

黄河潼关河段射流清淤技术与应用

1999 年黄河潼关河段清淤效果分析

高德松 鲁孝轩 兰现卿

(黄委会三门峡库区水文水资源局)

潼关高程反映潼关河段冲淤的特征指标,用潼关六断面 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 流量的水位表示。下同)问题,是黄河下游治理与开发中的难点和热点,历来受到广泛关注。近十几年来,由于来水来沙条件不利,潼关高程快速上升,并居高不下,给渭河下游和黄河小北干流防洪带来严重影响。为解决这一重要而又敏感的问题,黄委会从 1996 年起,每年汛期都在潼关河段安排旨在控制潼关高程的清淤试验,采用射流冲沙,以冲为主,冲扰结合的方法清淤。在疏浚浅滩、封堵串沟、理顺河势、集中水流、调整局部比降、增大水流挟沙能力方面取得了明显效果,为洪水期潼关河床的冲刷创造了条件。

一、1999 年潼关清淤实施概况

(一) 施工组织

1999 年潼关清淤,按基本建设项目进行管理。三门峡水利枢纽管理局作为项目业主;黄河工程咨询监理有限责任公司三门峡分公司和黄河水利科学研究院分公司作为监理单位,联合承担外业施工的监理工作;三门峡江河工程科技咨询服务中心作为施工单位,承担清淤外业施工和外业资料观测工作;黄河水利科学研究院和三门峡库区水文水资源局作为设计单位,联合承担了《1999 年黄河潼关河段清淤实施方案》的编制工作。

施工单位根据多年的清淤组织经验结合新的管理体制,成立了潼关清淤项目部,具体负责外业施工和资料观测。按工作性质,清淤项目部下设办公室、技术室、疏导组、测量组等专业部门,建立了较完备的施工组织管理体系。

为搞好清淤施工,施工单位投入各类技术人员和技术工人 70 余人。根据设备情况,在搞好清淤作业的同时,又组织了多次各类技术培训,邀请相关设备厂家的技术人员进行针对性的指导,提高了职工技术水平。所有这些,为搞好 1999 年度清淤奠定了良好的组织基础和技术基础。

(二) 清淤设备

清淤的主要设备为 4 艘新造的射流船和 1 艘扰流船。射流 0 号船,是 1998 年三门峡库区水文水资源局自行设计建造的第一艘专业射流船;射流 1 号船、2 号船、3 号船是根据以前的清淤经验和射流 0 号船的建造经验,由国内知名船舶设计单位设计,三门峡库区水

文水资源局组织建造的。这 4 艘射流船均配备了充足的动力，能适应较复杂的水流条件，有良好的机动性、较强的清淤作业能力和较高的清淤效率，解决了以往射流船功率小、机动性差、清淤能力低等主要问题。扰流船由三门峡水文水资源局的水文测船改造而成，自 1996 年以来，一直使用。各船的基本情况见表 1。射流船均是第一次投入清淤施工，在施工初期，由于设备尚处在磨合期，使用中需要经常进行调整，影响了正常施工。随着对设备进行不断调整和完善，清淤施工逐步正常，清淤作业时间和出勤率持续提高。

表 1 清淤船基本情况统计

船名		射流 0 号	射流 1 号	射流 2 号	射流 3 号	扰流船
主尺度	总长(m)	24.8	27.1	35.0	39.9	18.0
	总宽(m)	6.0	5.0	6.8	6.4	3.8
	型长(m)	23.6	24.0	29.8	28.5	
	型宽(m)	5.0	4.8	6.6	6.2	
	型深(m)	1.3	1.2	1.47	1.4	
	吃水(m)	0.70	0.62	0.60	0.62	0.60
装机功率	总功率(kW)	350	670	846	850	230
	主机功率(kW)	220	397	372	372	
	副机功率(kW)	20	24	24	24	
	泵机功率(kW)	110	249	450	450	
射流系统	水泵型号	1002J-I-A42	14LQSH-13	14/12G-G	350NH-73	扰流船配有 1 × 1.8m 的滚动式扰具一套
	水泵流量(m ³ /h)	245	1 200	2 100	2 200	
	水泵扬程(m)	67	44	34	40	
	射流操纵方式	人力手动	集中操纵	集中操纵	集中操纵	
	水枪布置形式	船首	船首、船底	船首、尾	船首、尾两侧	
	冲沙方式	人工调整	自动跟踪	自动跟踪	自动跟踪	
	水枪个数(支)	14	艏 12、底 11	30	30	
	管嘴直径(mm)	16	艏 35、底 20	35	35	
	出口流速(m/s)	33.5	23.6	21.9	19.6	
	最大作业宽(m)	5.0	4.5	6.0	10.0	

(三) 清淤河段

合理选择清淤河段是充分发挥清淤设备作用、取得良好清淤成效的关键之一。根据对大量资料的分析，黄淤 41~37 断面水流散乱，河道宽浅，比降较上下段偏小（一般小于 2.0×10^{-4} ），对洪水冲刷十分不利。特别是黄淤 39~37 断面常有浅滩，主流摆动频繁，泥沙易淤难冲，是影响潼关高程升降的关键河段。因此，1996~1998 年均在该段进行清淤。经过几年的清淤疏浚，该段河道有了明显变化，河势基本归顺，水流相对集中。但是，该段河道由于易变的特性和水沙条件不利，仍是影响潼关高程的关键河段。《1999 年黄

河潼关河段清淤实施方案》明确要求，清淤河段为黄淤 41~37 断面 具体作业河段 根据河道情况现场选定。

清淤开始时，河道正处在强烈冲刷后的回淤期，黄淤 39~38 断面间已有浅滩发育。为阻止回淤发展 控制潼关高程上升 按照《1999 年黄河潼关河段清淤实施方案》的要求，选择黄淤 39~37+3 断面作为清淤作业河段。根据以往的清淤经验，自下而上疏浚，是保证下段流路畅通，阻止淤积上延的有效办法。因此，不同时期的作业河段都是按照这一思路和原则进行上下调整。各时期作业河段，见表 2。

表 2 1999 年清淤作业河段统计

作业时段(月·日)	作业河段	重点作业部位	流量(m ³ /s)	含沙量(kg/m ³)
7.29~8.15	37+6~39	37+6~38	290~1 430	12.0~24.4
8.16~8.26	37+4~38	37+6~38	640~1 230	9.56~20.0
8.27~9.12	37+3~39	37+3~37+6	380~835	8.22~15.5
9.13~9.29	37+3~39	37+7~38	920~1 240	6.45~25.3

(四) 清淤的基本原则和基本方法

射流清淤是一种诱导性疏浚。其基本思路是选择对河道冲淤起关键作用的河段，采用射流方法冲击河床上的淤积物 使之起动、扬动、悬浮 借助自然水流将冲起的泥沙带出预定区域，并由此引导水流冲刷，达到清淤目的。因此，清淤成效一方面取决于清淤设备能冲起多少泥沙，另一方面还取决于自然水流能带走多少泥沙。

