

陈勇,何中发,黎兵,等. 长江河口拦门沙河段滩涂演化特征及驱动机制[J]. 海洋学报,2015,37(9):95-105,doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.09.010

Chen Yong, He Zhongfa, Li Bing, et al. Evolution of tidal flat in the bar area of the Yangtze Estuary and their driving factors[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(9): 95-105, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2015.09.010

长江河口拦门沙河段滩涂演化特征及驱动机制

陈勇¹, 何中发¹, 黎兵¹, 杨丽君¹, 张金华¹

(1. 上海市地质调查研究院, 上海 200072)

摘要: 利用长江河口实测 1958—2013 年水下地形数据, 基于 ArcGIS 技术和 DSAS 软件分析了拦门沙河段滩涂演化特征, 在此基础上结合河口重大工程建设、流域来沙状态对滩涂资源的变化机制进行分析。研究结果表明: (1) 1958—2013 年, 长江河口滩涂资源总量略有下降, 但最近十年趋于稳定, 维持在 2 350 km² 左右。 (2) 长江河口潮滩—5 m 等深线以下已经出现侵蚀, 垂向侵蚀速率达 7.3 cm/a; (3) 近 10 多年流域来沙剧烈下降对潮下带 0~—5 m 区域的滩涂资源淤涨产生了显著负面影响, 而河口重大工程建设则是近年来 0 m 以上滩涂逆势增长的主要驱动因素。

关键词: 滩涂资源; 重大工程; 减沙; 长江河口; 上海

中图分类号: P748

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2015)09-0095-11

1 引言

长江流域输沙量居世界第四位, 径流年均携沙达 3.8×10^8 t (1950—2012 年), 约 50% 泥沙在河流与海洋动力相互作用下在长江河口地区沉积^[1-2], 所形成的滩涂成为上海重要的后备土地资源来源。近 2 000 年来, 上海市陆域约 2/3 的面积自长江入海泥沙塑造的滩涂圈围成陆而成^[3]。1949 年以来, 上海圈围滩涂面积超过 1 200 km², 为缓解上海土地资源压力发挥了重要作用。20 世纪 70 年代以来, 由于气候变化, 水土保持工程的实施, 特别是三峡大坝的修建^[4-5], 长江入海泥沙量锐减。在此形势下, 长江口未来地貌演化趋势如何? 是否会如尼罗河、科罗拉多河、密西西比河一样, 因河流泥沙减少而发生严重海岸侵蚀与湿地面积减少^[6-8] 成为当前研究的热点^[9-10]。已有研究表明, 长江水下三角洲前缘斜坡作为对流域来沙量减少响应最为敏感的区域, 近年已出现侵蚀的迹

象^[5, 11-13]。但对于—5 m 等深线以上水深较浅的拦门沙河段来讲, 作为上海重要的后备土地资源潜力区, 除受流域来沙量影响外, 还因受河口大型航道、圈围等工程的叠加作用, 演变规律更为复杂, 需要进一步深入分析。先前的研究成果多针对某一局部地区^[14-16], 由于潮上带地区因局部水动力条件, 受工程影响程度的差异, 局部地区无法从全貌上整体把握上海滩涂资源的演化动态与趋势。本文将利用 1958—2013 年水下地形数据, 对上海滩涂资源量变化、重点滩涂演变规律以及影响因素进行分析, 以为上海滩涂资源的规划与开发利用提供数据支撑。

2 研究区概况

长江河口是动力条件较复杂的分汊型中等强度潮汐河口, 河口发育巨大的拦门沙体, 拦门沙滩顶一般在—5~—6 m 水深(最低理论基面)。长江口外, —5 m 和—10 m 等深线之间为一水下平台, 坡度约为

收稿日期: 2014-06-19; 修订日期: 2015-01-16。

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(201211009)。

作者简介: 陈勇(1982—), 男, 湖北省松滋市人, 高级工程师, 主要从事海岸带地质资源与环境研究。E-mail: chenrongcugb@126.com

0.01%。-10 m 等深线之外为海底斜坡,坡度可达 0.07%,口外海域地形总的趋势呈西北高东南低。本文研究范围限定于上海市行政区界以东,30°35′~31°36′N 区域(图 1)。研究区内主要发育崇明北支边滩、

崇明南沿边滩、崇明东滩、北港北沙、横沙东滩、长江口南沿边滩、杭州湾北沿边滩、长江口江心沙洲等地区,其中崇明东滩、横沙东滩、九段沙以及南汇边滩分别为上海四大滩涂。

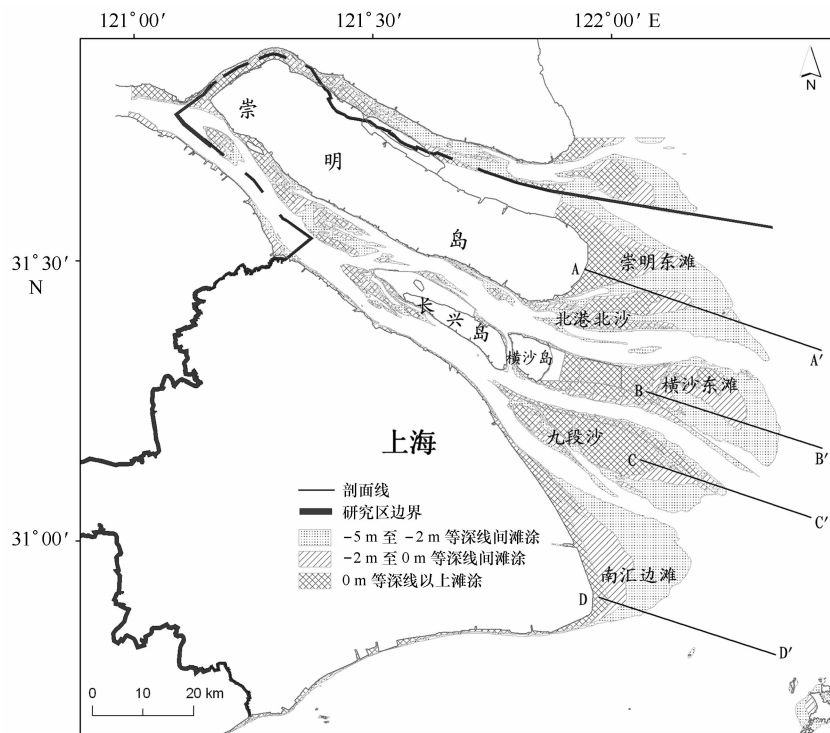


图 1 研究区范围

Fig. 1 Location of the study area

3 数据来源与技术方法

本文使用水下地形数据包括 1958、1983、1997、2002、2004、2006、2007、2009、2011、2013 年 10 个年份,时间跨度近 60 年。1958 与 1983 年数据通过数字化海图获得,比例尺 1:25 000~1:120 000;1997、2002、2004、2006、2007 年水下地形实测数据收集自上海海洋局,测线距离 1~2 km。2009、2011 与 2013 年数据为上海地质调查研究院单波速实测数据,测线间距 1~1.5 km,线上测点距离 5 m,测量精度±0.2 m。上海市沿海滩涂圈围面积数据来自上海市水务局。1951—2012 年,长江来沙资料采用大通站输沙数据,来源于水利部长江水利委员会,大通站是长江干流最下游的一个水文站,控制着 94% 的流域面积,在难以获得准确的大通以下河段资料的前提下,用大通站数据近似代表长江入海泥沙量。陆地卫星影像下载自 USGS/NASA (<http://earthexplorer.usgs.gov>),空

