

对黄河下游河道认识的突破

A Breakthrough in Recognizing the River Course of the Lower Reaches of the Yellow River

齐 璞
(黄河水利委员会水科院 郑州 450003)

一、造成“小水大灾”的原因

近年来,随着清水资源的优先开发,龙羊峡、刘家峡两座大型水库投入运用,及上中游地区工农业用水的增长,黄河下游的问题更加突出。龙、刘水库汛期的最大蓄水量可达100亿 m^3 ,使得汛期进入下游的水量大为减小,含沙量增加,洪峰流量减小,洪水的造床作用减弱,河槽严重淤积并萎缩,平滩流量减小,二级悬河进一步发展,几乎年年出现长时间断流,防洪和水资源利用问题更加突出^[1]。

1. 河槽严重淤积,平滩流量减小
黄河是多沙河流,小水挟带的泥沙在河床中的大量淤积,是造成洪水水位逐年抬升的主要原因。表1给出的近年来花园口站典型洪水水位的变化表明,1973年8月和1992年8月的高含沙洪水均出现了历史最高洪水水位,而1977年7、8月的两场高含沙洪水的水位,与流量相近的1976年的低含沙洪水水位相比略低,1996年8月5日洪峰流量仅7860 m^3/s ,最大含沙量126 kg/m^3 的低含沙洪水也出现历史最高洪水水位。

据分析,造成洪水水位高低的主要原因是前期河床条件。当前期连续几年枯水、河槽连年淤积,或汛初小水大沙,均会造成前期河床集中淤积,使水位大幅度抬升,致使当年汛期出现历史最高洪水水位。由表1给出的历年汛初3000 m^3/s 和1000 m^3/s 的水位数据即可以证明。在出现历史最高洪水水位的年份,汛初3000 m^3/s 和1000 m^3/s 的水位均表现最高,如1973年、1992年、1996年。其中1969年至1973年为枯水系列,花园口站3000 m^3/s 水位累计抬升0.93m,1986年到1996年也是枯水系列,3000 m^3/s 水位抬升1.35m。由此可见,前期连续枯水引起河床连续淤高,是出现历史最高洪水水位的主要影响因素。

从表1给出的洪水水位与平滩流量对应关系可以看出,洪水水位最高与平滩流量最小均同时发生。如发生最高洪水水位的1973年、1992年、1996年,相应汛前的平滩流量均很小。

2. 二级悬河普遍存在,造成槽高滩低,一旦洪水漫滩必成“大灾”
造成二级悬河的主要原因是游荡性河道不

表1 花园口站近年典型洪水水位与平滩流量变化情况

年.月.日	1973.8.30	1976.8.27	1977.7.9	1977.8.8	1982.8.2	1992.8.16	1996.8.5
流量(m^3/s)	5 020	9 210	8 100	10 800	15 300	6 260	7 860
水位(m)	94.18	93.22	92.90	93.19	93.99	94.33	94.73
含沙量(kg/m^3)	450	53	546	809	47.3	534	126
历史最高否	最高					最高	最高
汛初 3 000(m^3/s)	92.89	92.42	92.36		92.76	93.40	93.75
水位 1 000(m^3/s)	92.12	91.75	91.83		92.10	92.65	93.00
平滩流量(m^3/s)	3 500	5 500	6 000	6 000	6 000	4 000	3 500

利的来水来沙条件没有得到根本改变之前,即在游荡性河道上进行河势控导。经常走水的河槽逐年淤高,但又不能摆动。但漫滩洪水在滩地上形成(自然堤)滩唇,远离主槽滩地,很少落淤,主槽的抬升速度远远大于滩地抬升速度,最终造成槽高滩低。一旦洪水漫滩则形成大的淹没损失。如1996年汛前,黄河下游的平滩流量不足3500 m^3/s ,在8月份发生的洪峰流量7860 m^3/s ,最大含沙量126 kg/m^3 的洪水,在花园口站洪水水位达94.73m,创历史最高,使高滩上水,顺堤行洪,造成走一路淹一路。这种极不合理的洪水演进过程,造成300多万亩滩地受淹,受灾人口达100多万,比1958年发生的流量22300 m^3/s 的特大洪水所造成的淹没损失还大。由此可见,造成“小水大灾”的主要原因是二级悬河的普遍存在与河槽的过流能力小。

