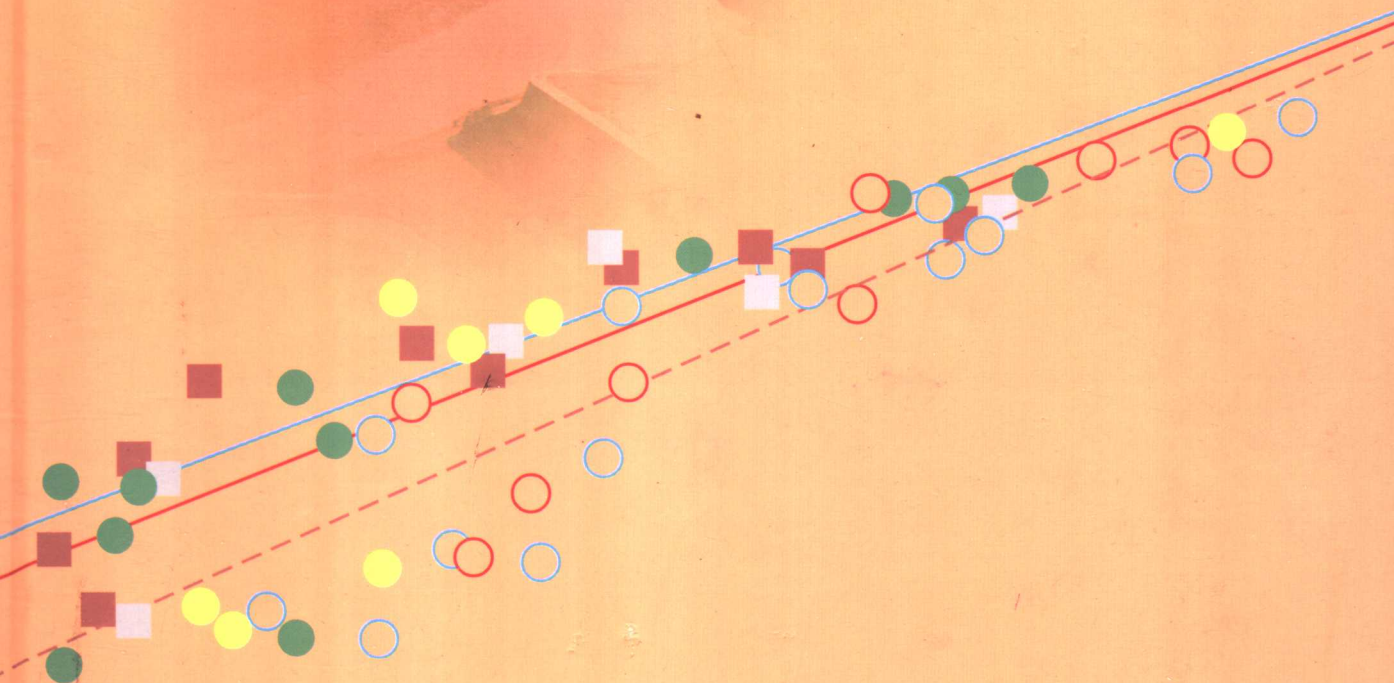


黄河水沙过程变异 及河道的复杂响应

胡春宏 等著



划项目(973项目):

黄河水沙过程变异及河道的复杂响应”课题

黄河水沙过程变异 及河道的复杂响应

胡春宏 等著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书根据国家重点基础研究发展规划项目(973项目)“黄河水沙过程变异及河道的复杂响应”课题(G1999043604)的研究成果系统总结而成。全书以水循环与水资源演化规律为基础,以自然因素和人类活动双重作用下流域水沙过程变异与河道萎缩为切入点,揭示了水沙过程变异条件下河道产生“小水大灾”的机理,并提出了黄河下游河道治理与调控的措施。主要研究成果包括:三个模型的建立、四项理论研究进展和四项应用研究进展。

本书可供从事泥沙运动力学、河床演变与河道整治、水土保持、防洪减灾、水沙资源配置与利用、黄河治理等方面研究的科技人员及高等院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄河水沙过程变异及河道的复杂响应/胡春宏等著. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-015305-7

I. 黄… II. 胡… III. ①黄河-含沙水流-变化-研究 ②黄河-河道整治-研究 IV. ①TV152 ②TV882.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第027360号

责任编辑:李 敏 李晓华 吴伶俐 / 责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:黄华斌

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

*

2005年7月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005年7月第一次印刷 印张:28 1/2 插页:2