间分辨率为 30 m。

由于水下地形来源不一,测量比例尺也存在较大差异,为了尽可能保持数据统计的一致性,将所有的水下地形数据转换到统一的北京 54 坐标系,高斯克吕格投影和理论深度基面后,在 ArcGIS 10.1 软件的支持下,利用 Kriging 方法按 100 m×100 m 网格进行插值,利用插值后的 Grid 文件绘制等深线与剖面线。采用人工勾绘的方式对插值生成的等值线异常区域进行适当修正,并计算 0 m、-2 m、-5 m 等深线包络的面积。由于 1958 年与 1983 年数据采用矢量化海图的方式获取,数据点密度与其他年份实测数据存在一定的差距,但这两个年份时间跨度比较大,滩涂变化比较剧烈,矢量化的结果基本能反映其所处时代滩涂资源的差异。1997 年之后的数据采用同一套测量技术标准,能在一定程度上减少不同数据源导致的误差。在勾绘不同深度等深线时,由同一技术人员依照实测水深点对不同年份插值结果进行修正,避免插值

异常以及不同人员勾绘等深线导致的人为误差。

除 1958 年外,其他年份统计滩涂面积时,利用当年遥感影像圈定当年最新海堤,海堤内已成陆区域不参加统计。为了方便讨论横沙与九段沙的整体演化规律,包含了深水航道工程岛堤与丁坝内相应滩涂面积,九段沙面积不包含江亚南沙。利用美国地质调查局海岸线分析系统(Digital Shoreline Analysis System,DSAS)计算 10 m 等深线离设定基准线的移动距离,移动速率等反映等深线摆动特征参数^[17]。

4 结果

4.1 拦门沙河段滩涂资源分布特征

上海地区一般将“−5 m”线以上区域作为滩涂资源,根据 2013 年水下地形监测成果,2013 年上海拥有滩涂资源总量 2 339.3 km²(理论基面,下同),0 m、0~−2 m、−2~−5 m 等深线滩涂面积分别占总面积的 34.4%、29.5%与 36.1%(表 1)。其中崇明东滩、北港北沙、横沙东滩、九段沙与南汇边滩 5 个滩涂 0 m、0~−2 m、−2~−5 m 等深线滩涂面积之和分别为 613.2 km²、630.1 km² 和 911.1 km²,占全市沿海滩涂 0 m、0~−2 m、−2~−5 m 等深线滩涂面积比例分别为 76.2%、76.3%和 95.6%,1958 年该比例分别为 47.2%、73.2%与 73.8%,5 个滩涂所占的比例

大幅度提升,上海后备土地资源开发潜力将越来越依赖于这 5 个滩涂的演化发育趋势。

近 60 年来上海滩涂资源总量总体呈缓慢减少趋势,但近 10 年已趋于稳定。−5 m 等深线以上滩涂资源总量从 1958 年的 2 717.4 km² 下降到 2004 年的 2 434.2 km²,下降幅度约为 10%。2004—2013 年,滩涂资源总量变化幅度波动小于 3%,考虑到测量误差与不同年份测量季节的差异,这个变化量可视为基本保持稳定。同时,不同高程滩涂的变化差异显著:0 m 以上滩涂起伏波动幅度较大,经历了先缓慢减少后快速增加的过程。1958—2006 年呈较明显的下降趋势,下降幅度达 36.3%,年均减少 6.9 km²;2006—2013 年,开始迅速反弹,年均增加 32.1 km²,至 2013 年基本恢复到 20 世纪 80 年代水平。假如将围垦成陆面积计算在内,则 0 m 以上滩涂面积净增加约 1 100 km²。0~−2 m 等深线之间滩涂资源总体变化幅度较小,20 世纪基本呈缓慢增加趋势,本世纪基本保持稳定;与 1958 年相比,1997 年 0~−2 m 等深线之间滩涂资源增加了 159.3 km²,年均增加 4.1 km²,增加幅度为 27%;21 世纪初至今,中滩资源幅度微小。−2~−5 m 等深线之间面积呈较为明显的下降趋势,且减少速度逐渐加快;从 1958—2002 年,年均下降约为 2.1 km²,2002—2013 年年均下降高达 27.0 km²,后者约是前者的 13 倍。

表 1 上海不同年份海岸带不同高程滩涂面积统计(单位:km²)

Tab. 1 Changes of the area within 0 m, −2 m and −5 m isobaths along shore of Shanghai city(unit: km²)

	1958	1983	1997	2002	2004	2006	2007	2009	2011	2013
0 m 以上	910.6	807.8	873.9	724.6	680.5	579.8	640.1	707.3	818.3	804.3
0~−2 m	579.2	765.3	738.5	679.6	684.2	654.6	611.3	604.7	680.6	690.9
−2~−5 m	1 227.6	1 390.3	1 251.7	1 138.6	1 069.5	1 091.5	1 126.9	1 044.4	827.9	841.1
合计	2 717.4	2 963.4	2 864.1	2 542.9	2 434.2	2 325.8	2 378.3	2 356.3	2 371.8	2 336.3

4.2 典型滩涂的演变特征

(1)崇明东滩

崇明东滩位于长江口崇明岛的东端,是上海最大的一片滩涂资源。1958 年以来一直处于比较稳定的淤涨趋势。虽然经过 6 次大规模的围垦,海堤数次向海外移,20 世纪 60 年代以来累计圈围总面积高达 176.1 km²^[18],滩涂资源总量仍维持微弱增长态势。2002 年之前,因围垦因素的影响,滩涂资

源面积具有较大的突变性,出现剧烈的增、减波动。1958—2002 年,滩涂资源总量减少 35.1 km²。假若把围垦掉的面积计算在内,则 1958—2002 年滩涂增长率为 3.2 km²/a。2002 年之后,崇明东滩被设立为自然保护区,滩涂基本处于自然演变状态,滩涂资源总量以 5.9 km²/a 的速度增长,是 2002 年之前的 1.8 倍(见表 2)。

表 2 崇明东滩不同高程滩涂面积统计(单位:km²)Tab. 2 Changes of the area within 0 m, -2 m and -5 m isobaths in Chongming Eastern Beach(unit: km²)

