

1986-2015年小浪底水库运行前后黄河下游 主槽调整规律

王彦君¹, 吴保生¹, 申冠卿²

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

2. 黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

摘要: 基于黄河下游 1986-2015 年的水沙和沿程实测大断面数据等资料, 统计分析了小浪底水库运行前后下游主槽断面形态参数(河宽、水深、河相系数)的调整过程。结果表明: 1986-1999 年小浪底运行前主槽持续淤积萎缩, 主槽河宽和水深均减小, 河宽与水深调整强度高村以上段河宽大于水深、断面河相系数明显减小, 高村以下段河宽小于水深、河相系数小幅增加; 2000-2015 年小浪底水库运行后主槽持续冲刷, 主槽河宽和水深增加, 沿程各段水深调整强度均大于河宽, 河相系数减小; 各段断面形态调整方式淤积期表现为艾山以上游荡段和过渡段既有横向萎缩又有垂向淤高、艾山以下弯曲段以垂向淤高为主, 冲刷期游荡段和过渡段为横向展宽和垂向冲深、弯曲段以垂向冲深为主; 河宽淤积期减小速率明显大于冲刷期增加速率, 水深淤积期减小速率略小于冲刷期增加速率, 经过一轮淤积和冲刷后, 断面形态向窄深方向发展; 主槽断面形态调整规律与水沙条件密切相关, 断面河相系数除游荡段淤积期与流量呈正相关、与含沙量呈负相关外, 游荡段冲刷期、过渡段和弯曲段淤积与冲刷不同阶段, 河相系数与流量呈负相关, 与含沙量呈正相关。

关键词: 黄河下游; 水沙变化; 小浪底水库; 主槽断面形态

DOI: 10.11821/dlxb201911016

1 引言

冲积河流的河床演变影响因素众多, 不仅与上游来水来沙条件有关, 而且与河床边界及床沙组成有关, 影响机理十分复杂。近几十年来由于气候变化、水库修建以及灌溉引水等人类活动的影响, 黄河下游的水沙条件发生了根本性变化^[1-2], 年水量显著减小, 汛期水量占年水量的比例下降, 洪峰坦化, 洪峰流量减小, 加之 20 世纪 90 年代黄河中游来沙量较大, 导致 90 年代河道严重淤积, 主槽萎缩, 行洪能力明显下降^[3-6]。自 1999 年 10 月小浪底水库蓄水以来, 库区共淤积泥沙 30 亿 m^3 , 水库通过拦蓄上游来沙, 造成进入下游的沙量锐减, 引起下游河床持续冲刷, 河床形态明显改变^[7-9], 并对下游生态环境和河口地区的河床演变产生重要影响^[9-13]。

近年来研究者开展了大量关于变化环境下黄河下游河床演变规律的研究^[8, 14-21], 主要集中在对黄河下游高村以上游荡河段河槽形态对水沙变化的响应调整和下游全河段河道对小浪底水库运行后来沙量急剧减小的响应两个方面。如夏军强等^[7, 16-17]和田世民等^[15]开

收稿日期: 2018-08-22; 修订日期: 2019-08-01

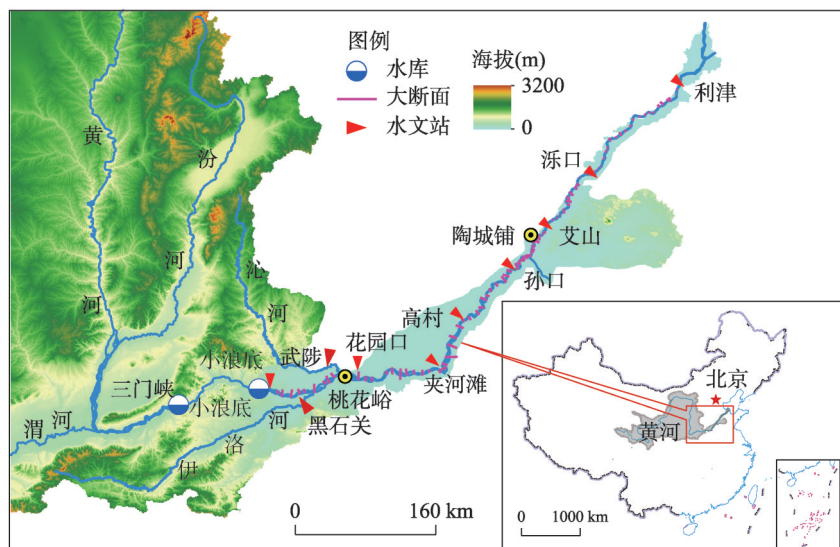
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51639005); 国家重点研发计划(2017YFC0405202, 2016YFC0402406)[**Foundation:** Key Program of National Natural Science Foundation of China, No.51639005; National Key R&D Program of China, No.2017YFC0405202, No.2016YFC0402406]

作者简介: 王彦君(1989-), 女, 河北邢台人, 博士生, 研究方向为河流地貌学和河床演变学。E-mail: yanjun1113@126.com
2411-2427 页

展了黄河下游高村以上游荡段河道断面形态和平滩流量演变规律以及深泓点摆幅变化的研究。孙赞盈等^[19]研究认为通过缩窄上游宽河段的河宽和上游水库的联合调度可以减小下游河道的淤积,甚至冲刷;但缪驰远等^[18]研究认为黄河下游河道在持续冲刷的情况下,小浪底水库下泄水流的冲刷效果已明显下降。在气候变化和人类活动的影响下1986年以来黄河下游先后经历了小浪底水库运行前的持续淤积和运行后的持续冲刷两个截然不同的阶段,而目前对于水库运行前后不同阶段河床形态调整的时空分布规律研究还不够充分,缺乏系统性认识。因此,本文根据黄河下游利津以上河段的淤积断面资料和水沙资料,统计分析1986-2015年下游河道主槽断面形态的时空分布规律,探讨小浪底水库运行前后主槽断面形态调整的模式及其对水沙条件变化的响应规律,为深入认识黄河下游河床演变规律和维持河道健康生命提供一定的理论指导。

2 研究区概况

黄河下游桃花峪至利津全长786 km,流域面积仅有2.3万 km^2 ,占全流域面积的3%,河段总落差93.6 m,平均比降为0.12‰。下游河道根据河床平面形态特点分为游荡段、游荡向弯曲的过渡段和弯曲段(图1)。其中高村以上为游荡段,处于冲积扇顶坡段,全长约207 km,平均比降为0.17‰~0.27‰,河道断面宽浅,水流散乱,主槽摆动频繁,河床极不稳定,河段内设有花园口、夹河滩和高村3个水文站和28个淤积断面,其中小浪底—花园口段(小花段)有11个,花园口—夹河滩段(花夹段)有10个,夹河滩—高村段(夹高段)有7个;高村至陶城铺为过渡段,处于冲积扇前缘,河长约为165 km,平均比降为0.12‰,该河段内主槽基本上都为单一外形,主流受到一定的控制,主流摆幅与游荡段相比明显减小,设有孙口1个水文站和22个淤积断面,其中高村—孙口段(高孙段)有13个,孙口—陶城铺段9个;陶城铺至利津段为弯曲段,河长约为300 km,平均比降为0.11‰,该河段基本上都在控导工程的控制以内,控导工程长度约占河道长



注: 基于国家测绘地理信息局审图号为GS(2016)2893的标准地图制作,底图无修改。

图1 研究区概况图

Fig. 1 Sketch of the study area

度的70%^[20], 设有艾山、泺口和利津3个水文站和42个淤积断面, 其中陶城铺—艾山段有7个, 艾山—泺口段(艾泺段)有13个, 泺口—利津段(泺利段)有22个; 由于陶城铺断面距艾山较近, 将孙口—陶城铺和陶城铺—艾山合并为孙口—艾山段(孙艾段)以便于对比断面形态与水沙条件之间的关系。

3 数据来源与研究方法

以小浪底、黑石关、武陟三站来水来沙之和作为黄河下游入口的水沙条件, 下游沿程设有花园口、夹河滩、高村、孙口、艾山、泺口和利津7个水文站, 本次收集了上述站点1965-2015年的水沙资料和黄河下游利津以上河段92个淤积大断面每年汛前和汛后的实测大断面数据(2014年汛前数据除外)以及基于大断面数据统计得到的不同河段主槽冲淤量, 数据主要来源于黄河流域水文年鉴与黄河泥沙公报^[21]。基于实测大断面数据, 首先对其进行滩槽划分, 滩槽划分的原则为根据左右滩唇点的位置和高程低值确定平滩水位 Z 和平滩河宽, 然后取平滩河槽内水深较大的区域作为主槽, 而将水深较小对行洪输沙能力贡献较小的区域划分为非主槽, 之后, 计算平滩水位下主槽面积 A 、主槽河宽 B 、主槽水深 $H=A/B$ 和断面河相系数 $\xi=B^{0.5}/H$, 下文中主槽河宽、主槽水深和主槽断面河相系数均为平滩水位条件下主槽部分的断面形态参数。由于游荡段断面形态沿程差异很大、主槽和平滩河槽差别亦较大, 而过渡段和弯曲段断面滩槽比较固定。图2给出了游荡段沿程伊洛河口、花园口、辛寨和韦城4个代表性断面的滩槽划分结果, 可以看到, 花园口断面主槽和平滩河槽差别较小, 而其他3个断面主槽明显小于平滩河槽。