印数:1—2 000 字数:680 000

定价:80.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

前 言

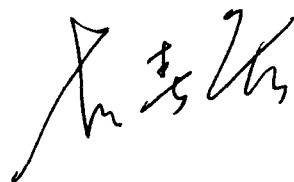
黄河是我国的第二大河流,源远流长;黄河也是闻名于世的多沙河流,是世界上最难治理的河流之一。黄河流域在我国社会经济的可持续发展中占有举足轻重的地位,在流域内居住着全国 8% 的人口,拥有全国 13% 的耕地;在全国已探明的 45 种矿藏储量中,黄河流域占了 32%,其中煤占 46.5%、石油占 26.6%、铝占 44%;后备的可开垦土地资源在 3000 万亩($1 \text{ 亩} \approx 666.7 \text{ m}^2$) 以上,是实现我国 21 世纪发展目标的重要基地。目前,黄河流域已成为全国主要的粮、棉、油、肉产区和最大的温带果品基地。黄河的灌溉在流域农业发展中起到了决定性的作用,流域灌溉面积已从 1949 年的 1200 万亩增长到现在的 1.07 亿亩,在流域内仅占耕地 45% 的灌区却生产着占总耕地 70% 的粮食和大部分经济作物。黄河流域的水土资源比例在全国七大流域中是最不平衡的,人均水量仅为全国平均值的 20%,亩均水量为全国的 9.8%,地表径流量仅占全国的 3%,黄河流域是一个十分干旱的地区。随着流域社会经济的发展和人口的增加,水资源的供需存在着极大的矛盾,流域人口已从 1953 年的 3837 万人增长到目前的 1.02 亿人,预计 2010 年将增加到 1.23 亿人。此外,黄河下游还承担着属于海河和淮河流域的 3000 万亩耕地的灌溉,这种超负荷的运转导致黄河流域水资源分配的严重失衡,使河道水沙过程和泥沙输移关系发生了质的变化,从而产生了河道萎缩、二级悬河加剧、小流量高水位大灾害、河道功能性断流、生态环境恶化等新问题,这一系列的问题表明黄河的“健康状况”在不断恶化,严重制约了流域社会经济的可持续发展,威胁到了人类的生存和健康,已成为 21 世纪初期国家发展的心腹之患。鉴于黄河流域所处的地理位置及水土资源的现实状况,如何处理流域开发与资源环境协调的关系,确保黄河流域水资源的合理利用与防洪的安全,维持黄河的“健康生命”,维持流域社会经济的可持续发展,已成为我国政府十分关注的问题。为此,科学技术部将“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”列为国家重点基础研究发展规划项目(973 项目),以加强对黄河问题的研究,我们承担的“黄河水沙过程变异及河道的复杂响应”为该 973 项目之第四课题(G1999043604),侧重于泥沙与防洪问题的研究。本课题的主要研究内容为:流域植被-侵蚀动力学模型与水沙过程变异规律、萎缩性河道演变规律与致灾机理、黄河下游河道的动力平衡临界阈值与调控措施等。本课题以水循环与水资源演化规律为基础,以自然

因素和人类活动双重作用下流域水沙过程变异与河道萎缩为切入点,揭示了水沙过程变异条件下河道产生“小水大灾”的机理,并提出了黄河下游河道治理与调控的措施。经过5年的系统研究,课题取得了多项创新性研究成果,可以概括为:三个模型的建立、四项理论研究进展和四项应用研究进展。本课题在国内外期刊上发表学术论文110篇,其中被SCI收录论文23篇、被EI收录论文30余篇,国际会议特邀报告10篇,国内会议特邀报告8篇,编写科研报告20余份,发表专著2部。

本书是在“黄河水沙过程变异及河道的复杂响应”课题研究成果的基础上,通过系统总结编写而成。全书共分8章,主要内容及编写人员如下:第1章绪论,由胡春宏和吉祖稳执笔;第2章黄河中游流域系统水沙过程变异规律,由陈浩、许炯心和陆中臣等执笔;第3章流域植被-侵蚀动力学的理论与模型,由王兆印等执笔;第4章人类活动影响下黄河流域泥沙侵蚀—搬运—沉积机理,由许炯心和陆中臣等执笔;第5章黄河下游萎缩性河道演变机理,由姚文艺、李勇和侯志军等执笔;第6章黄河口水沙过程变异与演变响应,由胡春宏、曹文洪和许炯心等执笔;第7章黄河下游河道动力平衡临界阈值与调控机理,由郭庆超、胡春宏和陆中臣等执笔;第8章黄河下游河道与河口调控措施研究,由胡春宏、郭庆超、姚文艺、曹文洪和陈建国等执笔。全书由胡春宏审定统稿。

特别需要说明的是,本课题是在多家科研单位的共同努力下完成的,参加课题的单位和主要完成人有:中国水利水电科学研究院的胡春宏、郭庆超、吉祖稳、曹文洪、陈建国、戴清、张燕菁、陈绪坚、祁伟、陆琴、胡海华等;中国科学院地理科学与资源研究所的许炯心、陈浩、陆中臣、张欧阳、李忠艳等;黄河水利科学研究院的李文学、姚文艺、侯志军、王德昌、李勇、常温花等;黄河水利规划勘测设计研究院的洪尚池、安催花等;国际泥沙研究培训中心的王兆印、李昌志等。胡春宏为课题负责人。在研究过程中,课题组全体成员密切配合,相互支持,圆满地完成了课题的研究任务,在此对他们的辛勤劳动表示诚挚的感谢。

限于作者水平,加之时间仓促,书中难免存在欠妥或谬误之处,敬请读者批评指正。



2005年5月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 黄河流域水沙过程变化概况	1
1.1.1 上游水沙过程的变异	1
1.1.2 中游水沙过程的变异	2
1.1.3 中游水利工程对水沙过程变异的影响	3
1.1.4 下游水沙过程的变异	4
1.1.5 下游河道对水沙过程变异的演变响应	5
1.2 研究内容与研究成果	6
1.2.1 研究内容与预期目标	6
1.2.2 主要研究成果	6
参考文献.....	8
第 2 章 黄河中游流域系统水沙过程变异规律	9
2.1 气候变化与人类活动对黄河中游水沙过程变异的影响	9
2.1.1 国内外研究成果综述	9
2.1.2 中游水沙过程的空间分异	15
2.1.3 地理环境要素对流域产流产沙过程变异的综合影响	21
2.1.4 中游水沙过程变异的成因	23
2.2 人类活动影响下黄河中游水沙过程变异的复杂响应机理.....	25
2.2.1 小流域治理过程中的泥沙输移比的时空变化	25
2.2.2 区域侵蚀产沙预报模型及其影响因素分析	28
2.2.3 人类活动影响下次暴雨的侵蚀—输移—沉积转化机制	30
2.2.4 中游林草植被的恢复能力与天然生态需水量	33
2.2.5 植被恢复对流域侵蚀产沙的影响	42
2.3 黄河中游河龙区间径流可再生性变化及其影响因素.....	44
2.3.1 径流可再生性的定量指标	44
2.3.2 水土保持措施对径流过程的影响	45
2.3.3 多沙粗沙区径流可再生性的变化	45
2.3.4 径流可再生性减弱与影响因子的关系	47
2.4 黄土高原流域地貌发育阶段临界.....	49
2.4.1 地貌临界的概念及其意义	50
2.4.2 侵蚀积分值分析法	50

