

流域和河口高强度人类活动对 崇明岛滩涂资源变化过程的影响

马彬彬, 何钰滢, 戴志军

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘要: 入海河口形成的冲积沙岛滩涂因陆海水沙变异而出现快速冲淤已成为当前河口城市发展关注的焦点。崇明岛为我国最大的入海河口冲积沙岛, 其滩涂给上海提供极其重要的空间资源, 但因流域和河口高强度人类活动可能导致滩涂出现新的变化状态。据此, 通过长达30多年的环岛实测地形资料, 基于ArcGIS平台摸清崇明岛滩涂资源变化过程及主控要素。研究结论主要包括: (1) 崇明岛各段滩涂冲淤过程复杂多变, 冲淤交替频繁; 但总体上北部、南部和东滩滩涂面积均为正增长, 分别增加170 km²、8 km²和51 km²。(2) 促淤围垦工程导致北支泥沙量增多加速河槽萎缩淤积, 是北部滩涂增长的主因。(3) 新桥水道北移且有所淤浅导致南部滩涂面积淤涨, 而东滩快速围垦及岸堤向海推进引起东滩滩涂面积扩大。

关键词: 高强度人类活动; 崇明岛; 滩涂资源; 变化过程; 影响因素

河口地处陆海交汇的敏感地带。受流域丰沛泥沙补给, 河口哺育大规模滩涂资源, 这里不仅是很多生物资源的宝贵栖息之地, 也是三角洲城市抵御台风大浪的重要屏障^[1]。然而, 全球变暖引发的海平面上升极可能导致世界相当一部分大河三角洲滩涂面临侵蚀风险^[2,3]。流域水库大坝等一系列河流工程构建则引起全球河流入海泥沙锐减, 由此导致供给滩涂资源增长的物质来源减少, 进而诱发滩涂资源出现侵蚀危机。显然, 很有必要开展河口三角洲滩涂资源的变化、尤其是流域泥沙减少后的滩涂冲淤过程研究, 这能增进对三角洲动力地貌演变机制的理解, 也能为河口城市制定滩涂资源规划提供理论支撑。

目前, 关于滩涂资源时空演变及其机制已开展不少研究。如Murray等^[4]对过去33年的全球遥感影像分析, 发现在海岸带开发和世界大河泥沙供应减少等背景下, 东亚、中东和北美地区损失了约16%的滩涂资源。Wang等^[5]基于1986—2016年间的中国海岸带遥感图片数据, 将中国海岸带滩涂面积在此30年间的动态变化分为先稳定后增大再减小的三个阶段。Kang等^[6]通过对韩国西海岸的Landsat遥感影像分析得出滩涂面积在修建堤坝后产生显著上升趋势。Chellew等^[7]分别研究有海堤和无海堤的滩涂区域, 发现两种区域滩涂剖面变化有着显著差异, 这取决于入射波与反射波产生的相互作用。Fagherazzi等^[8]指出因波浪冲刷作用, 滩涂滩面受到侵蚀缓慢向凹型剖面形态持续演变, 由此引起潮滩不断后退萎缩, 而在潮间带上部, 盐沼植被区域能有效减小波流作用, 从而促进滩涂持续淤积, 剖面高程持续增加, 进而又有利于植被生长, 有效形成滩涂与植被淤长发育相

收稿日期: 2020-09-07; 修订日期: 2021-08-09

基金项目: 上海市国际科技合作基金项目 (19230712400); 国家自然科学基金委—中华人民共和国水利部—中国长江三峡集团有限公司长江水科学研究联合基金项目 (U2040202); 国家自然科学基金项目 (42076174)

作者简介: 马彬彬 (1993-), 男, 江苏如皋人, 博士研究生, 研究方向为海岸带资源开发与管理。

E-mail: mbb_ecnu@163.com

通讯作者: 戴志军 (1973-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 教授, 研究方向为河口海岸动力沉积和动力地貌。

E-mail: zjdai@sklec.ecnu.edu.cn

互作用。朱庆光等^[9]基于滩涂断面高程数据,发现围垦工程促使滩面发生高强度淤积,而对应的堤坝内表层沉积物分析结果显示出细化现象。同时,不少研究表明河流泥沙是三角洲滩涂的重要物源,因入海泥沙急剧减少,三角洲滩涂面积处于减少态势^[10,11]。然而,涉及到潮流作用相对强劲的长江河口,在2003年三峡大坝开始运行后,尽管来自长江上游的泥沙供应降低幅度达到70%,但河口的滩涂资源和水下三角洲范围却呈现出扩大趋势,这说明说明上游来沙的减少并未直接影响到近期长江河口滩涂的变化^[2]。此外,韩震等^[12]通过研究崇明岛东滩不同时期的滩涂冲淤变化,发现东滩淤长与落潮期间径流扩散引起泥沙沉降堆积以及不断的促淤圈围工程有明显的相关性,这反映了河口滩涂资源变化的复杂性及成因多解性。

崇明岛是长江进入东海因径潮流顶托及入海丰沛泥沙沉降而成,环岛发育面积宽广的滩涂(图1),给河口巨型城市提供重要的土地、环境与空间资源。然而,长江宜昌以上河段自2003年三峡大坝构建以来,入海泥沙已减少约70%^[13-15],这很可能影响崇明岛滩涂地貌变化格局。此外,环崇明岛高强度人类活动尤其是圈围造地在很大程度也对滩涂资源的冲淤构成影响。基于此,本文通过分析流域和河口高强度人类活动作用影响的环崇明岛滩涂资源变化特征,进而阐明其主控要素,这对崇明岛岸滩防护及港航安全具有重要科学价值。

