黄河下游与河口对2015~2017年调水调沙中断的沉积响应

吴晓^{1,2*}, 范勇勇³, 王厚杰^{1,2}, 毕乃双^{1,2}, 杨作升¹, 徐丛亮³

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 青岛 266061;

3. 黄河河口海岸科学研究所, 东营 257091

* 联系人, E-mail: wuxiao@ouc.edu.cn

2020-08-04 收稿, 2020-12-17 修回, 2020-12-21 接受, 2021-01-04 网络版发表

国家重点研发计划(2016YFA0600903)、国家自然科学基金(41806101, 41525021, U1706214, 42041005)、山东省自然科学基金(ZR2018BD028)和山东省泰山学者项目(TS20190913)资助

摘要 受流域内降水波动和小浪底库容变化的影响, 2015~2017年期间黄河调水调沙中断. 本研究系统收集了2015~2017年黄河主要水文站水沙数据、下游河道高程资料和冲淤数据、河口测深和粒度资料, 研究了调水调沙中断导致的黄河入海泥沙来源和通量变化, 探讨了下游河道和河口地貌演化对调水调沙中断的快速响应. 2015~2017年, 上中游来沙完全被小浪底水库拦截, 黄河首次出现全年进入下游的泥沙量为0. 水库下泄清水, 引起下游河道全线冲刷, 累积冲刷量达1.8亿 m^3 , 高村以上河段是主要冲刷区, 高村向下冲刷量逐渐降低, 下游河道断面发生展宽和下切, 断面形态向宽深方向演化. 下游河道起动的泥沙成为黄河入海泥沙的唯一来源, 由于缺少中游泥沙供应, 黄河入海沙量进一步降低, 2017年, 黄河全年入海泥沙仅为770万 t , 是1950年黄河利津站有连续观测记录以来的最低值. 黄河行水河口陆域面积开始萎缩, 水下三角洲冲刷强烈, 最大冲刷量高达1.8 m/a , 导致表层沉积物粗化明显.

关键词 黄河, 人类活动, 调水调沙中断, 泥沙输运, 地貌演化

河流是连接陆地与海洋的重要通道之一, 在陆源物质向海输送过程中扮演着重要的角色. 每年约有231亿 t 陆源泥沙输送入海, 其中超过86%(约200亿 t)来自全球河流的贡献^[1]. 这些巨量泥沙不仅在入海口处快速堆积, 形成形态各异、面积不同的河口三角洲, 还可以在海洋环流的作用下长距离搬运, 对陆架海的地貌演化产生深远影响^[2]. 同时, 作为生源要素和污染物的重要载体, 入海泥沙通量、粒度组成和输运方式对河口及陆架海生物地球化学循环和生态系统都起到至关重要的作用^[3,4]. 因此, 河流入海泥沙的“源-汇”过程研究一

直是地球科学和环境科学领域广泛关注的热点问题之一, 并成为MARGINS-S2S、LOICZ等多个国际大型科学计划的重要主题^[5]. 河流入海泥沙通量研究是厘清“源-汇”问题的基础和关键, 其变化和波动受到流域内气候变化和人类活动的叠加影响.

工业革命以来, 尤其是20世纪50年代以来, 人类活动在全球尺度上显著增强, 其影响的深度和广度在某些区域已经远远超过自然驱动力的影响^[6]. 强烈的人类活动引起了全球大河河流系统的快速调整, 尤其是流域内水库大坝数量的爆炸式增长, 拦截了全球40%

引用格式: 吴晓, 范勇勇, 王厚杰, 等. 黄河下游与河口对2015~2017年调水调沙中断的沉积响应. 科学通报, 2021, 66: 3059–3070

Wu X, Fan Y Y, Wang H J, et al. Geomorphological responses of the lower river channel and delta to interruption of reservoir regulation in the Yellow River, 2015–2017 (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3059–3070, doi: 10.1360/TB-2020-0975

的河流淡水和25%的河流泥沙^[7]。全球河流水沙通量显著降低,其中,中纬度地区河流入海径流量降低60%以上^[8],东亚、东南亚大河入海沙量降低幅度更是高达70%^[9]。水库拦蓄和泄洪排沙显著影响了河流物质向海输送的格局^[7],并引起河口沉积过程和地貌演化的快速响应,受到了国内外的广泛关注^[10]。1997年, *Nature*连续刊发两篇与河流大坝有关的论文,强调将大坝引起的河流-河口系统的环境效应置于陆海相互作用的科学框架中进行系统研究^[11,12]。Syvitski等人^[13]总结了大河三角洲在全球变化背景下面临的风险,并且认为黄河由于人类活动干预强烈、水库调控方式成熟,为研究和应对这一问题提供了良好的试验场。

黄河以高输沙量著称,历史上入海沙量高达13亿t^[14],占全球河流入海泥沙总量的6%以上^[1]。然而,20世纪50年代以来,受流域内气候变化和强烈人类活动的叠加影响,黄河河流系统发生显著调整,入海水沙的时空输送特征发生明显变化,在全球河流系统中尤为突出^[15]。其中,黄土高原水土保持工程、流域内水库大坝修建和下游引水灌溉等人类活动造成了黄河入海沙量的显著降低^[16]。2002年以来,为减缓下游河道淤积、延长小浪底水库使用寿命,黄河水利委员会开始实施调水调沙,通过人造洪峰的形式冲刷下游河道,减轻下游河道淤积,同时将小浪底水库前期淤积泥沙排沙出库。