面对黄河水沙条件的不利变化,在特殊情况下形成的三门峡水库“蓄清排浑”泥沙年调节的运用方式,受库区条件限制不能对黄河水沙进行大幅度调节,因此无法解决目前下游河道出现的问题。要想从根本上解决二级悬河的问题,则应与小浪底水库调水调沙运用相结合。

小浪底水库是黄河进入平原前最后一座狭谷型水库,具有较强的调节能力,不管黄河上中游水沙如何变化,都要经过小浪底水库的调节进入下游河道。故应通过水库调水调沙改变进入下游的水沙条件,控制小水挟沙与河槽淤积,利用大洪水输沙,并塑造有利输沙的新河槽,使平滩流量增大,一般洪水不再漫滩,从而防止小水大灾。

二、对黄河下游河道输沙能力的再认识

1. 高含沙水流研究

早在 50 年代著名泥沙专家钱宁教授就开创了高含沙水流流变特性的研究。随着黄河清水资源的优先开发，黄河高含沙水流的研究逐渐形成高潮，在 70 年代末 80 年代初，水利系统各单位进行了系统的试验研究，对高含沙水流的流变特性、运动特性和输沙特性的基本规律有了较全面的了解，为正确认识高含沙洪水在河道中的演变与输移规律奠定了基础^{[2][3]}。

黄河高含沙水流所以具有强大的输沙能力，是由于细颗粒的存在改变了流体的性质，使水流粘性大幅度增加；粗颗粒的沉速大幅度降低，使得很粗的泥沙颗粒在高含沙水流中输送也变得很容易。而河床对水流的阻力没有明显的改变，仍可用曼宁公式进行水力计算，在同样比降、水深的情况下，产生的流速不会减小。因此，利用黄河高含沙水流特性输送黄河泥沙，是十分经济理想的技术途径。

2. 多沙并非一定形成坏河
以往对黄河下游严重淤积，常笼统地归结为水少沙多。国内外主要大河的资料统计表明，黄河的确是年输沙量最多，达 16 亿 t；含沙量最高，年平均达 37.7kg/m³，为举世仅有的多沙大河。因此，增加了治黄工作的困难。然而，多沙河流是否一定形成坏河呢？其实不然。

就以黄河中游发源于“粗泥沙”的主要支流渭河、北洛河下游河道为例（详见表 2），说明含沙量高的河流，并非一定形成强烈游荡堆积的河流。渭河、北洛河下游河道的流量与比降均比黄河干流小，含沙量比黄河高。以流量最小的北洛河为例，多年平均流量仅 25.4m³/s，含沙量 128kg/m³，与黄河下游相比，流量差 53 倍，含沙量差 3.4 倍；河道比降为 1.7‰。略缓于黄河下游。但是前者却形成窄深稳定

的弯曲性河流，而后者却形成宽浅游荡性堆积的河道。这是什么缘故？

表 2 黄河主要干流不同河段特性比较

河段名称	河性	河长 (km)	比降 (‰)	流量 (m ³ /s)	多年平均来水		
					含沙量 (kg/m ³)	D ₅₀ (mm)	D< 0.01 mm(%)
黄河小北干流 (龙门~ 潼关)	宽浅 游荡	132	3~ 6	1 090	33.4	0.044	18.2
黄河下游 (铁谢~ 夹河滩)	宽浅 游荡	214	2~ 2.5	1 350	37.7	0.038	20.5
渭河 (临潼~ 潼关)	窄深 稳定	165	1~ 3	296	47.3	0.024	27.2
北洛河 (洛 17# ~ 朝邑)	窄深 稳定	87	1.7	25.4	128	0.036	12.4

