

人类活动对港湾岸线及景观变迁影响的比较研究 ——以中国象山港与美国坦帕湾为例

刘永超^{1,2}, 李加林^{1,2}, 袁麒翔^{1,3}, 史小丽⁴, 浦瑞良⁵, 杨 磊¹, 卢雪珠¹

(1. 宁波大学城市科学系, 宁波 315211; 2. 浙江省海洋文化与经济研究中心, 宁波 315211;
3. 象山县海洋与渔业局海洋资源管理中心, 象山 315700; 4. 宁波大学学报编辑部, 宁波 315211;
5. 南佛罗里达大学地理系, 美国佛罗里达州 坦帕 33620)

摘要: 利用多时期遥感数据, 以10年为时间步长, 提取1985-2015年4个时期中国象山港和美国坦帕湾的岸线空间位置、长度和曲折度以及港湾地区景观构型、多样性和破碎度等信息, 构建海岸人工化和港湾景观人工干扰指标, 探讨人类活动对港湾岸线、景观演变的影响。结果表明: ①近30年来, 象山港和坦帕湾自然岸线长度不断缩减, 人工岸线长度呈先增后稳定的态势。由于两地人类活动方式的差异, 象山港局部岸段形态发生剧烈变化, 岸线曲折度不断变小; 而坦帕湾岸线形态变化较小, 岸线曲折度几乎保持不变。②1985-1995年, 象山港海岸人工化不断加强, 1995年以后有所减弱, 但人类活动的影响范围逐渐变大, 几乎遍及整个港湾海岸。1985-2015年, 坦帕湾海岸人工化强度虽有加强, 但增幅缓慢, 海岸人类活动也主要集中于各沿海城市区域。③1985-2005年, 象山港和坦帕湾各人工化强度等级样区景观平均斑块面积总体呈减少趋势, 但2005-2015年, 象山港各强度样区景观平均斑块面积变化趋势不一, 坦帕湾各强度样区变幅则较为平稳。④1985-2005年, 象山港各强度样区景观多样性指数逐渐增大, 而坦帕湾变化不一; 2005-2015年, 两港湾人工化强度由弱至强, 景观多样性指数先增后减。⑤1985-2005年, 象山港和坦帕湾不同人工化强度样区, 景观破碎度指数逐渐增大; 2005-2015年, 两港湾景观破碎度指数呈减小趋势。

关键词: 港湾岸线; 港湾景观; 变迁; 人类活动; 象山港; 坦帕湾

DOI: 10.11821/dlxb201601007

1 引言

随着社会经济的发展及陆地资源的不断被耗竭, 海岸带及海洋资源的开发利用已成为沿海国家和地区的战略选择^[1]。港湾作为海岸带开发的前沿与热点区域, 地表过程和生态环境演化面临着人类经济社会活动带来的空前压力, 加之3S技术支撑下的研究数据可得性不断提升, 人类活动引起的海岸资源环境问题逐渐成为国内外学者和政府管理者关注的焦点^[2]。

人类对岸线不同强度的利用过程会直接改变海岸轮廓的演化轨迹^[3-4], 通过岸线变迁

收稿日期: 2015-07-06; 修订日期: 2015-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171073, 41471004); 浙江省自然科学基金项目(Y5110321); 宁波大学研究生科研创新基金(G16082, G15059) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41171073, No.41471004; Natural Science Foundation of Zhejiang Province, No.Y5110321; Scientific Research Foundation of Graduate School of Ningbo University, No.G16082, No.G15059]

作者简介: 刘永超(1990-), 男, 甘肃庆阳人, 硕士, 中国地理学会会员(S110010638A), 主要从事海岸带环境与资源开发研究。E-mail: lycgeo@163.com

通讯作者: 李加林(1973-), 男, 浙江台州人, 教授, 博士生导师, 主要从事海岸带环境与资源开发研究。E-mail: nbj2001@163.com

分析可透视海岸带资源环境系统的演变过程^[5-6]。岸线动态变化信息通常在遥感影像的波谱分析基础上^[7-9]，运用人机交互式解译^[10]、多光谱分类^[11]、阈值分割^[12]及小波变换^[13]等方法获取，研究区主要涉及淤泥质海岸^[14]、河口海岸^[15]或基于沿海相关行政单元^[16]。海岸景观资源环境系统演化方面则主要运用空间统计分析^[17]、景观格局指数分析^[18]及基于元胞自动机的景观模拟^[19]等方法进行研究，国外主要以大尺度时空分析单元为主^[20-23]，国内则是以中小尺度分析单元为主^[24]。港湾地区的相关研究主要侧重于人类活动对潮汐汉道沉积动力过程^[25]、湾口潮流^[26]、海岸地貌^[27]、纳潮面积^[28]等的影响以及生态环境效应^[29-30]方面。

港湾作为海岸地区重要的地貌单元，其国家战略要地、对外交通要地、岸线开发重点区和休闲旅游场所的地位日渐凸显^[31]，但采用量化指标来系统评价人类活动对港湾地区岸线及景观变迁影响的分析较少^[32-33]，尤其缺乏区域或国别对比研究。同为海洋大国的中美两国，港湾资源丰富且开发活动活跃，人类活动对港湾海岸资源环境系统的影响尤为显著。但由于海洋开发阶段与保护措施的不同，人类活动对港湾资源环境系统演替的影响表现出较大的差异性。中国浙江象山港和美国佛罗里达坦帕湾同属热带气候与亚热带气候过渡地带，生产生活的自然条件相似，开发历史悠久。但是两港湾在人口规模、社会经济发展水平、渔业与娱乐休闲管理机制以及土地开发利用方式等方面却各具特性。因此，本文拟通过两港湾不同开发利用与保护模式下有区别的现代人类地表活动过程对港湾岸线及景观资源演化影响的比较分析，明晰两者的异同，希冀对深入理解海岸人工化过程及其岸线与景观变迁响应有所裨益，为中国港湾开发利用与保护规划提供科学借鉴。

2 研究区概况

象山港地处中国浙江省东部沿海，北靠杭州湾，南邻三门湾，东北通过佛渡水道、双屿门水道与舟山海域毗邻，东南通过牛鼻山水道与大目洋相通，湾内拥有大小岛屿65个及西沪港、铁港和黄墩港3个次级港湾，横贯象山、宁海、奉化、鄞州、北仑5县（市）、区（图1）。象山港流域面积1455 km²，岸线全长392 km，其中大陆岸线260 km；属于亚热带季风区，以低山丘陵为主，天然淤积海岸、侵蚀海岸和人工海岸交替分布。区域人口文化程度较低，科技力量不足，交通以公路为主；矿产资源丰富，旅游业起步发展；潮滩湿地广阔，水产捕捞和海水养殖业发达。宋庆历年间（1041年）王安石任鄞县县令时开始筑海塘，清雍正八年（1730年）建大嵩塘，清咸丰八年（1858年）建永成塘，至清光绪31年（1905年）修咸宁塘。1950年以来又筑西泽、团结、飞跃、联胜等海塘，至2015年象山港围垦总面积已超过170 km²，严重干扰了港湾的自然生态过程。

坦帕湾位于美国东南佛罗里达州中段海岸西部，港湾三面环陆，西侧与墨西哥湾相连，湾内拥有两个主要人工岛屿以及希尔斯伯勒湾、旧坦帕湾、中坦帕湾、低坦帕湾4个次级港湾（图2）；行政单元上包含了希尔斯伯勒、马纳提和皮拉尼斯的大部分区域，以及帕斯科和萨拉索托的小部分区域，周边有坦帕、圣彼得斯堡和克利尔沃特等较大城市。坦帕湾流域面积5700 km²，岸线绵长曲折，约1040 km。约5000~6000年前威登岛人

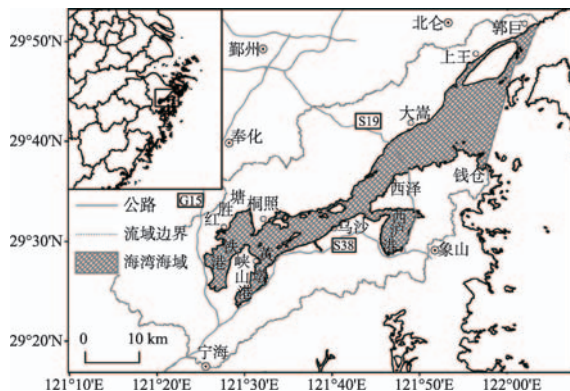


图1 中国象山港区位图

Fig. 1 A Map of Xiangshangang Bay, China

就已定居于坦帕湾沿岸, 19 世纪后期坦帕湾发展快速, 皮拉尼斯半岛和希尔斯伯勒沿岸逐渐形成了“圣彼得斯堡—克利尔沃特—坦帕”都市圈, 人口众多, 交通以海、陆、空为主, 休闲旅游娱乐业发展较为成熟, 加工、运输业兴盛, 同时对资源环境也造成了冲击与干扰。

与中国象山港相比, 美国坦帕湾 19 世纪后期凭借科技与经济的领先优势, 港湾开发范围广泛, 拥有众多国内国际机场, 客货吞吐量位居佛罗里达州之首, 国家经济和人口对海岸带的依赖更

为直接, 但同时也带来了严重的负面效应。为此, 美国 20 世纪 90 年代以来, 推行了“海湾河口保护计划”并配套采取保护措施与综合管理方案, 依靠海湾开发管理法制体系、开发强度评估预警机制和管理信息化平台等手段, 使港湾可持续开发与保育上升为国家战略, 提升了民众的环境保护意识, 成效显著。相比而言, 中国象山港作为工商业运输功能更为明显的深水港, 开发利用与保护政策具有明显的滞后性, 与港湾开发利用态势的变化不相适应, 如港湾开发管理法律法规缺乏、保护机制不完备、岸线及景观资源理论研究不充分等, 造成港湾内海洋水质、潮间带生态、岸线及流域景观受到了较大程度的影响与损害。因此, 借鉴美国港湾治理经验, 结合国情, 加强中国港湾管理政策和法规机制建设, 对促进中国港湾海岸生态—经济—环境的持续协调发展具有重要意义。