2.4.3	侵蚀积分值临界的确定	51
2.4.4	黄土高原流域地貌发育阶段的检验	55
2.4.5	流域地貌发育阶段的趋势预测	57
2.5	流域侵蚀产沙中地理环境要素的临界特征和交互作用	58
2.5.1	地理环境要素对流域侵蚀产沙的影响	58
2.5.2	影响流域侵蚀产沙地理环境要素的复合临界	65
2.5.3	地带性与非地带性环境因子与流域侵蚀产沙的交互作用	67
2.5.4	流域环境要素对流域侵蚀产沙临界值影响的数学判定	71
	参考文献	74
第3章	流域植被-侵蚀动力学的理论与模型	79
3.1	植被与侵蚀	79
3.2	植被-侵蚀动力学模型的建立	80
3.2.1	应力分类及其量化	80
3.2.2	植被-侵蚀动力学模型	82
3.3	植被-侵蚀动力学模型参数的确定	86
3.3.1	参数的物理意义	86
3.3.2	参数的计算	86
3.3.3	参数的分布规律	86
3.4	植被-侵蚀状态图的应用	87
3.4.1	植被-侵蚀状态图的绘制	87
3.4.2	植被-侵蚀状态图的意义	87
3.5	植被活力模型的研究	88
3.6	植被-侵蚀动力学模型应用实例	91
3.6.1	典型流域概况	91
3.6.2	植被-侵蚀动力学模型应用	94
	参考文献	101
第4章	人类活动影响下黄河流域泥沙侵蚀—搬运—沉积机理	103
4.1	宏观时间尺度上人类活动对黄河流域侵蚀—搬运—沉积过程的影响	103
4.1.1	人类活动对流域泥沙侵蚀—搬运—沉积过程的影响与突变现象	103
4.1.2	流域人类活动对下游历史泥沙灾害的影响	108
4.2	人类活动对黄河高含沙水流的影响	111
4.2.1	人类活动对支流高含沙水流的影响	111
4.2.2	流域因素对下游高含沙水流的影响	118
4.3	人类活动对黄河下游河道泥沙输移的影响	123
4.3.1	流域因素与人类活动对下游河道输沙功能的影响	123
4.3.2	人类活动对下游河道泥沙淤积趋势的影响	129
4.3.3	下游堤距对河道沉积速率的影响	140

4.4 人类活动对黄河下游河床形态的影响	146
4.4.1 低流量及间歇性断流时下游河床的沉积过程与形态调整	146
4.4.2 下游游荡性河道萎缩过程中河床形态的调整	156
4.4.3 下游人为季节性河流特征	167
4.5 黄河下游河道纵横剖面形态演变分析	177
4.5.1 下游河道纵剖面形态演变	177
4.5.2 下游游荡性河道平面形态与河势变化	186
参考文献	191
第5章 黄河下游萎缩性河道演变机理	194
5.1 萎缩性河道实体模型设计	194
5.1.1 试验河段选择与实体模型设计	194
5.1.2 试验水沙条件选择	198
5.1.3 试验方案	200
5.2 黄河下游萎缩性河道的成因与演变过程	200
5.2.1 河道萎缩的现象与定义	200
5.2.2 河道萎缩的成因	207
5.2.3 河道萎缩的过程	213
5.3 黄河下游萎缩性河道的致灾机理与效应	229
5.3.1 河道萎缩的致灾机理	229
5.3.2 河道行洪能力对河道萎缩的响应	236
5.3.3 输沙能力对河道萎缩的响应	247
参考文献	251
第6章 黄河口水沙过程变异与演变响应	252
6.1 黄河口水沙过程变异及其影响	253
6.1.1 黄河口水沙变异特征	253
6.1.2 影响未来黄河口来水来沙的因素	253
6.1.3 黄河口演变新特点	254
6.1.4 黄河口与世界其他河口的比较	255
6.2 黄河口泥沙的输移与扩散	257
6.2.1 海洋动力特征	257
6.2.2 黄河口泥沙输移与水动力参数的关系	260
6.2.3 黄河口泥沙输移的理论分析	264
6.2.4 黄河口泥沙的扩散	270
6.2.5 黄河口三角洲湿地的演变	271
6.3 黄河口近岸带泥沙的横向运动	271
6.3.1 黄河口波浪特征	272
6.3.2 黄河口破波带内含沙量的横向分布	273

6.3.3	黄河口破波带外含沙量的横向分布	274
6.4	黄河口演变基本规律	276
6.4.1	黄河口的淤积延伸、蚀退与造陆	276
6.4.2	黄河口拦门沙的形成与演变	276
6.4.3	黄河口流路演变及对下游河道的反馈影响	277
6.5	黄河口拦门沙对下游河道的反馈影响	277
6.5.1	试验方案	278
6.5.2	拦门沙对下游河道反馈影响的试验研究	279
6.6	人类活动对黄河口入海泥沙通量和造陆过程的影响	285
6.6.1	流域降雨量和人类活动对入海泥沙通量的影响	285
6.6.2	不同来源区水沙量对入海泥沙通量的影响	294
6.6.3	人类活动与降雨量对河口三角洲造陆过程的影响	301
	参考文献	307
第7章	黄河下游河道动力平衡临界阈值与调控机理	310
7.1	黄河泥沙数学模型研究现状综述	310
7.1.1	泥沙数学模型的历史回顾	310
7.1.2	黄河泥沙数学模型的发展过程	311
7.1.3	需要研究的问题	316
7.2	黄河中下游多系统互动泥沙数学模型	317
7.2.1	泥沙数学模型的基本原理	317
7.2.2	高含沙水流的输沙特性	322
7.2.3	泥沙数学模型基本参数的确定	325
7.2.4	泥沙数学模型的率定与验证	328
7.3	黄河下游河道动力平衡临界阈值研究	332
7.3.1	下游引水对河道冲淤的影响	332
7.3.2	下游河道对不同来水来沙过程的冲淤响应	334
7.3.3	下游河道冲淤平衡临界阈值研究	336
7.4	黄河下游萎缩性河道的内外临界特征	337
7.4.1	河道萎缩现象的普遍性	337
7.4.2	河道萎缩的内外临界	338
7.4.3	河床演变的临界与平衡	338
7.4.4	河流系统外边界条件的变化——下游水沙过程变异	339
7.4.5	河流系统内冲淤结构的质变——下游河道的萎缩	341
7.4.6	河道萎缩的外阈计算	343
7.5	黄河下游河床演变中的地貌临界	345
7.5.1	下游河型发育及其成因	345
7.5.2	下游河床比降和纵剖面形态调整的临界响应	348

