

萎缩性河道演变规律 与若干治理实践

王卫红 李文学 李 勇 常温花 著



黄河水利出版社

萎缩性河道演变规律

与若干治理实践

王宗明 李国英 等 著



中国水利水电出版社

国家自然科学基金委员会 黄河联合研究基金项目(编号 50379016)
水利部黄河水利委员会
国家重点基础研究发展规划(973)项目(编号 G199904360402)

萎缩性河道演变规律与 若干治理实践

王卫红 李文学 李 勇 常温花 著

黄河水利出版社

图书在版编目(CIP)数据

萎缩性河道演变规律与若干治理实践/王卫红等著.
郑州:黄河水利出版社,2006.12

ISBN 7-80621-977-3

I. 萎… II. 王… III. ①河道演变-研究 ②河道
整治-研究 IV. ①TV147②TV85

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 155164 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 传真:0371-66022620

E-mail:hslcbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:12

插页:6

字数:230 千字

印数:1—1 500

版次:2006 年 12 月第 1 版

印次:2006 年 12 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80621-977-3/TV·426

定价:45.00 元

前 言

自 20 世纪 80 年代中期以来,由于黄河来水来沙条件发生非协调性变异,下游河道发生严重萎缩,并大大加剧“二级悬河”形势。由河道萎缩而引起的各种灾害效应愈加明显,特别是防洪压力越来越大。例如,1996 年 8 月,花园口站发生洪峰流量 $7\,680\text{ m}^3/\text{s}$ 的中常洪水,其水位比 1958 年的 $22\,300\text{ m}^3/\text{s}$ 大洪水的水位还高 0.91 m 。到 2002 年,平滩流量不足 20 世纪 50 年代的一半,最小平滩流量不足 $1\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 。河道萎缩及“二级悬河”加剧等黄河“健康状况”的恶化问题已引起我国政府高度重视。为此,科学技术部在国家重点基础研究发展规划中,国家自然科学基金委员会在黄河研究联合基金中均列出相应项目对黄河河道萎缩和治理对策开展研究。因此,研究黄河下游河道萎缩规律和治理对策,对于黄河的治理和开发,实现黄河流域经济可持续发展具有极大意义,是国家建设的重大需求。

黄河下游萎缩性河道主要包括游荡性河段、过渡性河段和弯曲性河段(又称窄河段),各河段的水力边界、地理环境等河流系统变量因子都有一定差异,河道演变规律各不相同。因此,认识黄河下游不同河段的萎缩演变规律,对于揭示萎缩性河道的“小水大灾”效应,预测黄河下游萎缩性河道演化趋势,制定治理对策是一项重要的理论基础。

本书正是在国家重点基础研究发展规划(973)项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”的二级课题“萎缩性河道演变规律与致灾机理”(G199904360402),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“基于河势稳定原理的黄河游荡性河道整治机制研究”(50379016)、水利部创新项目“二级悬河”控制指标研究(XDS2004-03-03)等研究成果基础上整合而成的。其研究的内容包括黄河下游河道萎缩成因及规律、河道萎缩致灾机理、河道萎缩治理对策及实践效果分析等。在研究中,以河床演变学和河流地貌学等理论为基础,从河流系统学科的高度、水沙过程与河床过程相互作用的层次,以原型定位观测资料分析、物理模型试验和数学模拟计算为主要技术手段,把河道萎缩及其致灾作用视为水沙过程变异条件下河道系统的一种新的响应过程,是整个河流系统自适应调整的必然结果,研究水沙过程变异背景下的河道萎缩过程、规律及其致灾机理,以及河道萎缩的

治理对策等。

本书共分 10 章。第 1 章绪论,主要介绍了黄河下游河道萎缩规律研究目的、意义和研究内容,概述了国内外关于相关内容的研究现状和发展趋势;第 2 章概要介绍了研究中采用的模型试验设计方法及试验方案设计;第 3 章探讨了河道萎缩概念和定义,分析了河道萎缩的成因;第 4 章通过试验研究,依据河床演变学的原理,划分了河道萎缩的模式,并分析了不同萎缩模式下的河床演变特性,以及横断面形态的调整特点;第 5 章分析了河道萎缩过程中输沙能力的调整规律;第 6 章从理论上探讨了河道萎缩致灾机理,并从试验中得到了证明,在此基础上,进一步分析了河道行洪能力及输沙能力对河道萎缩的响应关系;第 7 章建立了萎缩河道水位过程的非线性预报模式,为预测河道的萎缩趋势提供了一项工具;第 8 章依据数学模型计算、原型定位观测资料分析,提出了黄河下游“二级悬河”的控制阈值,为“二级悬河”治理提供了科学参考依据;第 9 章在前述各章研究成果基础上,结合前人研究成果,探讨了河道萎缩治理对策;第 10 章作为成果应用,结合黄河下游开展的“二级悬河”治理试验工程,分析了疏浚河槽、淤填堤河等工程实施的效果,并提出了进一步开展“二级悬河”治理的建议。