由于黄河下游主槽形态调整沿程变化较大, 特定断面河槽形态变化难以反映河段整体的变化规律。为了对比不同河段主槽形态调整之间的异同, 采用夏军强等^[7]提出的基于对数转换的几何平均和断面间距加权平均相结合的方法计算了河段平均的主槽断面形态参数, 计算公式为:

$$\overline{G}_{bf} = \exp \left[\frac{1}{2L} \sum_{i=1}^{N-1} (\ln G_{bf}^i + \ln G_{bf}^{i+1}) \Delta x_i \right] \quad (1)$$

式中: \overline{G}_{bf} 为河段平均的主槽形态参数(河宽、水深和河相系数); G_{bf}^i 和 G_{bf}^{i+1} 分别为第 i 、 $i+1$ 断面主槽形态参数; Δx_i 为相邻两个断面($i, i+1$)的间距; L 为计算河段长度; N 为河段内的断面个数。

4 研究结果

4.1 进入下游水沙条件及主槽冲淤变化规律

1965年以来进入黄河下游的水沙条件如图3所示。可以看出, 自1986年黄河上游龙羊峡水库运行以来, 进入下游的水沙量发生了显著变化, 1986-1999年水沙量较之前均有所减小, 且减小主要发生在汛期, 水量减小比例大于沙量, 进入下游水流含沙量较之前增加, 汛期场次洪水平均含沙量一般大于 100 kg/m^3 , 来沙系数明显增加, 特别是1998年汛期来沙系数高达 $0.15 \text{ kg} \cdot \text{s/m}^6$ 。自1999年10月小浪底水库运行以来, 进入下游的年水量与1986-1999年基本持平, 但由于水库改变了水量的年内分配, 汛期水量减小, 非汛期水量增加, 非汛期水量明显大于汛期; 并且由于小浪底水库拦蓄泥沙, 至2015年库区共淤积泥沙30亿 m^3 , 进入下游沙量锐减, 除小浪底水库汛期排沙期含沙量较高外, 其他时段基本为清水下泄, 2000-2015年汛期平均沙量和含沙量分别为0.60亿 t 和 6.45 kg/m^3 。

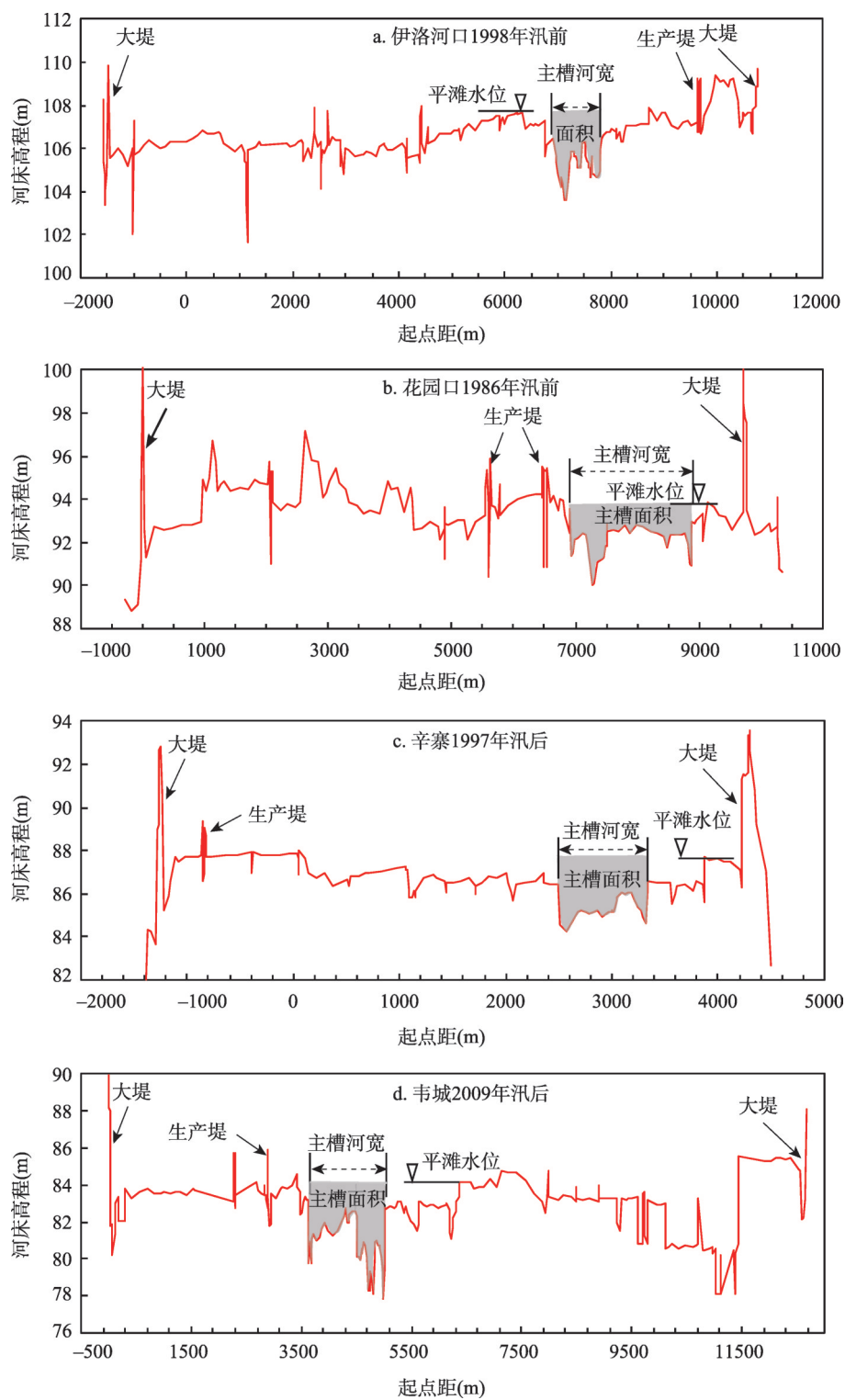


图2 黄河下游典型大断面及主槽划分

Fig. 2 Typical cross-sectional profiles of the lower Yellow River and main channel partition

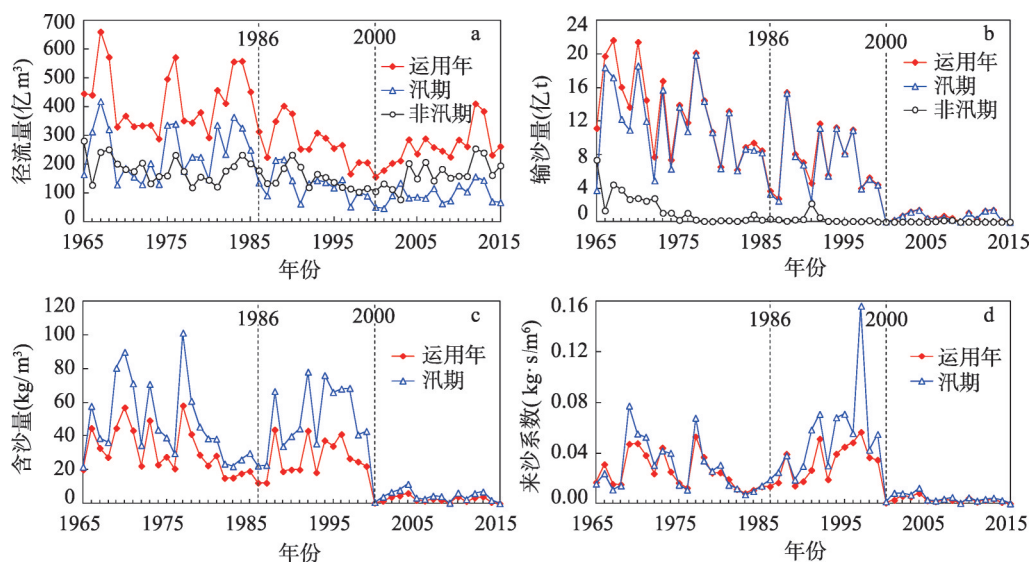


图3 黄河下游的来水来沙条件变化过程

Fig. 3 Temporal changes in water and sediment conditions in the lower Yellow River

由于水沙条件的显著变化, 1986年以来黄河下游主槽经历了1986-1999年持续淤积萎缩和2000-2015年持续冲刷两个不同的阶段, 不同河段主槽单位河长累计冲刷过程如图4所示。整个时期除小花段外, 花园口以下冲淤强度沿程减小, 花夹段冲淤强度最大, 孙口以下段冲淤变化较小; 由于小浪底水库运行后其下游自上而下的沿程冲刷发展需要一定的时间, 所以小花段和花夹段2000年开始明显冲刷, 夹高段和高孙段2003年开始冲刷较明显; 1986-1999年小花段、花夹段、夹高段和高孙段主槽单位河长累计淤积量分别为0.31 万 m^3 、0.67 万 m^3 、0.48 万 m^3 和0.20 万 m^3 , 共占全河段的78%; 2000-2015年孙口以上沿程各段主槽单位河长累计冲刷量分别为0.41 万 m^3 、0.63 万 m^3 、0.32 万 m^3 和0.17 万 m^3 , 共占全河段81%。1986-2015年整个时段主槽除小花段略有冲刷外, 花园口以下均有所淤积。