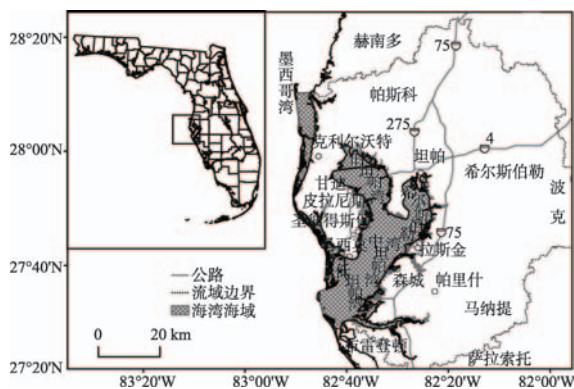


图2 美国坦帕湾区位图

Fig. 2 A map of Tampa Bay, USA

3 数据来源与研究方法

3.1 数据的获取与处理

以美国地质调查局 (USGS) 网站^①、地理空间数据云网站^②提供的象山港流域与坦帕湾流域 1985 年、1995 年、2005 年和 2015 年 4 期的 TM、OLI 遥感影像为数据源, 通过波段合成、几何纠正与配准、假彩色合成等处理, 使用 ENVI4.8 软件在 Map 模块下, 采用 Mosaic 工具, 进行基于地理坐标的影像镶嵌。在此基础上, 用“流域—海岸—海洋”连续系统^[34]划定港湾研究区范围, 即首先采用 ArcGIS10.2 软件中的 Archydro tool 插件, 根据 D8 算法, 采用水平精度为 30 m 的 ASRTER GDEM V2 数字高程模型提取获得象山港、坦帕湾流域边界^[35]。最后, 以陆地流域和海洋矢量数据作为掩膜, 利用 ArcGIS10.2 软件空间分析模块下的按掩膜提取工具, 对 4 个时期的遥感影像进行栅格影像提取, 最终得到本文的研究区域影像。

数据来源还包括象山港 1:50000 数字高程模型、坦帕湾流域边界矢量数据^③、1:50000 象山港地形图、美国德克萨斯州大学提供的 1:50000 坦帕湾地形图、中国港湾志 (第五分册) 以及象山港和坦帕湾不同测站点历史潮汐数据和海洋环境历史监测数据。

3.2 研究方法

3.2.1 岸线分类与提取方法 根据象山港和坦帕湾岸线类型特征并参考国家海岸基本功能

① 美国地质调查局官方网站. 影像数据下载[EB/OL]. <http://glovis.usgs.gov/>

② 地理空间数据云官方网站. 影像数据下载[EB/OL]. <http://datamirror.csdb.cn/>

③ 坦帕湾官方网站. 坦帕湾水图集[EB/OL]. <http://www.tampabay.wateratlas.usf.edu/digitallibrary/>

规划类型, 将研究区海岸线分为自然岸线和人工岸线 (表1), 各类型海岸线基于不同的遥感判读标准^[8], 利用阈值结合 NDVI 指数方法, 有效提取水陆边界线^[36], 并依据不同类型海岸线在标准假彩色遥感影像上的色调、纹理及空间形态与分布等特征, 结合岸线解译标志对海岸线进行局部修正, 最后提取出各时期海岸线空间位置、长度及曲折度等信息。

采用 ArcGIS10.2 软件随机选取 4 期影像的海岸线像元, 在自动提取的对应海岸线上找出相应点, 根据发生位移点的个数确定提取精度^[36], 并在每期影像中对各类型海岸分别选取 80 个像元点。结果表明基岩岸线、砂砾质岸线和淤泥质岸线提取精度 > 95%, 养殖岸线、建设岸线、娱乐休闲岸线、防护岸线和码头岸线提取精度 > 90%, 淤泥质岸线和河口岸线提取精度 > 80%, 结果总体准确可靠。

3.2.2 岸线变化及海岸人工化强度指标 在 4 个时相港湾岸线解译数据的基础上, 进行岸线空间分析, 可得到象山港和坦帕湾岸线变化的时空信息。为探讨两港湾海岸线变化的时间特征、空间形态及演变方向, 引入岸线长度、岸线曲折度及海岸人工化强度作为评价指标^[33, 37]:

(1) 岸线长度: 为揭示象山港和坦帕湾岸线变化的时空差异, 用岸线长度变化率来反映岸线长度变化情况:

$$V = (L_{i+1} - L_i) / \Delta t \quad (1)$$

式中: L_{i+1} 、 L_i 为两期岸线长度 (km); Δt 为相邻两期岸线变化时间 (年)。

(2) 岸线曲折度: 曲率是几何体不平坦程度的一种衡量, 曲率愈大, 表示曲线的弯曲程度愈大。因此, 利用曲率分布来反映象山港和坦帕湾岸线的曲折程度。

以 200 m 为间距获取象山港郭巨—钱仓岸段和坦帕湾马西莫—布雷登顿岸段海岸线的连续离散点, 但部分岸段离散点分布集中, 会产生一定的统计误差, 因此需进一步筛选离散点。选取阈值 e , 设 $A(i)$ 和 $A(i+1)$ 为两相邻离散点, 其中 d 的初始值为 $A(i)$ 和 $A(i+1)$ 的直线距离, s 为两点曲线距离, 当 $s/d > e$ 时, 进行曲率计算; $s/d \leq e$ 时, 连接下个邻接点, 通过以上迭代方法生成新的离散点序列。新序列中相邻两点与其中间点相连确定一个三角形, 利用三角形周长计算公式及 Heron's formula 可以求出外接三角形的半径 r :

$$r = \frac{l_a \times l_b \times l_c}{\sqrt{(l_a^2 \times l_b^2 \times l_c^2) - 2(l_a^4 \times l_b^4 \times l_c^4)}} \quad (2)$$

式中: l_a 、 l_b 、 l_c 分别为外接三角形的边长; r 近似为曲线的曲率半径; 曲率 $c = 1/r$ 。

(3) 海岸人工化强度: 人类活动对港湾海岸影响的压力程度可以用海岸人工化强度大小表示, 本研究利用物理学压强模型构造象山港和坦帕湾海岸人工化强度表达式:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n l_i \times p_i}{L} \quad (3)$$

式中: A 为海岸人工化强度; L 为研究区岸线总长度 (km); l_i 为区内第 i 种海岸的长度 (km); n 为海岸类型数量; p_i 为第 i 类海岸的资源环境影响因子 ($0 \leq p_i < 1$)。 P 表示不同

表1 海岸线分类系统

Tab. 1 Coastline classification system used in this analysis

一级类	二级类	说明
自然岸线	基岩岸线	基岩海岸的陆海分界线
	河口岸线	入海河口与海洋的分界线
	生物岸线	红树林与潮滩湿地的界线
	砂砾质岸线	沙滩、砾石滩的海岸线
	淤泥质岸线	淤泥或粉砂质泥滩的海岸线
人工岸线	养殖岸线	潮滩湿地养殖场海侧岸线
	建设岸线	城镇建设用地的海侧岸线
	防护岸线	用于防浪、防潮的岸线
	娱乐休闲岸线	用于生活娱乐休闲的岸线
	港口码头岸线	修筑港口码头形成的岸线

海岸类型针对资源环境的影响程度,其中自然岸线 p 值为0, p 越大表明负面影响越显著。以两港湾资源调查、水质调查中样本岸线各站点的监测数据为参照背景,选取研究区不同类型人工岸线若干岸段作为监测样本岸线,根据袁麒麟等^[33]的具体指标层权重 w_{ij} 与数据极差标准化后结果乘积求和方法,结合研究实际计算获得不同人类活动方式对港湾资源环境的影响因子 P ,即 p_1 (建设岸线)、 p_2 (防护岸线)、 p_3 (养殖岸线)、 p_4 (港口码头岸线)、 p_5 (娱乐休闲岸线)分别为0.84、0.33、0.68、0.48、0.46。

3.2.3 港湾景观人工干扰强度指数 港湾景观变化受自然和人为两方面的影响。在较短时间尺度下,人类活动干扰并主导了两个港湾的景观格局-过程。因此,依据港湾景观类型及其变化特征,采用景观人工干扰强度指数(Landuse human active interference index, LHAI)来描述区域内景观受人类干扰的强度,其计算公式为:

$$LHAI = \frac{\sum_{i=1}^N A_i P_i}{TA} \quad (4)$$

式中: $LHAI$ 为人工干扰强度指数; N 为景观类型的数量,本研究景观类型分为9类; A_i 为第 i 种景观类型的面积(km^2); p_i 为第 i 种景观类型所反映的景观资源环境影响因子; TA 为景观总面积(km^2)。结合地学、生态学、海洋学、环境科学等多学科专家意见及对景观资源变化的已有研究成果^[38-39],最终确定了两个港湾景观资源环境影响因子(表2)。

表2 象山港和坦帕湾景观资源环境影响因子

Tab. 2 Impact factors of landscape resources and environments in Xiangshangang Bay and Tampa Bay areas

景观类型	景观资源环境影响状况	影响因子
建设用地	对港湾景观资源及生态环境有显著影响,且部分为不可逆的	0.85
养殖用地和盐田	对港湾景观资源及生态环境有较大影响,且大多为不可逆的	0.65
娱乐用地	对港湾景观资源及生态环境稍有影响,且大多为不可逆的	0.55
未利用地	对港湾景观资源及生态环境稍有影响,且大多为不可逆的	0.48
耕地	对港湾景观资源及生态环境影响较小,且部分为可逆的	0.25
湖泊河流	对港湾资源及生态环境影响很小,并具有生态维护调节作用	0.10
林地	对港湾资源及生态环境影响很小,并具有生态维护调节作用	0.10
海域	对港湾资源及生态环境影响很小,并具有生态维护调节作用	0.10
潮滩湿地	对港湾资源及生态环境影响很小,并具有生态维护调节作用	0.10

在此基础上,采用ArcGIS10.2数据管理模块下的创建渔网工具,构建以研究区为模板的600 m×600 m网格,然后计算网格区域港湾人工干扰强度值,并将计算结果作为每个网格中心点值。在趋势分析和正态性检验基础上,利用3D分析模块下克里金插值法得到两港湾景观人工干扰强度时空分布信息。