	1958	1983	1997	2002	2004	2006	2007	2009	2011	2013
0 m 以上	84.2	227.1	156.0	105.7	129.4	125.8	124.3	137.5	144.8	138.1
0~-2 m	46.8	133.9	69.2	72.0	65.1	63.4	64.2	65.1	62.0	66.4
-2~-5 m	188.2	176.2	128.3	106.5	108.3	134.6	132.7	116.8	126.0	145.0
合计	319.3	537.1	353.5	284.2	302.8	323.8	321.2	319.3	332.8	349.5

同时,崇明东滩不同时期等深线如 0 m、-2 m、-5 m 等深线总体均向海淤进,并伴随东南方向偏转。不同等深线迁移的速率各有差异,0 m 等深线外移速度最快,1958-1983 年,向海最大迁移距离接近 6.5 km,年均 185 m/a;1983-2002 年,0 m 等深线东

进速率下降,约 96 m/a,2002-2013 年,扩展速率有所恢复,达到 354.1 m/a。1958-1983 年-2 m 等深线向东迁移最大速率为 512.5 m/a,但 1983 年以来东侧基本稳定。-5 m 等深线东北侧以及南侧等深线变化较为复杂,淤蚀相间。

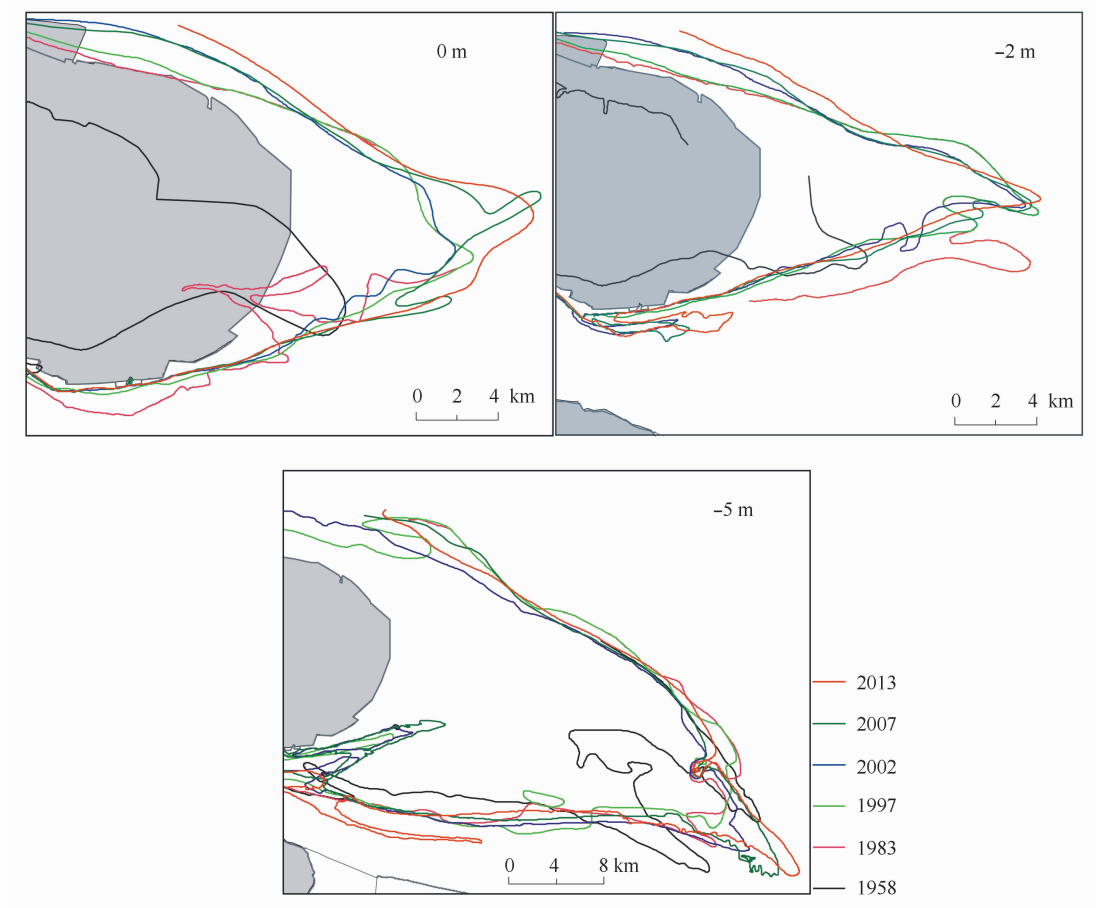


图 2 崇明东滩 0 m、-2 m、-5 m 等深线演化

Fig. 2 Evolution of the 0 m, -2 m and -5 m isobaths in Chongming Eastern Beach

(2)横沙东滩

横沙东滩滩涂资源总量 1958-1983 年经历较为明显的增长,1983 年以后出现较大波动(见表 3)。虽总体资源量差异不大,但不同高程滩涂资源量变化差异则非常显著。0 m 以上滩涂面积 1958-2002 年变

化较小,但 2002 年之后,面积快速增加,2002-2013 年年均增加 7.3 km²。由于 2007 年横沙岛东侧 15 km² 已成陆,2007 年以后不再作为滩涂统计,假如算上该部分面积,实际增长速度将更大。0~-2 m 等深线范围面积 1958-2002 年基本无变化,2002-

2013 年逐渐减小。-2~-5 m 等深线之间面积增长速度由 1958—1983 年的 $4.1 \text{ km}^2/\text{a}$ 下降到 1997—2006 年的 $-0.5 \text{ km}^2/\text{a}$, 2006—2013 年减少速度进一步加快, 达到 $-5.9 \text{ km}^2/\text{a}$ 。

表 3 横沙东滩不同高程滩涂面积统计(单位: km^2)

Tab. 3 Changes of the area within 0 m, -2 m and -5 m isobaths in Hengsha Eastern Shoal(unit: km^2)

	1958	1983	1997	2002	2004	2006	2007	2009	2011	2013
0 m 以上	72.1	56.4	67.2	51.3	113.4	104.4	113.1	111.8	148.4	131.8
0~-2 m	145.8	122.4	141.6	140.0	123.8	110.1	127.4	126.3	128.1	118.0
-2~-5 m	199.7	301.9	258.3	252.3	236.0	262.9	237.7	248.3	227.0	221.2
合计	417.6	480.6	467.0	443.6	473.2	477.4	478.2	486.4	503.5	471.0

从 0 m、-2 m、-5 m 等深线变化来看, 整体呈北冲南淤, 东部扩展的态势。1958 年 0 m 等深线分布零乱, 形态各异, 1958 年以来位置变化不定, 说明该水域的水流和波浪条件复杂。近年来, 呈现连片特征。-2 m 等深线以浅的地形反映北港与北槽之间涨落潮过滩水流比较明显, 洲滩及串沟的走向和排列呈 NW-SE 向。-2 m 等深线向东扩展呈现出间歇性特点, 1958—1983 年, -2 m 等深线东侧向西蚀退速率为 248 m/a , 1983—2007 年转变为淤进, 速率为 273 m/a , 而 2007—2013 年, 又转为微弱侵蚀, 侵蚀速率 216.6 m/a 。-5 m 等深线持续向东推进, 由 1958—1983 年的 104 m/a 增加到 1983—2013 年的 190 m/a , 推进速率有加快趋势, 并在科氏力作用下向南偏转, 东北侧近年出现一定程度的冲刷。

