一般河流所具有的供水、生态、环境等项功能,而且还具有一定的排洪、输沙基本功能。自20世纪80年代中期以后,由于来水来沙条件发生非协调性变异,黄河下游河道发生严重萎缩,中水河槽及主河槽(或称主槽)宽度缩窄,过水面积减小及过流能力下降,排洪输沙功能大大降低,致使“小洪水高水位大漫滩”的水沙灾害频繁发生。同时,还引起了水质恶化、河口湿地减少等一系列的生态问题。

从防洪安全的角度讲,黄河下游河道排洪输沙功能降低所引起的问题主要表现在两个方面:一是“二级悬河”形势加剧;二是“小水大灾”现象突出。

(1) “二级悬河”加剧,防洪压力不断增大。黄河下游河段为著名的地上悬河,现行河床一般高出背河地面4~6m,最高达10m以上。因河道边界条件及水沙条件的共同影响,黄河下游河槽与滩地水沙交换作用不断减弱,致使河槽淤积速度大于滩地,黄河下游大部分河段逐步形成了“槽高、滩低、堤根洼”即“二级悬河”的局面,而且近年来不断加剧。例如,京广铁路桥至东坝头河段左岸滩地平均横比降达到3.33‰;东坝头至高村河段左岸滩地平均横比降达到5.15‰,右岸的达到5.84‰,是其平均纵比降的2倍多;陶城铺以下河段左岸滩面平均横比降达到27.81‰^[1]。“二级悬河”的存在,极易造成顺堤行洪,尤其在洪水漫滩时,较大的横比降易使洪水对大堤形成直接冲击,甚至造成大堤的冲决,给黄河下游的防洪安全造成严重的威胁。

(2) 主槽排洪能力降低,“小水大灾”威胁严重。由于河槽的淤积萎缩,黄河下游河道排洪能力大大降低,到2002年,平滩流量已由20世纪80年代的5 000~7 000m³/s减少为不足3 000m³/s。与此同时,同流量水位抬升,如2002年花园口站流量3 000m³/s水位较1986年同流量水位抬升1.2m;1996年8月黄河下游花园口站洪峰流量为7 600m³/s的洪水水位比1958年流量为22 300m³/s洪水相应的水位还高0.91m;在西河口以上553km的山东黄河河道中,达历史最高水位的河道长度约293km,占总河段长度的52.98%。由此,造成了“小洪水、高水位、大漫滩、大灾害”的不利局面,约百万人受灾、300万亩(1亩≈667m²)耕地被淹,滩区直接经济损失达到43.59亿元^[2]。小浪底水库投入运用后,花园口站百年一遇洪峰流量仍可达到15 700m³/s,若黄河下游目前的河道形态不能得到改善,甚至继续恶化,一旦遇此流量级洪水甚至中小洪水都有可能给两岸造成较大的灾害,如2002年7月,小浪底水库的原型调水调沙试验中,高村附近河段在流量不足2 000m³/s时就开始漫滩。可见,在目前的河槽状况下,黄河下游中小洪水致灾的威胁已非常严重。

因此,河槽排洪输沙基本功能的衰退,是目前黄河下游治理面临的严峻挑战。根据河

流动力学原理,对于某一冲积性河流而言,其排洪输沙能力的大小在很大程度上主要取决于河道的横断面形态。而黄河河道淤积的主要原因正在于水少沙多、水沙搭配关系不合理。水沙过程是塑造河槽横断面形态的重要动力条件,合理的水沙过程对于维持或塑造较大排洪输沙能力的河槽横断面形态具有重要的作用。因而,如何通过人工调控的手段形成合理的水沙过程,塑造或维持具有一定排洪输沙功能的河道横断面形态,是黄河治理迫切需要解决的重大科学技术问题。

对于黄河这类水资源极为匮乏且水流含沙量高的河流,利用有限的水资源,通过人工方式调控水沙过程,改变不合理的水沙搭配关系,塑造能够满足一定排洪输沙基本功能的河槽显得更为必要。黄河多年平均天然年径流量为 580 亿 m^3 ,仅占全国的 2%。随着流域经济社会的发展,人类用水不断增加,特别是近期,在黄河流域实际产流量只有 350 亿 m^3 的情况下,工农业耗用径流量已达 300 亿 m^3 左右,水资源开发利用程度超过 80%,大大超过了国际公认的流域水资源合理开采度 40% 的临界值。根据 1987 年国务院批准的黄河水量分配方案,曾预留 210 亿 m^3 水量用于输沙和维持生态环境等方面,而实际上,目前黄河下游河道的输沙用水量已经难以得到保证。因此,在如此严峻的水危机形势下,仅靠单一增加下泄水量改变河道萎缩状况的方式已不可能。显然,研究通过水库合理调节径流泥沙过程,用有限的水量,改善河槽横断面形态,提高和维持黄河下游河槽的排洪输沙基本功能的关键技术,是黄河治理及水资源开发利用的重大需求,也是一项重大的挑战性课题。实际上,小浪底水库建成后开展的原型调水调沙实践证明,利用小浪底水库改变不合理的水沙搭配关系,是治理河槽萎缩的有效途径之一。小浪底水库的建成,已经为改变黄河不利的水沙过程提供了有利的条件。

