

近 10 年珠海海岸带海岸线时空变化遥感分析

杨 雷^{1,2}, 孙伟富¹, 马 毅^{1,2}, 任广波¹

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 为了更有效地研究珠海市海岸带海岸线的变化, 基于 2005 年、2010 年和 2015 年 3 期覆盖珠海市海岸带的高分辨率 SPOT-5、GF-1 和航空 DOM 遥感影像, 建立了珠海海岸带岸线分类体系, 并采用人机交互方式提取了 3 期 12 类海岸线信息。对海岸线长度及海岸蚀淤情况进行分析, 结果表明: (1)2005~2015 年珠海市海岸带海岸线总体长度从 470.69 km 增长到 496.95 km, 年平均增长 2.38 km; (2)2005~2015 年珠海市海岸带岸线中, 人工岸线一直占较大比重, 且 10 年间呈持续增长状态, 总长度增长了 40.21 km, 而此期间的自然岸线却减少了 13.95 km; (3)珠海市海岸带侵蚀面积为 0.98 km², 扩张面积为 34.75 km²。港口码头和建设岸线是扩张主因, 养殖围堤岸线、砾石岸线、基岩岸线长度逐年递减并向内陆侵蚀; (4)珠海市高栏港区附近岸线变化最为剧烈, 实地调查发现该地区港口从 2008 年开始建设并逐年向外扩张, 至 2015 年扩张面积为 27.65 km², 平均扩张速率为 3.4 km²/a。通过以上分析, 可以得出近 10 年珠海市海岸带海岸线变迁是海岸开发所引起的, 港口码头建设是人类开发海岸的主要方式。

关键词: 海岸线; 珠海; 高分影像; 变迁分析; 蚀淤分析

中图分类号: P748 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)02-0020-09

DOI: 10.11759/hyxx20160902001

人类不断开发海洋, 海陆相互作用逐渐加强, 海岸带的开发变得尤为活跃, 岸线变迁也变得剧烈且复杂。海岸线变迁蕴含着非常丰富的信息, 不仅反映出人类改造利用海岸的活动, 同时影响着海岸的生态环境和沿岸居民的生活发展。因此, 海岸线变迁的动态监测, 可为沿海地区的社会经济发展、生态自然保护、沿岸工程建设提供科学指导和决策作用。

珠海市位于广东省西南部, 是我国最早开放的 4 个经济特区之一, 是全国经济最发达的城市群所在区域, 也是珠江三角洲的交通要地。自改革开放以来, 珠海市成为我国重要的通商口岸和对外交往的前沿城市。然而, 由于人类的改造活动逐年增加, 近年来珠海市海岸带岸线不断向海推移, 对沿岸居民和生态环境造成很大影响, 故亟需明确珠海市岸线变迁情况。关于岸线变迁监测与分析, 国内外学者已进行了一些研究。在岸线提取方法上, 可归结为自动提取和人机交互提取两种。在自动提取研究中常用归一化水体指数 NDWI 及改进的归一化差异水体指数 MNDWI 作为水陆分割算子, 利用边缘检测提取水边线^[1-5]; 还有学者以水陆在近红外波段不同的光谱响应为原理, 提出了基于遥感影像亚像元的岸线提

取方法^[6-7]; 后续发展中, 也有学者结合面向对象和岸线纹理或光谱特征进行岸线提取^[8-10]。在人机交互提取岸线研究中, 国内外学者结合研究区实际情况, 给出了相应提取原则并进行了提取和分析^[11-22]。在海岸线变迁研究方面, 国内外科研人员在岸线提取的基础上, 结合岸线空间分布^[23-25]、蚀淤情况^[26-27]、驱动力^[28-30]、变迁速率^[30-34]等进行了不同地区典型岸段的演变分析。在上述研究中, 主要利用 Landsat 系列和 HJ-1 号等中低分辨率影像进行岸线信息提取, 缺乏高分辨率遥感影像数据的支持。此外, 国内外对珠海市海岸线变迁进行详细、具体的分析研究较少。

本文基于 2005 年、2010 年和 2015 年覆盖珠海市的高分辨率遥感影像, 采用人机交互的方法, 结

收稿日期: 2016-09-02; 修回日期: 2016-11-25

基金项目: 国家高分重大专项; 中央级公益性专项(2015T03)

[Foundation: National Major Projects of High Resolution; Basic Scientific Fund for National Public Research Institutes of China, No. 2015T03]

作者简介: 杨雷(1991-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事海岸带遥感与测绘研究, 电话: 17864229390, E-mail: yanglei@fio.org.cn; 马毅(1973-), 通信作者, 男, 内蒙古锡盟人, 研究员, 主要从事海岛海岸带遥感与应用、湿地高光谱遥感研究, 电话: 0532-88967094, E-mail: mayimail@fio.org.cn.

合实地调查资料,建立适用于珠海市海岸带海岸线的分类体系并提取珠海市 3 期海岸线信息,然后根据海岸线提取结果对珠海市海岸线变迁情况、变化速率和变迁原因进行分析。最后,选取变化剧烈的典型岸段进行详细分析,统计典型岸段岸线的进退情况。