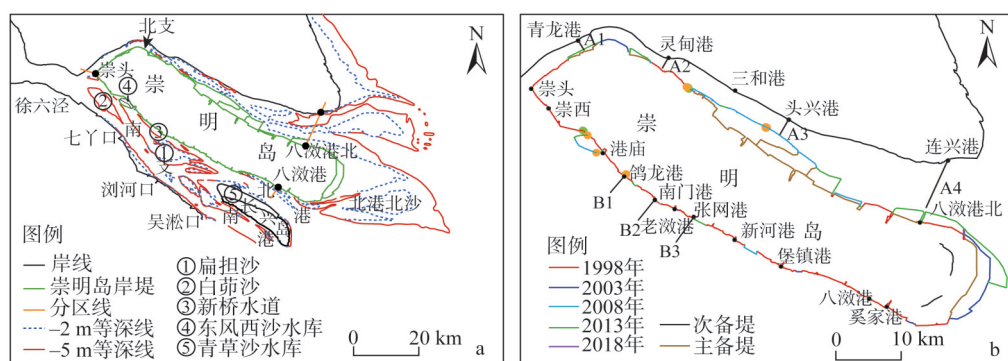


图1 研究区域和不同年份岸堤与断面位置

Fig. 1 Research area and location of embankment in different years and profiles

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

崇明岛位于长江尾间,是世界上河口区域所形成的最大的冲积沙岛(图1)。自618—626年以来,崇明岛由最早出露水面的西沙与东沙^[16]直至目前形成状如春蚕的形态,已有1400余年。环岛滩涂主要可分为崇明北部、南部滩涂和崇明东滩三块(图1)。其中北部滩涂从崇头起至启东连兴港,全长近80 km,根据北支的地貌形态可将其进一步分为崇头—青龙港、青龙港—头兴港以及头兴港—连兴港河段滩涂。崇明东滩范围主要是八澳港以东至北八澳港区域,外观基本向海出现舌头形态。为便于分析,除北部及东部滩涂外,本文将剩余岸段滩涂简称为南部滩涂,该段滩涂所在位置为崇明经济重心与人口主要聚居区域。

1.2 数据收集与方法

本文收集的涉及崇明岛滩涂相关资料主要是三部分，第一部分包括1984年以来环崇明岛滩涂地形资料；第二部分包括1991—2008年间的北支及南支实测水深数据（表1）；第三部分是收集了表征长江入海水沙的大通水文控制站1955—2016年间水沙数据与1971—2013年间长江口南北港分水分沙比资料。上述数据分别来自长江水利委员会和上海河口海岸研究中心。随后将纸质资料数字化，并与已数字化的水深资料都校正到理论深度基准面，构成研究区不同年份的数字化高程模型库（DEM）。在此基础上分别以0 m等深线、-2~0 m及-5~-2 m等深线分别界定高潮滩、中潮滩及低潮滩，并提取与计算不同年份涵盖的高、中与低滩涂面积和冲淤厚度。此外，在2018年5-6月利用RTK实地测量环岛岸堤位置以界定圈围工程区域（图1）。

表1 数据收集及来源

Table 1 Data collection and sources

测量年份	区域	数据来源
1984, 1990, 1997, 2000, 2002, 2004, 2009, 2013, 2016	环崇明岛	上海海事局
1991, 1998, 2005	北支	长江口航道管理局
1992, 1998, 1999, 2001, 2003, 2007, 2008	南支	上海河口海岸研究中心

2 结果分析

2.1 崇明岛滩涂地貌冲淤特征

2.1.1 北部滩涂地貌冲淤特征

自1984—2016年间，崇明北部滩涂总体处于淤积状态，年均淤积厚度超过0.1 m，年平均淤积速率约有 $3.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ （图2）。基于收集的数据和冲淤特征，北部滩涂变化可分六个阶段：1984—1990年间，青龙港与灵甸港至三和港滩涂岸段发生局部冲刷，其余滩涂岸段主要呈淤浅状态（图2a）。在1990—1997年间，三和港至连兴港滩涂岸段淤积年均小于0.5 m，在连兴港对应的北部滩涂出现大范围冲刷迹象（图2d）。1997—2000年间，滩涂淤积岸段北移且在北支上段青龙港—灵甸港段以及下段连兴港附近滩涂出现弱淤涨现象（图2g）。2000—2002年间，崇明西北部与中段上部分区域滩涂淤涨显著，中段下部分与下段区域侵蚀严重，在此期间北部滩涂整体被冲刷近 $4.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ （图2j）。2002—2004年间，崇明北部中上段滩涂冲刷显著，在中下段区域则出现年均淤积厚度超过0.1 m的迹象（图2m）。2004—2009年间，崇明北部滩涂再次呈现中上段年均淤积高达 $5 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的现象（图2p）。在2009—2013年间，除头兴港至连兴港滩涂岸段保持淤积状态，崇明北部滩涂多处呈现出冲刷现象（图2s）。在2013—2016年间，下段滩涂呈现轻微冲刷，而其他区域则再次淤积，其淤积厚度高达3 m（图2v）。

2.1.2 南部滩涂地貌冲淤变化特征

与北部滩涂变化有所差异，崇明岛南部滩涂地貌呈现出淤—冲—淤的交替变化特征。在1984—1990年间，崇西附近与新桥水道滩涂岸段年均淤涨 $3 \times 10^7 \text{ m}^3$ （图2b）。在1990—1997年间，老激港至堡镇滩涂岸段年均冲刷约 $1.4 \times 10^7 \text{ m}^3$ （图2e）。然而在1997—2000年间，南部滩涂除局部冲刷外，其整体再次出现高达年均淤积体积 $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的特征（图2h）。在2000—2002年间，南部滩涂出现年均冲刷 $9 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的迹象（图2k）。在2002—2004年间，东风西沙水库附近以及堡镇至八激港滩涂岸段呈现冲刷状态，但南部