(3) 九段沙

九段沙自形成以来总体呈淤涨态势, 但增长速率呈逐渐下降趋势(表 4)。近几年来九段沙平面扩张

明显减慢, 低滩淤涨受到抑制, 中高滩淤涨速度加快。1958—1983 年、1983—1997 年、1997—2002 年 3 个时间段 -5 m 等深线包络面积增长速率分别为 $3.6 \text{ km}^2/\text{a}$ 、 $3.3 \text{ km}^2/\text{a}$ 以及 $2.6 \text{ km}^2/\text{a}$ 。2002 年之后增长基本停止。与总面积情况不同的是, 0 m 以上滩涂资源持续高速增长且增长速率显著加快, 2002 年以后年均增长 5.8 km^2 , 是 2002 年前的 3 倍。0~-2 m 等深线之间滩涂面积在 1983 年前保持高速增长, 但 1983 年之后面积逐渐减小, 1983—2013 年减小速率达 $1.96 \text{ km}^2/\text{a}$ 。-2~-5 m 滩涂面积有增有减, 总体小幅增长, 总体增长速率为 $0.44 \text{ km}^2/\text{a}$ 。

九段沙在上游和海域来沙的不断补充下, 在自然冲淤阶段, 沙尾不断向海延伸, 近 10 年来, 在北槽深水航道工程建设以及上游来沙锐减的大背景下, 九段沙沙尾东南方向出现一定程度的侵蚀后退, 而且尾部出现极不规则的凹凸形态。

表 4 九段沙不同高程滩涂面积统计(不包含江亚南沙面积)(单位: km^2)

Tab. 4 Changes of the area within 0 m, -2 m and -5 m isobaths in Jiuduansha Shoal(Jiangyanansha is not included)(unit: km^2)

	1958	1983	1997	2002	2004	2006	2007	2009	2011	2013
0 m 以上	38.1	72.6	117.3	128.2	158.1	152.9	167.6	163.9	190.7	192.6
0~-2 m	65.0	107.3	102.2	97.3	93.2	107.4	91.1	99.4	54.7	48.5
-2~-5 m	103.5	115.6	122.4	129.3	108.8	100.4	105.7	115.1	123.1	129.1
合计	206.7	295.5	341.9	354.8	360.1	360.7	364.4	378.4	368.5	370.2

(4) 南汇边滩

南汇边滩 1958—1997 年滩涂资源总量基本稳定在 600 km^2 左右, 1997 年之后, 由于大规模的人工圈围活动, 滩涂资源总量快速下降, 下降幅度超过 25% (见表 5)。考虑到 1958 年以来, 南汇东滩与南汇北滩

成陆面积约 220 km^2 , 实际滩涂面积保持小幅增长, 年均增长约 1.4 km^2 左右。0 m 以上滩涂资源经历了 1958—1983 年的增长期以及 1997—2002 年的稳定期, 2002 年之后, 由于多期次的高滩圈围, 以 $4.7 \text{ km}^2/\text{a}$ 的速度逐渐减少。0~-2 m 等深线之间滩涂

资源经过多个冲淤波动旋回,近年呈快速减少趋势。
—2~—5 m 等深线之间滩涂面积 1958—1983 年处于

增长阶段,年增长速率为 $1 \text{ km}^2/\text{a}$,1983 年之后则处于持续下降趋势,减少速率达 $2.14 \text{ km}^2/\text{a}$ 。

表 5 南汇边滩不同高程滩涂面积统计(不包含江亚南沙面积)(单位: km^2)

Tab. 5 Changes of the area above 0 m, -2 m and -5 m isobaths in Nanhui Tidal Flat(Jiangyanansha is not included)(unit: km^2)

	1958	1983	1997	2002	2004	2006	2007	2009	2011	2013
0 m 以上	204.8	167.9	199.3	147.7	41.4	38.5	44.7	60.5	84.0	85.0
0~-2 m	112.0	143.6	117.2	147.2	159.6	161.8	166.3	160.0	126.3	127.4
-2~-5 m	268.4	293.4	284.3	281.2	270.7	273.5	263.2	240.6	251.0	229.2
合计	585.2	604.9	600.7	576.1	471.7	473.8	474.2	461.1	461.3	441.6

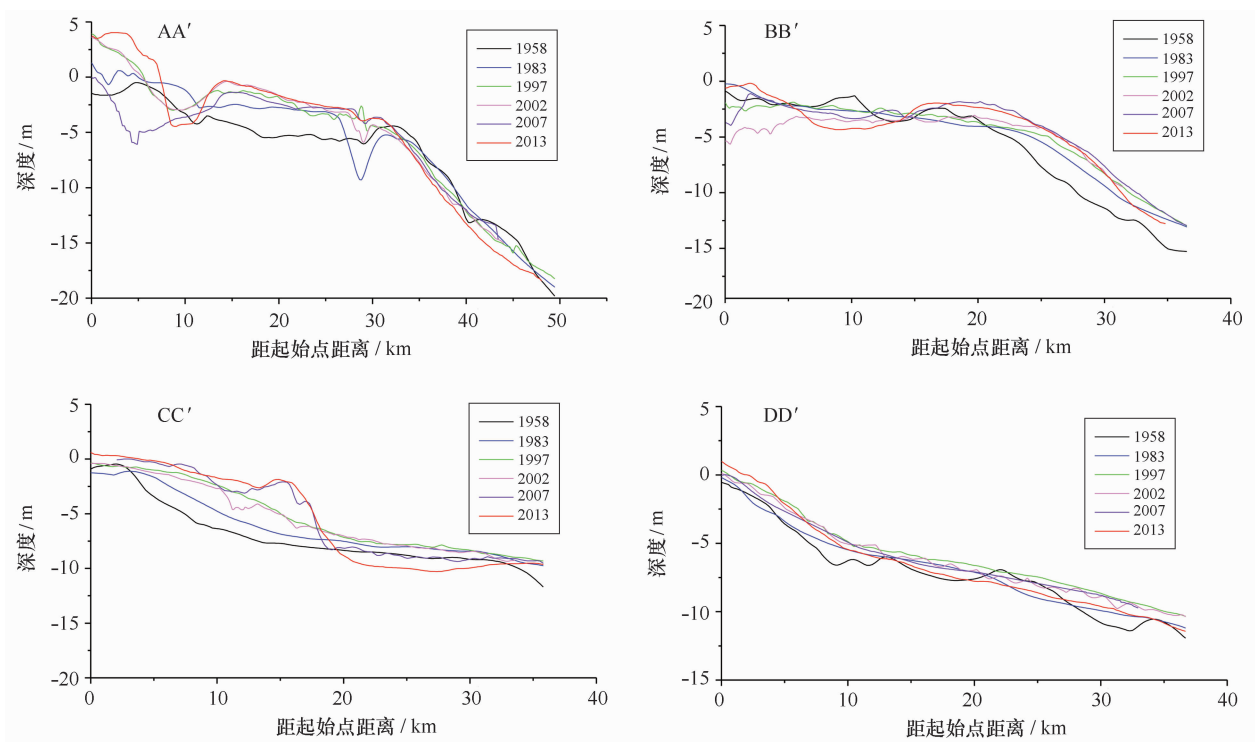


图 3 4 个典型断面水深变化(断面位置见图 1)

