长江入海泥沙锐减下河口最大无人沙岛的持续淤涨

张晓东^{1*}, 谢睿¹, 范代读², 杨作升¹, 王宏敏¹, 吴闯¹, 姚雨涵¹

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. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

* 通讯作者, E-mail: zxd@ouc.edu.cn

收稿日期: 2020-10-25; 收修改稿日期: 2021-01-21; 接受日期: 2021-02-22; 网络版发表日期: 2021-08-16

国家自然科学基金项目(批准号: 41776052)和山东省自然科学基金项目(编号: ZR2019MD037)资助

摘要 长江三角洲的演变不仅受海平面快速上升和长江入海泥沙锐减等因素的影响, 还关系我国经济发展龙头“上海市”和重大国家战略“长江经济带”的可持续发展, 研究意义重大. 本文基于1974~2020年间的497幅卫星图像, 综合利用瞬时水边线位置和高、低潮出露面积等指标详查长江河口最大无人沙岛——九段沙岛近50年来在高度、位置和面积等方面的变化, 并通过与长江河口其他沙体面积变化的对比, 探讨其成长规律、影响因素和发展趋势. 结果表明, 尽管近几十年来长江入海泥沙锐减, 但由于长江口最大浑浊带的存在、长江入海泥沙粗化、口外泥沙补给、九段沙岛近似圆锥体的地貌形态以及植被的促淤作用等原因, 九段沙岛的面积仍然保持了快速甚至加速的增长. 九段沙岛低潮出露面积的增长速率从1974~1990年的 $1.9\text{km}^2\text{a}^{-1}$ 增加到了1990~2020年的 $3.0\text{km}^2\text{a}^{-1}$, 高潮出露面积的增长速率在1994~2020年高达 $3.7\text{km}^2\text{a}^{-1}$. 北槽深水航道治理工程显著影响了九段沙岛的演变, 使得上沙和中下沙沙头由原来的快速后退转变为快速淤进, 并促进了江亚南沙和中下沙尾部潮滩的发育; 但是, 其对九段沙岛低潮面积的增长产生了不利的影响.

关键词 三角洲演变, 长江河口, 九段沙岛, 沙坝和沙岛, 卫星图像

1 引言

在当前海平面持续上升、三角洲快速沉降以及河流入海泥沙锐减等不利因素的影响下, 全球三角洲普遍发生侵蚀和衰退, 对三角洲本身及其生态环境构成巨大威胁(Syvitski等, 2009; Tessler等, 2015; van de Giesen, 2020; Nienhuis等, 2020). 三角洲的演变, 特别

是河流入海泥沙锐减的大河三角洲的演变备受关注(Stanley和Warne, 1993; Blum和Roberts, 2009; Anthony, 2015; Smajgl等, 2015; Zhang等, 2018a, 2020, 2021; Chen等, 2020; Liu等, 2021).

长江三角洲是我国经济最发达的地区; 紧邻长江口的上海市是人口密集的国际化大都市, 也是我国经济发展的龙头. 20世纪70年代以来, 快速淤进的长江

中文引用格式: 张晓东, 谢睿, 范代读, 杨作升, 王宏敏, 吴闯, 姚雨涵. 2021. 长江入海泥沙锐减下河口最大无人沙岛的持续淤涨. 中国科学: 地球科学, 51(11): 1990–2000, doi: [10.1360/SSTe-2020-0298](https://doi.org/10.1360/SSTe-2020-0298)

英文引用格式: Zhang X, Xie R, Fan D, Yang Z, Wang H, Wu C, Yao Y. 2021. Sustained growth of the largest uninhabited alluvial island in the Changjiang Estuary under the drastic reduction of river discharged sediment. Science China Earth Sciences, 64(10): 1687–1697, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9746-3>

三角洲馈赠了上海市和江苏省约1000km²的新生陆地。大量新生陆地不仅缓解了上海日益紧张的土地供应, 还有重要的风暴潮防护和生态服务功能(Luan等, 2016; Fan等, 2017)。长江是我国的黄金水道, 贯穿我国人口和产业最密集地区。长江口襟江通海, 是连接国际和内陆、海运和江运的交汇点和中继站。但是, 长江河口沙坝和沙岛冲淤多变、动态性极强, 直接影响长江口河势和航道稳定(陈吉余等, 1979; 杨世伦等, 1998; 李九发等, 2006; 余文畴和张志林, 2017; Zhang等, 2020), 进而影响长江经济带的持续发展。因此, 在当前形势下研究长江三角洲河口沙坝和沙岛的演变意义重大。

近几十年来, 长江径流量基本稳定, 但输沙量却经历了快速、阶梯式的下降(Yang等, 2006; Yang等, 2011; Yang等, 2018; Zhang等, 2018b; Wu等, 2020)。长江宜昌站和大通站的年均输沙量在2006~2019年的平均值分别为0.2和1.2亿吨, 仅为1953~1984年平均值的4%和25%(《长江泥沙公报》, 2000~2019)。国外学者通过对全球主要三角洲的综合对比, 把长江三角洲列为泥沙供给不足和极度危险的三角洲, 危险程度排第二位(Syvitski等, 2009; Tessler等, 2015)。国内学者定量评估了维持长江三角洲冲淤平衡的临界输沙量, 评估结果在1.84~3.95亿吨(Chen, 1998; Yang等, 2003; 李从先等, 2004; Gao等, 2011), 显著高于长江当前的输沙量(Fan等, 2017; Zhang等, 2018b)。但是, 最新研究表明, 目前长江三角洲发生侵蚀的部位主要是水下三角洲(Yang等, 2011, 2020; Dai等, 2014, 2018; Luan等, 2016; Zhu等, 2016; Luo等, 2017), 而与人类关系更为密切的陆上三角洲(包括潮间带和潮上带)仍在快速淤进; 陆上三角洲的淤进仅在崇明东滩有所减缓, 而在横沙东滩、南汇东滩、九段沙、北港北沙以及在整体上, 淤进反而加速(杜景龙等, 2007; Gao等, 2010; Chu等, 2013; Li等, 2014, 2016; Du等, 2016; Wei等, 2016, 2017; Fan等, 2017; Zhang等, 2018b, 2020)。