特别要说明的是,本书成果是在参加上述项目研究的所有人员共同努力下完成的,除作者外,还包括姚文艺、侯志军、陈界仁、袁永生、夏修杰、王德昌、高际萍、尚红霞、苏运启、官学文、夏爱华、张晓华、王普庆、王平、张敏、罗立群、郑艳爽、任健等。在研究过程中,全体研究成员相互协助、团结攻关,圆满完成了设定的研究任务,在此对他们的辛勤劳动表示诚挚感谢。

还要衷心感谢黄河水利出版社的支持和帮助,得以使研究成果成书面世。

限于作者水平,书中难免有谬误或不当之处,敬请读者指正。

作 者

2006 年 9 月

目 录

前 言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 研究的目的及意义	(1)
1.2 国内外研究现状及发展趋势	(2)
1.3 研究内容及技术路线	(11)
第 2 章 模型试验设计	(13)
2.1 试验河段选择及物理模型比尺设计	(13)
2.2 试验水沙条件选择	(16)
2.3 试验方案	(19)
第 3 章 黄河下游河道萎缩成因	(20)
3.1 河道萎缩的概念及现象	(20)
3.2 河道萎缩因子分析	(27)
3.3 河道萎缩成因分析	(28)
第 4 章 黄河下游河道萎缩模式	(37)
4.1 不同水沙条件下的萎缩模式	(37)
4.2 不同河型河段的萎缩形态及特征	(40)
4.3 不同萎缩模式的断面形态调整特点	(41)
4.4 小结	(44)
第 5 章 河道萎缩过程中水力参数及输沙能力参数的调整规律	(45)
5.1 水力参数的调整规律	(45)
5.2 输沙能力参数的调整规律	(50)
5.3 小结	(53)
第 6 章 黄河下游河道萎缩致灾机理及效应	(55)
6.1 河道萎缩致灾机理	(55)
6.2 河道行洪能力对河道萎缩的响应关系	(62)
6.3 输沙能力对河道萎缩的响应	(70)
第 7 章 萎缩河道水位过程非线性预报模式研究	(76)
7.1 概述	(76)
7.2 影响水位的基本因素及数据处理	(77)
7.3 水位预报模型及预报结果	(88)

7.4 小结	(89)
第 8 章 黄河下游“二级悬河”的控制阈值	(91)
8.1 “二级悬河”定义及现状	(91)
8.2 “二级悬河”发展过程	(101)
8.3 “二级悬河”控制阈值的数值模拟分析	(107)
8.4 “二级悬河”控制阈值的理论分析	(131)
8.5 “二级悬河”控制阈值的实测资料类比分析	(137)
8.6 小结	(142)
第 9 章 萎缩性河道治理对策探讨	(144)
9.1 概述	(144)
9.2 “宽河固堤”与“束水攻沙”相结合开展河道整治	(145)
9.3 点面结合进行大尺度空间水沙调控	(152)
9.4 小结	(155)
第 10 章 黄河下游“二级悬河”治理实践及效果分析	(157)
10.1 试验河段概况	(157)
10.2 濮阳“二级悬河”治理试验工程简介	(162)
10.3 试验效果分析	(169)
10.4 小结	(182)
参考文献	(184)

