

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2022.02.006

1977—2017 年芝罘连岛沙坝地貌演变

孙晓莹, 战超, 余建奎, 任宗海, 许国纯, 王庆

(鲁东大学 海岸研究所, 山东 烟台 264025)

摘 要: 本文基于 GIS 技术对 1977—2017 年芝罘连岛沙坝的岸线变化和海湾冲淤动态进行分析, 发现了连岛沙坝的变化情况及其影响机制。结果表明: 在此期间, 连岛沙坝东西两侧始终处于向海推进趋势; 在快速城市化进程下导致沙坝附近的岸线总体长度增加, 形状趋于复杂, 自然海岸消失, 人工海岸建设不断向海延伸; 通过等深线反映附近海域冲淤变化, 主要体现在芝罘湾侧以人为干预为主, 近岸海域的港口、码头等地侵蚀剧烈, 海湾中心呈严重片状淤积。本研究对明确人类活动、流域水沙及水动力环境变化等对芝罘连岛坝地貌演变的影响, 以及本地区海岸带的可持续利用具有重要指导意义。

关键词: 芝罘连岛沙坝; 海岸带; 地貌演变; 冲淤变化; 人类活动

中图分类号: P732

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2022)02-0170-09

Geomorphology evolution of Zhifu tombolo from 1977 to 2017

SUN Xiaoying, ZHAN Chao, YU Jiankui, REN Zonghai, XU Guochun, WANG Qing

(Institute of Coastal Research, Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract: With the support of GIS technology, analysis of the shoreline changes of Zhifu tombolo and the dynamics of erosion and deposition in the bay from 1977 to 2017 was conducted to study the changes of the tombolo and its influence mechanism. The results show that during this period, the east and west sides of the tombolo have always been seawards. Under the rapid urbanization process, the overall length of the shoreline near the tombolo has increased, the shape has become more complex, the natural coast has disappeared, and the construction of artificial coasts has continued to move seawards. The isobath reflects that the erosion and siltation changes in the nearby sea area is mainly reflected in the human intervention on the side of the Zhifu Bay. Ports and wharves in the coastal waters are eroded severely, and the center of the bay is seriously silting. This study has important guiding significance to clarify the changes in human activities, water and sand and hydrodynamic environment in the river basin, which in turn affect the landform evolution of the Zhifu tombolo, and the sustainable use of the coastal zone in the region.

Keywords: Zhifu tombolo; coastal zone; geomorphic evolution; erosion and deposition change; human activities

地貌演变是一个动态、连续的过程, 反映着自然与社会经济的综合作用。芝罘连岛沙坝位于山东半岛北部海域, 是芝罘岛与大陆之间发育的一条由沙砾组成的天桥, 为典型的连岛沙坝地质景观, 在国内外地质、地理学界颇负盛名, 因其特有的海岸地貌环境引起了众多学者研究。

针对芝罘连岛沙坝在自然条件下的成因机理,

陈国达等学者做过不同程度的探讨^[1-4]。随着区域经济快速发展, 我国海岸线资源形势日趋严峻, 本次研究所选区域对快速城市化引发的海岸线变化已做出敏感响应, 近年来其海岸线变迁幅度较大。张振克曾简述过烟台附近海岸地貌在人类活动下的演变影响^[5]。本文重点研究了 1977—2017 年芝罘连岛沙坝岸线及附近的冲淤变化情况, 并讨论其影

收稿日期: 2021-07-09; 修订日期: 2021-09-15

基金项目: NSFC-山东联合基金 (U1706220); 国家自然科学基金 (41901006; 41471005); 山东省基金 (ZR2019BD005); 山东高校青创科技团队 (2020KJH002)

作者简介: 孙晓莹 (1998—), 硕士研究生。电子邮箱: jiangnan190729@163.com

通讯作者: 战超, 博士, 副教授。电子邮箱: zhanchaolddx@126.com

响机制, 以期为本地区海岸开发管理及海岸带可持续利用服务, 并为后期研究提供参考和依据。

1 区域概况

芝罘岛位于烟台市北部海域, 地理位置为 $121^{\circ}16'E-121^{\circ}32'E$, $37^{\circ}28'N-37^{\circ}38'N$, 是中国最大的陆连岛。连岛沙坝处于黄海、芝罘湾、套子湾包围之中。沙坝大致呈双曲线形, 连接芝罘岛和大沽夹河河口东侧的海积平原。沙坝以西的套子湾为开放海域, 由东芝罘湾与崆峒岛等一系列岛屿构成一个半封闭的小海湾。连岛沙坝为一条高出平均高潮位的砂质堆积体, 其主要构成物质为: 中-细沙 (平均粒径 $0.125\sim 0.35\text{ mm}$)^[3]。区域内盛行偏北风, 为向岸风, 各月最多风向为 NW 向、NE 向。南部发育有本地区最大入海河流: 大沽夹河, 其上游起源于栖霞市低山丘陵区, 下游由内、外夹河汇流而成, 全长 80.1 km , 流域面积 2149.4 km^2 ^[6]。区域气候类型为暖温带季风型大陆性气候, 年均降水量 627.6 mm 。

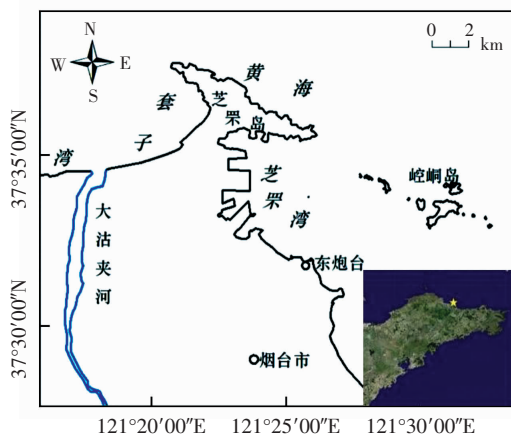


图1 研究区位置

研究区附近海域环境: 连岛沙坝西侧套子湾海域全湾平均水深 12 m , 海域以风浪为主, 常浪为 NW 向, 次常浪为 N、NNW、NNE 向, 平均波高 0.5 m 以上, 属正规半日潮性质^[7]; 芝罘湾内水域开阔, 浪小流稳, 常浪向为 NW 向, 潮汐属正规半日潮性质, 近年来芝罘湾港区水动力条件因围填海处于不断弱化中^[8]。