1 研究区概况

珠海市位于中国广东省,东望香港,南连澳门,西邻江门,北接中山。地处 $21^{\circ}48' \sim 22^{\circ}27'N$ 、 $113^{\circ}03' \sim 114^{\circ}03'E$,是珠三角海洋面积最大、岛屿最多(岛屿有 146 个,集中于东部海域的万山群岛)和海岸线最长的城市。珠海西岸以人工岸线为主,沿程多为港口码头和建设岸线,间有沙滩及养殖区,湾内多基岩、沙质、砾石 3 种岸线,东部沿岸多为道路且自然海岸保有率相对较高,自然景观优良。珠海地区被北东、北西向断裂切割成断块式隆升与沉降的地貌单元,形成断块隆升山地与沉降平原。地形以丘陵为主,陆内丘陵、山地和平原等为交错的水网分割。珠海属亚热带季风气候,冬无严寒,雨量充沛,常受南亚热带季候风侵袭,多雷雨,年平均气温 $22.3^{\circ}C$,年降雨量为 $1\ 770 \sim 2\ 300\ mm$ 。珠海市下辖香洲、金湾、斗门 3 个行政区,设有横琴新区以及高新技术产业开发区、高栏港经济区、保税区、万山海洋试验开发区、富山工业园、航空产业园 6 个经济功能区。珠海市人口占全省常住人口总量的 1.5%,是广东省人口规模最小的地级市。研究区范围见图 1。

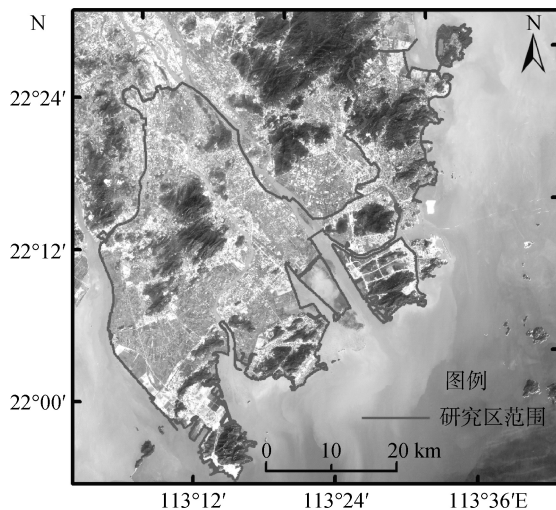


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic of the study area

2 数据及处理

2.1 数据基础

考虑到珠海市海岸线特点、数据的质量和可获得性,本研究以 5 a 为间隔选择影像数据。共收集了覆盖珠海市海岸带的 SPOT-5 卫星影像 3 景,航空 DOM 影像 7 景,高分一号(GF-1)卫星影像 4 景。具体所选数据信息详见表 1。

表 1 影像信息统计

Tab. 1 Information of remote sensing image

| 影像类型 | 成像时间 (年) | 地面分辨率 (m) | 坐标系 |
|--------|-------------|--------------|---------------|
| SPOT-5 | 2005 | 2.5 | 1980 西安坐标系 |
| 航空 DOM | 2010 | 0.5 | CGCS 2000 坐标系 |
| GF-1 | 2015 | 2 | WGS84 坐标系 |

2.2 数据预处理

为保证数据的几何精度一致,本文对影像数据进行了预处理。(1)坐标系转换,用于分析的影像资料所采用的坐标系各有不同,为了消除影像存在的坐标系统差异,采用珠海市七参数模型把 SPOT-5 和 GF-1 影像坐标系统一至 CGCS 2000 坐标系;(2)影像配准,收集的遥感影像因空间坐标系和校正精度不同,需对其进行重新匹配,以得到相同坐标系下的同名点匹配的 3 期遥感图像。以校正过的 2010 年航空 DOM 为基准影像,配准 SPOT-5 和 GF-1 影像,使 3 期图像在 CGCS2000 坐标系下,保证任意 2 期图像上相同地物的准确匹配,消除由分辨率差异以及坐标系转换造成的影像错位情况。

考虑研究区域情况,本文校正方法采用二次多项式。为了保证海岸线信息提取的空间准确性,配准时,每景影像选取均匀分布的同名地物点 15 个,精度检验点 5 个,分布在影像边缘、海岬顶点处和海湾的凹形深处,按照误差从大到小排序,删除误差较大的匹配点,调整到总的 RMS 值小于 0.5 个像素。最后应用精度检验点验证,保证每幅影像配准精度优于 0.5 个像元。

3 海岸线信息提取

在海岸的发育过程中,除了波浪作用外,还受到潮汐、海流、地壳运动、地形、入海河流、海平面变化等诸多因素的影响。复杂的影响因素造就了复杂的海岸环境。因此,到目前为止还没有公认的海岸类型划分系统,海岸类型通常依据区域特点划分。

本研究在 908 专项“海岛海岸带卫星遥感调查技术规程”^[35]海岸线分类体系基础上, 结合具有海岸带地物信息表现力较好的珠海市 3 个时相的遥感影像, 通过分析它们的色、形和位三方面的特征, 将珠海海岸线划分为人工岸线和自然岸线两个一级类。

自然岸线又划分为基岩、砂质、砾石、淤泥质、河口和生物岸线 6 个二级类; 人工岸线类型以国家海洋局制定的海洋功能区类型^[36]为标准, 参考珠海市海岸开发现状, 分为港口码头、建设、堤坝、养殖围堤、道路和闸 6 个二级分类(表 2)。

表 2 海岸线分类

Tab. 2 Classification of shoreline

| 一级类海岸线 | 二级类海岸线 |
|--------|--------------------------------|
| 自然岸线 | 基岩岸线、砂质岸线、砾石岸线、淤泥质岸线、河口岸线、生物岸线 |
| 人工岸线 | 港口码头岸线、建设岸线、堤坝、养殖围堤岸线、道路、闸 |

