

长江口 2002—2019 年滩涂演变分析

张东来, 宋 磊

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200136)

摘要: 在长江流域输沙量大幅度减少的背景下, 基于实测地形资料分析三峡工程运行前后长江口滩涂的总体变化, 其存在高滩增加, 中、低滩均减小的趋势。对长江口滩涂与涉水工程的关系归纳为4类, 其中基本圈围成陆的滩涂, 高、中、低滩面积均大幅减小; 建有工程的滩涂, 总体表现为高滩增加, 中滩减小多, 低滩减小少的现象; 受周边工程影响的滩涂, 滩涂演变与工程的相对位置及滩涂所处的河势与水文泥沙条件等有关; 而基本处于自然演变的滩涂, 则表现为高滩增加、中滩和低滩减小的演变特征。结果表明, 流域来沙减少是长江口滩涂演变的驱动因素, 具有范围大、周期长、变化缓慢的特征; 而人类活动是长江口滩涂演变的触发因素, 具有局部、周期短、变化剧烈的特征。

关键词: 长江口; 滩涂演变; 流域输沙量; 人类活动; 响应

中图分类号: U 612; TV 856

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0137-07

Tidal flat evolution in Yangtze River Estuary from 2002 to 2019

ZHANG Donglai, SONG Lei

(CCCC Shanghai Waterway Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200136, China)

Abstract: Since the sediment runoff in the Yangtze River Basin has greatly decreased, this study analyzes the general changes in tidal flats in Yangtze River Estuary before and after the operation of the Three Gorges project based on the measured topographic data and finds that the high tidal flats increase, while the medium and low tidal flats decrease. The relationship between tidal flats in Yangtze River Estuary and wading engineering can be divided into four categories. Specifically, in terms of tidal flats that have been enclosed, the areas of high, medium, and low tidal flats are greatly reduced. In terms of tidal flats with built projects, the high tidal flats increase. The medium tidal flats decrease greatly, and the low tidal flats decrease slightly. In terms of tidal flats affected by surrounding projects, the evolution of the tidal flats is related to the relative position of the projects, the river regime of the tidal flats, and hydrologic and sediment conditions. In terms of tidal flats undergoing natural evolution, the high tidal flats increase, and the medium and low tidal flats decrease. The results show that the reduction of sediment inflow in the basin is the driving factor of the tidal flat evolution in Yangtze River Estuary, which has the characteristics of large range, long period, and slow change. However, human activities are the factors triggering the evolution of the tidal flats in Yangtze River Estuary, which have the characteristics of local range, short period, and drastic change.

Keywords: Yangtze River Estuary; tidal flat evolution; sediment runoff in basin; human activities; response

长江充沛的径流挟带丰富的泥沙下泄, 在长江口堆积成宽广的三角洲, 滩涂就是堆积体的一种形式, 又称潮滩。河口滩涂发育演变的机理十

分复杂, 影响因素众多, 既受河流流量、输沙量、泥沙组成的影响, 又受潮汐、波浪以及盐淡水混合的影响, 它的物质来源既有流域, 又有口外水

收稿日期: 2022-08-05

作者简介: 张东来 (1993—), 男, 工程师, 从事水文勘测、自然地理学研究。

下三角洲, 泥沙运动的形式既有悬沙输运, 又有床沙推移^[1]。因此, 研究河口潮滩的发育演变机理既要掌握流域来水来沙情况, 又要了解潮汐动力的作用, 还要分析河口涉水工程的影响。

本文以长江口滩涂作为研究对象, 通过 2002、2010、2016 及 2019 年共 4 测次的水下地形资料(测图范围从徐六泾—长江口口外-10 m 等深线, 测图比例以横沙岛为界, 横沙岛以上为 1:25 000, 横沙岛以下为 1:50 000), 分析三峡工程运行前后长江口滩涂演变过程, 结合周边涉水工程的建设, 探讨在长江流域来沙减少的大背景下, 在人类活动影响下长江口滩涂的演变趋势, 为长江口滩涂保护与合理有序开发提供技术支撑。