研究区社会经济概况: 芝罘岛位于烟台市主城区, 烟台市为环渤海地区重要港口城市、中国首批

14 个沿海开放城市之一、中国海滨城市、“一带一路”国家战略重点建设港口城市。沙坝西侧的套子湾主要发展养殖业, 东侧的芝罘湾内建有烟台港等重要港口设施。芝罘岛以果树为主要经济作物^[9], 连岛沙坝因近年来的城市化发展已逐渐纳入烟台市市区范围, 以建筑用地为主。

2 研究方法

2.1 连岛沙坝岸线变化

岸线提取采用平均高潮线法, 通过目视解译多期遥感影像获取不同时期的海岸线位置^[10]。1977—2017 年每 10 年选取一幅研究区遥感影像, 共 5 幅, 以 1977 年、1987 年、1997 年、2007 年、2017 年遥感影像作为数据源, 选取云量少、质量较好的影像。首先对 2007 年的数据进行几何校正, 将其作为标准底图对其余 4 幅影像进行校正, 保证每幅影像误差控制在合理范围内, 之后分别进行数字化处理, 矢量化各时期的海岸线, 最后合并海岸线数据得到连岛沙坝海岸线的空间变化。

采取垂直断面法进行岸线变动建模。使用美国联邦地质调查局 (USGS) 开发的 ArcGIS 扩展模块中数字岸线分析系统 (DSAS) 进行分析^[11-13]。以 1977 年提取岸线的走势形态为基准, 向陆方向缓冲建立基线, 基线总长 27.35 km , 其中套子湾基线长 10.72 km , 芝罘湾基线长 16.63 km 。其次, 统一采用 60 m 采样间距, 依次生成垂直向海基线, 并与所有岸线相交等间距研究断面, 根据岸线整体形态进行基线的局部调整, 更新生成的断面, 避免断面相交, 共生成 459 条研究断面, 其中套子湾 180 条, 芝罘湾 279 条。最后, 根据断面同各时期海岸线相交形成的交点, 利用各交点之间的距离计算芝罘湾岸线的最大变化距离 (SCE) 及端点变化速率 (EPR)。

2.2 连岛沙坝量化数据测量

研究表明沙坝在形成时, 长度近 6 km , 北部宽 0.8 km , 南部宽 6 km , 中间最窄处宽 0.4 km ^[4], 形成时的三部分测量分界已不明确。依据蔡爱智对沙坝的分界^[3], 本文采取的测量分界的北段以芝罘岛与沙坝连接处的潟湖北部为界, 南段以与芝罘岛走向平行的线段连线为界 (西起大沽夹河河口, 东至烟台港附近), 中段以沙坝最窄处为界。采用

表 1 采用遥感影像数据清单

序号	日期	卫星	传感器	波段/个	空间分辨率/m	轨道号	坐标系
1	2017-10-02	Landsat-8	OLI_TIRS	11	15	119/34	WGS-84
2	2007-09-21	Landsat-5	TM	7	30	119/34	WGS-84
3	1997-05-04	Landsat-5	TM	7	30	119/34	WGS-84
4	1987-03-05	Landsat-5	TM	7	30	119/34	WGS-84
5	1977-04-20	Landsat-2	MSS	4	60	128/34	WGS-84

Arcmap 软件中的测量工具,对矫正后的 5 幅遥感影像,依次按北段、南段、中段三部分进行测量。本文分界与沙坝形成时的分界或有不同,测量数据

略有波动,但总体变化趋势一致。

2.3 连岛沙坝附近海域等深线变化

本研究搜集了研究区域 1977 年、1999 年、

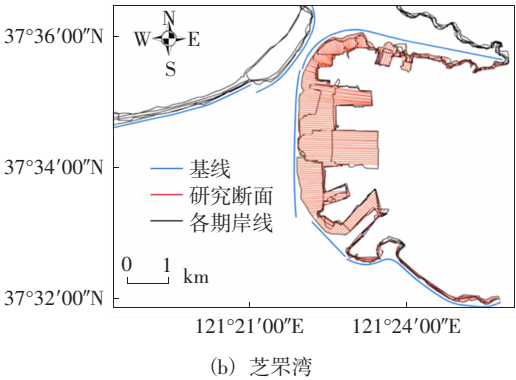
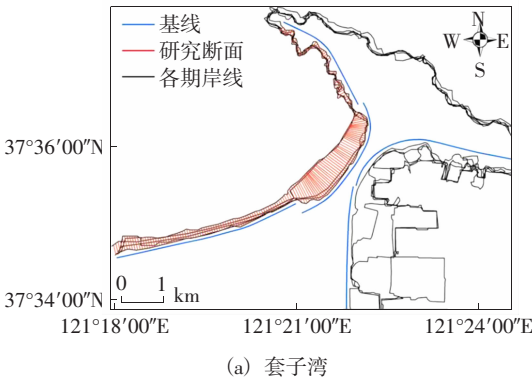


图 2 DSAD 分析所用基线与断面分布

2005 年和 2013 年出版的海图资料 (表 2), 各海图的水深测量时间分别为 1960—1974 年、1994—1997 年、2004 年以及 2010—2012 年, 各海图的平面坐标系有所不同。首先, 采用 Arcmap 软件将所有海图资料均统一为 WGS-84 坐标系, 在坐标系

转化的精度之间存在误差。依据柳光魁等关于转换算法的研究可得: 重合点数越多, 分布越均匀, 转换精度越好^[14-16]。本文实验中每幅图像选取重合点数在 13~18 个之间, 残差平均误差为: $m_x = 0.439$, $m_y = 0.135$, 误差较小, 研究结果可信度较高。