因而,将缓解黄河下游河槽功能衰退的问题列入国家科技攻关计划加以研究是很有必要的。开展此项研究就在于通过揭示黄河下游河槽排洪输沙功能对河槽形态的响应关系和水沙过程对河槽形态的塑造作用,研究恢复河槽排洪输沙基本功能的水沙调控指标,从而利用小浪底等水库调节合理的水沙过程,提高黄河下游河道排洪输沙能力、减轻防洪压力及改善生态环境等。

另外,通过本项研究对于推动河流学的发展也必将具有重要的意义。河流是流域系统中具有复杂响应性质的能量和物质输移的通道。这一通道输移径流泥沙的能力往往不仅与其空间尺度有关,而且与其几何形态也有着密切关系。也就是说,对一定尺度的河道,所具有的排洪输沙能力与断面形态之间将有着某种非线性的高阶响应关系。而包括断面形态调整内容在内的河道演变不仅决定于河道边界条件(河道物质组成、整治工程等),还取决于进入河道中的水沙条件及其在河道中运行的过程;不仅与流域的自然属性有关,而且还与人类活动的干扰程度有关。实际上,河道的演变是河流能耗过程的一种客观表现。因此,流域的自然属性决定了河道的一般演变特性,而人类活动对进入河道能量过程的干扰和调节,则既可以加速或减缓其某种自然演变过程的发展,又可附加给河道新的演变过程或变迁特性。总之,河道演变是一种极为复杂的流域复合系统的调整过程。尤其对于黄河下游河道,其演变对流域能量的输入变化及人类活动的干扰具有极其复杂的响应关系,表现出特有的规律性。近年来,黄河下游河道出现的萎缩过程及其所引发的“小水大灾”等现象正是对水沙输入改变的一种响应。因而,从调控水沙过程的角度探索塑造合适的断面形

态,进而改善下游河道的萎缩状况,也正是本项研究的学科目的所在。以往,关于黄河下游河槽排洪输沙功能的概念和含义研究较少,多是定性论述;对河槽形态的研究多是从河型的角度出发,将其作为河型划分的指标之一,并用于分析河道整治工程、大型水库运用等对河道塑造作用的依据,而从水沙调控的角度出发,研究横断面形态与水沙过程的响应关系还不多;从塑造有利的横断面形态,恢复和维持河槽排洪输沙基本功能的角度对水沙调控指标体系及其调控技术等更缺乏研究。因此,研究水沙过程与横断面形态调整之间的响应关系,认识河槽排洪输沙基本功能的制约因素和主导因子,提出维持黄河下游河槽排洪输沙基本功能的关键技术,对于进一步探索黄河下游河道演变规律,认识河流系统对水沙过程的适应关系等有着重要意义,必将进一步丰富河床演变学、泥沙工程学的研究内容。水利部开展的水利科技发展战略研究将黄河下游水沙调控技术研究列为了未来黄河治理的主要科学问题,并把小浪底、三门峡、陆浑、故县四库水沙联合调控运用方式的研究作为黄河防洪减淤体系建设中的重点科学课题。我国在中长期科学和技术发展规划纲要制定中,把黄河综合治理的科学技术列为未来15年重点优先研究主题。显然,开展维持黄河下游河槽排洪输沙基本功能关键技术研究也是我国水利科技发展的需求,具有很大的科学意义。

1.2 国内外研究进展

开展维持黄河下游河槽排洪输沙基本功能的关键技术研究涉及河道输沙特性、河道横断面形态调整、大型水利工程对下游河道演变影响及水库调控技术等多项内容。了解相关内容的国内外研究进展,将有助于对研究目标的理解和探索。

1.2.1 关于黄河河道输沙特性的研究

冲积河流的输沙特性不仅与河道的边界条件有关,而且还与上游水沙条件有关。河流的来水提供了塑造河床和输送泥沙的能量,而在一定的河床边界条件下,一定的流量形成一定的水力学特性。因此,流量及其过程是影响河流输沙的主要动力因素。麦乔威等^[3]曾根据三门峡水库下泄清水或来水较清(含沙量一般小于 $10\text{kg}/\text{m}^3$)的实测资料分析认为,黄河下游的流量与悬移质泥沙输沙率存在如下关系

$$G_s = AQ^n \quad (1-1)$$

式中: G_s 为悬移质泥沙输沙率(t/s); Q 为流量(m^3/s); n 为指数,接近于2.0; A 为与河床边界条件有关的系数。

F. B. Campbell 和 H. A. Bauder 早在1949年就根据美国河流的实测资料,得出过类似于公式(1-1)的关系,用以确定河流的输沙率^[4]。1974年 Janos Bogardi^[5]曾指出,天然河流的特性,如水流状况和输沙状况,除了受到水力学因素的影响外,还受到水文因素的影响。这些水文因素首先影响流域的产沙;而在泥沙进入河流后,它还影响泥沙在河道内的输移过程。在泥沙比较少的河流上,许多研究成果已经证实式(1-1)形式的关系是存在的。但是,对于多泥沙的冲积河流来说,在来水来沙条件发生变化时,河床的冲淤变幅很大。而且,即使来水条件并未改变,而来沙条件发生变化时,河床也将迅速地进行大幅度调