4 结果分析

4.1 港湾岸线长度变化

随着海岸开发不断加强,过去30年两港湾人工岸线比例总体上呈增长态势(表3),但土地利用方式与港湾管理模式各有特点,所以岸线长度变化的历史进程也不尽相同。象山港人工岸线从1985年的80.24 km增至2015年的133.07 km,30年间增加了52.83 km,其增加量占总岸线长度的比例逐渐升高,由1985年的28.27%上升到1995年、2005年、2015年的49.08%、51.08%、51.49%;自然岸线长度30年的平均减少速度为2.61 km/a。而坦帕湾人工岸线则从1985年的492.17 km增至2015年的528.54 km,30年仅增加了

表3 1985-2015年象山港与坦帕湾各类型岸线阶段性长度变化(km)

Tab. 3 Changes in length of various coastline types during different periods in Xiangshangang Bay and Tampa Bay from 1985 to 2015 (km)

中国象山港					美国坦帕湾				
	类型	1985-1995 年	1995-2005 年	2005-2015 年		类型	1985-1995 年	1995-2005 年	2005-2015 年
自然岸线	基岩岸线	-46.21	-10.71	-3.83	基岩岸线	-0.22	0.01	-0.04	
	河口岸线	-2.74	1.71	-1.17	生物岸线	-14.97	-20.13	-2.54	
	砂砾质岸线	0.14	0.05	0.41	砂砾质岸线	0.27	-1.38	0.1	
	淤泥质岸线	-15.56	-0.4	0.12	淤泥质岸线	0.68	-1.72	0	
	小计	-64.37	-9.34	-4.48	小计	-14.26	-23.21	-2.49	
人工岸线	养殖岸线	35.6	6.8	-5.11	防护岸线	-3.27	-0.85	0.4	
	建设岸线	0.09	-0.25	4.24	建设岸线	7.01	0.92	1.62	
	防护岸线	12.13	-6.5	-0.96	娱乐休闲岸线	2.53	5.54	-0.22	
	港口码头岸线	6.08	1.41	-0.69	港口码头岸线	5.64	16.97	0.08	
	小计	53.91	1.45	-2.53	小计	11.91	22.58	1.88	
	总计	-10.46	-7.89	-7.02	总计	-2.34	-0.64	-0.61	

注：“+”表示增长，“-”表示减少。

36.37 km，其增加量占总岸线长度的比例缓慢上升，4个时期所占比例分别为46.94%、48.19%、50.37%、50.58%；自然岸线长度30年的平均减少速度仅为象山港的50.96%。可以看出，两港湾的人工岸线比例均以持续增长为基本特征，但从人工岸线占总岸线长度的比重增幅来看，象山港远大于坦帕湾。因此，在开发过程中，象山港需要借鉴坦帕湾港湾保护战略，合理维护自然岸线资源，控制人工岸线增速。

局部岸段岸线的显著变迁是反映港湾重点岸段开发过程与开发强度的最直接量化指标。象山港的郭巨—大嵩、大嵩—桐照、桐照—乌沙、乌沙—钱仓岸段，坦帕湾的马西莫—甘迪、甘迪—坦帕、坦帕—森城、森城—布雷登顿岸段为两港湾近30年来岸线变迁显著区域（图3、图4）。从象山港各岸段自然岸线长度变化情况来看，4个岸段在1985-1995年总体上表现出逐渐减小趋势，其中桐照—乌沙岸段减幅最大。1995-2015年不同岸段的变化略有差异，其中郭巨—大嵩岸段缓慢减少，大嵩—桐照岸段却逐渐增加，桐照—乌沙岸段因该时期红胜海塘停建使潮滩湿地增加，岸线缩短率受淤泥质岸线的增长而减缓，近10年岸线变化率为-0.86 km/a，乌沙—钱仓岸段则平稳减少。而坦帕湾自然岸线长度30年来各岸段均有减小趋势，其中马西莫—甘迪岸段减幅最小。甘迪—坦帕岸段1985-2005年因大卫半岛围海工程建设而逐渐减小，但随着工程结束而趋于稳定；坦帕—森城岸段变化平稳；森城—布雷登顿岸段1995-2005年因马纳提流域开发引起人工岸线快速替代自然岸线，较前后10年减少明显。

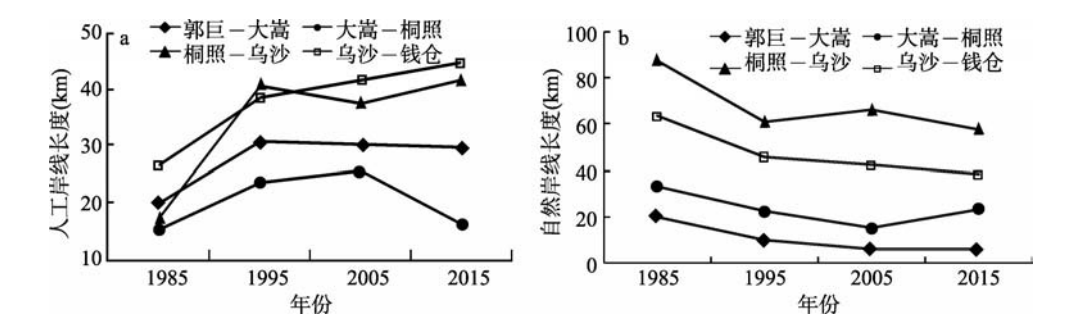


图3 1985-2015年象山港不同岸段自然岸线(a)与人工岸线(b)长度变化

Fig. 3 Changes in length of different natural and artificial coastline types in Xiangshangang Bay from 1985 to 2015

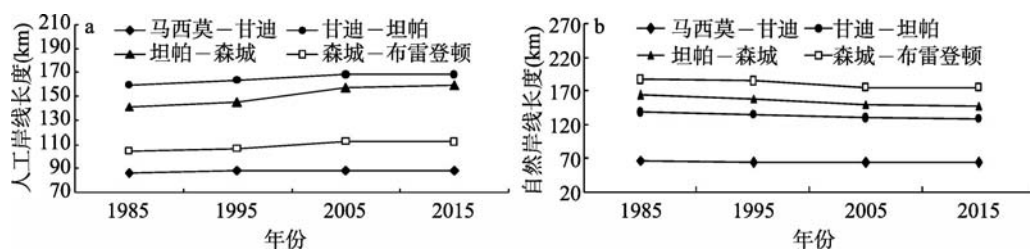


图4 1985-2015年坦帕湾不同岸段自然岸线(a)与人工岸线(b)长度变化

Fig. 4 Changes in length of different natural and artificial coastline types in Tampa Bay from 1985 to 2015

从人工岸线长度变化情况看, 1985-1995年象山港4个岸段逐渐增加, 其中桐照—乌沙岸段增速最快。郭巨—大嵩和桐照—乌沙岸段1995-2005年部分区域两岬之间岸线直接相连使整体岸线距离缩短, 导致人工岸线减少; 大嵩—桐照岸段近10年有所减少, 郭巨—大嵩岸段则几乎未变, 该时期大嵩—桐照养殖岸线减少的同时, 大嵩—洋沙山围垦仍在不断进行, 增加了人工岸线的保有率。从坦帕湾各岸段人工岸线长度变化情况看, 30年来4个岸段均逐渐增加, 其中马西莫—甘迪岸段增速较小, 变化率为0.24 km/a。甘迪—坦帕岸段先增加后稳定; 坦帕—森城岸段与其他3个岸段相比变化率最大, 尤其是1995-2005年达到1.18 km/a; 森城—布雷登顿岸段1995-2005年因马纳提河流沿岸娱乐休闲场所建立替代了自然岸线而变化显著。

4.2 港湾岸线曲折度变化

曲率是几何体不平坦程度的一种衡量, 曲率越大, 表示曲线的弯曲程度越大。本研究借助海岸线曲率的各离散点曲率来分析岸线曲折度, 曲率的变化量可以反映人类对岸线开发利用程度。为了较好并准确地反映两港湾海岸线的曲率分布, 结合前文曲折度计算公式, 根据研究经验并通过大量对比试验, 选取10个测试阈值, 测试阈值 e 取值自初始值为1.005, 公差为0.005, 终止值为1.050的等差数列, 多次实验结果表明, 当 e 值接近于1.020和1.040时, 离散点的曲率分布中值可以较为准确地反映4个时期象山港、坦帕湾岸线曲折度变化特征(表4)。

图5给出了1985-2015年象山港与坦帕湾自然岸线、人工岸线与整体岸线变化趋势: 30年来象山港岸线曲折度不断减小, 其中, 自然岸线曲折度变化程度弱于人工岸线, 但曲折度仍高于人工岸线。从整体岸线曲折度变化来看, 曲折度变化幅度逐年减少, 其中曲折度变化率前10年的0.78%分别高于1995-2005和2005-2015年的0.50%、0.25%(图5a)。与象山港相同的是, 坦帕湾近30年来岸线曲折度也呈减小趋势, 但变幅较小, 其中自然岸线曲折度基本保持不变, 而人工岸线略有变小。从整体来看, 曲折度变幅甚微, 3个时段的变化率分别仅为0.15%, 0.12%和0.04%(图5b)。可见, 象山港岸段围填海与海水养殖等工程使整体岸线在短时间内构成平直形态, 岸线曲折度较坦帕湾明显减小, 这对港湾生态功能与岸线资源造成了严重损害, 因此象山港在开发过程中, 可借鉴坦帕湾弯曲型建筑构造形态, 控制湾内岸线曲折度资源保有率。

表4 象山港与坦帕湾4时期岸线曲折度变化(10^{-3} m^{-1})Tab. 4 Changes in sinuosity of different coastline types in different years in Xiangshangang Bay and Tampa Bay (10^{-3} m^{-1})

类型	1985年		1995年		2005年		2015年	
	象山港	坦帕湾	象山港	坦帕湾	象山港	坦帕湾	象山港	坦帕湾
自然岸线	4.25	7.98	4.18	8.22	4.35	8.18	4.42	8.13
人工岸线	3.28	4.32	3.01	4.18	2.86	4.15	2.81	4.03
整体岸线	3.71	5.23	3.42	5.15	3.25	5.09	3.17	5.07