按照诱导疏浚的思路 主要通过局部河段的清淤疏浚 使河道畅顺 水流集中 河道行洪输沙条件得到改善，从而达到增加水流冲刷，减少河道淤积的目的。1996 年和 1997 年在清淤初期 清淤河段河道宽浅 水流散乱。当时提出的清淤基本原则是：“因势利导、疏通流路、理顺河势、集中水流、调整局部比降 从而达到改善河床条件 提高水流输沙能力，促进洪水冲刷，降低潼关高程”。这一原则的核心是改善河道条件、提高水流输沙能力。经过近几年清淤 虽然该段河道条件有所改善 水流相对集中 河道比较畅顺 但改善河道条件、提高水流输沙能力，仍是指导清淤的基本原则。

1999 年由于各艘船均有较好的机动性 都可以单独作业 因此 作业方法与以往略有不同 采取各船在规定河段独立作业 通过改变作业航速调整 1 次冲起泥沙的数量 使冲起的泥沙更容易输送。

在具体作业时 采取顺流顺冲和逆流顺冲的作业方法。为便于船舶的控制 两种作业方法通过船体逆流的前进与后退，实现作业状态的转换。这种作业方法，不仅避免了船体顺流行进时船速不易控制，容易有撞滩搁浅的危险，而且减少了船体调头时间和水枪转动的次数 从而提高了工作效率。

(五) 作业时间及工作量

1999 年清淤外业施工开始较晚。4 艘射流船 7 月 27 日到达施工现场 经过 2 天调整，7 月 29 日开始正式清淤作业。根据业主要求，扰流船 8 月 24 日进入施工现场 投入清淤作业。按照业主要求的工期计划和工作台班，9 月 30 日外业施工结束 外业作业时

间约 2 个月。各作业船累计作业台班 371 个。其中，射流船共完成 317 个 扰流船完成 54 个 超额完成台班 25 个。各船工作时间和完成台班数，见表 3。

表 3 清淤船作业台班统计

船名	射流 0 号	射流 1 号	射流 2 号	射流 3 号	扰流船
作业时段(月·日)	7.29~9.30	7.29~9.30	7.29~9.30	7.29~9.30	8.24~9.30
累计完成班台(个)	75	81	80	81	54

(六 观测资料情况

1999 年清淤观测资料是按照《1999 年黄河潼关河段清淤实施方案》的要求进行的。为搞好清淤观测，投入了较多的观测设备，主要有 220kW 水文测船 1 艘、33kW 测船 3 艘 测速仪、取沙仪和普通测量设备多台 配备了较强的技术力量 测量人员近 20 人。观测项目包括水位、流速、含沙量、流量等 观测范围为黄淤 41~36 断面。各项观测内容及成果 见表 4。

表 4 清淤资料观测成果统计

观测项目	施测日期 (月·日)	施测范围 (黄淤断面)	测次	说 明
控制测量	7.24~29	37~40	1	控制桩点的校测
水下地形	7.30~9.29	36~42	5	包括断面测量
河势测量	7.31~9.17	37~41	4	包括局部河势测量
水位观测	8.1~9.30	37~40	5 个断面	37,37+5,37+8,39+4,潼关 (七 不包括委托观测水位)
流量、输沙量对比	8.1~9.30	37+3~38+4	20	上、下断面比测
悬沙取样	8.5~9.24	37+3~38+4	859	包括输沙率、单沙取样个数
床沙取样	7.31~9.29	36~42	60	包括断面、输沙率床沙个数
颗分	8.5~9.24	36~42	232	送样作颗分的悬、床沙样
垂线含沙量对比	8.23~9.23	37+4~38+4	43	船前、船后
冲刷效果	7.27~9.30	37+7~38	2	作业冲刷效果试验
冲刷效率	7.27~9.30	37+7~38	6	指冲刷历时过程试验

二、水沙条件与河床条件

(一) 水沙条件

1. 水量与沙量

1999 年黄河属枯水枯沙年。潼关站 1~10 月水量 192 亿 m³ 较常年偏枯 36% 沙量 5.41 亿 t 较常年偏枯 44%。

7~10 月潼关站水量 95.2 亿 m³ 较常年偏枯 47% 沙量 4.09 亿 t 较常年偏枯 50%

以上，是三门峡建库以来水沙量最枯的年份之一。汛期水沙量主要集中在7月份该月水量为32.4亿 m^3 约占汛期水量的30%沙量3.27亿t约占汛期沙量的80%。8~10月份水量仅62.8亿 m^3 较多年平均偏枯50%以上沙量0.82亿t较多年平均偏枯70%以上。8月份沙量为0.27亿t较多年平均偏枯92%是历年最小的。9月、10月份沙量分别较多年平均偏枯83%和60%。

汛期水量主要来自黄河，龙门站7~10月份水量为77.7亿 m^3 约占同期潼关来水量的82%；汛期来沙量黄河龙门站7~10月为1.67亿t约占潼关沙量的41%。渭河华县站为2.1亿t约占潼关沙量的51%。其他支流来水来沙都较少，所占比例很小。汛期各月水沙量见表5。

表5 汛期各月水沙量统计

月份(月)		7	8	9	10	7~10
水量 ($\times 10^8 m^3$)	龙门	21.2	21.2	21.2	14.1	77.7
	华县	13.5	1.69	2.38	5.78	23.4
	河津	0.18	0.19	0.23	0.27	0.87
	潼关	32.4	21.2	21.3	20.3	95.2
沙量 ($\times 10^8 t$)	龙门	1.09	0.24	0.26	0.08	1.67
	华县	1.97	0.02	0.04	0.07	2.10
	河津	0	0	0	0	0
	潼关	3.27	0.27	0.27	0.28	4.09

2. 洪水

1999年汛期虽然洪水次数少洪峰流量小洪水历时短但洪水含沙量较高。潼关站洪峰流量大于2000 m^3/s 的洪水只在7月份出现2次最大洪峰流量为2950 m^3/s 最大含沙量为442 kg/m^3 。这种情况在历史上是罕见的。

汛期第一次洪水发生在7月12~18日由黄河、北洛河、渭河小流量高含沙洪水组成。7月13日龙门站洪峰流量1370 m^3/s 最大含沙量340 kg/m^3 ；7月14日北洛河湫头站洪峰流量1820 m^3/s 最大含沙量626 kg/m^3 ；7月15日，渭河华县站洪峰流量1360 m^3/s 最大含沙量636 kg/m^3 。以上洪水汇合后，形成潼关站7月16日洪峰流量2200 m^3/s 最大含沙量442 kg/m^3 的小洪水。近几年潼关附近河道条件有所改善，黄河与渭河的交汇位置下移交汇角减小这种河势有利于渭河洪水畅泄和对潼关河床的冲刷。在本次洪水过程中渭河高含沙量洪水汇入后在潼关以下河段造成了强烈冲刷使河槽缩窄。洪水过后潼关高程下降1.01m。