整,从而对河道输沙带来不同的影响。麦乔威等^[6]的进一步研究认为,黄河下游河道的输沙特性随来水来沙条件的不同而异,河流输沙率不仅是流量的函数,还与来水含沙量有关,具有“多来多淤多排、少来少淤少排”的特性,可由下述公式描述为

$$Q_s = KQ^a S_{\perp}^b \quad (1-2)$$

式中: Q_s 为悬移质泥沙床沙质输沙率(t/s); Q 为流量(m^3/s); $S_{\perp}$ 为上站来水含沙量(kg/m^3); K 为系数,与河床前期冲淤状况有关; a 、 b 是指数,与河床边界条件及来沙颗粒组成有关。 a 值一般为 1.1~1.3,且沿程逐渐减小; b 值一般为 0.70~0.98,变幅较大,并且沿程增大。 b 值可由游荡性河段的 0.70~0.80 增至弯曲性河段的 0.98,说明窄深河槽更有利于泥沙的输送。近期,根据姚文艺等^[7]的研究,在河道发生萎缩情况下,河槽输沙仍具有“多来多淤多排”的特性。由式(1-2)可以看出,在一定的河床边界条件下,为了加大河流的输沙率,既要人为地进行流量的调节,同时还要进行泥沙的调节,这是多泥沙河流与少泥沙或清水河流的不同点之一。

齐璞等^[8]进一步分析式(1-2)中指数 a 和 b 与河床边界条件的关系得出

$$a = 0.356 \lg J + 1.13 \quad (1-3)$$

$$b = -0.256 \lg \frac{\sqrt{B}}{H} + 1.18 \quad (1-4)$$

式中: J 为河床纵比降(‰); B 和 H 分别为河槽宽度(m)和深度(m)。

费祥俊^[9]于 1996 年的研究表明,式(1-2)不适用于高含沙水流。费祥俊^[10]认为,天然高含沙水流一般处于强烈的紊动状态,可以不考虑絮网结构的影响,其流变特性的变化主要体现在刚度系数 η_m 上,刚度系数的增大,致使单颗粒泥沙沉速显著降低,并提出了 η_m 具体的计算公式

$$\eta_m = (1 - K \frac{S_v}{S_{vm}})^{-2.5} \eta_0 \quad (1-5)$$

其中

$$K = 1 + 2(1 - \frac{S_v}{S_{vm}})^4 (\frac{S_v}{S_{vm}})^{0.3}$$

$$S_{vm} = 0.92 - 0.2 \lg (\sum P_i / d_i)$$

$$\eta_0 = \gamma_0 \nu_0$$

$$\nu_0 = \frac{0.000\ 001\ 775}{1 + 0.033\ 7t + 0.000\ 221t^2}$$

式中: η_0 、 η_m 分别为黏滞系数和浑水刚度系数 [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]; ν_0 为清水运动黏滞系数, (m^2/s); S_v 、 S_{vm} 为体积含沙量和浑水极限体积含沙量 (kg/m^3); K 为系数; P_i 为粒径 d_i (mm) 所对应的沙量占全沙的比例; t 为液体温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

曹如轩等^[11]在对沉速进行黏性及体积含沙量两次修正的基础上,仍沿用武汉水利电力学院挟沙能力公式基本形式,求得适合于黄河高含沙水流的挟沙力公式为

$$S_{*m} = 0.385 \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \frac{V^3}{g R \omega_{ms}} \quad (1-6)$$

式中: S_{*m} 为全沙挟沙力; γ_m 为浑水容重; γ_s 为泥沙容重; R 为水力半径; V 为流速; g 为重

力加速度; ω_{ms} 为考虑黏性和体积两次修正后的泥沙沉速。

舒安平研究认为, 悬浮泥沙消耗的能量来自水流动能, 根据水槽试验资料进行回归分析后得出如下可用于黄河的水流挟沙力公式为

$$S_{V*} = 0.355 \sum P_i \left[\frac{\lg(\mu_r + 0.1)}{\kappa^2} \left(\frac{f_m}{8} \right)^{3/2} \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \frac{V^3}{gR\omega} \right]^{0.72} \quad (1-7)$$