表 2 海图清单

序号	图号	图名	比例尺	出版年份	测量年份	坐标系	基准面
1	10304	烟台港附近	1:35 000	1977 年	1960—1974 年	北京 1954	理论深度基准面
2	11961	烟台港附近	1:35 000	1999 年	1994—1997 年	北京 1954	理论最低潮面
3	11961	烟台港附近	1:35 000	2005 年	2004 年	WGS-84	理论最低潮面
4	11962	烟台港芝罘湾港区及附近	1:25 000	2013 年	2010—2012 年	CGCS2000	理论最低潮面

因研究区域东西部海域变化差异较大, 将研究区域分为连岛坝芝罘湾附近、套子湾附近东西两大部分。之后, 分别进行数字化处理并提取水深和等深线数据。最后, 绘制成 1974—2012 年不同年份连岛沙坝套子湾和芝罘湾附近 0 m、2 m、5 m 和 10 m 等深线对比图。

3 研究结果与原因分析

3.1 芝罘岛连岛沙坝岸线变化

套子湾侧岸线变化幅度较小。北部以 1997 年

岸线为明显分界, 1977—1997 年岸线变化基本稳定。70 年代沙坝中部主要为大片滩涂, 到 1987 年沙坝西侧已有小片区域开发为养殖池, 至 1997 年养殖池已向海扩张 0.47~0.67 km, 但岸线总体变化稳定。此后养殖池有规模地扩展, 到 2007 年岸线已向海延伸 0.5 km, 2007—2017 年养殖池大面积转化为建设用地, 但岸线变幅度较小。南部岸线总体变化幅度小, 期间不断进行防波堤建设加强岸线稳定性 (图 3)。

芝罘湾侧岸线变化明显, 岸线长度增加, 形状趋于复杂。1977 年前主要处于自然演变控制下,

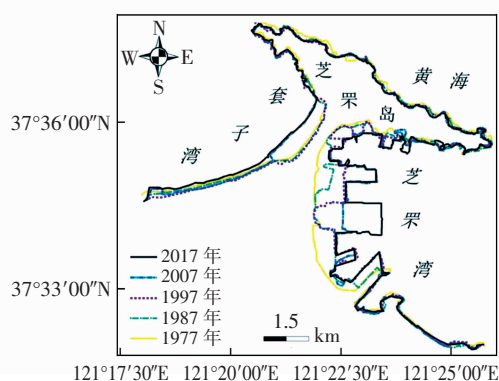
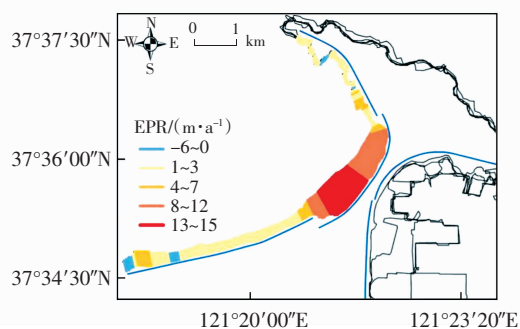


图3 连岛坝不同时期海岸线变化

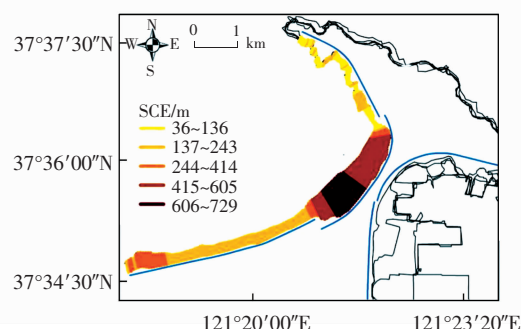
岸线平滑, 朝向芝罘湾呈“C”字形。1978 年近海养殖业迅速发展。至 1987 年, 沙坝中、南部海水养殖使岸线局部向海推进 0.4~0.6 km, 期间大量滩

涂被圈围造陆, 到 20 世纪 80 年代末期滩涂面积仅剩 8.8 hm², 大部分已转为城市建设用地。烟台港等港口设施的建设使芝罘湾一侧的岸线自 1987 年后不断向海推进, 2004 年《中华人民共和国土地管理法》颁布、2006 年“十一五”的规划实施均加速了填海造陆规模发展, 1987—2007 年海岸线向海推进速率最快, 最远推进 1.5 km, 直到 2010 年原国家海洋局开始对围填海实施指标化管理后, 围海造陆趋势才有放缓。1997—2017 年芝罘湾岸线总体长度增加了约 15.78 km, 形状日趋复杂, 自然岸线长度由 13.58 km 缩减至 5.10 km, 人工岸线由 10.27 km 增长至 34.52 km^[17]。

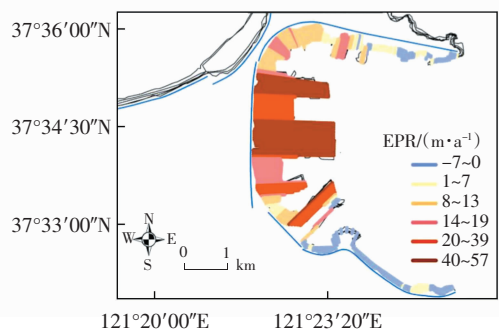
基于 DSAD 生成的 459 条断面中, 套子湾有 180 条, 向海推进与向陆蚀退的分别为 169、11 条。



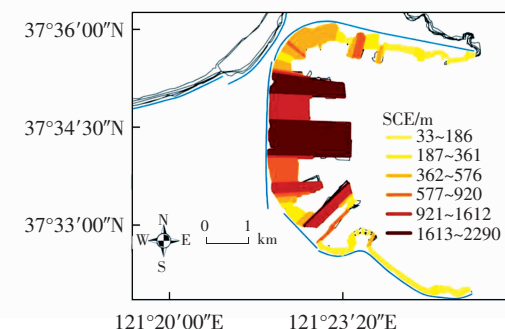
(a) 套子湾-EPR



(b) 套子湾-SCE



(c) 芝罘湾-EPR



(d) 芝罘湾-SCE

图4 1977—2017 年各断面变化速率计算结果和变化最大距离

经分析得到连岛坝套子湾侧 1977—2017 年海岸线变动结果。海岸线向海推进最大距离为 729.1 m, 最大速率 15.4 m/a; 岸线整体平均向海推进 291.49 m, 平均推进速率为 4.95 m/a; 岸线向陆最大后退距离为 242.59 m, 最大速率 6 m/a; 岸线整体平均向陆后退 187.69 m, 平均蚀退速率 2.19 m/a。

