DOI: 10.5846/stxb201406181270
毌亭,侯西勇.海岸线变化研究综述.生态学报,2016,36(4):1170-1182.
Wu T, Hou X Y.Review of research on coastline changes.Acta Ecologica Sinica,2016,36(4):1170-1182.

海岸线变化研究综述

毋 亭[1,2],侯西勇[1,*]
1 中国科学院烟台海岸带研究所,烟台 264003
2 中国科学院大学,北京 100049

摘要: 受全球及海岸带区域环境过程与人类活动的综合影响,海岸线发生剧烈的变化,对生态、环境及经济社会的影响不容忽视,海岸线变化相关研究因此得到普遍的关注。在讨论海岸线的定义和分类的基础上,介绍岸线信息提取的方法与技术,总结国内外海岸线变化的特征、机制与影响方面研究的进展,并指出未来研究的趋势,包括:对海岸线变化过程进行动态监测仍将是普遍关注的研究重点之一;对海岸线变化特征、规律与机理的认识已经日益深化,基于大量高精度数据和机理模型的研究已成为热点和前沿问题;针对不同的海岸带区域,聚焦海岸线变化的原因和机制及其对环境和生态的影响,以及不同区域之间的相互联系与影响特征,这将是未来研究的重点之一;中国海岸线变化的独特性、复杂性突出,促进和支撑中国的海岸带综合管理实践,提高决策者与管理者对岸线变化所带来的灾害风险的重视,为中国海岸带的科学规划与发展提供依据,这应该是我国海岸线变化研究的重要目标。

关键词: 海岸线; 遥感提取; 精度控制; 空间变化; 驱动因素

Review of research on coastline changes

WU Ting[1,2], HOU Xiyong[1,*]
1 *Yantai Institute of Coastal Zone Research (YIC), Chinese Academy of Sciences (CAS), Yantai* 264003, *China*
2 *University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: Because of the combined effects of global and coastal environmental processes and human activities, dramatic changes to coastlines have had significant effects on the environment, ecosystems, and human society in the coastal zone, and the issue has increasingly become a major socio-economic concern to countries along the coast. Consequently, coastline changes have drawn great attention in the academic community, and numerous studies on this issue have been conducted and results subsequently published. Following the definition of proxy-based coastlines and rules of coastline classification, in this paper, we review the methodologies and technologies of coastline interpretation, quality calculation, and estimation of coastlines extracted from remote sensing imageries and topographic maps, as well as analytical methodologies and technologies related to coastline change. Driving factors and the effects of coastline changes are also summarized and analyzed in this paper. Progress and directions of expected research are presented in the last part of this paper. A coastline is a wet-dry boundary or ocean-land boundary. In this paper, individual shoreline indicators generally fall into two categories: visually discernible coastlines (e.g., wet-dry line, debris line, vegetation line), or intersection lines of the coastal profile with a specific vertical elevation defined by the tidal constituents of a particular area (e.g., mean high-low water line, mean sea level line). Methodologies and data sources of coastline data extraction are reviewed in the second part, and the methodologies are classified into three categories based on whether they involve human assistance (automatic

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05130703); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14); 中国科学院烟台海岸带研究所"一三五"项目(Y254021031)
收稿日期: 2014-06-18; **网络出版日期:** 2015-07-09
* **通讯作者** Corresponding author.E-mail: xyhou@yic.ac.cn

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

extraction, semi-automatic extraction, and visual interpretation). Calculation of quality and estimation of coastlines are discussed in the second part of this paper, and include line-based evaluation, point-based evaluation, and deduction evaluation. In the third part, methods for analysis of coastline change are reviewed and explained, from simple methods to more complicated ones, and from qualitative methods to more quantitative ones. The driving factors are reduced to three categories: global environmental processes (e.g., global warming, sea level rise), coastal environmental processes (e.g., ocean dynamic, sediment movement), and human activities (e.g., coastline hardening, sea reclamation). In the last part of this paper, we discuss research progress and expected research on coastline change around the world. We put forward the following views. Dynamic monitoring of coastline changes remains one of the highest research priorities, as our understanding of features, laws, and mechanisms of coastline change deepens, and as research based on high-accuracy data and advanced mechanistic models develops. Studies focus on causes and mechanisms of coastline changes, impacts on coastal environments and ecosystems of various coastal zones, as well as on the characteristics of interrelations and mutual influences of different coastal regions, are another major area of focus of studies on global coastline change. Furthermore, coastline changes in China have distinct characteristics and complexity; therefore, studies of the Chinese coastline should be used to set the primary goals for improving and supporting the practices of ICZM (Integrated Coastal Zone Management). These studies will increase the awareness of decision-makers and stakeholders of the risks of hazards caused by coastline change, and will provide key information for coastal scientific planning and development.

Key Words: coastline; extraction by remote sensing; accuracy control; spatial variation; driving factors

海岸线具有独特的地理、形态和动态特征，是描述海陆分界的最重要的地理要素，是国际地理数据委员会(International Geographic Data Committee)认定的27个地表要素之一[1]。在全球气候变暖及海平面上升的背景下，全球超过一半的海滩遭受侵蚀而后退[2]。然而，20世纪以来，世界沿海国家经济重心向滨海地区转移，全球已有超过一半的人口居住在离海岸线100km的范围内[3]，海岸带成为人类经济活动最活跃、最集中的地区。日愈饱和与拥挤的生活与生产空间，迫使一些沿海国家、区域以围填海形式向海洋要土地，使得部分区域海岸线一反全球海平面上升背景下的海岸侵蚀趋势而大规模向海扩张，海岸线正以远大于自然状态下的速度与强度在改变。海岸线的剧烈变化，给世界各国沿海地区带来经济、社会、生态、环境等方面的矛盾与难题。岸线侵蚀，海岸带土地资源减少，土地承载力下降，海水入侵，淡水资源紧张; 岸线固化，陆海间的水沙供给过程中断，加剧海岸带地面下沉、湿地退化以及风暴潮灾害影响; 人工岸线扩张，侵占和破坏湿地资源，污染海岸带环境，加剧富营养化等问题。国内外学者已经认识到: 海岸线的位置、走向和形态变化是全球及海岸带环境过程、人类活动综合作用的结果与反映，不仅体现海岸带环境特征及演变态势，也反映海岸带经济社会发展、生态环境变化与政策导向之间的博弈关系，因此，海岸线动态变化研究是海岸带环境监测、资源开发与管理等研究的基础[4]，有助于加深对海岸带环境与生态过程的理解，以及促进海岸带资源与环境的可持续管理与开发。有鉴于此，本文对近年来国内外海岸线变化方面的研究进行系统地总结，以期指出这一问题研究的现状、特征和发展态势。