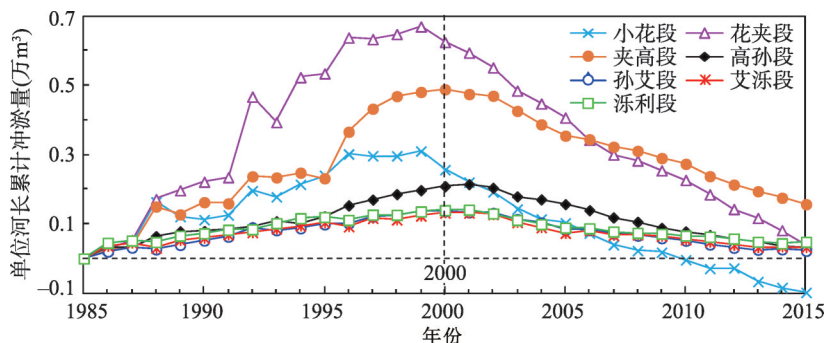


图4 不同河段主槽单位河长累计冲淤过程

Fig. 4 Main-channel cumulative erosion and sedimentation per unit river length in different reaches

4.2 黄河下游主槽形态特征时空分布

基于所选取的黄河下游沿程92个淤积断面1986-2015年每年汛前汛后的实测大断面数据, 在对其进行滩槽划分的基础上, 统计了每个断面各测次的主槽河宽、主槽水深和主槽断面平均河相系数 ($\xi = B^{0.5}/H$) 数据。由于断面形态沿程变动较大, 所以为了显示

不同河段之间的异同,参考夏军强等^[7]提出的研究方法,采用式(1)计算了河段平均的主槽断面形态参数。

4.2.1 小浪底水库运行前 1986-1999 年主槽断面形态变化规律

(1) 主槽河宽。图 5 为 1986-1999 年沿程 7 个河段平均主槽河宽的变化过程。可以看出,空间上,除小花段外,花园口以下各段主槽河宽及其减小幅度沿程呈下降趋势;时间上,各河段主槽河宽波动中整体呈减小趋势,小花段、花夹段、夹高段、高孙段、孙艾段、艾冻段和冻利段 1999 年汛后与 1986 年汛前相比,主槽河宽分别减小了 771 m、1687 m、1195 m、349 m、209 m、119 m 和 105 m。高村以上各段 1988 年之前基本不变,1988 年汛期大幅减小,1989-1992 年明显减小,之后 1993-1999 年减小较慢;高村以下各段主槽河宽整体呈阶梯式减小,减小主要发生在 1992 年和 1998 年汛期,另外高孙段在 1988 年汛期亦明显减小。可见,1989 年以前以孙口为界,1989 年后以高村站为界,分界点上下河宽变化存在较大差异。

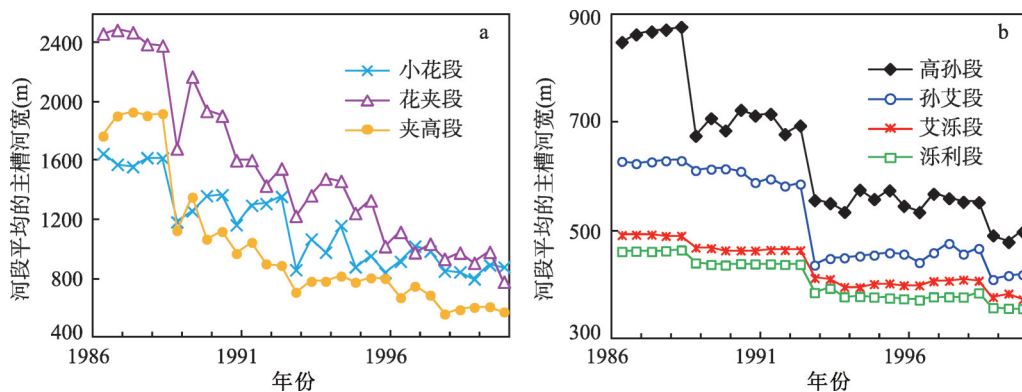


图 5 1986-1999 年不同河段主槽河宽变化过程

Fig. 5 Changes in main-channel width in different reaches from 1986 to 1999

(2) 主槽水深。图 6 为 1986-1999 年沿程 7 个河段平均主槽水深的变化过程。可以看出,空间上,除小花段外,整体表现为花园口—冻利段沿程增加、冻利段有所减小;时间上,各河段主槽水深波动中整体亦呈减小趋势,小花段、花夹段、夹高段、高孙段、孙艾段、艾冻段和冻利段 1999 年汛后与 1986 年汛前相比,主槽水深分别减小了 0.30 m、0.16 m、0.43 m、0.94 m、0.96 m、1.06 m 和 1.07 m。高村以上各段水深波动较大,小花段波动最大,一般为非汛期增加、汛期减小,但当汛期发生高含沙洪水河宽明显缩窄时水深增加,如 1992 年汛期;花夹段和夹高段除 1988 年汛期、1993 年非汛期和 1996 年明显增加外,其他时段整体减小。高村以下各段水深除 1988 年、1992 年、1996 年、1998 年汛期受高含沙洪水影响小幅增加外,其他时段整体减小。可见,水深变化以高村为界,高村以上段较为一致,高村以下段较为一致。

4.2.2 小浪底水库运行后 2000-2015 年主槽断面形态变化规律

(1) 主槽河宽。图 7 为 2000-2015 年沿程 7 个河段平均主槽河宽的变化过程。空间上,除小花段外,花园口以下段主槽河宽及其增加幅度沿程减小;时间上,各段主槽河宽整体均呈增加趋势,小花段、花夹段、夹高段、高孙段、孙艾段、艾冻段和冻利段 2015 年汛后与 2000 年汛前相比,主槽河宽分别增加了 392 m、674 m、265 m、88 m、41 m、29 m 和 25 m。可见,高村以上各段主槽河宽增幅明显大于高村以下段,且 2012 年后增幅较小;高村以下各段 2004 年左右之前主槽河宽减小,2004 年左右开始增加。

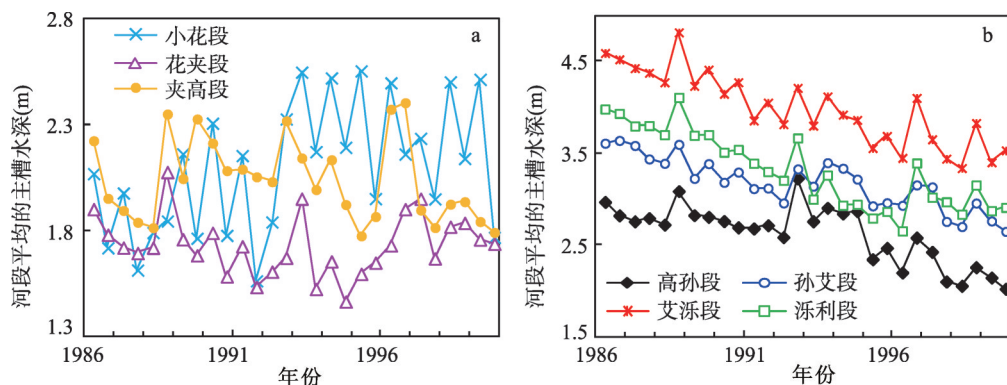


图6 1986-1999年不同河段主槽水深变化过程

Fig. 6 Changes in main-channel depth in different reaches from 1986 to 1999

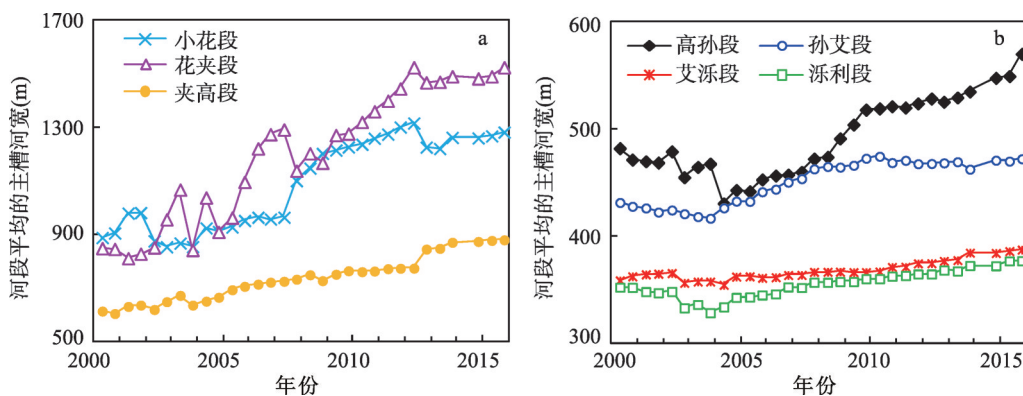


图7 2000-2015年不同河段主槽河宽变化过程

Fig. 7 Changes in main-channel width in different reaches from 2000 to 2015

(2) 主槽水深。图8给出了2000-2015年沿程7个河段平均主槽水深的变化过程。可以看出,空间上,主槽水深高村以上段沿程减小,高村—冻口段增加,冻利段有所减小;时间上,各段主槽水深均明显增加,小花段、花夹段、夹高段、高孙段、孙艾段、艾冻段和冻利段2015年汛后与2000年汛前相比,主槽水深分别增加了1.92 m、2.31 m、2.26 m、2.52 m、2.04 m、2.26 m和2.24 m,增幅基本维持在2 m以上。主槽水深高村以上各段2000-2006年增加较快,2006年左右后增加减缓;高村—冻口段2000-2002年略有减小,从2003年开始增加;冻利段从2001年开始增加。