第 1 章 绪 论

1.1 研究的目的及意义

黄河下游河段为严重的堆积性河道。尤其是自 20 世纪 80 年代中期以来,由于来水来沙条件发生非协调性变异,河道发生萎缩,中水河槽及主槽宽度缩窄,平滩流量下过水面积及过流能力减小。例如,20 世纪 90 年代下游河道的平滩流量仅为 50 年代的 50% 左右,致使中常洪水条件下即可形成大范围漫滩,各种水沙灾害效应更加明显,特别是防洪压力越来越大。1996 年 8 月,黄河下游花园口站发生洪峰流量 $7\,680\text{ m}^3/\text{s}$ 的中常洪水,洪水期最大含沙量 $155\text{ kg}/\text{m}^3$,洪峰含沙量仅 $50\text{ kg}/\text{m}^3$,是 20 世纪 50 年代及 80 年代初期的常见洪水,洪水几率仅为 2~3 年一遇,但其水位比 1958 年的 $22\,300\text{ m}^3/\text{s}$ 大洪水的水位还高 0.91 m ;在山东黄河西河口以上 553 km 的河道中,达历史最高水位的河道长度约 293 km ,占总河段长度的 52.98%。由此所造成的滩区直接经济损失达到 43.59 亿元。另外,由于河槽的淤积萎缩,床面高程不断抬升,河道横比降不断增大,使得“二级悬河”形势日趋严峻。例如,京广铁桥至东坝头河段左岸滩地横比降均值达到 3.33‰ ,东坝头至高村河段左岸滩地横比降均值达到 5.15‰ ,右岸达到 5.84‰ ,陶城铺以下河段左岸滩面平均横比降达 27.81‰ 。“二级悬河”的存在,极易造成顺堤行洪和主流顶冲大堤的险情。因而,一些人士强烈呼吁,若不尽快改变当今黄河所出现的水沙过程变异、河道萎缩、行洪能力降低、小水大漫滩大灾情等灾害状况,将可能形成灾难性突变的严重局面。鉴于黄河下游河道萎缩所带来的严峻形势,针对国家制定的 21 世纪可持续发展议程和黄河流域经济社会发展对黄河治理开发提出的重大要求,认识黄河下游河道萎缩规律,研究萎缩机理及所形成的“小水大灾”效应,提出治理对策和措施,对促进黄河治理开发、实现“维持黄河健康生命”的终极目标具有极大的意义,是国家的紧迫需求。

研究黄河下游河道萎缩规律,也是水科学发展的需求。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,其河道的演化不仅取决于进入河道中的水沙条件及其在河道中运行的过程,而且还决定于河道边界条件,

包括河道物质组成、整治工程等;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,河道的演化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化特性,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化过程的发展,又可附加给河道新的演化或变迁特性。总之,河道演化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出的“小水大灾”等灾害性响应关系是十分复杂的。以往关于河床演变的研究,多侧重于长期水文学意义下的水沙过程的造床作用,或是基于河流地貌学或地理学的基本观点,从历史角度对河床过程的认识。而河道萎缩是在变异水沙条件下所出现的一种特殊的河床演变现象,而且,不论这种水沙变异是由于自然环境变迁形成的,还是因为大型水利工程调节及引用径流等人类活动的干扰所引起的,对河道萎缩的致灾作用是等效的。同时,从河床演变学的角度而言,变异水沙过程所引发的河道萎缩,也必有其特殊的规律性,应当是河床演变学的一个重要研究领域。因此,研究河道萎缩规律,了解其致灾机理,对于进一步探索游荡性河道演变规律、认识河流系统对水沙变异的适应关系有着重要意义,必将进一步丰富河床演变学的内容。水利部制定的《水利科技发展规划(2001~2015)》将各类河型演变与相互转化规律研究列入了未来水利科技发展的优先领域,并把河道水沙变异规律及萎缩性河道演变机理的研究作为“十五”期间水利科技发展的重点。显然,认识黄河下游河道萎缩演变规律以及河道萎缩所引发的“小水大灾”等灾害性响应关系,包括研究在非协调性变异的水沙条件下水沙共同致灾机理,不仅可以为黄河下游的防洪减灾提供重要的科学决策依据,而且可望在河床演变学、环境变迁学及泥沙学科方面取得新的进展和突破,是水利科技发展的需求,具有很大的科学意义。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

1.2.1 关于河道输沙特性的研究

研究黄河下游河道的演变规律和机理,了解其与水沙之间的关系,是黄河治理开发的重要基础理论问题。多年来,尤其是自20世纪60年代以来,围绕三门峡水利枢纽的改建、小浪底水利枢纽等大型水利工程的规划设计和施工、黄河下游河道整治、黄土高原水土保持治理、防洪减灾等重大问题,有关学科对此进行了大量的不同层次的研究。在黄河下游河道来水来沙特性及冲淤基

