长江口水下地形演变对三峡水库蓄水的响应

黎兵*, 严学新, 何中发, 陈勇, 张金华

上海市地质调查研究院, 上海 200072

* 联系人, E-mail: ylibing@hotmail.com

2014-12-31 收稿, 2015-03-02 接受, 2015-05-29 网络版发表

国家公益性行业科研专项(201211009)和国家海洋地质保障工程项目(GZH201200506)资助

摘要 三峡水库蓄水对长江河口水下地形演变的影响, 近年已日趋成为研究热点. 但已有研究多受到水下地形数据范围和精度的限制, 在一定程度上制约了长江口区域地形演变对三峡水库蓄水的客观认识. 利用始于三峡蓄水前的2002年, 截至2013年的5个代表性年份的长江口全区实测水下地形数据, 通过构建水深-累积面积曲线和冲淤通量计算及与三峡水库和大通站输沙量的对比, 揭示了三峡蓄水后长江口全区水下地形演变规律及其对三峡水库蓄水的响应, 为判别三峡水库对长江口的影响提供了更客观和直接的证据. 研究结果显示, 长江口在三峡蓄水影响下的总体演化格局为: 以-6.4 m水深线为界, 近岸以淤积为主, 远岸以侵蚀为主导, -19 m水深线以深水水域水下地形相对稳定, 受水动力影响较小. 这种趋势到2013年发生显著变化, 海床侵蚀明显加剧. 总体而言, 研究区于2002~2007年间发生由淤积主导向侵蚀为主的转变, 且2007年后侵蚀趋势加剧, 相比三峡蓄水前的2002年, 2013年长江口侵蚀泥沙超过10亿t. 2007~2011年间长江口冲淤量变化趋势与三峡水库出库输沙量及大通站年输沙量呈极好的线性正相关性, 判别系数在0.99以上, 说明2007年后三峡蓄水对长江口区域演化具有控制性作用, 而2013年研究区海床侵蚀的加剧, 还与长江口外和苏北海岸带泥沙补给受到限制有关.

关键词

三峡
蓄水
长江口
海岸带
水下地形

长江是亚洲最长的河流, 其入海水量和沙量分居世界第5位和第4位, 1950~2010年的年均径流量和输沙量分别达到896.4 km³/a和3.90亿t/a^[1]. 由于长江携带了巨量泥沙, 中全新世以来, 长江三角洲向海推进了200 km以上^[2-4], 现代长江三角洲平原的全新世沉积厚度超过了60 m^[5,6]. 过去2000年来, 由于流域高强度的人类活动, 长江三角洲接受了快速沉积^[7]. 长江水下三角洲面积约10000 km², 呈“三级分叉, 四口入海”的地貌格局, -5~-10 m水深线以浅的河口地区为顶积层发育区, 是现代长江水下三角洲的主要沉积区, 前积层向海延伸至-20~-40 m水深线^[7].

三峡工程为全球最大水利工程, 位于长江干流湖北宜昌上游约44 km^[8](图1), 于2003年初次蓄水以来, 长江口潮流影响边界、距离长江口约600 km的安

徽大通水文站年输沙量发生显著减少^[8], 对长江口海岸带的水下地形演变产生了明显影响^[6,10]. 对于近年来长江口海岸带水下地形演变及相关工程影响的研究, 也日趋成为热点, 吸引了国内外同行的广泛关注^[6,8,11-14]. 然而, 已有成果多受到水下地形数据量的限制, 选择局部地区开展研究, 如长江口口门^[6], 南支河道^[14]或深水航道^[13,15], 不利于客观认识研究区水下地形演变的宏观规律. 此外, 已发表成果利用的水下地形数据多通过纸质海图的矢量化获取, 而纸质海图水深数据密度低, 且在人工矢量化过程中容易产生人为误差, 数据密度和精度的不足也在一定程度上影响了研究成果的准确性. 本文利用上海市地质调查研究院和上海市海事局海测大队2002年以来实测的水下地形数据, 选择长江河口全区作为

引用格式: 黎兵, 严学新, 何中发, 等. 长江口水下地形演变对三峡水库蓄水的响应. 科学通报, 2015, 60: 1735-1744

Li B, Yan X X, He Z F, et al. Impacts of the Three Gorges Dam on the bathymetric evolution of the Yangtze River Estuary (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 1735-1744, doi: 10.1360/N972014-01074

