

南黄海辐射沙洲趋势性演变的动力机制分析

陈可锋^{1, 2}, 陆培东², 王艳红^{1, 2}, 喻国华²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 南黄海辐射沙洲区水道及其之间的沙洲普遍存在逐渐向南偏移的趋势, 对这种趋势性演变机理及驱动力的认识成为辐射沙洲区海岸开发过程中亟待解决的问题。在恢复黄河北归以来苏北黄河三角洲海岸不同发育阶段的岸线位置和水下地形的基础之上, 通过所建立的潮波数学模型, 研究了在苏北黄河三角洲不同演变阶段南黄海潮波系统的特征及其变化。研究表明, 随着岸线后退和水下三角洲的夷平, 辐射沙洲地区潮差不断增大; 水动力不断加强, 而且加强的区域逐渐向南偏移, 这种大范围区域性水动力主轴的向南偏移有可能是导致辐射沙洲整体南移的主导因素之一。

关键词: 辐射沙洲; 废黄河三角洲; 岸线变迁; 数值模拟; 江苏海岸

中图分类号: TV148.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2010)02-0267-07

南黄海辐射沙洲位于江苏海岸以东, 呈辐射状分布。其面积宽广, 脊槽相间, 形态特殊, 地形复杂, 是南黄海独特的地貌类型^[1-2]。近年来, 由于经济和社会发展的需要, 人们把更多的目光投向于辐射沙洲海域近岸水深条件较好的潮汐通道和宽阔的潮间带滩涂, 其演变趋势及其稳定性逐渐成为辐射沙洲研究的热点问题之一。近期对南黄海辐射沙洲近岸水道、沙洲和岸滩稳定性研究发现: 20 世纪 60 年代以来, 辐射沙洲南翼的小庙洪、网仓洪、烂沙洋和黄沙洋等水道及其之间的沙洲普遍存在逐渐向南偏移的趋势^[3-5]。这种趋势性过程的原因和驱动力成为辐射沙洲区海岸冲淤动态研究和海港开发过程中亟待解决的问题。

外来泥沙不再是控制辐射沙洲发育的主导因素^[2]。潮流是形成和维持辐射沙脊群的主要动力^[6-8]。江苏岸外辐合的潮波系统, 是大洋潮波在朝鲜半岛、山东半岛和江苏岸线构成的独特边界下传播的必然结果^[9]。近半个世纪以来, 影响南黄海潮波系统变化的主要因素中, 除海岸变迁外, 大洋潮波、科氏力、深海地形和摩擦系数等不可能发生大的变化。这一时期控制该潮波系统格局的黄海岸线只有江苏海岸发生了较大幅度的淤蚀变迁。可见, 江苏海岸变迁是这一时期内影响南黄海潮波系统变化最关键的因素。1855 年黄河北归以来的 100 多年间, 苏北黄河三角洲顶端的岸线蚀退幅度达 20 余 km, 水下三角洲已基本被夷平^[10-11], 岸线和水下地形的剧烈改变对潮波传播的局部影响不容忽视。考虑到南黄海旋转潮波需经废黄河三角洲岸外向南传播进入辐射沙洲区, 从而构成辐聚辐散的潮流格局, 辐射沙洲水道、沙洲近期动态表现出向南偏移趋势与江苏岸线的淤蚀变迁可能有成因上的联系。本文通过所建立的大范围潮波数学模型和局部潮流数学模型, 研究在苏北黄河三角洲不同演变阶段, 南黄海潮波系统的特征; 分析海岸变迁引起的水动力变化, 探讨水道及其之间的沙洲普遍存在逐渐向南偏移的原因; 从动力机制上分析辐射沙洲趋势性演变的宏观背景, 为江苏海涂资源利用与保护, 特别是海港开发的决策活动提供科学依据。

1 辐射沙洲趋势性演变特征

1.1 沙洲南移

从 1979 年和 2001 年海图的对比来看, 辐射沙洲有从西北向东南移动的趋势, 蒋家沙以北的沙洲在南北向潮流作用下, 北岸不断侵蚀, 南岸则连续淤长, 整体向南迁移, 其变迁强度因沙洲位置和大小而异。现处于辐

收稿日期: 2009-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40706034); 南京水利科学研究院青年基金 (Y209004)