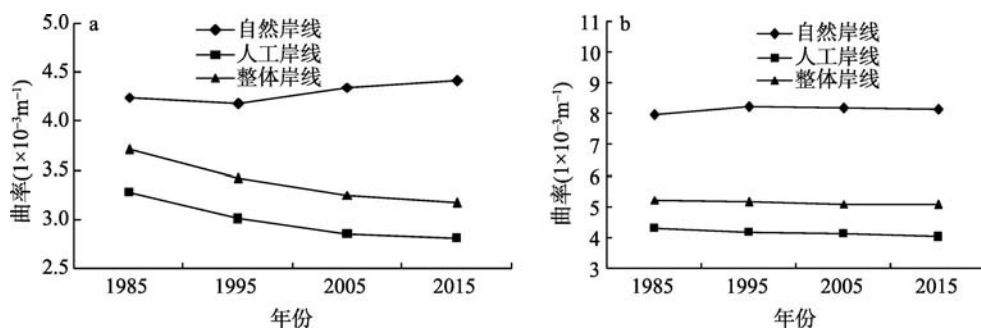


图5 1985-2015年象山港(a)与坦帕湾(b)自然岸线、人工岸线和整体岸线曲折度变化

Fig. 5 Changes in sinuosity of natural, artificial and whole coastlines in different years

in Xiangshangang Bay (a) and Tampa Bay (b) from 1985 to 2015

岸线曲折度变化在空间上主要体现在岸线的曲直形态变化。近30年来象山港和坦帕湾自然岸线曲折度变化较小, 人工岸线与整体岸线变化趋势相似(图5), 所以需进一步分析两港湾显著变化的岸线曲折度特征, 明晰各期岸线曲折度变化原因。将相邻两期遥感影像进行3波段R、G、B标准假彩色合成, TM影像波段组成为4、3、2, OLI影像波段组成为5、4、3, 最后提取影像中岸线发生剧烈变化岸段(图6、图7)。

相邻时期变化显著的岸线有两种表现形式(图6、图7), 即两岬之间的自然岸线被拉直的人工岸线替代, 或潮滩湿地围垦后, 岸线由陆地向海洋一侧凸出。可见, 人工岸线演变态势深刻地影响着整体岸线曲折度变化过程。与象山港不同, 坦帕湾围海造地规

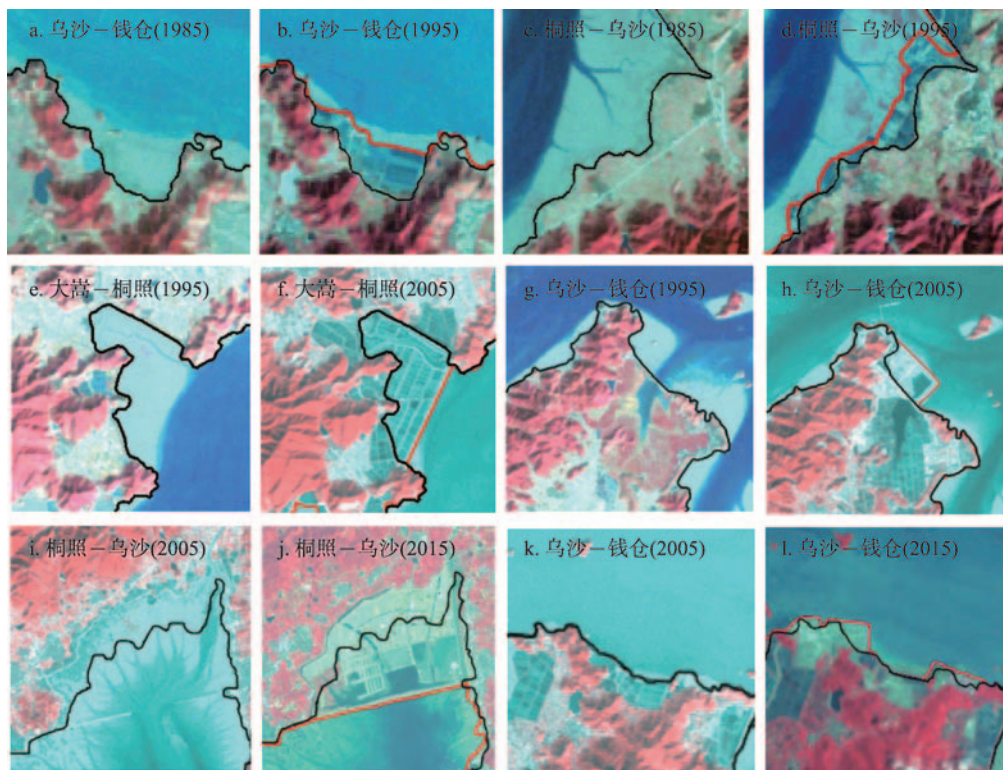


图6 1985-2015年相邻时期象山港海岸线曲折度剧烈变化的岸段

Fig. 6 The coastline segments with significant changes in sinuosity between two adjacent periods

in Xiangshangang Bay from 1985 to 2015

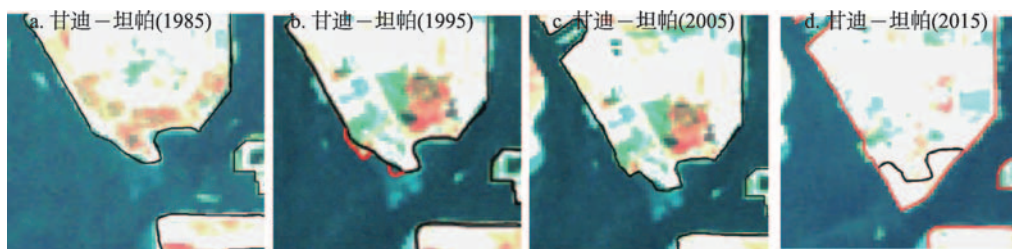


图7 1985-2015年相邻时期坦帕湾海岸线曲折度剧烈变化的岸段

Fig. 7 The coastline segments with significant changes in sinuosity between two adjacent periods in Tampa Bay from 1985 to 2015

模较少,岸线曲折度较高。两港湾整体岸线曲折度1995年与1985年相比均有变小,其中象山港桐照—乌沙和乌沙—钱仓岸段变化较其他岸段显著,黄墩港东侧建设用地和养殖用地快速增加,向海凸出的人工岸线替代了蜿蜒曲折的自然岸线。坦帕湾甘迪—坦帕岸段变化也较明显,其原因是大卫岛东侧建设用地的大量增加;2005年较1995年两港湾岸线曲折度变小,主要受象山港强蛟围垦、下滩围海养殖和坦帕湾大卫岛东侧围海造地推进的影响;2015年与2005年相比,象山港红胜海塘围海造地导致莼湖沿岸自然岸线消失、钱仓北岸人工岸线增加,使曲折度略有变小。而坦帕湾仅坦帕市东南部港口码头建设改变了岸线曲折度,其变化甚微。由于中、美两国经济社会发展阶段的不同,港湾开发利用方式及开发过程各异,使得海岸线利用特征与演替速度表现出不同的特征。

4.3 港湾海岸人工化强度变化

4.3.1 港湾海岸人工化强度时空变化特征分析 为进一步揭示30年来象山港和坦帕湾海岸人工化强度时空变化特征,采用ArcGIS10.2的分割工具获得1985年、1995年、2005年、2015年4个时期象山港郭巨—钱仓和坦帕湾马西莫—布雷登顿海岸段每隔2 km的海岸线,根据不同岸线类型长度和人类活动对资源环境影响因子计算结果,运用ArcGIS10.2字段计算功能求得每段岸线海岸人工化强度,并结合研究实际将岸线强度分为由弱至强的4个等级(图8,图9),其中低强度(I级 <0.21)、中强度($0.21 \leq$ II级

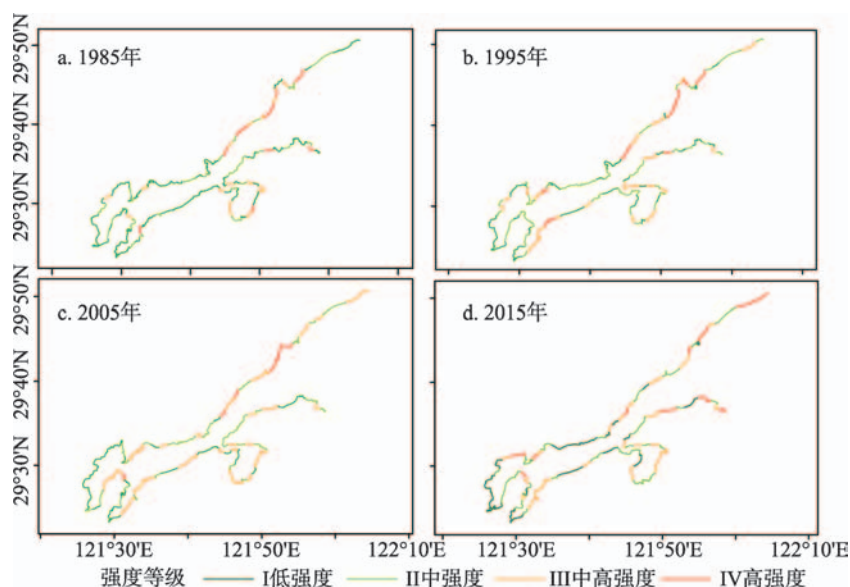


图8 1985-2015年象山港海岸人工化强度等级分布图

Fig. 8 Distribution of intensity levels of artificial coastline in Xiangshangang Bay from 1985 to 2015

<0.45)、中高强度 ($0.45 \leq \text{Ⅲ级} < 0.69$)、Ⅳ高强度 ($\text{Ⅳ} \geq 0.69$)，在此基础上对比分析两港湾岸线强度等级。

从整体变化来看，研究期间，象山港海岸人工化强度增加明显，海岸人工化强度近30年的变化率为1.59%，其中1985-1995年变化速度最快，达3.83%，1995年后变化速度有所减缓，但海岸人工化强度在增加；而坦帕湾海岸人工化强度缓慢增强，变化率仅为0.14%，近10年的变化率仅0.03%，海岸人类活动集中于港湾西侧圣彼得斯堡一带和南侧马纳提河中下游以及东北部坦帕市片区。