汛期第二次洪水发生在7月19~30日由黄河和渭河来水组成并以黄河来水为主。龙门站洪峰流量2610 m^3/s 最大含沙量165 kg/m^3 渭河华县站洪峰流量1350 m^3/s 最大含沙量397 kg/m^3 。黄河和渭河洪水汇合后，形成潼关站本年度最大洪水，洪峰流量2950 m^3/s 最大含沙量239 m^3/s 。本次洪水使潼关以下河段迅速回淤，河槽展宽。

以上2次洪水历时19天总洪量25.6亿 m^3 占汛期水量的27%总沙量3.13亿t，

占汛期沙量 76%。

8~10月虽有 4 次洪水过程 但洪水历时短 洪量小 洪峰流量最大仅 1 610m³/s 最大含沙量 65kg/m³ , 对河道冲淤变化影响不大。汛期各次洪水情况, 见表 6。

表 6 1999 年汛期各次洪水特征值统计

序号	站名	时段 (月·日)	水量 (×10 ⁸ m ³)	沙量 (×10 ⁸ t)	最大流量 (m ³ /s)	含沙量(kg/m ³)		水库运用水位(m)	
						平均	最大	平均	最高
1	龙门	7.11~7.17	3.32	0.454	1 370	137	340	304.67	306.35
	华县	7.12~7.18	3.90	0.816	1 360	207	636		
	潼关	7.12~7.18	7.26	1.41	2 220	194	442		
	三门峡	7.13~7.19	7.67	1.92	2 890	250	770		
2	龙门	7.19~7.30	14.8	0.591	2 610	40	165	300.44	305.60
	华县	7.19~7.30	5.46	1.08	1 350	198	397		
	潼关	7.19~7.30	18.3	1.72	2 950	94	239		
	三门峡	7.20~7.31	16.8	2.13	3 000	131	292		
3	龙门	8.19~8.19	3.237	0.035 5	1 900	11.3	20.2	303.12	303.85
	华县	8.18~8.20	0.069 7	0	29.2	0	0		
	潼关	8.18~8.20	2.868	0.034 0	1 610	11.7	14.1		
	三门峡	8.19~8.21	2.766	0.029 9	2 340	17.1	17.9		
4	龙门	9.18~9.26	9.177	0.171 2	1 740	16.7	71.3	305.00	305.50
	华县	9.19~9.27	0.942 6	0.010 4	170	10.4	30.1		
	潼关	9.19~9.27	8.225	0.096 1	1 310	13.0	18.6		
	三门峡	9.20~9.28	8.329	0.082	1 940	0.075 0	15.6		
5	龙门	10.1~10.8	3.762	0.025 2	921	6.86	9.99	309.21	312.91
	华县	10.2~10.9	3.142	0.067 5	1 160	17.9	45.4		
	潼关	10.2~10.9	7.011	0.156 9	1 500	20.3	47.2		
	三门峡	10.3~10.10	5.121	0.044 9	1 640	16.2	8.77		
6	龙门	10.24~10.30	4.152	0.026 3	962	5.52	10.1	316.30	318.07
	华县	10.25~10.30	0.521 6	0.001 3	115	2.32	5.4		
	潼关	10.25~10.31	5.729	0.054 6	1 190	10.3	13.0		
	三门峡	10.25~10.31	5.350	0	1 580	0	0		

(二) 河道条件

1. 三门峡水库运用概况

1999 年非汛期, 三门峡水库最高蓄水位 320.78m , 是控制运用以来最低的一年。库水位经常在 315~320m 之间变动 回水末端在埧埧以下。

汛期水库的运用方式 仍然是根据来水来沙和库区冲淤变化情况 适时调度 合理排沙。7~9 月份 平水期控制 305m 水位发电 洪水期降低水位排沙。按照黄河防总安排, 三门峡水库要小浪底水库预储水量, 10 月 4 日开始蓄水, 10 月 24 日库水位最高升到

318.22m 蓄水 5 亿 m^3 。随后，加大泄量向小浪底供水。

汛期进库水量 95.2 亿 m^3 进库沙量 4.09 亿 t 出库水量 87.0 亿 m^3 出库沙量 4.69 亿 t 水库冲刷 0.60 亿 t。

2. 清淤前河道冲淤变化

根据库区淤积测量资料统计，1998 年 11 月 18 日~1999 年 5 月 25 日 潼关至三门峡段共淤积泥沙 1.68 亿 m^3 比一般年份多淤 0.3~0.5 亿 m^3 是三门峡建库以来同期淤积较多的年份之一。非汛期水库运用水位较低，淤积部位靠下，淤积重心在大禹渡至北村之间 三角洲顶点在黄淤 22 断面附近。黄淤 31~22 断面淤积 0.992 亿 m^3 占全库段淤积量的 60% 黄淤 22~12 断面淤积 0.291 亿 m^3 约占全库段淤积量的 17% 黄淤 36~21 断面淤积 0.308 亿 m^3 约占全库段淤积量的 18%。以上三段，约占全段淤积量的 95%。淤积分布见图 1。

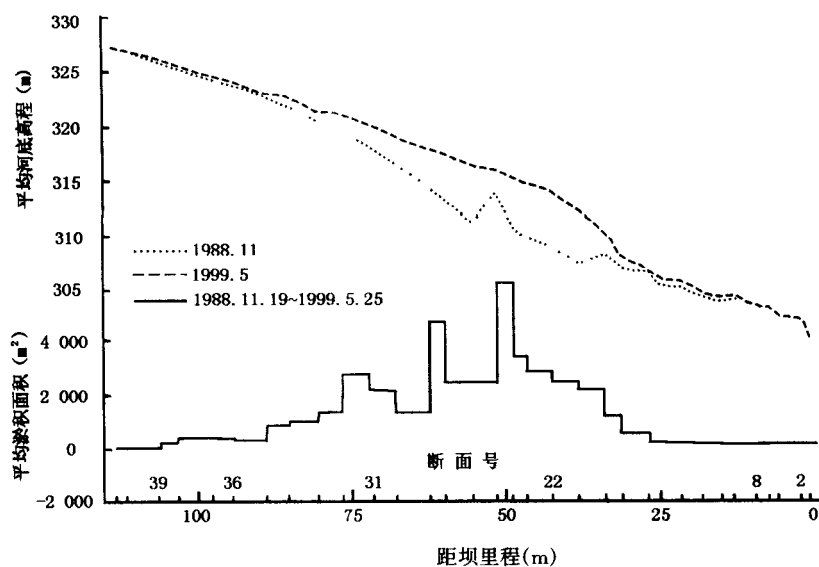


图 1 1998.11.18~1999.5.25 淤积分布

3. 清淤前河道状况

根据 5 月份勘查 潼关到鸡子岭河段有浅滩发育 其中潼关铁路桥到公路桥之间浅滩较多 在黄淤 37+4~37 断面之间也有成片心滩。

6 月份上游来水较少，河道冲淤变化不大。7 月中旬黄河、渭河、北洛河相继出现洪水，在洪水到达潼关后，先使潼关河段淤积，主流摆动。从套绘的潼关测流断面（图 2）可以看出 7 月 8 日 潼关断面水流集中在右岸深槽 进入中旬后 河槽淤积萎缩 又从左岸冲刷出新的河槽 主流摆动 600 余米；7 月 13 日左右两股河槽又全部淤塞 河床坦化难以分清滩槽 心滩亦普遍淤积升高。渭河 7 月 15 日高含沙洪水汇入后，潼关河段发生了强烈冲刷，在河道偏右部位冲出新河槽。7 月 16 日 5 时到 17 日 19 时，328m 高程以下冲刷面积达 350 m^2 河宽由 829m 束窄到 320m 河床平均高程由 327.5m 降到 324.3m 降低 3.2m。经过洪水回落淤积，7 月 17 日潼关高程由峰前的 328.46m 降至 327.45m，下降