4.2.3 主槽断面河相系数变化规律

(1) 时间变化过程。图9为1986-2015年汛后沿程7个河段平均的主槽断面河相系数的变化过程和趋势线。可以看出,空间上,除小花段外,花园口以下段呈沿程减小的趋势;时间上,高村以上各段整体呈减小趋势,减小速率2001年前明显大于2001年后;高村以下各段以2001年为界呈先增加后减小的趋势,且减小速率大于增加速率。高村以上段与高村以下段主槽断面河相系数变化过程存在显著差异的原因主要是由于不同河段主槽河宽与水深对水沙变化响应的调整速率存在较大差异。

为进一步分析不同河段主槽断面形态调整之间的异同,考虑到河相系数 $\xi = B^{0.5}/H$,根据1986年、1999年和2015年汛后沿程7个河段主槽河宽 B 、水深 H 和断面河相系数 ξ (表1),统计了小浪底水库修建前后1986-1999年和2000-2015年两个时期的 $B^{0.5}$ 、 H 和 ξ

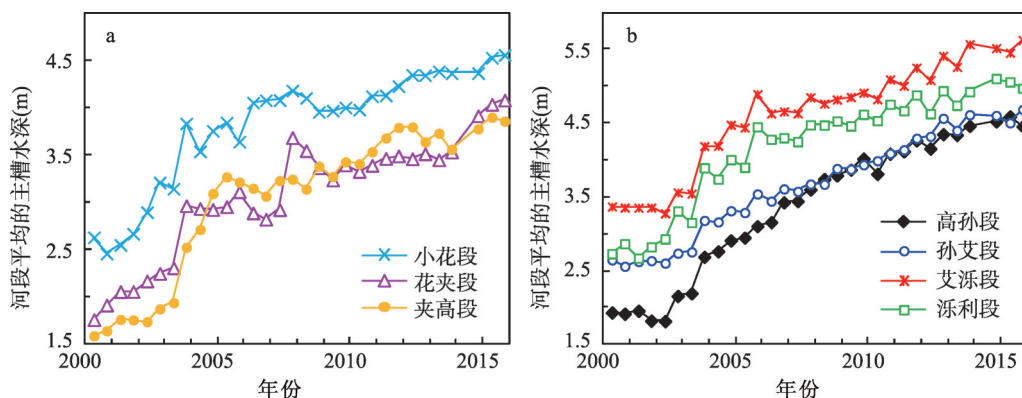


图8 2000-2015年不同河段主槽水深变化过程

Fig. 8 Changes in main-channel depth in different reaches from 2000 to 2015

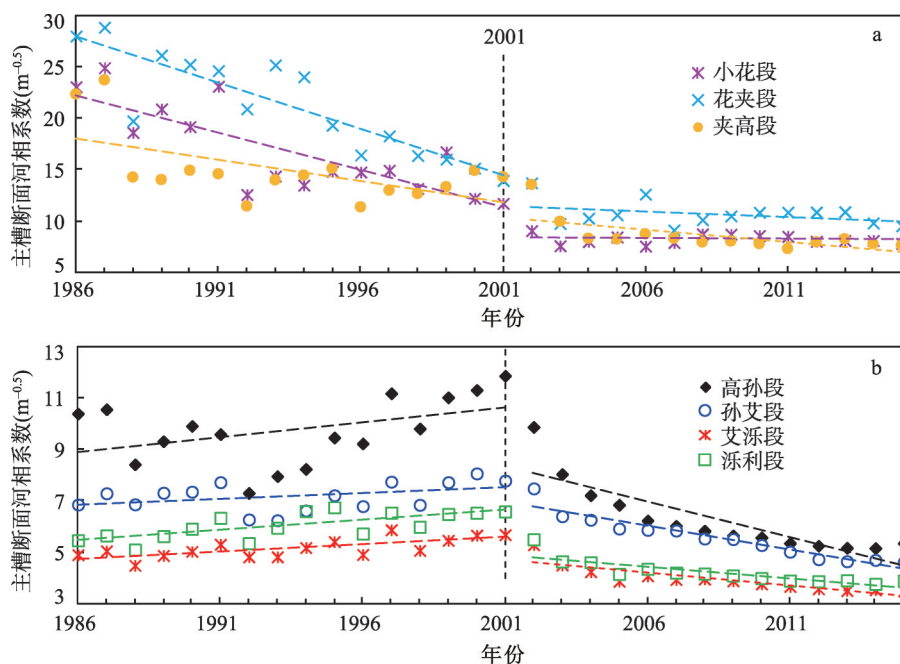


图9 不同河段平均的主槽断面河相系数变化过程

Fig. 9 Changes in cross-sectional geomorphic coefficient in different reaches

的相对值 y 和变化率如表2所示。由于 $\xi = B^{0.5}/H$ ，所以 $B^{0.5}$ 的相对值 $y_{B^{0.5}} = B_{末}^{0.5}/B_{初}^{0.5}$ 与 H 的相对值 $y_H = H_{末}/H_{初}$ 之比等于 ξ 的相对值 $y_{\xi} = \xi_{末}/\xi_{初}$ ，即 $y_{\xi} = y_{B^{0.5}}/y_H$ 。河相系数调整方向与河宽调整方向相同、与水深调整方向相反，即河宽增加、水深减小、河相系数增加，相反，河宽减小、水深增加、河相系数减小。而当河宽和水深调整方向相同时，河相系数的调整方向与两者调整变化率中较大的保持一致。

由表2可以看出，对于小浪底水库运行前的1986-1999年来说，沿程7个河段河宽均存在不同程度的减小；水深除小花段略有增加外，其他各段均减小；由于高村以上段河宽 $B^{0.5}$ 的减小比例约为40%，明显大于水深的减小比例，所以河宽减小决定河相系数朝减小的方向调整；高村以下段水深的减小比例约为25%，略大于河宽的减小比例，所以水

表1 1986-2015年黄河下游汛后各河段平均的主槽形态参数统计
 Tab. 1 Annual post-flood main-channel cross-sectional geometry parameters for different reaches of the lower Yellow River from 1986 to 2015