式中: P_i 为第 i 组泥沙的沙重百分数; κ 为卡门常数; f_m 为浑水阻力系数; γ_m 为浑水容重; γ_s 为泥沙容重; R 为水力半径; V 为流速; S_{V*} 为体积比水流挟沙力。上式除浑水容重 γ_m 与泥沙沉速 ω 和水流含沙量 S 有关外, 浑水黏滞系数 μ_r 也是含沙量 S 的函数。

张红武等^[12]的研究成果中也以不同的方式反映了水流含沙量对输沙特性的影响, 例如所提出的水流挟沙力公式为

$$S_* = 2.5 \left[\frac{(0.0022 + S_V)V^3}{\kappa \frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma_m} gh\omega_s} \ln \left(\frac{h}{6D_{50}} \right) \right]^{0.62} \quad (1-8)$$

式中: γ_s 为泥沙容重; ω_s 为泥沙群体沉速; S_V 为体积比含沙量; D_{50} 为床沙中值粒径; h 为断面平均水深; V 为流速; γ_m 为浑水容重; κ 为卡门常数; 其他符号同上。式中单位采用 kg、m、s 制。

黄河下游河道在不同水沙条件下, 其纵比降会发生相应调整, 纵比降的调整反过来又会影响水流输沙能力。有人分析认为^[13], 比降的变化对输沙的影响不大, 相对其他因素来说, 影响的比例仅为 8%~12%。

大量的研究表明, 黄河下游河道输沙的另一个重要特征是输沙能力调整十分迅速, 且低含沙水流与高含沙水流的输沙能力不同。低含沙水流的水流挟沙能力主要通过床沙粗化、细化, 横断面变化及纵比降变化进行自动调整, 以适应来水来沙条件的变化, 而其中床沙调整往往最为灵敏迅速。对于高含沙水流, 由于其自身挟带的造床物质非常丰富, 水流挟沙力的调整突出地表现在河槽横断面形态的调整, 即通过淤积使断面变得窄深, 加大输沙能力。黄河下游高含沙洪水通过宽浅河槽时, 使断面淤积缩窄的大量事实也充分说明了这一点。

齐璞等^[14]通过资料分析认为, 黄河下游宽河段不同含沙量级洪水输沙能力与断面形态也有关, 随着断面形态趋于窄深, 洪水输沙能力在低含沙量时可以增大 3 倍, 在高含沙时可以增大 1.5 倍。

黄河下游河道水沙条件变化较大, 使得河道冲淤演变十分剧烈。20 世纪 50 年代以来黄河下游河道经历了“淤积—冲刷—淤积—冲刷—淤积”的冲淤交替的变化过程, 具有特殊的冲淤演变特性。大量研究认为, 黄河下游河道淤积主要发生在洪峰期, 例如, 漫滩洪水洪峰期的冲淤强度与来水来沙的经验关系可表达为^[15]

$$\Delta G_s = 137Q^2 \left[\frac{S}{Q} - 0.33 \left(\frac{S}{Q} \right)^{0.75} \right] \quad (1-9)$$

式中: ΔG_s 为洪峰日平均冲淤量 (t/d); $\frac{S}{Q}$ 为来沙系数 ($\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$); S 为含沙量 (kg/m^3); Q 为洪峰平均流量 (m^3/s)。就平均情况看, 当来沙系数大于 $0.015 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 时, 滩槽均淤; 当来沙系数较小时, 滩淤槽冲。

黄河下游洪峰期单位水量的冲淤量与洪峰期平均含沙量具有较好的相关关系,即

$$\Delta W_s = KS - S_c \quad (1-10)$$

式中: ΔW_s 为洪峰期单位水量的冲淤量; S 为洪峰期平均含沙量; K 为系数; S_c 为常数,其物理意义基本相当于进口断面为清水时,出口断面可达到的平均含沙量。

就长期时段平均情况看,全下游河道冲淤基本平衡时的洪峰平均含沙量约为 50kg/m^3 。汛期(7~10 月份)单位水量的冲淤量与平均含沙量也具有较好的线性关系,其函数关系的形式与式(1-10)相似,只是就汛期平均而言,下游河道冲淤平衡的临界含沙量为 $25\sim 30\text{kg/m}^3$ 。进一步分析龙羊峡水库投入运用以后历年实测资料认为,汛期水量减少,枯水期历时增长,水流输沙能力降低,维持下游河道冲淤基本平衡的临界含沙量已减少到 20kg/m^3 左右。

张瑞瑾^[16]的研究认为,单宽河床和单位时间中水流的输沙能力(包括推移质及悬移质)大约与垂线上的平均流速的 4 次方成正比。因而可以设想,在比较稳定的次饱和的中水水流作用下,只要槽线的雏形一经在平衍的河床中出现,则槽内的冲刷强度便将较槽外滩面上的冲刷强度大几倍乃至十倍以上。而且,前者超过后者的数倍,将随着河槽的加深而加大。因此,只要平衍的床面上一经出现槽线的雏形,则中水河槽的形成将是加速度的。由此也可推论得知,通过调控较为合理的水沙过程,对现已萎缩的河槽再塑造并加以维持是完全可能的,这就从此方面为本研究提供了理论依据。