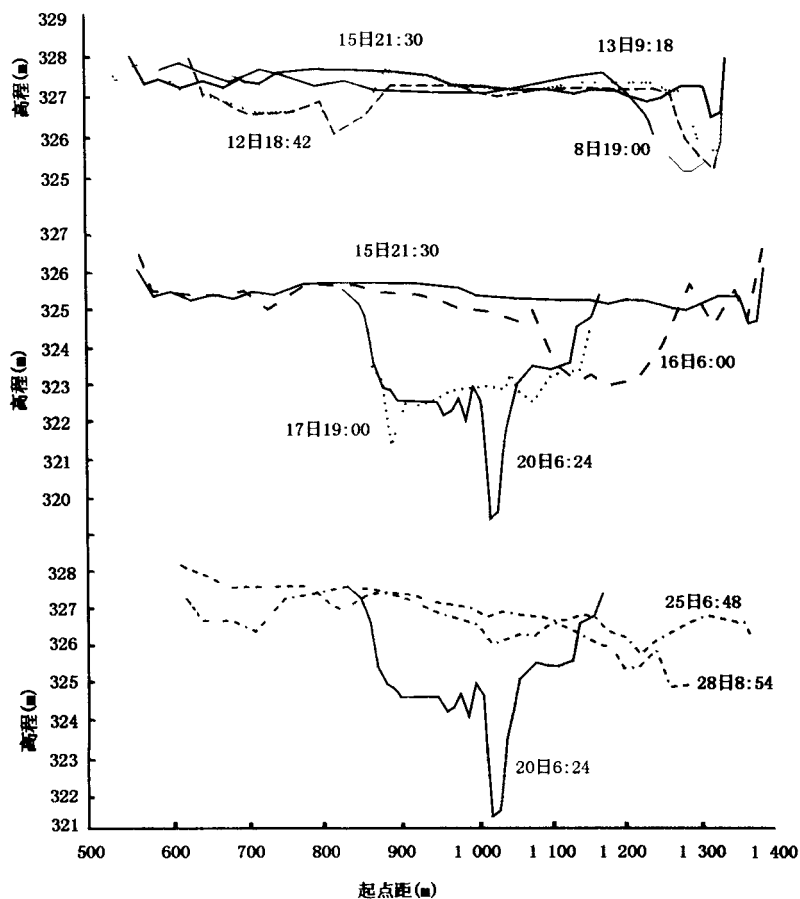


图 2 1999年7月潼关七站断面套绘

1.01m。由于洪水流量小，冲刷强度沿程减弱，淤堵断面同期 $1\ 000\text{m}^3/\text{s}$ 流量的水位仅下降 0.70m。潼关段比降由峰前的 1.9‰ 减小到 1.6‰ 。

7月下旬洪水到来时，潼关河段再次发生主流摆动，上次洪水塑造的窄深河槽位于断面中部之后，河槽逐渐淤积展宽并向右移动。洪水过后，潼关段出现沿程淤积，淤积强度沿程减小。8月2日潼关高程又升高到 328.22m，比洪水前升高 0.77m，淤堵断面同期 $1\ 000\text{m}^3/\text{s}$ 流量的水位升高 0.13m。潼关段比降恢复到接近 2.0‰ 。

4. 清淤前河势状况

根据多次河势勘查，黄淤 41~37 断面经过近几年清淤，总体上河势比较规顺，但在不同流量和来水条件下，局部仍有变化。5月份黄淤 41~40 断面之间水流居中靠右，在公路桥以下，水流沿七里村工程而下，到工程尾部向左岸挑出，然后水流居中而下，直达鸡子岭工程中部（37+5断面上下），再沿工程而下，到 37 断面后挑向对岸。7月中旬洪水冲刷后，全段水流居中，工程大部分脱流，只有鸡子岭工程尾部（约 37+3 断面以下）着流。7月下旬洪水淤积后，河势又大体上恢复到 5 月份的河势。清淤开始时，黄淤 38~39 断面

之间已有心滩发育 河槽展宽向两边发展 但总体河势基本畅顺。

三、清淤效果分析

(一) 射流作业效果分析

1. 射流能力分析

从表 1 知 射流 0 号船水枪口径 16mm 出口流速 33.5m/s 射流 1~3 号船水枪口径均为 35mm 出口流速分别为 23.6m/s、21.9m/s 和 19.6m/s。按照射流理论，淹没射流穿过水层后射流束中点流速与水枪出口流速有如下关系：

$$\frac{U_m}{U_0} = 12.8R_0/X \quad (1)$$

式中： U_m 为射流束中心的流速； U_0 为水枪出口流速； R_0 为水枪出口半径； X 为距射流极点的距离 近似于射流极点到水枪出口的距离。

按照式 (1) 计算的各船射流穿过不同水深后的流速，如表 7。从计算结果看 射流 1 号船射流穿透水层能力最强 射流 2 号船、射流 3 号船次之 射流 0 号船因水枪口径小 穿透水层的能力最弱。

表 7 穿透不同水深的射流速度

穿透水深(m)		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
射流速度 (m/s)	0 号船	6.86	3.43	2.29	1.72	1.37	1.14	0.98	0.86
	1 号船	10.6	5.29	3.52	2.64	2.11	1.76	1.51	1.32
	2 号船	9.81	4.91	3.27	2.45	1.96	1.64	1.40	1.23
	3 号船	8.78	4.39	2.93	2.20	1.76	1.46	1.25	1.10

为检验各船的实际射流能力，分别进行了定船冲坑试验，试验结果列于表 8。从试验结果看 射流 1 号船处最大冲深可达 3.9m 射流 2 号船处最大冲深 3.5m 射流 3 号船处最大冲深 3.0m 射流 0 号船处最大冲深 2.0m。这一结果与表 7 计算的结果一致。

从表 7、表 8 的结果可知，水枪口径大，射流速度快，射流的冲沙能力就强。实质上，射流量越大 冲沙量越大 射流能力就越强。对于整船来说 冲沙水泵流量的大小 反映冲沙作业能力的大小。由表 1 可知 射流 2 号船、3 号船冲沙泵流量最大。因此，射流作业能力最大 射流 1 号船次之 射流 0 号船最小。