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972014-01074>

图1 研究区地理位置图. (a) 长江流域和研究区地理位置, 据 Li 等人^[9]修改; (b) 研究区水下地形图, 利用 2006 年水深数据编制

Figure 1 (a) Map showing the locations of the Yangtze River basin, the Three Gorges Dam, the Datong gauging station and the study area (black solid polygon), modified from Li et al.^[9]; (b) The bathymetric map of the study area, generated using the bathymetric data of 2006

研究区, 分析其冲淤量变化规律及其对三峡工程蓄水的影响, 旨在为揭示三峡工程对长江口的影响提供直接证据. 同时, 为该区的水下地形演变机制及模型研究提供支持.

1 材料和方法

(i) 数据来源. 本文利用的水下地形数据, 均为利用单波束测深技术获取并经多站潮位改正后的数据, 数据坐标为北京 54 坐标, 数据基面为理论最低潮面. 空间分布上, 南、北支及口门测线间距多介于 100~300 m (2007 年北支口内无数据), 杭州湾北岸和北支入海口测线间距为 1~1.2 km, 测线上测点间距多小于 100 m. 水下地形数据点分布见图 2 所示.

数据获取过程执行《水运工程测量规范》^[16], 具体过程简述如下: 导航定位采用天宝公司 Sps351 信标 DGPS 系统, 仪器定位精度 0.5 m. 外业工作前, 在已知控制点上按 5 s 的采样间隔进行了 24 h 以上的静态测试工作, 获得最小和最大平面定位中误差分别为 ± 0.95 和 ± 1.99 m. 单波束测深采用美国 ODOM 公司的 HYDEOC 单频回声测深仪, 仪器测量精度为 1 cm + 0.1% 水深. 外业工作前, 使用水深模拟器按 5 min 的采样间隔对该测深仪进行了 2 h 以上的静态测试, 最大测深中误差为 0.10 m. 为保证导航定位信号和测试数据的稳定, 导航定位和测深仪均固定安装在工作船只驾驶台顶端和船舷中部, 六级以上大风天气未进行外业数据采集.

图2 研究区水下地形数据((a)~(e))和代表性年份(2013年)潮位站(f)分布。(f)中临时潮位站为外业测量期间自主抛设的潮位站,其他为利用的长期潮位站;南支上段和北支同期水深数据收集自长江上海航道管理处

Figure 2 (a)~(e) Distribution of the bathymetric data used in this paper, the North Branch and upper South Branch's data were collected from Shanghai Yangtze River Waterway Administration. (f) Distribution of the tide-gauge stations of the representative year 2013 for tidal correction of the bathymetric data. Filled circles represent long-term fixed stations, filled triangles indicate temporary set ones

(ii) 数据处理. 原始数据采集和处理采用HYPACK公司的导航定位、水深测量软件,版本号11.0. 潮位改正主要利用了上海市海事局、上海市航道局等有关部门的固定潮位站,在固定潮位站不足的地区(如杭州湾近岸和研究区东北部),通过海上定点抛投和岸边架设的方式增设了多个人工验潮潮位站(图2(f)),在海上作业期间按10 min间隔进行潮位数据采集. 潮位改正方法以三站改正为主,长江南支口内和长江口深水航道采用双站改正(图2(f)).

为识别水深数据误差并检验测量数据质量,在进行单波束水深测量期间,垂直设计主测线布置了累积长度约为10%的检查线,并对主测线和检查线的交叉点数据进行比对和统计,结果显示,99%以上数据点互差小于0.2 m.

(iii) 分析方法. 利用Golden Software公司的Surfer软件,对现有水下地形数据点进行插值和网格化处理. 由于不同时段水深资料的空间分布范围和密度不同,为了提高插值数据的可靠性,插值方法采用海洋测深较常用且最优^[17]的Kriging法,其保留了实测数据的属性,同时最大程度地降低了空间插值数据误差. 为避免导航定位误差(最大中误差1.99 m)