4 海岸线时空变化分析

本文采用目视解译方式提取海岸线, 综合现场

调查、海图及地形图对解译结果进行修正。海岸线信息提取结果见图 2, 各类型海岸带海岸线统计结果见表 3。

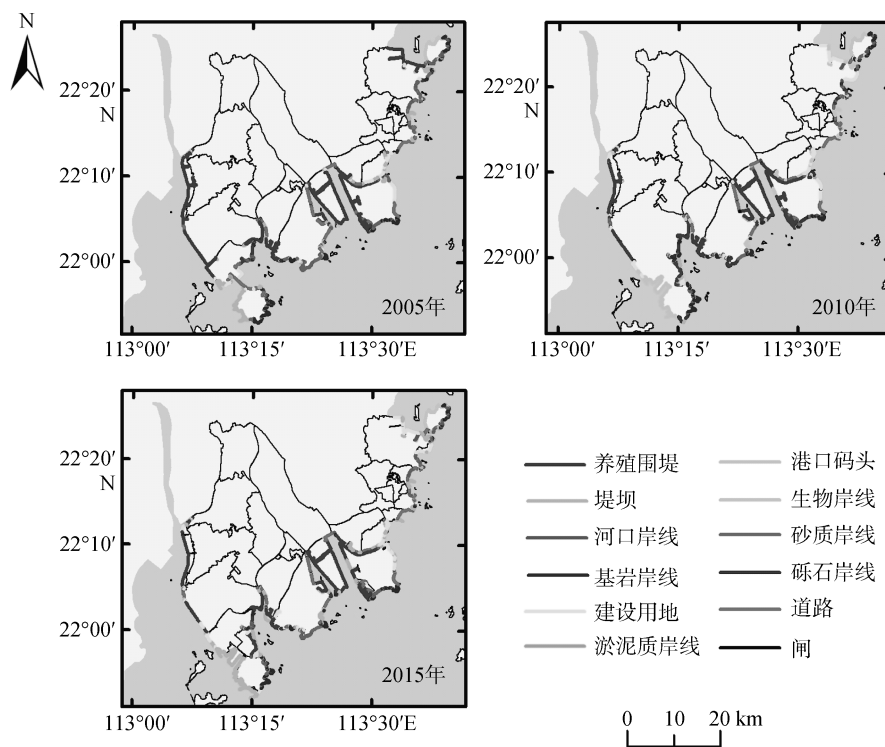


图 2 不同时期的海岸带海岸线分布

Fig. 2 The shorelines distribution in different periods

4.1 海岸线概况分析

数据表明, 2005~2015 年珠海市海岸带岸线长度呈持续增长趋势。2005 年岸线总长度为 470.69 km, 至 2010 年海岸线增长了 18.01 km, 年增长速率为 3.6 km/a。到 2015 年, 海岸线总长度达到 496.95 km, 较 2010 年增长 8.25 km, 年增长速率约为 2.06 km/a。具体长度变化如图 3 所示。

由表 3 可知, 近 10 年珠海市 3 期岸线中, 人工岸线占有较大比重并处于持续增长状态。2005 年人工岸线长度为 362.72 km, 所占总岸线的比重为 77.14%, 经过 5 年开发建设, 到 2010 年人工岸线长度达到 383.67 km, 比例上升至 78.51%, 增长速度达 4.19 km/a。到了 2015 年, 人工岸线长度达到 402.93 km, 所占比重上升了 2.57%, 增长速度达 3.85 km/a; 与之相对应, 自然岸线则有一定程度的减少, 两个阶段的减

表 3 珠海市各时期各类型海岸带海岸线长度统计

Tab. 3 Statistics of all types of shoreline length in different periods

| 一级类岸线 | 二级类岸线 | 岸线长度(km) | | | 岸线所占总岸线比例(%) | | |
|-------|-------|----------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| | | 2005 年 | 2010 年 | 2015 年 | 2005 年 | 2010 年 | 2015 年 |
| 自然岸线 | 基岩岸线 | 39.49 | 35.52 | 34.97 | 8.39 | 7.27 | 7.04 |
| | 砂质岸线 | 18.58 | 16.63 | 17.10 | 3.95 | 3.40 | 3.44 |
| | 砾石岸线 | 36.01 | 31.19 | 22.19 | 7.65 | 6.38 | 4.47 |
| | 生物岸线 | 11.18 | 11.99 | 11.50 | 2.38 | 2.45 | 2.31 |
| | 河口岸线 | 1.64 | 5.57 | 4.35 | 0.35 | 1.14 | 0.88 |
| | 淤泥质岸线 | 1.07 | 4.13 | 3.90 | 0.23 | 0.84 | 0.78 |
| | 小计 | 107.97 | 105.03 | 94.02 | 22.94 | 21.49 | 18.92 |
| 人工岸线 | 堤坝 | 2.26 | 12.43 | 20.47 | 0.48 | 2.54 | 4.12 |
| | 港口码头 | 70.10 | 112.48 | 134.10 | 14.89 | 23.02 | 26.99 |
| | 建设岸线 | 32.72 | 43.10 | 52.85 | 6.95 | 8.82 | 10.63 |
| | 养殖围堤 | 195.76 | 166.66 | 144.52 | 41.59 | 34.10 | 29.08 |
| | 闸 | 0.90 | 1.57 | 2.13 | 0.19 | 0.32 | 0.43 |
| | 道路 | 60.98 | 47.43 | 48.86 | 12.96 | 9.71 | 9.83 |
| | 小计 | 362.72 | 383.67 | 402.93 | 77.06 | 78.51 | 81.08 |