2. 射流作业的清淤效果

为探索射流作业的直接清淤作用，在清淤期间进行了模拟作业试验。选择 100m 长的顺直河段，按正常要求逆流进行作业。为了便于观测射流冲沙前后的水深变化，采用较低的航速作业，同时观测射流冲刷前后的沿程水深变化情况，二者差值基本上反映了射流作业时的冲刷深度。该项试验仅在射流 2 号船、射流 3 号船上进行。试验结果 如表 9。

从试验结果看 冲刷后的水深变幅较大 而冲刷前的水深变化较小 这主要是试验时船速难以匀速前进，对各处的冲刷时间不同造成的。因此，试验结果比较真实地反映了射流作业的冲刷情况。

表 8

射流冲坑试验成果

冲刷深度 .m

冲刷历时(s)	船号及射流速度			
	0号,33.5m/s	1号,23.6m/s	2号,21.9m/s	3号,19.6m/s
10	1.0	1.0	1.0	1.1
20	1.1	1.3	1.3	1.5
30	1.4	1.5	1.7	2.0
40	1.5	1.9	1.9	2.2
60	1.6	2.8	2.3	2.4
80	1.8	3.0	2.5	2.5
100	1.9	3.0	2.7	2.5
120	2.0	3.1	2.9	2.6
150	2.0	3.2	3.0	2.7
180	2.0	3.4	3.1	2.9
240	2.0	3.9	3.5	3.0
300	2.0	3.9	3.5	3.0
极限冲深(m)	2.0	3.9	3.5	3.0

表 9

模拟作业试验情况统计

试验船		射流 2 号船	射流 3 号船
沿程水深 (m)	冲刷前	0.9~1.40	0.75~1.05
	冲刷后	1.05~1.70	0.95~1.30
	最大冲深	0.45	0.45
	最小冲深	0.10	0.05
	平均冲深	0.24	0.20
作业段长(m)		100	100
沿程测点数(个)		23	42
射流角度(°)		90	65
平均航速(m/h)		462	262

试验结果表明 经过射流作业 河床被冲刷 河床高程下降 相当于在河床上冲出了一个“深槽”直接降低了河床高程。对于全断面来说 虽然 1 次射流作业的范围很小,对河床的影响也很有限 但当射流作业持续进行时 就可在河床上冲刷出一个深槽 由此还将引发河床的冲淤调整。当这种作业在特定淤积区进行时,就达到了预期的清淤效果。

按照表 9 的结果和射流宽度、射流作业长度、射流时间 计算出射流 2 号船、3 号船每小时平均可冲沙 460m^3 。据此,按照总作业时间可推算出射流 2 号船、3 号船总清淤量可

达 40 余万 m^3 。虽然这一数值不能作为定量依据，但它充分说明射流作业可以直接起动大量的泥沙，从一个侧面反映了射流作业的清淤效果。

为探索射流作业起动泥沙的输移情况。在清淤过程中观测了射流作业河段上、下游断面的含沙量和流量。观测断面根据河道情况临时设置，上下断面间距一般为 300~500m。观测按积点法输沙率分别在上下断面进行，共进行 20 次。上断面水流含沙量为 10~20 kg/m^3 ，除个别测次外，下断面平均含沙量比上断面增大 2~3 kg/m^3 。

为了分析清淤对泥沙组成的影响，对上下断面泥沙分别进行了颗分。从颗分资料对比看，下断面的泥沙颗粒明显比上断面粗，见图 3 所示。尽管受各种条件限制，观测资料有一定误差，还难以定量分析，但它从一个方面定性反映了清淤的效果。

(二) 清淤河段比降增大

1999 年清淤开始时，潼关至埭埭河段正处在回淤过程中。潼关到黄淤 37 断面的比降不足 1.84‰。经过 2 个月的清淤，该段比降增大到 2.0~2.05)‰，增大 10% 左右。

从比降变化过程看，以作业河段中部的 37+8~37+5 断面为界，上下段比降变化有明显差异。潼关(六)到 37+8 断面的比降由清淤开始时的 1.93‰ 逐渐增大，8 月下旬达

到约 2.0‰ 并基本保持在 2.0‰ 附近变化。到 9 月底清淤结束时增大到 2.11‰。潼关(六)到 37+5 断面的比降变化与潼关(六)到 37+8 断面趋势相同。而 37+8~36 断面的比降虽也在 2.0‰ 上下变动，但变化幅度明显较大，并有一定的周期性。37+5~36 断面的比降与此类似。这一现象表明，随着清淤的进行，清淤河段发生冲刷，相应上段比降逐步增大，而下段比降随清淤河段的调整而不断调整。下段比降变化既受清淤河段冲刷下降影响，也受冲刷沙量在下段淤积河床升高的影响，因此，比降变化幅度较大。这一现象反映了清淤对比降的调整过程。比降变化，如图 4 所示。

从图 5 点绘的流量 1 000 m^3/s 的水面线可以看出，在 37+5~37+8 河段附近，8 月 2 日的水面线与清淤后的水面线有明显差异。从清淤刚开始时的水面线看，37 断面以上比降一致，而经过清淤后到 8 月 17 日，37+5~37+8 断面水面线已显著降低，39+4~37+8 断面比降增大，而 37+8~37 断面的比降减小。表明经过清淤，作业河段同流量水位降低，为后期河床调整打下了基础。

(三) 清淤河段冲刷 过洪能力提高

1. 清淤河段冲刷

7 月 29 日清淤开始时，正值 7 月份第 2 次洪水的落水过程，潼关一埭埭河段正处在落水的淤积过程中。8、9 月份潼关基本上没有来洪水，仅在 8 月 18 日和 9 月 23 日分别