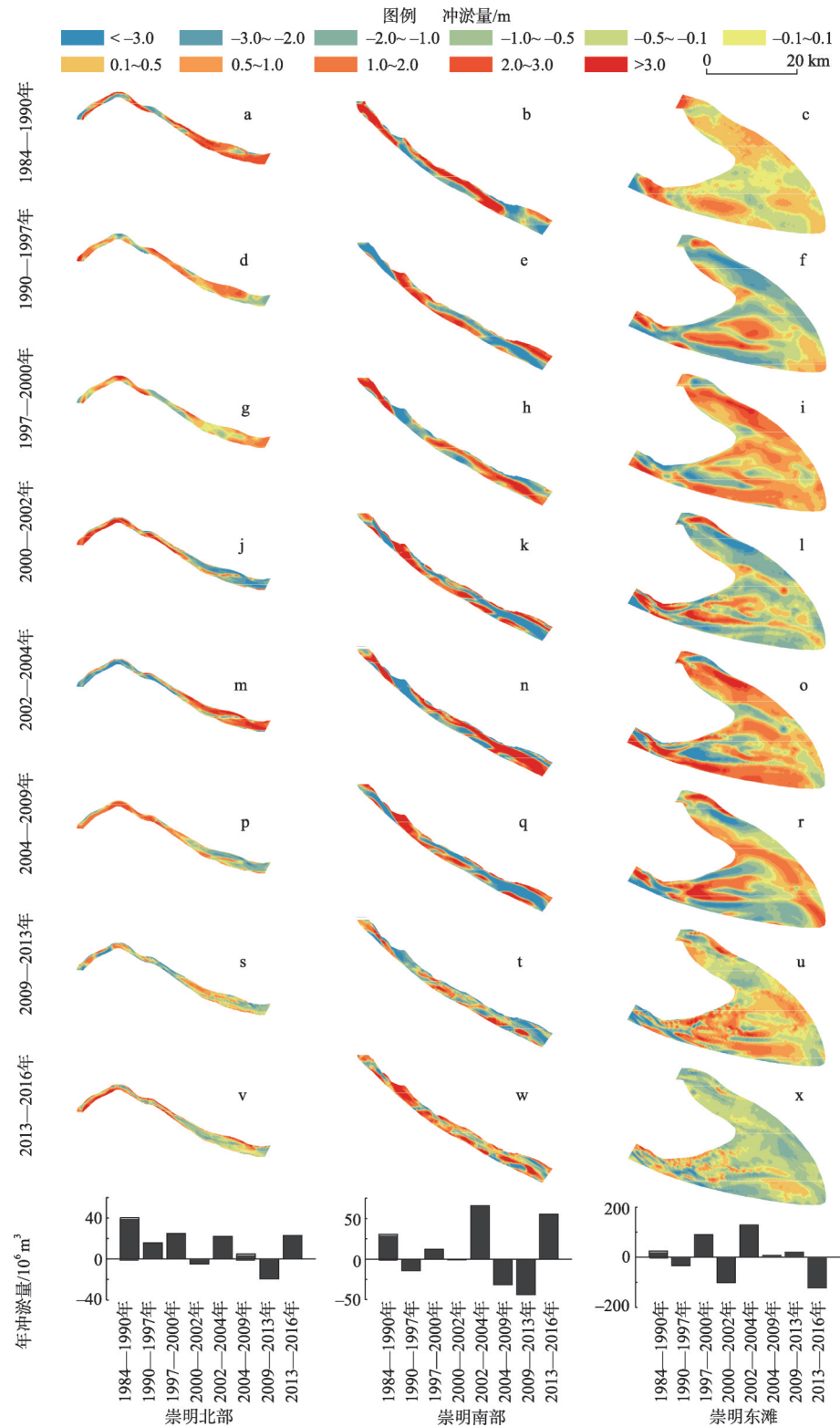


图2 1984—2016年环崇明岛冲淤变化

Fig. 2 Bathymetric changes around Chongming Island during different periods from 1984 to 2016

滩涂年平均淤积约 0.3 m, 新桥水道滩涂岸段淤积厚度甚至超过 3 m (图 2n)。在 2004—2013 年间南部滩涂回归到冲刷状态, 特别是 2004—2009 年间新桥水道及堡镇至奚家港滩涂岸段冲刷幅度超过 3 m (图 2q、图 2t)。在 2013—2016 年间南部滩涂再次出现淤积, 尤其是东风西沙水库及新桥水道岸段淤积厚度超过 1 m (图 2w)。

2.1.3 东滩滩涂地貌冲淤特征

东滩是上海最大的滩涂, 总体而言持续处于淤积状态。其中 1984—1990 年间, 东滩主要在奚家港以东、北港北沙及东滩北部出现淤积, 年均淤积体积高达 $2.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ (图 2c)。在 1990—1997 年间, 除北港北沙持续淤积外, 其他区段出现较为严重的侵蚀, 整个东滩年均侵蚀体积为 $3.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ (图 2f)。在 1997—2000 年间, 崇明东滩近 73% 的区域发生大规模淤积 (图 2i), 年均淤厚度约为 0.1 m。然而在 2000—2002 年间, 崇明东滩再次发生显著的冲刷现象, 其年均冲刷量达 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年均侵蚀厚度达 0.13 m (图 2l)。在 2002—2013 年间, 崇明东滩持续呈现淤积状态, 但淤积速率逐年下降。其中在 2002—2004 年间, 崇明东滩年平均淤积量接近 $1.3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 大部分区域淤涨厚度大于 1 m (图 2o)。而在此之后, 东滩虽保持淤涨但淤涨速率明显减弱 (图 2r、图 2u、图 2x)。