作者简介: 陈可锋 (1981 -), 男, 江西鄱阳人, 工程师, 博士后, 主要从事河流海岸动力学及环境演变研究。

E-mail: chenkefengnju@163.com

射沙洲东北部的东沙，主要靠接受黄河供沙形成。黄河北归后，北部泥沙供给断绝，同时潮汐动力加强，使一度为辐射沙洲区面积最大的东沙开始遭受侵蚀，面积逐渐缩小^[5,12]。东沙沙脊各沙洲北缘，南退趋势最明显，1979年与1964年相比，无论是亮月沙、三丫子、还是主沙洲东沙的北缘南移了5~6 km；同时东沙的滩脊线和总体位置有向东移动的趋势。由于卫片成像潮位的不同，难以判断其整体的向东移动量，但沙洲上的分水滩脊可以从其上小型潮沟分布判读出来。从图1上可以看出，1979~2001年22年间，东沙的分水滩脊线平均向东移动约4 km，平均约200m/a。毛竹沙沙脊的移位也比较明显，竹根沙北条泥、三角沙有向东南移动的趋势。

1.2 烂沙洋水道—沙洲水动力主轴南移

烂沙洋水道和西太阳沙位于辐射沙洲中南部。通过1963~2003年近40年水下地形资料的对比分析可以看出：黄沙洋主槽和烂沙洋主槽均存在南移趋势。西太阳沙北侧烂沙洋10 m深槽的中心线40年间南移约600 m(图2)。1963~1994年间，西太阳沙北侧的烂沙洋水道尾部充分发展，动力主轴南偏；同期烂沙洋南水道也迅速扩展，不仅水深和宽度增大，而且水道逐渐顺直并西伸。

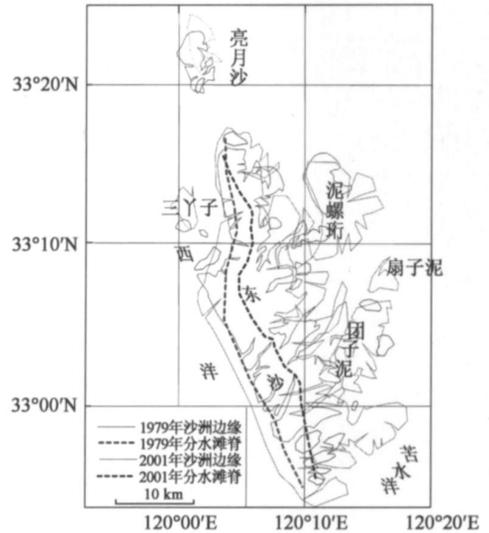


图 1 1979年以来东沙滩脊线与水边线变化^[12]
Fig.1 Change of Dongsha sand ridge and water-side line since 1979

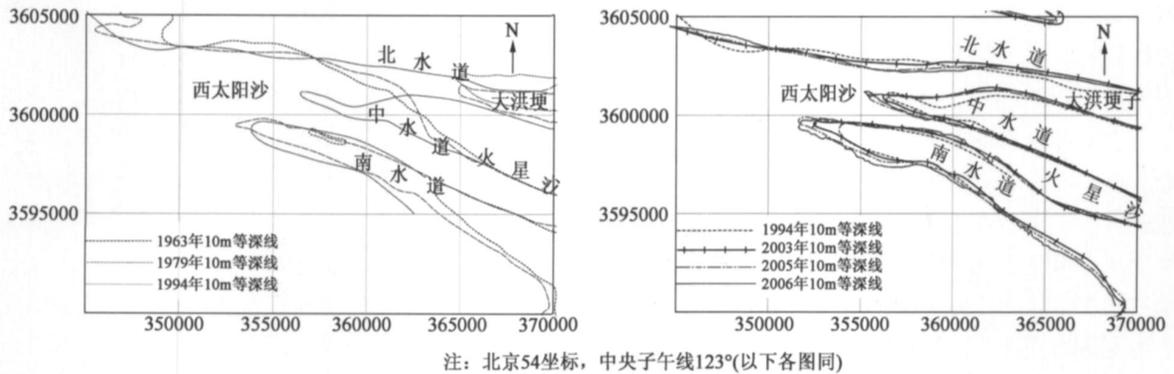


图 2 烂沙洋水道不同时期 10 m 等深线变化
Fig. 2 Change of the 10 m isobaths surveyed in the different periods in Lanshayang channel