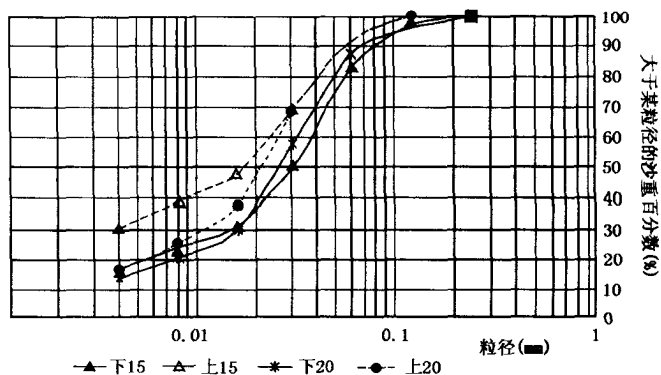


图 3 上下断面颗粒级配曲线

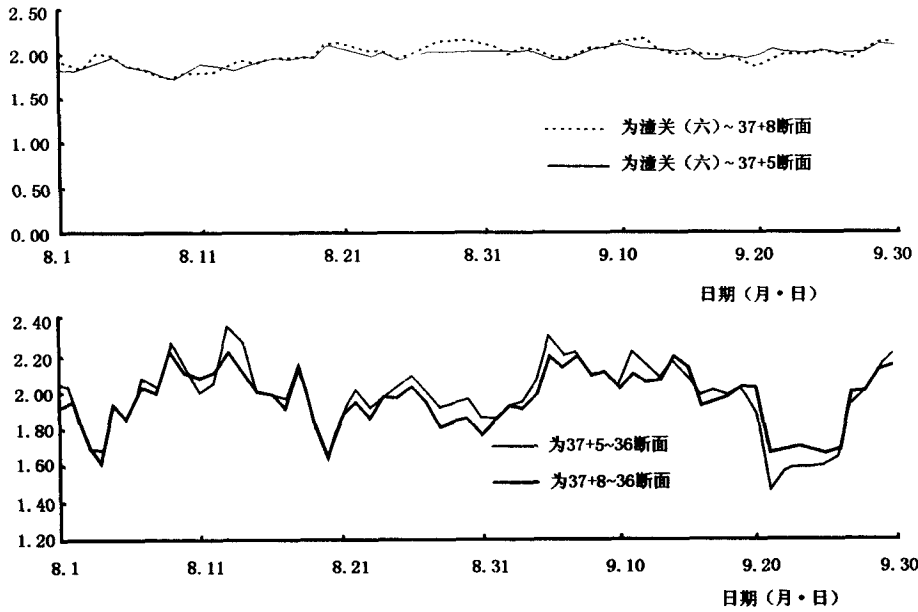


图 4 清淤期间比降变化过程线

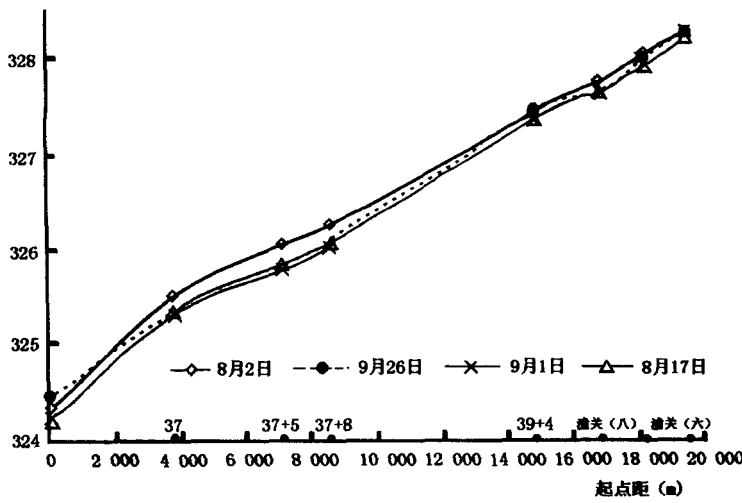


图 5 流量 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 的水面线

出现流量为 $1610\text{m}^3/\text{s}$ 和 $1310\text{m}^3/\text{s}$ 的小洪峰。8月1日到9月30日流量达到 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 的天数仅 19 天，最小流量仅为 $240\text{m}^3/\text{s}$ 含沙量为 $4.29 \sim 25.3\text{kg}/\text{m}^3$ ，一般为 $10 \sim 20\text{kg}/\text{m}^3$ 两月总水量为 42 亿 m^3 沙量为 0.54 亿 t。这样的水沙条件，对河道冲刷十分不利且易产生主流摆动引起河槽淤积。尽管如此经过 2 个月清淤，清淤作业河段还是产生了较大冲刷。

根据断面测量，处在作业河段的黄淤 37~39 断面间绝大多数断面都发生了冲刷最大冲刷面积 601m^2 ，一般断面冲刷面积在 200m^2 以上。黄淤 37~39 断面 8400m 长的河段累计冲刷 203 万 m^3 河床平均下降 0.21m 。而同期黄淤 40、41 断面面积分别淤积 158m^2 和 297m^2 。黄淤 39+2~41 断面累计淤积 69 万 m^3 ，其中黄淤 40~41 断面间长 1660m 的河

段淤积 38 万 m^3 。由此可见，清淤的减淤作用是十分明显的。

从清淤河段的冲刷过程看，清淤河段冲刷是持续发生的。清淤作业大部分时间在黄淤 38 断面以下 因此黄淤 37~38 断面的冲刷量随清淤进展逐渐增大。7 月 29 日到 8 月 16 日黄淤 37~38 断面冲刷 33 万 m^3 到 8 月 27 日增加到 63 万 m^3 到 9 月 12 日又增加到 90 万 m^3 到 9 月 27 日达到 126 万 m^3 。

从沿程变化看 8 月 1 日到 8 月 27 日黄淤 39+4 断面以下基本上是冲刷，黄淤 38~39 断面之间冲刷较大 黄淤 39+5 断面以上全程淤积，而且越往上淤积越多。8 月 27 日到 9 月 27 日黄淤 37+5 断面以下基本上是冲刷的 而往上则冲淤相间 并且与 8 月 1 日到 8 月 27 日的分布对应 前次冲刷后次淤积 有较好的对应关系。这表明 经过前期清淤调整，河道发生了变化，上游泥沙逐渐往下搬迁，清淤的影响逐渐向上发展。黄淤 39+5—潼关七 断面发生少量冲刷 黄淤 41 断面虽然仍在淤积，但淤积强度明显减弱。各时段淤积量 见表 10；淤积分布 见图 6。

表 10 各时段淤积量统计 $10^8 m^3$

时段 (月·日)	36~37 断面	37~38 断面	38~39 断面	39~40 断面	40~41 断面	Σ	主要作业河段
8.1~8.27	-0.006 9	-0.006 2	-0.007 9	0.000 1	0.003 2	-0.017 7	37+4~38 断面
8.27~9.27	-0.001 9	-0.006 3	0.000 1	0.002 8	0.000 5	-0.004 8	37+3~38 断面
Σ	-0.008 8	-0.001 25	-0.007 8	0.002 9	0.003 7	-0.022 5	

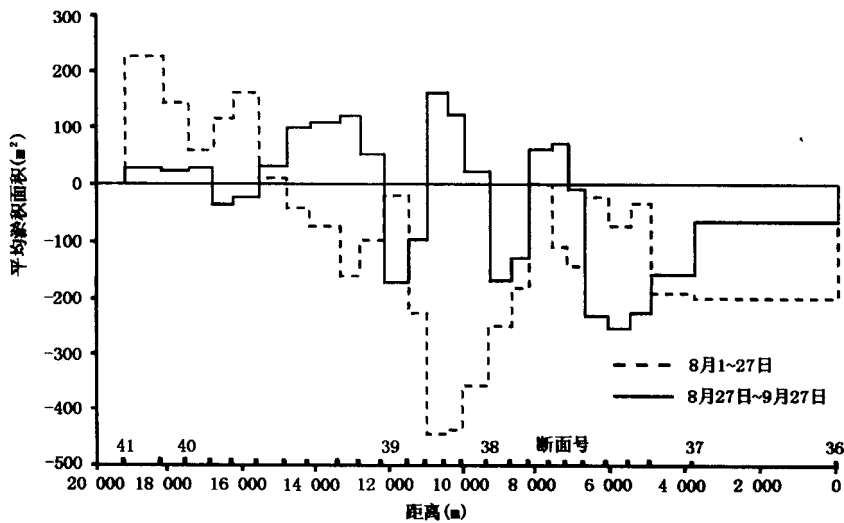


图 6 清淤河段淤积分布

为了分析清淤前后的冲淤变化，借用正常的库区淤积测量资料，计算了黄淤 41~36 断面各时段的冲淤量。计算结果，列于表 11。由于断面间距问题，8 月 1 日~9 月 27 日的淤积量与分段计算结果略有差异。但这不影响资料分析的结论。