1 研究区域概况

长江口是感潮河段, 受上游径流与口外潮流的共同作用。余文畴等^[2]因江阴—徐六泾为宽窄相间的分汊型河段将其定义为近河口段, 而徐六泾一口门为不断展宽的多分汊入海段, 直至拦门沙将其定义成河口段。本文研究的区域为徐六泾一口门拦门沙水域, 其主要特点为河道宽阔、水流动力条件复杂、滩槽交错、人类活动频繁。

长江口滩涂主要分布于南支河段的白茆沙、扁担沙, 北支河段的崇明北边沿、顾园沙, 以及口门的崇明东滩、横沙东滩、九段沙及南汇东滩等区域, 各滩涂地理位置见图 1。

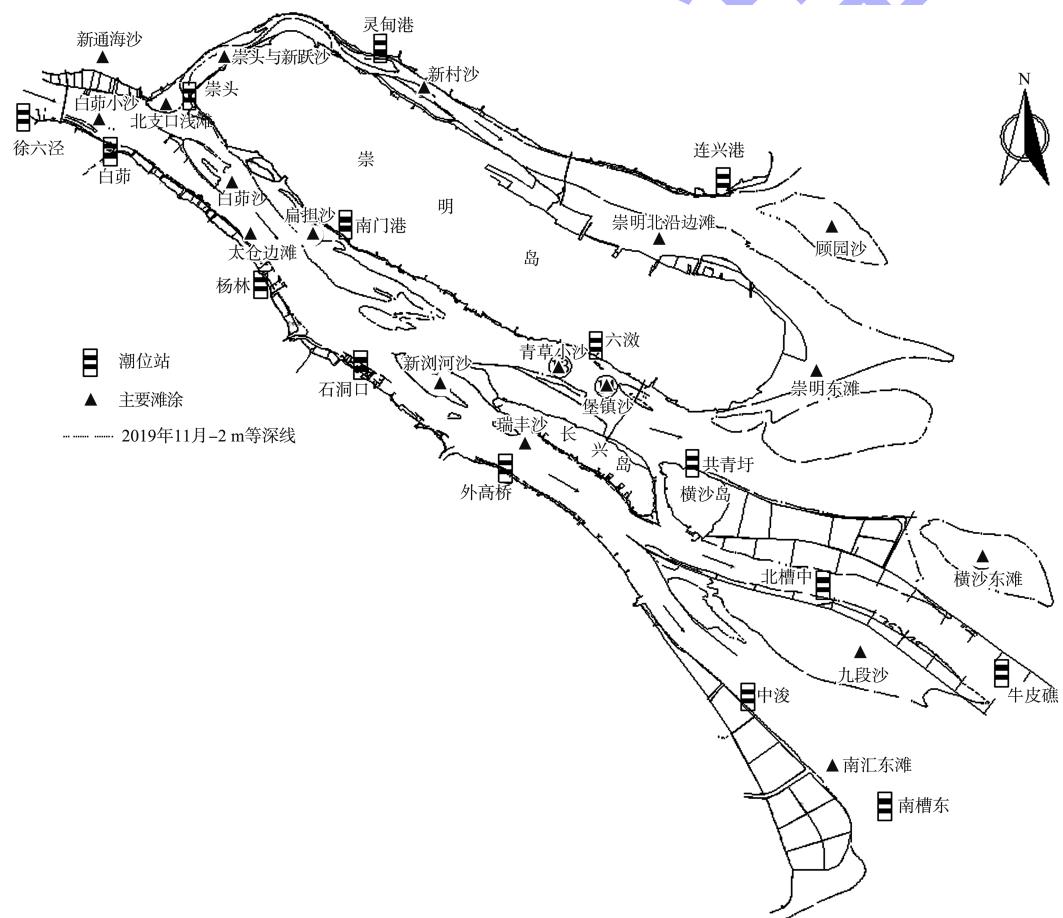


图 1 长江口主要滩涂及潮位站分布

长江口滩涂与涉水工程的关系可归纳成以下 4 类: 基本圈围成陆的滩涂、其上建有工程的滩涂、受周边工程影响的滩涂、基本处于自然演变的滩涂。长江口基本圈围成陆的滩涂有新通海沙、