根据对北洛河、渭河水沙条件与河床演变资料分析^{[4][5]}，主要是它的来水来沙组合有利。其泥沙主要由高含沙洪水输送（详见表 3，含沙量大于 300kg/m³的洪水挟带泥沙量分别占年总沙量的 72.4% 的 40.3%，丰沙年份常达 80~ 90% 以上。而造成塌滩的低含沙洪水很少发生，平水期流量小，含沙量低，河床不仅不淤，还会发生冲刷。造成塌滩的低含沙洪水，北洛河从 1958 年至 1988 年的 30 年中，仅于 1976、1983 年发生两次。在这样特殊条件下，塑造出比渭河更窄深的断面形态，河宽与水深的比值甚至小于 10，看上去就如一条规顺弯曲的渠道。显然这样的窄深河槽适合高含沙洪水的输送。甚至日平均流量仅 100m³/s 的洪水，含沙量高达 400~ 900kg/m³，经 100km 长的河道时亦不淤积，河段的排沙比可达 100%。由此可见，在一定的条件下，含沙量高的河流也可形成稳定的河流。

表 3 北洛河、渭河大于某级含沙量的沙量占总沙量百分数

含沙量(kg/m ³)		100	200	300	400	500	600	700	800	900
项目										
北洛河	1959~ 1989 年平均	88.2	80.8	72.4	64.0	51.2	35.0	17.1	10.5	1.54
	1977 年	93.3	90.1	89.0	87.3	86.0	66.0	28.0	21.9	0
	1959 年	99.5	98.0	92.0	87.0	72.0	61.2	58.4	55.2	13.6
	1974 年	93.0	87.0	86.0	84.0	78.0	62.0	46.8	46.8	31.5
渭河	1962~ 1988 年平均	68.6	54.9	40.3	25.8	15.2	3.91	1.12	0	
	1977 年	96.8	94.7	88.4	83.7	79.0	54.6	18.9	0	
	1973 年	98.3	93.7	92.7	71.5	37.5	10	0		
	1966 年	97.1	87.3	79.9	69.3	40.6	8.8	0		

3. 窄深河槽的输沙特性
系统分析黄河主要干支流不同河段大量的实测资料得知，河道具有窄深河槽是保证高含沙洪水长距离稳定输送的必要条件。
黄河下游河道的输沙特性决定了，各站的输沙能力不仅与本站流量大小有关，还与上游站含沙量有关。其河道的输沙能力与上游站含沙量成正比，在其条件不变时，输沙能力取决于上游站含沙量，其中含沙量的方次与河槽形态有关。在游荡性的宽浅河段仅为 0.6~ 0.8，艾山站以下的窄深河段达 1.0，表现出河槽形态愈窄愈有利于泥沙输送的特性。在洪水不漫滩时，上、下游站间的流量相等，构成窄深河槽“多来多排”的高效输沙特性。

黄河下游艾山站，实测最大含沙量达到 200kg/m³ 以上的洪水共发生 3 次，从含沙量在断面上分布情况可知，其表层含沙量 140~ 150kg/m³，底层含沙量 300kg/m³，没有达到均质流的输沙状态。但从河段排沙比达 100%，及洪水前后河床断面变化分析，在流量 3 000m³/s 时，可以顺利地长距离输送而不淤。艾山站以下的河道，虽然没有输送过含沙量更高的洪水，但是考虑到含沙量增加、流体粘性增大，粗颗粒的沉速会大幅度降低，当含沙量增加到 300~ 400kg/m³ 以上时，会更有利于泥沙颗粒的悬浮。1977 年 7、8 月在三门峡库区曾发生这样未曾预想的情况：两场洪水进库的最大含沙量分别为 616 和 911kg/m³，悬沙组成 d₅₀ 分别为 0.045mm 和

0.105mm, 坝前 40km 范围最高日平均水面比降分别为 0.27‰ 和 0.92‰, 进出库的排沙分别为 97% 和 99%。由此可知黄河高含沙水流在窄深河槽中, 可以在较弱的水流条件下输沙。