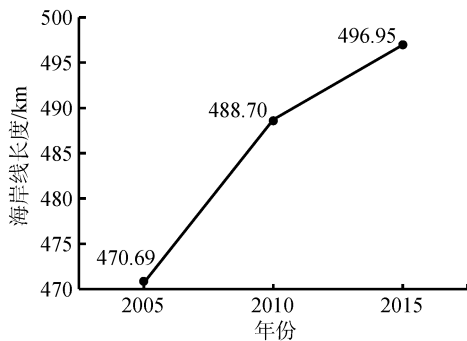


图 3 珠海市 3 期线海岸带海岸线长度变化图

Fig. 3 The change of shoreline length in Zhuhai in the three periods

少速度分别为 0.72, 2.76 km/a, 减少速度逐年加快, 表明珠海市开发建设速度增加, 岸线类型也随之改变。同时, 这也表明人类活动对珠海市岸线的变迁影响最大。

4.2 二级类海岸线变迁分析

根据分类体系的二级分类标准, 对提取的珠海市 3 期岸线结果进行统计, 统计的自然岸线结果如图 4 和图 5 所示。

由图 4 可得知, 近 10 年珠海市自然岸线以基岩和砾石岸线为主, 但其长度变化处于持续缩减状态。2005~2015 年基岩岸线长度分别为 39.49, 35.52 和 35.52 km, 年平均减少速率为 0.36 km/a。从变化幅度

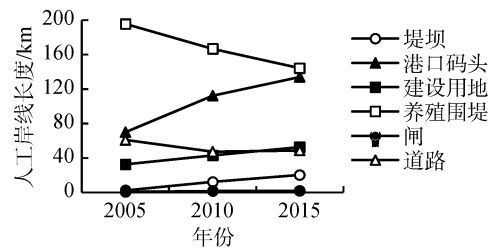


图 4 3 期自然岸线统计结果

Fig. 4 The nature shoreline length changes in the three periods

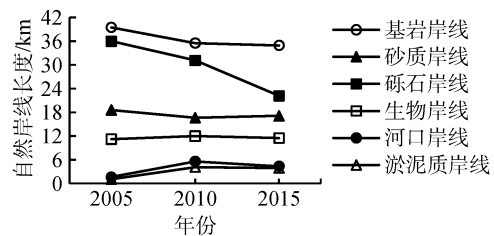


图 5 3 期人工岸线统计结果

Fig. 5 The artificial shoreline length changes in the three periods

来看, 砾石岸线变化最大, 近 10 年砾石岸线长度为 36.01, 31.19 和 22.19 km, 岸线长度减少了 13.82 km, 年平均减少速率为 1.26 km/a。其余自然岸线中, 砂质岸线长度变化趋势为先减少后增加, 其中岸线长度减少速率为 0.39 km/a, 增长速率为 0.1 km/a。2005~2015 年生物岸线变化相对稳定, 到 2015 年岸线长度为 11.50 km, 增加了 0.32 km, 因自然作用导致生物岸线长度产生了波动。河口岸线和淤泥质岸线所占

自然岸线长度比例较少,但变化却较为激烈。2005~2010年间河口岸线处于剧烈增长状态,以0.79 km/a速率增长到5.57 km,因填海处河道开挖产生新的河流,2010~2015年变化微弱,岸线长度减少到4.35 km,主由防洪堤坝建设导致部分后口岸线消失。在2005~2010年淤泥质岸线增长相对较剧烈,岸线长度由1.07 km增长到4.13 km,主要是部分废弃养殖区转化为淤泥质岸线,2010~2015年岸线长度保持平稳,总体年增长速率约为0.28 km/a。总体而言,自然岸线的消失离不开人类的活动,其中大部分消失的基岩和砾石岸线转化为了人工岸线,部分砂质岸线的增长也是开发保护旅游资源的现状所致,所以自然岸线的变化情况说明了近10年珠海市正不断开发建设海岸线。

如图5所示,人工岸线中养殖围堤和港口码头变化最为剧烈,其中养殖围堤岸线的急剧减少是发展了港口码头岸线的结果。20世纪70年代珠海市以水产养殖业为主,人工岸线大部分为养殖围堤,到了21世纪珠海市加快发展,港口建设逐步增多,养殖围堤逐步被开发为港口码头。近10年养殖围堤岸线岸线长度的减少速率为5.1 km/a,港口码头岸线的增加速率为6.4 km/a,至2015年,养殖围堤和港口码头岸线分别达144.52 km和134.10 km。闸和建设岸线呈增长状态,长度分别由2005年的0.9 km和32.72 km增长到2015年的2.13 km和52.85 km,年平均增长速率分别约为0.12 km/a和2.01 km/a。道路岸线的变化呈波动状态,2005年到2010年岸线长度减少了13.55 km,平均年减少速率约为2.71 km/a,减少原因为高栏港填海造地使得原有的跨海公路被围在岛内,2010年至2015年略微上升,增加了1.43 km。珠海市闸的长度基本保持一致,同时堤坝岸线逐年递增,增长速率为1.82 km/a。

5 海岸线变迁速率与典型岸段变迁分析

5.1 珠海市海岸线进退

根据提取的2005年、2010年和2015年3期岸线计算海岸线2005~2010年和2010~2015两期岸线进退情况,具体如表4所示。

珠海市海岸带岸线总体以向海扩张为主,扩张了34.75 km²,回退了0.98 km²,其中2005~2010年向海扩张最为剧烈,扩张面积达31.63 km²,年均扩张面积为6.32 km²。扩张区域集中在高栏岛,以建设港

表4 2005~2015年岸线进退面积

Tab. 4 The change area of shoreline in 2005—2015

| 时间 | 面积(km ²) | |
|------------|----------------------|------|
| | 扩张 | 回退 |
| 2005~2010年 | 31.63 | 0.21 |
| 2010~2015年 | 3.12 | 0.77 |

口码头用地为主,而此间海岸线回退面积较小,仅为0.21 km²。2010~2015年海岸线扩张放缓,扩张面积为3.12 km²,海岸线回退面积为0.77 km²,具体海岸带海岸线进退如图6所示。

