



黄河

泥沙粗细分治的理论与实践

曹如轩 秦毅 程文 谭培根 钱善琪 著



科学出版社

黄河泥沙粗细分治的 理论与实践

曹如轩 秦 毅 程 文 谭培根 钱善琪 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是论述黄河治理决策方面的专著,共11章,两个附录。在分析研究黄河来水来沙特性、低温输沙特性和粗泥沙运动特性的基础上,阐明黄河冲积平原河段纵横断面变化的趋向、河道游荡的成因以及不游荡的缘由,进而提出黄河中游河道对粗泥沙进行时空调节的机理。通过研究自排沙廊道输沙特性及螺旋流流场特征,认识到自排沙廊道具有高效排粗沙的能力。从而提出以自排沙廊道系统工程对黄河泥沙进行粗细分治的治理方案,以解决黄河四个冲积平原河段的游荡问题。

本书的分析研究方法有新颖独到之处,机理阐述清晰,可供泥沙、地理、环境、水文等方面的科技人员、大专院校师生和河流管理部门相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄河泥沙粗细分治的理论与实践/曹如轩等著. —北京:科学出版社, 2015. 6

ISBN 978-7-03-044802-6

I. ①黄… II. ①曹… III. ①黄河-泥沙-河道整治-研究 IV. ①TV152

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 124400 号

责任编辑:祝 洁 杨向萍/责任校对:李 影

责任印制:赵 博/封面设计:红叶图文

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:18 1/4 彩插:1

字数:370 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 一

钱宁先生在分析了黄河中游粗泥沙来源区的泥沙对黄河下游冲淤的影响后,提出了“集中治理粗泥沙来源区,对减少黄河下游的淤积具有重要意义”的著名论断。钱正英称钱宁的集中治理黄河中游粗泥沙来源区的成果是治黄认识上的一个重大突破,并且十分关心治理粗沙区的落实情况。近 20 年来,粗沙区治理已初见成效,窟野河等支流经治理后,1997~2006 年与 1970~1996 年相比,来沙减少了 70.9%~88.4%。当然,减沙这么多,除治理的成效外,近期降雨强度小、没有大洪水也是一个原因。

然而,来水来沙减少只是缓解了下游河道、水库的淤积,水库(如小浪底水库)的库容总是有限的,当调沙库容淤满水库转为“蓄清排浑、调水调沙”运用后,下游河道又将回淤。所以尚存在水库减淤和下游减淤不可兼得、河道运动的天然属性与人类生存条件之间的矛盾等问题,因此仍有必要探索解决矛盾问题的途径。

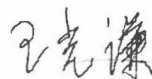
《黄河泥沙粗细分治的理论与实践》一书依据已有研究成果,着重论证了受黄河下游输沙特性的制约,小浪底水库不能仅靠“蓄清排浑、调水调沙”达到既可长期保持有效库容、下游河道又不淤积的目标。若配合泥沙粗细分治,在挟沙水流进入黄河下游前,用自排沙廊道系统工程拦截粗沙,排出的粗沙加以利用或放淤,使之不进入下游,这样水库减淤和下游减淤可以兼得。书中还论证了粗沙集中堆积且两岸无约束是河道游荡的根源,拦截粗沙使之不进入冲积平原河道,就可以使游荡河道变窄,开垦出数百万亩良田;内蒙古河段的淤积和游荡河段的形成是沙漠沙进入黄河所致,面临利用人造洪峰减淤或粗细分治使河道减淤的选择。全书采用的论证资料主要引用已公开发表的著作和论文中的资料,论证是较有说服力的。

该书分析研究了对黄河下游有害的粗沙是在地理、地质、气候、水文等多因素的综合作用下,由上、中游输往下游,首次揭示了低温效应对粗沙输移链的作用。“汛期高温期间,北干流淤积,小北干流削峰滞沙。低温期在低温效应作用下,汛期淤积的粗沙被小流量持续不断地往下输移,既影响潼关河床使潼关高程抬高,又影响下游,使下游建库前年均淤积约 0.7 亿 t;建库后非汛期粗泥沙淤积在水库中,汛期排沙时,淤沙连同来沙一起排出水库,因排出的泥沙粗,下游