从局部变化来看，随着岸线开发不断推进，象山港沿岸人类活动集中程度在空间上发生了扩散加强，其中前10年海岸人工化强度等级在Ⅲ级以上的岸段集中在郭巨一大嵩岸段，主要受洋沙山、西周一带围填海工程、红胜海塘前期建设的影响；近10年海岸人工化强度等级在Ⅲ级及以上的岸段有所增多，以湾顶北部区域及湾口南岸海岸最为典型。但随着人类活动对海岸作用力度变弱，自然岸线开发潜力下降，岸线人工化速度相应变缓。Ⅲ级、Ⅳ级强度岸线多为工厂、养殖池区域，对海岸资源环境系统影响较大，且有逐年扩张的趋势。反之坦帕湾局部岸段海岸人工化强度变化较小，仅存在于大卫半岛东侧，且Ⅰ~Ⅳ级强度岸线区域变化平稳，这与坦帕湾完善的港湾开发强度评估预警机制不可分割。因此，象山港应开展岸线资源环境敏感性评估、海水水质指标跟踪调查、港湾海岸土地利用潜力分析等工作，积极控制Ⅲ级、Ⅳ级岸线的开发力度，同时人为景观建设时需注重增加人工岸线曲折度，对相应区域进行海岸人工化强度实时监测和利用潜力综合评估。

4.3.2 海岸人工化强度与岸线长度的关系 象山港和坦帕湾整体岸线长度不断缩减，而自然岸线和人工岸线长度呈此消彼长变化。象山港海岸人工化强度与整体岸线和自然岸线长度变化均呈负相关（图10），表明随着人类活动强度增大，自然岸线和整体岸线逐渐减少；海岸人工化强度与人工岸线长度变化呈正相关，表明随着海岸人工化强度增大，人工岸线长度也随之增多。坦帕湾海岸

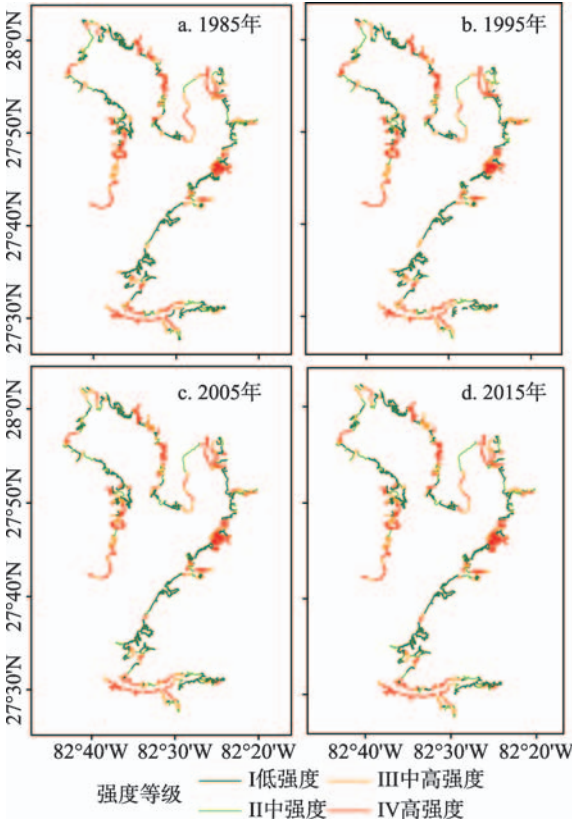


图9 1985-2015年坦帕湾海岸人工化强度等级分布图
Fig. 9 Distribution of intensity levels of artifical coastline in Tampa Bay from 1985 to 2015

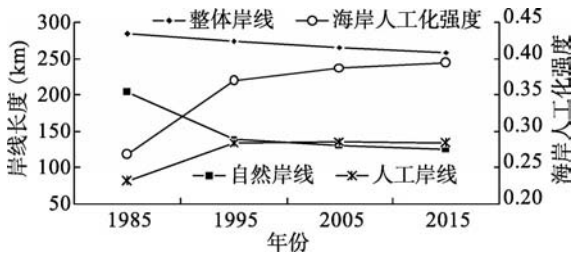


图10 1985-2015年象山港海岸人工化强度与岸线长度的关系
Fig. 10 Relationship between the intensity of artificial coastline and coastline length of Xiangshangang Bay from 1985 to 2015

人工化强度与整体岸线和自然岸线长度变化呈负相关(图 11),表明随着海岸人工化强度增大,自然岸线与整体岸线相应减少;海岸人工化强度与人工岸线长度变化呈正相关,与象山港相同,随着海岸人工化强度增大,坦帕湾人工岸线长度也随之增多。

4.3.3 海岸人工化强度与岸线曲折度的关系 象山港与坦帕湾整体岸线曲折度逐渐减小,而自然岸线曲折度基本不变,人工岸线曲折度不断减小。为分析岸线曲折度和海岸人工化强度这两个变量的关系,作 4 个时期海岸人工化强度与岸线曲折度的折线图(图 12、图 13)。象山港和坦帕湾海岸人工化强度与整体岸线、人工岸线的曲折度存在显著负相关,随着人类活动强度增大,整体岸线和人工岸线曲折度也逐渐减小。而海岸人工化强度与自然岸线曲折度存在显著正相关。可见,在一定时期内,海岸人工化强度与整体岸线曲折度均有紧密联系,当海岸人工化强度随着时间增大时,岸线曲折度会相应减小。因此,象山港必须坚持合理适度开发原则,进一步深化曲折度与人工化强度关系的理论研究,并将其应用到港湾岸线资源开发利用与保护的过程中。

4.4 港湾景观人工干扰强度变化分析

根据公式(4)进行港湾景观人工干扰强度指数计算和时空模拟分析,为便于比较象山港和坦帕湾各个不同时期的景观人工干扰强度,结合两港湾及各个年份景观人工干扰强度范围实际,进行归一断点分级,区间间隔为 0.16,共分为 5 个等级:低强度($LHAI < 0.21$),中低强度($0.21 \leq LHAI < 0.37$),中强度($0.37 \leq LHAI < 0.53$),中高强度($0.53 \leq LHAI < 0.69$),高强度($LHAI \geq 0.69$),得到两港湾人类活动强度带分布特征(图 14、图 15)。象山港与坦帕湾景观人工干扰的低、中低强度空间分布区域一致,即林地、海域、湖泊河流、潮滩湿地等自然景观区域。中、中高以及高强度区域分布在港湾平原区域,其构成景观在象山港主要为建设用地、养殖用地及盐田和耕地景观,而坦帕湾则由建设用地、娱乐用地等组成。

从空间分布变化来看,象山港以低、中低强度分布为主导,中、中高强度区逐渐向

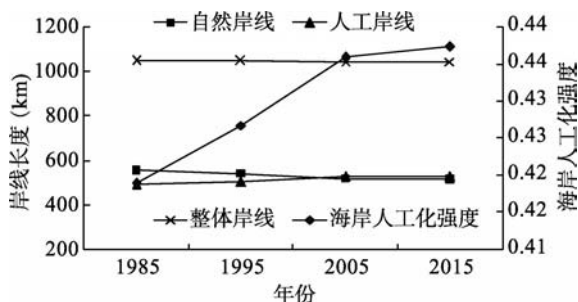


图 11 1985-2015 年坦帕湾海岸人工化强度与岸线长度的关系

Fig. 11 Relationship between the intensity of artificial coastline and coastline length of Tampa Bay from 1985 to 2015

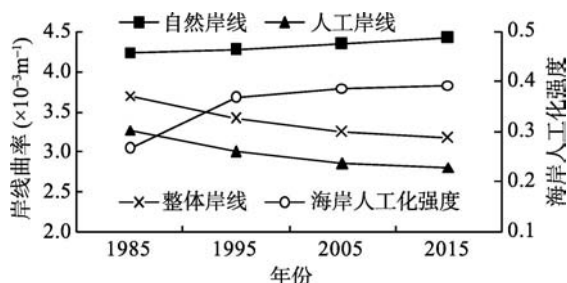


图 12 1985-2015 年象山港海岸人工化强度与岸线曲折度的关系

Fig. 12 Relationship between the intensity of artificial coastline and coastline sinuosity of Xiangshangang Bay from 1985 to 2015

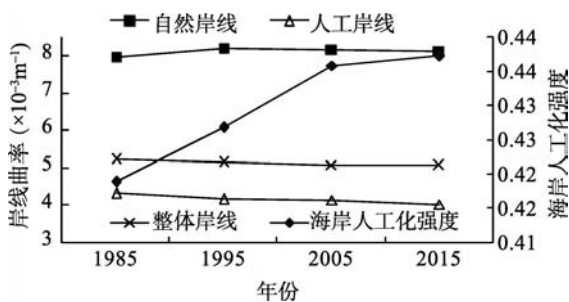


图 13 1985-2015 年坦帕湾海岸人工化强度与岸线曲折度的关系

Fig. 13 Relationship between the intensity of artificial coastline and coastline sinuosity of Tampa Bay from 1985 to 2015

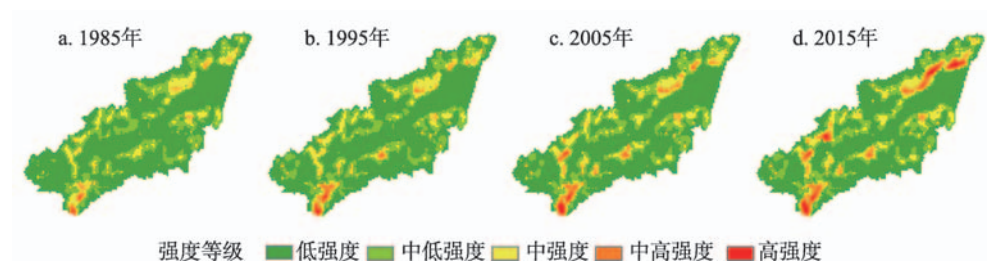


图 14 1985-2015 年象山港景观人工干扰强度

Fig. 14 The intensity of landscape disturbed by human in Xiangshangang Bay from 1985 to 2015