Fig. 3 Bathymetric profiles at 4 different cross sections (locations see Fig. 1)

1958 年南汇北滩 0 m 等深线持续淤涨,而东滩与南滩情况复杂,表现为 1958—1983 年东滩冲,南滩淤,1983—2002 年东滩淤,南滩冲。2002 年之后,岸线和 0 m 等深线变化完全失去了对岸滩自然冲淤变化的反映,南滩和东滩同时进入侵蚀阶段。—2 m 与—5 m 等深线演变特征具有较大的相似性,在 1958—1983 年间表现为北滩淤涨,东滩侵蚀,南滩淤涨,1983—2002 年以淤积为主,2002 年之后,北滩、东滩淤涨,南滩侵蚀。

(5) 典型断面的冲淤变化

为进一步研究滩涂及其水下延伸部分的高程变

化规律,在沿拦门沙河段滩涂延伸方向设置了 4 条断面(见图 1)。断面 AA' 位于崇明东滩东侧,0 m 等深线以上部分总体以快速淤积为主,这与崇明东滩总体呈淤涨趋势一致,2007 年的强烈侵蚀可能与风暴潮有关。0~-5 m 水深段除近年 0 m 深附近出现较大的冲刷槽外,总体以淤积为主,但近 10 年来淤积速率有大幅减小的趋势(图 3)。-6~-16 m 水深段内出现较为一致的持续侵蚀,平均侵蚀深度约 2~3 m。BB' 断面位于横沙东滩及其延伸区域。—5 m 等深线以浅断面变化复杂,过去 60 年出现多次冲淤交替,且空间上具有较大分异性,显示内部冲淤变化复杂;—5

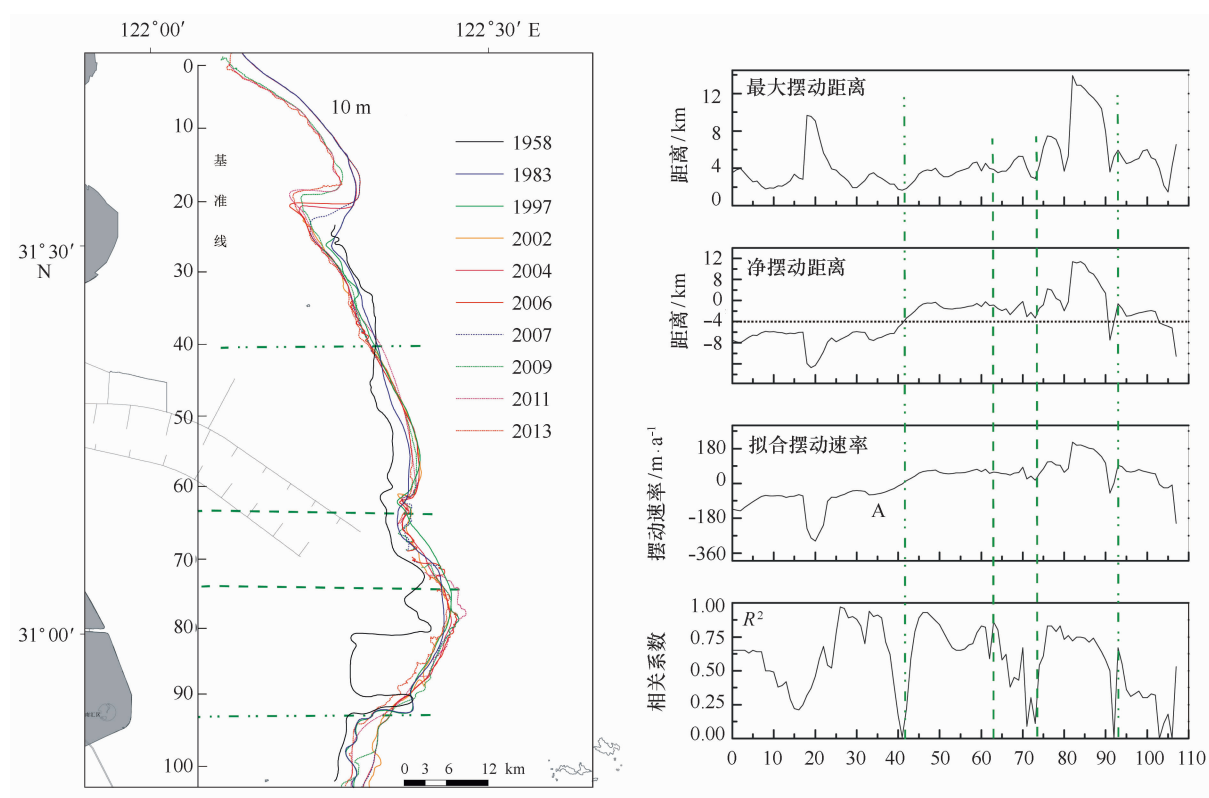


图4 1958—2013年长江口10 m等深线空间移动特征

Fig. 4 Shifts of the and 10 m isobaths in the Yangtze Estuary during 1958—2013

~ -8 m 水深区域, 总体以淤积为主, 淤积速率近年有减缓趋势, -8 m 水深以深, 出现侵蚀迹象。CC' 断面位于九段沙及东部区域, 该断面变化显示较为明显的规律性, 即 -5 m 水深以浅以淤积为主, -5 m 等深线以深 1997 年以前以淤积为主, 1997 年之后出现较为明显的侵蚀。DD' 断面位于南汇边滩, 是 4 个断面中变化相对最为稳定的断面, -6 m 等深线以浅以淤积为主, -6 m 等深线以深 1997 年以前以淤积为主, 1997 年之后由淤积转为侵蚀。4 条剖面 -5 m 等深线以深 1997 年之后平均垂向侵蚀速率达 7.3 cm/a。