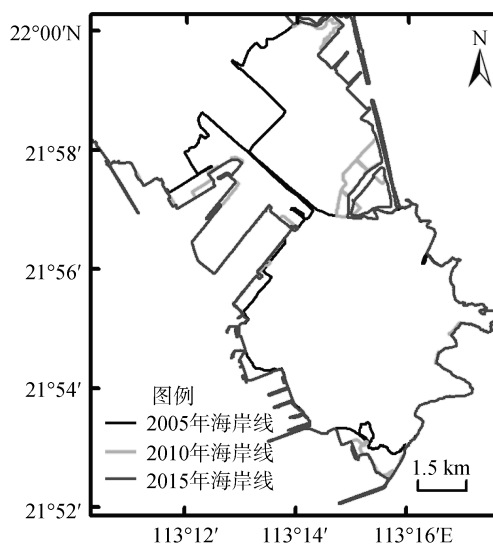


图6 珠海港高栏港区岸线变迁

Fig. 6 The shoreline change of the Gaolan Port in Zhuhai

5.2 速率分析

运用端点变化率(End Point Rate, EPR)方法来反映海岸线的净变化特征,计算方法为垂线和两期岸线的交点到基准线距离之差除以两期岸线间隔时间。以2005和2015两期的珠海海岸带岸线外接多边形向陆地纵深2000 m的缓冲边界作为基线,基线长419.1 km,利用“DSAS”工具模块,以1000 m为间隔自西向东沿基线共生成417条断面,对其进行编号(1~417),利用断面进行计算,计算结果根据区域分成1~68, 69~130, 131~352和353~417四个部分展示,结果如图7。

2005~2015年,断面1~断面68岸线变化速率不明显,主要位于崖门水道沿岸,沿程以养殖用地为主,并未进行建设开发。断面69~断面96和断面111~断面130两处海岸线变化较为剧烈,从影像上显示两处均位于高栏港区域并且该区域正在围海造地,

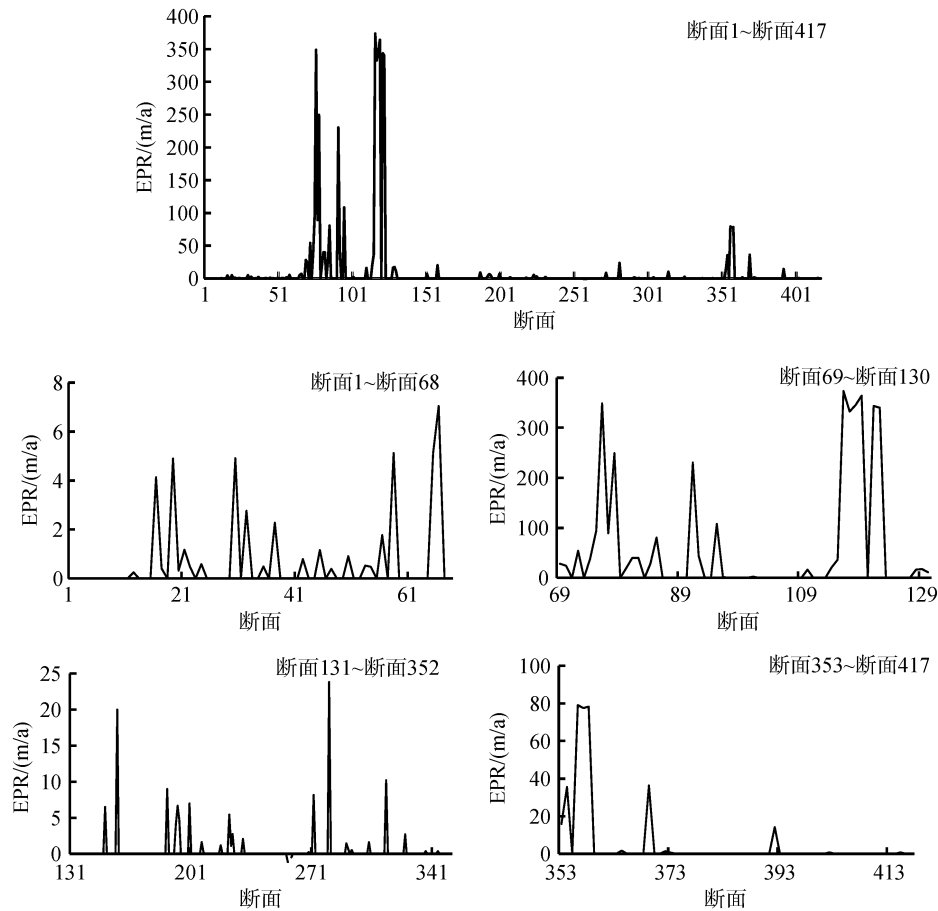


图 7 2005~2015 年珠海岸线 EPR 计算结果

Fig. 7 The results of Zhuhai coastline EPR during 2005–2015

进行港口码头等的海岸工程建设，从而导致变化速率突增。断面 131~断面 352 处在三灶岛区域，该区域海岸线近 10 年变化较小，变迁是以自然为主导。断面 354~断面 359 变化速率突增，位于淇澳岛附近，原因为工程建设向海扩张，而后沿程断面 360~断面 417 海岸线变化速率不大。

5.3 典型岸段分析

从 EPR 分析中可得知，变化最为激烈的区域为高栏港区域。该区属于珠海市高栏港经济区，规划建设为中国现代化港口新区。高栏港具备良好的自然条件，2003 年开始围海造地，高栏岛从西面开始工程建设，珠海港西北方向滩涂区被围垦为养殖区。自 2008 年底，珠海港高栏港区缘于政策机遇大力进行海岸港口建设，整个高栏港有合围之势。近 10 年高栏港区海岸线长度统计结果如表 5 所示。