影响,同时便于不同年份数据对比,所有年份水深数据均按远大于导航定位最大中误差(1.99 m)的100 m×100 m设置单元网格. 基于这些栅格数据,利用DEM叠加分析方法计算了水下地形数据重叠区域的垂向变化速率. 为避免测深数据误差(最大0.2 m)影响,在侵蚀淤积速率范围界定时,将-0.1~0.1 m作为稳定区处理. 为恢复三峡水库蓄水后长江口水下地形变化的宏观规律,本文统计了不同年份不同水深线以浅的面积数据,并构建了随水深变化的累积面积曲线. 通过不同年份的叠加对比可有效构建区域内总体地形格局及不同水深区的纵、横向变化特征. 为进一步揭示长江口冲淤量变化与三峡工程蓄水的相关性,计算了不同年份相对2002年的冲淤变化量,并与三峡水库和大通站泥沙输出数据进行了对比研究.

(iv) 代表性年份的选择. 为了对比三峡水库蓄水(2003年6月)前后长江口地区的水下地形变化,结合三峡工程蓄水的时间节点(2002年底~2003年6月至135 m, 2006年9月至150 m, 2009年至175 m)和近年来大通站来水来沙变化形势,选择2002, 2007, 2009, 2011和2013年5个代表性年份当年实测数据进行分

析, 对应于大通站年输沙量持续降低、年径流量/年输沙量的比值持续升高的趋势, 说明研究区5个代表性年份间的水下地形变化代表了三峡工程影响的背景。

2 结果与讨论

2.1 长江口水下地形演变格局

尽管现代水下三角洲沉积物存在一定压实和固结作用^[18], 但我们2009年以来对上海市沿海海堤的二等水准监测结果显示年均沉降量不超过2 cm/a, 新建海堤工程自重导致的沉积物最大压实量也不超过5 cm/a, 且多在3年之内达到稳定状态, 在水深数据误差范围(0.2 m)之内, 说明研究区沉积物压实作用对研究区地形变化的贡献微弱, 而水下地形的垂

向变化基本代表了侵蚀淤积的程度。

通过对选定年份水下地形数据进行DEM叠加对比, 发现长江口口内侵蚀淤积幅度明显较口门和口外地区大, 且冲淤条带多平行岸线分布(图3), 说明该区地形变化受岸线分布影响显著。更为明显的是, 三峡工程蓄水前(2002年)至2007年区域变化以淤积为主, 尤其是口门和口外地区, 2007年后发生向侵蚀主导的转变, 且侵蚀区范围逐渐增大, 至2011~2013年, 全区侵蚀区面积达到70%以上, 说明近年来长江口海床侵蚀呈加剧趋势。

为刻画研究区水下地形演变总体特征, 本文选择5个年份水下地形数据重叠区进行分析。重叠区面积约6400 km², 其范围涵盖长江口内南支、口门和部分口外地区, 东界至约122°37'E, 具体范围见图3所示。该区代表了长江口对长江来水来沙响应的主体

图3 年均侵蚀淤积图对比图。粗虚框示沉积通量计算区

Figure 3 Annual bathymetric changes during different periods. Black dashed polygon shows the calculating area of sediment flux

区域, 因为其外部区域均无明显响应: (1) 长江口北支近20年来呈不断衰退趋势, 1999年以来的分流量已减少至1%以下^[19], 其主要受潮流作用控制, 对长江来水来沙的响应不具显著意义; (2) 杭州湾受强潮流作用主导, 湾内细颗粒物以反复搬运, 净输运量为特征^[20], 2002年以来的水下地形变化(图3)也指示其冲淤变化基本处于平衡状态; (3) 2002年以来的区域侵蚀淤积图(图3)和2009年以来每年实测的水下地形剖面(包括崇明东部、横沙东部、九段沙东部和南汇东部)均显示, 长江口外-20 m水深线以深(东)地区水下地形年际变化程度多小于0.2 m, 说明其近年也未受到长江输沙的明显影响。

通过提取重叠区内不同年份、不同水深值对应的面积, 构建了水下地形-累积面积的对比曲线, 该曲线较客观地指示了不同水深线以浅面积的变化和区域侵蚀淤积总体特征。为了更直观地反映不同水深区的面积变化, 选择了多个代表性水深线的面积数据进行对比分析, 具体见图4所示。