在芝罘湾 279 条断面中, 向海前进与向陆蚀退的分别为 183、96 条。经分析得到连岛坝芝罘湾侧 1977—2017 年海岸线变动结果。海岸线向海推进最

大距离为 2289.62 m, 最大速率 56.6 m/a; 岸线整体平均向海推进 747.8 m, 平均前进速率为 17.53 m/a; 岸线向陆最大后退距离为 296.66 m, 最大速率 6.7 m/a; 岸线整体平均向陆后退 115.92 m, 平均蚀退速率 1.51 m/a。

3.2 连岛沙坝量化数据测量

本文所采分界测量数据 (表 3) 表明: 连岛沙坝北段 1997—2007 年呈稳定向海推进趋势, 其中 1997 年前主要为芝罘湾侧大面积围海养殖, 1997

年后东西侧养殖池向海延伸了 0.4 km 左右,其后 10 年岸线变化不大,大面积养殖用地转为建设用地。

连岛沙坝中段 1977—1997 年岸线变化集中在芝罘湾侧,1987 年前为海带养殖场拓宽,而后向人工建筑转变,至 1997 年西港池二期工程交付使用后,开始自北向南大面积围海造陆及码头建设。1997—2007 年岸线增长速度最快,套子湾侧养殖场大规模发展,芝罘湾侧受烟台港区突堤工程、三港池等港口设施建设影响大面积向海推进。2007—2017 年岸线较为稳定,局部地区因码头建设而向

表 3 连岛坝分段长度测量

单位: km

年份	南段宽	中段最窄处	中段最宽处	北段宽
形成时	6.00	0.40	—	0.80
1977 年	8.05	0.52	2.88	0.81
1987 年	7.95	0.49	3.35	1.02
1997 年	7.87	0.49	3.35	1.41
2007 年	7.89	1.25	3.96	1.84
2017 年	7.90	1.30	4.80	1.86

海推进 1.2 km。

连岛沙坝南端自烟台山至东炮台段是较为稳定的自然岸线,变化幅度较小,变化原因主要为夹河

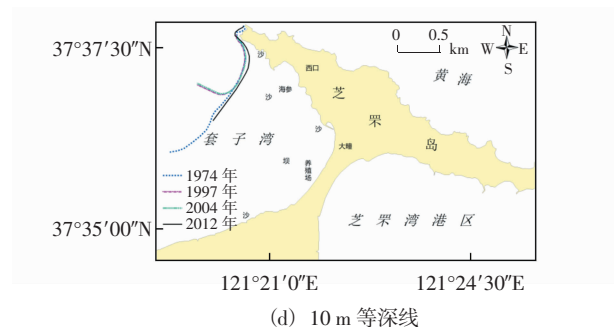
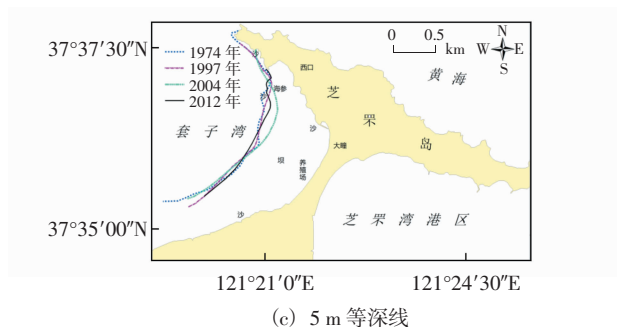
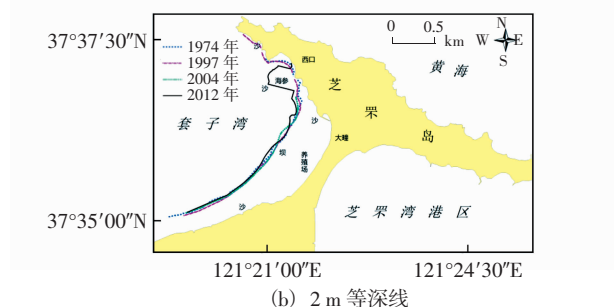
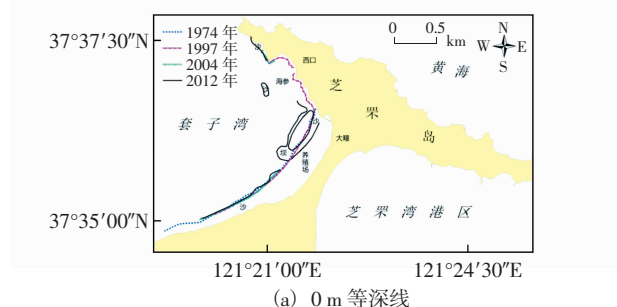


图 5 套子湾不同时期等深线对比

河口在近 50 年来的不断摆动。

总体上连岛沙坝在 1977—2017 年东西侧明显向海伸进,芝罘湾侧岸线向海推进大于套子湾侧。与研究期内变化一致,连岛坝岸线未来仍将处于向海推进趋势。在高速经济发展过程的中,连岛沙坝岸线变化已基本处于人类活动的控制之下。

3.3 连岛沙坝附近海域等深线变化

3.3.1 连岛沙坝套子湾侧冲淤变化 套子湾侧的连岛坝水下延伸体呈月牙形,中间宽、两边窄,海湾地形较为平缓,由海域中心向岸淤积逐渐增加。泥沙由夹河口流出随水流运移方向在东北面受芝罘岛阻挡堆积,自北向南淤积逐渐减轻。近岸处以细沙堆积为主,向海方向逐渐过渡为沙,沉积物粒度不断增大。