年份	主槽河宽(m)							主槽水深(m)							主槽河相系数(m ^{-0.5})						
	小花	花夹	夹高	高孙	孙艾	艾冻	冻利	小花	花夹	夹高	高孙	孙艾	艾冻	冻利	小花	花夹	夹高	高孙	孙艾	艾冻	冻利
1986	1575	2489	1905	862	624	493	462	1.72	1.78	1.95	2.82	3.64	4.52	3.93	23.06	27.98	22.34	10.39	6.86	4.91	5.47
1987	1621	2393	1907	871	629	490	463	1.62	1.70	1.84	2.79	3.44	4.38	3.80	24.91	28.83	23.71	10.56	7.30	5.06	5.66
1988	1184	1684	1126	675	611	469	441	1.85	2.08	2.35	3.09	3.60	4.81	4.11	18.63	19.75	14.28	8.42	6.87	4.50	5.11
1989	1362	1940	1067	685	614	464	437	1.77	1.69	2.33	2.81	3.39	4.41	3.70	20.90	26.13	14.04	9.32	7.32	4.88	5.64
1990	1165	1604	969	712	589	463	439	1.78	1.59	2.08	2.69	3.30	4.27	3.54	19.18	25.23	14.94	9.91	7.36	5.04	5.92
1991	1310	1432	900	678	583	465	438	1.57	1.54	2.05	2.72	3.12	4.05	3.30	23.11	24.62	14.60	9.59	7.73	5.32	6.34
1992	859	1226	707	556	437	413	386	2.33	1.67	2.32	3.23	3.33	4.21	3.67	12.60	20.91	11.47	7.31	6.28	4.83	5.36
1993	978	1479	781	535	450	396	378	2.17	1.53	2.00	2.91	3.40	4.12	3.26	14.40	25.17	14.01	7.96	6.25	4.83	5.96
1994	878	1245	775	558	455	402	378	2.19	1.47	1.92	2.87	3.22	3.86	2.94	13.51	24.02	14.47	8.24	6.63	5.19	6.61
1995	840	1020	800	546	457	400	375	1.95	1.65	1.87	2.47	2.96	3.69	2.87	14.85	19.33	15.14	9.46	7.22	5.42	6.75
1996	1020	978	747	568	460	407	378	2.16	1.90	2.40	2.58	3.16	4.10	3.39	14.78	16.44	11.38	9.23	6.80	4.92	5.73
1997	850	934	559	553	457	410	378	1.95	1.67	1.82	2.10	2.76	3.44	2.97	14.95	18.29	13.01	11.18	7.75	5.88	6.55
1998	797	906	604	491	410	378	358	2.14	1.84	1.94	2.26	2.96	3.83	3.15	13.19	16.38	12.68	9.81	6.85	5.08	6.00
1999	878	778	573	498	419	374	357	1.77	1.74	1.79	2.03	2.65	3.53	2.91	16.74	16.03	13.34	11.02	7.73	5.47	6.49
2000	905	845	605	471	428	362	352	2.46	1.92	1.65	1.92	2.56	3.36	2.87	12.23	15.16	14.93	11.31	8.07	5.67	6.54
2001	981	828	636	468	422	365	347	2.67	2.06	1.76	1.82	2.64	3.36	2.82	11.74	13.96	14.32	11.86	7.79	5.69	6.59
2002	853	955	649	455	421	356	333	3.21	2.25	1.88	2.16	2.74	3.56	3.31	9.10	13.73	13.57	9.87	7.49	5.30	5.51
2003	854	841	636	467	416	358	328	3.83	2.96	2.53	2.69	3.18	4.19	3.90	7.63	9.79	9.98	8.04	6.41	4.51	4.65
2004	910	909	666	443	432	362	343	3.75	2.93	3.09	2.91	3.32	4.48	4.01	8.04	10.30	8.34	7.22	6.27	4.25	4.62
2005	951	1095	706	453	441	361	345	3.64	3.11	3.21	3.11	3.54	4.89	4.45	8.48	10.63	8.27	6.85	5.93	3.88	4.17
2006	957	1273	722	457	450	364	353	4.07	2.82	3.07	3.43	3.61	4.66	4.30	7.59	12.64	8.76	6.24	5.88	4.09	4.36
2007	1100	1137	733	472	462	366	357	4.18	3.68	3.24	3.60	3.68	4.85	4.48	7.94	9.16	8.35	6.03	5.85	3.95	4.22
2008	1201	1166	727	491	464	367	358	3.95	3.36	3.38	3.79	3.89	4.82	4.53	8.77	10.15	7.98	5.84	5.54	3.97	4.18
2009	1225	1275	764	517	472	366	360	4.00	3.40	3.43	4.02	3.94	4.91	4.62	8.75	10.52	8.07	5.66	5.52	3.90	4.11
2010	1258	1358	763	521	468	371	363	4.12	3.39	3.53	4.09	4.09	5.09	4.76	8.61	10.87	7.82	5.58	5.29	3.78	4.00
2011	1299	1443	773	523	467	374	365	4.22	3.49	3.79	4.27	4.30	5.25	4.88	8.54	10.89	7.34	5.36	5.03	3.68	3.91
2012	1224	1466	845	525	468	377	368	4.34	3.51	3.64	4.35	4.57	5.41	4.94	8.06	10.90	7.99	5.26	4.74	3.59	3.88
2013	1261	1488	870	534	462	384	372	4.36	3.53	3.56	4.46	4.62	5.57	4.93	8.14	10.93	8.29	5.18	4.66	3.52	3.92
2014	1259	1480	873	547	471	384	372	4.36	3.91	3.77	4.52	4.61	5.52	5.11	8.14	9.84	7.83	5.17	4.71	3.55	3.78
2015	1280	1522	879	569	472	387	377	4.55	4.08	3.85	4.46	4.69	5.63	4.97	7.86	9.57	7.69	5.36	4.63	3.50	3.90

表 2 小浪底水库运行前后不同时期主槽断面形态变量统计值

Tab. 2 Statistical parameters of the main-channel cross-sectional geometry before and after the operation of the Xiaolangdi Reservoir

时段	断面形态变量	小花段	花夹段	夹高段	高孙段	孙艾段	艾冻段	冻利段
1986-1999 年	$y_{B^{0.5}}$	0.75	0.56	0.55	0.76	0.82	0.87	0.88
	y_H	1.03	0.98	0.92	0.72	0.73	0.78	0.74
	y_{ξ}	0.73	0.57	0.60	1.06	1.13	1.12	1.19
	$y_{B^{0.5}} - 1$	-0.25*	-0.44*	-0.45*	-0.24	-0.18	-0.13	-0.12
	$y_H - 1$	0.03	-0.02	-0.08	-0.28*	-0.27*	-0.22*	-0.26*
2000-2015 年	$y_{B^{0.5}}$	1.21	1.40	1.24	1.07	1.06	1.02	1.03
	y_H	2.57	2.34	2.15	2.20	1.77	1.59	1.71
	y_{ξ}	0.47	0.60	0.58	0.49	0.60	0.64	0.60
	$y_{B^{0.5}} - 1$	0.21	0.40	0.24	0.07	0.06	0.02	0.03
	$y_H - 1$	1.57*	1.34*	1.15*	1.20*	0.77*	0.59*	0.71*

注：相对值 y =变量末时刻与初时刻的比值， >1 变量增加， <1 变量减小；变化率=相对值与1之差， >0 变量增加， <0 变量减小；*为主导因素标识，主导因素为河宽 $B^{0.5}$ 和水深 H 变化率绝对值中较大的变量。

深减小决定河相系数增加。对于小浪底水库运行后的2000-2015年来说，沿程7个河段河宽、水深均存在不同程度的增加，由于各段水深的增加比例均大于60%，明显大于河宽 $B^{0.5}$ 的增加比例，所以水深增加决定河相系数减小。可见，1986-1999年持续淤积期，高村以上游荡段以横向河宽萎缩为主，高村以下过渡段和弯曲段以垂向淤高为主；2000-2015年持续冲刷期，整个下游河段垂向冲刷强度均大于横向展宽强度。

(2) 沿程分布规律。由于黄河下游沿程各断面主槽形态差异较大，为进一步分析各断面主槽形态之间的差异，根据典型年份沿程92个大断面主槽断面河相系数数据，统计了1986年、1999年和2015年汛后沿程7个河段主槽河相系数的箱型图如图10所示。可以看出，除孙艾段1999年较1986年断面间差异增加外，其他河段内各断面主槽河相系数间的差异减小；高村以上各段不同断面之间存在明显差异，1986年汛后最大值与最小值之差大于30，小花段和花夹段最大值大于40，夹高段最大值约为35；1999年汛后小花段和花夹段最大值大于35，最大值与最小值之差大于25，夹高段较1986年汛后明显减小，除异常值外大多在20以内；2015年汛后较之前明显减小，小花段和夹高段最大值为20左右，夹高段大多在10以内；高村以下各段内不同断面河相系数差异较小。

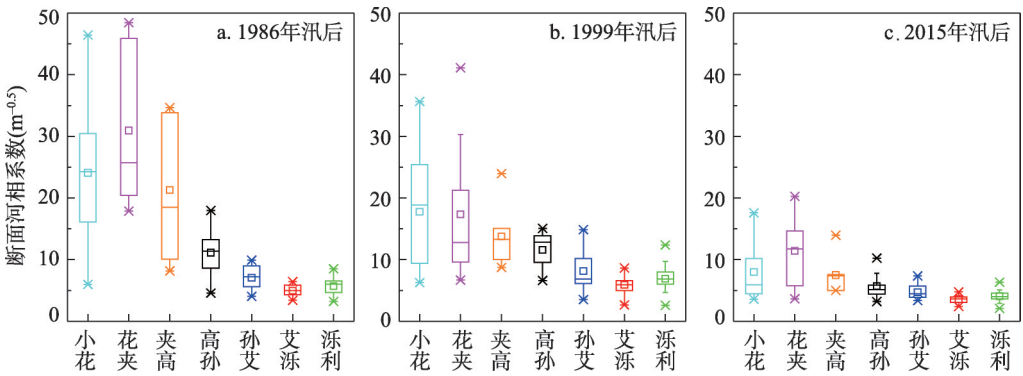


图 10 沿程各段主槽河相系数箱型图

Fig. 10 Box figure showing the cross-sectional geomorphic coefficients in different reaches

4.3 黄河下游主槽断面形态调整模式

为了更清楚地显示黄河下游断面形态调整过程, 图 11 给出了花园口、高村、孙口 3 个断面 1986 年、1989 年、1994 年、1999 年、2005 年、2010 年和 2015 年主槽部分的断面图。可以看出, 花园口断面 1986 年和 1989 年主槽河宽约为 2200 m, 1994 年萎缩为 1050 m, 之后位置发生频繁摆动, 而河宽变化不大、垂向先淤后冲, 2015 年冲刷成明显的深槽。高村、孙口断面主槽位置未发生摆动, 主槽在原有位置调整; 高村断面主槽河宽 1986-1989 年明显减小, 1989-1994 年有所恢复, 1994-2005 年变动较小、萎缩主要为垂向淤积, 2005 年后左岸冲刷、河宽小幅增加、水深明显增加; 孙口断面河宽变幅较小, 主槽冲淤主要以垂向水深调整为主。

通过对比 4.2 节中主槽形态变量之间的变化过程可知, 1986-1999 年持续淤积期, 主槽发生了不同程度的淤积, 同时, 由于该时期漫滩洪水作用, 滩地亦发生了不同程度的淤积^[9, 22], 其中高村以上段明显淤积, 平滩水位增加, 而高村以下段淤积量较小, 平滩水位基本不变。1999 年汛后主槽形态与 1986 年汛前相比, 小花段、花夹段、夹高段、高孙段、孙艾段、艾冻段和冻利段河宽减幅分别为 47%、68%、68%、41%、33%、24% 和 23%, 水深减幅分别为 14%、9%、19%、37%、27%、23% 和 27%; 小花段、花夹段和夹

