

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.04.008

小浪底水库调控后黄河下游冲淤规律与水沙调控指标

陈翠霞^{1,2}, 朱呈浩^{1,2}, 赵翔^{1,2}, 高兴^{1,2}, 罗秋实^{1,2}

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 河南 郑州 450003)

摘要: 为科学指导黄河调水调沙调度实践, 根据小浪底水库调控后黄河下游冲淤规律对水沙调控指标进行优化。选取2011—2022年黄河下游实测121场不同含沙量级水沙过程, 分析黄河下游水沙特点及其冲淤效率与水沙条件的响应关系, 以黄河下游不淤积以及主槽过流能力不降低为总体目标提出水沙调控指标。结果表明: ①小浪底水库对黄河下游水沙过程具有两极分化的调控作用, 高含沙量水流(平均含沙量 $S_{av} > 10 \text{ kg/m}^3$)的沙量全年占比为94%, 清水水流($S_{av} < 1 \text{ kg/m}^3$)的水量全年占比为85%。②高含沙量水流的淤积效率与平均含沙量呈正相关线性关系。③清水水流的冲刷效率与平均流量呈正相关对数关系。④对于高含沙量水流, 丰水年调控水量为80亿 m^3 , 平均流量为2000~4600 m^3/s , 平均含沙量为50 kg/m^3 ; 平水年调控水量为10亿 m^3 , 平均流量为2000~4600 m^3/s , 平均含沙量为150 kg/m^3 ; 枯水年水库不排沙。对于清水水流, 需要避免下泄平均流量在800~1800 m^3/s 范围内的水流过程。

关键词: 冲淤规律; 水沙调控; 水沙过程; 小浪底水库; 黄河下游

中图分类号: TV148 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2024)04-0606-11

大型水库运行会改变下游河道的水沙条件, 从而导致下游河道的河床边界及冲淤特性发生调整^[1-2]。研究水库调控后的水沙特点及其冲淤规律, 对于水库调度及下游河道治理具有重要意义^[3-4]。黄河下游的泥沙主要来自黄土高原的水土流失^[5-6], 长期淤积在河道形成了“千里悬河”。小浪底水库运行后改变了黄河下游水沙过程, 并通过水沙调控缓解了河床淤积抬高的态势。多年治黄经验表明, 小浪底水库调水调沙是解决黄河下游泥沙淤积的有力措施^[7-9], 通过拦蓄易造成下游河道泥沙淤积的水沙过程, 并泄放有利于河道冲刷的大流量过程, 可以充分发挥水流在大流量期间的输沙效率, 起到冲刷下游河道、扩大其排洪输沙能力的作用。

黄河调水调沙中, 水沙调控指标的确定至关重要, 其合理性决定了排沙减淤的调度目标能否顺利实现。在2002年的首次黄河调水调沙原型试验中, 通过分析1960年9月至1996年6月397场黄河下游水沙过程的冲淤规律, 提出花园口站平均含沙量为20 kg/m^3 、流量为2600 m^3/s 、历时6d的调控指标成功指导了调水调沙调度实践, 取得了黄河下游河道全线冲刷0.36亿t的效果^[10]。为了更好地发挥小浪底水库拦沙期的减淤效益, 国内诸多学者围绕下游河道冲淤及对水库调控需求开展了大量的研究。李小平等^[11]通过分析三门峡和小浪底水库拦沙期黄河下游洪水过程, 认为流量达到4000 m^3/s 时冲刷效率最大; 万占伟等^[12]根据小浪底水库运用以来黄河下游河道变化情况, 提出了利于输沙的流量、历时、峰型等调控指标; 陈翠霞等^[13]提出了黄河下游不同平滩流量大小对应的含沙量调控指标; Cheng等^[14]定量分析了小浪底水库运用以来黄河下游不同河段冲刷效率的变化过程及其影响因素。总体而言, 以往研究在黄河下游冲淤规律以及水沙调控指标方面取得了丰富的成果, 对不同阶段的调水调沙调度起到了一定指导作用。

河道冲淤与来水来沙条件、河道边界条件等直接相关^[15-16], 以往研究成果大多是建立在前期实测资料

收稿日期: 2024-02-23; 网络出版日期: 2024-07-15

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20240711.1736.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2243237; U22A20237)

作者简介: 陈翠霞(1987—), 女, 河南濮阳人, 高级工程师, 主要从事水库调度研究。E-mail: cxchen87@qq.com

通信作者: 朱呈浩, E-mail: zch950826@163.com

分析的基础上^[17-18]。小浪底水库自1999年起已运行25 a,当前黄河下游河道状态发生了显著变化^[19-21],下游河道已累计冲刷泥沙31.73亿t,河床平均下切3.1 m,最小平滩流量由2002年汛前的1 800 m³/s恢复至2010年的4 000 m³/s并维持相对稳定状态(至2023年汛前为4 600 m³/s)。在此背景下,如何长期维持该河槽规模,多输沙入海,同时兼顾水库多排沙延长水库使用年限,已成为调水调沙减淤调度新的目标。受水库调控后的水沙过程、河道冲淤规律与水库运行前差别较大的影响,原有水沙调控指标已无法满足黄河调水调沙减淤调度的需求。因此,有必要深入研究黄河下游现状河道边界条件下的冲淤规律,并提出水沙调控指标。

本研究基于小浪底水库调控作用影响,选取黄河下游不同含沙量级场次水沙过程,分析2011年以后黄河下游冲淤规律及影响因素,提出黄河下游水沙调控指标,以期当前及今后一个时期内黄河调水调沙调度决策提供参考价值。

1 研究区域及分析方法

1.1 研究区域概况

黄河下游河道自小浪底坝下起,沿途汇入伊洛河和沁河等支流,经黄淮海平原,于山东省垦利县注入渤海(图1)。下游河道全长772 km,按其特性可分为3段:高村以上河段长299 km,河道宽浅,水流散乱,主流摆动频繁,为游荡型河段,两岸堤距平均为8.4 km,最宽处为20 km;高村—陶城铺河段长165 km,由于近年来修建了大量河道整治工程,主流趋于稳定,属于由游荡型向弯曲型转变的过渡型河段,两岸堤距平均为4.5 km;陶城铺—利津河段长308 km,现状为受到工程控制的弯曲型河段,河势比较规顺,两岸堤距平均为2.2 km。利津以下为入海段。