2.2 崇明岛滩涂面积变化特征

2.2.1 北部滩涂面积变化特征

如前所述, 崇明北部滩涂处于总体淤积状态, 其面积亦处于净增长态势 (图 3a)。首先, -5 m 以浅滩涂面积由最初 1984 年的 198 km^2 到 2016 年的 368 km^2 , 滩涂面积扩大近 2 倍。其次, 0 m 以浅高滩面积由 1984 年不足 10 km^2 增大到目前 210 km^2 左右。特别是 1984—2009 年间北部滩涂快速淤长至 212 km^2 。自 2009—2016 年间滩涂面积基本维持在

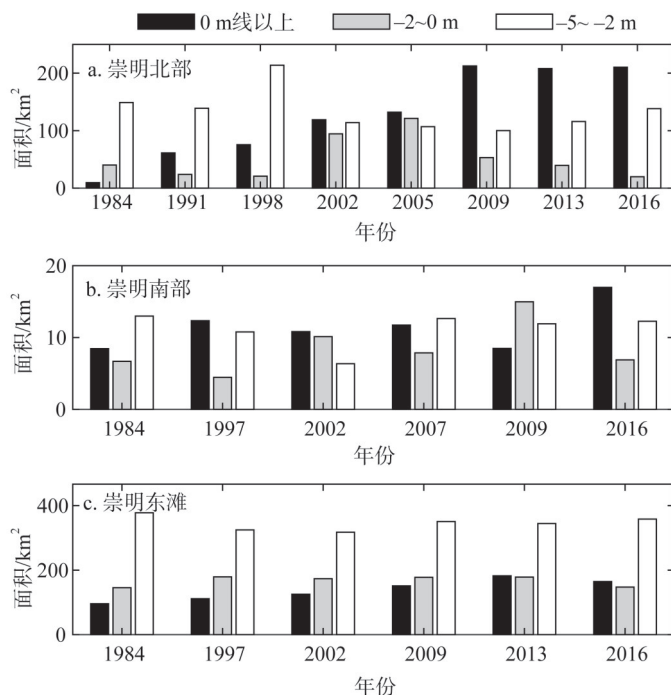


图3 崇明北部、崇明南部、崇明东滩滩涂面积变化

Fig. 3 Annual area variations in tidal flat of north region, south region and eastern shoal

210 km²左右。然而,与高滩面积比较,中滩与低滩面积变化具有明显差异,1984年中滩面积约为40 km²,随后面积有所减少,至1998年面积仅有20 km²。在1998—2005年间中滩面积骤然增加约100 km²,随后持续降低,而在2016年中滩面积又恢复约为20 km²。同时,低滩面积也呈现先急剧增长,随后持续减少的规律,但下降速率逐渐减缓直至最后再次发生增加,其中低滩面积在1998年达到最大值约为214 km²。

2.2.2 南部滩涂面积变化特征

崇明南部是主要人口集聚区,因此港口也密集分布。与北部滩涂相比而言,南部滩涂面积尤显稀缺,总面积不到40 km²。1984—2016年间,南部滩涂面积由1984年的28 km²持续淤积增加至2016年的36 km²,滩涂面积展现出明显增加的趋势,但高、中及低滩涂面积出现波动(图3b)。低滩面积除在2002年减少到6 km²,其余年份内基本维持在10 km²以上。在2002年中高滩面积较为接近,比1984年分别增长3.3 km²和2.4 km²。除此之外,中高滩面积分别在2009年与2016年达到最大值为15 km²与17 km²。

2.2.3 东滩滩涂面积变化特征

崇明东滩滩涂面积在1984—2002年间总体基本保持在620 km²左右,之后面积呈现持续上升趋势,在2013年总面积达到最大值为705 km²。随后在2013—2016年间,东滩滩涂局部区域发生冲刷,面积降低到约670 km²,但滩涂总面积仍比1984年有显著的增加(图3c)。此外,中高滩涂面积变化趋势与总面积变化趋势类似,在2013年达到最大值360 km²,而高滩面积在此期间扩大约一倍,近三十年的年平均增速达3 km²/a;中滩面积从起初的145 km²增加至178 km²,基本维持1.1 km²/a的年平均增速。之后2013—2016年间,崇明东滩局部区域呈现冲刷状态,中高滩面积均略微下降,分别减少31 km²与18 km²。低滩面积在1984—2002年间从起初377 km²减少至317 km²,随后呈现波状增长态势,其面积基本稳定在350 km²左右。

3 讨论

3.1 入海水沙对滩涂变化的影响

流域丰沛的入海泥沙是河口滩涂发育的基础。长江在1950s—2002年间年均入海泥沙高达4亿t,自2003年三峡大坝构建后引起泥沙下降了约70%^[2,15],这可能会对崇明岛滩涂冲淤构成影响。然而,如图4所示,在2003年之前年均输沙量均超过 2×10^8 t情况下,崇明岛北部、南部和东滩滩涂面积均呈现较低的状态,反而在2003年之后均有所增长,北部滩涂面积与入海泥沙的急剧下降呈弱的负相关(图4a),而南部和东滩滩涂面积则没有明显的相关性(图4b、图4c)。譬如,北部滩涂除在2002—2004年间出现局部侵蚀,随后滩涂整体出现淤积且未发生急剧侵蚀迹象,整个北部滩涂在近30多年来仅出现局部弱侵蚀而滩涂面积由原先198 km²增长至368 km²(图3a);同时,南部滩涂面积也出现弱的增加,东滩滩涂淤涨速率虽有所下降但其面积仍在增加(图3b、图3c)。三峡大坝导致长江入海泥沙减少到年均1亿t左右,崇明岛滩涂却依旧维持增长态势,显然,流域入海泥沙的减少目前并没有引起滩涂出现侵蚀,哺育崇明岛滩涂的泥沙还存在其他来源,如海平面上升引起滩涂沿海涨潮动力增强由此将先前堆积在水下三角洲的泥沙掀动而向岸输移,这可能在一定程度弥补长江入海泥沙不足,而维持崇明滩涂继续淤积。由此可见,上游输送泥沙并非滩涂增长的单一来源,近海潮动力增强带来的海域来沙则满足了现阶段滩涂淤涨的需求,这充分抵消了由于入海泥沙减少可能带来的影响。此外,由流