7.5.3 下游河道平面形态调整的临界响应	350
7.5.4 下游河型对河床边界条件的临界响应	351
7.5.5 下游河床断面形态的地貌临界判别	352
7.5.6 地貌临界在下游河型转化中的作用	354
参考文献	356
第8章 黄河下游河道与河口调控措施研究	361
8.1 黄河干流大型水利枢纽联合运用对下游河道的减淤作用	361
8.1.1 小浪底水库单独运用对下游河道的影响	361
8.1.2 小浪底水库和古贤水库联合运用对下游河道的影响	366
8.1.3 大型水利枢纽运用对下游河道的减淤机理	372
8.2 黄河下游萎缩性河道治理方向与措施研究	377
8.2.1 宽河固堤与束水攻沙的统一	377
8.2.2 下游窄深中水河槽的塑造与维持	384
8.2.3 萎缩性河道疏浚挖河减淤机理与效果	387
8.2.4 下游河道整治的作用与效果	395
8.3 三门峡水库运用方式与降低潼关高程	401
8.3.1 三门峡水库与潼关高程	402
8.3.2 三门峡水库不同运用方式对降低潼关高程的作用	407
8.3.3 降低潼关高程的途径	419
8.3.4 三门峡水库运用方式的调整	421
8.4 黄河口治理方向与措施研究	425
8.4.1 新时期黄河口的治理方向	425
8.4.2 稳定清水沟流路的措施	425
8.4.3 引海水冲刷黄河口效果分析	429
8.4.4 黄河口拦门沙疏浚效果分析	438
参考文献	446

第1章 绪 论

近 20 年来,黄河流域发生了很大的变化,来水来沙量及其过程大幅改变,人类活动日益加剧,导致黄河上游和河源地区生态环境退化,黄河中游水土流失依然严重,黄河下游悬河加剧、功能性断流与水患并存,黄河河口地区生态环境恶化,黄河水质污染日益加剧等,这一系列的问题都表明黄河“健康状况”日趋恶化,严重制约了流域社会经济的可持续发展,威胁到了人类的生存和健康,已成为 21 世纪初期国家发展的心腹之患。

导致黄河“健康状况”恶化的因素主要有两个方面:一是自然因素,包括气候、地貌、沉积物、植被与全球环境变化等;二是人为因素,包括不合理的开发和人类活动加剧等。20 世纪 50 年代以来,人类活动的影响更加剧了黄河“健康状况”的恶化。当前黄河流域面临的环境问题实际是东西部经济发展、社会需求日益提高与维持黄河“健康稳定”、保护生态环境之间的矛盾,其关键问题是要解决黄河流域环境支持能力与社会需求之间的不平衡。

人民治理黄河(以下简称“治黄”)以来,围绕不同时期“治黄”生产实践的需要,不少学者从不同的角度对黄河的水沙特性与河道演变进行了大量的研究^[1,2],取得了丰硕的成果。但由于黄河问题的复杂性与时效性,对于在自然因素和人类活动双重作用下黄河流域水沙过程变异规律及河道的响应机制、泥沙侵蚀—搬运—沉积的机理、萎缩性河道演变规律及致灾机理等基础问题尚缺乏深入系统的研究。黄河流域水沙量与过程的大幅变化是导致黄河出现一系列新问题的重要原因之一,对黄河流域水沙过程变异规律及河道的响应机理的研究是新时期重新认识和治理黄河的基础。

1.1 黄河流域水沙过程变化概况

1.1.1 上游水沙过程的变异

黄河上游水沙过程变异除受自然条件的影响外,主要是受黄河干流控制性骨干工程(龙羊峡和刘家峡水库)运用及沿黄工农业用水的影响。据研究^[3],受人类活动及气候因素的影响,1990~1996 年头道拐水文站实测年水、沙量比 20 世纪 50 年代分别减少 68.4 亿 m^3 和 1.055 亿 t,减少比例分别为 28.7% 和 69.9%。灌溉用水和龙羊峡水库、刘家峡水库调节径流对黄河上游水沙过程变化的影响很大,1987~1996 年,上游年平均灌溉耗水量为 126 亿 m^3 ,汛期用水量约占 50%;龙羊峡水库、刘家峡水库联合运用调节径流使头道拐水文站汛期径流量减少 47.4 亿 m^3 ,非汛期增加径流量 38.2 亿 m^3 ,年平均减少径流量 9.2 亿 m^3 。灌溉用水和龙羊峡水库、刘家峡水库调节径流分别造成头道拐水文站年输沙量减少 1 亿 t 和 0.54 亿 t 左右;近年来,头道拐水文站日平均流量小于 1000 m^3/s 的天数占汛期总天数的比例从刘家峡水库建库前的 42.4% 增加到 80%;大流量出现机会减少,日平均流量在 2000 m^3/s 以上的天数占汛期总天数的比例从建库前的 14.7% 减少到