0 m 等深线:集中体现在海湾北部区,呈现向

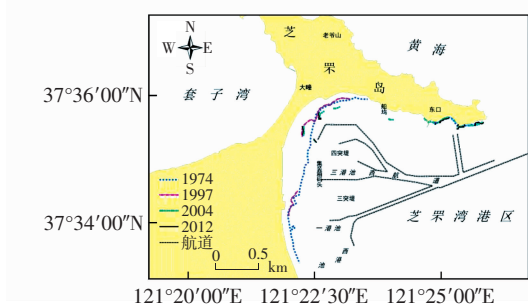
海推进态势。近岸处北部微淤积,中部向南至夹河口呈微冲刷态势。至 1997 年北部等深线向 NW 向延伸 1.2 km,泥沙有所淤涨。2004 年后局部等深线受人为活动影响向海推进约 100 m;海湾中部向南至夹河口,等深线变化不明显,略向东退。

2 m 等深线:总体特征同 0 m 等深线一致,在海湾北部地区,呈现向海推进态势。近岸处北部微淤积,中部向南呈微侵蚀状态。2004 年前变化稳定,至 2012 年等深线最北端较 2004 年向海推进 0.6~0.7 km,最大向西伸进 0.9 km;海湾中部向南至夹河口,等深线变化不明显,略向东退。

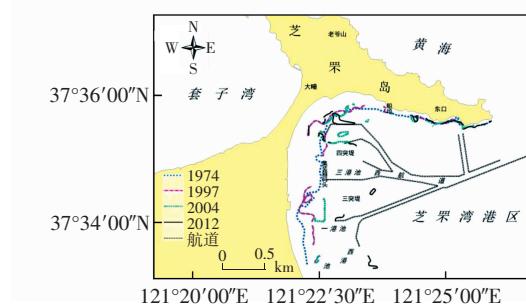
5 m 等深线:总体较为稳定,远岸处呈微侵蚀状态,1997—2004 年间侵蚀最为剧烈,后又向海淤积。最北端等深线向东后退约 1.2 km;中部向南等深线波动后退,局部较 1974 年最大后退

400 m, 后又向海淤进 200~300 m, 近夹河口端总体后退 100 m。

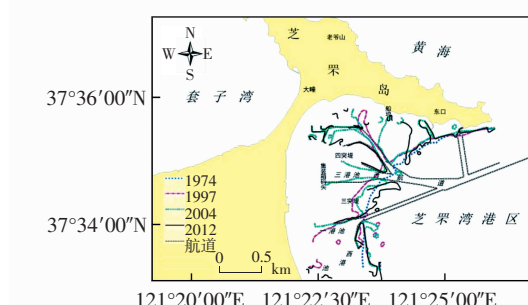
10 m 等深线: 波动变化, 远岸处呈微侵蚀状态。1974—1997 年从等深线中部至南端向 NW 延



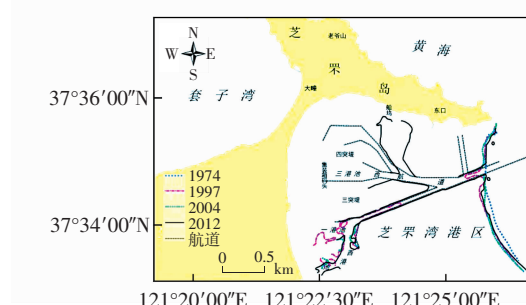
(a) 0 m 等深线



(b) 2 m 等深线



(c) 5 m 等深线



(d) 10 m 等深线

图 6 芝罘湾不同时期等深线对比

伸, 向海推进 500 m 以上, 此后 7 年间保持稳定, 到 2012 年已向岸后退 0.6 km 以上, 走向与 1974 年大致相同。

3.3.2 连岛沙坝套子湾侧冲淤特征 1977—2017 年连岛沙坝套子湾一侧冲淤变化较为稳定, 主要表现为海域近岸不断淤积, 远岸不断侵蚀状态。岸线受人为因素影响向海推进, 海床整体处于微冲刷状态, 等深线整体向密集趋势转变, 这主要与入海泥沙量的减少有关。

1974—1997 年淤积较缓, 北缘淤积有所西移, 中部略侵蚀; 1997—2004 年, 北部海域近岸处等深线向海推进明显, 主要是 2000 年后人为圈围筑坝所致。远岸泥沙量减少存在轻度侵蚀。2004—2012 年, 海域北部受人工养殖场建设影响, 仍以淤积为主, 远岸处以侵蚀为主, 尤其在芝罘岛西南角沿岸侵蚀较严重。

3.3.3 连岛沙坝芝罘湾侧冲淤变化 芝罘湾侧连岛沙坝的水下延伸体自然状态下与套子湾一侧相同, 呈中间宽、两边窄的地貌形态, 芝罘湾侧与崆峒岛构成一个半封闭的小海湾, 沉积物在沙坝近岸处主要为泥沙和泥, 向海湾中心过渡为泥和细沙, 到崆峒岛附近又转为泥质沉积。在近 50 年的演变

过程中, 受陆上人类活动以及航道开发影响, 水下地形变化幅度大, 等深线也日趋复杂化。自北向南有三条主航道, 分别为 NW-SE 走向、W-E 走向和 SW-NE 走向, 在西航道汇合, 之间均为港口设施建设。

0 m 等深线: 在连岛沙坝芝罘湾侧海域趋于消失, 整体向海推进, 看似淤积, 但日趋零碎化的等深线显示近岸侵蚀严重。海域西北部, 1997 年前等深线较为完整, 随后等深线趋于消失、零碎化, 至 2012 年总长约 0.7 km, 较 1974 年向海推进幅度不大; 海域中部向南, 只有 1974 年存在连续的 0 m 等深线, 至 1997 年仅残留一段南北延伸约 0.8 km 的等深线, 后 0 m 等深线在海域中部向南完全消失。