(6) -10 m 等深线的变化特征

-10 m 等深线位于长江水下三角洲前缘, 长江三角洲属于潮控性三角洲, 长江来沙在潮流作用下进行再分配, 水下三角洲前缘泥沙再悬浮随涨潮流向浅水区运输, 因此分析 -10 m 等深线的变迁对滩涂的淤涨以及后续的发展预测具有一定的参考价值。利用 DSAS 软件计算的等深线移动拟合系数可以表征 1958 年来等深线移动特征的趋势性(图 4), 相关性系数 R^2 越大, 表示不同年份间等深线移动趋势具有更好的一致性。总体上, 基准线 40 km 处是 -10 m 水深由冲刷转为淤积的分界点, 呈现北冲南淤格局。40

km 以北自 1958 年以来一直显示持续侵蚀, 40 km 以南的淤积带又可以分为几个亚带。0~40 km 范围内, 大致相当于北支口、崇明东滩与北港以东地区以侵蚀为主, 除个别岸段外, 大部分向陆蚀退速率达到 70~140 m/a, 平均移动距离约 2 km。40~42 km 为由侵蚀转为淤积的过渡带。42~52 km 段, R^2 大于 0.75, 表明等深线移动具有较好的一致性, 年平均移动距离 35 m。52~62 km 段, 虽然总体仍以淤涨为主, 但 R^2 值较小, 反映等深线移动具有阶段性差异, 具体为 1958—1997 年为淤涨期, 1997 年之后则进入蚀退期。62~73 km 段, R^2 值大幅下降, 这可能是由于 1997 年之后由于北槽深水航道工程的实施, -10 m 等深线受人为改变而发生突变, 破坏了原有的自然演变规律。74~92 km 段, 是净摆动幅度最大的岸段, 最大移动距离超过 12 km, 该段 1958—2006 年保持较为快速的淤涨, 2006 年至今, 则进入侵蚀阶段, 侵蚀速率达到 400 m/a, 远超过前期的淤积速率。92~100 km 段, $R^2 < 0.4$, 表明已无明显的趋势性, 从图面上看, 1958—2006 年虽然保持淤涨, 但 2006—2013 年, 10 m 等深线已蚀退至 1983 年附近, 表明 1983—2006 年 23 年的淤涨距离与近 7 年的侵蚀距离相当,

显示侵蚀程度正在急剧加强。

5 拦门沙河段滩涂资源演变机制

滩涂资源是由泥沙在一定的动力环境下落淤而形成,滩涂淤涨发育主要决定于泥沙来源的多寡与水动力环境变化。按形成的沉积动力环境类型划分,近年一些大型工程相继在长江口门附近建成(如崇明东滩、南汇边滩围垦以及深水航道工程),极大改变了这些滩涂附近水动力环境,而长江流域来沙是滩涂发育的主要物质来源。因此,上海滩涂资源的演化不可避免受到这两大因素的影响。

5.1 流域来沙量减少对滩涂资源发育的影响

长江年均来沙量由 4.12 亿吨(1951—2003 年)下降到目前 1 亿吨左右,下降幅度超过 70%,长江口水下三角洲前缘地带已对来沙量减少有了明显的响应。—10 m 等深线多处已由淤涨转为蚀退,如横沙东滩以东—10 m 等深线 1958—1997 年持续向海淤涨,淤进距离 2.6~3.1 km,平均淤进速率 47.2~70.0 m/a(见图 4),但 1997—2013 年,该段由淤涨变为侵蚀,最大蚀退距离约 1.1 km,蚀退速率达 71.2 m/a。4 条断面也均显示—6 m 以深地区正由淤积变为侵蚀,这个转换的时间节点在 1997 年,当年大通站输沙量下降至 3 亿吨以下,而这与 Yang 等^[5]认为 2.7 亿吨是长

江三角洲由净淤积向净冲刷的转变临界值较为接近。

尽管入海泥沙已显著下降,但是河口区尤其在拦门沙河段的含沙量并没有明显下降^[19],此区泥沙再悬浮泥沙随涨潮流向浅水区净输运,部分抵消了流域来沙量减少对滩涂发育的产生的负面影响^[10,20],这可能是 4 条剖面—5 m 水深以浅区域侵蚀相对较弱的原因。尽管如此,来沙量减少对滩涂资源总体淤涨速率已产生了显著影响。从图 5 中可以看出,1958—1997 年,滩涂资源总量(历史围垦面积也统计在内)呈快速增加,而 1997 年之后,滩涂资源总量开始出现下降。将 10 个统计年份依次划分为 9 个时间段,统计各时间段内滩涂资源的变化量与累计来沙量(见图 6),结果显示出具有较好的相关性($R^2=0.771$)。前人统计 1971—1990 年之间处于自然淤涨阶段的九段沙来沙量与滩涂增长面积时,也显示出两者较好正相关性^[13],三维数值模拟结果也显示滩涂的淤涨与来沙量的密切关系^[15]。四大典型滩涂的统计显示 0~—5 m 等深线之间滩涂的增长速率也随着来沙量的减少而增长趋缓或者遭受侵蚀。随着长江口外水下地形不断侵蚀,口门地区悬浮泥沙浓度可能会出现一定程度下降,届时来沙量减少的滩涂资源发育的负面影响可能会更加明显。

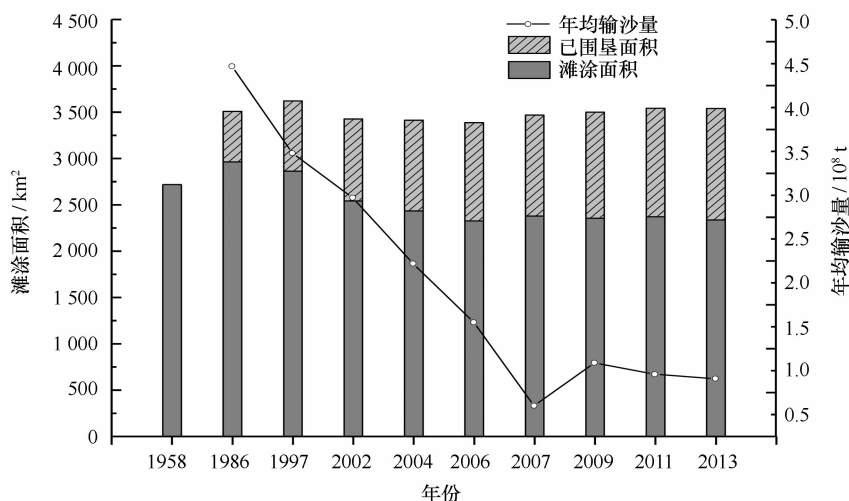


图 5 1958—2013 年滩涂资源量、累计围垦量以及年均输沙量对比图

Fig. 5 Comparison of area of tidal flat, accumulative amount of land reclamation and averaged annual sediment discharge during 1958—2013