淤积比可达到 53%”。这些论述是对钱宁先生粗沙治理论述的继承和补充。

书中较全面地论述了自排沙廊道截排粗沙的特性及应用前景，应创造条件及专项进行深入研究。

书中提出利用三门峡基岩天然落差布设自排沙廊道降低潼关高程的设想极富启发性，应予以关注。



中国科学院院士

序 二

《黄河泥沙粗细分治的理论与实践》一书的主要内容是继承钱宁先生关于“粗沙是黄河下游淤积的症结”这一著名论断撰写的，但又有发展。

该书作者对众所关注的泥沙问题的机理分析、内容选择有独创的见解。提出了“粗沙链”的新颖观点，用研究粗沙链中链源、链身、链尾之间的关联与断裂，来揭示黄河上、中、下游粗沙的输移和冲淤之间的相互联系，突出了黄河低温效应、沿程增能效应和冻融效应对粗沙输移的影响。

该书以挟沙力双值理论分析了冲积平原河流中的粗沙链，得出黄河冲积平原河流在天然状态下就没有富余挟沙力，稍受人为干扰就淤积，而且再不能恢复原状，所以它不能达到输沙平衡，必然处于相对冲淤平衡又微淤的状态，揭示了潼关高程问题的根源，也为传统的下泄大流量冲刷冲积平原河流淤积的方案提供了值得商讨的空间。

该书作者对一些看似平常却很重要的现象和问题有敏锐的观察，如发现三门峡坝址基岩的天然落差有溢流坝功能，配合自排沙廊道系统工程，可用以降低潼关高程。分析研究潼关高程的著作甚多，但都没有关注到这一天然落差可利用之处。

公认的黄河小北干流、黄河下游游荡的基本原因为“河床的堆积抬高和两岸不受约束”。书中提出了“粗沙迅速集中地由悬移运动转为推移运动和两岸不受约束是河流游荡的充分必要条件”，点出粗沙迅速集中悬移质转推移质比河床堆积抬高更为明确，并且用渭河、北洛河的实例论证了若不满足迅速集中悬移质转推移质的条件，即使河床堆积抬高和两岸不受约束，河道也可以不游荡。

该书作者通过自排沙廊道的原型实践、物理模型试验和数值模拟揭示了廊道中纵向螺旋流排粗沙效率高、耗水率很小的机理，与粗沙链的研究相结合，提出了黄河泥沙粗细分治的设想，为水库减淤、下游河道减淤二者兼得提供了空间。

鉴于该书的特点，值得一读。

19/李纯

西安理工大学教授

前 言

20 世纪 80 年代末, 钱宁先生发现黄河下游的淤积主要是粒径 $d > 0.05\text{mm}$ 的泥沙造成的, 重点治理粗沙来源区会取得减淤效果。为此, 西安理工大学水利水电学院参与了中国水利水电科学研究院主持的有关粗沙运动特性研究的自然科学基金项目、水利部主持的水沙变化基金项目和清华大学主持的“八五”攻关项目的研究工作, 参与了黄河水利委员会勘测规划设计研究院 (简称黄委设计院, 现已更名为黄河勘测规划设计有限公司) 委托的重点工程中粗沙数学模型、粗沙异重流的试验等的分析研究工作, 对粗沙的运动特性有了较深入的了解。2006 年以来, 结合黄河上游宁蒙河段河床演变的研究, 又认识到低温效应的时空调节下, 黄河上、中、下游的粗沙链形成、连接和断裂的机理。

潘贤娣、李勇、张晓华等分析了 1965~1990 年 198 场不同泥沙源区来的洪水在下游河道的沿程冲淤资料, 得出多沙粗沙来源区的洪水, $d = 0.05 \sim 0.1\text{mm}$ 的泥沙淤积比高达 85.5%, $d > 0.1\text{mm}$ 的泥沙几乎全淤; 即使是少沙来源区的洪水, $d = 0.05 \sim 0.1\text{mm}$ 的泥沙有冲有淤, 但 $d > 0.1\text{mm}$ 的泥沙淤积比仍高达 78.9%, 说明粗沙多来多淤不多排, 黄河下游排粗沙能力极低。