1　海岸线的定义、空间位置与分类

1.1　海岸线的定义与空间位置确定

海岸线被定义为陆地表面与海洋表面的交界线[5]。理想情况下，研究与管理中所涉及到的海岸线应该与实际水陆边界线一致，但因为周期性的潮汐与不定期风暴潮的影响，水陆边界线具有瞬时性，且一直处于摆动状态。因此，在实际应用中，一般采用较为固定的线要素代替水陆边界线指示海岸线的位置，称为指示岸线或代理岸线。指示岸线分为两大类: 目视可辨识线，即肉眼可分辨的线要素，如，干湿分界线、植被分界线、杂物堆积线、硝壁基底线、侵蚀陡崖基底线、大潮高潮线等; 基于潮汐数据的指示岸线，即海岸带垂直剖面与利用

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

实测潮汐数据计算的某一海平面的交线，如，平均高潮线为多年潮汐数据计算的平均大潮高潮面与海岸带垂直剖面的交线，平均海平面线为多年潮汐数据计算的平均海平面与海岸带垂直剖面的交线等。较常见的指示岸线如表 1 和图 1 所示。

表 1 常见指示岸线的定义

Table 1 The definition of some common shoreline indicators

指示岸线分类 Categories of shoreline indicators	指示岸线 Shoreline indicators	特征识别 Characteristics of individual shoreline indicators
目视可辨识线 Visually discernible coastal features	崖壁(侵蚀陡崖)顶或底线	临海峭壁(侵蚀陡崖)的崖顶线或基底线
	人工岸线	海岸工程向海侧水陆分界线
	植被线	沙丘上植被区向海侧边界线
	滩脊线	滩脊顶部向海一侧
	杂物线	大潮高潮的长期搬运作用形成的较为稳定的杂物堆积线
	干湿分界线	大潮高潮长期淹没形成的干燥海滩与潮湿海滩分界线
基于潮汐数据的指示岸线 Tidal datum-based coastline indicators	瞬时大潮高潮线	即时大潮的最高潮在沙滩上所达到的最远边界
	平均大潮高潮线	多年大潮高潮线的平均位置
	平均海平面线	平均海平面与海岸带剖面的交线

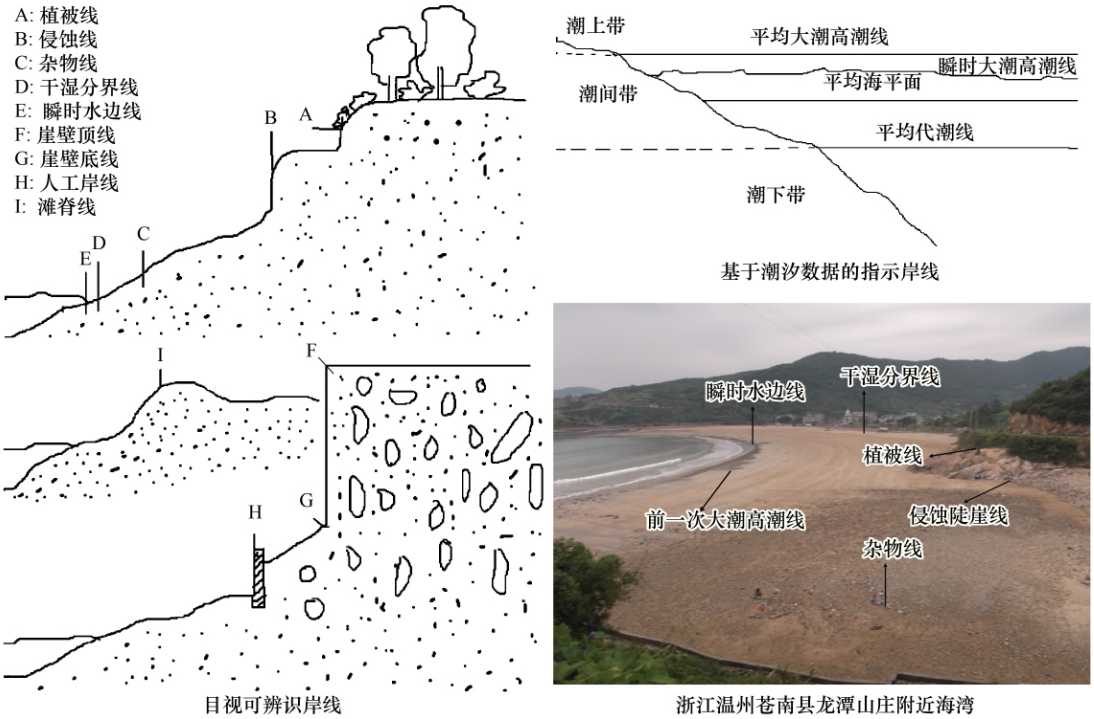

图 1 常见指示岸线空间位置的剖面图

Fig.1 Profile map of the spatial location of some common shoreline indicators

指示岸线的具体选择需要根据特定的研究背景、研究区的海岸特点和研究区域的可利用数据信息而定。通常认为大潮高潮线是海水与陆地的分界线，地形图中的岸线多数是指大潮高潮线，但在遥感影像及野外现场，大潮高潮线往往并不直接可见。可辨识岸线中，除人工岸线外，其余岸线均是在大潮高潮的长期淹没、冲刷、搬运等作用下形成，很好地指示了大潮高潮线的位置，因此，在岸线变化的时空特征研究与陆地制图中，常选择这些岸线代替大潮高潮线进行说明。平均高潮线是多年高潮线的平均值，但在温和气候下，以制图为目的输出的高潮线与平均高潮线的差距是非常小的[6]，因此，一些研究中选择平均大潮高潮线代替大潮高潮线。基于潮汐数据的指示岸线，暗含了海水侵蚀与淹没海岸的距离，因此，常被用于海岸带的管理、规划与灾

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

害预防等行政领域。如,在新西兰,平均大潮高潮线是法定的规划分界线。

1.2　海岸线的分类

岸线的分类体系较为多样化。孙晓宇等根据是否被人类利用将环渤海地区的岸线分为自然岸线与人工岸线两大类[7]; 姚晓静等根据海岸的物质组成将海南岛的自然岸线分为河口、基岩岸线、砂砾质岸线、生物岸线,以及将人工岸线分为建设围堤、码头岸线、农田围堤、养殖围堤[8]; 武芳等根据海岸的形态、物质构成及人类干扰程度将辽东湾东岸岸线分为人工岸线、基岩岸线、砂质岸线、已开发的淤泥质岸线、未开发的淤泥质岸线和河口岸线[9]; 孙伟富等将岸线分为基岩岸线、砂质岸线、粉砂淤泥质岸线、生物岸线和人工岸线; 高义等将中国大陆自然岸线分为基岩岸线、淤泥质岸线和砂质岸线[10]。综合众多研究,海岸线可按人类利用情况分为自然岸线与人工岸线 2 个一级类; 按照海岸的物质组成,又可将自然岸线划分为基岩岸线、砂砾质岸线、淤泥质岸线、生物岸线等二级类; 而人工岸线则可根据用途差异分为丁坝与突堤、港口码头、养殖与盐田围堤、交通围堤、防潮堤等。

2　海岸线信息提取的方法与技术

海岸线信息提取是对现实世界海陆分界线的概括过程,最终呈现的线要素模型是现实世界海陆分界线上具有代表性的特征点的集合。提取过程主要涉及数据源选取、提取的方法与技术、数据精度控制等问题。