由此可见,长江来沙量减少不仅对长江三角洲前缘斜坡地带产生侵蚀,而对—5 m 等深线以上的滩涂

资源发育也产生了深刻影响,水下三角洲地带底沙再悬浮向陆输运无法完全抵消来沙量减少的影响。虽

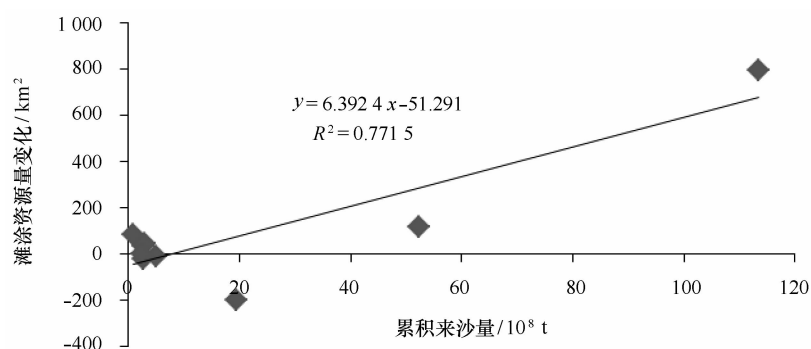


图6 1958—1983年、1983—1997年等9个时间段滩涂资源量变化与同时间段内累计来沙量关系

Fig. 6 Correlation of changes of area of tidal flat and sediment discharge during the periods

然滩涂资源总量以及0 m以下滩涂与来沙量密切相关,但0 m以上滩涂面积却逆势快速增长,显然与近年来河口实施的重大工程有关。

5.2 河口工程对滩涂发育的影响

假如没有河口工程建设影响,长江口潮滩年均自然淤涨面积不到2 km²^[21]。近60年来,累计圈围面积超过1 200 km²,年均圈围面积超过20 km²,是自然淤涨的10多倍,而上海滩涂资源总量仅下降约100 km²,可见因河口工程的实施,总体上加速了滩涂资源的淤涨。这主要是因为,在沉积物供应不变的条件下,按照滩涂的一般演化规律,随着潮滩向海不断淤进,滩涂淤涨速率和滩面沉积速率都将逐渐减小,逐渐达到平横,呈上凸形的地形剖面。也就是说假如没有人工干预,滩涂在增长到一定程度后,增长将趋于停滞。假如这种平衡因堤坝工程建设而被破坏,高滩修建堤坝后地形坡度变缓,涨落潮进出潮量对称性被破坏,往往出现涨潮优势沙,上滩泥沙通量大于下滩泥沙通量,从而加快淤涨速率必将加快^[22]。

四大滩涂1958—1983年0 m、0~−2 m、−2~−5 m范围滩涂面积均处于较快增长过程,而1983年之后,0~−2 m基本保持平衡,−2~−5 m增长趋缓或遭受侵蚀,而0 m以上滩涂面积近年保持高速增长,表明河口工程建设对0 m以上潮滩发育起到明显促进作用。河口工程对四大滩涂0 m以上潮滩发育影响显著。

崇明东滩由于经历数次大规模的圈围,海堤也数次外移,滩涂演变较为复杂。海堤对崇明东滩滩涂最为直观的影响表现在东滩向东,向北的自然淤涨趋势转为仅在中部向海延伸,并向东南方向偏转。1983年以前,崇明东滩向北扩展迅速,1964年修建的海堤也是一个重要影响因素,该工程圈围东滩的东北部

分,海堤对边滩淤涨刺激明显。而1983年之后,东滩向北延伸减缓的原因可能是1991、1998年海堤在东滩北侧侵占滩面,堤外滩涂面积较小,悬沙易随落潮流返回河道,不利于落淤。东滩中部及南部潮流入射方向呈西北—东南向,1998年海堤南部西南—东北的走向可能使得反射的落潮流在一定程度上偏向东南,并且此海堤圈围高程2.5 m,对潮流的影响程度较大,促进了东南部的发育。海堤另外一个重要影响为对高滩资源的影响大于低滩资源。2002年最后一次海堤建设以来,崇明东滩0 m以上滩涂面积增长速率达2.94 km²/a,而0~−2 m滩涂面积反而略有减小,这主要是因为海堤的建设圈围高滩,阻挡了涨潮流的流路,使水流速度减缓,携沙能力响应降低,有利于泥沙落淤,但随着堤外滩涂的不断延伸扩展,海堤建设带来的影响逐渐降低,泥沙输运趋于平衡,滩涂淤涨速度也相应放缓。值得注意的是,2002年以来,−2~−5 m等深线之间滩涂面积也相应出现较快增长,这可能与崇明东滩崇明东滩处在北港、北支水流在此撞击形成低速流区,有利泥沙沉积的环境有关。

1999年开始修建的深水航道工程对其两侧的横沙东滩与九段沙0 m以上滩涂发育影响显著。横沙东滩与九段沙位于口门中部,受制于较强的风浪侵蚀,泥沙活动等条件的影响,这里的涨落潮流冲淤不定,泥沙稳定性差,滩涂难以增长。深水航道两侧岛堤建成后,改变了周边的水动力条件,涨潮流受堤坝阻挡,在滩涂滩面流速都显著降低,为泥沙沉积创造了条件。横沙东滩与九段沙0 m等深线以上面积由2002年前的微弱侵蚀转为2002—2013年的大幅增长。但导堤的影响范围相对较小,仅限于0 m以上滩涂范围,对横沙东滩与九段沙滩涂整体向口外扩展作

用有限,部分区域如九段沙东南侧因南导堤的修建使涨潮流优势有所增强而造成沙尾的东南端出现冲刷。

南汇边滩 0 m 以上大片滩涂先后被筑堤促淤圈围,由于 2003 年完成的圈围大堤仍保持原有的浅滩嘴端向外凸出而两侧成顺直堤岸,使堤外浅滩水流顺畅,而且整个潮滩水流流态基本恢复到 1994 年以前的势态,新岸线并没有改变南汇边滩所处的水动力环境,南汇边滩仍是长江口,杭州湾潮流的发散区域,有利于泥沙落淤。2004—2013 年,0 m 以上滩涂面积增加了 44 km²,而 -5 m 等深线向海扩展不甚明显,0~-5 m 区域因受来沙量减少和 0 m 线范围的大幅度扩展挤压双重作用下,面积萎缩约 70 km²。

综上,目前所采取的圈围以及深水航道工程的实施给 0 m 以上滩涂资源发育带来积极的影响,成为滩涂资源淤涨的驱动力,但工程的影响范围较为有限,在 0~-5 m 区域,工程影响逐渐减弱,来沙量变化逐渐成为该区的主要控制因素。

6 结论

利用水下地形资料分析了上海近 60 年来的滩涂

资源演变特征,对其影响因素进行了探讨,结论如下:

(1)近 60 年来,上海 0 m 以上滩涂面积快速增长,0~-2 m 滩涂资源量基本稳定,-2~-5 m 面积萎缩,滩涂资源总量略有下降,近 10 年来资源量已趋于稳定,维持在 2 350 km² 左右,表明上海滩涂围垦规划与滩涂淤涨速率基本达到动态平衡状态。

(2)1997 年是上海海岸淤积侵蚀的临界点,流域来沙近 10 多年低输沙量不但使长江水下三角洲前缘由淤积转为侵蚀,而且对潮下带 0~-5 m 区域的滩涂资源淤涨产生了负面影响,-2~-5 m 水深滩涂面积正在快速减小。1997 年是 0~-5 m 滩涂由淤涨转为侵蚀的时间节点。未来若干年内长江流域来沙大幅增加的可能性不大,潮下带滩涂的侵蚀将会持续,相关部门需要加强对滩涂资源的动态监测。