4.5%。汛期水量占年水量的比例由刘家峡水库修建前的60%多降为40%;非汛期出库流量加大,水流过程较均匀,日平均流量为 $500\sim 1000\text{ m}^3/\text{s}$ 。汛期水流挟沙能力降低,相同年水量时头道拐水文站年输沙量比刘家峡水库修建前减少20%~50%;上游河道淤积严重,年平均淤积量达0.652亿t,主要淤积在内蒙古河道,占总淤积量的70%;巴彦高勒至昭君坟河段, $1000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时的水位上升了1m;河道淤积主要与龙羊峡水库、刘家峡水库6~10月调节流量和过程,兰州以下支流的来沙,以及内蒙古十大孔兑高含沙洪水等情况有关;上游河道平滩流量大幅度减少,内蒙古河道的平滩流量从龙羊峡修建前的 $2500\sim 3000\text{ m}^3/\text{s}$ 减少到 $1000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

黄河上游水资源的优先开发利用,导致上游水沙过程发生变异,对黄河上游、中游、下游的河道演变均产生深远的影响。从总体上看,影响上游水沙过程变异的因素相对较简单,在认识上分歧不大。但上游水沙过程变异对不同河段河道演变的影响,尤其是定量的影响还有待深入研究。

1.1.2 中游水沙过程的变异

黄河中游的水沙过程变化是十分显著的,水利部黄河水沙基金项目研究结果表明^[4]:①对1986~1995年水沙系列,中游干流河口镇、龙门、潼关三个水文站天然径流量仅比1967年以前水沙系列减少10%~17%,但实测径流量却减少了81亿~165亿 m^3 ,减幅达31%~37%,实测沙量减少52%~70%。中游水沙量的减少主要集中在汛期,三个水文站汛期水量减少了87亿~139亿 m^3 ,导致年内水量分配发生根本性的变化,汛期水沙量占全年的比例分别由天然条件下的60%和80%~90%减少为40%和65%~80%。②伏汛期(7~8月)是黄河中游多沙粗沙区暴雨洪水多发季节^[5],其水沙过程的变化对黄河下游河道冲淤特性具有重大的影响,造成黄河下游淤积最为强烈的高含沙量洪水主要来自中游河龙区间。1986年后的水沙系列与1968年前的水沙系列相比,伏汛期干流主要水文站实测水、沙量分别减少约50%和60%。水、沙量的减少主要集中在 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上的大中流量级,这种高效输沙流量级出现概率明显减少,导致水流输沙能力降低。③秋汛期(9~10月)洪水主要来自黄河上游和渭河流域,来水含沙量较低,对中游、下游河道具有一定的冲刷作用。秋汛期径流量及洪水的增加能够减少中游、下游河道的淤积,抑制河道淤积萎缩的发展。与1968年前的水沙系列相比,1986年后的实测水沙量大幅减少,9月份实测水量减幅超过50%,而天然水量仅偏枯30%~25%,实测沙量减幅达65%~80%,龙门和潼关水文站的沙量分别由7.7亿t和11.7亿t减少到2亿多吨。9月下旬和10月份水、沙量的减幅分别达到55%~75%和60%~95%,与非汛期特征十分接近。秋汛期水沙量的减少主要集中在 $1000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量级, $3000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上的洪水很少发生,在此期间几乎没有洪峰,加剧了河道淤积萎缩的过程。④凌汛期(12月至次年2月),1986年后比1968年前实测水沙量增加,各月水量增幅达30%~90%,其中河口镇的水量增幅最大,而天然水量均偏枯,12月和1月天然水量减少20%~47%。在天然来水的基础上增加了日平均流量,河口镇为 $250\sim 300\text{ m}^3/\text{s}$,潼关为 $170\sim 210\text{ m}^3/\text{s}$,这加重了上游、中游、下游冲积性河段及中游水库的防凌负担。⑤春灌期(4~6月)中的5月、6月份虽然水库大量泄水,但因沿程大量引水造成水量剧减。1986年后与1968年前比较,5月份水量减幅达

50%~60%, 6月份水量减幅约为30%, 引起河道断流现象加重, 而天然水量在此时期变化不大。⑥在中游全沙来沙量减少的条件下, 各分组粒径泥沙量也均有所减少^[6], 河口镇各分组粒径泥沙量减幅相近, 约为80%, 龙门和潼关的粗粒径泥沙减幅最大, 达60%~70%, 中等粒径泥沙减少约为50%, 细粒径泥沙减幅最少, 约为40%, 因而全沙粒径变细, 多年平均 d_{50} 变小。当中游来沙量增大时, 粗粒径泥沙比例增大, 细粒径泥沙比例减小, 中等粒径泥沙变化不大, 来沙组成相应变粗。

1.1.3 中游水利水保工程对水沙过程变异的影响

黄河流域各地区治理开发程度不一, 采用的水利水保措施也不同, 对径流、泥沙和洪水的影响差别很大。据研究^[7], 由于龙羊峡、刘家峡两大水库的调节和大型灌溉工程的引水, 河口镇的洪峰流量和水量均有较大幅度的减少。刘家峡水库投入运用前, 河口镇洪峰流量的平均值约为 $2000 \text{ m}^3/\text{s}$, 洪峰水量大致与河口镇至龙门区间的来水量相等。刘家峡水库投入运用后, 河口镇的洪峰流量和水量减少约一半。黄河上游来水的减少, 使中游洪水的基流减少, 洪峰峰型尖瘦, 对洪水演进中的削减洪峰作用具有一定的影响。20世纪70年代以来, 黄河中游7月、8月份高强度大面积降雨量减少, 造成中游伏汛期洪峰有所降低, 但洪水发生概率仍较高。由于河口镇以上来水比例减少, 龙门洪水历时缩短, 洪峰更加尖瘦, 同时沙量更加集中, 洪水含沙量较高。在河口镇至龙门区间的诸支流中, 无定河和三川河的治理程度较高, 洪水有明显的降低; 佳芦河和清涧河的治理也有一定的影响, 有少数洪水与治理前一致; 其他一些支流, 特别是窟野河、皇甫川、孤山川等支流的洪峰流量大, 出现次数多, 目前还看不出水利水保工程对洪水的影响。