太仓边滩、新村沙; 其上建有工程的滩涂有白茆沙、新浏河沙、瑞丰沙、横沙东滩、南汇东滩、九段沙; 受周边工程影响的滩涂有白茆小沙、青草小沙、堡镇沙、崇明北沿边滩、崇明东滩; 基本处于

自然演化的滩涂有北支口门浅滩、崇头与新跃沙、顾园沙、扁担沙。本文选取新通海沙、南汇东滩、堡镇沙、扁担沙作为研究对象, 分别探讨这4类滩涂对周边涉水工程的响应及自然演变规律。

2 长江口滩涂分类

本文高程零点为当地理论最低潮面。大多数学者以传统的经验分析方法, 即以理论基面0 m、水下-2 m、水下-5 m为界, 将滩涂分为高滩、中滩和低滩^[3-4], 但这种分析方法未充分考虑长江口滩涂潮浸地带的地貌特性。

统计2018—2020年长江口各潮位站的平均低潮位见表1, 各潮位站位置见图1。由表1可知, 长江口徐六泾节点段平均低潮位为1.03 m, 南支为1.10 m, 北港为0.92 m, 南港为0.95 m, 北槽为1.05 m, 南槽为1.18 m。除北支外, 平均低潮位都在1.0 m左右, 即长江口地区, 1.0 m以上的滩涂为常年潮浸地带, 而长江口最大浑浊带的天然水深常年在-5.5 m左右^[5]。因此, 分析长江口滩涂湿地, 需要有针对性地进行科学划分, 以长江口平均最低潮位和浑浊带最浅水深分别作为高滩和低滩的边界, 契合了长江口的潮汐和地貌特征。而在长江口滩涂治理工程中, -2 m等深线是促淤主顺坝的重要规划布置线, 因此, 众多学者在研究长江口滩涂时, 均研究-2 m等深线的演变^[6-7]。

表1 长江口各潮位站2018—2020年平均低潮位

河段	站名	平均低潮位/m		
		2018年	2019年	2020年
徐六泾 节点	徐六泾	1.15	1.22	1.34
	白茆	0.98	1.04	1.15
	崇头	0.73	0.79	0.86
北支	灵甸港	0.52	0.59	0.64
	连兴港	0.87	0.94	0.94
南支	杨林	0.96	1.03	1.11
	南门港	1.19	1.25	1.18
	石洞口	1.06	1.06	1.08
北港	六滧	1.06	1.12	1.17
	共青圩	0.67	0.74	0.74
南港	外高桥	0.93	0.97	0.95

续表1

河段	站名	平均低潮位/m		
		2018年	2019年	2020年
北槽	北槽中	0.91	0.92	0.94
	牛皮礁	1.15	1.16	1.20
南槽	中浚	1.07	1.09	1.09
	南槽东	1.24	1.30	1.28

基于以上原因, 本文将1 m等深线以上至堤防或海塘坡脚区域作为高滩, 水下-2、-5 m分别作为中滩、低滩的边界, 即以1、-2、-5 m特征等深线为界, 统计分析各等深线范围内的面积, 并以 ≥ 1 m、 $-2 \sim < 1$ m、 $-5 \sim < -2$ m区间分别定义长江口滩涂的高滩、中滩、低滩。

3 三峡工程运行前后长江口滩涂总体变化

长江口徐六泾以下各滩涂特征等深线包围的面积见表2。可以看出, 2002—2019年长江口徐六泾以下滩涂总体变化情况为: 高滩面积由440.7 km²增加到765.8 km², 增加了73.8%; 中滩面积由1 038.1 km²减小至719.2 km², 减少了30.7%; 低滩面积由1 163.1 km²减小至1 053.3 km², 减少了9.4%。中、低滩面积下降幅度最大的时间段为2010—2016年期间, 2016—2019年变化趋于平缓。