(3)河口重大工程建设对 0 m 以上滩涂的促淤作用起到积极影响,是近年来 0 m 以上滩涂逆势增长的主要驱动因素。但河口重大工程对 0~-5 m 水深区域影响有限,-2 m、-5 m 等深线并没有因工程的实施而加速向口外扩展。

参考文献:

- [1] Milliman J D, Shen H T, Yang Z S, et al. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang Estuary and adjacent continental shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1/2): 37-45.
- [2] Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea[J]. *Geomorphology*, 2007, 85(3/4): 208-224.
- [3] Yang S L, Zhang J, Zhu J, et al. Impact of dams on Yangtze River sediment supply to the sea and delta intertidal wetland response[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(F3): F3006.
- [4] Dai S B, Lu X X, Yang S L, et al. A preliminary estimate of human and natural contributions to the decline in sediment flux from the Yangtze River to the East China Sea[J]. *Quaternary International*, 2008, 186(1): 43-54.
- [5] Yang S L, Milliman J D, Li P, et al. 50,000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(1): 14-20.
- [6] Stanley D J. Nile Delta: extreme case of sediment entrapment on a delta plain and consequent coastal land loss[J]. *Marine Geology*, 1996, 129(3/4): 189-195.
- [7] Carriquiry D, Sanchez A. Sedimentation in the Colorado River Delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss[J]. *Marine Geology*, 1999, 158(1/4): 125-145.
- [8] Kennish M J. Coastal salt marsh systems in the U. S. : a review of anthropogenic impacts[J]. *Journal of Coastal Research*, 2001, 17(3/4): 731-748.
- [9] 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[J]. *Earth Science Reviews*, 2014, 138: 469-486.
- [10] Dai Z J, Liu T, Wei W, et al. Detection of the Three Gorges Dam influence on the Changjiang (Yangtze River) submerged delta[J]. *Scientific Reports*, 2014, doi:10.1038/srep06600.
- [11] 杜景龙. 长江三角洲前缘近十余年的冲淤演变及工程影响研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(5): 80-85.
Du Jinglong. Study on erosion and accretion evolvement in the Front Delta of Yangtze River over the past decade with the exploration into the projects influence[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(5): 80-85.
- [12] 计娜,程和琴,杨忠勇,等. 近 30 年来长江口岸滩沉积物与地貌演变特征[J]. *地理学报*, 2013, 68(7): 945-954.
Ji Na, Chen Heqin, Yang Zhongyong, et al. Sedimentary and morphological evolution of nearshore coast of Yangtze Estuary in the last 30 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 945-954.

- [13] 杨世伦,杜景龙,郜昂,等. 近半个世纪长江口九段沙湿地的冲淤演变[J]. 地理科学,2006,26(3):335—339.
Yang Shilun,Dunjinglong,Gao Ang,et al. Evolution of Jiuduansha wetland in the changjiang River Estuary during the last 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica,2006,26(3):335—339.
- [14] 李九发,戴志军,刘新成,等. 长江河口南汇嘴潮滩围工程前后水沙运动和冲淤演变研究[J]. 泥沙研究,2010(3):31—36.
Li Jiufa,Dai Zhijun,Liu Xincheng,et al. Research on the movement of water and suspended sediment and sedimentation in Nanhui spit of the Yangtze Estuary before and after the construction of reclamation projects on the tidal flat[J]. Journal of Sediment Research,2010(3):31—36.
- [15] Kuang C P,Liu X,Gu J,et al. Numerical prediction of medium-term tidal flat evolution in the Yangtze Estuary: Impacts of the Three Gorges project[J]. Continental Shelf Research,2013(52):12—22.
- [16] Wang Y H,Dong P,Oguchi T. Long-term (1842—2006) morphological change and equilibrium state of the Changjiang (Yangtze) Estuary,China [J]. Continental Shelf Research,2013,56(15):71—81.
- [17] Thieler E R ,Himmelstoss E A ,Zichichi J L,et al . Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0[R]//An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U. S. Geological Survey Open-File Report,2009:1008—1278.
- [18] 何小勤,戴雪荣,刘清玉,等. 长江口崇明东滩现代地貌过程实地观测与分析[J]. 海洋地质与第四纪地质,2004,24(2):23—27.
He Xiaoqin,Dai Xuerong,Liu Qingyu,et al. Observation and analysis of the process of present day morphology in the Chongming tidal flat of the Yangtze River Estuary[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2004,24(2):23—27.
- [19] 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[J]. Continental Shelf Research,2013,69:52—61.
- [20] 吴晗,杨世伦,邓兵,等. 长江口外泥沙向南输运速率的变化探讨—以朱家尖岛附近海域为例[J]. 上海国土资源,2014(1):114—120.
Wu Han,Yang ShiLun,Deng Bing,et al. Variation in the rate of southwards sediment transport from the Yangtze Estuary estimated from deposits in the inner continental shelf adjacent to Zhujiajian island[J]. Shanghai Land & Resources,2014(1):114—120.
- [21] 余绍达. 上海市滩涂围垦[J]. 上海水利志,1990(5):19—26.
Yu Shaoda. Inning on mud flat in Shanghai[J]. Shanghai Irrigation Records,1990(5):19—26.
- [22] 李九发,戴志军,应铭,等. 上海市沿海滩涂土地资源圈围与潮滩发育演变分析[J]. 自然资源学报,2007,22(3):361—371.
Li Jiufa,Dai Zhijun,Ying Ming,et al. Analysis on the development and evolution of tidal flats and reclamation of land resource along shore of Shanghai city[J]. Journal of Natural Resources,2007,22(3):361—371.

Evolution of tidal flat in the bar area of the Yangtze Estuary and their driving factors

Chen Yong¹, He Zhongfa¹, Li Bing¹, Yang Lijun¹, Zhang Jinhua¹

(1. Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China)

Abstract: Bathymetric data surveyed from 1958 to 2013 were analyzed using ArcGIS and DSAS software to investigate the evolution of the tidal flats in the bar area of the Yangtze Estuary. And driving factors such as the declined riverine sediment supply and the major engineering works constructed in the Yangtze Estuary were discussed in this study. The results demonstrated that: (1) the amount of tidal flat resources has experienced slight decrease since 1958; but it comes to be stable, with amount of 2 350 km² in recent decade. (2) the area deeper than 5 m has begun to experience erosion since 1997, and the averaged vertical erosion rate was 7.3 cm/a. (3) the dramatic sediment decline from Yangtze River in recent decade has brought negative impact on the progradation of the tidal flat deeper than 0 m. Nevertheless, the area shallower than 0 m was continued to accretion due to the influence of the engineering works in the estuary.

Key words: tidal flat resources; engineering works in the estuary; sediment decrease; Yangtze Estuary; Shanghai