曲线显示, 0 m水深线以浅面积变化最大, 且总体呈不断增大特征(图4)。这与近年来上海市大规模促淤圈围工程建设有关, 因为0 m水深线以浅区域为上海市主要的后备土地资源, 近年(尤其是2007年以来)在横沙东滩、崇明东滩及杭州湾北沿等地促淤圈围了大片土地。而以-19 m水深线为界, 其深部地区面积均未发生明显变化, 其中-19 m水深线以浅

2007~2013年的面积相对2002年的变化幅度均小于30 km², 不超过统计区面积的0.45%, 说明该水深线可能代表了研究区水动力对底质沉积物影响的边界, 可作为研究区水下地形监测范围边界线的参考。

有趣的是, 不同年份的曲线在-6.4 m水深线附近存在一个较明显的交叉点(图4), 该水深线以浅不同年份的面积相对稳定, 相对2002年的变化幅度均小于50 km², 仅占统计区面积的0.83%。而在其上部区域总体呈面积增大, 向海淤进的特征, 其下部区域则相反, 呈面积减小, 向岸侵蚀后退的特征。即以-6.4 m水深线为界, 研究区存在“近岸淤积, 远岸侵蚀”的总体特征。这与Yang等人^[6]在长江口门地区识别的-5~-8 m水深线的侵蚀界线一致。尽管如此, -6.4 m水深线以浅的近岸区域在2013年发生了显著变化, 其相对2011年呈相反的面积减小, 侵蚀后退的特征。相对2011年, 2013年-3 m水深线以浅面积减少了71.5 km², 说明2011年后侵蚀界线发生显著向岸移动, 区域海床侵蚀明显加剧。

2.2 长江口冲淤量与三峡蓄水的关系

为了对长江口地区的水下地形变化程度进行量化表达和对比, 本文对研究区5个年份水下地形数据重叠区(约6400 km², 图3)进行了冲淤通量计算, 并换算成相对三峡蓄水前(2002年)的冲淤通量。为进一步识别长江口水下地形演变与三峡水库蓄水的关系,

图4 长江口水下地形-累积面积曲线。计算区范围图中黑色虚线框, 图中柱形图为代表性水深线以浅面积相对于2002年的变化量

Figure 4 Curves showing the area changed with bathymetry in different years. See the black dashed polygon in Fig 4 for the calculating area. The column diagrams show the changed area above given bathymetry of different years relative to 2002

我们根据研究区泥沙容重(1.4 t/m^3)^[21]将相邻年份间泥沙增加和减少的体积折算为泥沙重量,并与三峡水库年出库输沙量和长江大通站年输沙量进行了对比. 计算和对比结果如图5所示.

显然,从三峡蓄水前的2002年至三峡蓄水后的2007年,长江口地区总体呈淤积态势,淤积泥沙8.32亿t(图5),这与前述研究区垂向冲淤速率的分布特征一致,也与过去30年来研究区总体向海淤积的特征吻合^[22]. 与此同时,三峡水库出库输沙量和大通站年输沙量均发生了一定程度的减少(分别减少1.77和1.37亿t),且以三峡水库出库输沙量减少更为显著(图5),说明2003年三峡水库首次蓄水后,三峡下游流域气候^[23]、人类活动^[8,24]和新构造活动^[25,26]以及苏北沿岸流相对增强^[27]导致的泥沙侵蚀^[28,29]在一定程度上弥补了长江口泥沙来源的不足^[8,9],从而降低了三峡水库蓄水对长江口水下地形演变的影响.

然而,2007年及其后期的变化显示了不同的特征,即随着三峡水库出库输沙量和大通站年输沙量的逐渐减少,长江口淤积泥沙也呈现不断减少的趋势,以2013年泥沙减少最为显著,相对2002年减少泥沙在10亿t以上(图5),揭示了2007年后长江口地区海床侵蚀不断发展并加剧的特征,这与长江口地区侵蚀区范围不断增大的特征一致,也说明三峡水库下游长江泥沙的侵蚀补给已不能保持长江口地区的持续淤涨^[12,28]. 此外,和长江口冲淤量相比,2007年大通站年输沙量明显小得多,如长江口2007年相对