表2 长江口徐六泾以下各滩涂特征等深线包围的面积

年份	等深线包围的面积/km ²				
	1 m	-2 m	-5 m	-2 ~ < 1 m	-5 ~ < -2 m
2002	440.7	1 478.8	2 641.9	1 038.1	1 163.1
2010	590.4	1 651.8	2 807.3	1 061.5	1 155.4
2016	614.7	1 382.8	2 434.4	768.1	1 051.7
2019	765.8	1 480.3	2 538.3	719.2	1 053.3

4 典型滩涂的演变

4.1 基本圈围成陆——新通海沙

新通海沙位于长江口起点段—徐六泾河段的左侧。自2007年开始, 南通开发区、海门市分别根据规划治导线对新通海沙实施了分期圈围, 绝大部分围堤于2011年完成, 到2018年6月, 苏通大桥保护区上下游的区域也实施了整治, 至此新

通海沙全部并岸^[8]。

新通海沙-2 m 等深线演变见图 2。可以看出,新通海沙圈围后围堤前沿发生了冲刷, -2 m 等深线持续向围堤前沿后退, 2010 年后基本稳定在新围堤前沿。新通海沙特征等深线包围的面积见表 3。可以看出, 至 2019 年, 新通海沙滩涂面积为 0 km², 圈围后滩涂消失。同类型的太仓边滩、新村沙有类似的变化。

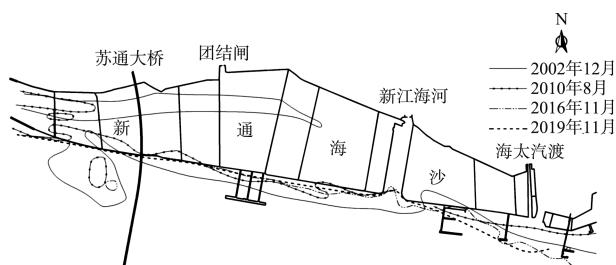


图 2 新通海沙-2 m 等深线演变

表 3 新通海沙特征等深线包围的面积

年份	等深线包围的面积/km ²				
	1 m	-2 m	-5 m	-2~<1 m	-5~<-2 m
2002	1.49	24.73	30.40	23.24	5.67
2010	0.00	5.20	6.33	5.20	1.13
2016	0.97	3.03	3.22	2.06	0.19
2019	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

4.2 其上建有工程的滩涂——南汇东滩

南汇东滩位于长江口南槽与杭州湾之间, 涨潮时受长江口门外泥沙与潮流的影响, 落潮时受上游径流裹挟的泥沙落淤的影响, 接近岸边时水深减小波浪作用加强, 高滩受到 NNE 向的波浪影响, 使岸线向南偏移, 总体趋势向东南发展^[9]。

南汇东滩特征等深线包围的面积见表 4。可以看出, 2019 年南汇东滩高滩面积为 133.46 km², 中滩面积为 82.97 km², 低滩面积为 175.14 km², 与 2002 年相比, 变化幅度分别为 11.6%、-49.3%、-33.3%。高滩部分略有增长, 中、低滩部分显著减小, 中、低滩面积大幅度减少的时间段为 2010—2016 年, 分别减少了 61.1% 和 26.5%。2016—2019 年, 变化较小。

表 4 南汇东滩特征等深线包围的面积

年份	等深线包围的面积/km ²				
	1 m	-2 m	-5 m	-2~<1 m	-5~<-2 m
2002	119.63	283.33	546.00	163.70	262.67
2010	116.50	338.80	591.20	222.30	252.40
2016	114.14	200.64	386.06	86.50	185.42
2019	133.46	216.43	391.57	82.97	175.14