低含沙洪水期粗沙的输移特性表明, 在流量大于 $2\,000\text{m}^3/\text{s}$ 以后, 随着流量的增大, 平均河底高程不断降低, 说明床沙组成 $D_{50}=0.05\text{mm}\sim 0.1\text{mm}$ 的粗颗粒泥沙在洪水期也可顺利输送, 水库若利用洪水期排沙, 就不必拦粗排细。

以上分析计算表明, 在流量 $3\,000\text{m}^3/\text{s}$ 的洪水到来时, 目前的山东河道不仅能够顺利输送含沙量 200 多 kg/m^3 的洪水, 即使含沙量增加到 $300\sim 800\text{kg}/\text{m}^3$ 时, 也能顺利输送。黄河窄深河槽存在的巨大输沙潜力, 为解决黄河下游泥沙问题指明了解决的方向。

三、黄河下游河道的治理

1. 治理方向——窄槽宽滩的规顺河道

即使黄河中游地区的治理对减少泥沙完全不起作用, 但若利用窄深河槽, 当输沙流量为 $4\,000\text{m}^3/\text{s}$ 、含沙量为 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 时, 每天仍可输送泥沙 1.73 亿 t, 16 亿 t 泥沙 9 天即可入海, 用水量仅为 32 亿 m^3 。由此可见在理论上黄河前途是光明的。

黄河下游高村以上的宽浅游荡河段, 是利用河道输送高含沙洪水入海的主要障碍, 也是防洪整治困难的河段。

实测资料分析表明, 游荡性河道的河槽形态随着来水来沙变化会发生相应的调整: 来沙量大幅度减少时河槽冲刷趋向窄深; 小水带大沙则淤积河槽; 高含沙洪水可塑造窄深河槽; 较大的清水基流冲刷引起塌滩。在游荡性河道比降陡、水沙变幅大的情况下, 各种水沙相互制约、相互破坏, 使游荡性河道经常呈现宽浅散乱的形态, 河势变化呈随机性, 在目前整治条件下不能形成稳定的中水河槽。

河槽宽浅河段的输沙能力低, 是造成目前高含沙洪水在黄河下游严重淤积的主要原因。同时河槽宽浅无法约束洪水期河势的突然变化, 常造成平工出险、险工脱流, 形成十分被动的防洪局面。因此, 从减淤与防洪河道整治上考虑, 都需要把宽浅游荡河段治理成具有窄槽宽滩的规顺河道。

2 改造宽浅游荡河段的可行途径^[6]

对于宽浅游荡河段的改造, 首先要改变来水来沙条件, 控制小水淤槽, 泥沙应主要由洪水输送, 自行塑造窄深河槽, 然后充分利用其输沙入海。从渭河、北洛河形成的水沙条件与黄河下游高含沙洪水期间河槽形态的调整分析, 这是经济可行的。只要能人为地促成历时较长、流量比较稳定的高含沙洪水, 则可产生改造河道和减少淤积的显著效果。

1977 年黄河小北干流和 1973 年黄河下游夹河滩以上的游荡河段, 在高含沙洪水连续发生或历时较长时, 河道的输沙能力都曾迅速提高。河段的排沙比分别由第一场洪水的 78% 和 66%, 迅速上升到 101% 和 120%。经过 210km 长宽浅河道, 1973 年 9 月 3 日夹河滩站的含沙量仍达 $456\text{kg}/\text{m}^3$ 。河道输沙能力迅速提高的主要原因, 是高含沙洪水在输送过

程中, 塑造了适合自己输送的, 河宽 600~700m 的窄深河槽。游荡性河段输沙能力能有如此迅速的变化, 为调水调沙改造宽浅河道, 为减少高含沙洪水在下游河道中严重淤积, 为稳定河槽兴建护岸控导工程, 提供了可能。

3. 小浪底水库的调水调沙的任务与运用方式

近年来黄河水沙条件的不利变化, 引起下游河道萎缩, 产生一系列的严重问题, 这应主要通过水库调水调沙改变进入下游的水沙组合来解决。这是因为冲积河流具有自动调整功能, 即水流塑造河槽、河槽约束水流。河槽特性决定水流强弱, 从而决定河流的输沙特性。小浪底水库应当承担此项调沙任务。