2 m 等深线: 在芝罘湾侧海湾只有 1974 年存在连续等深线, 整体向海推进, 并趋于零碎化, 近岸侵蚀强烈, 海湾内局部小面积淤积严重。北部海湾 1997 年等深线曲折, 较 1974 年局部向岸后退 200~450 m, 呈微侵蚀状态, 随后 18 年间等深线趋于零碎、圈闭化, 较 1974 年向海推进 0.4~0.8 km, 局部出现淤积; 中部向南海域仅局部残留等深线, 最远较 1974 年向海推进 1.7 km, 南段较 1974 年最

大向海推进 1.5 km。等深线零散、圈闭状分布,局部出现淤积。

5 m 等深线:变化复杂,整体不断向岸蚀退,局部呈片状轻度淤积。北端总体向岸后退,1974—1997 年平均向岸后退 150 m,局部沿 NW 走向形成一条长 2 km、平均宽度 150 m 的深槽;到 2004 年深槽处分别向东西扩展,东扩 0.7 km,西扩 1~1.5 km,呈开口朝岸、尖端向海的喇叭状,此处等深线与岸线重合,在其东北向 1.6 km 处发育有一条 NW 走向长 0.7 km、宽不足 100 m 的深槽;至 2012 年等深线向海域中心收缩 0.5~1 km,呈片状淤积。中部向南海域等深线整体向岸蚀退,局部向海淤进。至 1997 年向岸后退 300~400 m,南部沿 SW 走向形成长约 1.8 km、最宽处 1.6 km 的开口向岸、尖端向海的喇叭状深槽,到 2004 年中部海域沿 WE 走向发育有一条长 1.8 km、平均宽度 300 m 的深槽,局部向海淤进 150 m,最大淤进 0.5 km。至 2012 年 5 m 等深线形状更为曲折,最远处较 2004 年向海淤进 0.7 km。

10 m 等深线:整体不断向岸蚀退,局部侵蚀严重。1997 年相较于 1974 年等深线的主要区别为南部近岸处发育有葫芦状圈闭式深槽,南北延伸 1 km,其南部略宽,最窄处约 300 m,北部沿 SW-NE 走向推进 1.3 km。此后等深线逐渐向岸后退,至 2012 年在海湾北端发育有条南北走向条带状深槽,南北长 1.7 km,北宽 1 km,南宽 400 m。

3.3.4 连岛沙坝芝罘湾一侧冲淤特征 1977—2017 年来连岛沙坝芝罘湾侧冲淤变化明显。水下地形复杂且变化率大,但其侵蚀与淤积并非仅是波浪作用下的泥沙堆积,主要是由于烟台港的建设不断填海造陆,原水下岸坡露出水面成为港口码头,距离原岸线越远,深度差值越大,淤积程度越深。由于停泊水位的需要,人工加大了水深深度,造成新建码头附近发生严重侵蚀^[9]。由于湾内航道开发对水深的要求,人工加大水深造成了不同程度的侵蚀,同时形成了海湾内部大面积的轻度淤积。

1974—1997 年,受人类活动影响,等深线已不连续,总体呈向岸后退趋势,在沙坝北缘近岸处冲淤变化不明显,在其附近海湾中形成一条 NW-SE 走向的深槽,而后开发为航道。中部地区因集装箱站和码头建设基本无自然岸线,以侵蚀为主,岸边水深 3 m。在沙坝南缘北部发生侵蚀,南部人

工建筑和大坝处形成泥沙堆积。1997 年西港池已建成,沿西港池向海湾中心开发为航道。

1997—2004 年,芝罘湾港区不断填海造陆使局部岸线向海推进约 1 km,到 2004 年三港池已建成,西航道的开发使水下地形更加复杂。冲淤变化受人类活动影响,在沙坝与芝罘岛连接处的岬角轻度淤积,而向南各港池码头建设处,因人为加大水深造成侵蚀,码头与航道相间的大面积海域均有淤积现象,自北向南逐渐加重。

2004—2012 年,连岛沙坝芝罘湾北部填海造陆与中部三突堤建设,局部岸线向海推进 1.4 km,湾内冲淤变化更为显著,人为加大水深使港口码头附近侵蚀严重,在连岛沙坝北缘与芝罘岛相连处淤积严重,三港池与一港池相间处淤积严重,西港池附近以人为加大水深造成的侵蚀为主。

4 讨论

4.1 人类活动对连岛沙坝地貌演变影响

连岛沙坝作为生态环境脆弱区,最易受人为干预影响。从岸线、沙坝附近海域冲淤变化原因分析可以看出,1977—2017 年以围填海为主的人类活动是连岛沙坝岸线变迁的主因。因其位于烟台市芝罘区城区,1977—2017 年耕地、滩涂、裸地面积大幅缩减,建筑用地显著增长,到 2007 年滩涂面积只占 1979 年的 1/3 (图 7)。1997 年之前以近海养殖业为主,沙坝周围存在大面积的养殖池,到 1997 年后随房地产业扩展逐渐转为海岸住宅区。城市化的快速发展改变了沙坝原有的天然岸线形态,大量人工建筑使岸线变得复杂曲折,大段自然海岸消失。

芝罘湾海域因其特有的地理条件成为建设港口的理想海域^[18]。随着烟台市国内外贸易额在进入 21 世纪后迅速上升,经济总量曾位居山东省第二位,港口码头吞吐量增长迅猛,不断的填海造陆使海岸线向海大幅度推进,到 2007 年芝罘湾港口的人工岸线长度已达 8300 m^[9],其后的 10 年间依然保持较高增长趋势。但人工建筑导致海岸纵剖面陡峭,同时人为加大港口水深使沿岸波浪冲击力增强,造成近岸侵蚀尤为剧烈。而海湾面积缩小加之航道开发,使水下地形复杂多变,航道以外的海域呈现大面积片状淤积,西南部海域因防波堤建筑呈现严重