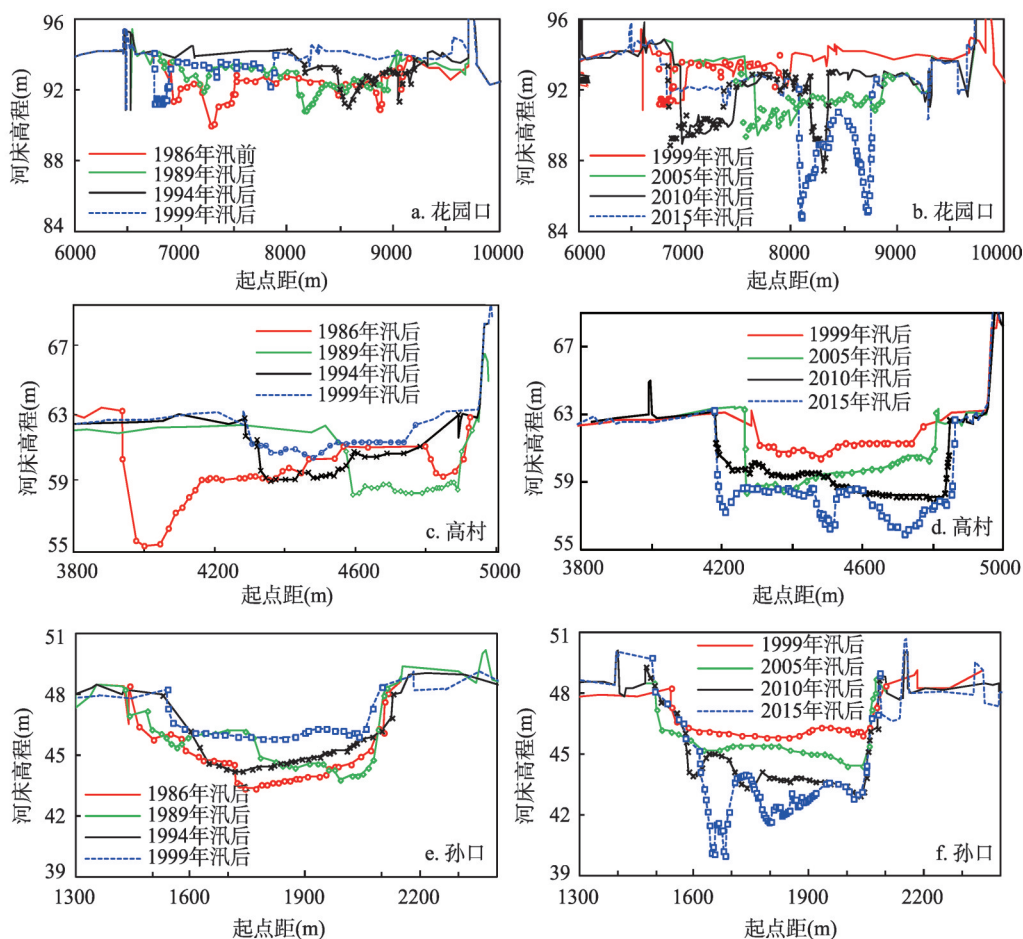


图 11 黄河下游典型断面形态调整过程(图中数据标记部分为主槽)

Fig. 11 Adjustment of the typical cross-sectional profile in the lower Yellow River

高段河相系数减幅分别为15%、29%和29%，而高村以下各段河相系数增幅在15%左右。总体上看，持续淤积期整个下游各段均表现为横向淤积、河宽减小和垂向河底淤高、水深减小的调整模式，但由于各段河宽和水深减小比例有所差异，可以将断面形态调整过程概化成图12a中的3类模式，分别为游荡型高村以上段的横向大幅萎缩和垂向淤高、过渡型高孙段和孙艾段的横向明显萎缩和垂向淤高、弯曲型艾冻段和冻利段以垂向淤高为主。

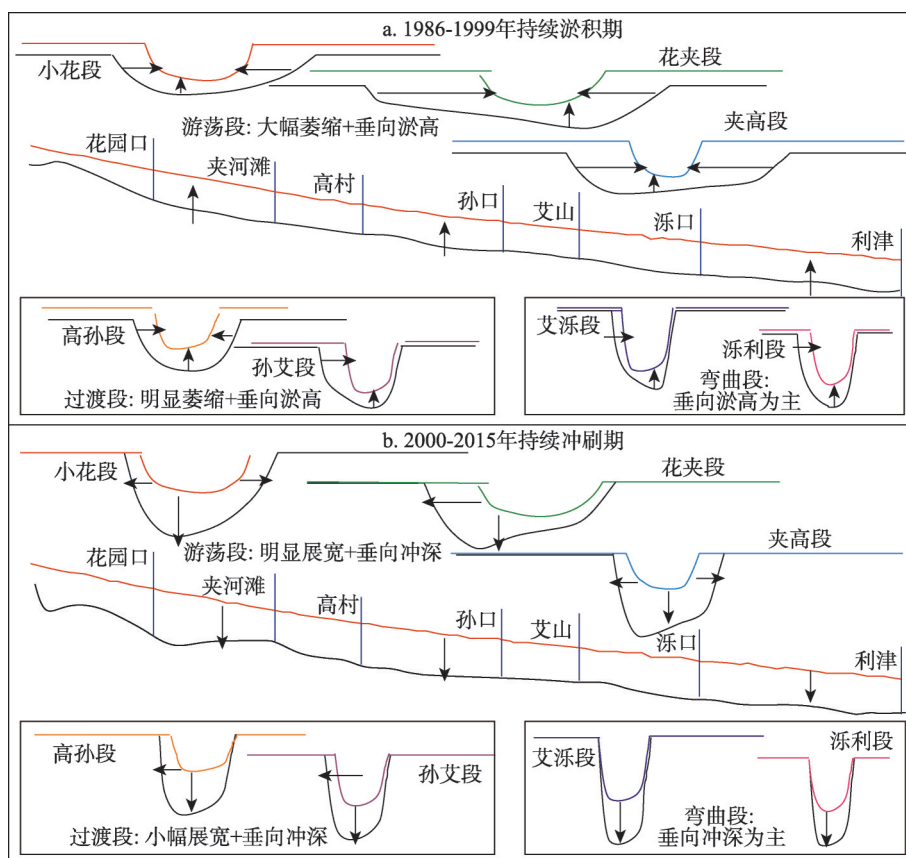


图12 黄河下游断面形态调整概化模式

Fig. 12 Generalized models for the morphological adjustment of the lower Yellow River

同样，2000-2015年持续冲刷期，小花段、花夹段、夹高段、高孙段、孙艾段、艾冻段和冻利段2015年汛后与1999年汛后相比，河宽增幅分别为46%、96%、53%、14%、13%、4%和6%，水深增幅分别为157%、134%、115%、120%、77%、59%和71%，艾山以上段断面形态调整既有沿河宽方向的横向展宽，也有沿水深方向的垂向冲深，而艾山以下段主要以垂向冲深为主。同理，可以将持续冲刷期断面形态调整过程概化成图12b中的3类模式，分别为高村以上段的横向展宽和垂向冲深、高孙段和孙艾段的横向小幅展宽和垂向冲深、艾冻段和冻利段以垂向冲深为主。

4.4 黄河下游断面形态调整与水沙条件和冲淤的关系

水沙条件作为河道冲淤和断面形态调整的主要影响因子，当水流含沙量大于其挟沙能力时，水流中超出挟沙能力的泥沙发生沉降，河槽发生侧向或者垂向淤积，断面形态以河宽萎缩或垂向淤高的方式调整；当水流含沙量小于其挟沙能力时，水流冲起河床底

部或边岸的泥沙，河槽发生侧向或垂向冲刷，断面形态以横向展宽或垂向冲深的方式调整。

为分析断面形态对水沙条件的响应规律，首先，考虑到黄河下游主槽形态年内调整迅速，将沿程各断面每年汛前、汛后两测次的平均值作为当年的主槽形态变量；然后，由于小花段受基岩河床影响断面形态调整与花高段存在一定差异，所以将下游划分为游荡型的花园口—高村段（花高段）、过渡性的高孙段、孙艾段和弯曲型的艾山—利津段（艾利段）共4个河段，采用式（1）计算了各段平均的断面河相系数。

图 13 为各段主槽断面河相系数与年平均流量和含沙量之间的关系，虽然主槽河相系数与当年水沙条件之间关系比较散乱，但基本可以反映两者之间的关系，这主要是由于主槽断面形态对水沙变化的响应需要一定时间，河床调整滞后于水沙条件的变化，根据吴保生等^[4, 23]研究，黄河下游平滩河槽调整受包括当年在内的前期 5 年水沙条件的影响。

由图 13 可以看出，游荡型的花高段持续淤积期主槽河相系数与流量呈正相关、与含沙量呈负相关，即流量越大、含沙量越小断面越宽浅，而持续冲刷期河相系数与流量呈负相关、与含沙量呈正相关，即流量越大、含沙量越小断面越窄深。造成这种差异的原因主要是由于该河段持续淤积期始于前期大洪水过后形成的宽浅、散乱的断面形态，在中小流量较高含沙量洪水的作用下，河宽随流量增加而增加，随含沙量增加主槽两侧流速较小的区域快速淤积、主槽萎缩、河宽减小；宽浅断面水深对流量和含沙量变化响应的调整强度小于河宽，所以河相系数与河宽变化方向一致，随流量增加而增加、随含沙