南汇东滩近岸促淤围垦工程较多, 影响也较大。1996—2001 年间规模较大的是上段的浦东国际机场促淤工程^[10], 位于薛家泓以上, 纵向跨度长, 但向江侧圈围少。2013 年始开展了南汇东滩促淤工程, 分两期实施。一期工程于 2013 年 5 月—2014 年 10 月期间实施^[11], 包括大治河以北促淤区($N_1 \sim N_3$ 区)约 61 km² 和大治河以南内侧促淤区($S_1 \sim S_3$ 区)约 44 km²; 二期工程计划为大治河以南外侧促淤区($S_4 \sim S_6$ 区)约 44 km²^[12]。2016 年 11 月在促淤一期 N_1 库区的基础上实施了南汇东滩整治一期工程(即圈围工程), 其中的堤防建设于 2018 年 5 月完工, 工程位置见图 3。

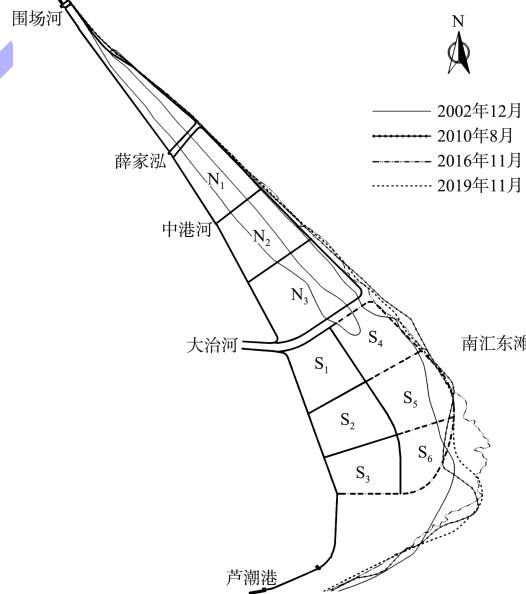


图 3 南汇东滩-2 m 等深线演变

南汇东滩高滩面积的扩大和中滩面积的减小的演变特征, 既有促淤工程的作用, 又有其所处特定地理位置、河口地貌必然堆积的规律, 还有上游来沙减少的影响。随着未来圈围工程进一步实施, 高滩进一步淤高扩宽, -2 m 线将稳定于外围堤附近。

4.3 受周边工程影响的滩涂——堡镇沙

堡镇沙与青草小沙-2 m等深线演变见图4。可以看出, 堡镇沙是不靠岸的江心沙。现在的堡镇沙有2块沙体组成, 上沙体为20世纪80年代新桥通道生成时, 切滩挟带大量泥沙进入北港主槽, 与堡镇边滩沙嘴合并而成^[13]; 而下沙体为堡镇沙南侧凸岸的青草沙在水流冲击下分裂而成, 又称六激沙脊。1988年堡镇沙与六激沙脊连成一体发育成为现在的堡镇沙, 使四激港—奚家港以下的近岸水域成为涨潮流为主的夹槽^[14]。随着北港上段水流由南向北偏移, 堡镇沙所处为弯道凹岸, 头部受到水流顶冲, 沙头退至六激港附近。

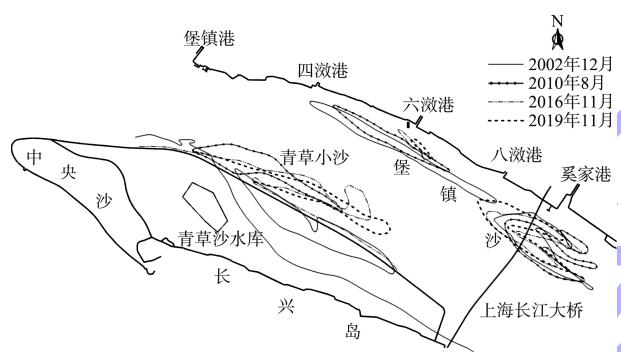


图4 堡镇沙与青草小沙-2 m等深线演变

堡镇沙特征等深线包围的面积见表5。可以看出, 2010—2019年堡镇沙高、中、低滩面积分别减少了94.0%、60.2%、26.3%。其主要原因在于, 2009年1月青草沙水库围堤合龙导致河道缩窄^[15], 水流流速增加, 堡镇沙逐渐冲刷减小所致。由表5还可知, 2019年堡镇沙1 m以上面积只有0.06 km², 意味着堡镇沙已是位于最低潮位之下的基本不出露水面的阴沙。