河口沙体是三角洲的骨架, 决定三角洲的形态; 长江河口沙体规模宏大, 是研究长江三角洲演变的关键(图1a; 李从先等, 1979)。长江河口早期形成的沙体年代久远, 其演变难以定量评估。九段沙在1954年开始独立成为沙洲, 是长江河口最年轻的尚无人居住的沙岛。研究九段沙的演变不仅有助于揭示河口沙坝和沙岛的演变规律, 还有助于理解河流入海泥沙锐减对长江三

角洲演变的影响, 具有重要的科学价值。

前人主要采用测深数据研究九段沙的演变。杨世伦等(1998)、李九发等(2006)和Gao等(2010)的研究揭示了九段沙沙头持续后退、沙尾持续淤涨, 并分析了其位置、形态和面积的变化特征。Li等(2016)、Wei等(2016)和程海峰等(2020)的最新研究进一步明确了九段沙的面积基本呈快速增长的趋势, 但其结果却存在明显差异。利用测深数据计算面积需要利用坡度进行数据转换, 但平缓的水下地形会显著放大测深数据的误差, 这可能是上述结果出现较大差异的原因。另外, 测深数据的时间间隔较长(以年计), 测深数据还局限在理论最低潮位面以下的海域, 不能用来研究潮间带和潮上带的演变。

也有研究者利用卫星图像通过提取植被线研究九段沙的演变(Li等, 2016; 袁爽, 2018)。在九段沙植被一般生长在高潮滩, 植被线约为高潮线, 利用卫星图像的研究补充了测深数据在空间范围上的不足。但上述研究采用的卫星图像数量较为有限, 平均每年0.4~0.5幅, 没有发挥卫星图像数量多的优点; 另外, 仅利用植被线也不能研究整个潮滩的演变。迄今为止, 基于卫星图像、全面和高分辨率的九段沙演变研究尚未见报道。与以往使用测深数据针对九段沙低潮线以下部分演变的研究不同, 本文使用1974~2020年间的497幅卫星图像, 研究九段沙低潮线以上部分的变化(为了明确与前人研究的区别, 本文将研究范围定义为“九段沙岛”), 并分析其成长规律以及对长江入海泥沙锐减和河口工程的响应。

2 研究区概况

长江河口两千年来的发育模式可概括为: 南岸边滩推展, 北岸沙岛并岸(陈吉余等, 1979)。根据长江河口拦门沙沙体的历史演变, 长江三角洲约7500年以来的演变可划分为红桥、黄桥、金沙、海门、崇明、长兴和九段沙等7个主要时期(图1a; 同济大学海洋地质系三角洲科研组, 1978; Fan等, 2017)。九段沙从1945年开始形成, 早期的九段沙与铜沙浅滩相连, 1954年长江发生特大洪水, 导致九段沙从铜沙浅滩脱离而成为独立沙洲(杨世伦等, 1998; 李九发等, 2006)。九段沙岛主要由江亚南沙、上沙、中沙和下沙组成, 其中中沙和下沙已经合并, 本文称为中下沙(图1b)。

图1 长江三角洲的历史演变和九段沙岛现状

(a) 长江三角洲海岸线和主要河口沙体的历史演变, 改自同济大学海洋地质系三角洲科研组(1978)和Fan等(2017); (b) 九段沙岛(包括江亚南沙、上沙和中下沙)、北槽深水航道治理工程以及14个研究剖面, 背景为2020年5月12日的Landsat卫星图像

为了更好地发挥长江黄金水道的作用, 在九段沙岛北侧兴建了北槽深水航道治理工程, 工程分三期实施, 建设时间分别为1998~2000、2002~2005和2006~2010年, 共兴建169km堤坝, 包括鱼嘴、南北导堤、南北丁坝群和南坝田挡沙堤等(图1b)。为了浦东机场驱鸟, 1997年在中下沙实施了种青引鸟工程, 共种植芦苇和互花米草 0.9km^2 (陈吉余等, 2001)。九段沙沉积物的中数粒径为 $3.0\sim 8.5\phi$, 和长江入海泥沙的中数粒径相当; 九段沙沉积物的分布呈环形特征, 顶部

盐沼带主要为较细的黏土质粉砂, 向外逐渐变粗, 至外围的光滩过渡为细沙(Yang, 1999)。长江口的潮汐以太阴主要半日分潮(M2)主控, 强度中等, 平均潮差2.67m, 最大潮差4.62m(恽才兴, 2004; 李身铎等, 2013)。