2.1　主要数据源

1927 年以前,航空摄影测量技术尚未出现,海岸线信息主要来源于历史文献与地图资料(如,历史地质地貌、专题地图) [11]、18 世纪的地形图(如,美国地形图(Topographic sheet) [12]、英国地形测量图(Ordnance Survey maps)) 等。此类数据源通常地域性比较强,所能覆盖的空间范围有限。

1927—1980 年,航空摄影测量技术问世并逐渐成熟,各种航空摄影测量像片[13]成为岸线信息获取的重要来源。航空像片覆盖范围较广,但成本高、时间覆盖率低,仍然具有很强的地域性。

20 世纪 70 年代以来,美国陆地卫星发射升空,遥感影像数据覆盖范围广、重复周期短、获取成本低、空间分辨率高,成为岸线等研究的首选数据源。应用最普遍的是 Landsat 系列遥感影像数据[14],以及 QuickBird、IKONOS、SPOT、HJ-CCD、CBERS、IRS、Radarsat 等卫星影像。此外,遥感卫星的相关产品及衍生数据,如,GPS 坐标、海深、气候气象等也常被用作岸线研究的补充与辅助数据。

90 年代以来发展起来的数码影像系统技术,利用若干固定位置的摄像机按照一定的时间间隔曝光获取海岸影像,可监测岸线的连续变化,但仅限于特定的离散点,适用空间尺度小。

同样在 90 年代出现的激光雷达探测数据,能在很短的时间内获取较大范围区域的地面信息,因此,在海岸线研究中的应用发展较快。按照承载雷达的工具可分为航天合成孔径雷达、航空激光雷达[11]、船载雷达[15]、车载雷达等。但雷达数据的获取成本仍然较高,在岸线研究中的应用仍局限于较小的空间尺度。

2.2　海岸线提取的方法与技术

海岸线的提取包括几何位置绘制与类型识别等。岸线类型识别主要靠人工判读。岸线几何位置的提取,根据绘制过程中是否需要人工辅助或手动修改分为自动、半自动与目视解译三种技术。实际应用时,在统一海岸线标准的基础上,应综合考虑各种岸线提取精度的影响因素,结合多源数据匹配组合的特征,运用地学相关知识,选择合适的方法高效、准确的提取海岸线。

2.2.1　海岸线的自动提取

海岸线的自动提取主要依赖于雷达探测的 DEM 高程数据,即,提取海岸带地形剖面与海岸线高程面的交线。海岸线高程面可以是: 1) 验潮站长期观测资料计算的平均高潮面或平均海平面; 2) 没有验潮站资料时可现场测量多个岸线点的高程然后取平均高程面; 3) 在没有验潮站观测资料同时又无法实施现场测量时,可在 DEM 数据或遥感影像解译标志明显的区域判绘多个岸线点,然后取平均高程面[16]。后两种获取高程面的方法假定区域内岸线的高程面一致,只适用于地形起伏与空间差异可以忽略的较小空间区域的岸线提取。位置

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

确定后，结合遥感影像各类型海岸的解译标志或实地经验，判断岸线的类型。

2.2.2 海岸线的半自动提取

借助 ERDAS\ENVI\PCI 等遥感图像处理软件的数字图像处理技术可实现岸线的半自动化提取，如图 2 所示。

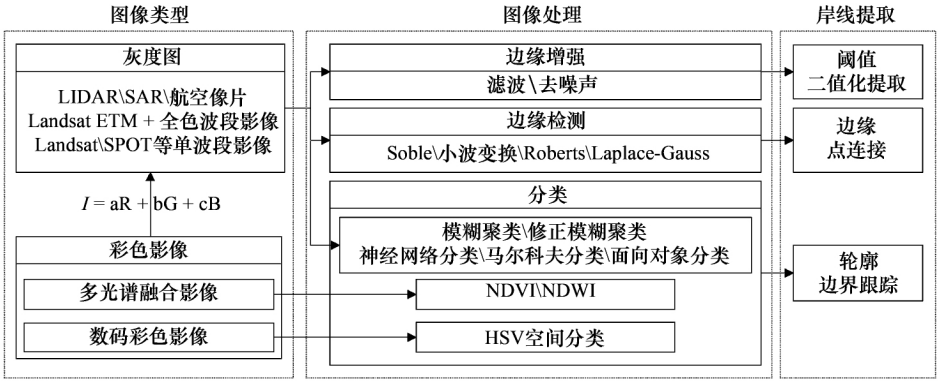

图 2 岸线半自动提取技术流程

Fig.2 Technical process of semi-automatic extraction of shoreline

对于单波段影像(LIDAR、SAR、航空像片、Landsata ETM+全色波段、Landsat-SPOT 等的可见光多光谱的单波段等)，可通过 3 条技术流提取岸线：通过滤波、去噪等边缘增强最大化岸线与背景地物的辐射对比度，设定阈值将图像二值化以提取岸线；利用边缘检测算法，检测灰度梯度突变的边缘点，然后连接提取岸线；运用模糊聚类、修正模糊聚类、神经网络分类、马尔科夫分类、面向对象等分类方法区分陆地与海洋像元并将同类邻近像元合并斑块化，利用轮廓边界跟踪技术提取岸线。

对于多光谱影像，可通过 $I = aR + bG + cB$ 关系，将彩色图像转化为单波段形式的灰度图像，利用基于灰度图像的岸线提取技术提取岸线；或者构建归一化植被指数(NDVI)、归一化水体指数(NDWI)[17]，识别陆地与海洋斑块，利用轮廓边界跟踪技术提取岸线。

对于数码彩色影像(Video Image)，可将其“红-绿-蓝(Red-Green-Blue，RGB)”空间转换为“色调-饱和度-亮度(Hue-Saturation-Value，HSV)”空间，利用水体与陆地“色调-饱和度”或亮度差异，识别陆地与海洋单元，实现海陆分离和海岸线提取[18]。

利用数字图像处理技术提取岸线，存在 2 个问题：1) 在图像噪声及分辨率因素的影响下，获取的岸线的连续性和准确性存在一定问题，提取结果需要人工辅助修测；2) 提取结果均为影像获取时间的瞬时水边线，必须经过潮位校正后方能作为海岸线。潮位校正一般根据卫星成像时刻的潮位高度、平均大潮高潮位的潮水高度以及海岸坡度等信息，计算水边线至高潮线的水平距离，从而确定海岸线的位置。

2.2.3 海岸线的目视解译

多光谱遥感影像呈现的各类岸线的典型而丰富的光谱特征，使得岸线的目视解译成为可能。具体而言，可结合各类型岸线的地学特征、光学特征，总结形成岸线解译标志，并通过野外验证与修正，建立多光谱遥感影像上各类岸线的解译标志与判绘原则，利用多光谱遥感影像识别海岸线的类型，判绘岸线位置[19]。