自2002年实施以来,调水调沙已经成为控制黄河物质向海输送的最重要工程措施之一,显著改变了黄河河流系统的自然属性,短期内(10~20 d)集中向海输送全年30%~50%的水沙,黄河流域排洪输沙的季节性特征发生改变,黄河由“自然径流”进入“遥控脉冲”阶段^[17]。黄河下游河道持续冲刷,下游再悬浮的床沙成为黄河入海泥沙新的来源^[18]。受调水调沙实施的影响,黄河入海泥沙通量增加、粒度粗化^[17],经利津站入海的年均泥沙通量和悬沙粒径分别增加至1.7亿t和22.5 μm ,入海泥沙扩散方式转为羽状流运输为主,现行黄河三角洲由1996~2001年的缓慢蚀退转为缓慢淤进^[19]。

前人的大量工作揭示了调水调沙实施引起了河流-河口系统的显著变化,取得了一系列新的科学认识。然而,受流域内降水波动和小浪底库容的影响,2015~2017年调水调沙中断。2015年虽然尝试进行调水调沙试验,但并未实现排沙出库。2016、2017年小浪底水库未进行水沙调控。这一流域尺度调控工程的中断对黄河入海沙量和地貌演化的影响如何,尚无系统研究,这也为深入了解河流-河口系统对入海输沙量急剧

变化的快速响应提供了难得的契机。本研究通过对2015~2017年黄河入海水沙通量、下游河道及河口地貌资料的分析,研究了调水调沙中断影响下黄河入海水沙通量波动及地貌响应特征,对于深入理解人类活动影响下大河系统“源-汇”过程具有重要的科学意义,也是“黄河流域生态保护和高质量发展”国家战略的重要内容。

1 区域概况

黄河发源于青海巴颜喀拉山脉,自西向东横穿青、川、赣、宁、内蒙古、晋、陕、豫、鲁等多个省/自治区,在山东省垦利县注入渤海,全长约5464 km(图1(a))。根据自然环境和河流特征,以内蒙古自治区托克托县河口镇和河南省郑州桃花峪为节点,将黄河分为上、中、下游。黄河以其“水少沙多、水沙异源”著称世界,径流量主要来自上游地区,占黄河总入海径流的50%以上;中游黄土高原区是历史上黄河流域的主要产沙区,年产沙量15亿t,对黄河泥沙总量的贡献高达90%以上^[20,21]。黄河水沙输送具有明显的季节性特征,汛期(7~10月)超过全年80%的水沙被输送入海^[16]。黄河下游地势平坦,河道淤积严重,河床抬高,较两岸地势高出2~10 m,成为地上悬河^[22]。

黄河现行河口位于渤海西岸,受东亚季风的影响,风速、风向不同季节差异较大,冬半年盛行偏北风,平均风速高达8 m/s以上,风向稳定,持续数日至十余天,夏季盛行偏南风,风速较低^[23]。波浪主要以风成浪为主,生成快,消散快,季节性特征明显。现行河口区域潮流为平行于海岸的往复流,具有明显的潮时不等现象,涨潮历时较短,落潮历时长。受入海径流、气压和风场的控制,平均潮位每年11月至次年2月最低,8~10月明显偏高。风生余流是该区的主要余流类型,分布范围最广;潮汐余流主要分布在湾口强潮流区;径流型余流主要发生在黄河行水口门区,汛期尤为明显^[24]。

2 数据来源

本研究所用数据包括黄河水利委员会(<http://www.yrcc.gov.cn/>)公开发布的小浪底站和利津站实测径流泥沙数据、小浪底水库以下河道冲淤数据、花园口站与泇口站河道高程测量断面数据、Landsat陆地卫星影像及反演的河口三角洲面积数据、黄河现行河口区2002、2015和2017年测深资料以及2017年表层沉积物粒度数据,具体数据来源与方法如下。

图1 (网络版彩色)黄河流域区域概况图(a)和1950~2017年黄河利津站实测水沙通量(b)

Figure 1 (Color online) Map of the Yellow River basin (a) and time-series data (1950–2017) of annual water and sediment discharge recorded at station Lijin (b)

(1) 黄河水利委员会公开发布的1999~2017年黄河小浪底站实测径流、泥沙数据和1950~2017年黄河利津站实测径流、泥沙数据。由于利津站是黄河入海前最后一个水文站,距离河口仅100 km,水文站之下无支流汇入,通常将利津站作为黄河入海的控制站。

(2) 黄河水利委员会公开发布的2002~2017年小浪底水库以下黄河主要站位之间的河道冲淤数据。该数据由黄河水利委员会利用河道断面高程数据,通过断面法求得。河道断面高程数据由黄河水利委员会各河段水务局统测,数据通过GPS-RTK方式测得,测量所用基准高程为天津大沽高程,坐标系统为北京54坐标系。断面间距为2~13 km,同一断面测点距主河道区域间隔较小,约为1 m,河漫滩处间隔较大,约为100 m;RTK高程测量精度为2 cm。利用河道断面高程数据,将相邻两断面间河道作为固定滩槽和间距的梯形或椎体进行计算,两次测量结果计算的河槽体积之差即为断面间冲