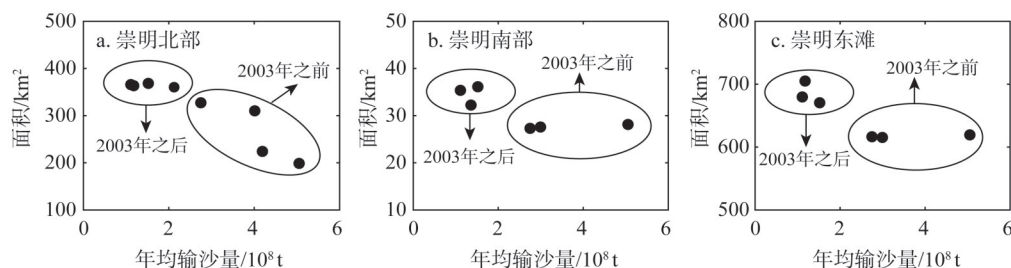


图4 崇明北部、崇明南部、崇明东滩滩涂面积与年均输沙量变化

Fig. 4 Variation in the tidal flat area of of north region, south region and eastern shoal and annual mean sediment discharge

域进入北支的泥沙不到2%，而北支作为喇叭型潮控河口，涨潮优势流夹带口外泥沙持续输送进入北支，这在很大程度上导致北支滩槽都出现淤积，由此引起滩涂面积增大^[17]。

尽管三峡大坝洪蓄枯泄，但并没有引起长江入海径流出现年际的明显波动从而对研究区30年来的滩涂面积增减及冲淤没有明显的影响。然而，长江大洪水对河口河势的改变却有着控制性作用^[18]。前人研究表明，历史大洪水如1860年、1931年及1954年洪水通过切滩、合滩等作用形成新河槽或通道，由此改变河口地貌格局，达到改造或塑造滩涂的目的^[19]。如1954年的特大洪水促使南北支分汉口河势发生巨大变化，北支入口处骤然淤积，白茆沙逐渐向崇明岛淤进，从而白茆沙南沙道发育成为行洪主槽^[18]。

3.2 促淤圈围工程对崇明滩涂变化的影响

促淤圈围工程对崇明岛北部滩涂面积变化的影响最大。北支形成于1915年，在1915—1958年处于未受人为作用干扰的状态。然而，自20世纪60年代以来北支沿岸出现滩涂圈围及开发利用^[20]（图5a），由此导致长江口北支不断发展形成当前形态为喇叭型的河槽，在北支上段进口则因为围垦导致长江进入北支的水沙缩减不到2%^[18]。喇叭型河槽的出现，导致涨潮动力增强并成为优势作用力，从而由外海进入北支河槽的泥沙日趋增加且并没有随落潮作用力输出，从而北支滩槽都出现淤积。如近三十多年北支淤积的泥沙高达 $1.07 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，相应滩槽年平均泥沙淤涨速率为 $3.33 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ （图3a）。基于实测断面资料亦发现河槽平均水深则逐年减小（图5b）。其中青龙港A1断面由1984年最大水深-9 m缩减到目前-2 m，减少了近5倍（图6a）；灵甸港A2断面则减少5 m（图6b）；头兴港A3断面在2016年最大水深仅有-3.8 m（图6c）；连兴港A4断面近岸段最大水深则减小至-3 m。在此期间，青龙港A1断面的最大水深处年平均沉积速率最大，达到27 cm/a，A2、A3和A4断面的年平均沉积速率分别为18 cm/a、12 cm/a和20 cm/a。此外，2013—2016年间，沿岛北支河槽持续淤积且大片浅滩在低潮时将出露水面（图6d）。即滩涂围垦引起北支河槽形态发生改变，涨潮动力输移口内的泥沙持续增加，从而导致北支河槽萎缩，滩涂面积扩大。

东滩恰处于北支与北港涨潮分流与落潮河流的区域，这就有利于泥沙落淤在东滩从而促使其不断扩大。同时，与北支类似，东滩自1960s起就一直有促淤圈围、围海造田等人类活动，特别是20世纪90年代相继出现多次大规模滩涂圈围活动。譬如，在1990—1991年与1991—1992年间东滩南部与北部圈围面积达18 km²与44 km²，在1998—1999年间再次围垦5 km²与23 km²^[22]。为巩固圈围工程成果而将在其外修建海堤以防止冲刷，海堤外则因局部有利水沙环境再次发育新的滩涂^[17]，故历次圈围工程构建的岸堤向外推进（图1c），推进后的岸堤外又出现持续发育的滩涂，这种过程导致东滩整个区域面积年均