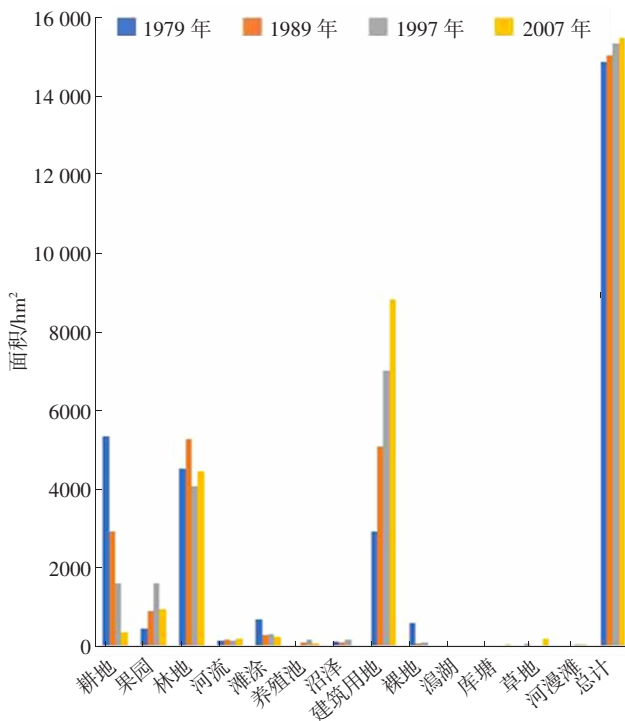


图7 不同时期研究区土地利用类型

的带状淤积。

4.2 流域来沙变化对连岛沙坝地貌演变影响

研究任何地段海岸的冲淤规律，都必须查明该海岸段的主要泥沙来源、泥沙移动方向和主要堆积区等基本情况^[19]。芝罘连岛沙坝受径流、潮汐双向来沙影响，流域来沙变化、浅滩再悬浮搬运的泥沙都是影响其演变的泥沙来源，其中流域来沙变化对其演变影响最大^[20]。连岛沙坝组成物质中的泥沙主要源于南部河流输沙，部分源于北部海岸侵蚀产沙。输沙量最大的河流——夹河，发源于低山丘陵区，河长 80 km，流域面积 2295.5 km²，河流流程短、比降大，汛期径流量大（连续多年占全年平均天然径流量的 80% 以上），年平均入海泥沙为 100×10⁴ t，以粒径大于 2 mm 的中细砂-粗砂为主，在 0 m 等深线内由夹河口向东西两侧递减^[21-22]。1960 年，内夹河上游建成的庵里水库和门楼水库总库容分别为 0.73×10⁹ m³、1.97×10⁹ m³。后期河道下游建设了多条拦河堤坝，入海水沙量明显减少，旱季径流量小甚至出现断流，为明显的季节型河流。烟台市福山站水文局实测数据（图 8）表明夹河 1977—2017 年年径流量明显减少，输沙率也随之降低，多年平均输沙量为 35.4×10⁴ t，最大 65.6×10⁴ t^[23-24]。其他河流输沙量较少，年总输沙量不大于 5×10⁴ t。流

域来沙量的减少，使得连岛沙坝淤进趋势减弱，加强了沿岸侵蚀。

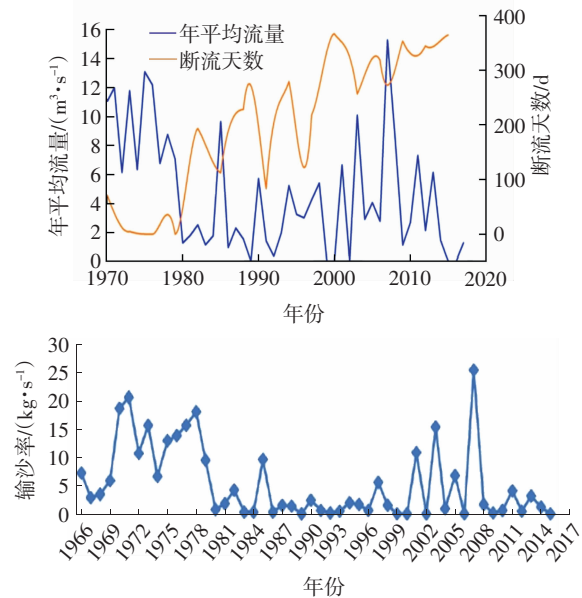


图8 福山站实测大沽夹河径流信息

4.3 水动力条件变化对连岛沙坝地貌演变影响

研究海域较小，整体水动力条件相对较弱，但大规模的社会经济活动诱发了周围海域环境的水动力变化，水动力条件反过来影响连岛沙坝的地貌发展。海洋水动力系统稳定性较差的小海湾对围填海活动的响应更为剧烈^[25]。套子湾海域风浪季节变化明显，夏季盛行 SSE 向风、冬季盛行 NW 向风，常浪向为 N、NW、NNW 向；次浪向为 NNE 向；强浪向为 N 向，最大波高 7 m^[21]。芝罘湾与周围担子岛、崆峒岛等构成半封闭海湾，波浪、潮汐作用均较弱。芝罘岛主要为基岩海岸，被侵蚀的沿岸物质向海湾运输，但数量较少。2000 年以前附近海域水体含沙浓度约为 150 mg/L，之后逐年降低，到 2006 年已降至 20 mg/L。以悬浮物质为主，粉砂含量为 50%~60%，黏土含量为 18%~24%，砂含量为 15%~25%，砾含量小于 2%^[22,26]，其中芝罘湾沉积物粒度较套子湾更小。海域总体含沙量低，波浪、潮流作用不强，泥沙运动较弱，很难产生长距离的泥沙沿岸运移。在流域供沙量不足情况下，连岛沙坝附近海域中心易受侵蚀，同时人为建筑、港口、航道等压缩了海湾的空间尺度，缩短了驻波型潮波的反射距离，引起湾内潮流减弱^[27]，连岛沙坝两侧海湾的平均潮差与纳潮量在研究时间段内均呈现减小趋势^[28]，使得海域水下地形日趋复杂，沙