淤体积,断面法计算黄河下游河道的误差约为0.08 亿 m^3 ^[25],为定量描述河道横断面几何形态变化和流域来水来沙条件,本研究引入河相系数(ξ)与来沙系数(ϕ)的概念,具体计算公式如下^[25]:

$$\xi = \frac{\sqrt{w}}{h}, \quad (1)$$

$$\phi = \frac{C_s}{Q}, \quad (2)$$

其中, w 为平滩水位时的水面宽度, h 为对应平滩水位的平均水深, C_s 为进入河道的含沙量, Q 为进入河道的流量。

(3) 黄河水利委员会公开发布的黄河下游花园口站与冻口站2015和2017年的河道断面高程资料。花园口和冻口河道分别作为黄河下游游荡型和蜿蜒型河段的代表断面^[26],在前人研究中多用来探讨下游河道冲淤过程和河道形态特征变化^[26,27]。

(4) 美国地质调查局(USGS)发布的黄河三角洲区域2002~2017年的Landsat陆地卫星影像(<http://glovis.usgs.gov/>), 用以分析探讨2002年调水调沙以来现行河口三角洲陆域面积变化. 岸线提取方法采用Alesheikh等人^[28]2007年提出的基于直方图阈值和波段比的海岸线提取方法, 将遥感影像的不同波段经过直方图阈值化和波段比处理后, 将二元图像叠附后获得的海陆界线能够较为准确地反映海岸线特征, Landsat影像提取岸线的误差约为一个像元^[29].

(5) 黄河现行河口区2002、2015和2017年测深资料. 其数据来自黄河河口海岸科学研究所2002年8~9月、2015年8~10月和2017年8~9月的黄河河口水下地形调查, 调查范围以现行河口为中心向南北各延伸10 km(图2). 水下地形调查采用Trimble SPS 351型信标机和BATHY-500DF测深仪联合作业, 同时为保证测深精度, 在部分断面同时用HY-1600测深仪进行比测, 误差控制在5 cm内. 调查期间在滨海区加布临时验潮站, 全部数据均已进行声速与潮汐校正. 校正后的数据利用Surfer软件进行等间距插值后, 计算对应年份的水深数据的差值, 用以分析河口区域冲淤变化.

(6) 2017年河口表层沉积物粒度资料. 样品来自2017年水下地形调查期间采集的表层沉积物样品(图2), 粒度测试在山东黄河河务局进行, 在实验室中分别用过量的30%过氧化氢溶液和3 mol/L的盐酸去除样品中的有机质和碳酸盐后, 使用英国马尔文(Malvern)公司生产的Mastersizer 2000型激光粒度仪进行粒度测试, 仪器测量范围为0.02~2000 μm , 重复测试的相对误差

小于2%. 本研究所用的中值粒径即仪器测试结果中频数为50%对应的粒径.

3 结果

3.1 黄河入海水沙波动

1999年10月小浪底水库建成后, 黄河入海水沙显著降低(图1(b)). 2000~2001年, 由于小浪底水库建成初期的拦蓄作用, 大量来自中游的泥沙被拦截在水库内, 平均每年仅有15.4 km^3 的径流和0.2亿t泥沙可以通过小浪底水库向下游输送(图3(a)). 这一阶段黄河入海水沙通量仅为4.7 km^3/a 和0.2亿t/a(图3(b)), 相比历史观测时期(1950~1999年, 34.4 km^3/a 和8.7亿t/a), 入海流量减少86.3%, 沙量减少97.7%以上. 2002~2014年调水调沙实施期间, 小浪底水库年均出库流量为24.8 km^3/a , 出库沙量为0.8亿t/a(图3(a)), 相当于小浪底水库蓄水年份(2000~2001年)的161%和400%; 黄河入海水沙通量增加至17.9 km^3/a 和1.5亿t/a(图3(b)). 2015~2017年受流域内降水波动和小浪底库容的影响, 调水调沙中断, 黄河入海沙量持续降低, 2017年黄河仅有770万t泥沙输送入海.

3.2 黄河下游河道冲淤变化

2015~2017年黄河调水调沙中断, 小浪底水库拦截了上中游的全部来沙, 河道来沙系数降低至0, 水库下泄清流不断冲刷下游河道. 2014年10月~2017年10月小浪底水库以下河道全线冲刷, 累积冲刷为1.8亿 m^3 , 年均

图2 黄河现行河口测深断面与表层沉积物取样站位

Figure 2 Map of the active Yellow River mouth with bathymetric transects and sampling stations

图3 (网络版彩色)1999~2017年小浪底(a)和利津站(b)实测水沙通量

Figure 3 (Color online) Time-series data (1999–2017) of annual water and sediment discharge recorded at station Xiaolangdi (a) and station Lijin (b)

冲刷量为 $0.6 \text{ 亿m}^3/\text{a}$ (图4(a)). 高村以上河段是主要冲刷区, 小浪底至高村河段3年累积冲刷 1.4 亿m^3 , 其中, 仅花园口至高村区间冲刷量高达 0.9 亿m^3 (图4(a)). 高村向下冲刷量逐渐减低, 高村-艾山和艾山-利津河段3年累积冲刷量分别为 0.3 亿m^3 和 0.1 亿m^3 .

河道高程测量数据对比显示, 2014年10月~2017年10月, 花园口断面河道形态向宽深方向变化, 断面横向展宽和纵向下切同时进行, 以横向展宽为主(图4(b)), 展宽幅度为 143.5 m . 其中, 向左岸展宽 75.0 m , 向右岸展宽 68.5 m ; 主河道平均下切深度为 0.6 m ; 河相系数由 7.4 降为 7.0 . 汴口断面相对稳定(图4(c)), 主河道宽窄变化幅度较小, 仅左岸发生小幅度横向展宽, 展宽幅度为 4.9 m ; 主河道平均下切深度为 0.4 m , 最大下切深度发生在主槽右侧, 达到 5.6 m ; 河相系数变化不大, 由 2.1 降至 2.0 .