费祥俊、傅旭东、张仁分析了 1960~1996 年黄河下游不漫滩洪水中的冲淤资料, 得出排沙比与来沙系数成反比关系。这表明只有水库蓄水拦沙, 下泄水流含沙量很低时, 下游河道排沙比为 100%, 否则下游河道淤积量大于入海沙量。

韩其为根据三门峡水库不同运行方式下, 下游河道的冲淤资料, 建立了下游河道排沙比与水库排沙比的关系式, 得出当水库排沙比大于 0.7 时, 下游河道淤积, 当水库排沙比小于 0.5 时, 下游河道出现明显的冲刷。

从这些研究成果中, 作者认识到只要是冲积平原河流包括黄河下游就没有富余挟沙力, 问题的关键是用什么方法拦减粗沙。2003 年, 我院校友谭培根教授创建了一种新型的排粗沙效率高的自排沙廊道, 作者认为这种廊道为拦截粗沙提供了新方法。为此, 我院秦毅教授、王新宏教授指导研究生进行了自排沙廊道物理模型试验, 得出廊道排出的挟沙水流含沙量高、颗粒粗, 而所需的流量很小。程文教授指导研究生用数学模型得出廊道中的螺旋流沿程的持续变化。这些研究说明了廊道中的螺旋流排沙不同于明渠流和管流, 反映出螺旋流排沙效率高的机理。

作者通过多项粗沙运动特性研究成果积累,以及同行对黄河下游河道排沙比、淤积率等输沙特性研究的启示,认识到冲积平原河流中粗沙的运动受到水流挟沙力双值关系的制约,冲淤有别,淤多冲少,易淤难冲,不可能通过下泄大流量冲沙予以解决。因此,提出了“黄河泥沙粗细分治”的论点,利用自排沙廊道系统工程缓解冲积平原河流粗沙的淤积。

本书共 11 章,两个附录。秦毅撰写第 3 章、第 9 章,程文撰写第 10 章,谭培根撰写附录 1,其余由曹如轩、钱善琪撰写。

多年来,研究组成员间互尊互容、相互切磋,完成了本书的撰写。为研究工作作出贡献的还有王新宏、巨江、郭崇、李勇、邓贤艺等同仁,研究生杨洪艳、韩海军、陈琛、李子文、王凤龙、李锦璐,白少智、闫丹丹等也提供了不同方面的帮助,在此深表感谢。

本书的很多论述依据研究团队出版的专著和研究报告,在此向这些专著和报告的作者:潘贤娣、赵业安、徐建华、张仁等深表感谢。同时,本书的出版得到西安理工大学水利水电学院领导的支持,也得到了水文水资源学科的资金支助,并获得科技部国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB403305)提供的研究机会与支持,在此一并深表感谢。

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 与时俱进治粗沙	1
1.1 治黄认识上的突破	1
1.2 粗细泥沙分治	6
1.2.1 分治的必要性	6
1.2.2 分治的技术系统	13
1.3 三门峡基岩天然落差的利用	14
1.3.1 三门峡基岩的溢流坝功能	14
1.3.2 根治渭河下游洪涝盐碱灾害	15
第 2 章 黄河来水来沙特性	17
2.1 流域概况	17
2.2 径流、洪水特征	18
2.2.1 年径流量	18
2.2.2 洪峰流量	20
2.3 泥沙特征	22
2.3.1 沙量大, 含沙量高	22
2.3.2 水沙异源	24
2.3.3 泥沙粒径组成	26
2.4 水沙协调性问题	30
2.4.1 黄河上游水沙协调性分析	30
2.4.2 黄河中游水沙协调性分析	31
2.4.3 黄河下游水沙协调性分析	35
2.5 近期来水来沙减少原因分析	36
2.5.1 自然因素影响	36
2.5.2 人为活动影响	37
第 3 章 黄河低温输沙特性研究	38
3.1 黄河上、中、下游凌情概况	38