从黄河下游河道输沙规律、防洪和水资源充分利用出发, 小浪底水库的调水调沙的任务是: 尽量把黄河小水挟带的泥沙调节成主要由大流量高含沙量洪水输送, 防止小水挟沙过多淤积河槽。为此, 应采取泥沙多年调节的运用方式, 平枯水年蓄水拦沙、兴利发电; 在丰水年的洪水期, 流量大于 $3\,000\text{m}^3/\text{s}$ 时集中进行泄空冲刷, 形成黄河泥沙主要由大流量高含沙洪水输送; 使输沙用水量集中在小浪底水库无法调节利用的丰水年的洪水期, 一般年份则取消输沙用水。

从有利高含沙水流的产生考虑, 水库蓄水拦沙运用后库水位迅速降低, 淤积物中的饱和水排不出, 土体抗剪强度低, 容易滑塌, 此时进行泄空冲刷, 有利于高含沙水流的产生, 可使更多的泥沙能调节到洪水期输送。分析计算结果表明, 小浪底水库降水冲刷可产生 $300\sim 500\text{kg}/\text{m}^3$ 的高含沙水流。

根据黄河“八五”攻关的研究结果, 小浪底水库具有较大的调节库容和较强的泄空冲刷条件时, 才能进行泥沙多年调节, 并取得较理想的减淤效果。随着泄空冲刷水位的降低, 调沙库容增大, 冲刷效率提高, 水库的调沙能力增强, 下游河道的淤积量大幅度减少, 使更多的泥沙被调入高含沙洪水输送 (有 60~80% 泥沙集中在排沙期集中下泄), 年均淤积量可减少 50% 以上; 输沙用水较原预留的 $200\sim 240\text{亿}\text{m}^3$ 节省 2/3, 使过机总沙量、含沙量减小, 泥沙组成变细, 为正常发电创造了良好的大环境; 同时, 可减少汛期断流的机会, 使黄河水资源得到充分利用。为此, 应按泥沙多年调节的需要确定水库的泄流规模。

经初步方案计算, 当水库淤满 30 亿 m^3 泥沙时, 若在有较大的洪水时就按上述办法排沙, 254m 以下的 100 亿 t 的拦沙库容可用 30 年以上, 即小浪底水库可以长期发挥调水调沙的作用。

保持小浪底水库低水位时的泄流能力, 是保证在今后水沙条件越来越不利的情况下, 充分发挥小浪底水库多年调节泥沙的关键, 是能否充分利用下游河道可能达到的输沙潜力输沙的前提, 关系着黄河下游河道治理的前途, 必须引起足够的重视。

4. 加速宽河道整治的必要性^[7]

河流的调整与稳定往往需要较长的时间, 其中游荡性河道比降陡、河岸抗冲能力差的特点, 在短期内不会有大的改变, 且流量小于 $1\,500\text{m}^3/\text{s}$ 的清水进入下游河道, 还会造成上段河道冲刷、艾山以下河道严重淤积; 流量较大的清水基流会造成游荡河段坍塌, 破坏新河槽的稳定。如在小浪底水库坝下, 把造

我国“十五”能源发展战略的思考

Thoughts on the Developmental Strategy of the Energy during China's Tenth Five Year Plan

倪维斗¹ 李 政²
(清华大学机械工程学院, 中国工程院院士¹, 副教授² 北京 100084)

一、关于化石燃料

1. 不失时机地发展我国自己的超临界蒸汽发电机组

从世界发展趋势来看, 用提高参数来提高热效率已是肯定的方向。经过多年积累, 我国已具备大规模开发、应用此技术占领国内外市场的能力。在材料方面已解决高温钢种。在通流部分设计方面我国也具有自己的特色, 某些方面已具有世界领先水平, 形成了有自主产权的设计体系。在制造方面我国已形成了制造 600~ 1 000MW 的能力。应不失时机地安排我国自己超临界机组的工程项目, 并集中力量开展科研工作, 向更高的参数冲击(超超临界: 35MPa、600℃以上)。