在相同降雨条件下, 20世纪70年代以后, 吴堡以下来水为主的洪水有一定的减少, 吴堡以上来水为主的洪水没有减少。潘贤娣等^[8]依据水利水保工程对不同降雨条件下减水、减沙及削减洪峰情况的不同, 将黄河中游各典型支流划分为三种类型: 第一种类型是以汾河为代表的治理程度较高的支流, 不仅在中常降雨条件下径流减少, 降雨-径流关系发生明显变化, 而且在较大暴雨条件下减水和减沙作用也较明显, 洪峰流量明显降低; 第二种类型是以无定河为代表的治理程度一般的支流, 其降雨-径流关系在中常降雨条件下有所减少, 大于某降雨级以后, 径流量减少不明显, 若遇高强度大暴雨, 洪峰流量没有发生明显的趋势性变化; 第三种类型是以窟野河、皇甫川、孤山川等为代表的治理程度较差的支流, 其降雨-径流关系及暴雨强度与洪峰流量的关系均没有发生趋势性的变化。

潘贤娣等^[9]通过分析河口镇至龙门区间不同时期7月、8月份降雨-径流-输沙关系得到: 在现状(20世纪80年代末)治理条件下, 中常降雨量所产生的区间径流量明显减少, 7月、8月份累积降雨量200~250 mm时, 比天然条件下减少径流量约10亿 m^3 , 且减水作用较稳定; 降雨量较小时径流量减幅较小, 但减少百分数较大; 受流域综合治理标准的影响, 大于250 mm降雨量后, 径流量减幅明显变小, 并且减水作用很不稳定。水利水保措施对于河口镇至龙门区间径流-产沙关系影响不明显, 对产沙作用的影响基本与对径流的影响同步。

分析表明^[4], 渭河上游(北道以上)在中等暴雨(降雨量40 mm)情况下, 治理后的洪水有明显的减少。泾河流域各地区的治理情况不同, 洪德至庆阳区间在降雨量为30~60 mm时, 洪水有减少的趋势, 其他地区看不出明显的变化, 所以对张家山的洪水影响不大;

由北洛河的暴雨与洪水关系中还看不出明显的变化,但其洪水大多来自刘家河以上,洪峰尖瘦,沿程洪峰流量削减很大。通过小流域对比观测资料的分析认为,治理程度达到 60% 以上时对洪水的影响有明显的提高,对于整条支流,治理程度要达到 30%~40%,对洪水才有比较明显的影响。

水利水保工程对暴雨洪水的影响研究虽然已经取得了一些成果,但关于其对水沙过程变异的影响机理、水沙过程变异引起冲积河道自动调整的过程和发展趋势等还有待深入研究。

1.1.4 下游水沙过程的变异

黄河下游的来水来沙条件在过去的几十年里发生了剧烈的变化^[10]。据表 1-1 所示的实测资料统计,1919 年 7 月至 1985 年 6 月的 66 年中,进入黄河下游的年平均水量、沙量和含沙量分别为 464 亿 m^3 、15.6 亿 t 和 33.6 kg/m^3 ,其中 1950 年 7 月至 1960 年 6 月进入下游的年平均水量、沙量和含沙量分别为 480 亿 m^3 、17.95 亿 t 和 37.4 kg/m^3 ;1964 年 11 月至 1973 年 10 月进入下游的年平均水量、沙量和含沙量分别为 426 亿 m^3 、16.3 亿 t 和 38.3 kg/m^3 ;1973 年 11 月至 1985 年 10 月进入下游的年平均水量、沙量和含沙量分别为 431 亿 m^3 、11.3 亿 t 和 26.2 kg/m^3 。1985 年 11 月至 1999 年 10 月进入黄河下游的年平均水量、沙量和含沙量分别为 278 亿 m^3 、7.64 亿 t 和 27.5 kg/m^3 。1999 年 11 月至 2002 年 10 月进入黄河下游的年平均水量、沙量和含沙量为 181 亿 m^3 、0.32 亿 t 和 1.77 kg/m^3 。在 1950~1960 年,进入下游的汛期日平均流量为 2550 m^3/s ,下游河道的平滩流量为 6000~8000 m^3/s ,大洪水漫滩的概率较多,10 000 m^3/s 流量以上的大洪水有 6 次,大洪水漫滩后滩地淤积了 22 亿 t,主槽冲刷了约 16 亿 t,维持了滩槽平行抬升,使我们得到了“大水出好河”及淤滩刷槽、滩高槽稳、槽稳滩存、滩存堤固等河道演变规律;在 20 世纪 70~80 年代中期,进入下游的汛期日平均流量为 2150 m^3/s ,河道的平滩流量为 4000~6000 m^3/s ,尚有 3 次大于 10 000 m^3/s 流量以上的大洪水漫滩,20 世纪 80 年代中期以来,汛期日平均流量不足 1000 m^3/s ,河道的平滩流量为 3000~4000 m^3/s ,最大的一次洪峰流量也只有 7860 m^3/s ;小浪底水库运行以来,汛期平均流量每秒只有几百立方米,根本没有大洪水漫滩,使部分河段平滩流量骤降到不足 2000 m^3/s 。由此可见,黄河下游来水来沙的变化趋势是水量和沙量大幅度减少,洪水发生的次数、洪峰的流量、水流漫滩次数及平滩流量等均大幅度减小。进入 20 世纪 80 年代中期以后,来水来沙过程也发生了变化,1989 年 11 月至 1999 年 10 月汛期来水量的比例已由过去的约占 60% 变为 43.6% 左右,表明进入黄河下游的水沙数量和过程均发生了重大变异。