表5 堡镇沙特征等深线包围的面积

年份	等深线包围的面积/km ²				
	1 m	-2 m	-5 m	-2~<1 m	-5~<-2 m
2002	1.24	8.73	23.43	7.49	14.70
2010	1.00	9.80	18.40	8.80	8.60
2016	0.50	4.02	12.91	3.52	8.89
2019	0.06	3.56	9.90	3.50	6.34

4.4 基本处于自然演变的滩涂——扁担沙

扁担沙位于南支河段左侧, 其右侧为南支主槽, 左侧与崇明岛之间为新桥水道, 扁担沙宽度占河道一半以上, 总长约30 km, 滩面自上游向下游倾伏, 头尾窄, 中间宽, 总体为长条形, 状似扁担, 故被称为扁担沙。扁担沙上接已经完成圈围的东风西沙水库(东风沙内侧), 沙尾位于新河港附近, 沙尾常有切割的小沙体进入北港河段。

因无工程守护, 扁担沙沙体演变较大, 由于中部经常生成串沟分隔沙体, 串沟上称为上扁担沙, 串沟下称为下扁担沙。扁担沙-2 m等深线演变见图5。可以看出, 扁担沙2002年-2 m等深线共有5块组成, 上2块下3块; 2010年上下沙体相连接, 下沙体右侧有1块较大的独立沙体; 2016年又分为5块, 上1块下4块; 2019年则只有3块, 上1块下2块, 2016年下移至北港进口段的切割体已被冲蚀消失。可见, 扁担沙虽然总体变形不大, 但局部演变剧烈。

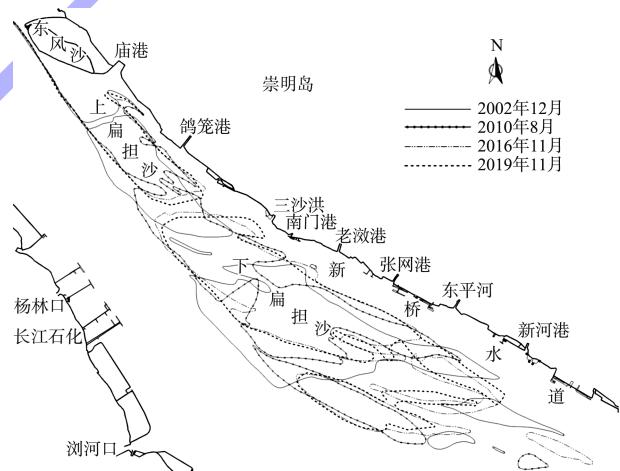


图5 扁担沙-2 m等深线演变

扁担沙特征等深线包围的面积见表6。可以看出, 扁担沙中滩面积2002年后持续减少, 2019年降至57.48 km²; 低滩面积2002—2019年间变化不大。与2002年相比, 扁担沙高、中、低滩面积变化幅度分别为106.1%、-17.4%、-1.2%。可见, 2002—2019年间扁担沙高滩部分增长快速, 部分中滩向高滩转化而减少, 相对而言, 低滩部分变化不大。

表 6 扁担沙特征等深线包围的面积

年份	等深线包围的面积/km ²				
	1 m	-2 m	-5 m	-2~<1 m	-5~<-2 m
2002	20.18	89.73	135.00	69.55	45.27
2010	24.38	92.13	148.73	67.75	56.60
2016	34.50	96.29	141.68	61.79	45.39
2019	41.58	99.06	143.79	57.48	44.73

扁担沙所处水域江面宽阔, 涨、落潮流路分歧, 因左、右侧河床阻力的差异导致涨落潮相位不同步, 形成利于泥沙堆积的缓流带^[16]。河床演变分析表明, 扁担沙洲体总体上较为稳定, 但又存在不稳定的一面, 即沙体右缘时有蚀淤^[17]。由于潮汐横比降的作用, 扁担沙滩面常被横向水流切割出数条串沟, 在水流的持续作用下, 这些浅水串沟中可能发育成横向或斜向水深较大的通道, 扁担沙沙尾也经常受水流切割而分裂, 从而形成江心滩, 增加了南支主槽段河床变化及其对下游河势影响的复杂性。