本规律,黄河下游河道形态、河型及河性,黄河下游游荡性河段形态变异成因,流域治理对下游河道的减淤作用,高含沙水流运动规律与河床演变特性,上游修建大型水库后下游游荡性河道的演变趋势及治理,黄河下游河道输沙特性及河道整治等方面,均取得重要研究进展。例如,根据三门峡水库拦沙期的资料分析,在下泄清水期,河道输沙与一般少沙河流没有太大差别,流量与床沙质输沙率一般具有较稳定的关系,即

$$Q_s = AQ^n \quad (1.1)$$

式中: Q_s 为悬沙床沙质输沙率; Q 为流量; n 为指数,接近于 2; A 为与河床边界条件有关的系数。

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,与河床前期冲淤有关; a 、 b 为指数,与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 值由游荡性河段的 0.7~0.8 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。

齐璞等进一步分析了流量和含沙量指数 a 和 b 与河床边界条件的关系,得出以下公式

$$a = 0.356 \lg J + 1.3 \quad (1.3)$$

$$b = -0.256 \lg \frac{\sqrt{B}}{H} + 1.18 \quad (1.4)$$

式中: J 为河道平均比降; B 为主槽演变, m ; H 为主槽平均水深, m 。

在挟沙水流中,含沙量的增加可以引起流体黏性和容重的增加,使得泥沙在浑水中的沉降速度减小,从而提高水流的输沙能力。引入上站含沙量作为主要参数,可使得黄河下游计算断面流量与输沙率关系显著改善,这一基本认识定性地揭示了含沙水流对河道输沙能力的显著影响。

费祥俊则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,并提出了一套具体的计算方法

$$\eta_m = (1 - K \frac{S_v}{S_{vm}})^{-2.5} \eta_0 \quad (1.5)$$

其中

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

$$S_{vm} = 0.92 - 0.21 \lg(\sum P_i / d_i)$$

$$\eta_0 = \gamma_0 v_0$$

$$v_0 = \frac{0.000\ 001\ 775}{1 + 0.033\ 7t + 0.000\ 221t^2}$$

式中: η_0 、 η_m 分别为黏滞系数和浑水刚度系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; v_0 为清水运动黏滞系数; 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 (以 mm 计) 所对应的沙量占全沙的比例; t 为液体温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

曹如轩、程文等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的基本形式, 求得适合于黄河高含沙水流的挟沙力公式

$$S_{*m} = 0.385 \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \frac{V^3}{gR\omega_{ms}} \quad (1.6)$$

式中: S_{*m} 为全沙挟沙力; ω_{ms} 为考虑黏性和体积两次修正后的沉速。

舒安平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

$$S_{v*} = 0.355 \sum P_i \left[\frac{\lg(\mu_\gamma + 0.1)}{K^2} \left(\frac{f_m}{8} \right)^{3/2} \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \frac{V^3}{gR\omega} \right]^{0.72} \quad (1.7)$$

上式除浑水容重 γ_m 与泥沙沉速 ω 及水流含沙量 S 有关外, 浑水黏滞系数 μ_γ 也是含沙量 S 的函数。

张红武等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

$$S_* = 2.5 \left[\frac{(0.002\ 2 + S_v) V^3}{K \frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma_m} gh\omega_s} \ln\left(\frac{h}{6D_{50}}\right) \right]^{0.62} \quad (1.8)$$

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。有分析认为, 比降的变化对输沙的影响仅为 8% ~ 12%。

齐璞、赵业安等通过资料分析认为, 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, 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,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,洪峰期的冲淤强度与来水来沙的经验关系可表达为

$$\Delta G_s = 137Q^2 \left[\frac{S}{Q} - 0.33 \left(\frac{S}{Q} \right)^{0.75} \right] \quad (1.9)$$

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

$$\Delta W_s = KS - S_c \quad (1.10)$$

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; 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。

就平均情况看,冲淤基本平衡时的洪峰平均含沙量约为 $50 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。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 $25 \sim 30 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。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减小到约 $20 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

三门峡水库蓄清排浑运用,在年内冲淤交替、年际间总体上处于维持淤积的条件下,非汛期下游冲淤量与非汛期水量成正比,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,艾山以下河段淤积随下泄水量的增加呈增大趋势。