3.1.1 黄河上游宁蒙河段	38
3.1.2 黄河中游河段	39
3.1.3 黄河下游河段	40
3.2 低温期河道输沙特征	40
3.2.1 已有成果简介	40
3.2.2 黄河上、中、下游低温时空分布	41
3.2.3 宁蒙河段低温期输沙特性	43
3.2.4 北干流低温期冲淤特性	49
3.2.5 小北干流低温期的冲刷特性	51
3.2.6 黄河下游低温期输沙特性	54
3.3 塑就低温输沙特性的机理	55
3.3.1 低温效应	55
3.3.2 沿程增能效应	58
3.3.3 冻融效应	60
3.4 影响低温输沙的次要因素	60
第4章 粗泥沙运动	63
4.1 粗泥沙的粒径界定	63
4.1.1 河道淤积物含量界定法	63
4.1.2 河流动力学界定法	69
4.1.3 泥沙运动形态界定法	69
4.2 粗泥沙运动的基本规律	72
4.2.1 推移质与悬移质的区别	72
4.2.2 粗泥沙的运动特性	73
4.3 来沙组成及含量对河道冲淤的影响	79
4.3.1 不同水沙条件下游冲淤量变化	79
4.3.2 粗、中、细沙淤积的相互影响分析	81
4.3.3 各级流量下不同粒径泥沙冲淤变化	84
4.3.4 高含沙洪水不同粒径泥沙沿程冲淤量	86
4.3.5 粗泥沙是淤积主体	86
第5章 黄河输沙特性	88
5.1 影响水流输沙的因素	88
5.1.1 来水来沙对输沙率的影响	88
5.1.2 边界条件对输沙率的影响	90
5.2 不平衡输沙理论	90
5.2.1 含沙量沿程变化	90
5.2.2 水流挟沙力	91

5.3 高含沙水流挟沙力	93
5.3.1 浑水的沉降特性	93
5.3.2 高含沙浑水的流变特性和静态极限切应力	94
5.3.3 高含沙浑水的沉速	97
5.3.4 挟沙力双值关系	98
5.4 高含沙水流的输沙特性	101
5.4.1 细沙高含沙水流的输沙特性	101
5.4.2 粗沙高含沙水流的输沙特性	103
5.5 高含沙洪水演进中的异常现象	105
5.5.1 洪水位创新高机理	105
5.5.2 流量沿程增加机理	105
5.5.3 “驼峰”现象	106
第6章 黄河下游纵横断面变化基本规律	108
6.1 影响纵横剖面变化的主要因素	109
6.1.1 来水来沙条件的影响	109
6.1.2 侵蚀基准面的影响	114
6.1.3 河道周界条件	116
6.2 黄河下游纵剖面形态	117
6.2.1 黄河下游纵剖面形态特征	117
6.2.2 黄河下游纵剖面沿程调整分析	120
6.3 黄河下游横断面形态	123
6.3.1 黄河下游横断面形态特征	123
6.3.2 三门峡水库运用方式对下游横断面形态的影响	124
6.4 黄河下游河相关系	127
6.4.1 造床流量	127
6.4.2 纵剖面河相关系	127
6.4.3 横断面河相关系	128
6.5 河道游荡成因	131
6.5.1 已有成果简介	131
6.5.2 悬推转换集中迅速且两岸无约束是河流游荡的根源	134
6.5.3 冲积平原河流不游荡的成因分析	142
第7章 黄河中游对粗沙的时空调节	150
7.1 北干流是粗沙的转运调节通道	150
7.1.1 北干流概况	150
7.1.2 支流的水沙	157
7.1.3 粗沙转运调节机理	158