由表 5 可知，高栏港区域海岸线变化较为复杂，10 年间海岸线变迁方向以向海扩张为主。自然岸线总长度减少了 7 km，部分自然岸线消失并转化成人

表 5 不同时期高栏港区域海岸线长度

Tab. 5 The length of shoreline in Gaolan Port in different period

| 一级类岸线 | 二级类岸线 | 岸线长度(km) | | |
|-------|-------|----------|--------|--------|
| | | 2005 年 | 2010 年 | 2015 年 |
| 自然岸线 | 基岩岸线 | 14.18 | 12.92 | 12.70 |
| | 砂质岸线 | 3.37 | 3.41 | 2.75 |
| | 砾石岸线 | 8.41 | 9.80 | 3.84 |
| | 淤泥质岸线 | 0.71 | 0.38 | 0.38 |
| 人工岸线 | 堤坝 | 1.08 | 11.47 | 8.07 |
| | 港口码头 | 29.56 | 54.53 | 65.51 |
| | 建设岸线 | 6.56 | 8.68 | 14.84 |
| | 养殖围堤 | 14.63 | 14.27 | 12.39 |
| | 闸 | 0.10 | 0.33 | 0.33 |
| | 道路 | 12.15 | 1.98 | 1.98 |

工岸线，其中消失最多的为砾石岸线。人工岸线扩张较大，除道路和养殖围堤外都处于持续增长状态，以港口码头岸线变化最为剧烈，近 10 年增加了 35.95 km。养殖围堤海岸线的减少和部分道路的消

失都与填海造地有关,原先海岸线被围起并填埋后形成新的海岸线,同时海岸带面积急剧增加。经过

计算,10年间海岸线扩张面积为 27.65 km²。扩张地区如图 8 所示。

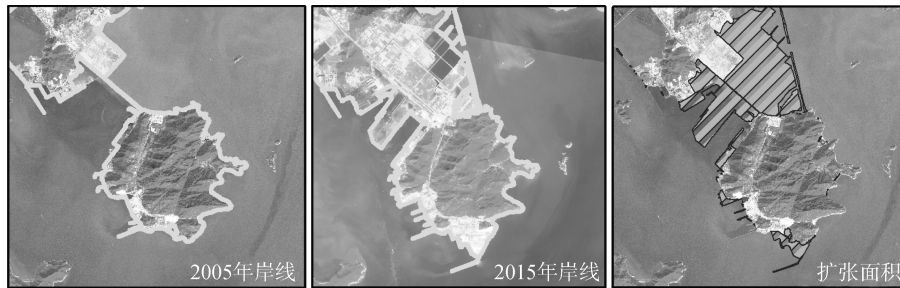


图 8 高栏港区海岸线扩张区

Fig. 8 The expansion area of the Gaolan Port coastline

6 结论

本文基于 2005 年、2010 年和 2015 年覆盖珠海市的 SPOT-5 和 GF-1 和航空 DOM 等高分辨率遥感影像,建立了适用于珠海市海岸带岸线的分类体系,提取了珠海市 3 期海岸带岸线信息,经变迁分析和冲淤分析,结论如下:(1)珠海市海岸带岸线在 2005~2010 年增长剧烈,增长速率为 3.6 km/a。2010~2015 年增长放缓,总岸线长度增加了 8.25 km,增长速率为 1.65 km/a。(2)珠海市海岸带岸线类型中,人工岸线所占比例最高。至 2015 年,人工岸线所占比例最大,达 81.08%,岸线长度为 402.93 km,年增长速率为 4.02 km/a,其中增长最多的为港口码头岸线。随着人工岸线增长,自然岸线则减少,至 2015 年,其岸线长度减少到 94.02 km,减少速率为 1.39 km/a。(3)珠海市海岸带岸线以向海扩张为主。10 年间,海岸带面积增加了 34.75 km²,平均扩张速率为 3.4 km²/a,总体表现为海岸工程建设,围海造地。人为造地是海岸线变迁的主要驱动因素。(4)岸线变化最为典型区域为高栏港区,其岸线变迁以向海扩张为主,陆地面积增加了 27.65 km²,岸线变化的主因是港口码头建设。

参考文献:

- [1] Tuncay K, Abdulaziz G, FevziK, et al. Automatic detection of shoreline change on coastal Ramsar wetlands of Turkey[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(10): 1141-1149.
- [2] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
Xu Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595.
- [3] Guariglia A, Buonamassa A, Losurdo A, et al. A multi-

source approach for coastline mapping and identification of shoreline changes[J]. Ann Geophys, 2006, 49(1): 295-304.

- [4] Alesheikh A A, Ghorbanali A, Nouri N. Coastline change detection using remote sensing[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2007, 4(1): 61-66.
- [5] 王小龙, 张杰, 初佳兰. 基于光学遥感的海岛潮间带和湿地信息提取——以东沙岛(礁)为例[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(4): 477-481.
Wang Xiaolong, Zhang Jie, Chu Jialan. Extraction of remotely sensed information of island intertidal zone and wetland——Taking the Dongsha Island as an example[J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(4): 477-481.
- [6] Shah C A. Automated lake shoreline mapping at sub-pixel accuracy[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(6): 1125-1129.
- [7] Pardo-Pascual J E, Almonacid-Caballer J, Ruiz L A, et al. Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 123: 1-11.
- [8] 刘鹏程. 基于水平集理论的海岸线轮廓特征提取[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(2): 75-79.
Liu Pengcheng. Feature extraction of coastline contour based on level set theory[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(2): 75-79.
- [9] Dong Di, Li Ziwei, Liu Zhaoqin, Yu Yang. Automated techniques for quantification of coastline change rates using Landsat imagery along Caofeidian, China [J]. Earth and Environmental Science, 2014, 17(1): 012103.
- [10] 高燕, 周成虎, 苏奋振, 等. 基于多特征的人工海岸线提取方法[J]. 测绘工程, 2014, 23(5): 1-5.
Gao Yan, Zhou Chenghu, Su Zhenfen, et al. Coastline extraction from remote sensing images based on multi-features approach[J]. Engineering of Surveying & Mapping, 2014, 23(5): 1-5.
- [11] 张霞, 庄智, 张旭凯, 等. 秦皇岛市海岸线遥感提取及变化监测[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(4): 625-630.