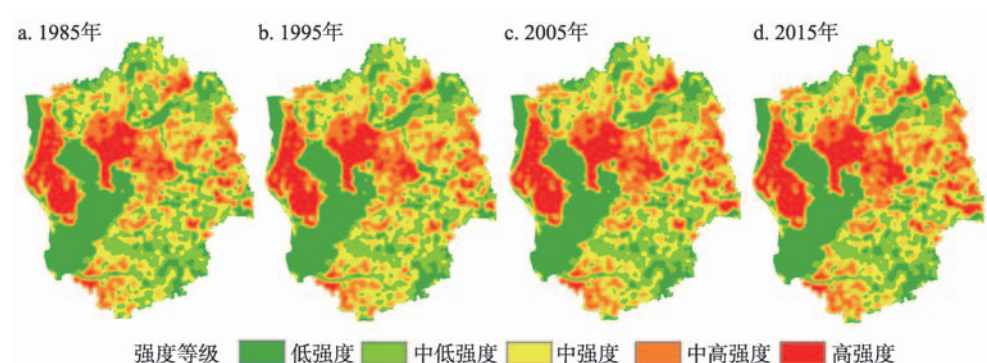


图 15 1985-2015 年坦帕湾景观人工干扰强度

Fig. 15 The intensity of landscape disturbed by human in Tampa Bay from 1985 to 2015

外围延伸，高强度分散展布但有逐渐聚合为连续强度带的趋势。而坦帕湾低、中低强度人类活动分布较少，中强度区分布在港湾北部和希尔斯伯乐县东南部，以郊区耕地和建设开发区为主。中高强度、高强度区集中分布于“圣彼得斯堡—克利尔沃特—坦帕”都市圈、布兰登和普兰特城连线区域（希尔斯伯勒县东部）以及马纳提河流域下游区域。从景观人工干扰强度整体格局变化来看，象山港景观人工干扰的低、中低强度区在陆侧一带较为稳定，海侧区域则有所缩小，中、中高以及高强度区分布于沿海地带，并呈现扩张趋势。而坦帕湾景观人工干扰的低、中低强度变化较小，尤其是海侧的人工干扰较为稳定。中、中高以及高强度区在帕斯科县东南部、希尔斯伯勒县南部和萨拉索托县北部有所扩张。可见，近30年来象山港和坦帕湾在人类活动影响下，景观格局和景观人工干扰强度也相应发生了变化。

此外，象山港与坦帕湾景观人工干扰中高、高强度区也主要分布在国道、省道附近、县（镇）中心地的平原区域，如宁海县景观人工干扰高强度区域、“圣彼得斯堡—克利尔沃特—坦帕”都市圈区域；重点发展的产业，如船舶修建工程，围填海工程、房产开发项目也使区域景观人工干扰强度发生显著改变。其中，20世纪90年代坦帕湾的房地产开发投资建设快速发展使坦帕湾北部、东部和南部的景观人工干扰强度发生显著变化；21世纪初期象山港大唐乌沙山电厂建造，红胜海塘的续建，以及大嵩—洋沙山围填海工程使象山港东北部、东南部和西部的景观人工干扰强度发生较大变化。

4.5 港湾景观对不同人工干扰强度的响应

海岸不断开发引起港湾景观人工化速度加快，导致港湾景观的空间结构、景观多样性和景观破碎度对人类活动做出不同程度的响应。采用两港湾2015年景观人工干扰强度等级区划标准，将各自研究区分为5个景观人工干扰强度区，根据ArcGIS10.2空间分析

模块下的栅格重分类工具对人工干扰强度区分级归一化, 区划间隔为0.14, 其中低强度干扰区 <0.33 、 $0.33 \leq$ 中低强度干扰区 <0.47 、 $0.47 \leq$ 中强度干扰区 <0.61 、 $0.61 \leq$ 中高强度干扰区 <0.75 、高强度干扰区 ≥ 0.75 , 并进行编码得到1~5强度样区(表5), 再进行景观斑块数目、景观面积的计算统计, 最后获得4个时期不同人工干扰强度区的平均图斑面积、景观面积比重, 并比较1985-2015年不同强度人工干扰影响下的象山港与坦帕湾景观变化特点(图16、图17)。

从整体变化趋势来看, 随着人工干扰强度的增大, 象山港平均斑块面积逐渐减少, 其中1~3区自然景观比重相对较大, 分散、单独的人工干预下完整的自然景观发生破碎、分离, 并被小图斑替代, 使小图斑数增多而斑块平均面积减少; 4区自然景观比重相对较低, 但人工景观较为分散, 增加了图斑数量导致整体景观平均斑块面积减少; 5区中自然景观比重相对较小, 人工集中干预下的连片人工景观成为样区主导, 引起整体景观斑块面积增大。同样, 坦帕湾平均斑块面积变化趋势与象山

表5 人工干扰强度区划分及内部主要景观组成		
Tab. 5 Intensity divisions of human-disturbed landscape and its internal main composition		
名称	编码	景观组成
低强度干扰区	1	主要是海洋、林地, 不透水性小, 包含潮滩湿地、红树林等
中低强度干扰区	2	主要是林地、湖泊等自然景观, 包括部分农用地和离散住宅
中强度干扰区	3	主要是建筑和植被的混合区, 离散的住宅区和农用地
中高强度干扰区	4	主要包含离散的住宅区, 准备开发的空旷地
高强度干扰区	5	主要是大面积的建筑物, 不透水性大, 包含工厂、高密度住宅区、机场等

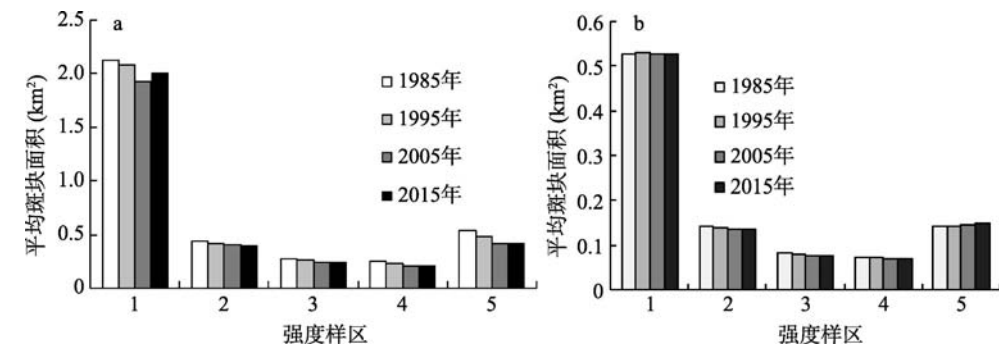


图16 1985-2015年象山港(a)与坦帕湾(b)景观平均斑块面积对不同人工干扰强度的响应
Fig. 16 Responses of landscape mean patch area to intensities of different human disturbance in Xiangshang Bay (a) and Tampa Bay (b) from 1985 to 2015

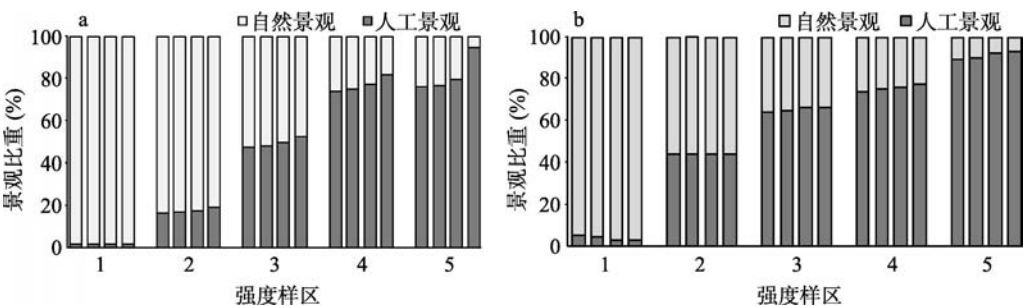


图17 1985-2015年象山港(a)与坦帕湾(b)自然景观、人工景观比重对不同人工干扰强度的响应
Fig. 17 Responses of specific gravity of natural and artificial landscapes to intensities of different human disturbance in Xiangshang Bay (a) and Tampa Bay (b) from 1985 to 2015

港基本吻合,即样区强度增大而平均斑块面积减少,其中1~4区景观平均斑块面积较小,但5区集中的人类活动干预下人工景观占据了该样区的主要部分,整体平均斑块面积有所增加。因此,象山港在开发过程中应注意自然景观的保护,注重港湾景观布局基础理论研究与信息化平台建设,合理分布休闲娱乐、工厂企业、工矿用地,强化公众环境意识,提高景观生态修复的及时性。防止生态廊道的破坏,必要时采取法律法规措施,减少港湾开发过程中对自然景观的人工干预程度。

选用较为常用的香农多样性指数对象山港和坦帕湾进行景观多样性表征。象山港人工干扰强度1~5区,景观多样性整体表现为先增加后稳定的趋势(图18a),其中1~3区景观多样性指数逐渐增多,但人类活动分散,仅边缘区域的自然景观受到干扰,人工景观仍占较小比重;而3~5区则波动减少。坦帕湾人工干扰强度1~3区,景观整体多样性逐渐增大,但4~5区明显变小(图18b),其中1~3区自然景观分布较多,在人工干扰加强下景观类型增加;4~5区景观类型较为单一,以建设用地为主,景观多样性指数较小。因此,象山港在开发利用过程中,应避免景观过于单一,注重比较和研究不同景观或同一景观不同时期、岸段的多样性与异质性变化,分析港湾土地利用过程中的景观敏感性,维持港湾景观格局良性发展。

景观破碎度指自然分割及人为切割的破碎化程度,即景观生态格局由连续变化结构向斑块嵌块体变化过程的一种度量,它反映景观空间结构的复杂性,也说明人类对景观的干扰程度。由图19可知,随着象山港景观人工干扰强度提升,1~4区连片分布的自然景观在人工干扰后破裂、斑块分离,嵌块体不断分散,景观破碎度不断加剧;而5区人