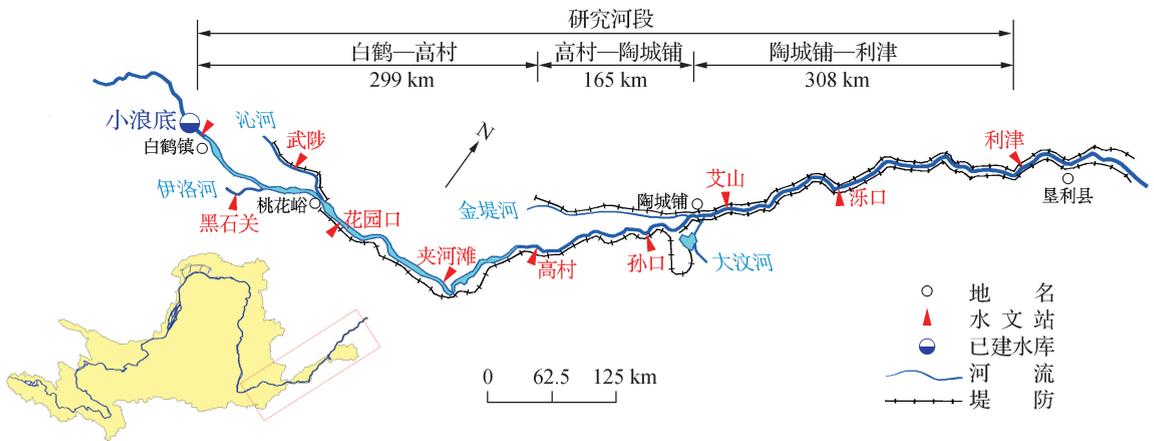


图1 黄河下游河道概况

Fig. 1 Sketch of the Lower Yellow River

黄河水利科学研究院每年会开展黄河下游河道排洪能力分析工作,基于平滩水位对不同河段及典型断面平滩流量进行计算^[22]。通过套绘黄河下游典型断面平滩流量变化过程(图2(a))以及床沙平均中值粒径变化过程(图2(b)),可以发现与小浪底水库运行前的1999年汛前相比,2023年汛前最小平滩流量由2 400 m³/s增大到4 600 m³/s,床沙平均中值粒径由0.05 mm增大到0.1 mm以上。从图2和图3同样可以看到,2011年以后,黄河下游河床粗化到一定程度后冲刷难度加大,平滩流量以及床沙粒径基本趋于稳定,因此可以视为黄河下游的相对稳定时期。根据程亦菲等^[18]研究成果,2011年以后黄河下游河段平均尺度的平滩宽度、平滩水深、河相系数等河槽形态参数也基本保持不变。截至2023年汛前,小浪底水库淤积34.57亿m³,剩

余拦沙库容 40.93 亿 m^3 。未来一段时期内,小浪底水库将继续发挥拦沙和调水调沙作用,而且黄河中游的古贤水库建成后将进一步拦减进入黄河下游的泥沙,加之河道整治工程的续建,可预见黄河下游将长期维持目前的相对稳定状态。

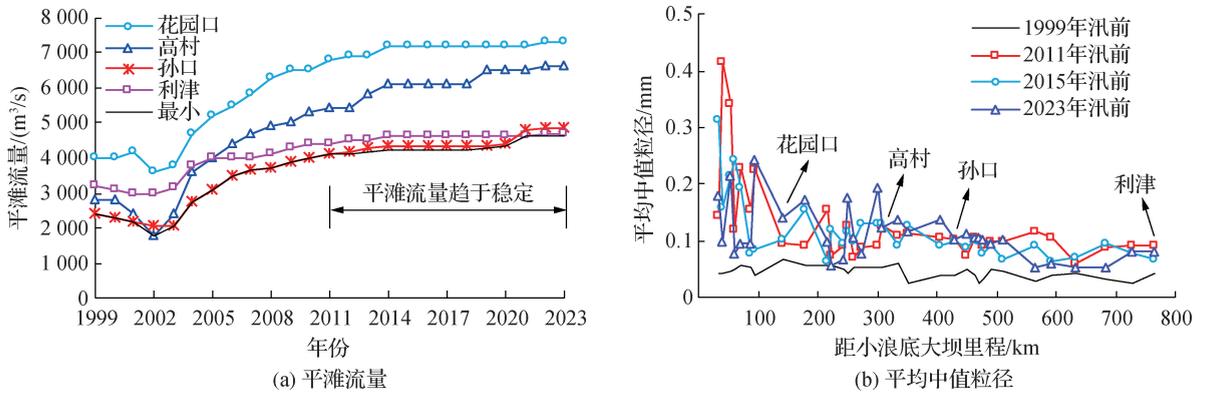


图2 黄河下游典型断面平滩流量和床沙平均中值粒径变化过程

Fig. 2 Variations of bankfull discharge and average median diameter of bed sand for typical cross-sections in the Lower Yellow River

1.2 研究数据及分析方法

黄河下游水沙过程用干流小浪底站、支流伊洛河黑石关站、支流沁河武陟站 3 个水文站之和(以下简称小黑武站)表示,黄河下游沿程还有花园口、夹河滩、高村、孙口、艾山、冻口和利津 7 个水文站,上述 10 个水文站观测有逐日平均流量、含沙量、悬沙级配等数据。黄河下游每年汛前和汛后会开展河道断面以及床沙级配的测验工作。本次收集 2011—2022 年的数据资料作为研究基础,资料来源于黄河水利委员会水文局现场观测及整编。

场次水沙过程的选取需遵循一定原则,对于高含沙量水流(平均含沙量 $S_{av} > 10 \text{ kg}/\text{m}^3$),以日均含沙量明显高于前一天作为起始时刻,当日均含沙量衰减至明显低于前几天平均值时作为结束时刻;对于清水水流($S_{av} < 1 \text{ kg}/\text{m}^3$),以一定时间内流量比较稳定未出现较大变幅为准。考虑到水沙从小浪底坝下传播至高村一般需要 2 d,传播至利津一般需要 5 d,因此在小黑武站水沙过程选取后,高村站水沙过程采用 2 d 后对应时段内的,利津站水沙过程采用 5 d 后对应时段内的。若选取的水沙过程不足 5 d,则往后延长至 5 d,保证是一场完整的水沙过程。