- Zhang Xia, Zhuang Zhi, Zhang Xukai, et al. Coastline extraction and change monitoring by remote sensing technology in Qinhuangdao City[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(4): 625-630.
- [12] 孙伟富, 马毅, 张杰, 等. 不同类型海岸线遥感解译标志建立和提取方法研究[J]. *测绘通报*, 2011, 30(3): 41-44.
Sun Weifu, Ma Yi, Zhang Jie, et al. Study of remote sensing interpretation keys and extraction technique of different types of shoreline[J]. *Bulletin of Surveying & Mapping*, 2011, 30(3): 41-44.
- [13] 包萌, 孙伟富, 马毅, 等. 近 40 年来清澜湾海岸线及其邻接地物遥感监测与变迁分析[J]. *海岸工程*, 2014, 33(2): 66-76.
Bao Meng, Sun Weifu, Ma Yi, et al. Remote sensing monitoring and analysis of the changes in coastline and adjacent landscapes along the Qinglan Bay in the last 40 years[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 33(2): 66-76.
- [14] 陈晓英, 张杰, 马毅. 近 40 年来海州湾海岸线时空变化分析[J]. *海洋科学进展*, 2014, 32(3): 324-334.
Chen Xiaoying, Zhang Jie, Ma Yi. Analysis of the spatial and temporal changes of the coastline in the Haizhou Bay during the past 40 years[J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(3): 324-334.
- [15] 陈晓英, 张杰, 马毅, 等. 近 40a 来三门湾海岸线时空变化遥感监测与分析[J]. *海洋科学*, 2015, 39(2): 43-49.
Chen Xiaoying, Zhang Jie, Ma Yi, et al. Monitoring and analysis of coastline changes of the Sanmen Bay with remote sensing during the past 40 years[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(2): 43-49.
- [16] 田海兰, 刘西汉, 王红, 等. 近三十年来曹妃甸岸线岛体时空演变特征分析[J]. *海洋科学*, 2015, 39(5): 68-74.
Tian Hailan, Liu Xihan, Wang Hong, et al. Spatiotemporal change characteristics of Caofeidian shoreline and island in the past three decades[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(5): 68-74.
- [17] 栗云召, 于君宝, 韩广轩, 等. 基于遥感的黄河三角洲海岸线变化研究[J]. *海洋科学*, 2012, 36(4): 99-106.
Li Yunzhao, Yu Junbao, Han Guangxuan, et al. Coastline change detection of the Yellow River Delta by satellite remote sensing[J]. *Marine Sciences*, 2012, 36(4): 99-106.
- [18] 宫立新, 金秉福, 李健英. 近 20 年来烟台典型地区海湾海岸线的变化[J]. *海洋科学*, 2008, 32(11): 64-68.
Gong Lixin, Jin Bingfu, Li Jianying. The changing of typical bay coastline in Yantai in recent 20 years[J]. *Marine Sciences*, 2008, 32(11): 64-68.
- [19] 薛允传, 马圣媛, 周成虎. 基于遥感和 GIS 的现代黄河三角洲岸线变迁及发育演变研究[J]. *海洋科学*, 2009, 33(5): 36-40.
Xue Yunchuan, Ma Shengyuan, Zhou Chenghu. The shoreline migration and the Delta changes study in the modern Yellow River Delta using remote sensing and GIS[J]. *Marine Sciences*, 2009, 33(5): 36-40.
- [20] 赵宗泽, 刘荣杰, 马毅, 等. 近 30 年来湄洲湾海岸线变迁遥感监测与分析[J]. *海岸工程*, 2013, 32(1): 19-27.
Zhao Zongze, Liu Rongjie, Ma Yi, et al. Remote sensing monitoring and analysis of coastline changes in the Meizhou Bay since the last 30 years[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 32(1): 19-27.
- [21] Wang Changying, Zhang Jie, Song Pingjian. An intelligent coastline interpretation of several types of sea-coasts from TM/ETM+ images based on rules [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(7): 89-96.
- [22] Marfai M A, Almohammad H, Dey S, et al. Coastal dynamic and shoreline mapping: multi-sources spatial data analysis in Semarang Indonesia[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2008, 142(1-3): 297-308.
- [23] 杨金中, 赵玉灵. 浙江东部穿山半岛岸线及潮滩演变的遥感调查[J]. *国土资源遥感*, 2004, 16(1): 51-55.
Yang Jinzhong, Zhao Yuling. The remote sensing dynamic monitoring of the shoreline and the tidal bank in Chuanshan Peninsula[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2004, 16(1): 51-55.
- [24] 赖志坤. 泉州湾海岸线变化特征的定量分析研究[J]. *海洋科学*, 2012, 36(8): 75-78.
Lai Zhikun. Quantitative analysis of shoreline variation characteristics of the Quanzhou Bay[J]. *Marine Sciences*, 2012, 36(8): 75-78.
- [25] 王建步, 张杰, 陈景云, 等. 近 30 余年辽河口海岸线遥感变迁分析[J]. *海洋环境科学*, 2015, 34(1): 86-92.
Wang Jianbu, Zhang Jie, Chen Jingyun, et al. Analysis of the remote Liaohe Estuary coastline changes sensing image in the past thirty basing on the years[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(1): 86-92.
- [26] Kaliraj S, Chandrasekar N, Magesh N S. Impacts of wave energy and littoral currents on shoreline erosion/accretion along the south-west coast of Kanyakumari, Tamil Nadu using DSAS and geospatial technology[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(10): 4523-4542.
- [27] 李涛, 常军, 刘伟. 1996~2014 年黄河三角洲海岸线遥感动态监测[J]. *安徽农业科学*, 2015, 8(8): 342-345.
Li Tao, Chang Jun, Liu Wei, et al. Dynamic monitoring of coastline in the Yellow River Delta by remote sensing since 1996[J]. *Geo-information Science*, 2015, 8(8): 342-345.
- [28] 周相君, 李晓敏, 马毅, 等. 基于遥感的广西防城湾海岸线变迁分析[J]. *海洋学研究*, 2014, 32(1): 47-55.
Zhou Xiangjun, Li Xiaomin, Ma Yi, et al. Analysis of shoreline changes in the Fangcheng Bay of Guangxi based on remote sensing technique[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2014, 32(1): 47-55.
- [29] 郑旭霞. 闽江口海岸线 40 年变迁遥感监测与分析[J]. *福建地质*, 2015, 34(1): 79-84.
Zheng Xuxia. The remote sensing dynamic monitoring of Minjiang estuary's shoreline evolution in the past 40 years[J]. *Geology of Fujian*, 2015, 34(1): 79-84.
- [30] 姚晓静, 高义, 杜云艳, 等. 基于遥感技术的近 30a 海南岛海岸线时空变化[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(1): 114-125.
Yao Xiaojing, Gao Yi, Du Yunyan, et al. Spatial and temporal changes of Hainan coastline in the past 30