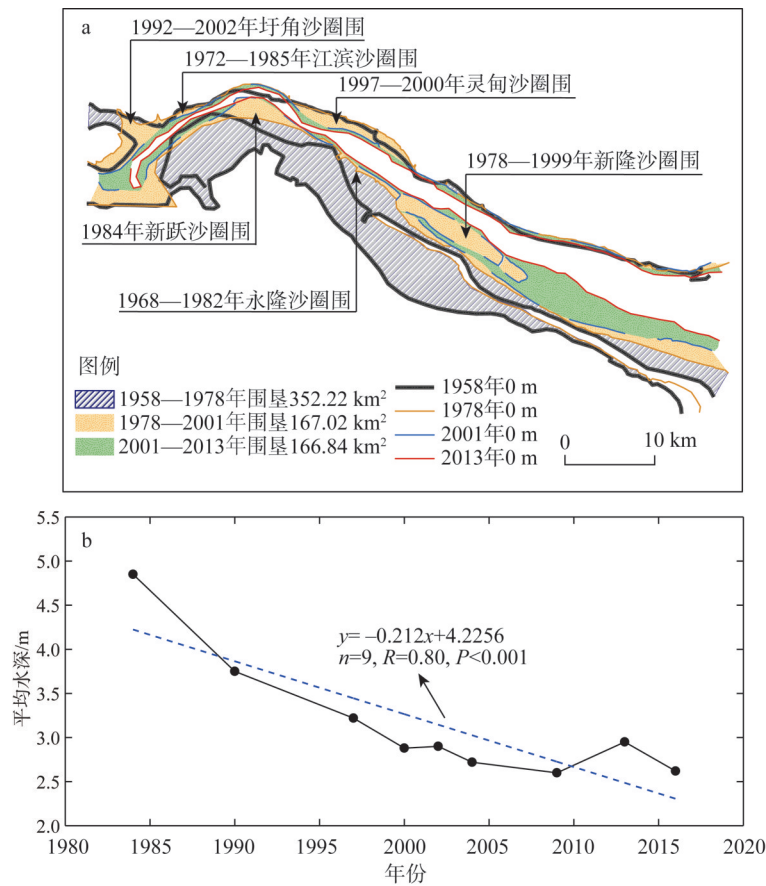


图5 北支不同时期的围垦工程^[21]及北支多年平均水深变化

Fig. 5 Reclamation in the North Branch during different periods; Average depth changes in North Branch

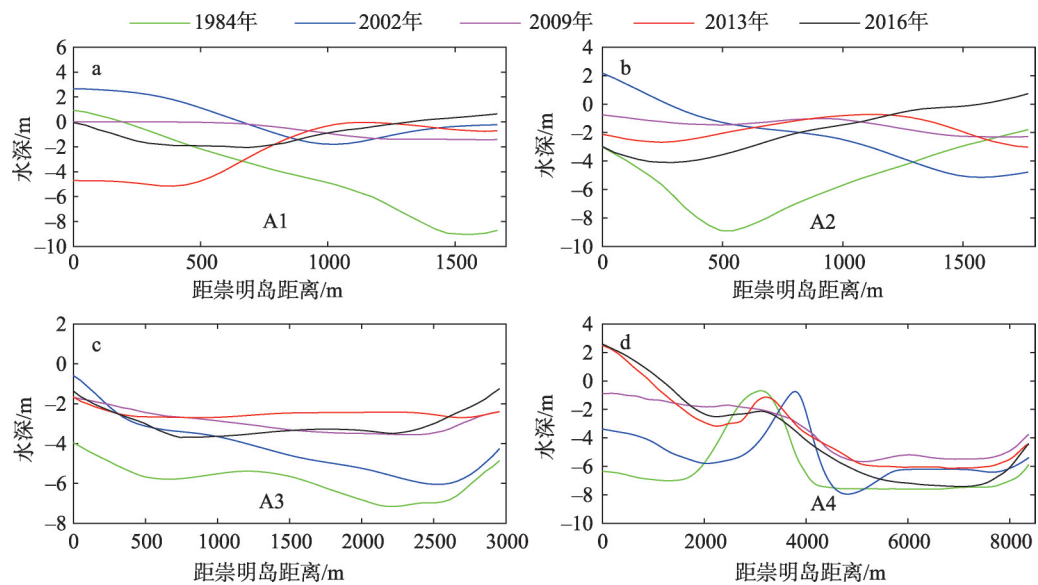


图6 北支断面水深变化

Fig. 6 Bathymetric changes along the sections A1, A2, A3 and A4

增长近 $2.15 \text{ km}^2/\text{a}$ 。近几十年来, 促淤圈围工程是上海市用以缓解土地紧缺的主要手段之一 (图 1c、图 5a), 几乎每次强烈的促淤围垦工程之后, 均会引起崇明岛滩涂的爆发式增长, 在海域来沙的补充下, 崇明岛滩涂的增长基本归因于高强度的人类促淤圈围活动。

3.3 新桥水道变迁对崇明南部滩涂的影响

崇明南部滩涂位于新桥水道北沿。新桥水道变迁发展对崇明南部滩涂冲淤进退具有重要作用 (图 1) [1,23]。如图 7a、图 7d 所示, 由位于鸽龙港周边的 B1 断面可以看出, 在 1984—1992 年间河槽形态发生了明显的变化, 近岛水下地形淤积, 河槽因此由宽广形态转变为狭窄形态, 2003—2008 年间变动频繁, 其中河槽又恢复宽广形态, 且其水深甚至达到 8 m, 随后 2009 年河槽发生明显淤积, 水深仅为 4 m 左右, 且在后面的年份河槽坡度逐渐变缓 (图 7d)。在此阶段, 附近区域南部滩涂发生扩张淤积 (图 2w), 整个南部滩涂高滩和低滩此时也达到历史最大值, 分别为 17 km^2 和 13 km^2 。位于南门港附近的 B2 断面, 在 1984—1997 年间河槽底部沉积最快点位的沉积速率可达到 50 cm/a , 而因多年间冲淤复杂多变, 年平均沉积速率为 7 cm/a , 至 2001 年河槽比原先状态显著变宽, 随后 2001—2009 年间河槽宽度又明显变窄, 2009 年后逐渐变宽, 水深淤浅, 直至 2016 年水深总体上不超过 8 m (图 7b、图 7e)。张网港 B3 断面以 2001 年为节点, 节点前新桥水道扩大且河槽水深增加到近 15 m; 节点后河槽处于淤浅状态, 水深则减少到不足 10 m, 其间近岸段年平均沉积速率为 18 cm/a (图 7c、图 7f)。在 1984—2016 年间, 南部滩涂的高中低滩总面积由开始的 28 km^2 增长到 36 km^2 , 尤其是高滩面积足足增长了 6 km^2 (图 3b), 新桥水道深泓线逐渐向崇明岛偏移以及水深总体变浅的过程直接造成崇明南部滩涂不断淤长。