成坍塌的多余清水分走, 减小清水流量, 则可减少坍塌量及艾山以下淤积量。目前的河道整治只能减少游荡范围, 无助于形成有利输沙入海的窄深河槽, 因此需要采用阿姆河下游荡性河段对口丁坝双岸同时整治的工程措施整治游荡河道。双岸整治可防止水库运用初期清水冲刷坍塌, 有利于形成具有较大滩槽高差、窄槽宽滩的新河道。既利于河道输沙, 又可利用滩地滞洪, 使出库的高含沙洪水能长距离稳定输送大量泥沙入海, 而不淤积河槽, 亦可基本控制下游河道长期内不淤积。同时由于窄槽对河势的控导作用, 游荡性河道也可以逐渐稳定, 使河型发生根本性变化, 泥沙淤积与防洪问题都能得到较为彻底的解决。

表 4 B= 500m、比降 2‰与 1‰河槽过流能力比较

水深(m)	2‰(m ³ /s)	1‰(m ³ /s)
3	3 690	2 610
4	5 970	4 120
5	8 660	6 120
6	11 700	8 300
8	18 900	13 400

不同槽深、河宽为 500m 时, 由 $Q = \frac{1}{n} R^{2/3} B$ 公式计算出, 比降 2‰与 1‰河段的泄量如表 4 (n=

2. 大力研制、开发适合国情的烟气脱硫技术
虽然国外烟气湿法脱硫技术已很成熟, 但是由于基建投资大(约占整个电厂投资的 1/4~ 1/5)、运行费用高, 不符合我国国情, 无法在我国广泛使用。所以尽快研制出具有我国特色、价格低廉、少用水的烟气脱硫装置是当务之急。(至今为止, 我国电厂 99% 以上是没有脱硫装置的)

3. 大力发展循环流化床锅炉技术(CFBC)
使用 CFBC, 锅炉在燃烧过程中脱硫价格低廉, 比较适合我国国情, 现在我国自己开发的 75 吨/时以下的 CFBC 已趋成熟, 可以在工业锅炉和部分电厂锅炉中普遍推广。我国在 CFBC 方面已积累了大量经验, 已开发的紧凑方形分离器正符合世界上 CFBC 的发展方向, 我国也完全有可能在 CFBC 上迎头赶上国际水平。国家应及早安排 CFBC 大型化工

0.012)。
表中数据表明, 由于泄量与水深的高次方成正比, 所以窄深河槽的输水能力是很强的, 当槽深 5~ 6m 时, 即可渲泄 8 000m³/s 洪水而不漫滩。1977 年 8 月花园口站曾形成河宽 500m、渲泄 9 000m³/s 的窄深河槽。

为此, 应根据窄深河槽的输水输沙特性, 作好利用对口丁坝双岸的整治规划, 并抓紧实施, 促使河道冲刷向纵深方向发展、冲刷部位逐渐下移。

参考文献

[1] 齐璞, 孙赞盈等. 黄河水沙变化与下游河道治理思考. 泥沙研究, 1999(8)

[2] 齐璞, 赵文林等编. 黄河高含沙水流运动规律及应用前景. 科学出版社, 1993

[3] 钱意颖, 杨文海等. 高含沙均质水流基本特性的试验研究. 详见《黄河高含沙水流运动规律及应用前景》, 科学出版社, 1993

[4] 赵文林, 茹玉英. 渭河下游河道输沙特性及形成窄深河槽的原因. 人民黄河, 1994(3)

[5] 齐璞, 孙赞盈. 北洛河下游河道形成与输沙特性. 地理学报, 1995(3)

[6] 齐璞, 刘月兰等. 黄河水沙变化与下游河道减淤措施. 黄河水利出版社, 1997

[7] 齐璞, 王开荣等. 小浪底水库投入运用后游荡性河道整治问题, 人民黄河, 1999(11) (责任编辑 王宏章)