表 11

各时段淤积量统计

10⁸m³

时 段(月·日)	36~37 断面	37~38 断面	38~39 断面	39~40 断面	40~41 断面	合 计
5.21~8.1	0.003 1	0.024 0	0.004 6	-0.013 4	-0.006 0	0.012 3
8.1~9.27	-0.007 3	-0.017 7	-0.004 6	0.002 4	0.003 7	-0.023 4
9.27~11.16	-0.006 3	-0.027 0	-0.009 9	-0.009 2	-0.001 1	-0.053 4
合 计	-0.010 5	-0.020 7	-0.009 9	-0.020 2	-0.003 4	-0.064 5

从表 11 可以看出,清淤前虽然潼关河段发生了强烈冲刷,但经过后期洪水回淤,潼关段仍然淤积 123 万 m³,且大部分泥沙淤积在黄淤 37~38 断面之间。经过 2 个月的清淤,黄淤 37~39 断面的大部分淤积物被清除。清淤使该段比降增大,河道条件得到改善。清淤结束后在水沙条件不利情况下,潼关段仍然发生较大冲刷。这是清淤诱发的冲刷,并且冲刷范围达到潼关附近,这为潼关高程降低起到了重要作用。

2. 主槽过洪能力提高

经过清淤和河道冲淤调整,清淤河段主槽的过洪能力不断提高。图 7 分别点绘了各断面的日平均水位与日平均流量的关系,为便于分析对比,按月点绘并添加趋势线。

从图 7 可以看出,由上而下,9 月份与 8 月份相比,主槽过洪能力逐渐增大。潼关(六)断面 9 月份关系线比 8 月份整体偏左,表明同水位流量减小。潼关(八)断面 9 月份关系线与 8 月份相近,但在 327.5m 上下两条曲线分开,而 327.5m 为该断面的滩面高程,这表明河槽有微冲而滩地微淤。黄淤 39+4 断面 8、9 月份曲线接近,滩槽相差很小。黄淤 37+8 断面 9 月份的关系线在 326m 滩面上下与 8 月份曲线有较大差异,滩面以下,9 月份同水位流量比 8 月份大,而滩面以上与之相反。黄淤 37+5、37 断面关系线与黄淤 37+8 断面非常相似,8、9 月份曲线的交点都是在滩面高程附近。这表明,经过 8 月份的清淤,河槽发生冲刷,过洪能力提高。潼关(六)断面 10 月份的关系线与 9 月份接近,而潼关(八)断面 10 月份的关系线明显比 8、9 月份偏右,即同水位流量增大。经过 9 月份的持续清淤,河床调整已经影响到潼关(八)断面附近,但对潼关(六)断面影响不大,与断面冲淤资料反映的结果是一致的。河槽冲刷和过洪能力的提高,为潼关高程下降打下了基础。

四、潼关高程保持稳定

(一) 潼关高程升降基本规律

潼关高程受水库蓄水、河道淤积和洪水冲刷的综合影响,其基本升降规律是非汛期三门峡水库蓄水,河道淤积,潼关高程相应升高;汛期水库泄洪排沙,河床冲刷,潼关高程相应下降,但若遇不利的水沙条件,汛期潼关高程仍可升高。对于 1 次洪水,潼关高程的升降取决于洪水来源、洪水组合、前期河道条件等因素。一般是渭河来水潼关高程降低,渭河高含沙量洪水可使潼关高程较大幅度下降,黄河来水潼关高程有升有降,且升高的情况较多,黄河高含沙洪水升降不定,且升降幅度一般不大。潼关上下河段比降的调整和潼关以下冲淤变化对潼关高程有直接影响,一般潼关以下河段冲刷,潼关高程相应降低,反