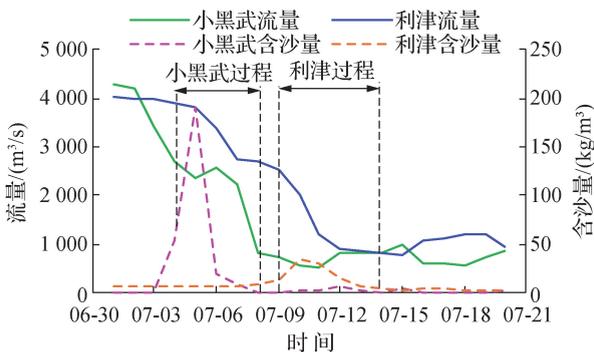


图3 小黑武站和利津站日均流量及含沙量过程

Fig. 3 Process of daily averaged discharge and sediment concentration of Xiaohewu station and Lijin station

以 2022 年 7 月 1—20 日小黑武站和利津站实测日均流量、含沙量变化过程为例(图 3),说明一场高含沙量水流是如何选取的。

从图 3 中可以看到,7 月 4 日日均含沙量从前一天的 $0.03 \text{ kg}/\text{m}^3$ 突增至 $52.79 \text{ kg}/\text{m}^3$,因此该日应作为高含沙量水流的起始时刻;随后日均含沙量先增后减,在 7 月 7 日降至 $9.74 \text{ kg}/\text{m}^3$,明显低于前 3 d 的平均值 $87.59 \text{ kg}/\text{m}^3$,因此 7 月 7 日应作为结束时刻。但考虑到 7 月 4—7 日不足 5 d,因此往后延长 1 d 至 7 月 8 日作为结束时刻,相应利津站的水沙过程为 7 月 9—13 日。进一步从利津站的水沙过程可以看到,日均含沙量在 7 月 12 日仍然较高,在 7 月 13 日以后才基本趋于稳定,这说明 7 月 12 日高含沙量水流的泥沙尚未完

全输送至利津,因此从确保水沙过程的完整性、避免计算结果失真的角度,时间选取在5 d及以上是合理的。

在水沙过程选取后,采用输沙率法计算河段冲淤量及冲淤效率,即根据黄河下游进口(小黑武站)和出口(利津站)的水沙量进行计算。断面法也可计算河段冲淤变化,但黄河下游河道地形测验时间一般为汛前4—5月和汛后10—11月,时间间隔较长,无法反映场次洪水期间的冲淤变化。高含沙量水流期间,下游引黄涵闸为了避免引水口门淤堵一般会停止引水;清水水流期间,含沙量较低,即使引水对沙量的影响也很小,因此在进行场次水沙过程的冲淤计算时,不再考虑引水引沙的影响。黄河下游冲淤量及冲淤效率计算公式如下:

$$\Delta C = C_{xhw} - C_l \quad (1)$$

$$\eta = 1\,000\Delta C/W_{xhw} \quad (2)$$

式中: ΔC 为冲淤量,亿t,正值表示淤积,负值表示冲刷; C_{xhw} 为小黑武站沙量,亿t; C_l 为利津站沙量,亿t; W_{xhw} 为小黑武站水量,亿 m^3 ; η 为冲淤效率, kg/m^3 ,正值表示淤积,负值表示冲刷。

对于高村以上平滩流量较大的宽河段和高村以下平滩流量较小的窄河段,按照同样的方法也可以分段进行冲淤量和冲淤效率的计算。

2 小浪底水库对黄河下游水沙的调控作用

黄河下游年水量、沙量变化见图4。由图4可知,2014—2017年为连续枯水年,年均水量为217.1亿 m^3 ,由于小浪底水库排沙动力较弱,黄河下游沙量较少,年均沙量为0.07亿t;2018—2021年水量丰枯急转,年均均为469.9亿 m^3 ,调水调沙调度在维持黄河下游河槽规模的基础上兼顾小浪底水库多排沙,黄河下游沙量明显增多,特别是2018—2020年年均沙量为4.46亿t。

进一步按照不同含沙量级和不同流量级统计了黄河下游多年平均水沙量。为便于文中表述,参考《泥沙设计手册》中对于多沙河流(年平均含沙量大于 $10\text{ kg}/m^3$)和少沙河流(年平均含沙量小于 $1\text{ kg}/m^3$)的定义,对划定的3个含沙量级分别称之为高含沙量水流、低含沙量水流($1 < S_{av} < 10\text{ kg}/m^3$)和清水水流。经统计,高含沙量水流的水量次多,沙量最多,其中水量占比为9%,沙量占比为94%(水量、沙量占比均为占全年水量、沙量的比例,下同),且水沙全部集中在汛期;低含沙量水流的水量最少,沙量次多,其中水量占比为6%,沙量占比为6%,且水沙同样全部集中在汛期;清水水流的水量最多,沙量最少,其中水量占比为85%,沙量占比几乎为0,且水量大部分集中在非汛期。另外,从不同流量级来看,高含沙量水流的水量和沙量主要集中在大于 $2\,000\text{ m}^3/s$ 的流量级,其中水量占比为7%,沙量占比为86%;低含沙量水流的水量和沙量在不同流量级分布较均匀;清水水流的水量主要集中在小于 $2\,000\text{ m}^3/s$ 的流量级,占比为67%。

上述分析结果说明了在小浪底水库的调控作用下,黄河下游水沙过程呈现两极分化特性,即要么为含沙量很高的高含沙量水流,要么为含沙量很低的清水水流,其中沙量集中在高含沙量水流期间,水量集中在清水水流期间,低含沙量水流无论是水量还是沙量都相对较少。产生上述结果的原因是,小浪底水库一般在调水调沙期间降至较低水位时集中排沙,此时一般为汛期的7—8月,在其他时段水位较高,或不排沙,或仅能通过异重流的方式排出少量泥沙。