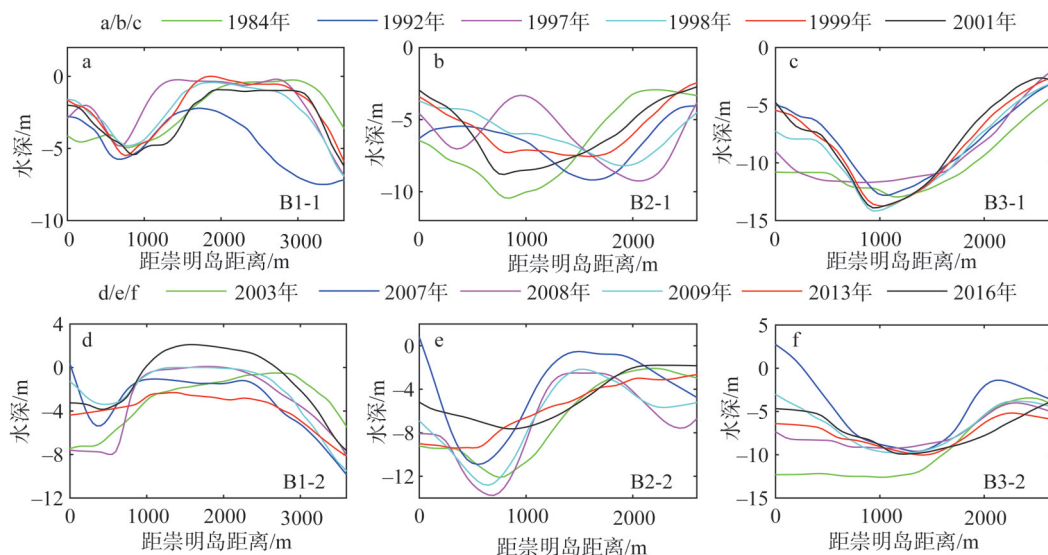


图7 新桥水道断面水深变化

Fig. 7 Bathymetric changes along the sections B1, B2 and B3

4 结论

本文基于长江口崇明岛 1984—2016 年间多年的地形图资料与实测水深数据, 探究崇明岛滩涂变化过程, 揭示滩涂变化过程对高强度人类活动的响应机制, 主要结论包括:

(1) 1984—2016 年间, 环崇明岛滩涂冲淤演变极为频繁复杂。其中, 崇明北部滩涂

虽局部区域在部分时期略有冲刷,但总体上处于淤涨状态;崇明南部滩涂则出现淤积、冲刷及淤积交替变换的格局;崇明东滩总体处于淤涨,淤涨速率逐渐减缓。

(2) 1984—2016年间崇明岛滩涂面积总体为淤涨扩大状态。其中北部总滩涂由1984年的198.7 km²扩大到2016年的368.3 km²。东滩面积维持增长状态,其中高滩面积增长了近2倍,中滩面积增加了约30 km²。南部滩涂面积虽整体较小但也扩大近1.3倍。

(3) 崇明岛滩涂面积的变化受控于新桥水道河势演变及促淤圈围工程,河流入海泥沙减少并没有导致其面积出现缩减。

参考文献(References):