基岩岸线　在标准假彩色合成的彩色影像上，海水区域呈深蓝色，而陆地因为岩石或植被辐射作用，呈亮白色或红色，颜色差异较大，可直接提取水陆边界线作为海岸线。

砂砾质岸线　在标准假彩色合成影像上呈亮白色，而海岸线以下海滩因为水的间歇或经常淹没作用较为湿润，在影像上则较暗，因此，砂砾质海滩岸线的影像解译位置一般选择在亮白色向暗色转折的分界线上，且偏向于亮白色区域。

淤泥质岸线　淤泥质海岸向陆一侧一般植被生长茂盛，在标准假彩色合成影像上呈红色或暗红色，向海

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

一侧植被较为稀疏或没有植被,则呈浅红色或灰色,因此岸线的遥感解译位置取红色明显变淡或变为灰色的转折处。

人工岸线　一般比较平直并因而在影像上易于辨识,丁坝和突堤一般直接沿其中心线提取,其余人工岸线一般取人工构筑物向海一侧的水陆边界线作为海岸线。

2.3　岸线信息质量控制

岸线数据集一般是基于某一特定时刻的静态影像所提取,因此,它只能代表特定定义与特定时间或时段的陆海分界线,而且,岸线数据的提取受人为主观影响较大,因此,提取结果必然与实际陆海分界线存在差异。对提取的岸线数据进行误差分析和精度控制,判断并保证其能达到某一特定应用或需求,是岸线相关研究中非常必要和重要的过程。基本的思路是计算提取的岸线与真实岸线之间的位置差异并判断其是否在应用或用户的可接受范围内,若不在,则采取相应措施予以改进。获得数字格式的"真实岸线"是不可能的,所以在实际的岸线质量控制过程中,一般是将已知具有较高精度的岸线作为真值参与比较。

2.3.1　岸线质量评估

岸线质量评估的方法可分为基于特征点评估、推论评估、基于线评估。

基于线评估 美国国家图像与地图局(National Imagery and Mapping Agency, NIMA) 2000 年白皮书中提出了针对线性要素的质量评估方法。基本思想为评估代表同一地球表面要素的两条线数据的相似性,度量方法包括地图概括因子、失真因子、偏离因子、模糊因子。四者分别描述线要素的不同特征,同时,又具有能够表现误差的空间分布形式的能力。1) 地图概括因子: 待评估岸线与已知具有较高精度岸线长度之比,反映待评估岸线与较高精度岸线所能呈现的细节相似度,值越接近 1,待评估岸线越接近较高精度岸线; 2) 失真因子: 将待评估岸线与较高精度岸线数据同时标准化并平均分割,依照同一方向为两条岸线的分割点编号,计算两条岸线上所有对应点对的平均距离反映两岸线对应点间的差异,值越大,待评估岸线相对于较高精度岸线的变形越大; 3) 偏离因子: 待评估岸线落于较高精度岸线右边的弧段与左边弧段长度比,反映待评估岸线相对于较高精度岸线的摆动情况,值越大,待评估岸线相对于较高精度岸线的摆动越不规则; 4) 模糊因子: 计算两条岸线两对端点间的对应距离,取较大值作为半径,以 4 个端点为圆心分别做圆,两对端点的圆对应相交,求相交面积较大者与整圆面积的比值,反映待评估岸线的端点相对于较高精度岸线的偏移情况,值越接近 1,待评估岸线的端点越接近较高精度岸线的端点。

基于特征点评估 选择已知误差且精度较高的数据集作为参照对象,如,GPS 野外采样点、由更高空间分辨率的影像提取的岸线点等,比较参照数据集与待评估数据集中对应岸线特征点的平面坐标,按公式计算均方根误差(RMSE)[20],或计算较高精度岸线数据集中的岸线点至待评估岸线的垂直距离,然后按公式计算中误差[16]:

$$\mathrm{RMSE} = \sum_{j=1}^{N} \sqrt{(X_{Tj} - X_{tj})^2 + (Y_{Tj} - Y_{tj})^2} \tag{1}$$

$$\mathrm{RMS} = \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2 + D_3^2 + \cdots + D_n^2}{n}} \tag{2}$$

式中,RMSE(均方根误差)为误差统计量,(X_{Tj}, Y_{Tj}) 为实地控制点坐标,(X_{tj}, Y_{tj}) 为实地控制点在岸线数据图形上的对应点坐标,RMS 为中误差,D 为较高精度岸线数据集中的岸线特征点至待评估岸线的垂直距离。

推论评估 当用户因为没有足够的资金与时间支持而无法获得有效数量的高精度特征控制点或岸线数据时,岸线的质量评估可采用推论评估法。该方法认为数据源误差、数据转换与处理过程中产生的误差会积累并传播至最终的岸线数据,一般是分析并推算岸线提取过程中所有潜在的可能误差项,并按公式(3)计算综合误差,该方法又可称为多误差综合法[20]:

$$U = \sqrt{Er^2 + Ed^2 + Ep^2 + Etd^2 + Es^2 + \cdots} \tag{3}$$

式中,U 表示综合误差,Er 为校正误差,Ed 为数字化误差,Ep 为像元误差,Etd 为潮差误差,Es 为季节误差。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

具体计算时,可视具体情况添加或删除某些误差项。

2.3.2 岸线质量判断

对于空间数据的水平精度,不同组织或个人根据应用需要,在不同空间尺度上定义了质量判断标准,其中,可用于岸线质量判断的分别如下:

1) 美国国家地图精度标准(National Map Accuracy Standard, NMAS) 指出,当制图比例尺大于 1:2 万时,90%的特征点应落在制图比例尺下真实值的 1/30 英寸范围内;美国联邦地理数据委员会(Federal Geographic Data Committee, FGDC) 则指出,当有 20 个控制特征点时,95%置信水平要求只能有一个点落在所设定的误差范围外;连同美国摄影测量与遥感(American Society Photogrammetry and Remote Sensing, ASPRS) ,3 个机构均要求当制图比例尺大于 1:2 万时,用于比较的特征点数量不能小于 20 个,且所有特征点必须均匀分布以使其能反映研究区域的地理特征及数据集中的误差分布。金永福等利用 GPS 实测了 1083 个上海的岸线点,将其与 Google Earth(空间分辨率 0.6—1 m) 进行对比,发现 90%以上的点偏移距离小于 5 m,最大偏移小于 10 m,满足 1:2 万的制图精度要求[21]。

2) 美国海岸和大地测量局(U.S. Coast and Geodetic Survey) 第 49 号摄影测量与制图指南中要求,在基于地图资料提取海岸线时,岸线定位误差不应超过一定制图比例尺下地图距离的 0.5 mm[6],例如,对于比例尺为 1:5 万、1:10 万和 1:25 万的地图,岸线定位误差应分别小于 25、50、125 m。刘善伟等利用 GPS 采集青岛市 261 个岸线点,计算这些岸线点到由 SPOT 影像提取的岸线的距离的中误差,结果优于 5 m,由此判断 SPOT 遥感影像提取的岸线满足 1:1 万比例尺的制图精度要求[16]。