3 数据和方法

本文共使用497幅1974~2020年间长江口(条带号为118, 行编号为38)的Landsat卫星图像(图2和网络版

图2 本文使用的长江口Landsat卫星图像的拍摄时间和图像类型

附表S1, <http://earthcn.scichina.com>). MSS图像的分辨率为60m, 其余图像为30m. 卫星图像来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)和美国地质调查局(<https://glovis.usgs.gov/>), 图像下载的标准是云量小于50%. 图像合成采用标准假彩色方法, 近红外、红和绿波段分别映射为合成图像的红、绿和蓝色分量. 在合成图像上植被显示为红色, 光滩为红褐色, 水体为蓝色, 高浑浊度的海水为灰白色(图1b). 下载的卫星图像已进行了地理配准, 误差小于0.4像素(<https://glovis.usgs.gov/>), 但仍有部分图像偏差较大, 本文利用ERDAS软件对偏差较大的图像进行了配准. 图像配准的参考图像采用研究期间的平均图像, 地面控制点采用边缘较为清晰的人工建筑的角点和道路的交叉点, 校正误差控制在0.5像素之内. 对于受机载扫描行校正器(SLC)故障影响出现数据条带丢失的ETM+图像, 本文利用周边的正常数据对缺失数据进行了插值处理.

沙坝在低潮时出露、高潮时淹没, 沙岛则在低潮和高潮时都可见. 参照Zhang等(2020)的方法, 本文采用沙坝和沙岛在卫星图像上的可见性研究江亚南沙、上沙和中下沙的高度变化, 并确定其从沙坝地形转化为沙岛地形的时间. 沙坝可见和不可见时刻之间的分界线即为沙坝刚刚出露的时刻, 此时的水位即沙坝当时的最大高度(图3).

相对于其他海岸线指标, 如高潮线和植被线, 瞬时水边线一年四季在卫星图像上都比较明显, 利用瞬时水边线还可以得出高、平均和低潮线, 研究结果较为全面. 本文参照Zhang等(2018a, 2018b, 2019, 2020),

采用聚焦剖面的方法研究九段沙岛的演变. 聚焦剖面, 仅提取海岸线在研究剖面上的位置, 并进一步选取关键时段、特定潮位的卫星图像提取所有海岸线, 避免了在所有卫星图像上解译所有海岸线的繁重任务, 有利于大量卫星图像的处理. 本文共设置14条研究剖面, 分别以江亚南沙、上沙和中下沙在全部卫星图像的平均图像上的中心位置为起点, 向头(上游)、右、尾(下游)和左绘制4条剖面. 由于中下沙的尾部在后期显著展宽, 该处增设了两条剖面(图1b).

本文参照Zhang等(2018a, 2018b, 2019, 2020), 使用自编的海岸线位置识别软件(CASPRS)提取瞬时水边线在研究剖面上的位置. CASPRS可以方便地在不同图像和剖面之间切换, 并可对图像进行1~30倍的缩放. CASPRS利用边缘提取算法自动得出瞬时水边线在剖面上的位置. 对于受云、云影、浪花、高浊度水体以及传感器失效等影响识别错误的结果, 本文利用CASPRS通过人机交互进行更正或删除.

长江三角洲的高潮滩普遍较陡, 再加上高潮滩植被的影响, 导致瞬时水边线位置在高潮时的分布较为密集, 该现象在黄河三角洲也有发生. 但是, 和黄河三角洲的情况不同, 长江三角洲瞬时水边线位置在低潮时的分布也较为密集(Zhang等, 2018a, 2018b, 2019, 2020). 因此, 不同于通过水位校正计算高、低潮位线位置的方法(Zhang等, 2018a, 2019), 本文采用Zhang等(2018b, 2020)描绘瞬时水边线位置包络线的方法得出九段沙岛的高、低潮线位置. 长江三角洲瞬时水边线位置在低潮时的密集分布可能与宽阔的长江口以及丰

图3 江亚南沙、上沙和中下沙在卫星图像上的可见性
(a) 江亚南沙; (b) 上沙; (c) 中下沙. 水位数据源自潮汐模拟软件, 未考虑长期海平面上升的影响, 水位深度基准为平均海平面

沛的长江径流有关, 上述二者的共同作用使得长江口在低潮时的水位不会出现较大的波动, 进而导致瞬时水边线位置在低潮时的变化相对较小.

本文使用针对东亚海域进行了优化处理的潮汐模拟模式Nao.99b(Matsumoto等, 2000)计算上述卫星图像拍摄时刻的潮汐高度, 利用模拟潮汐高度初步筛选高、低潮时刻的卫星图像, 然后利用瞬时水边线位置精确选定高、低潮时刻的卫星图像, 选用高、低潮时无云的卫星图像描绘江亚南沙、上沙和中下沙的轮廓, 统计其面积, 并进一步计算其误差. 长江宜昌站和大通站的输沙量以及大通站的悬沙中数粒径数据来自长江水利委员会编写的《长江泥沙公报》.

4 结果

4.1 九段沙岛的高度变化

江亚南沙从1986年开始出露, 在一年内其最大高度从-2m快速增加到平均海平面附近(图3a). 上沙和中下沙形成较早, 在1974年其最大高度已达0.5m左右(图3b和3c). 上沙、中下沙和江亚南沙陆续在1991、1994和2007年从沙坝地形转化为沙岛地形, 其在转化为沙岛地形前都有一个高度快速增加的过程, 整个过程持续了3~5年, 增加幅度约为2m(图3).

4.2 九段沙岛的位置变化

九段沙岛的瞬时水边线位置呈分段式、线性变化特点(图4).