- years based on RS[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(1): 114-125.
- [31] Deepika B, Avinash K, Jayappa K S. Shoreline change rate estimation and its forecast: remote sensing, geographical information system and statistics-based approach[J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2013, 11(2): 1-22.
- [32] Jana A, Biswas A, Maiti S, et al. Shoreline changes in response to sea level rise along Digha Coast, Eastern India: an analytical approach of remote sensing, GIS and statistical techniques[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2014, 18(3): 145-155.
- [33] Shetty A, Jayappa K S, Mitra D. Shoreline Change Analysis of Mangalore coast and morphometric analysis of Netravathi-Gurupur and Mulky-pavanje Spits[J]. *Aquatic Procedia*, 2015, 4: 182-189.
- [34] Zagórski P, Rodzik J, Moskalik M, et al. Multidecadal (1960-2011) shoreline changes in Isbjørnhamna (Hornsund, Svalbard)[J]. *Polish Polar Research*, 2015, 36(36 4): 369-390.
- [35] 国家海洋局, 908 专项办公室. 海岛海岸带卫星遥感调查技术规程[M]. 北京: 海洋出版社, 2006. State Oceanic Administration, 908 Special Office. Technical Specification for Coastline Satellite Remote Sensing Survey[M]. Beijing: Maritime Press, 2006.
- [36] 国家海洋局. 关于开展海岸保护与利用规划编制工作的通知 [EB/OL]. [2013-11-18]. http://govinfo.nlc.gov.cn/hebsfz/xxgk/hbsgtzyt/201301/t20130110_3300531.shtml?classid=373. State Oceanic Administration. Notice on the development of coastal protection and utilization planning [EB/OL]. [2013-11-18]. http://govinfo.nlc.gov.cn/hebsfz/xxgk/hbsgtzyt/201301/t20130110_3300531.shtml?classid=373.

Remote sensing analyses of the spatial and temporal changes in Zhuhai shoreline

YANG Lei^{1, 2}, SUN Wei-fu¹, MA Yi^{1, 2}, REN Guang-bo¹

(1. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Received: Spe. 2, 2016

Key words: shoreline; Zhuhai; high resolution images; change analysis; erosion and deposition analysis

Abstract: In this paper, a classification system for Zhuhai coastal shoreline was created to study the change in the coastal zones in Zhuhai based on high resolution remote sensing images obtained from the SPOT5, GF-1, and aerial DOM. The 3 phase information for 12 kinds of coastlines was extracted by human-computer interactions, and the length of the coastline and the erosion and deposition of the two aspects were analyzed in detail. The results were as follows: (1)The overall length of the coastline of Zhuhai city increased from 470.69 km to 496.95 km in 10 years, and the average annual growth was 2.38 km. (2)During the period of 2005—2015, the artificial shoreline had a larger proportion, and it underwent continuous development in the recent 10 years. The length of artificial shoreline increased to 40.21 km, whereas the length of natural shoreline reduced to 13.95 km. (3)The erosion area of Zhuhai is 0.98 km², and the deposition area is 34.75 km² in these 10 years. The shorelines which expand to the sea are mainly in the port and construction areas. The length of the coastline including aquaculture ponds, gravel shorelines, and rock shorelines has decreased, and the migratory direction of these shorelines is mainly toward the inland. (4)The past 10 years have witnessed a severe change in the Gaolan Port. According to the fieldwork in the Gaolan Port, the port was constructed and expanded toward the sea in 2008. The expansion area reached 27.65 km² by 2015, and the average expansion rate was 3.4 km²/a. Port construction is the main expansion type in this area. Through the above analysis, it can be concluded that the coastline change of the coastal zone of Zhuhai in the recent is caused by coastal development.

(本文编辑: 刘珊珊)