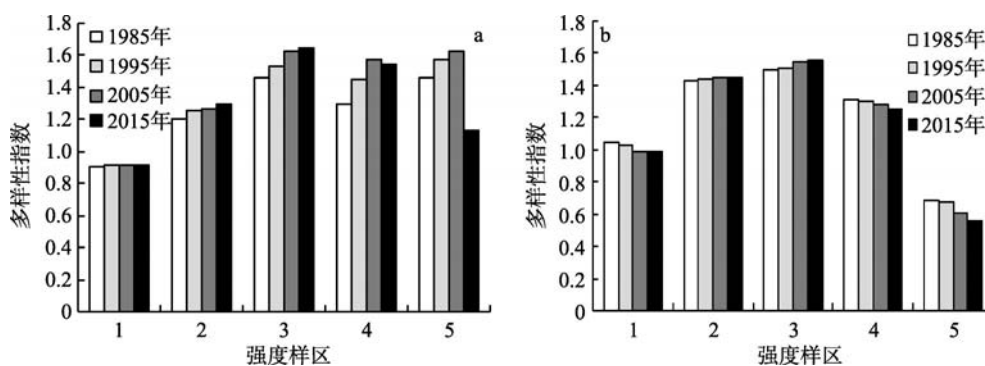


图18 1985-2015年象山港(a)与坦帕湾(b)景观多样性对不同强度人工干扰的响应

Fig. 18 Responses of landscape diversity to intensities of different human disturbance in Xiangshangang Bay (a) and Tampa Bay (b) from 1985 to 2015

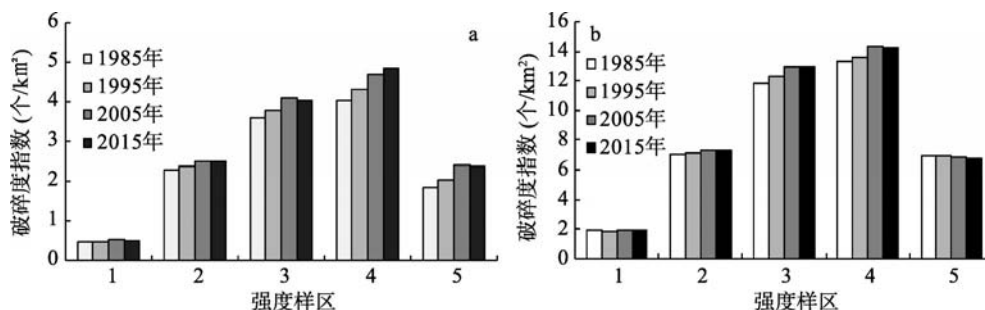


图19 1985-2015年象山港(a)与坦帕湾(b)景观破碎度对不同人工干扰强度的响应

Fig. 19 Responses of landscape fragmentation to intensities of different human disturbance in Xiangshangang Bay (a) and Tampa Bay (b) from 1985 to 2015

工景观聚合程度高且平均斑块面积较大,使4~5区的景观破碎度有所降低。从不同阶段变化来看,1985-2005年象山港不同人工化强度下景观破碎度逐渐增大,2005-2015年的3区、5区,景观破碎度有所减小,主要是耕地景观、高密度建设用地等人工景观聚合度增大所导致。同样,坦帕湾整体景观破碎度变化与象山港一致,即人工干扰强度1~4区景观破碎度增大,4~5区降低。但坦帕湾变幅很小且趋于平稳,说明坦帕湾自然景观区域保护措施良好,受人工干扰影响小。因此,在象山港开发和保护过程中,也应该注意维持部分自然景观状态,特别要注意港湾开发达到一定强度时,需监测较大规模的聚集景观类型及空间辐射范围,以免被人类活动过度干预而导致大规模景观分离。

5 结论

(1) 随着海岸开发不断加强,过去30年中、美两港湾人工岸线比例均以持续增长为基本特征,而自然岸线长度逐渐减小,但从人工岸线占总岸线长度的比重增幅来看,象山港远大于坦帕湾。岸线资源不可逆转且容易破坏,因此在开发过程中,象山港需要借鉴坦帕湾港湾保护战略,合理维护自然岸线资源,控制人工岸线增速。

(2) 30年来象山港岸线曲折度不断减小,其中,自然岸线曲折度变化程度弱于人工岸线,但曲折度仍高于人工岸线。同样,坦帕湾近30年来岸线曲折度也呈减小趋势,但变幅较小。这种差异是由两港湾不同的土地开发利用与社会经济发展历程引起的。此外,人类活动干预下象山港和坦帕湾人工岸线演变态势也深刻地影响着整体岸线曲折度的变化过程。因此象山港在开发过程中,可借鉴坦帕湾岸线利用方式,构造曲折型岸线,控制湾内岸线曲折度资源保有率。

(3) 从整体变化来看,象山港海岸人工化强度增加明显,而坦帕湾海岸人工化强度则缓慢增强;从局部变化来看,随着岸线开发不断推进,象山港沿岸人类活动集中程度在空间上表现为扩散加强,而坦帕湾局部岸段海岸人工化强度变化较小。因此,象山港应开展岸线资源环境敏感性评估、海水水质指标跟踪调查、港湾海岸土地利用潜力分析等工作,积极控制Ⅲ级、Ⅳ级岸线的开发力度,同时人为景观建设时需注重增加人工岸线曲折度,对相应区域进行海岸人工化强度实时监测和利用潜力综合评估。

(4) 在一定时期内,海岸人工化强度与整体岸线曲折度均有紧密联系,表现出显著负相关。当海岸人工化强度随着时间增大时,岸线曲折度会相应减小,反之亦然。因此,象山港必须坚持合理适度开发原则,进一步深化曲折度与人工化强度关系的理论研究,并将其应用到港湾岸线资源开发利用与保护的过程中。

(5) 近30年来人类活动对象山港和坦帕湾景观格局演变产生了深刻的影响,主要表现在景观空间构型、景观多样性和景观破碎度的变化:象山港和坦帕湾港湾平均斑块面积和景观比重基本一致,随着人类活动增强,景观平均斑块面积减少,自然景观比重高于人工景观;象山港景观多样性减少明显,坦帕湾景观多样性减少区域集中在人类活动最弱和最强区域,形成双峰模式;两港湾景观破碎度和人类活动强度密切相关,即随着人类活动增强,景观破碎度增加,在人类活动最集中区域景观破碎度降低。因此,应该注意维持部分自然景观状态,特别要注意港湾开发达到一定强度时,需监测较大规模的聚集景观类型及空间辐射范围,以免被人类活动过度干预而导致大规模景观破碎。

参考文献(References)

- [1] Xu Lianghui, Li Jialin, Yang Lei, et al. Integrated suitability evaluation on mainland coastline resources in Zhejiang Province. *China Land Sciences*, 2015, 29(4): 49-56. [徐谅慧, 李加林, 杨磊, 等. 浙江省大陆岸线资源的适宜性综合评

- 价研究. 中国土地科学, 2015, 29(4): 49-56.]
- [2] Wu Jiansheng, Wang Zheng, Zhang Liqing, et al. Research progresses on driving forces of the changes of landscape pattern. *Progress in Geography*, 2012, 31(12): 1739-1746. [吴健生, 王政, 张理卿, 等. 景观格局变化驱动力研究进展. *地理科学进展*, 2012, 31(12): 1739-1746.]
- [3] Tirkey N, Biradar R S, Pikle M, et al. A study on shoreline changes of Mumbai coast using remote sensing and GIS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2005, 33(1): 85-91.
- [4] Paterson S K, Loomis D K, Young S E. The human dimension of changing shorelines along the U.S. North Atlantic Coast. *Coastal Management*, 2014, 42(1): 17-35.
- [5] Li Xing, Zhang Lianpeng, Ji Changchen, et al. Spatiotemporal changes of Jiangsu coastline: A remote sensing and GIS approach. *Geographical Research*, 2014, 33(3): 414-426. [李行, 张连蓬, 姬长晨, 等. 基于遥感和GIS的江苏省海岸线时空变化. *地理研究*, 2014, 33(3): 414-426.]
- [6] Xu Jinyong, Zhang Zengxiang, Zhao Xiaoli, et al. Spatial-temporal analysis of coastline changes in northern China from 2000 to 2012. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(5): 651-660. [徐进勇, 张增祥, 赵晓丽, 等. 2000-2012年中国北方海岸线时空变化分析. *地理学报*, 2013, 68(5): 651-660.]
- [7] Chu Z X, Yang X H, Feng X L, et al. Temporal and spatial changes in coastline movement of the Yangtze Delta during 1974-2010. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66: 166-174.
- [8] Sun Weifu, Ma Yi, Zhang Jie, et al. Study of remote sensing interpretation keys and extraction technique of different types of shoreline. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2011(3): 41-44. [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. *测绘通报*, 2011(3): 41-44.]
- [9] Lantuit H, Pollard W H. Fifty years of coastal erosion and retrogressive thaw slump activity on Herschel Island, southern Beaufort Sea, Yukon Territory, Canada. *Geomorphology*, 2008, 95(1/2): 84-102.
- [10] Yao Xiaojing, Gao Yi, Du Yunyan, et al. Spatial and temporal changes of Hainan coastline in the past 30 years based on RS. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(1): 114-125. [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. *自然资源学报*, 2013, 28(1): 114-125.]
- [11] Blodgett H W, Taylor P T, Roark J H. Shoreline changes along the Rosetta-Nile Promontory: Monitoring with satellite observations. *Marine Geology*, 1991, 99(1/2): 67-77.
- [12] Zhu Changming, Zhang Xin, Luo Jiancheng, et al. Automatic extraction of coastline by remote sensing technology based on SVM and auto-selection of training samples. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2013, 25(2): 69-74. [朱长明, 张新, 骆剑承, 等. 基于样本自动选择与SVM结合的海岸线遥感自动提取. *国土资源遥感*, 2013, 25(2): 69-74.]
- [13] Fan Dian, Guo Huadong, Yue Huanyin, et al. Detection of lake shoreline in SAR image based on wavelet. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(6): 511-516. [范典, 郭华东, 岳焕印, 等. 基于二进小波变换的SAR图像湖岸线提取. *遥感学报*, 2002, 6(6): 511-516.]
- [14] Ryu J H, Choi J K, Lee Y K. Potential of remote sensing in management of tidal flats: A case study of thematic mapping in the Korean tidal flats. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 102: 458-470.
- [15] White K, El Asmar H M. Monitoring changing position of coastlines using thematic mapper imagery, an example from the Nile Delta. *Geomorphology*, 1999, 29(1/2): 93-105.
- [16] Xu L H, Gong H B, Li J L. Comprehensive suitability assessment of coastline resources of Zhejiang Province, China. *Philippine Agricultural Scientist*, 2015, 98(2): 224-236.
- [17] Guo Luo, Du Shihong, Xue Dayuan, et al. Spatio-Temporal variation of landscape patterns during rapid urbanization in Guangzhou City. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, 45(1): 129-136. [郭砾, 杜世宏, 薛达元, 等. 快速城市化进程中广州市景观格局时空分异特征的研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(1): 129-136.]
- [18] Verbutg P H, Soepboer W, Veldkamp A, et al. Land use change modeling at the regional scale: The Clues Environmental Management, 2002, 30: 391-405.
- [19] Qin Xiangdong, Min Qinwen. Application of cellular automata in landscape pattern optimization. *Resources Science*, 2007, 29(4): 85-91. [秦向东, 闵庆文. 元胞自动机在景观格局优化中的应用. *资源科学*, 2007, 29(4): 85-91.]
- [20] Parceris L, Marull J, Pino J, et al. Land use changes, landscape ecology and their socioeconomic driving forces in the Spanish Mediterranean coast (El Maresme County, 1850-2005). *Environmental Science & Policy*, 2012, 23(11): 120-132.
- [21] Solon J. Spatial context of urbanization: Landscape pattern and changes between 1950 and 1990 in the Warsaw metropolitan area, Poland. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 93(2): 250-261.