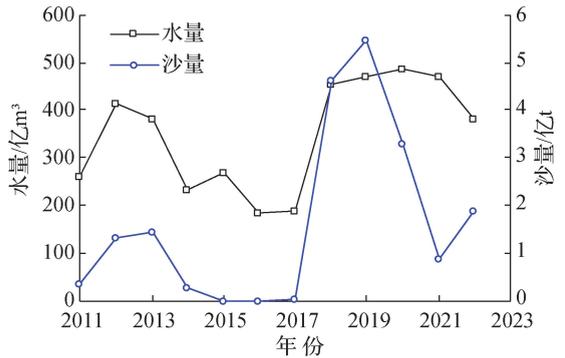


图4 2011—2022年黄河下游年水量、沙量变化过程
Fig. 4 Process of annual runoff and sediment in the Lower Yellow River from 2011 to 2022

3 黄河下游冲淤规律分析

对高含沙量水流、低含沙量水流、清水水流的冲淤规律分别进行分析,以此来指导黄河下游水沙调控指标的制定。

3.1 高含沙量水流淤积效率与水沙条件的关系

选取研究时段内全部 14 场高含沙量水流作为分析基础,见表 1。由表 1 可知,高含沙量水流的平均流量范围为 745 ~ 2 980 m³/s,平均含沙量范围为 11.92 ~ 105.40 kg/m³。点绘并拟合 14 场高含沙量水流期间黄河下游淤积效率与平均含沙量的关系,见图 5(a)。结果显示,淤积效率与平均含沙量呈正相关的线性关系 ($R^2 = 0.95$),即随着平均含沙量的增大,淤积效率同样增大且增速保持不变,该结果也符合黄河下游“多来、多排、多淤”的特点。根据该拟合公式,可以得出使黄河下游不冲不淤的临界平均含沙量为 14.15 kg/m³,与以往研究提出的 20 kg/m³ 相比偏小,分析原因是近期黄河下游持续冲刷,与小浪底水库运用之初相比,河床粗化,下层床沙固结程度增大,因此冲刷难度提高,输沙效率有所降低。

表 1 2011—2022 年黄河下游高含沙量水流统计结果

Table 1 Statistical results of hyperconcentrated flow in the Lower Yellow River from 2011 to 2022

开始时间	历时/ d	平均流量/ (m ³ /s)	平均含沙 量/(kg/m ³)	水量/ 亿 m ³	沙量/ 亿 t	冲淤量/亿 t			冲淤效率/(kg/m ³)			高村以上淤 积比例/%
						高村以上	高村以下	全下游	高村以上	高村以下	全下游	
2011-07-04	5	1 640	46.58	7.06	0.33	0.17	0.08	0.25	24.27	11.24	35.50	68
2012-07-03	7	2 210	43.13	13.34	0.58	0.29	0	0.28	21.58	-0.34	21.24	102
2012-07-25	14	2 510	21.92	30.37	0.67	0.15	0	0.15	4.81	0.03	4.83	99
2013-07-03	32	2 420	20.65	66.88	1.38	0.36	-0.08	0.28	5.42	-1.19	4.23	128
2014-07-05	5	2 070	30.06	8.93	0.27	0.15	0.03	0.19	16.96	3.83	20.79	82
2018-07-04	25	2 910	65.61	62.86	4.12	2.57	0.18	2.75	40.92	2.80	43.72	94
2018-08-14	18	1 880	16.05	29.19	0.47	-0.03	0	-0.04	-1.20	0	-1.20	/
2019-07-06	38	2 980	54.69	97.91	5.35	3.71	0.30	4.00	37.87	3.02	40.88	93
2019-09-02	6	1 100	11.92	4.74	0.06	-0.02	0.03	0.01	-3.93	7.03	3.10	/
2020-07-05	40	2 410	36.26	83.43	3.02	1.48	0.32	1.80	17.76	3.86	21.62	82
2021-07-04	5	2 130	62.32	9.22	0.57	0.37	0.07	0.44	40.55	7.09	47.63	85
2022-07-04	5	2 290	105.40	9.90	1.04	0.78	0.10	0.88	78.69	10.39	89.08	88
2022-07-14	10	1 610	38.50	13.88	0.53	0.18	-0.02	0.15	12.80	-1.69	11.12	115
2022-08-13	19	745	19.31	12.24	0.24	0.06	0.07	0.13	4.58	6.07	10.65	43

值得注意的是,本次研究得出的淤积效率仅与平均含沙量相关,而与平均流量无关的结论与以往认知不符(图 5(a)),分析原因主要有以下 3 点:①选取的高含沙量水流大部分为 2 000 ~ 3 000 m³/s 流量级,共有 9 场,其余几场也基本与该流量级相差不大,仅有 1 场平均流量为 745 m³/s 的相对较小,因此研究结果主要由 2 000 ~ 3 000 m³/s 流量级决定;②对于平均流量最小的这场,实测的淤积效率(10.65 kg/m³)相比公式计算的淤积效率(4.90 kg/m³)是明显偏大的,也就是符合流量越小、输沙效率越低的规律,但由于平均含沙量较低,因此绝对误差不是很大,对公式影响较小;③受小浪底水库拦粗排细作用的影响,黄河下游的泥沙多数为细沙(粒径 $d < 0.025$ mm),以 2018 年为例,小浪底站实测悬沙平均中值粒径为 0.018 mm,分析认为细沙在平均流量大于 2 000 m³/s 后,即可达到较高的输沙效率,因此随着流量的继续增大输沙效率不再明显提高。需要说明的是,高含沙量水流的平均流量都在 3 000 m³/s 以下,与以往研究提出的调控流量上限

($4\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$)相比偏低,原因是为了避免黄河下游高含沙量洪水期间洪峰增值可能带来的洪水漫滩风险,一般调水调沙调度时在小浪底水库集中排沙期间会对下泄流量进行一定程度的压减。