2002年的淤积量为8.32亿t,而大通站年输沙量仅为1.38亿t(图5),说明三峡水库蓄水后,长江口80%以上(大于6.9亿t)泥沙来源于其他途径,而非长江携带的泥沙. 由于长江泥沙近30%沿浙江和福建沿岸向南输运^[30],而且近年研究区水下地形演变格局显示口外侵蚀加剧的特征,因此,长江口外和苏北海岸带地区^[31]成为三峡蓄水后研究区最重要的物源区. 然而,长江口冲淤量和大通站输沙量差值随时间的逐渐减小(图5,2009和2011年分别减至6.10和4.81亿t),说明口外泥沙作为源区的贡献正趋于减弱. 三峡水库的进一步蓄水拦沙、苏北海岸带近年大规模的围垦造地^[32]和长江口外泥沙补给的不足,成为2013年研究区海床侵蚀进一步加剧的重要原因.

尽管现有数据显示,2007年研究区发生由淤积主导向侵蚀主导的转变,但2007年后利用数据年份的增加和研究区侵蚀作用的不断加剧说明这次转变发生的时间更可能在2002~2007年,而2002~2007年的总体淤积特征是该时间节点前期大幅淤积和后期小幅侵蚀的结果. 长江口泥沙冲淤曲线与大通站年输沙量及三峡水库年出库输沙量曲线分别交叉于 ± 2.5 和 ± 1.9 亿t(图5),说明大通站和三峡水库年输沙量分别在 ± 2.5 和 ± 1.9 亿t时,长江口地区发生由淤积主导向侵蚀主导的转变,前者与长江口门研究区地形对比与大通站输沙量关系研究获得的 ± 2.7 亿t^[6]一致.

为了进一步识别长江口侵蚀加剧的特征与三峡蓄水的关系,我们尝试将2007年后长江口泥沙冲淤

图5 不同年份的泥沙重量变化. 大通站年输沙量和三峡水库年出库输沙量数据来源文献[1], 其中, 2002年三峡水库年出库输沙量数据利用距离三峡水库最近(约20 km)的宜昌站数据, 2002年后利用三峡水库出库控制站黄陵庙站数据

Figure 5 Sediment weight changes of different years in the Yangtze River estuary, the Datong station and the Three Gorges Dam, data of the Datong station and Three Gorges Dam from Ref. [1]

量与长江三峡水库和大通站年输沙量进行对比。因受到2013年三峡水库和大通站输沙量数据缺失的限制,对比年份仅选择2007, 2009和2011年3个年份。尽管选择年份较少,但对比结果显示了惊人的一致性,三峡水库年出库输沙量和大通站年输沙量均与长江口相对2002年的冲淤量呈极好的线性正相关性,其判定系数均在0.99以上(图6)。这至少说明,在对比的2007~2011年,三峡水库蓄水对长江口冲淤格局的影响是控制性的,而流域内水土保持和采砂等其他人类活动^[33]影响相对较小,上海近岸海域工程建设^[15,24,34]的影响也仅限于研究区范围的内部调整。尽管流域气候条件(如降雨量)对长江输沙量的影响显著^[35],认为其对长江口冲淤格局的影响是通过调节三峡蓄水量和长江输沙量实现的,在指示长江口冲淤特征上不具直接意义,在本文中不作讨论。因为统计年份较少,数据巧合可能导致统计结果呈一定相关性,但难以解释这种高度一致性。推测存在一个由三峡水库主导的长江口外泥沙输入的反馈机制,即三峡拦沙到一定程度后,长江口外补充输入长江口的泥沙通量受到三峡水库出库输沙量的控制,随着三峡出库泥沙的减少,长江口外泥沙按比例补充输入长江口。由于缺乏长江口外更大范围的水深监测数据支持,其内在机理和过程尚难以解释。

该线性正相关性预示着随着三峡水库的持续蓄水和下泄泥沙量的减少^[36],同时伴随着海平面的持续上升^[37~39],长江口的海床侵蚀在未来数十年内将进一步加剧,对上海地区的后备土地资源开发利用

和城市安全构成不利影响。

大通站和三峡水库年输沙量的差值,代表了三峡水库和大通站之间长江流域的泥沙补给,其从2007~2011年由0.87亿t向0.65亿t的逐渐减少(图6),说明三峡水库下游至大通站之间泥沙侵蚀补给呈不断减少趋势。这种趋势除了受到该段流域内侵蚀泥沙来源减少^[40~42]的影响,其线性特征更可能指示与三峡水库出库输沙量减少后导致长江中下游河床侵蚀程度受到限制有关。这种趋势的持续发展,将进一步导致长江口海床侵蚀的加剧,并可能持续到下一个世纪^[8,40]。