- [1] 陈吉余. 中国河口海岸研究与实践. 北京: 高等教育出版社, 2007: 18-22. [CHEN J Y. Research and Practice of Estuaries and Coasts in China. Beijing: Higher Education Press, 2007: 18-22.]
- [2] DAI Z J, LIU J T, WEI W, et al. Detection of the Three Gorges Dam influence on the Changjiang (Yangtze River) submerged delta. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6600, Doi: 10.1038/srep06600.
- [3] GIOSAN L, SYVITSKI J, CONSTANTINESCU S, et al. Climate change: Protect the world's deltas. *Nature*, 2014, 516 (7529): 31-33.
- [4] MURRAY N J, PHINN S R, DEWITT M, et al. The global distribution and trajectory of tidal flats. *Nature*, 2019, 565 (7738): 222-225.
- [5] WANG X, XIAO X, ZOU Z, et al. Tracking annual changes of coastal tidal flats in China during 1986-2016 through analyses of Landsat images with Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 238(2020): 110987, Doi: 10.1016/j.rse.2018.11.030.
- [6] KANG M S, SANG J I, JANG T I, et al. Detecting areal changes in tidal flats after sea dike construction using Landsat-TM images. *Journal of Earth System Science*, 2007, 116(6): 561-573.
- [7] CHELLEW E, ROSSINGTON K, TOWNEND I, et al. The significance of wave reflection on the morphology of intertidal mudflats. *Coastal Engineering Proceedings*, 2011, 1(32): 1-12.
- [8] FAGHERAZZI S, KIRWAN M L, MUDD S M, et al. Numerical models of salt marsh evolution: Ecological, geomorphic, and climatic factors. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(1): 294-295.
- [9] 朱庆光, 冯振兴, 徐夏楠, 等. 围垦工程影响下的江苏琼港潮滩剖面的演化机制. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34 (3): 21-29. [ZHU Q G, FENG Z X, XU X N, et al. Evolution of tidal flat profiles under the influence of land reclamation in Jiangsu province. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2014, 34(3): 21-29.]
- [10] WEGEN M. Numerical modeling of the impact of sea level rise on tidal basin morphodynamics. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118(2): 447-460.
- [11] LI X, LIU J P, SAITO Y, et al. Recent evolution of the Mekong Delta and the impacts of dams. *Earth-Science Reviews*, 2017, 175: 1-17.
- [12] 韩震, 恽才兴, 戴志军, 等. 淤泥质潮滩高程及冲淤变化遥感定量反演方法研究: 以长江口崇明东滩为例. *海洋湖沼通报*, 2009, (1): 12-18. [HAN Z, YUN C X, DAI Z J, et al. Remote sensing quantitative inversion research of the silt tidal flat elevation and deposition and erosion: Chongming Dongtan as the example. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2009, (1): 12-18.]
- [13] 陈中原. 长江河流入海泥沙通量的探讨. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(1): 1-5. [CHEN Z Y. Discussion on flux of silt discharge of the Yangtze River into the sea. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2007, 27(1): 1-5.]
- [14] YANG S L, MILLIMAN J D, LI P, et al. 50, 000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta. *Global & Planetary Change*, 2011, 75(1-2): 14-20.
- [15] DAI Z J, MEI X F, DARBY S E, et al. Fluvial sediment transfer in the Changjiang (Yangtze) river-estuary depositional system. *Journal of Hydrology*, 2018, 566: 719-734.
- [16] 魏嵩山. 崇明岛的形成、演变及其开发的历史过程. *学术月刊*, 1983, (4): 74-77. [WEI S S. Historical process of the formation, evolution and development of Chongming Island. *Academic Monthly*, 1983, (4): 74-77.]
- [17] 冯凌旋, 李九发, 戴志军, 等. 近年来长江河口北支水沙特性与河槽稳定性分析. *海洋学研究*, 2009, 27(3): 40-47. [FENG L X, LI J F, DAI Z J, et al. Analysis of the river channel stability and the characteristics of suspended sediment and

- water in the North Branch of the Changjiang River Estuary in recent years. *Journal of Marine Science*, 2009, 27(3): 40-47.]
- [18] 恽才兴. 图说长江河口演变. 北京: 海洋出版社, 2010. [YUN C X. Illustrated Evolution of the Yangtze River Estuary. Beijing: China Ocean Press, 2010.]
- [19] 茅志昌, 虞志英, 徐海根. 上海潮滩研究. 上海: 华东师范大学出版社, 2014. [MAO Z C, YU Z Y, XU H G. Study on Tidal Flats in Shanghai. Shanghai: East China Normal University Press, 2014.]
- [20] 姚弘毅, 李九发, 戴志军, 等. 长江河口北港河道泥沙特性及河床沙再悬浮研究. *泥沙研究*, 2013, (3): 6-13. [YAO H Y, LI J F, DAI Z J, et al. Sediment character and bed load resuspension in north channel of Changjiang Estuary. *Journal of Sediment Research*, 2013, (3): 6-13.]
- [21] DAI Z J, FAGHERAZZI S, MEI X F, et al. Linking the infilling of the North Branch in the Changjiang (Yangtze) estuary to anthropogenic activities from 1958 to 2013. *Marine Geology*, 2016, 379: 1-12.
- [22] 路兵, 蒋雪中. 滩涂围垦对崇明东滩演化影响的遥感研究. *遥感学报*, 2013, 17(2): 342-349. [LU B, JIANG X Z. Reclamation impacts on the evolution of the tidal flat at Chongming Eastern Beach in Changjiang Estuary. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(2): 342-349.]
- [23] LOU Y Y, DAI Z J, HE Y Y, et al. Morphodynamic couplings between the Biandan Shoal and Xinqiao Channel, Changjiang (Yangtze) Estuary. *Ocean and Coastal Management*, 2020, 183: 105036, Doi: 10.1016/j.ocecoaman.2019.105036.

Study on the influence of intensive human activities on the variation process of tidal flat resources in Chongming Island

MA Bin-bin, HE Yu-ying, DAI Zhi-jun

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The rapid erosion and deposition of tidal flat in alluvial island in estuaries due to the variations of land- sea sediments discharge has become the focus of urban development. Chongming Island, the largest alluvial island in China, has become an extremely valuable reserve land resource in Shanghai. However, the tidal resource in this island possibly presented new variation due to intensive human activities in drainage basins and estuaries. Accordingly, based on topographic data and measured bathymetric data around Chongming Island from 1984 to 2016, we illustrated the variation process of tidal flats in the study area through ArcGIS analysis and mathematical statistical analysis, and discussed the main factors influencing the geomorphic evolution of tidal flats. The results mainly include: (1) The process of erosion and accretion in each section of tidal flat around Chongming Island was complicated and varied. Totally, during the past three decades, the areas of the northern, southern and eastern beaches increased by 170 km², 8 km² and 51 km², respectively. (2) Variation of the northern tidal flat was affected by land reclamation, which led to the shrinkage of the north branch and promoted the continuous growth of the tidal flat. (3) The deposition of Xinqiao channel and its northward movement to the island directly caused the expansion of the southern tidal flat. The eastern tidal flat was dominated by frequent reclamation projects. Owing to the continuous outward movement of the embankment, the tidal flat expanded greatly in the past decades.

Keywords: intensive human activities; Chongming Island; tidal flat resources; variation process; influencing factor