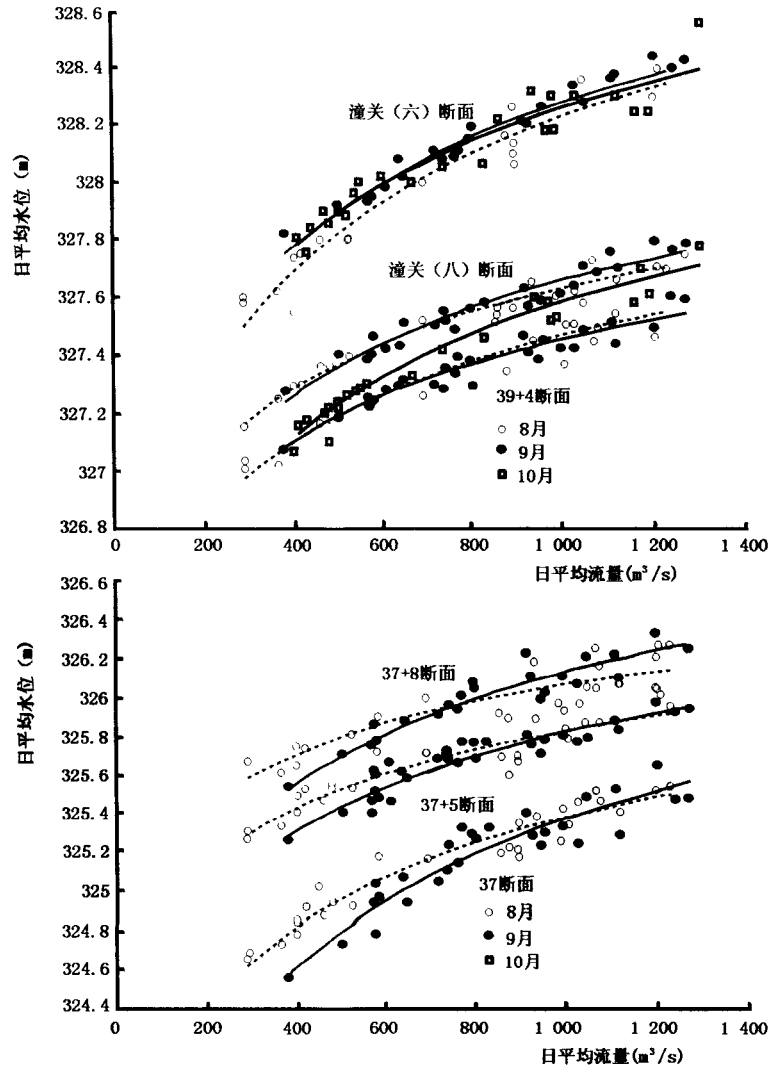


图 7 各断面日平均水位与日平均流量关系

之潼关高程升高。

(二) 清淤前潼关高程变化情况

1998 年汛后 潼关高程为 328.12m。由于水沙条件不利，到 1998 年底 大约上升到 328.48m，凌汛期间潼关河床淤积增多，高程不断升高，到 1999 年 3 月初上升到 328.60m 达到近几年的最高水平 与 1996 年凌汛冰塞壅水淤积之后的高程持平。进入 1999 年，经过桃汛洪水的冲刷，潼关高程有所下降 4 月 2 日降到 328.37m。之后，长时间的小水使潼关高程再次升高 到 7 月 7 日升高到 328.46m 由于 7 月中旬渭河高含沙量洪水的剧烈冲刷 潼关高程降低到 327.45m，比洪水前降低 1.01m。随着后期洪水的淤积 潼关高程又迅速升高 到 8 月 2 日上升到 328.22m。

(三) 潼关高程保持相对稳定

1999年清淤开始后,河道淤积势头得到控制,清淤河段出现了冲刷。随着清淤的进展和河道冲刷的持续发展,河道比降得到调整,主河槽冲刷,过洪能力提高,河道条件得到改善,潼关附近的淤积也得到缓解,潼关高程也相应得到控制。8月2日,潼关高程为328.22m。在清淤过程中,虽然有升降变化,但最高没有突破328.35m,最低也没有低于328.18m。到9月底清淤结束时,潼关高程与8月初基本持平,为328.20m。

10月份水沙条件仍然不利,潼关水量偏枯50%,最大流量为 $1500\text{m}^3/\text{s}$,但随着河床冲刷的向上延伸,潼关附近也发生了冲刷。10月底潼关出现流量为 $1200\text{m}^3/\text{s}$ 的小洪水,潼关河床不但未淤反而冲刷,潼关高程相应降低,10月30日降低到328.12m,与1998年汛后持平。

在水沙条件不利情况下,清淤期间潼关高程保持了相对稳定,清淤结束后,潼关河床发生冲刷,潼关高程下降近0.1m,说明清淤对稳定潼关高程有重要作用。虽然9月底清淤施工已经停止,但由于清淤影响的滞后性,清淤诱发的河道冲刷调整并没有停止。因此,10月份潼关河床冲刷,潼关高程下降仍与清淤有重要关系。

(四) 清淤河段挟沙力提高

通过清淤,河道比降得到调整,射流作业本身可直接使河床冲刷下降,河道水深增加,从而也使河道流速增大。从图8点绘的潼关(八)断面实测流速与流量的关系可以看出,

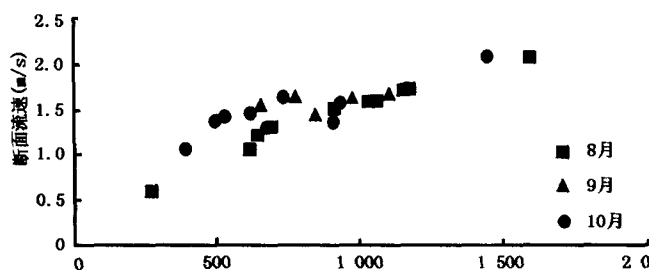


图8 潼关(八)断面流速—流量关系

9、10月份同流量的流速较8月份有所增大。由于流速的增加,水流挟沙能力也相应增大,使河床产生冲刷。

清淤期间,潼关到黄淤37断面间河道比降由 1.84‰ 增大到 $(2.0 \sim 2.05)\text{‰}$,增大10%。清淤河段黄淤37~39断面平均冲深0.21m,水深增大

13%。经用挟沙力公式计算,求得清淤前后挟沙能力增大26%。这一结果,与黄科院在《潼关河段清淤对洪水冲刷影响的初步分析》中冲刷量增加17.6%结论基本相符。虽然以上计算结果还不能作为定量分析的依据,但它定性说明清淤可以增大挟沙能力,清淤河段及相邻河段在清淤结束后的冲刷,也说明上述结论是正确的。

五、结论与建议

(一) 结论

通过对1999年清淤实施情况、水沙情况和河道情况的回顾,初步对清淤效果、清淤成效有了初步认识,主要结论如下:

(1)1999年属枯水枯沙年,汛期不仅水沙量偏枯50%以上,而且洪峰次数少、峰值低、峰量小、历时短。特别是在8、9月份的清淤期间,基本没有洪水,这对潼关河床冲刷非常不利。由于清淤施工开工较晚,在清淤开始时,正值洪水的落水过程,河道正在淤积。这

些对清淤非常不利。

(2)1999 年的清淤设备发生了很大变化,一是射流船数量由往年的 2 艘增加到 4 艘,扰流船由往年的 3 艘减少到 1 艘;二是射流船全为新造的专业船,综合作业能力有了很大提高。射流作业可对河床有效冲刷,使河道水深增加。这为清淤工作顺利进行,并取得成效打下了坚实基础。

(3)两个月的清淤,使潼关到黄淤 37 断面比降增加。到清淤结束时,该段比降约增大 10%。

(4)清淤使河道冲刷,主槽过洪能力提高。清淤开始时河道正处在回淤之中,在水沙条件不利情况下,通过清淤不仅使作业河段发生冲刷,主槽过洪能力提高,而且诱发相邻河段冲刷。这表明清淤不仅可以促进洪水冲刷,也能促进一般水流的冲刷。

(5)清淤使潼关高程在水沙条件不利情况下保持相对稳定。由于清淤效果的滞后性,清淤结束后清淤河段及相邻河段的冲刷仍没有停止使 10 月份潼关高程稳中有降。10 月底,潼关高程降为 328.12m 与 1998 年汛后高程持平。

(二) 建议

潼关清淤尚处在试验阶段 项目管理应突出试验特点 不宜完全按照一般工程项目进行管理。因此,建议在以后工作中应加强以下方面的工作:

(1) 加大资料观测力度 进一步提高资料质量 配合清淤作业 开展针对性观测。

(2) 为了便于分析清淤机理和清淤效果 在清淤过程中要有计划的开展专项试验。

(3)为合理、公正评价清淤成效 应加强基础研究和相关试验 逐步建立有效的评价机制。

(4)加强清淤方法研究 探讨不同河道条件、不同水沙条件、不同设备规模的清淤作业方法 使清淤更加有效。

(5) 加大作业力度 延长作业时间 应尽快开展桃汛清淤试验 并进行汛前枯水期的清淤试验 为今后清淤积累经验。

(6)充分利用清淤施工的有利条件,加强清淤设备试验和优化改进,为今后制造更高效率的清淤设备积累经验。