在三门峡水库蓄清排浑运用以后,黄河下游河道在年内冲淤交替,而在年际间总体上处于淤积状态。其中,非汛期下游冲淤量与非汛期水量呈正比,但艾山以下窄河段非汛期是淤积的,其淤积量与全下游冲淤量呈明显的增函数关系。非汛期三门峡水库下泄水量增大,下游冲刷增多,但冲刷集中在艾山以上河段。

1.2.2 关于河道横断面形态调整关系的研究

河道横断面形态常用作河型的判数,是划分河型的一个重要水力参数。陆中臣等^[17]认为,对于一定的河型,横断面河相系数($\sqrt{B}/H$,式中 B 为平滩河宽, H 为相应的断面平均水深)存在着地貌临界,如根据渭河下游河道的资料分析,分汊型河道 $\sqrt{B}/H \geq 10\text{m}^{1/2}/\text{m}$,弯曲型 $\sqrt{B}/H \leq 10\text{m}^{1/2}/\text{m}$ 。根据黄河下游河道的资料分析^[13],黄河下游艾山以下微弯型河段主槽平均宽度 $400\sim 600\text{m}$,平均水深 $3\sim 5\text{m}$,河相系数($\sqrt{B}/H$)一般为 $4\sim 5\text{m}^{1/2}/\text{m}$;而高村以上游荡型河段,河相系数($\sqrt{B}/H$)在 $30\text{m}^{1/2}/\text{m}$ 以上。但是,尹学良等曾认为,用 $\sqrt{B}/H$ 表达横断面形态判断断面变化性质是不合理的。

关于河道横断面形态的问题国内外都有不少人开展过研究,如近年 Dietrich^[18]、Thorne 等^[19]曾针对美国的 Muddy Creek 和 Fall River 河流观测河段的床面形态进行过野外观测和定性分析。王平义等^[20]专门就弯曲河道的断面形态规律进行过研究。

一些研究表明,河床的边界条件对河床横断面形态有着很大的制约作用。若河床物质以粗沙与细沙为主,粉沙-黏土含量少,且河床比降大,则河床抗冲性小,其形态变化最明显。当河床比降变小,粉沙-黏土含量增加,抗冲性亦增大,河床形态调整的幅度就小。陆中臣等^[17]选择河床中粉沙-黏土含量百分数($M\%$)和河床比降($J_{\text{‰}}$)作为边界因子,定量分

析黄河下游清水冲刷阶段河床形态的变化得到的回归方程为

$$\frac{\sqrt{B}}{H} = -21.59 - 0.11M + 25.58J \quad (1-11)$$

林承坤也曾根据河床边界土层或岩性的组成与结构、河床的地形类型及其河床与河底相对可动性来定性划分不同河型。尤联元等^[21]统计了我国一些冲积河流的边界条件及其他因素对河型形成的影响认为,河底相对于河岸的相对可动性对河床的稳定性具有较大影响,并认为河底的可动性与河床床沙中值粒径成反比,河岸的可动性则与河岸中粉沙-黏土含量成反比,河床的稳定性指标与中值粒径的关系可表示为

$$\pi = \frac{100D}{M_w} \quad (1-12)$$

式中: π 为河岸与河床相对可动性指标; D 为床沙中值粒径(mm); M_w 为河岸中粉沙-黏土含量(%)。 π 大于0.65为游荡性河型, π 小于0.25为顺直型或弯曲线,介于两者之间为分汉性河型。黄河下游花园口河段为细沙河床, π 值为0.96,属典型的游荡性河道。黄河洛口河段河岸黏土含量增多, π 值为0.42,当属过渡型河段,与实际河型有所出入。

对于主槽和滩地的物质均由水流本身所挟带的泥沙组成的冲积性河流来说,其河床演变的一个主要特点是随来水来沙的变化不断地进行调整。调整的最终目的是力求使河床的输水、输沙能力与来水来沙相适应,达到相对的平衡状态。早在1949年J. H. Mackin^[22]就指出,这种河流的比降及河床特性,可以在若干年代里进行细致的调整,以便在一定的流量下,使其流速足以输送流域的来沙。事实上,冲积性河床调整的平衡趋向性,不仅反映在纵向形态方面,而且也反映在横向形态方面。根据梁志勇等^[23]的研究,河道断面宽深比与来水过程的几何平均流量的某一次方成正比,与流量过程的变化幅度成正比。