表 1-1 黄河下游年平均来水来沙量情况统计表

时间(年.月)	来水量/亿 m^3	来沙量/亿 t	含沙量/(kg/m^3)	平滩流量/(m^3/s)
1950.7~1960.6	480	17.95	37.4	6000~8000
1964.11~1973.10	426	16.3	38.3	
1973.11~1985.10	431	11.3	26.2	4000~5000
1985.11~1999.10	278	7.64	27.5	3000~4000
1999.11~2002.10	181	0.32	1.77	部分河段不足 2000
1919.7~1985.6	464	15.6	33.6	

导致黄河下游来水来沙量大幅减少的原因主要有:①干支流大型水利枢纽的修建,三门峡水库、刘家峡水库、龙羊峡水库和小浪底水库等枢纽工程的建成,不仅减少了进入下游的径流量、洪峰流量与洪水次数,还改变了水沙过程;②上游、中游大量水土保持工程的修建,也减少了进入下游的水沙量,据分析^[4],年平均减少入黄水量 10 亿~30 亿 m^3 、年平均减少入黄沙量约 3 亿 t;③沿黄社会经济的发展,大量引水和调水,用水量大幅度增加,使径流量大幅度减小;④自然气候的变化,使降雨量偏小约 10%。

1.1.5 下游河道对水沙过程变异的演变响应^[10]

在三门峡水库修建前的 1950 年 7 月至 1960 年 6 月期间,下游河道为天然情况,这一时期进入下游的水量和沙量均较多,如表 1-2 所示。下游河道淤积的特点为:①艾山以上宽河段的淤积量明显大于艾山以下窄河段的淤积量,铁谢至利津年平均淤积量为 3.61 亿 t,其中艾山以上占 87.6%,艾山以下占 12.4%;②主槽淤积量较小,占总淤积量的 22.7%,滩地淤积量较大,占 77.3%,由于该时期发生洪水的次数较多,大漫滩的概率高,滩地淤积量大于主槽的淤积量,滩槽基本上是同步抬升。

表 1-2 黄河下游河道冲淤变化特征统计表

时间(年·月)	淤积量/亿 t	艾山以上淤积比例/%	主槽淤积比例/%	滩地淤积比例/%
1950.7~1960.6	3.61	87.6	22.7	77.3
1964.11~1973.10	4.39	84.5	67	33
1986.11~1999.10	2.26	88.9	70.4	29.6
1999.11~2002.10	-0.95		主槽冲刷	嫩滩 0.17

在三门峡水库改变运行方式和二次改建的 1964 年 11 月至 1973 年 10 月期间,下游河道年平均淤积量为 4.39 亿 t,其中艾山以上淤积量占总淤积量的 84.5%,艾山以下占 15.5%;下游河道主槽淤积量占总淤积量的 67%,滩地占 33%。

在龙羊峡水库投入运行后的 1986 年 11 月至 1999 年 10 月期间,下游河道年平均淤积量为 2.26 亿 t,其中艾山以上淤积量占总淤积量的 88.9%,艾山以下占 11.1%,这期间枯水历时较长,使进入下游的水沙条件进一步变化。下游河道的淤积特点为:①河道的淤积量占下游来沙量的比例增大,由 1950~1960 年的 20%增加到 30%;②主槽严重淤积萎缩,行洪断面大幅度减少,下游河道主槽淤积量占总淤积量的 70.4%,滩地占 29.6%;③高含沙、小洪水发生概率较高,使主槽和嫩滩严重淤积;④“二级悬河”不断发展,“槽高、滩低、堤根洼”的局面日趋严重,防洪形势严峻。

1999 年 11 月小浪底水库投入运用后,下泄水流的含沙量较低,下游河道的淤积趋势得到缓解,至 2002 年 10 月下游河道累积冲刷 2.84 亿 t,冲刷主要集中在高村以上河道,占全下游冲刷量的 98%。由于河道上冲下淤,河道泥沙搬家,高村至艾山河段发生了淤积,导致该河段平滩流量下降至不足 $2000 \text{ m}^3/\text{s}$,2002 年 7 月的小浪底水库调水调沙试验和 2003 年的秋汛期间,小浪底出库流量控制为 $2400\sim 2600 \text{ m}^3/\text{s}$,该河段即大面积漫滩,造成滩区灾害。该河段也是“二级悬河”发展最为严重的河段,防洪形势十分严峻。

综上所述,黄河流域来水来沙过程与河床边界条件随着治理开发程度的不断提高已

经发生了巨大的变化,水沙过程的变异引起了黄河上中下游河道强烈的冲淤调整。近年来,黄河下游河道主河槽淤积萎缩,明显降低了下游河道的排洪输沙能力,极易造成“小水大灾”的严重局面。如何处理黄河流域开发与资源环境的协调关系,确保黄河流域水资源的合理利用与防洪的安全,维持黄河的“健康生命”,维持流域社会经济的可持续发展,已成为我国政府十分关注的问题。为此,科技部将“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”列为国家重点基础研究发展规划项目(973项目),我们承担的“黄河水沙过程变异及河道的复杂响应”课题为上述973项目的第四课题(G1999043604),本书为该课题研究成果的系统总结。