进一步分河段点绘并拟合高村以上宽河段和高村以下窄河段淤积效率与平均含沙量的关系,见图5(b)和图5(c)。结果显示,高村以上宽河段淤积效率与平均含沙量同样呈正相关的线性关系,而高村以下窄河段淤积效率与平均含沙量则没有太好的关系,该结果说明高村以上宽河段的泥沙淤积与整个黄河下游的泥沙淤积相关度更高。分析原因是高村以上宽河段距离小浪底大坝更近,受小浪底水库调控作用的影响更明显,在经历了长期冲刷后,平滩流量更大,因此对高含沙量水流携带的泥沙具有较强的滞存能力和调节作用。经高村以上宽河段自然调节后的水沙过程已经变得相对协调,因此在高村以下窄河段演进时更容易将泥沙输送走,也就与进入下游河道的水流平均含沙量关系密切度不高。同样在表2中可以看到,对于平均流量大于 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 的9场高含沙量水流,高村以上宽河段的淤积比例均大于80%,平均为95%;而对于平均流量小于 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 的5场水流,高村以上宽河段的淤积比例最小可低至43%。该结果说明即使经高村以上宽河段调节后的水沙过程,也需要较大的流量才能将泥沙从高村以下窄河段输送走,否则将会使泥沙在窄河段继续沿程落淤。

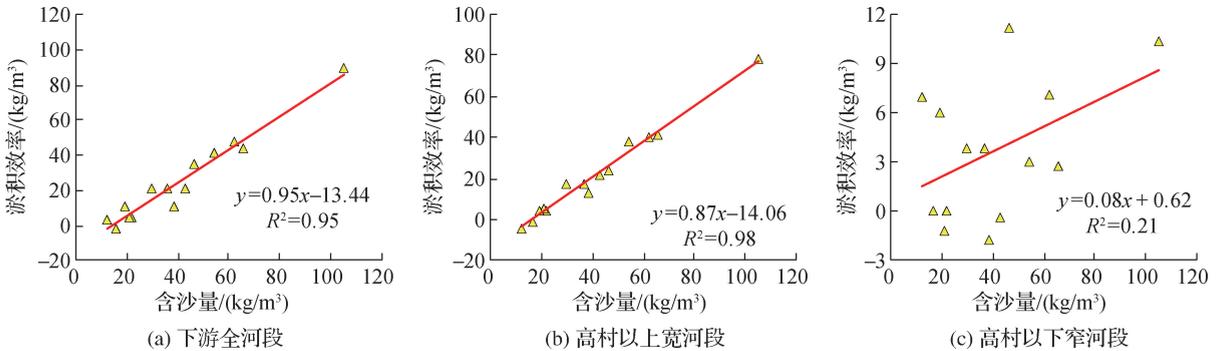


图5 高含沙量水流期间淤积效率与平均含沙量的关系

Fig. 5 Relationship between siltation efficiency and average sediment concentration in hyperconcentrated flow

3.2 低含沙量水流冲淤表现

选取研究时段内9场低含沙量水流作为分析基础。低含沙量水流的平均流量范围为 $983 \sim 4\ 250\ \text{m}^3/\text{s}$,平均含沙量范围为 $1.25 \sim 5.74\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。低含沙量水流期间黄河下游基本表现为冲刷,且除去2020年8月14日至9月2日历时较长(20 d)、平均流量较大($3\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$)的1场外,冲刷量较小,均小于0.2亿t。分河段来看,高村以上宽河段全部表现为冲刷,高村以下窄河段不冲不淤或微淤。分析原因是低含沙量水流经过高村以上床沙的沿程补充后,水流挟沙能力基本达到饱和。需要说明的是,低含沙量水流的水量和沙量占全年的比例较少,因此整体上对黄河下游冲淤影响不大。

3.3 清水水流冲刷效率与水沙条件的关系

选取研究时段内98场清水水流作为分析基础,平均流量范围为 $348 \sim 4\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$ 。分析发现当清水水流平均流量小于 $800\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,黄河下游冲刷效率很小,基本在 $1\ \text{kg}/\text{m}^3$ 以下。因此在分析清水水流期间黄河下游冲刷效率与平均流量的关系时,筛选掉了28场平均流量小于 $800\ \text{m}^3/\text{s}$ 的场次,以避免小流量过程对拟合公式的影响,见图6(a)。结果显示,冲刷效率与平均流量呈正相关的对数关系($R^2 = 0.80$),即随着平均流量的增大,冲刷效率同样增大但增速逐渐减小。根据该拟合公式,可以计算出平均流量为 $4\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时对应的冲刷效率为 $7.12\ \text{kg}/\text{m}^3$,与以往研究所提出的冲刷效率为 $20\ \text{kg}/\text{m}^3$ 左右相比明显偏小,分析原因同样是受近期黄河下游持续冲刷以后下层床沙固结程度增大的影响。

进一步分河段点绘并拟合 98 场清水水流期间高村以上宽河段和高村以下窄河段冲刷效率与平均流量的关系, 见图 6(b) 和图 6(c)。从图 6(b) 可见, 高村以上宽河段冲刷效率同样与平均流量呈正相关的对数关系 ($R^2=0.68$), 说明在清水水流期间, 主要是该河段起到了冲刷作用。从图 6(c) 中可以看到, 虽然高村以下窄河段冲刷效率与平均流量没有明显的关系, 但值得注意的是, 高村以下窄河段冲淤状态的转换在平均流量上有明显的分界点, 当平均流量小于 $800 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 基本表现为微淤或不冲不淤; 当平均流量在 $800 \sim 1\,800 \text{ m}^3/\text{s}$ 范围时, 基本表现为淤积; 当平均流量大于 $1\,800 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 基本表现为冲刷。该结果说明平均流量在 $800 \sim 1\,800 \text{ m}^3/\text{s}$ 范围时, 会出现冲刷高村以上宽河段的泥沙并淤积在高村以下窄河段的现象。分析原因是当平均流量处于该区间时, 能够冲刷高村以上宽河段并恢复一定的含沙量, 同时随着沿程引黄用水量的损耗, 平均流量不断减小, 当演进至高村以下时, 已经减小到水流挟沙能力不足以输送从高村以上带来的泥沙, 因此泥沙开始落淤。例如, 2014 年 3 月 5—31 日的这场清水中, 黄河下游的平均流量为 $1\,390 \text{ m}^3/\text{s}$, 演进至高村时平均流量还有 $1\,200 \text{ m}^3/\text{s}$, 但演进至利津时平均流量仅剩 $321 \text{ m}^3/\text{s}$ 。而当平均流量较大或较小时, 要么即使经过沿程引黄用水量的损耗, 仍然有较大的平均流量和输沙能力, 要么一开始在高村以上就难以冲刷, 也就不会在高村以下淤积。