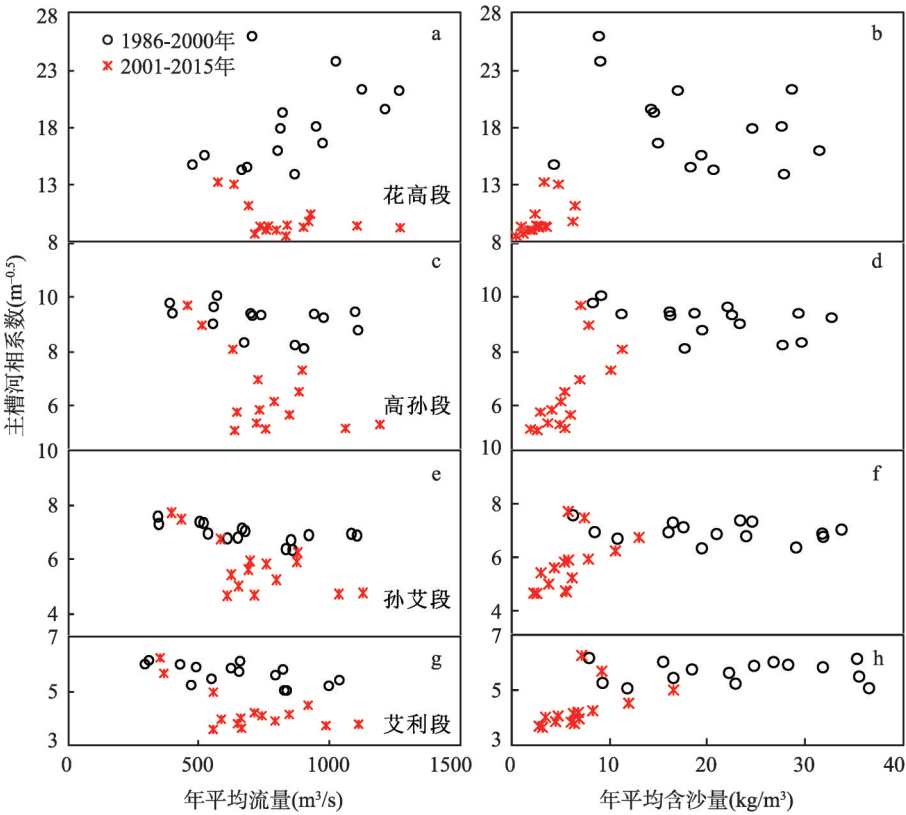


图 13 黄河下游主槽河相系数与当年水沙条件之间的关系

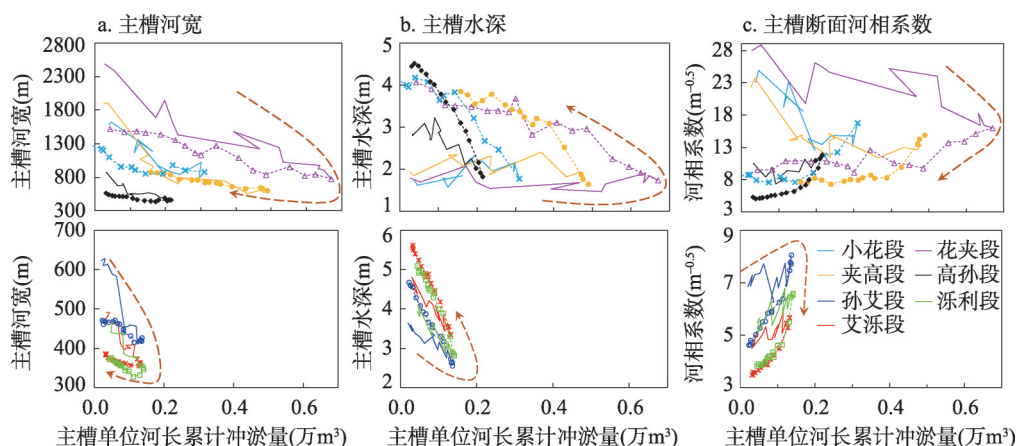
Fig. 13 Relationships between the main channel cross-sectional geomorphic coefficient and the flow and sediment conditions of the lower Yellow River

量增加而减小。而2010-2015年持续冲刷期始于前期淤积萎缩后形成的相对较窄深的断面形态,含沙量急剧降低和缺少较大流量的洪水过程,河床不断冲刷下切,横向展宽强度小于纵向冲深强度,主槽向窄深方向发展,主槽河相系数与水深变化方向一致,随流量增加而减小、随含沙量增加而减小。

过渡性的高艾段和弯曲型的艾利段,在小浪底水库运行前、后的主槽河相系数与流量之间呈负相关、与含沙量之间呈正相关,即流量越大、含沙量越小断面越窄深。这主要是由于高村以下各段主槽断面较为稳定单一,主槽水深对流量和含沙量变化的响应调整强度大于河宽,河相系数与水深的调整方式保持一致。1986-1999年和2000-2015年两个时段存在较大差异的原因主要是由于前者含沙量较大,在水深随流量增加的过程中,伴随有河床的淤积抬升;而后者含沙量较小,在水深随流量增加的过程中,伴随有河床的持续冲刷降低,所以后者主槽断面形态更加窄深,同流量下的河相系数后者小于前者。

总体来看,游荡段在小浪底水库运行前的1986-1999年持续淤积期以横向萎缩调整为主,而在小浪底水库运行后的2000-2015年持续冲刷期以垂向冲深调整为主;弯曲段在小浪底水库运行前、后断面形态均以垂向水深调整为主;而过渡性的高孙段和孙艾段,前者还可以保留了一些游荡段的特点,而后者基本具备了弯曲段的全部特性。这与图12给出的游荡段、过渡段及弯曲段断面形态调整概化模式一致。

为进一步对比主槽断面形态随冲淤变化的调整规律,图14给出了下游沿程7个河段主槽断面形态各参数随单位河长累计冲淤量变化的调整过程。淤积时河宽减小、冲刷时河宽增加,除夹高段在冲刷和淤积的不同阶段河宽调整速率基本一致外,其他段淤积时河宽减小的速率明显大于冲刷时河宽增加的速率,河宽随单位河长累计冲淤量的变化呈顺时针环状(图14a)。淤积时水深减小、冲刷时水深增加,各段淤积期水深减小的速率小于冲刷期水深增加的速率,水深随单位河长累计冲淤量的变化呈逆时针环状(图14b)。游荡型的高村以上段淤积期和冲刷期河相系数均减小,但减小的速率淤积期大于冲刷期(图14c);高村以下段断面河相系数淤积时增加冲刷时减小,淤积时增加的速率略小于冲刷时减小的速率。可见,虽然河道冲淤引起的河道形态调整原则上是可逆的^[24],但是本文分析发现黄河下游主槽经过一轮持续淤积和持续冲刷后,在各段累计冲淤量恢复到零附近时,黄河下游河道主槽形态并未回到其原有的状态,而是变得更加窄深;表明虽然主



注: 图中实线部分为1986-1999年持续淤积期, 虚点画线为2000-2015年持续冲刷期

图14 黄河下游主槽断面形态调整与冲淤的关系

Fig. 14 Relationships between morphological adjustment and the erosion and sedimentation of the lower Yellow River

槽河宽和水深随冲淤变化的调整均满足冲刷时增加、淤积时减小, 但河宽和水深的调整强度随淤积和冲刷的发展存在一定差异, 若欲将断面形态恢复到调整前的原有状态, 仅冲淤量达到基本平衡是不够的, 具体的来水来沙过程还必须要满足一定条件, 如欲将淤积期河宽减小后的断面形态恢复至原有状态, 需经过大流量长历时的低含沙洪水以冲刷两侧边滩为主的作用来实现, 而在中小流量低含沙洪水长时间以垂向冲刷为主的作用下, 断面形态将向窄深方向发展, 如小浪底水库运行后下游游荡型的花高段。可见, 主槽断面形态的调整方式和强度与水沙条件和冲淤之间的关系极为复杂, 与来水来沙过程密切相关^[25-26], 今后有必要进一步探求主槽断面形态调整与其影响因素之间定量关系。

5 结论

选取小浪底水库运行前 1986-1999 年主槽持续淤积萎缩和运行后 2000-2015 年主槽持续冲刷两个典型时段, 通过分析黄河下游不同河段主槽断面形态的调整过程及其对水沙变化的响应规律, 可以得出的主要结论包括:

(1) 水库运行前后主槽断面形态调整模式不同: 运行前, 沿程各段主槽河宽、水深减小, 断面河相系数高村以上段明显减小、高村以下段小幅增加, 其中花园口以下段主槽河宽及其减小幅度沿程减小、主槽水深及其减幅沿程增加; 沿程调整模式分为游荡段横向大幅萎缩与垂向淤高、过渡段横向明显萎缩与垂向淤高和弯曲段以垂向淤高为主。运行后, 沿程各段主槽河宽、水深增加, 河相系数减小, 其中花园口以下河宽增加幅度沿程减小、水深增幅沿程差异不大; 调整模式分为游荡段横向明显展宽与垂向冲深、过渡段横向小幅展宽与垂向冲深和弯曲段以垂向冲深为主。