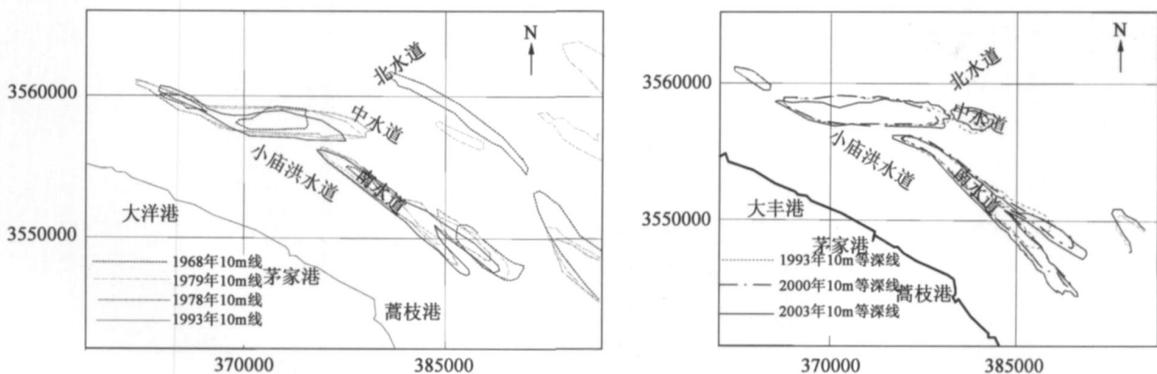


图 3 小庙洪水道不同时期 10 m 等深线变化
Fig. 3 Change of the 10 m isobaths surveyed in the different periods in Xiaomiaohong channel

1.3 小庙洪水道水动力主轴南移

小庙洪潮汐水道位于辐射沙洲的最南端, 距长江口北支约 60 km, 全长约 42 km, 水道自口门外至尾部宽度逐渐变窄。从 1968、1979、1989、1993、2000 年和 2003 年的地形资料对比可看出 (图 3), 小庙洪水道一直存在着北淤南冲的演变趋势, 口门段的北水道深槽不断萎缩直至消失, 南水道充分发展; 自 20 世纪 80 年代南水道头部分成南北两汉以来, 南汉始终处于发展的过程。小庙洪南水道及其南汉的发育表明, 该水道的动力主轴也有向南移动的趋势。

2 不同历史时期潮流数值模拟

2.1 模型建立

数学模型采用荷兰代尔夫特水力学研究所开发的 Delft 3D 系统。该模型系统已被广泛应用于海岸工程的数值模拟中, 其基本方程为描述静压力假定下不可压缩浅水流动方程, 即纳维尔-斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程。由于计算范围大, 需考虑地球曲率和科氏加速度随纬度的变化, 故采用球面坐标下的二维潮波传播方程, 本文引用东中国海平面二维潮波数学模型^[4], 模型区域为 $117^{\circ} \sim 131^{\circ} \text{E}$ 、 $24^{\circ} \sim 41^{\circ} \text{N}$, 计算范围包括渤海、黄海和东海, 通过此模型模拟 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 N_2 、 K_2 、 P_1 、 Q_1 8 个分潮的潮波运动。由此大尺度潮波模型提供的边界条件, 建立江苏海域潮流数学模型^[4]。大尺度潮波数学模型网格尺度为 $4' \times 4'$; 网格数 162×205 ; 江苏海域潮流数学模型的网格数为 171×202 , 网格尺度最大 5 km, 最小为 500 m。数值计算方法采用 AD 法。

2.2 模型验证

根据《英国潮汐表》, 选取本区域内 91 个验潮站的 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 4 个分潮的调和常数作为验证资料。其中 M_2 潮波振幅均方差为 9.4 cm, 迟角误差为 7.51° ; K_1 振幅均方差为 2.5 cm, 迟角度均方差为 6.52° 。从误差的空间分布来看, 误差偏大的验证点也主要集中长江口附近和杭州湾附近。从无潮点的个数及位置分布看, 本项研究得到的潮汐和潮流分布结果和前人的研究基本一致^[13-15]。在中国近海共证实 4 个完整的半日潮无潮点: 其中渤、黄海各 2 个, 还有 1 个退化无潮点在台湾岛北端 (图 4)。全日潮无潮点共 2 个分别分布在渤海、黄海 (图 5)。