3) 在岸线变化的相关研究中,岸线的误差要求小于岸线的变化值,否则,岸线变化的分析将不可靠。例如,Bradley M. Romine 等 2009 年运用推论评估法计算岸线误差,并比较由岸线误差计算的速率误差与变化速率的大小关系,判断夏威夷欧胡岛东南海岸线变化速率的可靠性、统计显著性及合理性[22]。

3 海岸线变化特征、机制与影响研究

3.1 海岸线变化特征的分析方法与技术

海岸线变化特征包括长度消长、形态演化、位置变迁、利用类型转移、岸线所围陆海空间更替等。在对海岸线变化进行分析时,可定性分析,或凭借一些简单的基本统计量定量分析,如,利用长度值、海陆域面积、分形维、变化速率等分析岸线长度、形态、位置的时空变化特征。Bradley M. Romine 等人,通过计算岸线变化速率,对夏威夷群岛的考艾岛、欧胡岛、毛伊岛的岸线位置变化趋势进行了分析[23];孙晓宇等人从岸线长度、海陆域面积变化等方面分析渤海湾地区岸线的时空变迁特征[7];徐进勇等人从岸线变化强度及分形维数变化为切入点,分析中国北方岸线长度及形态的时空变化特征[24]。

岸线位置变化的分析在岸线变化研究中占据重要地位,主要研究方法分为定性和定量两种。定性分析主要通过地图叠加分析对岸线位置变化形成基本的了解和定性认识。定量分析则通过数值统计量,如,面积、速率等对岸线位置变化进行量化,其中,基于剖面的位置变化速率方法可同时在多层空间尺度上进行,对岸线变化特征的刻画因此更为深刻与全面,该方法自提出至今,其具体的速率计算方法一直在不断被改进,已从最初简单的端点速率、平均速率发展到较为复杂的线性回归与加权线性回归速率,近年来又出现了能够描述海岸线非线性变化与空间相关性的速率模型。更复杂的方法不断被开发出来,方法的尝试、检验与多种方法的优劣比较、适用条件的讨论也因此成为很多学者关注的热点[25]。根据速率的计算方法,定量分析方法又可分为简单模型分析与复杂模型分析。

3.1.1 地图叠加分析

即将不同时期岸线图层叠加,利用视觉感观定性分析岸线位置变化的时空特征[26-27]。这种方法比较简单,但分析过程主观,分析结果粗糙,不能进行时间或空间的比较,无法进行驱动力分析。

3.1.2 简单模型分析

此类方法认为岸线位置变化过程是单调线性的,即中间没有波动。距离和速率的计算方法主要有 4 种:

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1) 多重缓冲区法[28]　构建原始岸线不同半径的缓冲区,计算岸线落入不同缓冲区的长度占总长度的百分比。对于既定的一个百分比序列,如 5%、10%、15%…95%,存在与序列中每个值相对应的缓冲区的宽度,这些缓冲区宽度构成一个服从高斯分布的序列,根据高斯分布的概率及非线性最小二乘法求得这个序列的平均值及标准差,即岸线的变化距离及变化距离的置信区间。该方法不涉及尺度效应、岸线长度及复杂性影响,更重要的是具有统计精确性[29],但它假设岸线只在水平方向上移动,没有考虑方向性[30]。

2) 动态分割法[31]　在不打断实际岸线的基础上,根据地域特征在岸线属性发生变化的位置进行分割,计算基线与岸线上对应关联点间的平均距离。该方法保持了岸线同其它空间要素的拓扑关系,但当岸线较长且较复杂时,可能会出现不合理值[29]。

3) 基于点的计算　将较早时相的岸线多边形化,将较新时相岸线分割为点数据,计算点至多边形的最短距离,除以两时相的时间间隔即得岸线变化速率[32]。

4) 基于剖面的计算　以平行于所有历史岸线基本走向的线要素为基准线,构建垂直于基线并与所有岸线相交的剖面,基于剖面计算岸线变化速率。剖面与岸线的交点构成岸线位置的时间序列,对此时间序列进行拟合求速率的模型有: 端点速率[33]、平均速率[34]、最小二乘法线性拟合[35]、交叉验证法[36]、加权线性回归法[37]、再加权最小二乘法[37]、绝对值最小法[37]等。

3.1.3　复杂模型分析

认为岸线变化过程是非单调线性的,变化速率也不再是常数,而是随时间变化。计算方法仍是基于剖面对岸线位置的时间序列进行拟合,但不同于简单模型阶段的线性模型,其拟合模型为复杂的多项式模型,图形显示为曲线。曲线的波峰或波谷所在时间点为海岸线运动趋势发生变化的时间拐点,曲线的凹口方向决定海岸线变化的方向及速度的变化。拟合时多项式的次数不由用户决定,而是由岸线数据的精度、样本量等本身固有特征而定。岸线数据的误差越大、样本量越多,多项式的次数将越高,模型匹配度与复杂性也随之增加。因此,选择模型之前首先要构建统计量,通常称为信息标准参数,该统计量的值随模型匹配度的增加而减小,随模型复杂性的增加而增加,统计量的值最小时对应的模型为最优模型,此时,拟合模型最精简同时匹配度最高[38]。

美国联邦地质调查局所实施的“国家海岸线评估项目(U. S. Geological Survey National Shoreline Assessment Project)”提出岸线位置相关性概念,认为某单个剖面上岸线的位置变化并非独立事件,而是受相邻剖面同时相岸线位置的牵制,即相邻剖面岸线位置变化具有空间相关性。因此,同时考虑岸线的相关性及波动性,拟合模型也就变得更加复杂,目前已有的计算方法仍在尝试阶段,还未被广泛应用与了解。选择标准仍然是满足拟合模型最精简且匹配度最高,但模型不再是传统的多项式模型,而是能表达相关性的复杂模型。如: IC-bin[39]与 T、I bin[40]局部模拟方法均是将剖面分为若干组,组内剖面具有相关性,组间剖面则不具备相关性,每组对应一个相关拟合模型,最终岸线变化速率在空间上表现为分段常数序列; 多项式与特征向量模拟方法则在全局尺度上以考虑了相关性的线性、三角函数或特征向量模型统一拟合,剖面线上岸线变化具有加速度,速率不再是常值[22,40]。

3.2　海岸线变化的影响因素分析

3.2.1　海岸线变化的影响因素

海岸带变化的影响因子可归为三类: 全球环境过程、海岸带环境过程、人类活动。

(1) 全球环境过程　新构造运动、海平面大尺度起伏等环境过程是构筑海岸轮廓和骨架、决定海岸沉积/侵蚀方向和速率的作用力,是较长时间尺度海岸发育和变化的背景要素[41]。而气候变暖则构成 20 世纪以来全球及区域岸线变化的重要影响因素。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第三次评估报告指出,全球表面平均温度将上升 1.4—5.8℃。全球变暖,热带洋面温度上升,气压下降,热带气旋随之增多,当热带气旋将远海沉积物搬运至近海分布时,岸线将向海推进[42],而当热带气旋登陆,在海平面升高背景下,极端海水漫溢与洪涝灾害频率、强度增加[43],岸线将会遭受大规模、更强与更