(1) 江亚南沙: 沙头在江亚南沙转化为沙岛地形之前快速淤进, 末期合并了一个小沙坝, 其后基本稳定. 右翼在深水航道南导堤建设前快速淤进, 其后淤进减缓. 尾部在南导堤建设前合并了两个小沙坝, 其后低潮线快速淤进, 潮滩显著展宽, 在江亚南沙转化为沙岛地形后基本稳定, 在2017年尾部出现一个小沙坝, 目前尚未完全合并. 左翼基本稳定, 早期微侵、后期微淤.

(2) 上沙: 沙头在南导堤建设前快速蚀退, 其后低潮线快速淤进至南导堤然后微侵, 高潮线在同期也快速淤进, 在2017年与低潮线汇合, 2004年后在南导堤北侧出现两个小沙坝. 右翼在上沙转化为沙岛地形前基本稳定, 潮滩有所展宽, 其后淤进, 在南导堤建设后低潮线稳定、高潮线淤进, 后来在南导堤北侧也出现一个小沙坝. 尾部在南导堤建设前合并了两个小沙坝, 其后逐渐侵蚀, 左翼微侵.

(3) 中下沙: 沙头在南导堤建设前快速蚀退, 其后低、高潮线相继淤进至南导堤然后保持缓慢淤进, 南导堤北侧也出现一个小沙坝. 右翼在南导堤建设前逐渐侵蚀, 经过一次沙嘴凸出和一次沙坝合并有所前进, 其后中速淤进. 在中下沙转化为沙岛地形前, 尾3剖面快速蚀退, 末期经历一次规模较大的沙嘴凸出过程. 在转化为沙岛地形后, 尾2持续快速淤进, 尾1低潮线的淤进有所减缓, 尾3低潮线的淤进在2004年后转化为侵蚀, 尾1~3高潮线则持续快速淤进. 左翼先蚀退, 后经过两次沙嘴凸出得以前进, 在中下沙转化为沙岛地形后先快速淤进, 然后稳定.

4.3 九段沙岛的高、低潮出露面积变化

九段沙岛的高、低潮出露面积存在一定的波动(图5), 该波动主要是因为描绘高、低潮线所用卫星图像拍摄时的水位与高、低潮位并不完全一致. 例如在1999~2000年由于缺乏潮位较低的卫星图像, 该时段的低潮出露面积偏小. 本文计算了高、低潮出露面积与图5所示拟合线之间的平均绝对误差(MAE). 江亚南沙、上沙、中下沙和九段沙岛的高潮出露面积的MAE分别为0.5、1.2、3.1和3.9 km², 江亚南沙、上沙、中下沙和九段沙岛的low潮出露面积的MAE分别为0.9、1.0、4.7和5.5 km². 面积误差与平均面积有较好的相关性, 相关系数达0.97, 拟合线的斜率为0.056, 表明相对误差为5.6%(网络版附图S1). 本文进一步评估了九段沙的高、低潮出露面积的置信区间(网络版附图S2), 其在95%置信度时分别为(±2)和(±4) km², 略小于理论最低潮面积的(±6) km². 另外, 九段沙的高、低潮出露面积与理论最低潮面积具有良好的相关关系, 相关系数分别为0.98和0.93(网络版附图S3).

尽管上述波动的存在, 九段沙岛的面积仍呈现明显的分段式、线性变化特点, 并主要呈增加趋势. 江亚南沙的高、低潮出露面积的增速分别为0.32和0.33 km² a⁻¹ (判定系数 R^2 分别为0.87和0.90). 上沙的高潮出露面积的增速稳定在0.64 km² a⁻¹ (R^2 为0.93), 其低潮出露面积的增速在1974~1990、1990~1999、1999~2008和2008~2020年分别为1.0、-0.75、1.1和-0.1 km² a⁻¹ (R^2 分别为0.89、0.88、0.76和0.18). 中下沙和九段沙岛的low潮出露面积的增速分别从1974~1990年的0.84和1.9 km² a⁻¹ (R^2 分别为0.53和0.82)增加到1990~2020年的2.3和3.0 km² a⁻¹ (R^2 分别为0.94和0.92). 中下沙和九段沙岛高潮出露面积的增速在1994~2020年间分别为3.1和3.7 km² a⁻¹ (R^2 分别为0.98和0.97). 九段沙岛高、低潮出露面积在2020年分别为(100±4)和(155±6) km².

4.4 九段沙岛和长江河口其他沙体面积变化的对比

九段沙岛形成后29年(1945~1974年)详细的面积变化由于缺乏卫星图像尚不明确. 本文使用北港北沙形成后27年(1991~2018年)的低潮出露面积(Zhang等, 2020)与九段沙岛的low潮出露面积进行对比, 发现二者在总体上具有较一致的增长趋势, 且在数据衔接处

(27~29a)的面积和增长速率都可对比(图6a). 本文选择九段沙岛在南导堤建设前以及北港北沙的低潮出露面积与成长历时进行回归分析, 结果显示存在几乎完全的二次函数拟合关系, R^2 达0.98. 而九段沙岛在南导堤建设后的面积则位于该拟合线延长线的下方(图6a).

本文进一步对比了九段沙和长江河口早期形成的其他拦门沙沙体的面积增长速率. 形成于70多年前的九段沙岛的面积增长速率(端点法, low潮出露面积)高达2.05 km² a⁻¹, 是形成于700年前的长兴的2倍, 200~2500a BP的崇明和海门的3倍, 2000~7500a BP的金沙、黄桥和红桥的4倍(图6b和6c).