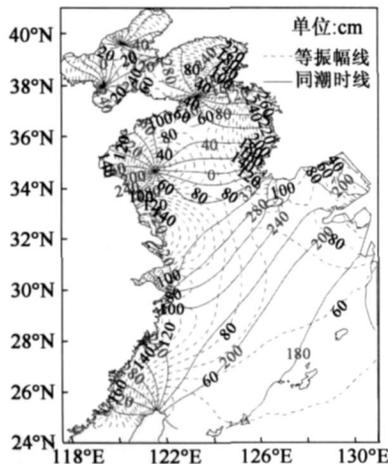


图 4 M_2 潮波的潮汐同潮图

Fig. 4 Cotidal line of M_2 partial tide

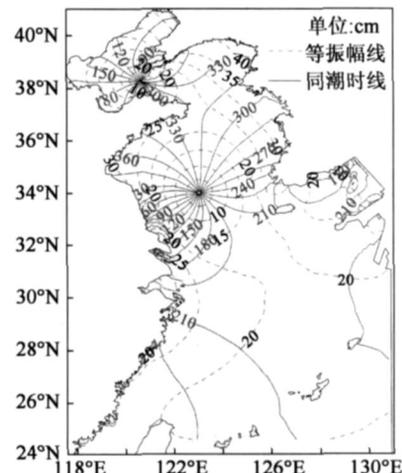


图 5 K_1 潮波的潮汐同潮图

Fig. 5 Cotidal line of K_1 partial tide

2.3 不同历史时期岸线、水深的确定

参考前人研究的成果^[11, 16-18], 结合近岸与陆地钻孔资料, 并与现代江苏岸线与水下地形特征加以对比, 把江苏海岸演变分成 3 个主要时期: 废黄河三角洲发育时期 (1855 年以前); 快速侵蚀时期 (黄河北归后至 20 世纪初); 基本稳定期 (本世纪初)。根据文献 [11, 16-17], 分别确定这 3 个时期的岸线位置 (图

6)。在计算不同历史时期古海岸的潮流场时，还需确定古水深，即古地形。柱状岩芯和浅层底层剖面研究表明：废黄河水下三角洲的最大范围北面 and 东面大致在水深 30 ~ 40 m 等深线，南翼现已被苏北辐射沙洲群所覆盖，坐标南起 33°05' N，北至 34°50' N，西起 120°30' E，东抵达 122°30' E，水下三角洲的厚度不超过 3 m，平均厚度约 2 m 左右^[18]。对于三角洲范围内的水深数据，1855 年前古水深根据陈伦炯《沿海全图》、陶澍《海运图》，并参考现代黄河三角洲的坡度进行恢复。20 世纪初的古地形参考 30 年代英版图及 1937 年日版海图。范围之外水深采用现代水深，从 1/100 万海图上读取。

3 趋势性演变的水动力机制分析

3.1 不同时期的潮流场变化

辐射沙洲区是一特殊的潮汐环境，东海的前进潮波与北部海域旋转潮波在弶港地区辐合，产生了辐聚辐散的潮流场。不同时期的数值模拟研究显示，江苏岸线的局部变迁并没有改变这种辐聚 辐散潮波系统。但 1855 年黄河北归前，由于废黄河口岸线向外突出 20 余公里，且有宏大的水下三角洲，使得由北向南传播的潮波收到阻挡，处在其南侧的辐射沙洲区水动力相对较弱。随着岸线的后退和水下三角洲的侵蚀，由北向南传播的潮波变得更加顺畅，辐射沙洲区的水动力得到进一步的加强 (图 7、图 8)。