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

频繁的侵蚀[44]。

(2) 海岸带环境过程　海洋动力(如波、浪、潮等)以及沉积物运移是影响岸线变化的最基本的海岸带环境过程。波、浪、潮等海洋动力是海岸形态的主要营造动力[45-46],其与海岸的作用方向、作用强度和海岸带地形、地貌、岸线形状、岸线走向相关[47],其对海岸的改变作用具有空间差异性。沉积物运移是海岸侵蚀的结果和海岸淤积的物质来源,海洋动力对沉积物的搬运,造成海岸线在较大空间尺度上的改变[14];而海岸带微气候因素,如,气压、温度、风场等,通过降水、蒸发、径流等过程对河流向海洋的泥沙补给产生影响[48-49],造成海岸线在较小空间尺度上的改变。

(3) 人类活动　人类活动对岸线的直接改变具有较强的破坏性及不可逆性,原有自然系统的功能及原始状态的恢复较为困难,对其所引起的生态环境的恶化和退化进行治理与补救代价高昂。例如,以海岸防护为目的的防潮堤、丁坝突堤的修筑,以增加人类生存与发展空间为目的的围填海工程,以物品贸易、经济交流与交换为目的港口码头的修建与扩张等。人类活动通过干扰全球环境过程与海岸带环境过程,也间接地影响海岸的变迁。例如,采沙[1]、补沙[50]等活动改变波、浪、潮与海岸作用的方向、能量,影响海岸带侵蚀与堆积过程,从而改变海岸线形状;河流上游水库蓄水拦沙、水土保持工程、土地利用变化、城市扩展、河流或河口改道等,打破河流与海洋间原有的泥沙供给平衡,导致局部岸线的变化[51]。

3.2.2 海岸线变化影响因素分析方法

对于岸线变化影响因子的分析可通过 3 条途径:

(1) 基于岸线实际变化过程的影响因子与影响机制分析,即,通过事件前后、不同区域岸线位置变化特征的对比,分析环境因子与过程等对岸线变化的影响。Cheryl J. Hapke 等将美国加里福尼亚州分为北、中、南三部分,从岸线变化平均速率、最高速率的空间趋势及空间差异方面出发,探索岸线变化与海蚀崖变化的相关关系及内部影响机制[11];Jffrey H. List 等分析风暴潮前、中、后三个时期岸线的变化特征,讨论海岸线对风暴潮响应的空间异质性[52];Keqi Zhang 等选择美国东部海岸的 5 个岸段,通过分析海岸线变化速率的空间差异探究海平面变化与海岸侵蚀之间的关系[53]。

(2) 基于数学方法的影响因素分析,即,通过影响因子变化过程与岸线变化过程的相关分析,确认两个过程是否具有关联。Courtney A. Schupp 等利用卡方检验、交叉相关分析及数字海岸线分析系统等方法,探讨美国北卡罗莱纳州外滩群岛沙坝、近岸沉积物与海岸线变化的关系[54]。

(3) 基于模型的岸线变化分析和模拟,即,利用以自然过程或因子为参数的模型模拟海岸线变化,分析这些自然过程或因子对岸线变化的影响。Hilary F. Stockdon 等以预测的风暴潮海平面高度,结合风暴潮前的沙丘和坡台高程,模拟不同沙滩地区风暴潮前后海岸线和沙滩体积的变化,揭示风暴潮前后海平面高度、海滩坡度对海岸线变化的影响[55];Lisa M. Valvo 等利用模型模拟不同海滨浅层地下岩岩性对海岸线变化的影响[56]。

3.3 海岸线变化的影响效应

岸线侵蚀过程的影响效应 海岸的蚀退作用增强、岸线后退速度剧增,直接造成海岸带土地资源、生物多样性资源、社会经济资源的损失[57],并导致海水入侵、土地盐渍化加剧、淡水资源减少、地基承载力下降、沿海建筑物稳定性被破坏与削弱[58]等。

人力作用下岸线变化的影响效应 包括对海洋动力的影响以及对环境和生态的影响。海岸带的人工建造物,如,养殖池、港口码头、防潮堤都会干扰沿岸流的方向及速率[59],或产生新的沿堤流,从而改变或产生新的泥沙搬运-沉积过程,打破其本身及附近海区原有的冲刷与淤积平衡状态,干扰或逆转海岸线的自然演变趋势[60]。海岸工程伴随大量垃圾的排放入海,海洋环境退化,污染加剧;养殖使用的化学制剂、饵料,通过废水排入海洋,会显著提高近海水域营养物浓度,海水富营养化问题加重,赤潮发生率提高[61]。海岸工程导致海岸带湿地生态系统大面积的减少与破坏,其所特有的诸如气候调节、防洪、为人类提供特定生物资源及作为野生动植物栖息地等生态服务功能也随之丧失。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4　海岸线变化研究的展望

近年来,国外研究主要探讨基于剖面的变化速率的计算方法与岸线变化影响因子。除日本、荷兰、新加坡等,世界上其它国家少有大规模的围填海活动,但愈演愈烈的海岸带开发利用,如,农牧渔业发展、采沙、旅游与娱乐等,以及气候变暖、海平面上升、河流入海泥沙减少等因素,同样使得海岸带面临越来越多的问题与威胁。与中国海岸正经历大规模向海推进的变化趋势相反,海滩侵蚀是全球海岸所面临的最普遍问题[62]。据统计,世界上有 70%的海岸长期遭受侵蚀[2],如,美国的夏威夷群岛[63]以及意大利[51]、土耳其[64]和印度[2]等国家的岸线。主要的影响因素是海平面上升[65]、风暴潮[45-46, 52]和人类干扰[66]。其中,风暴潮对海岸的影响是间歇的,而非周期性的,且风暴潮过后海岸的变化会回归到其固有的长期变化趋势[67],所以风暴潮对全球海岸普遍存在的后退趋势不起决定作用; 人类干预对海岸的改变则具有地区差异性。因此,海平面上升是全球海岸侵蚀现象的决定性和关键性因子。

国内对于岸线变化的研究多数是对岸线基本特征的分析,如岸线长度变化、海陆面积交替、岸线利用类型的相互转移以及岸线分形维时空动态特征等; 对岸线变化影响因子的讨论一般是在岸线利用类型或沿海土地利用类型变化的基础上展开,以定性讨论为主,且多数研究认为目前中国岸线变化的主要控制因素是人类活动,例如,河流上游的调水治沙活动引起的入海水、沙量的减少导致河口入海口处岸线的侵蚀,港口码头、防潮堤的建设使岸线结构硬化从而破坏其上下游沿岸沉积物的侵蚀与堆积平衡,大规模围填海运动导致岸线向海剧烈扩张等; 受高精度数据及方法的限制,基于剖面的位置变化与预测分析在国内研究中仍较少见。