7.2 小北干流是黄河粗沙的时空调节通道	159
7.2.1 小北干流概况	159
7.2.2 低温期冲淤特性	160
7.2.3 高温期冲淤特性	163
7.3 潼关至三门峡河段对粗沙的调节	164
7.3.1 潼三河段概况	164
7.3.2 河段冲淤特性	164
7.4 渭河下游对粗沙的调节	165
7.4.1 渭河下游概况	165
7.4.2 天然情况下渭河下游冲淤特性	166
7.4.3 三门峡建库后渭河下游的冲淤演变	167
7.5 中游泥沙时空调节对下游的影响	169
第8章 利用三门峡基岩天然落差降低潼关高程	171
8.1 重新认识天然情况下的潼关高程问题	171
8.1.1 地理位置的独特性	171
8.1.2 天然情况下影响潼关高程的因素	172
8.1.3 天然情况下潼关河床处于动态冲淤平衡微淤状态	177
8.2 重新认识建库后潼关高程问题	179
8.2.1 潼关高程演变特性	179
8.2.2 潼关高程居高不下的原因	186
8.3 潼关高程成为问题的原因及影响	188
8.3.1 小北干流演变加剧	189
8.3.2 渭河下游洪涝盐碱灾害严重	190
8.4 降低潼关高程的方案	191
8.4.1 敞泄排沙降低潼关高程	191
8.4.2 黄河下游输沙特性对水库蓄清排浑运用的制约	193
8.4.3 自排沙廊道排沙	197
第9章 黄河宁蒙河段的产沙、输沙特性	199
9.1 宁蒙河段概况	199
9.1.1 自然地理	199
9.1.2 河流环境	200
9.2 粗沙来源	203
9.2.1 水沙异源特征	203
9.2.2 粗泥沙进入宁蒙河段的形式	205
9.3 粗沙的输移与河床演变	206
9.3.1 天然情况下粗沙的输移与河床变化	206

9.3.2 人类活动影响下粗沙的输移	213
9.4 近期河床演变趋势分析	215
9.4.1 径流量减少	215
9.4.2 区间来沙增加	216
9.4.3 用水量增加	216
9.4.4 河床的演变趋势	216
9.5 宁蒙河道治理方案分析	217
9.5.1 下泄大流量冲刷方案	217
9.5.2 自排沙廊道治理方案	221
第10章 一种新型的排粗沙建筑物——自排沙廊道	222
10.1 廊道中三维水流的数值模拟	222
10.2 廊道的功能演变	223
10.2.1 第一代廊道	223
10.2.2 第二代廊道	225
10.2.3 自排沙廊道	226
10.2.4 自排沙廊道在沉沙池中的应用	230
10.2.5 自排沙廊道排粗沙效率高的机理	230
10.3 自排沙廊道的优化设计	231
10.4 应用前景	231
10.4.1 游荡河道变窄的“希望工程”	232
10.4.2 有利于环境保护	233
10.4.3 增大城市下水道排水能力	235
第11章 高含沙水流长距离输送	237
11.1 明渠高含沙输送	238
11.1.1 输送浓度的选择	238
11.1.2 明渠设计	239
11.2 管道高含沙输送	245
11.2.1 管道高含沙输送的能量损失	245
11.2.2 管道高含沙输沙的临界流速	246
11.2.3 管道输送设计步骤	248
11.2.4 高浓度长距离输送需研究的问题	249
11.3 结论	249
参考文献	254
附录1 东雷抽黄灌区自排沙廊道技术应用十年回眸	258
附录2 1967~1968年渭河淤塞、归流纪实	273
彩图	

第 1 章 与时俱进治粗沙

1.1 治黄认识上的突破

黄河下游是一条强烈的堆积性河流，黄河的泥沙主要来源于中游黄土地区，历史上黄河下游灾害频繁，泥沙问题是治黄的一个重要问题，已形成共识。钱宁等（1980）分析实测资料，探索黄河中游多沙粗泥沙来源区洪水对下游河道冲淤的影响，将洪水来源分成四个区域：

1 区：河口镇以上，来沙较少，是少沙来源区。

2 区：河口镇至龙门区间，马莲河、北洛河属于多沙粗泥沙来源区。

3 区：除去马莲河以外的泾河干支流，渭河上游、汾河属于多沙细泥沙来源区，渭河南山支流则为少沙来源区。

4 区：伊洛河、沁河是少沙来源区。

此外，还根据洪峰来水地区的分布情况，将下游洪水来源分为六种不同的组合：

- (1) 各地区普遍有雨，强度不大；
- (2) 多沙粗泥沙来源区有较大洪水，少沙区未发生洪水或洪水较小；
- (3) 多沙粗泥沙来源区有中等洪水，少沙区也有补给；
- (4) 多沙粗、细泥沙来源区与少沙区较大洪水相遇；
- (5) 洪水主要来自少沙区，多沙粗泥沙来源区雨量不大；
- (6) 洪水主要来自多沙细泥沙来源区。