5 讨论

5.1 九段沙岛在沙坝和沙岛时期的增长方式

在沙坝发育时期, 上沙和中下沙的沙头和沙尾快速后退, 导致其在纵向上收缩聚拢(图4), 这和北港北沙一致, 并应同样归因为潮流冲刷(Zhang等, 2020). 但是, 其面积并未因潮流冲刷而减小, 这可能是因为从沙头和沙尾侵蚀的泥沙被运移到沙坝两侧造成沙坝的横向扩展. 相反, 由于新生小沙坝不断并入, 上沙和中下沙的低潮出露面积不断增加(图5b和5c). 上沙low潮出露面积在1990~1999年间出现减小与其向中下沙的逐渐靠近有关. 中下沙的存在和发育壮大限制了上沙沙尾的发展空间, 但上沙沙头的后退却在继续, 结果造成上沙面积的减小. 与上沙和中下沙不同, 江亚南沙沙头在沙坝发育时期持续地快速淤进(图4), 这可能是因为江亚南沙是新近“切滩”形成(杨世伦等, 1998; 李九发等, 2006). 切滩后原边滩上游的低位泥沙在落潮流作用下向下运移并被抬高, 导致江亚南沙沙头持续淤进.

在江亚南沙、上沙和中下沙转化为沙岛地形前后不久, 北槽深水航道治理工程的鱼嘴和南导堤工程即告完成. 鱼嘴和南导堤的建造改变了九段沙岛原来近乎自然的演变过程, 导致上沙和中下沙沙头由原来的快速后退转变为快速淤进, 上沙沙头的淤进速率创纪录地达到1400 m a⁻¹ (图4); 上沙low潮出露面积的减小趋势也被逆转. 鱼嘴和南导堤的建造还分别诱发和促进了江亚南沙和中下沙沙尾潮滩的发育(图4). 在鱼嘴和南导堤建造后, 新出现的小沙坝主要位于鱼嘴和南导堤的北侧(图1和4), 这可能是因为鱼嘴和南导堤阻

图4 九段沙岛的瞬时水边线在14个研究剖面上的位置变化

指示南导堤的横实线的Y坐标为南导堤在剖面上距起点的距离, 虚线的X坐标为南导堤的建造时间; 高(低)潮线的淤进速率为负值时实为蚀退速率

隔了径流和落潮流携带泥沙进入九段沙岛附近海域。尽管严重受到北槽深水航道治理工程的影响, 九段沙岛在沙岛发育时期的变化仍呈现以下特点: (1) 岸线相对稳定, 低潮滩的淤涨主要发生在尾部; (2) 高潮滩的增长相对低潮滩显著滞后但增长速度略快。

5.2 影响九段沙岛演变的主要因素

长江河口主要拦门沙沙体面积增长的每一次加速与长江流域人口阶段性激增基本同步(图6c; 张迪祥, 2000; 国家统计局, www.stats.gov.cn/tjsj/), 这说明长江河口拦门沙沙体的加速增长与长江流域人类活动增强

有关。长江流域刀耕火种的农耕活动会减少流域的植被覆盖、增加流域的泥沙产出(陈吉余等, 1979), 人类为保卫家园而修筑河堤则有利于更多泥沙输送入海, 进而促进河口沙体的发育。

与农耕和修筑河堤的作用相反, 流域建坝和河沙开采等活动会导致入海泥沙减少, 不利于河口沙体的发育。近几十年来长江流域建造了5万多个水坝, 而且还在继续修建中(Yang等, 2011; Yang等, 2018)。主要受流域建坝的影响, 大通站现在的输沙量仅为早期的1/4。但长江当前入海泥沙主要来自河床侵蚀, 粒径较大(Dai等, 2018; Zhang等, 2020)。大通站悬沙中数粒径的

图 5 高、低潮出露面积变化

(a) 江亚南沙; (b) 上沙; (c) 中下沙; (d) 九段沙岛。(a)和(b)纵轴的比例尺是图(c)和(d)的5倍

平均值已从2000~2006年的 $8.9\mu\text{m}$ 增加到了2016~2019年的 $15.8\mu\text{m}$ 。大量较粗的床沙被运输至河口有利于河口沙体的增长。口外泥沙在长江喇叭形河口所形成的强劲涨潮流以及台风等引起的风暴潮的作用下向口内的运输也有利于河口沙体的增长(Yang, 1999; Yang等, 2019, 2020; Gao等, 2010; Luo等, 2017; Wang等, 2020; Zhang等, 2020)。另外, 九段沙地处长江河口最大浑浊带, 得益于底沙的再悬浮、口外泥沙的补给以及河口最大浑浊带独特的絮凝作用, 长江河口最大浑浊带的悬沙浓度未受流域建坝影响出现大幅减少(Li和Zhang, 1998; Dai等, 2014; 张晓鹤等, 2015), 这进一步保障了河口沙岛淤涨的泥沙来源。

九段沙岛低潮出露面积的加速增长还与其地貌形态有关。Zhang等(2020)的研究结果表明, 北港北沙类似圆锥体的地貌形态会导致其面积增长速率比高度增

图 6 低潮出露面积和沙体的面积变化以及沙体面积增长和长江流域人口增长对比

(a) 九段沙岛和北港北沙的低潮出露面积变化, 北港北沙的面积源自Zhang等(2020); (b) 九段沙岛和长江河口其他拦门沙沙体的面积变化, 后者数据源自同济大学海洋地质系三角洲科研组(1978); (c) 长江河口拦门沙沙体面积增长和长江流域人口增长对比(长江流域人口数据源自张迪祥(2000); 国家统计局, <http://www.stats.gov.cn/tjsj/>)