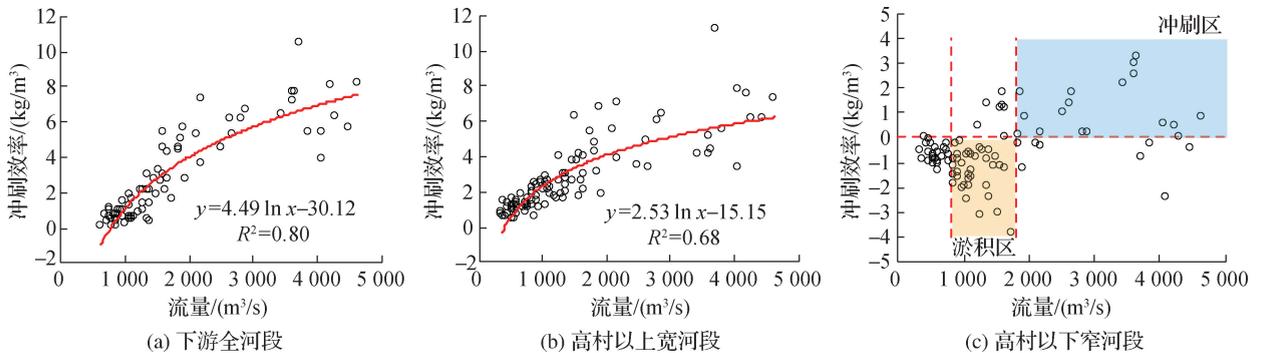


图 6 清水水流期间冲刷效率与平均流量的关系

Fig. 6 Relationship between scour efficiency and average discharge in clear flow

4 黄河下游水沙调控指标制定

利用黄河下游河道上宽下窄的特性进行泥沙多年调节, 在小浪底水库集中排沙时, 通过高村以上宽河段滞存泥沙, 随后在水库清水下泄时, 再将这部分泥沙冲刷起来间接输沙入海。由于高村以上宽河段的平滩流量大于高村以下窄河段, 因此即使有短时间的淤积, 也不会对黄河下游全河段的排洪输沙能力造成太大影响。通过水沙调控指标的制定来实现上述思路时, 需要满足黄河下游不淤积以及主槽过流能力不降低的总体要求。

4.1 黄河下游不淤积的水沙调控指标

黄河下游不淤积的基础是淤积量小于泥沙处理量。反之, 泥沙处理量即是黄河下游最大可允许的淤积量。泥沙处理量包括清水冲刷量、引沙量和采砂量 3 部分。由于不同来水年份的水量差别较大, 因此在计算清水冲刷量时, 首先需要按照丰、平、枯水年进行区分。研究时段内 2018—2021 年为丰水年, 2011—2013 年、2022 年为平水年, 2014—2017 年为枯水年, 与潼关站实测百年水沙系列都是丰枯同频^[23]。对于丰、平、枯水年, 分别统计不同流量级清水水量, 再根据清水水流期间冲刷效率与平均流量的关系式计算冲刷量 (表 2)。对于引沙量和采砂量, 分别根据黄河下游引水引沙情况和采砂规划情况确定, 结果见表 2。

进一步根据近几年黄河调水调沙调度实践, 结合陈翠霞等^[24]提出的黄河调水调沙“丰调枯蓄”运用方式,

认为若未来小浪底水库采用丰水年多开展调水调沙多排沙、平水年仅开展1次汛前调水调沙适量排沙、枯水年不开展调水调沙不排沙的策略,则丰、平、枯水年黄河下游高含沙量水流的水量约分别为80亿、10亿和0 m³。由于枯水年不排沙,而且实测资料表明枯水年和丰水年同频,因此枯水年的泥沙处理量可跨年调节丰水年的淤积量。根据高含沙量水流期间淤积效率与平均含沙量的关系式,即可得到丰、平水年的平均含沙量分别为50、150 kg/m³,该指标即为小浪底水库集中排沙时,黄河下游高含沙量水流的平均含沙量调控指标,对应的水量调控指标分别为80亿、10亿 m³,对应的小浪底水库排沙量分别为4亿、1.5亿 t。采用该水沙调控指标,不同来水条件下黄河下游泥沙处理量及淤积量基本可达到平衡(表2)。

表2 不同来水条件下泥沙处理量及淤积量

Table 2 Sediment disposal and deposition amount under different runoff conditions

单位:亿 t

来水条件	泥沙处理量				泥沙淤积量
	清水冲刷量	引沙量	采砂量	合计	
丰水年	1.12	0.39	0.39	1.90	2.72
平水年	0.66	0.27	0.39	1.32	1.29
枯水年	0.19	0.14	0.39	0.72	0

4.2 黄河下游主槽过流能力不降低的水沙调控指标

在实现黄河下游整个河段不淤积的基础上,还需要实现高村以下窄河段不淤积,即防止出现冲河南淤山东的情况,才能保证黄河下游主槽过流能力不降低。前文分析表明,高含沙量水流平均流量大于2 000 m³/s时,高村以上宽河段的淤积比例均大于80%;平均流量小于2 000 m³/s时,淤积比例最小可低至43%。因此,为了避免泥沙淤积在高村以下窄河段,平均流量的调控指标应大于2 000 m³/s。清水水流平均流量小于800 m³/s时,高村以下窄河段基本表现为微淤或不冲不淤;平均流量大于1 800 m³/s时,基本表现为冲刷。因此,为了防止出现冲刷高村以上宽河段的泥沙并淤积在高村以下窄河段的问题,需要避免下泄平均流量在800~1 800 m³/s范围内的水流过程。

需要进一步说明的是,本研究所提出的高含沙量水流期间的调控指标,是与小浪底水库调水调沙调度相结合的,而要想达到一次完整的调水调沙过程输沙入海,需要保证流量历时在5 d及以上。同时,为避免下游洪水漫滩,需要对流量上限进行控制,当前可暂按黄河下游最小平滩流量4 600 m³/s控制。调水调沙的启动条件为水库蓄水量及河道来水量满足水量指标要求^[23]。