(2) 水库运行前后主槽断面形态对水沙条件的响应规律存在一定差异: 游荡段河相系数, 水库运行前与流量呈正相关、与含沙量呈负相关, 水库运行后与流量呈正相关, 与含沙量呈负相关; 而过渡段和弯曲段河相系数水库运行前后均与流量呈负相关, 与含沙量呈正相关。运行前河宽减小速率明显大于运行后增加速率, 运行前水深减小速率略小于运行后增加速率, 经过一轮持续淤积和持续冲刷后, 主槽断面形态并没有回到其原有的状态, 而是变得更加窄深。

(3) 主槽断面形态调整方式和强度与水沙条件和冲淤之间的关系非常复杂, 今后有待进一步深入对主槽断面形态调整与其影响因素之间定量关系的研究。

参考文献(References)

- [1] Cui B, Chang X, Shi W. Abrupt changes of runoff and sediment load in the lower reaches of the Yellow River, China. *Water Resources*, 2014, 41(3): 252-260.
- [2] Wang H, Yang Z, Saito Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): Impacts of climate change and human activities. *Global and Planetary Change*, 2007, 57: 331-354.
- [3] Lu Zhongchen, Chen Shaofeng, Chen Hao. The evolutionary tendency forecast of channel morphology and river state of the wandering braided rivers in the Lower Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(6): 729-736. [陆中臣, 陈劭锋, 陈浩. 黄河下游游荡段河道平面形态与河势变化趋势预测. *地理学报*, 2000, 55(6): 729-736.]
- [4] Wu B, Wang G, Xia J, et al. Response of bankfull discharge to discharge and sediment load in the Lower Yellow River. *Geomorphology*, 2008, 100: 366-376.
- [5] Peng Jun, Chen Shenliang, Liu Feng, et al. Erosion and siltation processes in the Lower Yellow River during different river courses into the sea. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 613-622. [彭俊, 陈沈良, 刘锋, 等. 不同流路时期黄河下游河道的冲淤变化过程. *地理学报*, 2010, 65(5): 613-622.]
- [6] Wang S, Li Y. Channel variations of the different channel pattern reaches in the Lower Yellow River from 1950 to 1999.

- Quaternary International, 2011, 244: 238-247.
- [7] Xia J, Li X, Zhang X, et al. Recent variation in reach-scale bankfull discharge in the Lower Yellow River. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39: 723-734.
- [8] Wang H, Wu X, Bi N, et al. Impacts of the dam-orientated water-sediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River (Huanghe): A review. *Global and Planetary Change*, 2017, 157: 93-113.
- [9] Zhang M, Huang H, Carling P, et al. Sedimentation of overbank floods in the confined complex channel-floodplain system of the Lower Yellow River, China. *Hydrological Processes*, 2017, 31: 3472-3488.
- [10] Xia X, Dong J, Wang M, et al. Effect of water-sediment regulation of the Xiaolangdi Reservoir on the concentrations, characteristics, and fluxes of suspended sediment and organic carbon in the Yellow River. *The Science of the Total Environment*, 2016, 571: 487-497.
- [11] Kong D, Miao C, Wu J, et al. Bi-objective analysis of water-sediment regulation for channel scouring and delta maintenance: A study of the Lower Yellow River. *Global and Planetary Change*, 2015, 133: 27-34.
- [12] Wu Baosheng, Li lingyun. Characteristics of cross-section in the lower channel of the Yellow River. *Yellow River*, 2008, 30(2): 15-16, 79. [吴保生, 李凌云. 黄河下游河道横断面的若干特点. *人民黄河*, 2008, 30(2): 15-16, 79.]
- [13] Zheng S, Han S, Tan G, et al. Morphological adjustment of the Qingshuigou channel on the Yellow River Delta and factors controlling its avulsion. *Catena*, 2018, 166: 44-55.
- [14] Ma Y, Huang H, Nanson G, et al. Channel adjustments in response to the operation of large dams: The upper reach of the Lower Yellow River. *Geomorphology*, 2012, 147-148: 35-48.
- [15] Tian S, Wang W, Xie B, et al. Fluvial processes of the downstream reaches of the reservoirs in the Lower Yellow River. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(9): 1321-1336.
- [16] Li J, Xia J, Zhou M, et al. Variation in reach-scale thalweg-migration intensity in a braided reach of the Lower Yellow River in 1986-2015. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42: 1952-1962.
- [17] Xia J, Zhang X, Wang Z, et al. Modelling of hyperconcentrated flood and channel evolution in a braided reach using a dynamically coupled one-dimensional approach. *Journal of Hydrology*, 2018, 561: 622-635.
- [18] Miao C, Kong D, Wu J, et al. Functional degradation of the water-sediment regulation scheme in the Lower Yellow River: Spatial and temporal analyses. *The Science of the Total Environment*, 2016, 551/552: 16-22.
- [19] Sun Z, Wang W, Li Y, et al. Can the narrowing of the Lower Yellow River by regulation result in non-siltation and even channel scouring? *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(9): 1337-1348.
- [20] Zheng Shan. Study on the simulation of non-equilibrium fluvial processes [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. [郑珊. 非平衡态河床演变过程模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.]
- [21] Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources (MWR). *Yellow River Sediment Bulletin*, 2015. [水利部黄河水利委员会. 黄河泥沙公报, 2015.]
- [22] Zhang Yuanfeng, Shen Guanqing. Regulation indices of hyperconcentrated floods in the Lower Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2017, 42(5): 25-30. [张原锋, 申冠卿. 黄河下游高含沙洪水河床形态及调控指标. *泥沙研究*, 2017, 42(5): 25-30.]
- [23] Wu Baosheng, Xia Junqiang, Zhang Yuanfeng. Response of bankfull discharge to variation of flow discharge and sediment load in lower reaches of Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(7): 886-892. [吴保生, 夏军强, 张原锋. 黄河下游平滩流量对来水来沙变化的响应. *水利学报*, 2007, 38(7): 886-892.]
- [24] Yao Wenyi, Zhang Huaxing, Hou Zhijun, et al. Discussion on the reversibility of the river channel shrinking in the Lower Yellow River. *Proceedings of the 2nd International Yellow River Forum on Keeping Healthy Life of the River*, 2015, 4: 197-204. [姚文艺, 张华兴, 侯志军, 等. 论黄河下游河道萎缩的可逆性. 第二届黄河国际论坛论文集, 2015, 4: 197-204.]
- [25] Xu Jiongxin, Zhang Ouyang. Complicated fill-scour behaviors of the Huanghe River and the channel forming processes. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(3): 274-280. [许炯心, 张欧阳. 黄河下游游荡段河床调整对于水沙组合的复杂响应. *地理学报*, 2000, 55(3): 274-280.]
- [26] Zhang Ouyang, Xu Jiongxin, Zhang Hongwu. The response of the channel form adjustment at the wandering-braided reaches of the Lower Yellow River to flood events. *Journal of Sediment Research*, 2002(6): 1-7. [张欧阳, 许炯心, 张红武. 不同来源区洪水对黄河下游游荡河段河床横断面形态调整过程的影响. *泥沙研究*, 2002(6): 1-7.]

Adjustment in the main-channel geometry of the lower Yellow River before and after the operation of the Xiaolangdi Reservoir from 1986 to 2015

WANG Yanjun, WU Baosheng, SHEN Guanqing

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Previous studies indicate that the lower Yellow River experienced a continuous siltation period and a continuous scouring period during the past 30 years. However, the patterns of main-channel adjustments during these two periods are not clear. Based on measured discharge, sediment load, and cross-sectional data between 1986 and 2015, the changes in the morphological parameters (width, depth, and cross-sectional geomorphic coefficient) of the main channel were analyzed. The results showed that before the operation of the Xiaolangdi Reservoir (XLDR) from 1986-1999, the main channel shrunk continuously with decreasing width and depth. Because the decrease rate in width was greater than that in depth, the geomorphic coefficient decreased in the reach above Gaocun. In contrast, for the reach below Gaocun, the decrease rate in width was smaller than that in depth, and the geomorphic coefficient increased. After the XLDR began operating, the main channel eroded continuously, and the width and depth increased from 2000-2015. Because the increase rate in depth was obviously larger than that in width, the geomorphic coefficient decreased in all sub-reaches. The cross-sectional geometry of the main channel exhibited different adjustment patterns during two periods. Before the XLDR operation, the main channel mainly narrowed in the transverse direction and silted in the vertical direction in the reach above Aishan (AS); in the reach below AS, the main channel primarily vertically silted. After the XLDR operation, the main channel adjusted by widening and deepening in the reach above AS; for the reach below AS, the main channel adjusted mainly by deepening. Compared to the decrease rates in main-channel width and depth during the siltation period, the increase rate in width during the scouring period was obviously smaller, while that in depth was larger. After continuous siltation and scouring, the main-channel cross-sectional geometry changed from relatively wide and shallow to relatively narrow and deep. The pattern of main-channel adjustment was closely related to the water and sediment conditions. For the braided reach, the geomorphic coefficient was negatively correlated with discharge and positively correlated with suspended sediment concentration (SSC) during the siltation period. In contrast, the geomorphic coefficient was positively correlated with discharge and negatively correlated with SSC during the scouring period. For the transitional and wandering reach, the geomorphic coefficient was negatively correlated with discharge and positively correlated with SSC.

Keywords: the Lower Yellow River; changes in water and sediment conditions; Xiaolangdi Reservoir; main-channel geometry