3.3 黄河现行河口地貌响应

自2002年黄河流域开始逐年实施调水调沙以来, 现行清8河口三角洲叶瓣陆地面积由2002年的 15.4 km^2 增长到2015年的 84.0 km^2 , 净造陆面积为 68.6 km^2 , 平均每年造陆速率为 $5.3 \text{ km}^2/\text{a}$ (图5(a)), 黄河现行河口三角洲逐渐形成一个饱满的“楔子”. 随着调水调沙中断, 黄

河现行清8河口陆上三角洲进入缓慢蚀退阶段, 2017年陆地面积降至 81.8 km^2 , 蚀退速率为 $1.1 \text{ km}^2/\text{a}$ (图5(a)). 清8河口附近岸线开始逐渐萎缩, 河口西侧岸线最大蚀退距离为 577.1 m , 河口东侧最大蚀退距离为 896.1 m (图5(b)).

与陆上三角洲发育的阶段性变化相对应, 清8河口水下三角洲也由2002~2015年的淤积中心(图5(c))转为2015~2017年的冲刷区(图5(d)). 冲刷中心位于现行口门正北的三角洲前缘地带, 最大侵蚀厚度达到 3.5 m 左右, 冲刷量高达 1.8 m/a . 河口水下岸坡由2002~2015年持续向海淤进转为向岸蚀退(图5(e)). 随着水下三角洲不断冲刷, 表层沉积物粒度级配也发生显著调整. 现行口门附近形成粗粒级中心, 中值粒径在 $75 \mu\text{m}$ 以上, 最大可达 $105.4 \mu\text{m}$ (图5(f)). 表层沉积物粒度等值线近于平行岸线呈带状分布, 近口门处粒度较粗, 向深水区逐渐变细.

4 讨论

4.1 调水调沙中断引起黄河向“贫沙性”河流转换

黄河流域是中华文明的发源地之一, 过去几千年

图4 2014年10月~2017年10月小浪底至利津河段主河道冲淤变化(a)及2014年10月和2017年10月花园口站(b)与冻口站(c)主河道形态
Figure 4 Erosional volume of the river channel between stations Xiaolangdi and Lijin from October 2014 to October 2017 (a), and channel geometry at stations Huayankou (b) and Luokou (c) in October 2014 and October 2017

来, 人类活动在黄河流域留下了深刻的印迹, 并显著影响着黄河泥沙通量的变化. 从奴隶社会、封建社会到民国末期, 随着黄土高原人口数量的快速增长以及生产工具的不断进步, 黄土高原的植被覆盖情况发生了颠覆性变化, 黄河入海沙量由史前的0.3亿t/a增加至20世纪初期的13.1亿t/a^[14]. 然而, 20世纪50年代以来, 受黄河流域气候变化(降雨波动)和人类活动(水土保持、

修建水库、引水引沙)的影响, 黄河入海沙量呈阶段性递减(图1(b))^[15,16], 其中70%的原因归于人类活动(40%水土保持、20%水库蓄沙、10%上游水库运作)的贡献^[16].

2002年调水调沙工程开展以来, 人类活动的控制作用进一步加强, 控制了90%以上的黄河沙量变化^[30]. 水库泄淤、河道冲刷一定程度缓解了黄河入海沙量的

图5 2002~2017年黄河现行河口陆上和水下三角洲演化特征。陆上三角洲面积(a)与岸线(b)变化; 2002~2015年(c)与2015~2017年(d)黄河现行河口水下三角洲冲(-)/淤(+)特征; (e) 水下断面2002、2015、2017年深度变化(断面位置见图(c)); (f) 2017年10月黄河现行河口海底表层沉积物中值粒径分布特征

Figure 5 Evolutional characteristics of the subaerial and subaqueous Yellow River delta from 2002 to 2017. Area (a) and shorelines (b) of the subaerial Yellow River delta; spatial distribution of accumulation (+)/erosion (-) pattern of the subaqueous Yellow River delta from 2002 to 2015 (c) and 2015 to 2017 (d); (e) bathymetric changes of the subaqueous slope in 2002, 2015 and 2017 at the selected transect along the active Yellow River delta lobe (location of the transect is shown in (c)); (f) spatial distribution of median grain size of the surface sediment on the subaqueous Yellow River delta in October 2017

持续降低趋势, 入海沙量由0.2亿t/a增加至1.5亿t/a(图3(b)). 然而, 随着调水调沙中断, 2015~2017年来自中游的2.8亿t的泥沙几乎被完全拦截在了小浪底库区内, 历史上首次出现进入黄河下游的年输沙量为0^[31]. 小浪底水库下泄清水冲刷下游河道成为这一时期黄河入海泥沙的唯一来源, 但由于缺少中游泥沙贡献, 黄河入海沙量持续减少. 2017年黄河只有770万t泥沙输送入海, 平均悬沙浓度仅为0.86 kg/m³, 是1950年利津站有连续观测记录以来的最低值(图1(b)). Milliman和Meade^[1]对全

球代表性河流进行了统计, 其中黄河多年平均入海沙量高达10.8亿t, 多年平均悬沙浓度为22.0 kg/m³, 位居世界第一. 然而, 在人类活动的强烈干预下, 短短50年的降幅达到了过去几千年来泥沙量的增长总和, 黄河入海沙量恢复至距今7000~3000年前的输沙水平^[14].