3 结论

(1) 长江口近年水下地形演变特征为:以-6.4 m水深线为界,呈“近岸淤积,远岸侵蚀”的特征,但2013年受到三峡水库进一步蓄水拦沙和长江口外及苏北海岸带泥沙补充不足的共同影响,海床侵蚀进一步加剧,该界线发生显著向岸迁移。-19 m水深线以浅面积在不同年份的变化幅度非常小,代表了研究区水动力条件影响的边界线,可作为研究区水下地形监测的参考界线。

(2) 三峡水库蓄水初期(2007年前),由于长江中下游、长江口外和苏北海岸带泥沙的补给,三峡蓄水对长江口冲淤变化的影响并不显著。但2007年后长江口的冲淤变化与三峡水库蓄水相关性明显,尤其是2007~2011年间,长江口冲淤量与三峡水库和大通站年输沙量呈极好的正相关性,判定系数在0.99以

图6 长江口相对2002年淤积泥沙重量与大通站年输沙量及三峡水库年出库输沙量对比

Figure 6 Sediment weight of the Yangtze River estuary relative to 2002 correlated with Datong station and Three Gorges Dam

上,说明期间三峡蓄水对长江口区域演化具有控制性作用.

(3) 三峡水库和大通站年输沙量分别降至 ± 1.9 和 ± 2.5 亿t时,长江口地区发生由淤积主导向侵蚀主导的转变.这种转变发生在2002~2007年间,2007年后

长江口海床侵蚀不断发展,到2013年明显加剧,侵蚀区面积达到70%以上.相对2002年,2013年的泥沙减少量达10亿t以上.随着三峡水库的持续蓄水和下泄泥沙量的减少,长江口的海床侵蚀在未来数十年内将进一步加剧.

致谢 上海市地质调查研究院地质环境监测站全体人员为获取外业数据付出了艰辛努力,审稿专家为本文修改提供了诸多建设性意见,在此一并致谢.

参考文献

- 1 Changjiang Water Resources Commission (CWRC) (in Chinese). Changjiang Sediment Bulletin, 2002–2012 [水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报, 2002–2012]
- 2 Hori K, Saito Y, Zhao Q, et al. Sedimentary facies and Holocene progradation rates of the Changjiang (Yangtze) delta, China. *Geomorphology*, 2001, 41: 233–248
- 3 Li C, Wang P, Sun H, et al. Late Quaternary incised-valley of the Yangtze Delta (China): Its stratigraphic framework and evolution. *Sediment Geol*, 2002, 152: 133–158
- 4 Wang Z, Xu H, Zhan Q, et al. Lithological and palynological evidence of late Quaternary depositional environments in the subaqueous Yangtze delta, China. *Quat Res*, 2010, 73: 550–562
- 5 Hori K, Saito Y, Zhao Q, et al. Architecture and evolution of the tide-dominated Changjiang (Yangtze) River delta, China. *Sediment Geol*, 2002, 146: 249–264
- 6 Yang S L, Milliman J D, Li P, et al. 50000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta. *Glob Planet Change*, 2011, 75: 14–20
- 7 Chen J Y, Zhu H F, Dong Y F, et al. Development of the Changjiang Estuary and its submerged delta. *Cont Shelf Res*, 1985, 4: 47–56
- 8 Yang S L, Milliman J D, Xu K H, et al. Downstream sedimentary and geomorphic impacts of the Three Gorges Dam on the Yangtze River. *Earth-Sci Rev*, 2014, 138: 469–486
- 9 Li P, Yang S L, Milliman J D, et al. Spatial, temporal, and human-induced variations in suspended sediment concentration in the surface waters of the Yangtze estuary and adjacent coastal areas. *Estuar Coast*, 2012, 35: 1316–1327
- 10 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
- 11 Jiang C J, Li J F, deSwart H E. Effects of navigational works on morphological changes in the bar area of the Yangtze Estuary. *Geomorphology*, 2012, 139–140: 205–219
- 12 Dai S B, Lu X X. Sediment load change in the Yangtze River (Changjiang): A review. *Geomorphology*, 2013, 215: 60–73
- 13 Dai Z, Liu J T, Fu G, et al. A thirteen-year record of bathymetric changes in the North Passage, Changjiang (Yangtze) estuary. *Geomorphology*, 2013, 187: 101–107
- 14 Wang Y, Dong P, Oguchi T, et al. Long-term (1842–2006) morphological change and equilibrium state of the Changjiang (Yangtze) Estuary, China. *Cont Shelf Res*, 2013, 56: 71–81
- 15 Wang Y, Shen J, He Q. A numerical model study of the transport time scale and change of estuarine circulation due to waterway constructions in the Changjiang Estuary, China. *J Marine Syst*, 2010, 82: 154–170
- 16 Ministry of Transport of P R China. Specification for water transport engineering surveying (JTS131-2002) (in Chinese). 2002, 1–69 [交通运输部. 水运工程测量规范(JTS131-2002). 2002, 1–69]
- 17 Javier B P, Jose L H S. Comparing the performance of two spatial interpolation methods for creating a digital bathymetric model of the Yucatan submerged platform. *Panam JAS*, 2007, 2: 247–254
- 18 Rosati J D, Dean R G, Stone G W. A cross-shore model of barrier island migration over a compressible substrate. *Mar Geol*, 2010, 271: 1–16
- 19 Meng Y, Cheng J. The atrophy of the estuarine North Branch of the Yangtze River (Changjiang River) (in Chinese). *Mar Geol Lett*, 2005, 21: 1–10 [孟翊, 程江. 长江口北支入海河段的衰退机制. 海洋地质动态, 2005, 21: 1–10]