在气候变暖、海平面上升引起的全球岸线普遍后退的大趋势与背景下,国内岸线因为日愈强烈的围填海运动正大规模向海推进。已有研究表明,新中国成立以来,我国先后经历了四次围填海高潮: 前 3 次分别是新中国成立之初的围海晒盐,20 世纪 60 年代中期至 70 年代的围海造田,80 年代中后期至 90 年代的围海养殖; 第四次围填海高潮始于 2008 年国际金融危机,沿海一些地方政府主导港口经济与临海工业,围、填海造地规模远超过去,造成近年来海岸线以数倍于以往的速度大规模向海扩张。我国围填海的热点区域 20 世纪 90 年代以前是长江三角洲地区,1990 年代以来,天津、河北以及珠江三角洲岸线开发、围填海热度开始超越长江三角洲,尤其是 2000 年以后,在天津滨海新区建设的影响下,渤海湾的围填热潮跃居全国首位,并辐射和带动了整个环渤海区域,与长江三角洲、珠江三角洲一起形成三足鼎立的格局[68-69]。针对围填海工程是否对海洋及海岸带生态系统造成较大及不可逆危害,在国内学术界有较大争议。相关学者从海洋动力条件、海岸带湿地面积、海洋及海岸带生物等方面的变化入手,对围填海工程的影响进行讨论与分析。

综合分析国内外的研究进展发现: 岸线变化的研究方法由定性转为定量,而研究内容则从特征的描述发展为机理与机制的探讨。岸线变化的研究方法由最初较为简单的视觉定性分析过渡为以简单统计量量化岸线变化特征,如今已发展出以简单线性或复杂非线性模型拟合分析岸线变化特征的方法。岸线变化的研究内容最初仅停留在对岸线长度、分形维、海陆面积变迁等特征的简单描述,现如今则以探讨引起岸线变化的环境、物理、社会、经济等内在机理与机制为主。

综合国内外海岸线变化方面的研究,得出: 1) 利用多源、多类型、长期的资料和数据对海岸线变化过程进行动态监测是海岸线变化研究的基础,仍将是普遍关注的研究重点之一,更高时空分辨率遥感数据的作用和优势将日益显现,但其应用仍将面临实测潮汐等信息不足的制约; 2) 对海岸线变化特征、规律与机理的认识已经日益深化,基于大量高精度数据和机理模型的深入研究已成为热点和前沿问题,新近对“海岸线位置相关性及非单调线性变化”特征的认识使得对岸线变化特征的描述更加深入、更加接近真实情景,但也对研究方法,尤其是模型的发展提出了新的要求; 3) 在多时空尺度气候变化和人类活动的共同影响下,海岸线变化的过程、机制、趋势与影响具有显著的复杂性和区域差异性,由于海岸带综合管理只能在区域层面得到有效实施,所以,针对不同的海岸带区域开展大量综合的研究,聚焦海岸线变化的原因和机制及其对海岸带环境和生态的影响,以及不同区域之间的相互联系与影响特征,这将是未来研究的重点之一; 4) 中国的海岸带复杂而

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

多样，海岸线变化的独特性、复杂性异常突出，因而是国内外研究的热点区域，从促进和支撑中国的海岸带综合管理实践的角度出发，未来时期，海岸线变化研究有必要在技术和方法创新的基础上，量化不同区域岸线变化的趋势，评估岸线变化对当前及未来生态环境、经济社会的影响，提高决策者与管理者对岸线变化所带来的灾害风险的重视，为中国海岸带的科学规划与发展提供信息与决策依据。

参考文献(References)：

[1] Mujabar P S, Chandrasekar N. Shoreline change analysis along the coast between Kanyakumari and Tuticorin of India using remote sensing and GIS. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(3): 647-664.

[2] Dar I A, Dar M A. Prediction of shoreline recession using geospatial technology: a case study of Chennai coast, Tamil Nadu, India. Journal of Coastal Research, 2009, 25(6): 1276-1286.

[3] Primavera J H. Overcoming the impacts of aquaculture on the coastal zone. Ocean & Coastal Management, 2006, 49(9-10): 531-545.

[4] Liu H, Jezek K C. Automated extraction of coastline from satellite imagery by integrating Canny edge detection and locally adaptive thresholding methods. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(5): 937-958.

[5] Boak E H, Turner I L. Shoreline definition and detection: A review. Journal of Coastal Research, 2005, 21(4): 688-703.

[6] Crowell M, Leatherman S P, Buckley M K. Historical shoreline Change: error analysis and mapping accuracy. Journal of Coastal Research, 1991, 7(3): 839-852.

[7] 孙晓宇，吕婷婷，高义，付敏. 2000—2010 年渤海湾岸线变迁及驱动力分析. 资源科学，2014，36(2): 413-419.

[8] 姚晓静，高义，杜云艳，季民. 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.

[9] 武芳，苏奋振，平博，吴文周，朱良. 基于多源信息的辽东湾顶东部海岸时空变化研究. 资源科学，2013，35(4): 875-884.

[10] 高义，苏奋振，周成虎，杨晓梅，孙晓宇，张丹丹. 基于分形的中国大陆海岸线尺度效应研究. 地理学报，2011，66(3): 331-339.

[11] Hapke C J, Reid D, Richmond B. Rates and trends of coastal change in california and the regional behavior of the beach and cliff system. Journal of Coastal Research, 2009, 25(3): 603-615.

[12] Chaaban F, Darwishe H, Battiau-Queney Y, Louche B, Masson E, Khattabi J E, Carlier E. Using ArcGIS © modelbuilder and aerial photographs to measure coastline retreat and advance: North of France. Journal of Coastal Research, 2012, 28(6): 1567-1579.

[13] Alberico I, Amato V, Aucelli P P C, D´argenio B, Di Paola G, Pappone G. Historical shoreline change of the sele plain (Southern Italy): the 1870—2009 time window. Journal of Coastal Research, 2012, 28(6): 1638-1647.

[14] Ahmad S R, Lakhan V C. GIS-based analysis and modeling of coastline advance and retreat along the Coast of Guyana. Marine Geodesy, 2012, 35 (1): 1-15.

[15] Quan S, Kvitek R G, Smith D P, Griggs G B. Using vessel-based LIDAR to quantify coastal erosion during El Niño and inter-El Niño periods in Monterey Bay, California. Journal of Coastal Research, 2013, 29(3): 555-565.

[16] 刘善伟，张杰，马毅，孙伟富. 遥感与 DEM 相结合的海岸线高精度提取方法. 遥感技术与应用，2011，26(5): 613-618.

[17] Mcfeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.

[18] Aarninkhof S G J, Turner I L, Dronkers T D T, Caljouw M, Nipius L. A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry. Coastal Engineering, 2003, 49(4): 275-289.

[19] 孙伟富，马毅，张杰，刘善伟，任广波. 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.

[20] Fletcher C, Rooney J, Barbee M, Lim S, Richmond B. Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii. Journal of Coastal Research, 2003, (38): 106-124.

[21] 金永福，郭伟其，苏诚. Google Earth 在海岸线修测调查中的应用研究. 海洋环境科学，2009，28(5): 566-569，593-593.