惠遇甲等^[24]通过对小浪底水库运用50年内不同水沙条件下下游游荡性河道横断面形态和河相关系的研究认为,对于高村断面,小浪底水库运用各时期 $\sqrt{B}/H$ 和 Q 都具有良好的相关关系。流量在 $1\,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上时, $\sqrt{B}/H$ 值多在 $15\text{m}^{1/2}/\text{m}$ 以下,流量越大, $\sqrt{B}/H$ 值越趋近于 $10\text{m}^{1/2}/\text{m}$,反映出该断面的河相关系强烈地受着两岸边界的约束。此时 $\sqrt{B}/H$ 主要与流量有关,而较少受水流含沙量的影响。在小浪底水库拦沙运用期,当 $Q < 2\,500\text{m}^3/\text{s}$ 时,花园口断面 $\sqrt{B}/H$ 值多小于 $30\text{m}^{1/2}/\text{m}$, $Q > 2\,500\text{m}^3/\text{s}$ 时, $\sqrt{B}/H$ 值多为 $30 \sim 45\text{m}^{1/2}/\text{m}$;在蓄清排浑运用期, $\sqrt{B}/H$ 值约为 $18 \sim 150\text{m}^{1/2}/\text{m}$,即蓄清排浑运用后期的水沙条件更容易造成水流漫滩,形成宽浅断面。进一步研究发现,花园口断面 $\sqrt{B}/H$ 与含沙量 S 的关系比与流量 Q 具有更好的相关关系, $\sqrt{B}/H$ 随含沙量 S 的增加而增大,表明在游荡性河段,强烈地与含沙量相关。钱宁、麦乔威曾研究认为^[25],对于黄河下游游荡性河段,当来沙量小,河床发生冲刷时,主槽横断面形态趋于窄深,滩槽高差加大;相反的,如来沙量大,河床发生堆积,则主槽横断面趋于宽浅,滩槽高差减小。从1986年以来黄河下游河床调整结果看,因黄河下游长期枯水少沙,高含沙洪水较多,下游游荡性河道横断面调整十分剧烈^[26],平滩下主槽过水面积由1986年以前的 $2\,500\text{m}^2$ 减少到1997年的 $1\,400\text{m}^2$,相应主槽宽度由 $1\,200 \sim 1\,600\text{m}$ 减小到 $700 \sim 900\text{m}$ 。

对于达到相对平衡状态下的河床横断面形态,通常用流量的指数关系^[27]来描述

$$B = K_1 Q_n^{\alpha_1} \quad (1-13)$$

$$h = K_2 Q_n^{\alpha_2} \quad (1-14)$$

$$V = K_3 Q_n^{\alpha_3} \quad (1-15)$$

式中: Q_n 为造床流量; B 、 h 、 V 为处于准平衡状态的天然河流的河宽、水深和流速; K_1 、 K_2 、 K_3 和 α_1 、 α_2 、 α_3 分别为河宽、水深和流速的系数和指数。在一般情况下, 断面水力几何形态关系的指数可分别取 0.14、0.43、0.43。黄河下游弯曲性河道在弯道段 α_1 约为 0.16, α_2 为 0.30; 在浅滩段 α_1 约为 0.28, α_2 约为 0.18^[28]。

缺乏比较稳定的相对平衡的中水河槽是游荡性河段最突出的特点。根据张瑞瑾^[16]的分析, 不利于形成游荡性河段相对稳定的中水河槽的因素很多, 但主要有 3 个: 一是现有的中水需漫流于宽达 1 000~3 000m 的平衍的河床上, 暂时无槽可归。二是对于宽达 1 000~3 000m 的河槽来说, 两侧滩地的可动性极大, 在缺乏人工防护的河段, 只要接触大溜, 侧蚀在所难免。三是在上游一些大的支流未被控制以前, 存在着对形成中的中水河槽的破坏性威胁。尤其是在高含沙洪水期间, 黄河下游河床横断面形态经常发生突变, 一场高含沙洪水过后, 主槽宽度可由 2 000~3 000m 缩窄到 700~800m^[14]。涂启华等分析了黄河下游高村以上游荡性河段水文站的实测资料后认为, 含沙量的增大将使河宽明显减小, 而水深和流速则随之增大, 并将河相关系表示为

$$B = K_1 Q^{\alpha_1} S^{\beta_1} \quad (1-16)$$

其中, $K_1 = 50 \sim 18.5$, $\alpha_1 = 0.51$, $\beta_1 = -0.34 \sim -0.61$ 。

$$H = K_2 Q^{\alpha_2} S^{\beta_2} \quad (1-17)$$

其中, $K_2 = 0.066 \sim 0.410$, $\alpha_2 = 0.185$, $\beta_2 = -0.10 \sim -0.44$ 。

$$V = K_3 Q^{\alpha_3} S^{\beta_3} \quad (1-18)$$

其中, $K_3 = 0.082 \sim 0.110$, $\alpha_3 = 0.305$, $\beta_3 = -0.13 \sim -0.24$ 。

式中: S 为水流含沙量 (kg/m^3); Q 为流量 (m^3/s); B 、 H 、 V 分别为断面平均河宽 (m)、水深 (m) 和流速 (m/s); K_1 、 K_2 、 K_3 、 α_1 、 α_2 、 α_3 和 β_1 、 β_2 、 β_3 分别为相应系数和指数。