1.2.2 关于河道断面形态调整的关系研究

黄河下游河床演变具有各河段同步性的特征,纵比降变化较小,在河床淤积抬升的同时,更主要地表现为河床横断面形态的调整。河床横断面形态的调整主要取决于来水来沙条件与河床边界条件,不同河段由于河床比降、河底与河岸物质组成等边界条件的不同,河床横断面形态差异很大。黄河下游艾山以下微弯性河段主槽平均宽度 $400 \sim 600 \text{ m}$,平均水深 $3 \sim 5 \text{ m}$,河相系数

$(\frac{\sqrt{B}}{H})$ 为 $4 \sim 5 \text{ m}^{1/2}/\text{m}$; 而高村以上游荡性河段, 河相系数 $(\frac{\sqrt{B}}{H})$ 在 $30 \text{ m}^{1/2}/\text{m}$ 以上。同一河段河床边界条件变化不大, 但水沙条件的显著差异也可造成横断面形态的明显变化。1986 年以来, 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是十分剧烈的, 平滩下主槽过水面积由 1986 年以前的 2500 m^2 减小到 1997 年的 1400 m^2 , 相应主槽宽度由 $1200 \sim 1600 \text{ m}$ 减小到 $700 \sim 900 \text{ m}$ 。造床流量的大幅度减少, 使得河道明显淤积萎缩; 含沙量较高的中常洪水频繁发生, 流量变幅减小, 使得河道形态总体趋于窄深方向发展。河道整治工程日趋完善, 对稳定流路、规顺河势、断面形态趋于窄深方向发展也具有较大的影响。

为适应水沙条件的变化, 河床横断面形态处于不断的变化调整过程中, 通常用流量的指数关系来描述相对平衡状态下的水力几何形态

$$B = K_1 Q_n^{\alpha_1} \quad (1.11)$$

$$h = K_2 Q_n^{\alpha_2} \quad (1.12)$$

$$V = K_3 Q_n^{\alpha_3} \quad (1.13)$$

式中: Q_n 为造床流量; B 、 h 、 V 分别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、水深和流速的系数与指数。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 。

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 $2000 \sim 3000 \text{ m}$ 缩窄到 $700 \sim 800 \text{ m}$ 。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, 而水深和流速增大, 并将河相关系表示为

$$B = K_1 Q^{\alpha_1} S^{\beta_1} \quad (1.14)$$

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

$$H = K_2 A^{\alpha_2} S^{\beta_2} \quad (1.15)$$

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

$$V = K_3 Q^{\alpha_3} S^{\beta_3} \quad (1.16)$$

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

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

王国宾、于为信等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

$$B = 0.215 Q^{0.5} S^{-0.12} \quad (1.17)$$

$$H = 0.024 2 Q^{0.33} S^{-0.08} \quad (1.18)$$

黄河下游高村以上宽河段河道由于水流含沙量大、洪峰陡涨陡落、河床比降陡、河床物质组成较粗、河岸黏土含量少、抗冲性差而呈典型的游荡性。艾山以下窄河段受上游宽河段调整的影响,水沙条件相对稳定,河岸黏性物质增多,抗冲性增强,呈典型的微弯性河道。不同学者从不同的角度,对冲积性河道的河床稳定性及河型的划分等进行过较多的研究。

方宗岱采用洪峰变差系数(C_V)、来水含沙量与水流挟沙能力之比(S_i/S_*)及洪水时河道宽度与河面宽之比(B/b)作为划分河型的指标,认为随着以上三个因素的增大,河床趋向于宽浅游荡,河床稳定性愈差。

钱宁提出冲积河流游荡性指标的公式为

$$\beta = \left(\frac{\Delta Q}{0.5 t Q_n} \right) \left(\frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\max} + Q_{\min}} \right)^{0.6} \left(\frac{hJ}{D_{35}} \right)^{0.6} \left(\frac{b}{H} \right)^{0.45} \left(\frac{B}{b} \right)^{0.3} \quad (1.19)$$

式中: β 为游荡性指标; ΔQ 为一次洪峰中流量涨幅, m^3/s ; Q_n 为平滩流量, m^3/s ; t 为洪峰历时,d; $Q_{\max}$ 、 $Q_{\min}$ 分别为汛期最大日平均流量和最小日平均流量, m^3/s ; h 、 b 分别为平滩流量下的平均水深和河宽,m; J 为比降; B 为历年最高水位下的水面宽度,m; D_{35} 为床沙中以重量计35%的较细粒径,mm。