4.2 调水调沙中断引起黄河下游河道冲刷量进一步降低

历史上黄河水少沙多, 由于缺少强径流输送, 大量

泥沙淤积在下游河道, 导致河床不断抬高, 形成地上悬河, 一直备受关注. 1855年, 黄河改道归入渤海以来, 62%的上中游来沙淤积在下游河道^[32]. 虽然20世纪50年代以来, 黄河入海沙量持续降低, 但下游河道仍处于不断淤积状态. 1974~1999年, 下游河道平均淤积量为 $0.1 \text{ km}^3/\text{a}$, 河床抬高速率为 4 cm/a , 淤积主要集中在艾山以上河段^[33,34]. 2002年黄河实施调水调沙, 通过水库下泄清水, 塑造高流量洪峰, 降低河流来沙系数, 小浪底以下河道整体由淤积转为冲刷^[35]. 2002~2007年, 小浪底以下河道平均冲刷量为 $1.8 \text{ 亿m}^3/\text{a}$. 随着下游河道不断被冲刷, 下游床沙逐渐粗化, 冲刷效率明显降低, 2008~2014年, 下游河道冲刷量降至 $1.0 \text{ 亿m}^3/\text{a}$ (图6). 2015~2017年黄河调水调沙中断, 虽然小浪底水库下泄清流导致进入下游河道的来沙系数由前一阶段(2008~2014年)的 $2.7 \times 10^{-3} \text{ kg/s/m}^6$ 进一步降低至0, 有利于河道冲刷. 但由于下游河床不断粗化^[35], 加之缺乏调水调沙塑造的高流量洪峰下泄, 小浪底水库以下河道冲刷量进一步降低, 年均冲刷量仅为 $0.6 \text{ 亿m}^3/\text{a}$ (图6).

4.3 调水调沙中断引起黄河现行河口快速冲淤转换

三角洲地处海陆交接地带, 其冲淤演变受到多种因素的制约, 其中入海水沙条件和海洋动力环境是影响三角洲演变的关键因素^[36,37]. 前者表现为建设性作用, 后者表现为破坏性作用为主. 黄河口属于河控型河口, 同时受到波浪的破坏作用, 入海泥沙的多寡决定了三角洲的形成规模和发展速率^[38]. 前人综合考虑黄河入海径流量和输沙量的控制作用, 估算维持现行黄河三角洲叶瓣的冲淤平衡的临界沙量约为 0.6 亿t/a ^[19].

2015~2017年黄河调水调沙中断, 上中游来沙完全被小浪底水库拦截, 入海泥沙几乎全部来自下游河道冲刷, 入海沙量仅为 0.2 亿t/a , 远低于维持陆上三角洲冲淤平衡所需的临界沙量. 由于泥沙供应不足, 现行口门处陆上三角洲开始逐渐蚀退(图5(b)). 黄河行水口门处陆域面积萎缩, 这在黄河三角洲的演化历史过程中十分罕见. 即使在小浪底水库建成初期, 水库拦蓄作用导致黄河入海沙量急剧降低, 现行陆上三角洲虽然总体开始蚀退, 但在行水口门处陆上三角洲仍能不断向海淤进^[19].

受东亚季风影响, 黄河口海洋动力冬强夏弱的季节性特征十分显著. 冬半年北风增强, 波浪作用增大, 使得黄河三角洲近岸海底底切应力加大, 在潮流的剪切作用和波浪的扰动作用综合控制下, 海底泥沙发生再悬浮, 水体垂向混合均匀. 由于波浪强烈的湍动作用, 再悬浮的泥沙短时间难以沉降, 被潮流和余流向外海搬运, 黄河三角洲完成“源-汇”角色的季节性转换^[23]. 由于调水调沙中断, 河口缺少泥沙供应, 在海洋动力的破坏作用下, 河口水下三角洲发生显著侵蚀(图5(d)). 2015~2017年, 黄河现行河口水下三角洲净冲刷体积为 0.64 亿m^3 , 按河口海域泥沙容重为 1.53 t/m^3 计算^[39], 现行河口水下三角洲损失泥沙 1.0 亿t . 调水调沙中断后, 河口表层沉积物粒度特征也发生明显变化, 相比2013年调水调沙前河口附近沉积物中值粒径最大值仅为 $50.0 \mu\text{m}$ 左右, 甚至在调水期粗粒级泥沙入海在河口处堆积的影响下, 河口附近沉积物中值粒径也仅为 $60.0 \mu\text{m}$ 左右^[40]. 2015~2017年由于水下三角洲不断侵蚀, 经过海洋动力的不断“淘洗”, 河口水下三角洲表层

图6 2002~2017年小浪底至利津河段主河道年际和累计冲刷量

Figure 6 Annual and cumulative erosional volume of the river channel between stations Xiaolangdi and Lijin from 2002 to 2017

沉积物粗化明显(图5(f)).