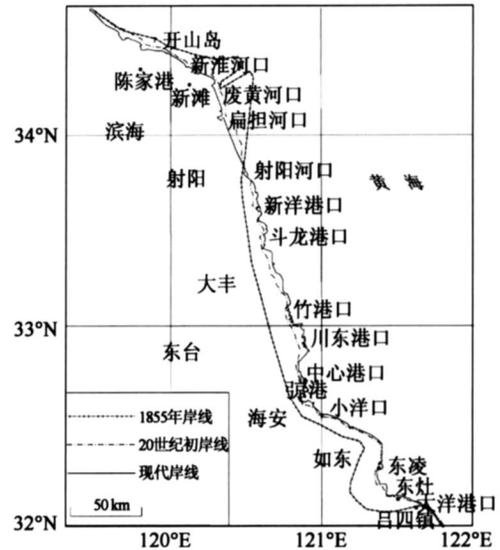


图 6 不同时期海岸线位置

Fig. 6 Locations of the coastal lines in different periods

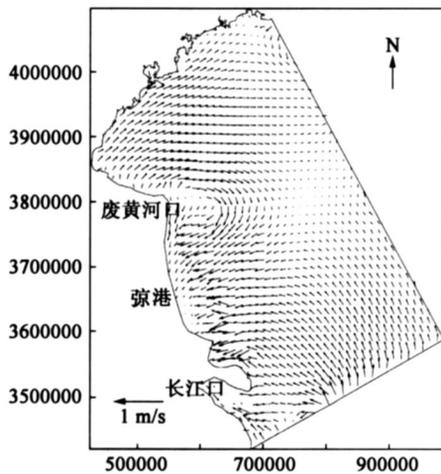


图 7 1855 年江苏海域涨急流场图

Fig. 7 Current field of Jiangsu sea area during the spring tidal in 1855

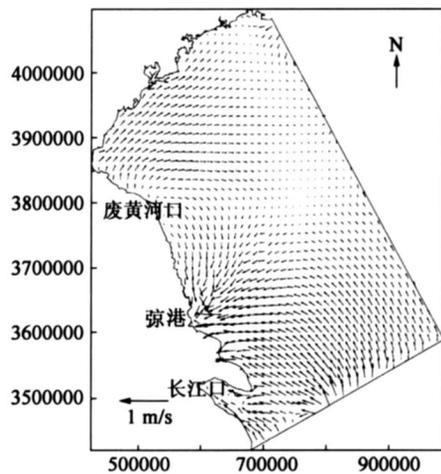


图 8 21 世纪初江苏海域涨急流场图

Fig. 8 Current field of Jiangsul sea area during the spring tidal in the beginning of the 21th century

另外，由不同时期全潮平均流速变化等值线图 (图 9、图 10)可以看出，1855 到 20 世纪初，随着岸线的后退，废黄河口附近以及南翼的局部海域，水动力得到了明显的加强，废黄河口附近平均流速增大 10 ~ 20 cm/s，辐射沙洲区平均流速增大 5 ~ 10 cm/s；从 20 世纪初年到本世纪初，岸线进一步后退，废黄河口水下三角洲夷平，废黄河口附近平均流速增大 5 ~ 10 cm/s，辐射沙洲区平均流速增大 10 ~ 20 cm/s，水动力加强的区域逐渐向东南方向扩展、偏移。

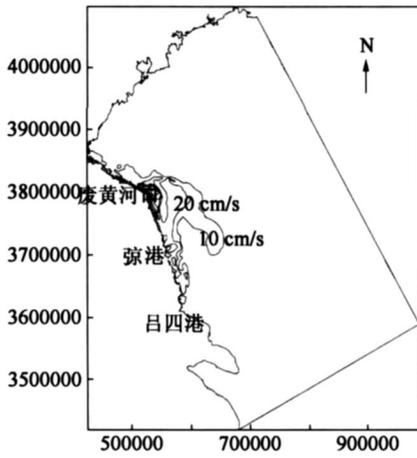


图 9 1855 年 ~20 世纪初年全潮平均流速变化

Fig. 9 Change of the entire average velocity of flow since 1855 to the beginning of the 20th century

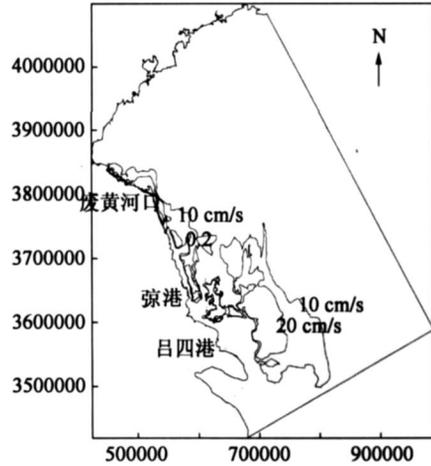


图 10 20 世纪初 ~21 世纪初年全潮平均流速变化

Fig. 10 Change of the entire average velocity of flow since the beginning of the 20th century to the beginning of 21th century