随着洪峰陡涨陡落、流量变幅增大、平滩流量减小,以及河道比降变陡,床沙组成细化和河床宽深比、洪枯水面比的增加,河床更趋游荡性发展,当河流游荡性指标大于5时,为游荡性河道,小于2则不游荡。

不少学者基于水流能量的角度,认为河流流量与河床比降具有较好的相关关系。钱宁、麦乔威提出关系式为

$$J = 0.01 Q_n^{-0.44} \quad (1.20)$$

式中: J 为比降,‰; Q_n 为平滩流量, m^3/s 。

毕慈芬在研究黄河下游游荡性河段河道形态变异成因时,将漫滩洪水按洪水来源区分为三类,即清水来源区漫滩洪水含沙量小,对游荡性河型影响不大;粗沙来源区漫滩洪水常伴有部分细沙来源区洪水,对河床有向窄深变化的造床趋势,可导致变成过渡性河型;细沙来源区为主的漫滩洪水,含沙量高,细沙含量多,水质中可溶性胶结盐类的离子量高,使水流呈非牛顿宾汉流体,有

固滩刷槽作用,游荡性形态可变异成弯曲性形态。毕慈芬在研究中还定义了一个形态成因数 C ,由漫滩系数 A 、漫滩时段洪峰平均含沙量 S 和前期河床比降 J 三者乘积决定,研究认为,洪峰过后的河型系数 E 与形态成因数 C 有良好的关系,可表示为 $E = 42.5 \exp(-0.00129C)$ 。

河道的来水来沙条件及河床边界条件对河床的稳定性具有决定性的作用,影响着河型的发展趋势。河岸与河底的相对抗冲性与河型也具有密切的关系。林承坤曾根据河床边界土层或岩性的组成与结构、河床的地形类型及河床与河底相对可动性来定性划分不同河型。尤联元等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径成反比,河岸的可动性则与河岸中粉砂黏土含量成反比,河床的稳定性指标可表示为

$$\pi = \frac{100D}{M_w} \quad (1.21)$$

式中: π 为河岸与河床相对可动性; D 为床沙中径,mm; M_w 为河岸中粉砂黏土含量,%。 π 大于 0.65 为游荡型, π 小于 0.25 为顺直型或弯曲线型,介于二者之间为分汊型。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。黄河冻口河段河岸黏土含量增多, π 值为 0.42,当属过渡性河段,与实际河型有所出入。

大量的实测资料分析和试验研究表明,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。

1.2.3 关于水沙变化对河道冲淤影响的研究

人类活动在黄河治理开发取得巨大效益的同时,也引起了水沙条件的变化及上中下游河道的反馈调整,带来了许多新情况与新问题。如龙羊峡、刘家峡水库(简称龙刘水库,下同)调节径流和黄河上中下游大量引水,使得黄河上中下游干流河床演变向不利于排洪输沙的方向发展,历史上长期处于微淤状态的上游宁蒙河段在龙羊峡水库运用后转为逐年淤积。

赵业安等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 ,相互抵消后均增加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,库区累积性淤积造成潼关高程持续上升。水文法模型计算表明,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,为实测淤积量的 1.5 倍。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平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。而非汛期全下游冲刷,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%。

1973 年 11 月三门峡水库“蓄清排浑”运用以来的实际情况说明,受其特定的河床边界条件及已建大坝泄流规模的限制,当流量超过 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 后,水库自然滞洪、壅高水位,影响洪水期水库排沙。据统计,1974~1993 年汛期,潼关以下库区年均冲刷泥沙 1.47 亿~2.23 亿 t,其中大都是在 $1\,000\sim 2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上的洪水基本没有冲刷排沙。采用中国水利水电科学研究院、黄河水利科学研究院、清华大学、武汉水利电力大学等提出的黄河下游河道泥沙冲淤数学模型,对三门峡水库实际运用的出库水沙条件与无三门峡水库的天然来水来沙条件,进行下游河道冲淤对比计算,计算结果表明,1974 年三门峡水库“蓄清排浑”运用以来(1973 年 11 月至 1990 年 10 月),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。

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,对下游输沙不利,因此下游河道年均增淤 0.171 亿 t。