4.4 黄河调水调沙对全球河流调控和三角洲地貌稳定的启示

随着河流建坝的负面效应逐步凸现,国内外专家学者和相关管理部门也试图通过水库塑造“人造洪峰”冲刷河床,增加入海径流和泥沙量,缓解水库建坝导致的三角洲蚀退、河口生态环境恶化等一系列问题^[41].然而,这些工程措施调控方式简单、规模有限,大多停留在试验阶段,其功效难以进行系统评估^[41].黄河调水调沙提供了重要的实践案例:2002~2014年调水调沙的持续运行,增加了黄河入海沙量和悬沙级配组成,黄河现行河口三角洲持续淤进;2015~2017年调水调沙中断,黄河入海沙量急剧降低,河口三角洲重新面临蚀退风险.河流-河口系统对调水调沙实施和中断的快速响应表明,水库调控仍然是现阶段缓解河流建坝负面效应、维持河口三角洲地貌稳定的重要手段.但不可忽视的是,尽管排沙出库一定程度上缓解了小浪底水库的淤积状况,仍有85%的入库泥沙沉积在小浪底库区中难以有效排出;同时,下游河道不断被冲刷,床沙粗化明显,河道抗蚀能力增强,单位径流量对下游河床的冲刷效率逐渐减弱^[42,43].随着水库有效库容持续降低、下游河道冲刷效率逐渐降低,水库调控的效率和功能不断退化,简单的排沙出库和河道冲刷手段并非一劳永逸的长久之计^[42].未来为更好地实现三角洲的地貌稳定和可持续发展,水库调控方案应当联合其他三角洲保护工程措施(如密西西比河河道分汊、三角洲植被种植和荷兰三角洲保护工程等)统筹规划,而不仅仅只是通过水库泄洪将库区和河道泥沙简单粗暴地输送至河口地区.

5 结论

2015~2017年黄河调水调沙中断,小浪底水库拦截了全部的上中游来沙,黄河首次出现全年进入下游的泥沙量为0.如此大规模人类工程活动的中断,导致黄河河流系统发生显著调整,引起下游河道和河口沉积演化的快速响应.

(1) 2015~2017年,下游河道冲刷是黄河入海泥沙的唯一来源.黄河平均入海沙量为0.2亿t/a,尤其是2017年,黄河全年入海泥沙仅为770万t,是1950年黄河利津水文站开始水沙实测工作以来的最低值,接近距今7000~3000年前的史前输沙水平.

(2) 小浪底水库下泄清流造成下游河道全线冲刷,累积冲刷1.8亿m³.高村以上河段是主要冲刷区,小浪底至高村河段3年累积冲刷1.4亿m³,高村向下冲刷量逐渐减低,高村-艾山和艾山-利津河段三年累积冲刷量分别为0.3亿m³和0.1亿m³.下游河道断面发生展宽和下切,断面形态向宽深方向演化.

(3) 2015~2017年调水调沙中断期间,黄河现行河口陆上三角洲逐渐萎缩,水下三角洲冲刷强烈,最大冲刷量高达1.8 m/a,现行河口水下三角洲净冲刷体积为0.64亿m³,净损失泥沙1.0亿t.随着水下三角洲不断冲刷,河口水下三角洲表层沉积物粗化明显.

(4) 2002年开始实施的调水调沙已经成为控制黄河下游及河口沉积环境演化的最重要的工程活动之一.调水调沙的中断引起下游及河口沉积环境的快速响应,对河口三角洲地貌稳定带来极大威胁.在水库不断淤积和下游河道粗化导致调水调沙功能逐渐减退的新形势下,如何利用干流水库合理进行水沙调控以保障下游及河口的高质量发展,应当引起重视和进一步的思考.

参考文献

- 1 Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *J Geol*, 1983, 91: 1-21
- 2 Gao S, Collins M B. Holocene sedimentary systems on continental shelves. *Mar Geol*, 2014, 352: 268-294
- 3 Martin J M, Meybeck M. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Mar Chem*, 1979, 7: 173-206
- 4 Seitzinger S P, Mayorga E, Bouwman A F, et al. Global river nutrient export: A scenario analysis of past and future trends. *Glob Biogeochem Cycles*, 2010, 24: 2621-2628
- 5 Zhang J. On the critical issues of land-ocean interactions in coastal zones (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 1956-1966 [张经. 关于陆海作用的若干问题. 科学通报, 2011, 56: 1956-1966]
- 6 Crutzen P J, Stoermer E F. The "Anthropocene". *IGBP News*, 2000, 41: 17-18
- 7 Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 2005, 308: 405-408
- 8 Milliman J D, Farnsworth K L, Jones P D, et al. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951-2000. *Glob*