统计分析了代表天然状态的 1952～1960 年以及代表有水库调节的 1969～1978 年两个时段中，103 次不同洪水组合的下游淤积强度资料，见表 1-1。分析表明，下游的严重淤积主要是多沙粗泥沙来源区的洪水造成的。第（1）种组合多地普遍降雨，但强度小，来沙系数平均为 $0.0216\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ ，淤积强度 341 万 t/d，出现机遇仅为 6.8%，淤积量仅占总量 4%。第（2）种组合的洪水多系暴雨产生，峰型尖瘦，汇入干流后不漫滩或小漫滩，来沙系数最大，平均为 $0.0516\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ ，故下游淤积严重，平均淤积强度达到 3100 万 t/d。第（2）种组合的 13 次洪水淤积量占全部 103 次洪水淤积量的 59.8%，对下游危害性最大。第（3）种组合洪水因有少沙区来水的补给，平均来沙系数降为 $0.036\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ ，淤积强度平均为 545 万 t/d，这种组合洪水出现次数最多，出现 22 次，占总数的 21.4%，淤积量占总量的 13.6%。第（4）种组合的最大特征是洪峰流量大，花

表 1-1 1952~1960 年及 1969~1978 年期间洪水来源的几种主要组合及对下游河道冲淤的影响

洪水来源组合	各种组合 洪峰次数	各种组合 出现的比 例/%	花园口洪峰特征		各地区来水占 三黑小水量/%				各地区来沙占 三黑小沙量/%				下游河段冲淤强度 /(万 t/d)				各种组合的 洪水所造成 的淤积量占 全部洪峰淤 积量/%	
			Q_m /(m^3/s)	$(\bar{S}/\bar{Q})$ /($kg \cdot s/m^6$)	I	II	III	IV	I	II	III	IV	高村 以上	高村— 艾山 以下	全下游			
(1)各地区普遍有雨,强度不大	7	6.8	3680	0.0216	29.9	22.3	26.8	17.1	3.7	59.6	34.2	5.6	6.4	-44.1	341.3	4.0		
(2)多沙粗泥沙来源区有 较大洪水,少沙区未发洪 水或洪水较小	13	12.6	6830	0.0516	26.8	60.8	18.1	6.3	1.2	122.5	15.9	0.3	2620	349.0	131.0	59.8		
(3)多沙粗泥沙来源区 有中等洪水,少沙区也 有补给	22	21.4	4280	0.0360	46.0	33.3	14.8	8.5	5.6	97.0	17.7	0.9	515	67.0	-37.0	13.6		
(4)多沙粗、细泥沙来源 区与少沙区较大洪水相遇	10	9.7	11742	0.0131	23.7	24.2	26.1	22.8	3.0	72.2	30.2	5.2	1313	856.0	-271.0	28.2		
(5)三个少沙区同时来水	6	5.8	4750	0.0110	56.8	9.9	21.6	11.3	10.2	40.0	23.2	1.6	-148	25.6	-44.2	-166.6	-1.9	
	洪粗 水泥 两个 少沙 区同 区时 来水	4	4620	0.0093	64.6	10.8	26.7	4.5	13.1	52.5	42.4	2.8	250.3	-67.4	-107.8	75.1	0.4	
		3	3520	0.0094	57.2	4.6	18.6	15.0	15.9	35.4	14.1	3.4	125.3	-97.6	-87.4	-59.7	-0.1	
	洪粗泥沙主沙区要来水	47	45.6	5150	0.0102	30.1	10.2	40.7	17.2	8.1	26.0	44.4	6.1	-38.1	-30.1	-111.5	-179.7	-4.6
		15	14.6	3830	0.0113	75.8	9.9	10.2	3.5	19.2	56.0	8.3	0.3	61.5	-13.0	-46.4	2.1	-1.2
洪粗泥沙主沙区要来水	13	12.6	4920	0.0074	41.7	1.3	63.5	5.8	7.0	9.4	39.2	0.2	205.0	86.0	-288.0	2.0	0.0	
	1	1.0	5400	0.0119	33.5	11.2	7.8	38.5	7.3	49.0	9.2	15.5	-214.4	38.7	-57.0	-232.7	-1.6	
	5	4.9	5730	0.0210	34.0	8.8	46.0	9.0	4.6	21.5	72.3	1.0	572.0	245.0	115.0	932.0	3.4	
(6)洪水主要来自多沙 细泥沙来源区	4	3.9	5500	0.0226	42.3	23.4	22.6	12.5	7.7	66.8	25.6	3.1	615.0	144.1	-53.5	705.6	平均	