坝水下延伸体外缘侵蚀后退,内侧局部区域淤积严重。

5 结论

本研究搜集了 1977—2017 年 5 期的芝罘连岛沙坝遥感影像及 4 期海图资料,对比分析发现此段时期芝罘连岛沙坝的地貌演变主要呈现以下主要特征:

(1) 1977—2017 年,芝罘连岛沙坝由沙坝中心向东西两侧海域横向拓宽明显,芝罘湾侧岸线向海推进幅度大于套子湾侧,连岛沙坝岸线中段变幅最大,无自然岸线,南端以较稳定的自然岸线为主,变幅小。连岛沙坝海岸线曲折复杂,已基本处于人为控制中。

(2) 连岛沙坝附近海域海湾中心(10 m 等深线附近)出现侵蚀后退,套子湾侧冲淤相对稳定。芝罘湾侧变化率大,近岸处附近海域港口、码头等地侵蚀严重,局部呈现严重的斑状淤积,造成湾内地形复杂,稳定性差,但其侵蚀与淤积并非仅由波浪作用下的泥沙堆积导致,主要是由于人为填海造陆、加大水深而诱发的冲淤变化。

(3) 流域来水来沙减少是近年来芝罘连岛沙坝附近海域海湾中心受侵蚀的主要原因,近岸边滩人工围垦、填海造陆、港口建设、航道开发等使海湾面积缩小,湾内水动力条件减弱,对连岛沙坝地貌演变造成的影响值得关注。

参 考 文 献

- [1] 陈国达. 中国岸线问题[J]. 中国科学, 1950, 1(2/4): 2-28.
- [2] 张振克. 芝罘连岛沙坝北端封闭潟湖成因与发育过程[J]. 海洋科学, 1996, 5: 59-63.
- [3] 蔡爱智. 论芝罘连岛沙坝的形成[J]. 海洋与湖沼, 1978, 1: 1-13.
- [4] 王庆, 仲少云, 毛爱华, 等. 烟台芝罘连岛沙坝地区全新世以来的地貌与演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(3): 31-36.
- [5] 张振克. 人类活动对烟台附近海岸地貌演变的影响[J]. 海洋科学, 1995(3): 59-62.
- [6] 张振克. 胶东大沽夹河滨海平原地貌发育过程[J]. 海洋科学, 1994(6): 43-45.
- [7] 李孟国, 左书华, 许婷, 等. 烟台套子湾水动力泥沙问题研究[J]. 水运工程, 2018, 11: 25-32.
- [8] 王璐, 陈焰, 张鲁骏, 等. 围填海对芝罘湾潮流场和纳潮量的影响研究[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 2: 32-39.
- [9] 邸向红, 王周龙, 王庆, 等. 土地利用变化对芝罘岛连岛沙坝附近海岸带的影响[J]. 海洋科学, 2011, 35(8): 76-82.
- [10] 康波, 林宁, 徐文斌, 等. 基于遥感和 GIS 的长岛南五岛近 30 年海岸线时空变迁分序[J]. 海洋通报, 2017, 36(5): 594.
- [11] 杜逢超, 徐艳东, 于宁, 等. 近 40 年芝罘湾岸线时空演变及围填海活动评价[J]. 海洋科学, 2018, 42(4): 28-35.
- [12] GAO Y, WANG H, SU F Z, et al. The analysis of spatial and temporal changes of the continental coastline of China in recent three decades[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 25(6): 31-42.
- [13] OYEDOTUN T D T. Shoreline geometry: DSAS as a tool for historical trend analysis [J]. Geomorphological Techniques, 2014, 3(2): 1-12.
- [14] 柳光魁, 王振禄, 赵永强, 等. BJ-54 坐标系与 WGS-84 坐标系转换方法及精度分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2007, 30(3): 167-173.
- [15] 林吉兆, 贾登科, 武警. CGCS2000 及 WGS84 坐标系若干问题探讨及应对策略[J]. 水运工程, 2014, 2: 27-30.
- [16] 谢建春, 陈同峰, 姚磊, 等. 1980 西安坐标系与 2000 坐标系坐标成果转换方法及精度分析[J]. 山东国土资源, 2012, 28(8): 58-60.
- [17] 孙贵芹, 徐艳东, 林蕾, 等. 基于遥感和 GIS 的烟台芝罘湾海岸线变迁研究[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(1): 140-152.
- [18] 赵迎春, 张瑞安. 芝罘湾港区泥沙与海流特征[J]. 海洋通报, 1990, 9(1): 7-16.
- [19] KOMAR P D. Coastal erosion—underlying factors and human impacts [J]. Shore & Beach, 2000, 68(1): 3-16.
- [20] CHEN J Y, CHEN S L. Estuarine and coastal challenge in China[J]. Marine Geology Letters, 2002, 18(1): 1-5.
- [21] 左书华, 韩志远, 许婷. 烟台套子湾海域表层沉积物粒度分布特征及其动力响应[J]. 泥沙研究, 2013, 5: 41-46.
- [22] 吕纪轩, 胡日军, 李毅, 等. 烟台北部近岸海域表层沉积物粒度分布及沉积动力环境特征[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(4): 27-36.
- [23] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第三分册: 山东半岛北部和东部海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [24] 刘强. 水利工程影响下的水文情势分析及径流还原计算技术研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- [25] 林磊, 刘冬艳, 刘哲, 等. 围填海对海洋水动力与生态环境的影响[J]. 海洋学报, 2016, 38(8): 1-11.
- [26] 汤世凯, 于剑峰, 李金鹏, 等. 烟台芝罘湾底质沉积物粒度特征和沉积动力环境研究[J]. 山东国土资源, 2020, 36(1): 22-28.
- [27] LIN L, LIU Z, XIE L, et al. Dynamic governing the response of tidal current along the mouth of Jiaozhou Bay to land reclamation[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(4): 2958-2972.
- [28] 朱金龙, 朱淑香, 魏潇, 等. 围填海影响下的芝罘湾水动力变化的数值研究[J]. 海洋湖沼通报, 2020, 6: 61-71.

(本文编辑: 崔尚公)