- Planet Change, 2008, 62: 187–194
- 9 Wang H, Saito Y, Zhang Y, et al. Recent changes of sediment flux to the western Pacific Ocean from major rivers in East and Southeast Asia. *Earth-Sci Rev*, 2011, 108: 80–100
 - 10 Syvitski J P M. Deltas at risk. *Sustain Sci*, 2008, 3: 23–32
 - 11 Milliman J. Blessed dams or damned dams? *Nature*, 1997, 386: 325–327
 - 12 Humborg C, Ittekkot V, Cociasu A, et al. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, 1997, 386: 385–388
 - 13 Syvitski J P M, Kettner A J, Overeem I, et al. Sinking deltas due to human activities. *Nat Geosci*, 2009, 2: 681–686
 - 14 Wu X, Wang H, Bi N, et al. Climate and human battle for dominance over the Yellow River's sediment discharge: From the Mid-Holocene to the Anthropocene. *Mar Geol*, 2020, 425: 106188
 - 15 Wang S, Fu B, Piao S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nat Geosci*, 2016, 9: 38–41
 - 16 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. *Glob Planet Change*, 2007, 57: 331–354
 - 17 Wang H J, Wu X, Bi N S, et al. Impacts of the dam-orientated water-sediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River (Huanghe): A review. *Glob Planet Change*, 2017, 157: 93–113
 - 18 Kong D X, Miao C Y, Alistair G, et al. Evolution of the Yellow River Delta and its relationship with runoff and sediment load from 1983 to 2011. *J Hydrol*, 2015, 520: 157–167
 - 19 Wu X, Bi N S, Xu J P, et al. Stepwise morphological evolution of the active Yellow River (Huanghe) delta lobe (1976–2013): Dominance of flux and composition of riverine sediment. *Geomorphology*, 2017, 292: 115–127
 - 20 Qian Y Y. Changes in water and sediment discharge and bed evolution of the Yellow River (in Chinese). *Yellow River*, 1994, 2: 23–27 [钱意颖. 黄河干流水沙变化与河床演变. 人民黄河, 1994, 2: 23–27]
 - 21 Wang Y, Zhang Y Z. Impact of human activity on discontinuation of the Yellow River and coastal environment (in Chinese). *J Nanjing Univ (Nat Sci)*, 1996, 3: 6–20 [王颖, 张永战. 人类活动与黄河断流及海岸环境影响. 南京大学学报(自然科学版), 1998, 3: 6–20]
 - 22 Shi C, Dian Z, You L. Changes in sediment yield of the Yellow River basin of China during the Holocene. *Geomorphology*, 2002, 46: 267–283
 - 23 Yang Z, Ji Y, Bi N, et al. Sediment transport off the Huanghe (Yellow River) delta and in the adjacent Bohai Sea in winter and seasonal comparison. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2011, 93: 173–181
 - 24 Zhang J, Huang W W, Shi M C. Huanghe (Yellow River) and its estuary: Sediment origin, transport and deposition. *J Hydrol*, 1990, 120: 203–223
 - 25 Sun Z Q. Erosion and deposition of the river channel in the lower Huanghe (Yellow River) reaches in Shandong Province (1991–2012): Process and mechanisms (in Chinese). Master Dissertation. Qingdao: Ocean University of China, 2017 [孙中强. 黄河下游河道山东段冲淤演化过程及其机制(1991~2012). 硕士学位论文. 青岛: 中国海洋大学, 2017]
 - 26 Wu B S, Li L Y. Characteristics of cross-section in the lower channel of the Yellow River (in Chinese). *Yellow River*, 2008, 30: 15–17 [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: 15–17]
 - 27 Hu C H, Chen J G, Liu D B, et al. Studies on the features of cross section's profile in lower Yellow River under the conditions of variable incoming water and sediment (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2006, 11: 1283–1289 [胡春宏, 陈建国, 刘大滨, 等. 水沙变异条件下黄河下游河道横断面形态特征研究. 水利学报, 2006, 11: 1283–1289]
 - 28 Alesheikh A A, Ghorbanali A, Nouri N. Coastline change detection using remote sensing. *Int J Environ Sci Technol*, 2007, 4: 61–66
 - 29 Fan H, Huang H J. Spatial-temporal changes of tidal flats in the Huanghe River Delta using Landsat TM/ETM+ images. *J Geogr Sci*, 2004, 14: 366–374
 - 30 Liu S S, Wang H J, Zhang Y, et al. Impacts of climate change and human activity on sediment discharge in the middle reach of the Yellow River (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2014, 4: 41–50 [柳莎莎, 王厚杰, 张勇, 等. 气候变化和人类活动对黄河中游输沙量影响的甄别. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 4: 41–50]
 - 31 Yellow River Conservancy Committee. Yellow River Sediment Bulletin (in Chinese), 2015, <http://www.yrcc.gov.cn/zwzc/gzgb/gb/nsgb/> [黄河水利委员会. 黄河泥沙公报, 2015, <http://www.yrcc.gov.cn/zwzc/gzgb/gb/nsgb/>]
 - 32 Shi C X. Sediment budget of the Yellow River over the period 1855–1968 (in Chinese). *J Sediment Res*, 2003, 2: 1–6 [师长兴. 1855年以来黄河泥沙输移系统的泥沙淤积分布分析. 泥沙研究, 2003, 2: 1–6]
 - 33 Chu Z. The dramatic changes and anthropogenic causes of erosion and deposition in the lower Yellow (Huanghe) River since 1952. *Geomorphology*, 2014, 216: 171–179
 - 34 Zeng Q, Zhang C J, Liu H J, et al. Changes in depositional and erosional pattern of the lower Yellow River since 1988 (in Chinese). *Yellow River*, 2000, 8: 40–41 [曾芹, 张长江, 刘豪杰, 等. 1998年以来黄河下游河道冲淤变化分析. 人民黄河, 2000, 8: 40–41]
 - 35 Bi N, Sun Z, Wang H, et al. Response of channel scouring and deposition to the regulation of large reservoirs: A case study of the lower reaches of the Yellow River (Huanghe). *J Hydrol*, 2019, 568: 972–984