注: Q_m 为洪峰最大流量; $\bar{S}/\bar{Q}$ 为洪峰平均来沙系数, 其中 $\bar{S}$ 及 $\bar{Q}$ 分别为洪峰期平均含沙量及流量。

园口最大洪峰流量的平均值达到 $11742\text{m}^3/\text{s}$, 水流多漫滩, 来沙系数 $0.0131\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$, 因洪水漫滩, 下游河道淤积强度达到 1898万 t/d , 10 次洪水的淤积量占总量的 28.2% 。这种组合洪水多为淤滩刷槽, 大水出好河, 流量大, 挟沙力大, 山东河段一般都出现冲刷, 冲刷强度 271万 t/d , 对山东河段保持稳定的深槽起了很大作用。第 (5) 种组合洪水花园口来沙系数为 $0.0074 \sim 0.0119\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$, 下游发生长距离冲刷。第 (6) 种组合虽然洪水来自细泥沙源区, 但含沙量变幅大, 含沙量高时, 仍含一定量的粗泥沙造成下游河道淤积, 含沙量小时, 河槽冲刷。

钱宁等分析了来沙系数 $\bar{S}/\bar{Q}$ 与下游河道冲淤强度的关系, 发现点群有明显的分区性。第 (2) 种组合的洪水产生的淤积强度最大, 充分说明多沙粗泥沙来源区的洪水对下游的危害严重。 $d > 0.05\text{mm}$ 的粗泥沙主要集中在两个区域内, 一为皇甫川至秃尾河等各条支流的中下游地区, 粗泥沙输沙模数达 $10000\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 另一区域为粗泥沙输沙模数在 $6000 \sim 8000\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的无定河中下游及粗泥沙输沙模数约 $6000\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的广义的白于山河源区。

钱宁 (1980) 正是从这些分析中提出了“集中治理粗泥沙来源区, 对减少黄河下游的淤积具有重要意义”的著名论断。钱正英称钱宁的集中治理黄河中游粗泥沙来源区的成果是治黄认识上的一个重大突破, 并且十分关心治理粗沙区的落实情况。1989 年 9 月 15 日她在听取了黄河水利委员会关于窟野河、秃尾河、孤山川规划汇报时指出: “钱宁同志关于治理多沙粗沙区的论文得奖已 10 年, 去世已几年了, 但多沙粗沙区的治理仍停留在纸面上。”她进一步指出: “对于黄河减沙问题, 可能有三种结论: 一种是只靠面上加快水土保持治理进度, 不需要布设拦泥工程措施; 第二种是除了面上水土保持措施外, 再搞些治沟骨干工程, 这些工程水保经费又不能解决, 从黄河大局出发, 水利部可以考虑列入基建, 治沟骨干工程标准可以高一些, 按基建补助; 第三种是除上述二种措施外, 在三条河干流下游可以考虑设大型拦泥库, 黄委设计院要研究一下, 如果没有可能, 也要做一个结论” (张胜利, 1995)。

近 20 年来, 粗沙区治理已初见成效, 窟野河等支流经治理后, 1997~2006 年与 1970~1996 年相比, 来沙减少了 $70.9\% \sim 88.4\%$ (姚文艺等, 2011)。当然, 减沙这么多, 除治理的成效外, 近期降雨少、没有大洪水也是减沙的主要原因。