5 长江口滩涂演变原因分析

由于长江上游水土保持及梯级电站的建设, 长江流域向下游输送的泥沙总量下降^[18]。以长江大通水文站为例, 大通水文站距离长江入海口 624 km, 为理论上长江潮汐影响的最上端, 集水面积为 170.5 万 km², 控制长江流域 95% 的面积, 是长江干流下游泥沙、流量的代表性水文站。大通站历年输沙量变化过程见图 6。可以看出, 大通站历年(1951—2020 年)平均输沙量为 3.50 亿 t, 其中三峡工程运行前(1951—2002 年)平均输沙量为 4.27 亿 t, 蓄水后(2003—2020 年)平均输沙量为 1.34 亿 t, 下降了 68.6%, 显著减小。

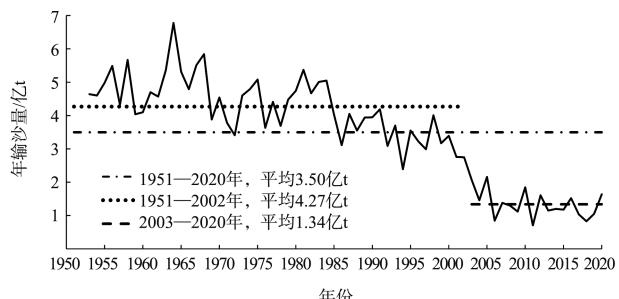


图 6 大通站历年输沙量变化过程

根据表 2 的数据可以看出, 长江口徐六泾以下的滩涂总面积(-5 m 以上)2002 年为 2 641.9 km², 2019 年为 2 538.3 km², 总体减少了 3.9%。通过这 2 个测次的地形数据计算可知, 徐六泾至河口外-10 m 等深线范围内, -5 m 以下河槽的容积, 2002 年为 103.2 亿 m³, 2019 年增加至 128.5 亿 m³, 增加了 24.5%。说明自 2003 年三峡工程运行以来, 在长江流域输送至下游及长江口地区的沙量大量减少的大背景下, 长江口浅滩、河槽均发生了冲刷。

人类高强度涉水活动直接改变了长江口滩涂的边界, 甚至有些滩涂被圈围而消失, 如新通海沙。建设在滩涂上的促淤固滩工程虽然保护了高滩, 但中、低滩依然发生了冲刷, 如文中分析的南汇边滩。处于因工程而缩窄了河宽河段的江中滩涂, 则无论高、中、低滩均大幅减小, 如堡镇沙。涉水工程对滩涂的演变是直接而快速的, 新通海沙的主要整治时间介于 2007—2011 年, 青草沙水库围堤建设的时间介于 2007—2009 年^[19], 南汇东滩大规模促淤时间介于 2013—2014 年, 2016 年后, 于长江口滩涂上开展的治理活动较少。由表 3~5 可见, 工程对滩涂的影响均快速得到反馈, 而 2016—2019 年间, 长江口滩涂的总体变化及各滩涂的变化均较小, 限于工程跟踪测量地形资料的欠缺, 工程对滩涂影响的具体时间段难以准确确定, 但总体而言, 工程的直接影响时间约在 5 a 以内。

而基本处于自然演变状态下的扁担沙, 2002—2019 年间, 高滩面积增长较多, 中滩减少了 17.4%, 低滩面积略有减少, 与长江口徐六泾以下滩涂总体变化是一致的。因此, 在流域来沙减少的大背景下, 长江口滩涂将呈现高滩淤涨, 中、低滩冲刷, 滩涂面积总体减少的趋势。

6 结论

1) 三峡工程运行后至 2019 年, 长江口徐六

泾以下的滩涂变化的总体情况为: 高滩增加了73.8%, 中滩减少了30.7%, 低滩减少了9.4%。中、低滩面积下降幅度最大的时间段为2010—2016年, 正是长江口滩涂治理力度最大时段, 主要集中在口门的横沙东滩和南汇东滩。2016—2019年滩涂演变趋于平缓。