3.2 不同时期最大可能潮差的变化

采用公式 $2(1.29H_{S2} + 1.23H_{M2} + H_{O1} + H_{K1})$ 来计算最大可能潮差^[18]。一般而言, 凡平均潮差大者, 最大可能潮差也大, 两者的分布规律是相似的, 所以可根据最大可能潮差的分布来了解该区的潮差分布规律。

岸线和地形的改变, 对江苏沿海的最大可能潮差的影响比较明显。20 世纪初, 在废黄河口岸线快速后退的背景下, 江苏海岸最大可能潮差的变化, 大致以废黄河口为界 (图 11), 以北潮差减小 30 ~ 60 cm, 减小 5% ~ 15%; 以南从废黄河口到吕四潮差增大, 其中在废黄河口的南翼, 射阳河口附近增加幅度最大达 150 cm; 辐射沙洲海域增幅约 30 ~ 90 cm, 增大 8% ~ 23%。到本世纪初, 随着岸线后退速率的减缓, 废黄河水下三角洲的夷平, 最大可能潮差的分布又发生了很大的变化 (图 12), 辐射沙洲地区的潮差继续增大, 其中弼港附近潮差增加幅度最大, 达到 240 cm, 辐射沙洲外海域最大可能潮差增加 10 ~ 30 cm。

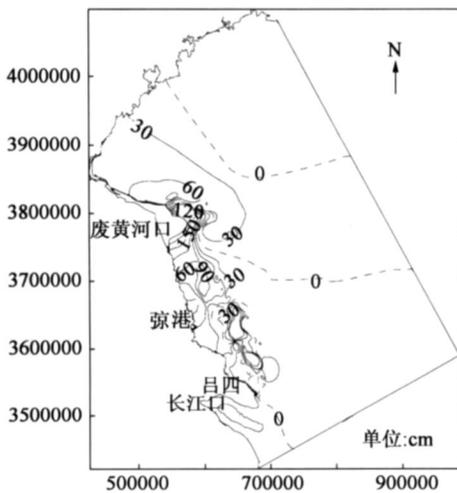


图 11 1855 年 ~20 世纪初最大可能潮差变化

Fig. 11 Change of the upmost tide amplitude since 1855 to the beginning of the 20th century

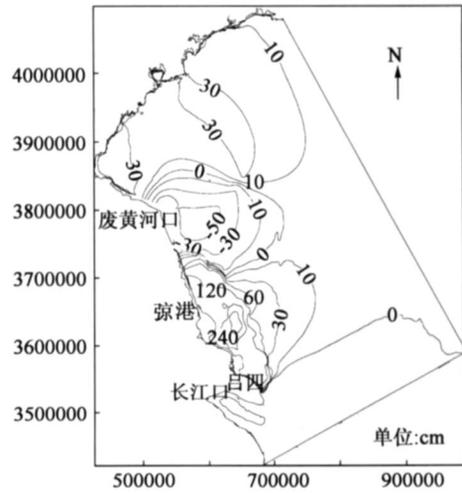


图 12 20 世纪初 ~21 世纪初年最大可能潮差变化

Fig. 12 Change of the upmost tide amplitude since the beginning of the beginning of 20th century to the 21th century

4 结 论

(1) 1855年黄河北归后随着岸线的后退和水下三角洲的侵蚀,由北向南传播的潮波变得更加顺畅,辐射沙洲区的水动力得到进一步的加强。1855到20世纪初,随着岸线的后退,废黄河口附近以及南翼的局部海域,平均流速增大 $5\sim 20\text{ cm/s}$ 。从20世纪初年到本世纪初,岸线进一步后退,废黄河口水下三角洲夷平,水动力加强的区域逐渐向东南方向扩展、偏移。