长速率高一个阶次。九段沙岛在南导堤建设前的低潮出露面积增长与北港北沙的加速增长趋势一致(图6a), 这说明九段沙岛的低潮出露面积增长同样符合上述规律。根据这一规律, 即使九段沙岛周边潮滩(主要是潮间带)的沉积速率有所下降, 九段沙岛低潮出露面积仍有可能维持加速增长。1997年引种互花米草对中下沙高潮滩的淤涨起到了促进作用, 这与互花米草较强的入侵能力和消浪固滩作用有直接关系(陈吉余等, 2001; 王卿等, 2006; 袁爽, 2018; Yang等, 2019)。

近十年来, 九段沙岛低潮面积加速增长的趋势不

复存在(图6a)。尽管不能排除长江入海泥沙锐减的影响,但鉴于长江河口最大浑浊带的悬沙浓度未出现大幅减少以及邻近的北港北沙仍在加速增长(Dai等, 2014; Zhang等, 2020),我们认为北槽深水航道治理工程对九段沙岛低潮面积的增长产生了不利的影响。鱼嘴和南导堤在阻滞涨潮流促进泥沙淤积的同时,还限制了径流和落潮流携带泥沙进入九段沙岛附近,不利于九段沙岛的增长。随着九段沙岛和南导堤之间水域逐渐淤积成陆,工程的促淤作用减弱、阻隔作用凸显。

5.3 九段沙岛未来的发展

当前的九段沙岛仍在快速淤涨,究竟何时其趋于稳定甚至转为侵蚀,目前尚没有明显的信号。鉴于当前长江中下游河道侵蚀贡献了约1/2的长江入海泥沙(Dai等, 2018),长江充沛的径流量以及中下游河道的侵蚀效率尚未见降低(Zhang等, 2020),我们预测,包括九段沙岛在内的长江河口沙坝和沙岛的淤涨仍将维持较长一段时间。但在更远的将来,在上述诸多不利因素的持续影响下,九段沙岛乃至整个长江三角洲的演变不容乐观(Gao等, 2011; Yang等, 2011; Dai等, 2018; Zhang等, 2020)。

河口沙坝和沙岛主要是河流输运的粗颗粒泥沙形成的,其演变对河流输沙变化较为敏感。河口沙坝和沙岛长大后能够塑造有利于细颗粒泥沙沉积的河口和海岸形态,促进其自身、周围潮滩以及三角洲的发育。我们建议加强对长江河口沙坝和沙岛演变的监测,尽早发现其趋于稳定或转为侵蚀的信号。

6 结论

本文基于497幅卫星图像,利用瞬时水边线位置和高、低潮出露面积等指标研究了九段沙岛近50年来的演变,总结了其演变规律,并分析了影响其演变的主要因素。大量卫星图像的使用克服了以往数据少、时间分辨率低的不足,研究结果更加详细可靠;多种指标的综合应用使得研究结果更加全面。

九段沙岛的最大高度呈阶段性快速增加的特点,瞬时水边线位置呈分段式、线性变化特点,高、低潮出露面积呈快速甚至加速增长的趋势。九段沙岛低潮出露面积的增长速率从1974~1990年的 $1.9\text{km}^2\text{a}^{-1}$ 增加到了1990~2020年的 $3.0\text{km}^2\text{a}^{-1}$,高潮出露面积的增长

速率在1994~2020年间高达 $3.7\text{km}^2\text{a}^{-1}$ 。

在沙坝发育时期,上沙和中下沙在纵向上收缩聚拢,但在横向上展宽,并通过合并小沙坝实现面积增长。进入沙岛发育时期,九段沙岛的位置相对稳定,其低潮滩的增长主要发生在江亚南沙和中下沙的尾部,而上沙尾部的低潮滩由于受到中下沙的限制基本不再增长。

在长江入海泥沙锐减的背景下,九段沙岛的快速甚至加速增长与长江口最大浑浊带、长江入海泥沙粗化、口外泥沙补给、九段沙岛近似圆锥体的地貌形态以及植被的促淤作用等有关。北槽深水航道治理工程显著影响了九段沙岛的演变,使得上沙和中下沙沙头由原来的快速后退转变为快速淤进,并促进了江亚南沙和中下沙尾部潮滩的发育;但是,其对九段沙岛低潮出露面积的增长产生了不利的影响。

我们预测长江河口沙坝和沙岛的淤涨仍将维持较长一段时间,这为长江三角洲的侵蚀防护带来了一个缓冲期。我们建议珍惜这一缓冲期,顺应河口沙坝和沙岛的演变规律,尽早规划以应对长江三角洲未来可能出现的侵蚀灾害。