- 20 Xie D, Gao S, Wang Z, et al. Numerical modeling of tidal currents, sediment transport and morphological evolution in Hangzhou Bay, China. *Int J Sediment Res*, 2013, 28: 316–328
- 21 Yun C X. Recent evolution of the Yangtze River estuary (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 2004. 290 [恽才兴. 长江河口近期演变基本规律. 北京: 海洋出版社, 2004. 290]
- 22 Li B. Underwater topography evolution and its driving mechanisms over the past nearly 30 years in Shanghai offshore area (in Chinese). *Shanghai Geol*, 2010, 29–34 [黎兵. 上海近岸海域近30年来的地形演变和机制探讨. 上海地质, 2010, 29–34]
- 23 Guo J, Guo S, Li Y, et al. Spatial and temporal variation of extreme precipitation indices in the Yangtze River basin, China. *Stoch Env Res Risk A*, 2013, 27: 459–475
- 24 Walling D E. Human impact on land ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology*, 2006, 79: 192–216
- 25 Milliman J D, Syvitski J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers. *J Geol*, 1992, 100: 525–544
- 26 Milliman J D. Fluvial sediment discharge to the sea and the importance of regional tectonics. *Tectonic Uplift Clim Change*, 1997, 239–257
- 27 Shen F, Zhou Y X, Li J F, et al. Remotely sensed variability of the suspended sediment concentration and its response to decreased river discharge in the Yangtze estuary and adjacent coast. *Cont Shelf Res*, 2013, 69: 52–61
- 28 Chen Z Y, Zhao Y W. Impact on the Yangtze (Changjiang) estuary from its drainage basin: Sediment load and discharge. *Chin Sci Bull*, 2001, 46(Suppl): 73–80
- 29 Chu Z X, Zhai S K. Yangtze River sediment: In response to Three Gorges Reservoir water impoundment in June 2003. *J Coastal Res*, 2008, 24: 30–39
- 30 Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea. *Geomorphology*, 2007, 85: 208–224
- 31 Liu J, Saito Y, Kong X, et al. Sedimentary record of environmental evolution off the Yangtze River estuary, East China Sea, during the last ~13000 years, with special reference to the influence of the Yellow River on the Yangtze River delta during the last 600 years. *Quat Sci Rev*, 2010, 29: 2424–2438
- 32 Wu D L, Shen Y M, Fang R J. A morphological analysis of tidal creek network patterns on the central Jiangsu coast (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2013, 68: 955–965 [吴德力, 沈永明, 方仁建. 江苏中部海岸潮沟的形态变化特征. 地理学报, 2013, 68: 955–965]
- 33 Chu Z X, Zhai S K, Lu X X, et al. A quantitative assessment of human impacts on decrease in sediment flux from major Chinese rivers entering the western Pacific Ocean. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L19603
- 34 Liu J, Chen J Y, Xu Z Y. River-bed evolution in the braided reach of the south and north passage after implementing Yangtze Estuary deep water navigational improvements. *Adv Water Sci*, 2008, 19: 605–612
- 35 Dai Z J, Chu A, Stive M, et al. Is the Three Gorges Dam the cause behind the extremely low suspended sediment discharge into the Yangtze (Changjiang) Estuary of 2006? *Hydrolog Sci J*, 2011, 56: 1280–1288
- 36 Luo X X, Yang S L, Zhang J. The impact of the Three Gorges Dam on the downstream distribution and texture of sediments along the middle and lower Yangtze River (Changjiang) and its estuary, and subsequent sediment dispersal in the East China Sea. *Geomorphology*, 2012, 179: 126–140
- 37 Blum M D, Roberts H H. Drowning of the Mississippi Delta due to insufficient sediment supply and global sea-level rise. *Nat Geosci*, 2009, 2: 488–491
- 38 Tian B, Zhang L, Wang X, et al. Forecasting the effects of sea-level rise at Chongming Dongtan Nature Reserve in the Yangtze Delta, Shanghai, China. *Ecol Eng*, 2010, 36: 1383–1388
- 39 Wang Y, Ding Y J, Ye B S, et al. Contributions of climate and human activities to changes in runoff of the Yellow and Yangtze rivers from 1950 to 2008. *Sci China Earth Sci*, 2013, 56: 1398–1412
- 40 Yang S L, Zhang J, Xu X J. Influence of the Three Gorges Dam on downstream delivery of sediment and its environmental implications, Yangtze River. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L10401
- 41 Chen X Q, Yan Y, Fu R S, et al. Sediment transport from the Yangtze River, China, into the sea over the post-Three Gorge Dam period: a discussion. *Quat Int*, 2008, 186: 55–64
- 42 Hu B Q, Yang Z S, Wang H J, et al. Sedimentation in the Three Gorges Dam and the future trend of Changjiang (Yangtze River) sediment flux to the sea. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2009, 13: 2253–2264