总体而言,本研究提出的调控指标能够充分发挥水沙调控的排沙减淤效益,同时实现黄河下游不淤积以及主槽过流能力不降低。值得注意的是,上述调控指标是基于长水文周期视角提出的,在实际调度中,还需要根据前期河道冲淤情况,对本年度的调控指标进行适当优化。例如,若前一年淤积量较大,则本年度平均含沙量的调控指标可适当降低;若遭遇连续枯水年,则下一个丰水年可根据前期河道连续冲刷情况适当提高水库排沙量。

5 结 论

2011年以来黄河下游维持相对稳定状态,基于2011—2022年下游实测水沙资料研究了小浪底水库的调控作用以及河道冲淤效率与水沙条件的响应关系,提出了适应现行河道冲淤特性的水沙调控指标,主要结论如下:

(1) 小浪底水库对黄河下游水沙过程具有两极分化的调控作用,高含沙量水流的水量占比小,但沙量占比大,主要集中在汛期大于2 000 m³/s的流量级;清水水流的水量占比大,但沙量占比小,主要集中在非汛

期小于 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 的流量级。

(2) 河道冲淤变化与水库调控后的水沙过程有较大关系。高含沙量水流的淤积效率与平均含沙量呈正相关线性关系；清水水流的冲刷效率与平均流量呈正相关对数关系；低含沙量水流对黄河下游冲淤影响不大。

(3) 根据丰、平、枯水年的不同来水条件，从长水文周期视角提出了水量、沙量、平均流量、平均含沙量、历时等水沙调控指标，可满足黄河下游不同河段冲淤平衡。在实际调度中，还需要根据前期河道冲淤情况，对本年度的调控指标进行适当优化。

参考文献：

- [1] 张为, 吴美琴, 李思璇, 等. 三峡水库蓄水后城陵矶至九江段河道冲淤调整机理[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 162-171. (ZHANG W, WU M Q, LI S X, et al. Mechanism of adjustment of scouring and silting of Chenglingji—Jiujiang reach in the middle reaches of the Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Dam[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(2): 162-171. (in Chinese))
- [2] 张原锋, 王平, 申冠卿, 等. 小浪底水库运用对黄河下游河道水流阻力的影响[J]. 水科学进展, 2023, 34(6): 858-866. (ZHANG Y F, WANG P, SHEN G Q, et al. Impact of Xiaolangdi Reservoir operations on flow resistance in the Lower Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(6): 858-866. (in Chinese))
- [3] 左利钦, 陆永军, 王洪杨, 等. 荆江河段泥沙冲淤对三峡水库汛期排沙的响应[J]. 水科学进展, 2023, 34(1): 115-125. (ZUO L Q, LU Y J, WANG H Y, et al. Responses of erosion and deposition in the Jingjiang reach to sediment delivery of the Three Gorges Reservoir during flood season[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(1): 115-125. (in Chinese))
- [4] 陈立, 王愉乐, 邹振华, 等. 三峡水库蓄水后下游河道悬沙恢复效率[J]. 水科学进展, 2023, 34(5): 697-707. (CHEN L, WANG Y L, ZOU Z H, et al. Efficiency of suspended sediment recovery in the downstream reaches of the Three Gorges Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(5): 697-707. (in Chinese))
- [5] 胡春宏, 张晓明, 赵阳. 黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 725-733. (HU C H, ZHANG X M, ZHAO Y. Cause analysis of the centennial trend and recent fluctuation of the Yellow River sediment load[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 725-733. (in Chinese))
- [6] 刘晓燕. 黄土高原现状产沙情势评价[J]. 水利学报, 2023, 54(1): 24-33. (LIU X Y. Evaluation on present status of sediment yield in the Loess Plateau[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(1): 24-33. (in Chinese))
- [7] 李国英. 基于水库群联合调度和人工扰动的黄河调水调沙[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1439-1446. (LI G Y. Regulation of water and sediment for the Yellow River based on joint operation of reservoirs and artificial intervention[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1439-1446. (in Chinese))
- [8] 韩其为. 论黄河调水调沙[J]. 天津大学学报, 2008, 41(9): 1015-1026. (HAN Q W. Regulation of flow-sediment in the Yellow River[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(9): 1015-1026. (in Chinese))
- [9] 高兴, 朱呈浩, 刘俊秀, 等. 新时期黄河调水调沙思考与建议[J]. 人民黄河, 2023, 45(2): 42-46. (GAO X, ZHU C H, LIU J X, et al. Thoughts and suggestions on water-sediment regulation of the Yellow River in the new period[J]. Yellow River, 2023, 45(2): 42-46. (in Chinese))
- [10] 李国英. 黄河调水调沙[J]. 人民黄河, 2002, 24(11): 1-4, 46. (LI G Y. The Yellow River water and sediment regulation [J]. Yellow River, 2002, 24(11): 1-4, 46. (in Chinese))
- [11] 李小平, 李文学, 李勇, 等. 水库拦沙期黄河下游洪水冲刷效率调整分析[J]. 水科学进展, 2007, 18(1): 44-51. (LI X P, LI W X, LI Y, et al. Analysis of erosion efficiency and adjustment of flood in the Lower Yellow River during the storage periods[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(1): 44-51. (in Chinese))
- [12] 万占伟, 罗秋实, 闫朝晖, 等. 黄河调水调沙调控指标及运行模式研究[J]. 人民黄河, 2013, 35(5): 1-4. (WAN Z W, LUO Q S, YAN Z H, et al. Study on regulation index and operation mode of the Yellow River water and sediment regulation [J]. Yellow River, 2013, 35(5): 1-4. (in Chinese))
- [13] 陈翠霞, 卢嘉琪, 吴默溪, 等. 基于下游河道中水河槽维持的小浪底水库运用方式研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(11): 35-39. (CHEN C X, LU J Q, WU M X, et al. Study on the operation of Xiaolangdi Reservoir based on maintaining the