- 36 Nanson R A, Vakarelov B K, Ainsworth R B, et al. Evolution of a Holocene, mixed-process, forced regressive shoreline: The Mitchell River delta, Queensland, Australia. *Mar Geol*, 2013, 339: 22–43
- 37 Zhou Y, Huang H Q, Nanson G C, et al. Progradation of the Yellow (Huanghe) River delta in response to the implementation of a basin-scale water regulation program. *Geomorphology*, 2015, 243: 65–74
- 38 Ye Q C. The geomorphological structure of the Yellow River delta and its evolution model (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 1982, 49: 349–363 [叶青超. 黄河三角洲的地貌结构及发育模式. *地理学报*, 1982, 49: 349–363]
- 39 He C G, Li X J, Zuo X L. Analysis and research on sediment bulk density test in coastal area of Yellow River estuary (in Chinese). *Water Res Dev Manag*, 2017, 4: 70–72 [何传光, 李小娟, 左学玲. 黄河口滨海区泥沙容重试验研究. *水资源开发与管理*, 2017, 4: 70–72]
- 40 Wu X, Bi N, Yuan P, et al. Sediment dispersal and accumulation off the present Huanghe (Yellow River) delta as impacted by the Water-Sediment Regulation Scheme. *Cont Shelf Res*, 2015, 111: 126–138
- 41 Mueller E R, Schmidt J C, Topping D J, et al. Geomorphic change and sediment transport during a small artificial flood in a transformed post-dam delta: The Colorado River delta, United States and Mexico. *Ecol Eng*, 2017, 106: 757–775
- 42 Wu X, Bi N S, Syvitski J, et al. Can reservoir regulation along the Yellow River be a sustainable way to save a sinking delta? *Earth Future*, 2020, 8: 1–9
- 43 Miao C Y, Kong D X, Wu J, et al. Functional degradation of the water-sediment regulation scheme in the lower Yellow River: Spatial and temporal analyses. *Sci Total Environ*, 2016, 551-552: 16–22

Summary for “黄河下游与河口对2015~2017年调水调沙中断的沉积响应”

Geomorphological responses of the lower river channel and delta to interruption of reservoir regulation in the Yellow River, 2015–2017

Xiao Wu^{1,2*}, Yongyong Fan³, Houjie Wang^{1,2}, Naishuang Bi^{1,2}, Zuosheng Yang¹ & Congliang Xu³

¹ Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Technique, Ministry of Education, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

² Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China;

³ Institute of the Yellow River Estuarine and Coastal Science, Dongying 257091, China

* Corresponding author, E-mail: wuxiao@ouc.edu.cn

As the major link between land and ocean, rivers play a significant role in global biogeochemical cycles. Owing to the proliferation of dams over the past decades, however, most of the river systems throughout the world have been largely fragmented and regulated by dams. Significant dam interception has largely decreased the sediment supply from drainage basins to coastal settings, inducing unintended consequences of geomorphological evolution (e.g., coastal erosion). China's Yellow River has been dammed since the 1950s, with the result that the Yellow River-derived sediment has become an order of magnitude smaller. The Yellow River Conservancy Committee (YRCC) started to initiate the Water and Sediment Regulation Scheme (WSRS) through a coordinated regulation of three large reservoirs along the mainstream (Wanjiazhai, Sanmenxia, and Xiaolangdi reservoirs) in July 2002. Since then, the WSRS has been generally operated every summer to mitigate the siltation of the lower reach by scouring the lower riverbed, and to prolong the operational life expectancy of the Xiaolangdi Reservoir by expelling the sediment that previously accumulated within the reservoir. Such an unprecedented engineering effort has brought the Yellow River under human control. The monsoon-fed flood peaks are largely controlled, replaced by man-made floods. Consequently, the geomorphological features of the lower river channel and delta of the Yellow River have been substantially altered from their natural states. Furthermore, the functional degradation of the WSRS in recent years has received increasingly more attention. From 2015 to 2017, the WSRS was interrupted due to a decrease in precipitation in the drainage basin. Herein, the impact of the interruption of the WSRS from 2015 to 2017 on the Yellow River's water and sediment transport is examined, and the geomorphological responses of the lower reaches and delta of the river are discussed. The main datasets used in this study include the sediment load measured by the YRCC at Xiaolangdi and Lijin stations from 1999 to 2017, erosional volume of the river channel downstream from the Xiaolangdi from 2002 to 2017, Landsat-image-derived area data of the active Yellow River mouth from 2002 to 2017, and bathymetric data off the active Yellow River mouth in 2002, 2015 and 2017. The results show that there was no sediment export from the Xiaolangdi Reservoir from 2015 to 2017, resulting in the lower Yellow River, for the first time ever, not receiving sediment from the Loess Plateau for an entire year. All sediment delivery to the sea during this period was eroded from the lower reaches by dam-released clear water. Owing to the lack of sediment supply from the Loess Plateau, the sediment delivered from the Yellow River to the sea fell to 7.7 million tons in 2017, which is the lowest since record-keeping began in 1950. The lower Yellow River channel became widened and deepened due to continuous scouring, with erosion mainly occurring in the reaches from Xiaolangdi to Gaocun. Because of the lack of WSRS-released flood water, the erosive effectiveness gradually decreased. Since 2015, the subaerial Yellow River delta has transitioned to an erosive phase due to the lack of sediment supply. Additionally, the subaqueous delta off the active river mouth suffered net erosion, with a maximum erosive rate of 1.8 m/a. As a consequence, the surface sediment off the active Yellow River coarsened, with the median grain size reaching as high as 105.4 μm . The results of this work show that, under the current circumstances, the geomorphic stability of the deltaic area seems to be extremely in danger without the operation of the WSRS. Optimizing the reservoir regulation scheme is urgently necessary to maintain the sustainable development of the Yellow River delta, especially in the era when functional degradation of the WSRS is considerable.

Yellow River, human activity, interruption of Water and Sediment Regulation Scheme, sediment delivery, geomorphological evolution

doi: [10.1360/TB-2020-0975](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0975)