致谢 感谢三位匿名评审专家的宝贵意见和建议。

参考文献

- 陈吉余, 恽才兴, 徐海根, 董永发. 1979. 两千年来长江河口发育的模式. 海洋学报: 中文版, 1: 103111
- 陈吉余, 李道季, 金文华. 2001. 浦东国际机场东移与九段沙生态工程. 中国工程科学, 3: 18
- 程海峰, 辛沛, 刘杰, 顾峰峰, 王巍, 韩露. 2020. 1959~2018年九段沙地貌演化特征及动力机制. 水科学进展, 31: 491~501
- 杜景龙, 姜俐平, 杨世伦. 2007. 长江口横沙东滩近30年来自然演变及工程影响的GIS分析. 海洋通报, 26: 43~48
- 李从先, 郭蕃民, 许世远, 王靖泰, 李萍. 1979. 全新世长江三角洲地区河口砂体的特征和分布. 海洋学报, 1: 252~268
- 李从先, 杨守业, 范代读, 赵娟. 2004. 三峡大坝建成后长江输沙量的减少及其对长江三角洲的影响. 第四纪研究, 24: 495~500
- 李九发, 万新宁, 应铭, 左书华, 付桂. 2006. 长江河口九段沙沙洲形成和演变过程研究. 泥沙研究, 6: 44~49
- 李身铎, 朱巧云, 虞志英. 2013. 长江口横沙浅滩及邻近海域水动力特征分析. 华东师范大学学报(自然科学版), 4: 25~41
- 同济大学海洋地质系三角洲科研组. 1978. 全新世长江三角洲的形成和发育. 科学通报, 23: 310~313
- 王卿, 安树青, 马志军, 赵斌, 陈家宽, 李博. 2006. 入侵植物互花米草

- 生物学、生态学及管理. 植物分类学报, 44: 559–588
- 杨世伦, 贺松林, 谢文辉. 1998. 长江口九段沙的形成演变及其与南北槽发育的关系. 海洋工程, 4: 56–66
- 余文畴, 张志林. 2017. 长江口河段近期演变特点与整治研究建议. 人民长江, 48: 1–5
- 袁爽. 2018. 近35年长江口潮滩演变遥感研究——以崇明东滩与九段沙为例. 硕士学位论文. 南昌: 江西理工大学. 1–58
- 恽才兴. 2004. 长江河口近期演变基本规律. 北京: 海洋出版社. 1–20
- 张迪祥. 2000. 春秋、战国时期以来长江流域人口活动对植被变迁的影响. 植物资源与环境学报, 9: 47–53
- 张晓鹤, 李九发, 朱文武, 程和琴. 2015. 近期长江河口冲淤演变过程研究. 海洋学报, 37: 134–143
- Anthony E J. 2015. Wave influence in the construction, shaping and destruction of river deltas: A review. *Mar Geol*, 361: 53–78
- Blum M D, Roberts H H. 2009. Drowning of the Mississippi Delta due to insufficient sediment supply and global sea-level rise. *Nat Geosci*, 2: 488–491
- Chen D, Li X, Saito Y, Liu J P, Duan Y, Liu S, Zhang L. 2020. Recent evolution of the Irrawaddy (Ayeyarwady) delta and the impacts of anthropogenic activities: A review and remote sensing survey. *Geomorphology*, 365: 107231
- Chen X. 1998. Changjiang (Yangtze) River Delta, China. *J Coast Res*, 14: 838–858
- Chu Z, Yang X, Feng X, Fan D, Li Y, Shen X, Miao A. 2013. Temporal and spatial changes in coastline movement of the Yangtze Delta during 1974–2010. *J Asian Earth Sci*, 66: 166–174
- Dai Z, Liu J T, Wei W, Chen J. 2014. Detection of the Three Gorges Dam influence on the Changjiang (Yangtze River) submerged delta. *Sci Rep*, 4: 6600
- Dai Z, Mei X, Darby S E, Lou Y, Li W. 2018. Fluvial sediment transfer in the Changjiang (Yangtze) river-estuary depositional system. *J Hydrol*, 566: 719–734
- Du J L, Yang S L, Feng H. 2016. Recent human impacts on the morphological evolution of the Yangtze River delta foreland: A review and new perspectives. *Estuar Coast Shelf Sci*, 181: 160–169
- Fan D, Wu Y, Zhang Y, Burr G, Huo M, Li J. 2017. South flank of the Yangtze Delta: Past, present, and future. *Mar Geol*, 392: 78–93
- Gao A, Yang S L, Li G, Li P, Chen S L. 2010. Long-term morphological evolution of a tidal island as affected by natural factors and human activities, the Yangtze estuary. *J Coast Res*, 261: 123–131
- Gao S, Wang Y P, Gao J. 2011. Sediment retention at the Changjiang sub-aqueous delta over a 57 year period, in response to catchment changes. *Estuar Coast Shelf Sci*, 95: 29–38
- Li J F, Zhang C. 1998. Sediment resuspension and implications for turbidity maximum in the Changjiang Estuary. *Mar Geol*, 148: 117–124
- Li X, Liu J P, Tian B. 2016. Evolution of the Jiuduansha wetland and the impact of navigation works in the Yangtze estuary, China. *Geomorphology*, 253: 328–339
- Li X, Zhou Y, Zhang L, Kuang R. 2014. Shoreline change of Chongming Dongtan and response to river sediment load: A remote sensing assessment. *J Hydrol*, 511: 432–442
- Liu Y L, Liu J Q, Xia X F, Bi H B, Huang H J, Ding R W, Zhao L H. 2021. Land subsidence of the Yellow River Delta in China driven by river sediment compaction. *Sci Total Environ*, 750: 142165
- Luan H L, Ding P X, Wang Z B, Ge J Z, Yang S L. 2016. Decadal morphological evolution of the Yangtze Estuary in response to river input changes and estuarine engineering projects. *Geomorphology*, 265: 12–23
- Luo X X, Yang S L, Wang R S, Zhang C Y, Li P. 2017. New evidence of Yangtze delta recession after closing of the Three Gorges Dam. *Sci Rep*, 7: 41735
- Matsumoto K, Takanezawa T, Ooe M. 2000. Ocean tide model developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimetry data into hydrodynamical model: A global and a regional model around Japan. *J Oceanogr*, 56: 567–581
- Nienhuis J H, Ashton A D, Edmonds D A, Hoitink A J F, Kettner A J, Rowland J C, Törnqvist T E. 2020. Global-scale human impact on delta morphology has led to net land area gain. *Nature*, 577: 514–518
- Smajgl A, Toan T Q, Nhan D K, Ward J, Trung N H, Tri L Q, Tri V P D, Vu P T. 2015. Responding to rising sea levels in the Mekong Delta. *Nat Clim Change*, 5: 167–174
- Stanley D J, Warne A G. 1993. Nile delta: Recent geological evolution and human impact. *Science*, 260: 628–634
- Syvitski J P M, Kettner A J, Overeem I, Hutton E W H, Hannon M T, Brakenridge G R, Day J, Vörösmarty C, Saito Y, Giosan L, Nicholls R J. 2009. Sinking deltas due to human activities. *Nat Geosci*, 2: 681–686
- van de Giesen N. 2020. Human activities have changed the shapes of river deltas. *Nature*, 577: 473–474
- Tessler Z D, Vörösmarty C J, Grossberg M, Gladkova I, Aizenman H, Syvitski J P M, Foufoula-Georgiou E. 2015. Profiling risk and sustainability in coastal deltas of the world. *Science*, 349: 638–643
- Wang J, Dai Z, Mei X, Fagherazzi S. 2020. Tropical cyclones significantly alleviate mega-deltaic erosion induced by high riverine flow. *Geophys Res Lett*, 47: e89065
- Wei W, Dai Z, Mei X, Liu J P, Gao S, Li S. 2017. Shoal morphodynamics of the Changjiang (Yangtze) estuary: Influences from river damming, estuarine hydraulic engineering and reclamation projects. *Mar Geol*, 386: 32–43