王国宾、于为信等通过在大型水槽中对河床形态的变化规律进行试验研究, 给出了河槽水面宽、平均水深与流量及含沙量的关系。研究表明, 随着含沙量增大, 河宽呈明显的减小趋势, 即

$$B = 0.215 Q^{0.5} S^{-0.12} \quad (1-19)$$

$$H = 0.024 2 Q^{0.33} S^{-0.08} \quad (1-20)$$

式中: S 为水流含沙量。大量实测资料分析和试验研究认为, 黄河下游河道纵横断面的调整与水沙条件关系极为密切, 在迅速变化的来水来沙条件下, 下游河床的调整响应十分灵敏和强烈; 黄河下游游荡性河段的河型变异, 只是一定条件的洪水在短期内剧烈地对河床再塑造的结果, 但洪峰过后的河型恢复则是一个缓慢的过程。

费祥俊等^[29]于 1997 年进一步研究了横断面调整对排洪输沙能力的影响问题。研究认为, 多泥沙河流输沙能力的变化, 突出地表现为河槽横断面的调整。黄河下游高含沙洪水过后, 使游荡性河段河槽宽深比大幅度减小, 从而提高了同流量的输沙能力, 但因此使排洪能力大幅度下降。频繁出现的高含沙洪水水位异常高的现象证明, 断面缩窄将比前期

河床淤高对洪水水位的影响更大。这一认识,对于开展维持黄河下游河槽排洪输沙基本功能的研究是很有意义的。

1.2.3 大型水库运用对河道冲淤影响研究

由于水库对水沙过程及组合具有较强的调节作用,因而修建水库后,对河流下游来说,将随来水来沙条件的改变使河床边界作相应的调整。河床调整的最终状态趋之与新的水沙条件相适应,这也正是水库修建后下游河床再造床过程的实质。因而,水库调节出什么样的水沙过程,将会对应塑造出什么样的断面形态,这也就是力求利用水库调控水沙过程,塑造有利于排洪输沙的河道形态的理论依据。相反,不合理地对水沙加以控制和调节,将会对下游河道产生不利调整作用,带来许多新情况和新问题。如美国 Grand 河流修建水库后,大大改变了径流的时间分配,从而使得原本冲淤平衡的河段失去平衡,部分河段发生强烈冲刷,直接危及两岸的安全。许炯心^[30]在研究汉江丹江口水库下游河床调整过程中的复杂响应时指出:丹江口水库 1958 年兴建后,首先清水下泄,下游水流含沙量剧减,流量调平,下泄的细颗粒泥沙缺乏,故形成一些边滩,不仅高低滩较前为小,且其粉沙-黏土含量也逐渐减少,因而边滩抗冲性逐渐减弱。钱宁、麦乔威^[25]曾认为,多泥沙河流修建水库后河道断面调整过程是比较复杂的,水库下泄清水后,一方面水流为满足河相关系,断面将向窄深方向发展,另一方面由于主流摆动或坐弯以后所引起的滩地损失,又使河面有展宽的可能。断面的下切或展宽主要决定于这种力量对比消长的结果。在冲刷河段,中枯流量下应以下切为主,断面形态趋于窄深;若遇大洪水,侧蚀为主,主槽摆动加强,断面将迅速展宽。在过渡及堆积河段,冲泻质的减少将使河床在各种水流过程下都可能展宽。

黄河上游修建龙羊峡、刘家峡水库(简称龙刘水库,下同)后,因调节径流,加之下游大量引水,使得下游干流河床演变向不利于排洪输沙的方向发展,如历史上长期处于微淤状态的宁夏至内蒙古河段在龙羊峡水库运用后转为逐年淤积^[31]。赵业安等^[32]采用黄河水利科学研究院水文数学模型计算表明,龙羊峡水库蓄水运用期间的 1986 年 11 月至 1993 年 10 月间年均汛期蓄水 54.9 亿 m^3 ,非汛期泄水 30.2 亿 m^3 ,年均增加黄河小北干流河段淤积量 0.21 亿 t,约占实测淤积量的 25%;初期蓄水的前三年(1986 年 11 月至 1989 年 10 月)年均增加淤积量达 0.41 亿 t。龙羊峡、刘家峡两库汛期蓄水致使下游河道大流量出现机遇减少,同时,增加了三门峡水库“蓄清排浑”运用的难度,库区无法维持年内冲淤基本平衡,且库区累积性淤积又造成潼关高程持续上升。水文数学模型计算表明,龙羊峡水库蓄水运用以来年均增加潼关至三门峡河段淤积量 0.38 亿 t。计算时段内三门峡水库坝前实际运用水位较低,如果没有龙刘水库调节,本河段不仅不发生淤积,而且可以冲刷泥沙约 1.0 亿 t。龙羊峡、刘家峡两库调节径流对河道冲淤的影响更主要地集中在下游,龙羊峡水库蓄水运用以来年均汛期增加下游河道淤积 0.7 亿 t,占实测淤积量的 27%。研究进一步指出,两库蓄水所增加的下游河道淤积主要集中在主槽范围内。并且由于洪峰流量削减,不能发挥大水冲刷艾山以下河道的作用,对艾山以下河道十分不利。而非汛期发生冲刷时,又因水量较小,冲刷又不能遍及全下游,致使汛期和非汛期艾山以下窄河段均增加淤积,龙羊峡水库运用以来年均增淤达 0.30 亿 t,约占下游增淤量的 50%。