Impacts of the Three Gorges Dam on the bathymetric evolution of the Yangtze River Estuary

LI Bing, YAN XueXin, HE ZhongFa, CHEN Yong & ZHANG JinHua

Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China

The Three Gorges Dam (TGD) is the largest hydraulic engineering structure in the world. Its downstream impacts, especially on the Yangtze River Estuary, have attracted worldwide attention since its impoundment in 2003. A lack of high-accuracy bathymetric data that completely accounts for the Yangtze River Estuary makes it difficult to reliably document the influence of the TGD to any degree of detail. In this study, high quality bathymetric data, covering the Yangtze River Estuary from 2002 (pre-TGD) until 2013, were analyzed to delineate the bathymetric evolution of the Yangtze River Estuary during the post-TGD period and the effects of the TGD impoundment. After the completion of the TGD, deposition occurred in the Yangtze River Estuary in the inshore area from a depth of 6.4 m below the lowest tide, whereas there was significant erosion in the area below that water depth that intensified severely until 2013. In the area below the -19 m isobath, the bathymetry changed little, indicating a weak influence from the force of local water, so the -19 m water depth contour was proposed as a reference boundary for local bathymetric monitoring. The study area gradually changed from being deposition-dominated to being erosion-dominated between 2002 and 2007, and the erosion intensified with time after 2007. The amount of sediment eroded from 2002 to 2013 was more than 10×10^8 t. The trend in the local sediment flux from 2007 to 2011 relative to that in 2002 was correlated closely with the suspended sediment discharge from the TGD and the Datong gauging station, located 600 km from the Yangtze River Estuary, with a correlation coefficient greater than 0.99. This indicates that the TGD impoundment was the main mechanism that controlled the evolution of the Yangtze River Estuary after 2007. The intensified erosion in 2013 also in part reflects the insufficient sediment supply from the outer Yangtze River Estuary and the North Jiangsu coastal ocean.

Three Gorges Dam, impoundment, the Yangtze River estuary, coastal ocean, bathymetry

doi: 10.1360/N972014-01074