- Wei W, Mei X F, Dai Z J, Tang Z H. 2016. Recent morphodynamic evolution of the largest uninhibited island in the Yangtze (Changjiang) estuary during 1998–2014: Influence of the anthropogenic interference. *Cont Shelf Res*, 124: 83–94
- Wu Z, Zhao D, Syvitski J P M, Saito Y, Zhou J, Wang M. 2020. Anthropogenic impacts on the decreasing sediment loads of nine major rivers in China, 1954–2015. *Sci Total Environ*, 739: 139653
- Yang H F, Yang S L, Xu K H, Milliman J D, Wang H, Yang Z, Chen Z, Zhang C Y. 2018. Human impacts on sediment in the Yangtze River: A review and new perspectives. *Glob Planet Change*, 162: 8–17
- Yang S L, Belkin I M, Belkina A I, Zhao Q Y, Zhu J, Ding P X. 2003. Delta response to decline in sediment supply from the Yangtze River: Evidence of the recent four decades and expectations for the next half-century. *Estuar Coast Shelf Sci*, 57: 689–699
- Yang S L, Milliman J D, Li P, Xu K. 2011. 50,000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta. *Glob Planet Change*, 75: 14–20
- Yang S L. 1999. Sedimentation on a growing intertidal island in the Yangtze River mouth. *Estuar Coast Shelf Sci*, 49: 401–410
- Yang S L, Fan J Q, Shi B W, Bouma T J, Xu K H, Yang H F, Zhang S S, Zhu Q, Shi X F. 2019. Remote impacts of typhoons on the hydrodynamics, sediment transport and bed stability of an intertidal wetland in the Yangtze Delta. *J Hydrol*, 575: 755–766
- Yang S L, Luo X X, Temmerman S, Kirwan M, Bouma T, Xu K H, Zhang S S, Fan J Q, Shi B W, Yang H F, Wang Y P, Shi X F, Gao S. 2020. Role of delta-front erosion in sustaining salt marshes under sea-level rise and fluvial sediment decline. *Limnol Oceanogr*, 65: 1990–2009
- Yang Z, Wang H, Saito Y, Milliman J D, Xu K, Qiao S, Shi G. 2006. Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) river sediment discharge to the sea: The past 55 years and after the Three Gorges Dam. *Water Resour Res*, 42: W04407
- Zhang X D, Fan D D, Yang Z S, Xu S M, Chi W Q, Wang H M. 2020. Sustained growth of river-mouth bars in the vulnerable Changjiang Delta. *J Hydrol*, 590: 125450
- Zhang X D, Lu K, Yin P, Zhu L H. 2019. Current and future mudflat losses in the southern Huanghe Delta due to coastal hard structures and shoreline retreat. *Coast Eng*, 152: 103530
- Zhang X D, Lu Z Y, Jiang S H, Chi W Q, Zhu L H, Wang H M, Lv K, Wang B Y, Yang Z S. 2018a. The progradation and retrogradation of two newborn Huanghe (Yellow River) Delta lobes and its influencing factors. *Mar Geol*, 400: 38–48
- Zhang X D, Xu K H, Yang Z S, Tan X W, Wu C. 2021. Decreasing land growth and unique seasonal area fluctuations of two newborn Mississippi subdeltas. *Geomorphology*, 378: 107617
- Zhang X D, Zhang Y X, Zhu L H, Chi W Q, Yang Z S, Wang B Y, Lv K, Wang H M, Lu Z Y. 2018b. Spatial-temporal evolution of the eastern Nanhui mudflat in the Changjiang (Yangtze River) Estuary under intensified human activities. *Geomorphology*, 309: 38–50
- Zhu L, He Q, Shen J, Wang Y. 2016. The influence of human activities on morphodynamics and alteration of sediment source and sink in the Changjiang Estuary. *Geomorphology*, 273: 52–62

(责任编辑: 杨守业)