三门峡水库从 1973 年 11 月“蓄清排浑”运用至 1990 年期间,虽然平均每年减少下游河道淤积 0.2 亿~0.3 亿 t,但减少的是高村以上河段滩地的淤积量,主槽淤积量并没有减少,艾山以下河道的淤积还略有加重^[32]。三门峡水库蓄清排浑运用对黄河下游河道的冲淤影响与入库水沙条件极为密切,1973 年 11 月至 1985 年 10 月进入水库的流量变幅较大,流量大于 $6\,000\text{m}^3/\text{s}$ 时滞洪拦沙,流量小于 $1\,500\text{m}^3/\text{s}$ 时蓄水拦沙,泥沙主要集中在 $2\,000\sim 6\,000\text{m}^3/\text{s}$ 流量级排出,对下游河道输沙有利。1986 年以后,受各种因素的影响,流量变幅较小,很少出现大于 $6\,000\text{m}^3/\text{s}$ 的入库流量,泥沙主要集中在 $1\,500\sim 3\,500\text{m}^3/\text{s}$ 时排出,对下游输沙非常不利,因此下游河道年均增淤 0.171 亿 t。

关于三门峡水库运用对下游河道冲淤影响的研究成果很多,如参考文献^[33~37]。这些成果对于认识不同调控水沙运用方式下对下游河道的演变作用具有一定的参考价值。

近期,吴保生等^[38]研究了修建水库及河道整治对黄河下游白鹤镇至高村游荡性河道河势演变的影响,探讨了游荡性河道向弯曲性河道转化的可能性。研究认为,经过水库调节后,进入下游的来沙减少,洪峰削平及中水持续时间加长,有利于游荡性河道淤积程度的降低及向弯曲方向的发展;河道整治工程对于减小河道的摆动强度,稳定流路,促使河道由游荡向弯曲方向发展的作用是显著的。在小浪底水库下泄有利水沙条件下,若能利用现有的河道整治工程,并补充必要的河道整治措施,黄河下游游荡性河道有可能逐步转化为像高村至陶城铺河段那样的限制性弯曲河道。姚文艺等^[39]以 1960~1964 年三门峡水库清水下泄期定位观测资料为依据,结合实体模型试验,研究了清水下泄过程中黄河下游游荡性典型河段河势变化趋势、河道横断面形态的调整过程及其模式。研究表明,若缺乏较完善的整治工程体系的约束,尽管在上游水库建成运用后的清水下泄初期,河势会趋于相对归顺,但冲刷后期将会出现明显的坐弯摆动现象,游荡性并不能改变;横断面调整过程的模式基本上为“下切+展宽—下切—下切+局部河段展宽”;为利于河槽形成窄深断面,上游水库下泄流量不宜过小且历时不能过长,同时,流量变幅不宜过大。陆中臣等^[40]的研究也认为,小浪底水库清水下泄期间,黄河下游游荡性河段不对称的河谷形态不会改变;在继承性新构造运动造成的地壳向南掀沉、科氏力和人类活动的影响下,主流线总体上仍呈南摆趋势,清水冲刷不会导致河型彻底转化。因此,充分利用小浪底水库拦沙库容未被淤满时期,通过人工进行调控有利的水沙过程,对于改善下游河道形态就显得十分必要。

1.2.4 利用水库调控水沙的关键技术研究

目前,由于水资源的减少或大型水利工程修建对泥沙径流的不合理调节,所引起的下游河道萎缩等问题已引起国内外的广泛关注。如我国的汉江、淮河、海河干流等均有不同程度的萎缩。美国的科罗拉多河、埃及的尼罗河也均发生过断流及河道萎缩。科罗拉多河曾进行过原型调节水量过程试验,旨在保持天然条件下的河道形态和改善生态环境。另外,美国的 Grand 河流也为改善水库对下游径流过程的不良干扰,也曾进行过原型调控径流过程的实践。从目前国内外研究现状看,对于少沙河流河道萎缩问题的解决多是从合理配置水量的角度予以考虑的。但是,对于多泥沙河流,特别是对于泥沙含量位居世界第一的黄河,仅从水量调节是不能有效解决河道萎缩问题的。