(2) 岸线和地形的改变,导致入射波、反射波和折射波的传播发生变化,该变化造成无潮点的移动,由此造成潮差显著变化。20世纪初,在废黄河口岸线快速后退的背景下,江苏海岸最大可能潮差的变化,大致以废黄河口为界以北潮差减小,以南从废黄河口到吕四港潮差增大,辐射沙洲海域增幅约 $30\sim 90\text{ cm}$ 。到了本世纪初,随着岸线的继后退,废黄河水下三角洲的夷平,辐射沙洲地区的潮差继续增大,弇港附近潮差增加的幅度最大,达到 240 cm ,辐射沙洲外海域最大可能潮差增加 $10\sim 30\text{ cm}$ 。

(3) 海岸动力变化与海岸演变之间相互作用长期存在,海岸变迁引起潮波变化;同时改变后的潮波系统分布也将会对海岸地貌重新塑造。随着岸线后退和水下三角洲的夷平,辐射沙洲地区潮差不断增大;水动力不断加强,而且加强的区域逐渐向南偏移,这种大范围区域性水动力主轴向南偏移有可能是导致辐射沙洲整体南移的主导因素之一。

参考文献:

- [1] 任美镔.江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告[M].北京:海洋出版社,1986:517-519. (REN Mei-e. Comprehensive investigation of coastal zone and tidal flat resources, Jiangsu Province[M]. Beijing: China Ocean Press, 1986: 517-519. (in Chinese))
- [2] LI Cong-xian, ZHANG Jia-qiang, FANG Dai-du, et al. Holocene regression and the tidal radial sand ridge system formation in the Jiangsu coastal zone, East China[J]. Marine Geology, 2001, 73: 97-120.
- [3] 何华春, 邹欣庆, 李海宇. 江苏岸外辐射沙背群烂沙洋潮流通道稳定性研究[J]. 海洋科学, 2005, 29(1): 12-16. (HE Hua-chun, ZHOU Xin-qing, LI Hai-yu. Stability of major tidal channel in radial submarine sand ridges system of Jiangsu province [J]. Ocean Science, 2005, 29(1): 12-16. (in Chinese))
- [4] 陈可锋. 黄河北归后江苏海岸带陆海相互作用过程研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008. (CHEN Ke-feng. Research of land and ocean interactions process of the coastal zone in Jiangsu province since the Yellow River flows northward [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [5] 陈君, 王义刚, 张忍顺, 等. 江苏岸外辐射沙洲群东沙稳定性研究[J]. 海洋工程, 2007, 25(1): 106-113. (CHEN Jun, WANG Yi-gang, ZHANG Ren-shun, et al. Stability study on the Dongsha Sandbanks in submarine radial sand ridges field of Jiangsu Coast[J]. The Ocean Engineering, 2007, 25(1): 106-113. (in Chinese))
- [6] 褚裕良, 严以新, 薛鸿超. 黄海辐射沙洲形成发育潮流数学模型[J]. 水动力学研究与进展, 1998, 13(4): 473-480. (ZHU Yu-liang, YAN Yi-xin, XUE Hong-chao. Tidal current numerical model for the formation and development of radial sandbank in the Yellow Sea [J]. Journal of Hydrodynamics, 1998, 13(4): 473-480. (in Chinese))
- [7] ZHU Yu-liang, CHEN Qing-qiang. On the origin of the radial sand ridges in the southern yellow sea results from the modeling of the paleo-radial tidal current fields off the paleo-Yangtze River estuary and northern Jiangsu coast [J]. Journal of Coastal Research, 2005, 21(6): 1245-1256.
- [8] 褚裕良, 严以新, 薛鸿超. 南黄海辐射沙洲形成发育水动力机制研究[J]. 中国科学: D辑, 1998, 28(5): 403-410. (ZHU Yu-liang, YAN Yi-xin, XUE Hong-chao. Formation of the Southern Yellow Sea sandbank radiation hydrodynamics development mechanism [J]. Science in China: Series D, 1998, 28(5): 403-410. (in Chinese))
- [9] 林琿, 阎国年, 宋志尧, 等. 东中国海潮波系统与海岸演变模拟研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 107-112. (LIN Hui, LU Guo-nian, SONG Zhi-yao, et al. East China sea wave system and the simulation of the evolution of the coast [M]. Beijing: Science Press, 2002: 107-112. (in Chinese))
- [10] 虞志英, 张国安, 金镠. 波流共同作用下废黄河口水下三角洲地形演变预测模型[J]. 海洋与湖沼, 2003, 33(6): 583-590. (YU Zhi-ying, ZHANG Guo-an, JIN Mu. Evolution prediction of the abandoned Yellow River submerged delta under wave and current [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2003, 33(6): 583-590. (in Chinese))