徐建华等 (2000) 的研究提出了多沙粗泥沙区域界定原则、方法和指标体系。界定方法采用输沙模数指标法, 多沙区指全沙输沙模数 $M_{\text{全}} \geq 5000\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的地区, 粗沙区指 $d > 0.05\text{mm}$ 粗泥沙输沙模数 $M_{\text{粗}} \geq 1300\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的地区, 多沙粗泥沙区为 $M_{\text{全}} \geq 5000\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 并且 $M_{\text{粗}} \geq 1300\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的地区。根据内业分析、外业勘查和卫星地貌影像, 确定了黄河中游多沙区面积 11.92万 km^2 , 粗沙区面积为 7.86万 km^2 , 多沙粗沙区面积为 7.86万 km^2 , 占河口镇至桃花峪区间总面积的 22.8% , 产沙 11.82亿 t , 占中游输沙量的 69.2% , 产生的粗泥沙量

3. 19 亿 t，占中游总粗泥沙量的 77.2%。

徐建华等还研究了粗沙产沙输沙规律，得出黄土产沙、基岩产沙、风沙产沙是粗沙区产沙的主要成因，提出了加强多沙粗沙区的水土流失治理是减少黄河下游河道淤积的关键。

潘贤娣等（2006）统计分析了黄河下游 1965~1990 年 198 次洪水资料，并按洪水来源区的不同分成多沙粗泥沙来源区洪水 14 次，多沙细泥沙来源区洪水 108 次，少沙来源区洪水 76 次。分别统计 $d<0.025\text{mm}$ 的细泥沙、 $0.025\sim0.05\text{mm}$ 的中泥沙、 $0.05\sim0.1\text{mm}$ 的粗泥沙、 $d>0.1\text{mm}$ 的更粗泥沙及全沙在下游的冲淤量及分布。表 1-2~表 1-4 为三门峡至利津四个分河段、分粒径组泥沙的冲淤量和淤积比、排沙比。表中数据全面地反映了三个不同泥沙来源区洪水中，各粒径组泥沙沿程冲淤调整和输移特性，揭示了无论洪水来自何方，粗泥沙及更粗泥沙的淤积比均最大，少沙来源区的洪水 $0.05\text{mm}<d<0.1\text{mm}$ 的粗泥沙沿程有两个河段冲，但排沙比最小，而 $d>0.1\text{mm}$ 的更粗泥沙仍是全程淤积的，淤积比达 78.9%，这表明 $d>0.1\text{mm}$ 的泥沙多来多淤不多排。此外，不论洪水来源如何，粗泥沙都集中淤积在高村以上的游荡河段，反映了粗细泥沙运动规律的不同，提示了粗泥沙何以是下游淤积的症结所在。

表 1-2 多沙粗泥沙来源区洪水下游河道各粒径组泥沙冲淤量

泥沙各粒径组 /mm	三十黑+武 来沙量/亿 t	冲淤量/亿 t					淤积比（淤积量 /排沙量）/%
		三门峡— 花园口	花园口— 高村	高村— 艾山	艾山— 利津	全下游	
<0.025	18.88	-0.06	5.24	1.64	0.05	6.84	36.40
0.025~0.05	11.37	4.96	2.34	0.69	0.18	8.17	71.90
0.05~0.10	10.88	5.03	3.16	0.54	0.57	9.30	85.50
>0.10	3.69	2.21	1.16	0.16	0.09	3.62	98.10
全沙	44.82	12.14	11.90	3.03	0.89	27.96	62.40

表 1-3 多沙细泥沙来源区洪水下游河道各粒径组泥沙冲淤量

泥沙各粒径组 /mm	三十黑+武 来沙量/亿 t	冲淤量/亿 t					淤积比（淤积量 /排沙量）/%
		三门峡— 花园口	花园口— 高村	高村— 艾山	艾山— 利津	全下游	
<0.025	96.33	2.20	8.76	7.94	-1.84	17.06	17.7
0.025~0.05	45.16	10.68	4.33	0.98	-1.34	14.65	32.4
0.05~0.10	29.44	9.40	5.99	-4.01	1.68	13.06	44.4
>0.10	3.86	0.21	2.10	0.26	0.49	3.06	79.3
全沙	174.79	22.49	21.18	5.17	-1.01	47.83	27.4