2) 长江口工程与滩涂的关系有4类, 演变特征各不相同。基本圈围成陆的滩涂, 高滩、中滩、低滩面积均大幅度减小, 滩涂甚至消失; 其上建有工程的滩涂总体表现为高滩增加、中滩减小多、低滩减小少的现象; 受周边工程影响的滩涂, 其演变与工程的相对位置及滩涂所处的河势与水文泥沙条件等有关, 如青草沙水库建设缩窄了河宽, 堡镇沙面积大幅减小; 基本处于自然演变的滩涂, 表现出高滩增加、中滩和低滩减小的演变特征。

3) 流域来沙减少是长江口滩涂演变的驱动因素, 具有范围大、周期长、变化缓慢的特征, 未来长江口滩涂高滩将以淤积增大为主, 但中滩、低滩将趋势性减小; 人类活动是长江口滩涂演变的触发因素, 具有局部、周期短、变化剧烈的特征。

参考文献:

- [1] 茅志昌, 虞志英, 徐海根. 上海潮滩研究[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2014.
- [2] 余文畴, 张志林. 长江口河段近期演变特点与整治研究建议[J]. 人民长江, 2017, 48(15): 1-5.
- [3] 徐骏, 刘羽婷, 唐敏炯, 等. 长江口滩涂变化及其原因分析[J]. 人民长江, 2019, 50(12): 1-6, 30.
- [4] 李琦, 徐贵泉. 长江口滩涂资源变化分析[J]. 中国水利, 2016(5): 19-21, 24.
- [5] 陈吉余, 沈焕庭, 恽才兴, 等. 长江河口动力过程和地貌演变[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988.
- [6] 刘新成, 崔冬. 长江口工程促淤区的淤积特性分析[J]. 泥沙研究, 2019, 44(1): 24-30.
- [7] 廖建英, 胡春燕, 张志林. 长江口口门湿地的演变分析[J]. 人民长江, 2010, 41(7): 38-42.
- [8] 张志林, 王珏, 张东峰, 等. 长江口徐六泾节点整治工程的影响分析[J]. 人民长江, 2022, 53(1): 1-6, 12.
- [9] 孔俊, 叶荣辉, 薛晓晓, 等. 南汇东滩对长江口与杭州湾泥沙交换的影响研究[J]. 水道港口, 2009, 30(2): 77-81.
- [10] 浦东国际机场建设指挥部. 浦东国际机场可持续发展研究与实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 1998.
- [11] 冯凌旋. 基于GIS的南汇东滩促淤一期工程实施效果分析[J]. 水利技术监督, 2018(4): 62-65.
- [12] 长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局. 南汇东滩整治二期工程洪水影响评价报告[R]. 上海: 长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局, 2017.
- [13] 茅志昌, 武小勇, 赵常青, 等. 长江口北港拦门沙河段上段演变分析[J]. 泥沙研究, 2008(2): 41-46.
- [14] 刘玮祎, 唐建华, 缪世强. 长江口北港河势演变趋势及工程影响分析[J]. 人民长江, 2011, 42(11): 39-43.
- [15] 陆忠民, 吴彩娥. 青草沙水库堤坝工程关键技术研究与实践[J]. 人民长江, 2013, 44(21): 28-31, 36.
- [16] 华凯, 程和琴, 颜阁, 等. 近期长江口南支扁担沙洲演变特性[J]. 泥沙研究, 2020, 45(6): 33-39.
- [17] 何钰滢, 戴志军, 楼亚颖, 等. 长江口扁担沙动力地貌变化过程研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(5): 104-116.
- [18] 余文畴, 张志林. 2002—2018年长江口基本河槽冲刷及形态调整演化趋势[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(8): 1-8, 13.
- [19] 张志林, 胡国栋, 朱培华, 等. 长江口南港近期的演变及其与重大工程之间的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(12): 1433-1441.

(本文编辑 王璁)