- river channel of median water of the Lower Yellow River[J]. *Yellow River*, 2021, 43(11): 35-39. (in Chinese))
- [14] CHENG Y F, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Recent variation in channel erosion efficiency of the Lower Yellow River with different channel patterns[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 1694-1707.
- [15] 申红彬, 吴保生, 吴华莉. 黄河下游河道边界条件影响输沙效率研究述评[J]. *水科学进展*, 2019, 30(3): 445-456. (SHEN H B, WU B S, WU H L. A review on the effects of boundary condition on sediment transport efficiency in the Lower Yellow River[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(3): 445-456. (in Chinese))
- [16] 申红彬, 吴保生. 冲积河流泥沙输移幂律函数指数变化规律[J]. *水科学进展*, 2018, 29(2): 179-185. (SHEN H B, WU B S. Exponent change rule of power law for sediment transport in alluvial rivers[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(2): 179-185. (in Chinese))
- [17] 程亦菲, 夏军强, 周美蓉, 等. 黄河下游游荡段排沙比对水沙条件与断面形态的响应[J]. *地理学报*, 2021, 76(1): 127-138. (CHENG Y F, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Response of sediment delivery ratio to the incoming flow-sediment regime and channel geometry in the braided reach of the Lower Yellow River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1): 127-138. (in Chinese))
- [18] 程亦菲, 夏军强, 周美蓉, 等. 黄河下游不同河段分组悬沙输移对河床冲淤的影响[J]. *水科学进展*, 2022, 33(3): 506-517. (CHENG Y F, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Effects of grouped suspended sediment transport on channel evolution in the Lower Yellow River[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(3): 506-517. (in Chinese))
- [19] 夏军强, 李洁, 张诗媛. 小浪底水库运用后黄河下游河床调整规律[J]. *人民黄河*, 2016, 38(10): 49-55. (XIA J Q, LI J, ZHANG S Y. Channel adjustments in the Lower Yellow River after the operation of Xiaolangdi Reservoir[J]. *Yellow River*, 2016, 38(10): 49-55. (in Chinese))
- [20] 程亦菲, 夏军强, 周美蓉, 等. 黄河下游游荡段过流能力调整对水沙条件与断面形态的响应[J]. *水科学进展*, 2020, 31(3): 337-347. (CHENG Y F, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Response of flood discharge capacity to the incoming flow and sediment regime and channel geometry in the braided reach of the Lower Yellow River[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(3): 337-347. (in Chinese))
- [21] 王彦君, 吴保生, 申冠卿. 1986—2015年小浪底水库运行前后黄河下游主槽调整规律[J]. *地理学报*, 2019, 74(11): 2411-2427. (WANG Y J, WU B S, SHEN G Q. Adjustment in the main-channel geometry of the Lower Yellow River before and after the operation of the Xiaolangdi Reservoir from 1986 to 2015[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2411-2427. (in Chinese))
- [22] 张春晋, 孙赞盈, 张敏, 等. 2023年黄河下游河道排洪能力分析[R]. 郑州: 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 2023. (ZHANG C J, SUN Z Y, ZHANG M, et al. Analysis on the discharge capability of the Lower Yellow River in 2023[R]. Zhengzhou: Yellow River Institute of Hydraulic Research, 2023. (in Chinese))
- [23] 高兴, 朱呈浩, 陈翠霞, 等. 考虑黄河水沙丰枯变化的小浪底水库调水调沙优化研究[J]. *人民黄河*, 2023, 45(10): 19-24. (GAO X, ZHU C H, CHEN C X, et al. Study on the optimization of water and sediment regulation of the Xiaolangdi Reservoir considering the change of wet-dry water and sediment in the Yellow River[J]. *Yellow River*, 2023, 45(10): 19-24. (in Chinese))
- [24] 陈翠霞, 朱呈浩, 高兴, 等. 新形势下黄河调水调沙“丰调枯蓄”运用方式[J]. *人民黄河*, 2024, 46(1): 32-38. (CHEN C X, ZHU C H, GAO X, et al. Operation mode of “regulation in wet years and storage in dry years” of water and sediment regulation in the Yellow River under the new situation[J]. *Yellow River*, 2024, 46(1): 32-38. (in Chinese))

Scouring and silting law of the Lower Yellow River and water and sediment regulation indicators after the regulation of Xiaolangdi Reservoir*

CHEN Cuixia^{1,2}, ZHU Chenghao^{1,2}, ZHAO Xiang^{1,2}, GAO Xing^{1,2}, LUO Qiushi^{1,2}

(1. *Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China*; 2. *Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources (Under Construction), Zhengzhou 450003, China*)

Abstract: In order to scientifically guide the practice of water and sediment regulation of the Yellow River, an optimization was necessary for water and sediment regulation indicators according to the law of scouring and silting in the Lower Yellow River after water and sediment regulation of the Xiaolangdi Reservoir. For this purpose, 121 water and sediment processes at different sediment concentrations measured in the Lower Yellow River from 2011 to 2022 were selected to analyze the water and sediment characteristics, and the relationship between the efficiency of scouring and silting and the water and sediment conditions. On this basis, water and sediment regulation indicators were proposed to ensure generally no siltation in the Lower Yellow River and no reduction of the discharge capacity of main channel. The results showed that: ① The Xiaolangdi Reservoir has a polarized regulation effect on the water and sediment process in the Lower Yellow River, that is, the sediment in the high sediment concentration flow (average sediment concentration $S_{av} > 10 \text{ kg/m}^3$) accounts for 94% in the whole year, and the water in the clear water flow ($S_{av} < 1 \text{ kg/m}^3$) accounts for 85% in the whole year. ② The silting efficiency of high sediment concentration flow has a positive linear correlation relationship with the average sediment concentration. ③ The scouring efficiency of clear water flow has a positive logarithmic correlation relationship with the average discharge. ④ For high sediment concentration flow, in a high flow year, the water volume regulated is 8 billion m^3 , the average discharge is 2 000—4 600 m^3/s and the average sediment concentration is 50 kg/m^3 ; in a normal flow year, the water volume regulated is 1 billion m^3 , the average discharge is 2 000—4 600 m^3/s and the average sediment concentration is 150 kg/m^3 ; and in a low flow year, no sediment is discharged from the reservoir. For clear water flow, it is necessary to avoid water flow process with an average discharge of 800—1 800 m^3/s .

Key words: law of scouring and silting; water and sediment regulation; water and sediment process; Xiaolangdi Reservoir; the Lower Yellow River

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2243237; No. U22A20237).