- [11] 蔡则健. 江苏海岸线演变趋势遥感分析 [J]. 国土资源遥感, 2002, 53(3): 19-24. (CAI Ze-jian. The application of remote sensing technology to the investigation of beach resources and their developing trend in Jiangsu province [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2002, 53(3): 19-24. (in Chinese))
- [12] 张忍顺, 陈才俊. 江苏岸外沙洲演变与条子泥并陆前景研究 [M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 22-34. (ZHANG Ren-shun, CHEN Cai-jun. Study on the foreground of the sandbank evolution and Tiaozini sandbank combine land offshore of Jiangsu [M]. Beijing: China Ocean Press, 1992: 22-34. (in Chinese))
- [13] 张衡, 朱建荣, 吴辉. 东海黄海渤海 8 个主要分潮的数值模拟 [J]. 华东师范大学学报, 2005(3): 71-77. (ZHANG Heng, ZHU Jian-rong, WU Hui. Numerical simulation of eight main tidal constituents in the East China Sea, Yellow Sea and Bohai Sea [J]. Journal of East China Normal University, 2005(3) 71-77. (in Chinese))
- [14] 李磊, 杜凌, 左军成, 等. 渤、黄、东海 M2 和 K1 分潮潮流场的有限元模拟 [J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(6): 851-858. (LI Lei, DU Ling, ZUO Jun-cheng, et al. Tidal current simulation for M2 and K1 with the finite element method in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea [J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(6): 851-858. (in Chinese))
- [15] 姜波, 吕咸青. 渤、黄、东海内潮的数值模拟 [J]. 海洋湖沼通报, 2007(1): 30-37. (JIANG Bo, LÜ Xian-qing. Three-dimensional numerical simulation of internal tides in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea [J]. 2007(1): 30-37. (in Chinese))
- [16] 凌申. 全新世以来江苏中部地区海岸的淤进 [J]. 台湾海峡, 2006, 25(3): 445-451. (LING Shen. Deposition and forward movement of the coastline in the middle part of Jiangsu since Holocene [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2006, 25(3): 445-451. (in Chinese))
- [17] 徐敏, 陆培东. 波流共同作用下的泥沙运动和海岸演变 [M]. 南京: 南京师范大学出版社, 2005: 232-235. (XU Ming, LU Pei-dong. Sediments moving and coastal evolution under wave and current [M]. Nanjing: Nanjing Normal University Publishing Company, 2005: 232-235. (in Chinese))
- [18] 海港水文规范 (JTJ213-98) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2000, 25-26. (Harbor hydrological norms (JTJ213-98) [S]. Beijing: People Traffic Press, 2000, 25-26. (in Chinese))

Hydrodynamic mechanism of evolution trends in radial sandbank of South Yellow Sea, China *

CHEN Ke-feng^{1,2}, LU Pei-dong², WANG Yan-hong^{1,2}, YU Guo-hua²

(1. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydranuc Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The recent studies show that the water channels and sandbanks in radial sandbank of South Yellow Sea (SYS) have been gradually migrating southward. Hydrodynamic analysis on the mechanism of such evolution trends is thus crucial for the regional development in the coastal zones of Northern Jiangsu province. In this study, the staged evolution of coastlines and seabed topographies since the northern retrieval of the Yellow River estuary is first studied, and a numerical tidal wave model is then established to investigate the hydrodynamic characteristics of the tidal wave system in SYS and evolutions of the Yellow River delta in the different stages. The results show that because of the coastal zone erosions and vanishing of the delta formed by the abandoned Yellow River estuary in Northern Jiangsu province, both tidal elevation and hydrodynamic condition in radial sandbank of SYS have been strengthened, and the strengthened regions are found to be gradually migrating southward. The large-scale southward regional reinforcement of dynamic axis of flow is likely to be one of the major contributing factors causing the entire sandbar regions of SYS migrating southward.

Key words: radial sandbank; abandoned Yellow River delta; coastline change; numerical model; coastal zones of Jiangsu province

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40706034).