- [22] Olsen L M, Dale V H, Foster T. Landscape patterns as indicators of ecological change at Fort Benning Georgia USA. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 79(2): 137-149.
- [23] Tzanopoulos J, Vogiatzakis I N. Processes and patterns of landscape change on a small Aegean island: The case of Sifnos, Greece. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 99(1): 58-64.
- [24] Tian Guangjin, Zhang Zengxiang, Zhang Guoping, et al. Landscape dynamic change pattern of Haikou City by TM imagery and GIS. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 1028-1034. [田光进, 张增祥, 张国平, 等. 基于遥感与GIS的海口市景观格局动态演化. *生态学报*, 2002, 22(7): 1028-1034.]
- [25] Zhang Qiaomin, Zheng Deyan, Li Shaoning, et al. A study on the sediment dynamics of ebb-tidal delta of Zhanjiang harbor tidal inlet. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(5): 421-429. [张乔民, 郑德延, 李绍宁, 等. 湛江港潮汐汉道落潮三角洲沉积动力过程. *地理学报*, 1995, 50(5): 421-429.]
- [26] Wan Kai, Bao Xianwen, Yao Zhigang, et al. Tidal and residual current characteristics at mouth of Shachenggang channel. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2014, 45(4): 669-675. [万凯, 鲍献文, 姚志刚, 等. 沙垵港湾口断面潮流及余流特征分析. *海洋与湖沼*, 2014, 45(4): 669-675.]
- [27] Li Chunchu. Ceomorphic characteristics of the harbour coasts in south China. *Acta Geographica Sinica*, 1986, 41(4): 311-320. [李春初. 华南港湾海岸的地貌特征. *地理学报*, 1986, 41(4): 311-320.]
- [28] Ma Lijie, Yang Xiguang, Qi Yali, et al. Oceanic area change and contributing factor of Jiaozhou Bay. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(3): 365-369. [马立杰, 杨曦光, 祁雅莉, 等. 胶州湾海域面积变化及原因探讨. *地理科学*, 2014, 34(3): 365-369.]
- [29] Wang Xianghua, Zhu Xiaodong, Li Yangfan, et al. Dynamic assessment of the cumulative ecological effects from Xiamen Bay city development. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2375-2381. [王向华, 朱晓东, 李杨帆, 等. 厦门海湾型城市发展累积生态效应动态评价. *生态学报*, 2007, 27(6): 2375-2381.]
- [30] Lin Guilan, Zuo Yuhui. Cumulative ecological effects assessment on resource exploitation and utilization in bay. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(3): 432-440. [林桂兰, 左玉辉. 海湾资源开发的累积生态效应研究. *自然资源学报*, 2006, 21(3): 432-440.]
- [31] Chen Zeshi, Wang Wenhai, Wu Sangyun. The Gulf of China. Beijing: China Ocean Press, 2007. [陈则实, 王文海, 吴桑云. 中国海湾引论. 北京: 海洋出版社, 2007.]
- [32] Wang Mingyue, Li Jialin, Xu Lianghui, et al. Beach farmland reclamation from landscape pattern change: Dongtai County, Jiangsu Province as a case study. *Journal of Ningbo University (NSEE)*, 2014, 27(4): 60-65. [王明月, 李加林, 徐琼慧, 等. 滩涂围垦农业利用区景观格局变化分析: 以江苏东台为例. *宁波大学学报(理工版)*, 2014, 27(4): 60-65.]
- [33] Yuan Qixiang, Li Jialin, Xu Lianghui, et al. Temporal and spatial variations of shoreline in tidal inlet system of Xiangshangang Bay and its relation to human activities in the past 40a. *Journal of applied Oceanography*, 2015, 34(2): 279-290. [袁麒翔, 李加林, 徐琼慧, 等. 近40a象山港潮汐汉道岸线的时空变化特征及其与人类活动的关系. *应用海洋学学报*, 2015, 34(2): 279-290.]
- [34] Wang Ying, Ji Xiaomei. Environmental characteristics and changes of coastal ocean as land-ocean transitional zone of China. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(2): 129-135. [王颖, 季小梅. 中国海陆过渡带—海岸海洋环境特征与变化研究. *地理科学*, 2011, 31(2): 129-135.]
- [35] Yuan Qixiang, Li jialin, Xu Lianghui, et al. Quantitative analysis of river morphological features in Xiangshangang Bay Basin. *Journal of Marine Sciences*, 2014, 32(3): 50-57. [袁麒翔, 李加林, 徐琼慧, 等. 象山港流域河流形态特征定量分析. *海洋学研究*, 2014, 32(3): 50-57.]
- [36] Li You, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Research on dynamic changes of coastline in Shenzhen City based on landsat image. *Resources Science*, 2009, 31(5): 875-883. [李猷, 王仰麟, 彭建, 等. 深圳市1978年至2005年海岸线的动态演变分析. *资源科学*, 2009, 31(5): 875-883.]
- [37] Zhao Zongze. Mainland shoreline change analysis of Fujian Province of 30 years on remote sensing [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2013. [赵宗泽. 30年来福建省大陆海岸线变迁遥感分析[D]. 青岛: 山东科技大学, 2013.]
- [38] Zhou Juan, Chen Bin, Yu Weiwei. Landscape pattern analysis and dynamic change in Quanzhou Bay. *Marine Environmental Science*, 2011, 30(3): 370-375. [周娟, 陈彬, 俞炜炜. 泉州湾景观格局分析及动态变化研究. *海洋环境科学*, 2011, 30(3): 370-375.]
- [39] Lin Guilan, ZuoYuhui. PRED Regulation of Xiamen Bay in the process of urbanization. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(2): 137-146. [林桂兰, 左玉辉. 厦门湾城市化过程的人口资源环境与发展调控. *地理学报*, 2007, 62(2): 137-146.]

Comparative research on the impact of human activities on changes in coastline and landscape in bay areas: A case study with Xiangshangang Bay, China and Tampa Bay, USA

LIU Yongchao^{1,2}, LI Jialin^{1,2}, YUAN Qixiang^{1,3}, SHI Xiaoli⁴,
PU Ruiliang⁵, YANG Lei¹, LU Xuezhu¹

(1. Department of Scientific Research of the Urban, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;
2. Research Center for Marine Culture and Economy, Zhejiang Province, Ningbo 315211, Zhejiang, China;
3. Center for Marine Resource Management, Ocean and Fishery Bureau of Xiangshan, Xiangshan 315700, Zhejiang, China; 4. Editorial Department of Journal of Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;
5. School of Geosciences, University of South Florida, Tampa, FL 33620, USA)

Abstract: Using multitemporal Landsat TM images at a 10-year interval, in this study, we (1) extracted information of spatial location, length, and tortuosity of coastline and landscape configuration, diversity and fragmentation in the bay areas of Xiangshangang Bay, China and Tampa Bay, USA as well from the four 10-year periods from 1985 to 2015; (2) constructed indices of artificial coastline and bay area landscape human disturbance; and (3) explored and discussed the impact of human activities on changes in bay area coastline and landscape types. Our analysis results demonstrate the following five points. (1) In the past 30 years, the length of natural coastline in Xiangshangang Bay and Tampa Bay was shrunk, while the length of their artificial coastline was first elongated and then showed a stable trend. Since there was a difference influence of human activities on coastline and landscape types between the two bay areas, Xiangshangang Bay experienced dramatic changes in parts of coastline geomorphologies and continuous decrease of coastline sinuosity while in Tampa Bay, there was a little change in coastline geomorphologies and its coastline sinuosity was almost unchanged. (2) The intensity of human activities in Xiangshangang Bay was continuously enhanced from 1985 to 1995, and then the degree of enhancement had slowed down after 1995. However, in the time period, the impacted extent of human activities gradually increased and finally covered almost entire coastline in the area. In Tampa Bay area, although the intensity of human activities was enhanced, the degree of enhancement was slow from 1985 to 2015 and the impacted area of human activities was concentrated in several coastal city areas. (3) The average area of landscape patches strongly disturbed by human activities in both Xiangshangang Bay and Tampa Bay generally showed a trend of decreasing from 1985 to 2005. However, during the period of 2005-2015, the mean patch area of landscape disturbed by different degree of human activities in Xiangshangang Bay changed differently, while in Tampa Bay it basically unchanged. (4) From 1985 to 2005, the indices of landscape diversity in various areas of human disturbance in Xiangshangang Bay gradually increased, while in Tampa Bay, changes in indices of the landscape diversity varied. From 2005 to 2015, the change in the intensity of human disturbance in both bay areas was from weak to strong while the indices of landscape diversity in Xiangshangang Bay and Tampa Bay increased first and then decreased. (5) Landscape fragmentation index in different human disturbance areas in both Xiangshangang Bay and Tampa Bay gradually increased from 1985 to 2005 while from 2005 to 2015, in both bay areas, the landscape fragmentation index presented a decreasing trend.

Keywords: bay coastline; bay landscape; coastline change; human activities; Xiangshangang Bay; Tampa Bay