1.2 研究内容与研究成果

1.2.1 研究内容与预期目标

本课题以水循环与水资源演化规律研究为基础,以自然因素和人类活动双重作用下流域水沙过程变异与河道萎缩为切入点,进而揭示水沙过程变异条件下河道产生“小水大灾”的机理,并提出了黄河下游河道治理与调控的措施。课题前两年的研究任务为:①研究流域土壤侵蚀动力学机制,探讨在人类活动条件下流域泥沙侵蚀—搬运—堆积的机理和水沙过程的变异规律,揭示在人类活动条件下流域产流产沙变化规律;②研究“小水大沙”型高含沙洪水的运动机理,探讨水沙过程变异对黄河下游河道演变的影响及河床加速抬升与河道行洪排沙能力不断降低的机制,预测下游河道的演变趋势;③研究黄河下游萎缩性河道的演变机理及其“小水大灾”效应,揭示不同频率来水来沙条件下水沙的共同致灾机理;④研究河道水沙过程动力平衡机理与临界阈值,包括来水来沙与河道的动力平衡机制和相应的临界阈值。在课题后三年的研究中,根据中期验收专家提出的课题中期评估意见,经课题组成员讨论,项目首席科学家同意删减了一些与别的课题重复的研究内容,加强了中期评估专家们所强调的内容。调整后的课题主要研究内容为:①研究植被发育、土壤侵蚀和人类活动三者之间的动力平衡,建立植被-侵蚀动力学的理论与方程,并应用于生态建设的效果评价。探讨在人类活动条件下流域泥沙侵蚀—搬运—堆积的机理和水沙过程的变异,揭示在人类活动条件下流域产流产沙变化规律。②研究水沙过程变异条件下黄河下游萎缩性河道的演变规律,探讨萎缩性河道的“小水大灾”效应及不同水沙条件下的致灾机理。③研究不同来水来沙条件下黄河下游河道的动力平衡机制、水沙变异后下游河道的复杂响应、黄河下游河道治理与调控的措施。

本课题预期的研究目标为:建立植被-侵蚀动力学理论,并应用于生态建设效果评价;揭示人类活动条件下流域水沙过程变异规律、萎缩性河道演变规律与致灾机理、不同来水来沙条件下黄河下游河道的动力平衡机制;提出黄河下游河道治理与调控的措施。

1.2.2 主要研究成果

经过课题负责人及全体参加人员5年的共同努力,本课题在侵蚀-植被动力学、黄河中下游多系统互动泥沙数学模型、人类活动对水沙过程变异和流域侵蚀—搬运—堆积过

程的影响、河道萎缩机理、黄河下游河道治理与调控措施等方面取得了多项创新性的研究成果,一些成果为首次提出的,课题取得的研究成果可以概括为“三个模型的建立、四项理论研究进展和四项应用研究进展”。本课题在国内外期刊上共发表学术论文 110 篇,其中被 SCI 收录论文 23 篇,被 EI 收录论文 30 余篇,国际会议特邀报告 10 篇,国内会议特邀报告 8 篇,出版科研报告 20 余份,出版专著 2 部,完成了课题任务书所要求的各项研究内容,达到了课题任务书所确定的研究目标。

1. 三个模型的建立

(1) 在植被-侵蚀动力学模型研究方面,采用理论分析、现场调研及资料分析等手段,研究了植被演变、土壤侵蚀、人类活动三者之间的相互关系,揭示了生态动力学系统与植被覆盖关系的变化机理,在量化各种生态应力的基础上,从理论上建立了植被-侵蚀动力学模型,并应用于黄土高原、云南和北京等不同类型小流域的生态建设和效果评价。

(2) 在黄河中游、下游多系统互动泥沙数学模型研究方面,基于非均匀不平衡输沙理论,考虑了支流入汇和区间耗水对水流的影响,针对黄河高含沙水流的特性,以黄河小北干流、渭河下游、三门峡水库、小浪底水库和黄河下游为研究单元,建立了一套能反映流域内各单元间互动关系的整体数学模型;该模型在潼关高程、黄河下游冲淤临界阈值及大型水利枢纽对黄河下游河道的减淤效果等方面得到了很好的应用。

(3) 在萎缩河道实体模型研究方面,以黄河下游游荡性河道为对象,在模型设计中充分考虑了游荡性河道的演变特征、高含沙水流运动特点及河道萎缩过程研究的技术要求,确保了模型满足动床试验的各种相似条件,经采用 1987 年水沙过程的验证,表明实体模型可以应用于黄河萎缩机理的研究。

2. 四项理论研究进展

(1) 在黄河下游河道萎缩机理研究方面,通过实测资料分析、数学模型、实体模型和理论分析等方法,对黄河下游河道萎缩的定义、河道萎缩与水沙条件的关系、河道萎缩的过程与演变机理、河道行洪能力对河道淤积萎缩的响应、河道萎缩的“小水大灾”效应及致灾机理等方面进行了深入研究。

(2) 在水沙过程变异与流域泥沙侵蚀—搬运—堆积机理研究方面,采用实测资料和理论分析的方法,探讨了人类活动对流域泥沙侵蚀—搬运—堆积特性及流域泥沙输移比的影响;采用地理环境要素法分析了水沙过程变异特性及成因,提出了黄河中游流域系统的水沙过程变异受到了环境要素的综合影响,建立了环境要素和人类活动对水沙过程变异影响的定量关系;运用流域系统中产流产沙子系统与泥沙输移子系统、泥沙沉积子系统耦合关系的概念,对黄河干流高含沙水流的形成及发生频率进行了研究。

(3) 在黄河下游河道动力平衡临界阈值与调控机理研究方面,利用黄河多系统互动泥沙数学模型,分析了不同来水来沙条件下黄河下游河道的冲淤响应,提出了下游河道冲淤平衡的临界阈值;根据地貌临界理论,研究了下游河道萎缩的外部 and 内部阈值,通过对下游河道河床组成的研究,提出了判别不同河型的临界指标。

(4) 在黄河口水沙变异与演变响应研究方面,研究了黄河口水沙输移与河口演变的