[22] Romine B M, Fletcher C H, Frazer L N, Genz A S, Barbee M M, Lim S. Historical shoreline change, Southeast Oahu, Hawaii; applying polynomial models to calculate shoreline change rates. Journal of Coastal Research, 2009, 25(6): 1236-1253.

[23] Romine B M, Fletcher C H. A summary of historical shoreline changes on beaches of Kauai, Oahu, and Maui, Hawaii. Journal of Coastal Research, 2013, 29(3): 605-614.

[24] 徐进勇，张增祥，赵晓丽，温庆可，左丽君，汪潇，易玲. 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.

[25] Genz A S, Fletcher C H, Dunn R A, Frazer L N, Rooney J J. The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. Journal of Coastal Research, 2007, 23(1): 87-105.

[26] Fromard F, Vega C, Proisy C. Half a century of dynamic coastal change affecting mangrove shorelines of French Guiana. A case study based on

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

remote sensing data analyses and field surveys. Marine Geology, 2004, 208(2/4): 265-280.

[27] 于杰, 杜飞雁, 陈国宝, 黄洪辉, 李永振. 基于遥感技术的大亚湾海岸线的变迁研究. 遥感技术与应用, 2009, 24(4): 512-516.

[28] Goodchild M F, Hunter G J. A simple positional accuracy measure for linear features. International Journal of Geographical Information Science, 1997, 11(3): 299-306.

[29] Heo J, Kim J H, Kim J W. A new methodology for measuring coastline recession using buffering and non-linear least squares estimation. International Journal of Geographical Information Science, 2009, 23(9): 1165-1177.

[30] Heo J, Kim J W, Park J S, Sohn H. New line accuracy assessment methodology using nonlinear least-squares estimation. Journal of Surveying Engineering, 2008, 134(1): 13-20.

[31] Li R X, Liu J K, Felus Y. Spatial modeling and analysis for shoreline change detection and coastal erosion monitoring. Marine Geodesy, 2001, 24(1): 1-12.

[32] Cowart L, Corbett D R, Walsh J P. Shoreline change along sheltered coastlines: insights from the Neuse River Estuary, NC, USA. Remote Sensing, 2011, 3(7): 1516-1534.

[33] Crowell M, Honeycutt M, Hatheway D. Coastal erosion hazards study: phase one mapping. Journal of Coastal Research, 1999, (28): 10-20.

[34] Crowell M, Leatherman S P, Buckley M K. Shoreline change rate analysis: long term versus short term data. Shore and Beach, 1993, 61(2): 13-20.

[35] Fenster M S, Dolan R, Morton R A. Coastal storms and shoreline change: signal or noise?. Journal of Coastal Research, 2001, 17(3): 714-720.

[36] Dolan R, Fenster M S, Holme S J. Temporal analysis of shoreline recession and accretion. Journal of Coastal Research, 1991, 7(3): 723-744.

[37] Keyes T K. Applied regression analysis and multivariable methods. Technometrics, 2001, 43(1): 101-101.

[38] Fenster M, Dolan R. Large-scale reversals in shoreline trends along the U. S. mid-Atlantic coast. Geology, 1994, 22(6): 543-546.

[39] Frazer L N, Genz A S, Fletcher C H. Toward parsimony in shoreline change prediction (I): basis function methods. Journal of Coastal Research, 2009, 25(2): 366-379.

[40] Genz A S, Frazer L N, Fletcher C H. Toward parsimony in shoreline change prediction (II): applying basis function methods to real and synthetic data. Journal of Coastal Research, 2009, 25(2): 380-392.

[41] 庄振业, 刘冬雁, 刘承德, 胡广元, 王玲. 海岸带地貌调查与制图. 海洋地质动态, 2008, 24(9): 25-32.

[42] Cooper M J P, Beevers M D, Oppenheimer M. The potential impacts of sea level rise on the coastal region of New Jersey, USA. Climatic Change, 2008, 90(4): 475-492.

[43] Peduzzi P, Chatenoux B, Dao H, De Bono A, Herold C, Kossin J, Mouton F, Nordbeck O. Global trends in tropical cyclone risk. Nature Climate Change, 2012, 2(4): 289-294.

[44] Woodruff J D, Irish J L, Camargo S J. Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise. Nature, 2013, 504(7478): 44-52.

[45] Kish S A, Donoghue J F. Coastal response to storms and sea-level rise: Santa Rosa Island, Northwest Florida, U. S. A. Journal of Coastal Research, 2013, (63): 131-140.

[46] St-Hilaire-Gravel D, Forbes D L, Bell T. Multitemporal analysis of a gravel-dominated coastline in the Central Canadian Arctic Archipelago. Journal of Coastal Research, 2012, 28(2): 421-441.

[47] Solomon S M. Spatial and temporal variability of shoreline change in the Beaufort-Mackenzie region, northwest territories, Canada. Geo-Marine Letters, 2005, 25(2/3): 127-137.

[48] Ranasinghe R, Duong T M, Uhlenbrook S, Roelvink D, Stive M. Climate-change impact assessment for inlet-interrupted coastlines. Nature Climate Change, 2013, 3(1): 83-87.

[49] Yıldırım U, Erdoğan S, Uysal M. Changes in the coastline and water level of the Akşehir and Eber Lakes between 1975 and 2009. Water Resources Management, 2011, 25(3): 941-962.

[50] Slott J M, Murray A B, Ashton A D. Large-scale responses of complex-shaped coastlines to local shoreline stabilization and climate change. Journal of Geophysical Research: Earth Surface (2003—2012), 2010, 115(F3): F03033.

[51] Aiello A, Canora F, Pasquariello G, Spilotro G. Shoreline variations and coastal dynamics: A space - time data analysis of the *Jonian* littoral, Italy. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2013, 129: 124-135.

[52] List J H, Farris A S, Sullivan C. Reversing storm hotspots on sandy beaches: Spatial and temporal characteristics. Marine Geology, 2006, 226(3/4): 261-279.

[53] Zhang K Q, Douglas B C, Leatherman S P. Global warming and coastal erosion. Climatic Change, 2004, 64(1/2): 41-58.

[54] Schupp C A, Mcninch J E, List J H. Nearshore shore-oblique bars, gravel outcrops, and their correlation to shoreline change. Marine Geology, 2006, 233(1/4): 63-79.

[55] Stockdon H F, Sallenger A H Jr., Holman R A, Howd P A. A simple model for the spatially-variable coastal response to hurricanes. Marine

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Geology, 2007, 238(1/4): 1-20.

[56] Valvo L M, Murray A B, Ashton A. How does underlying geology affect coastline change? An initial modeling investigation. Journal of Geophysical Research: Earth Surface (2003—2012), 2006, 111(F2): F02025.

[57] Crowell M, Coulton K, Johnson C, Westcott J, Bellomo D, Edelman S, Hirsch E. An estimate of the U. S. population living in 100-year coastal flood hazard areas. Journal of Coastal Research, 2010, 26(2): 201-211.

[58] 周健, 丛林, 许彰珉. 上海地区沿海岸线工程受相对海平面上升影响浅析. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(3): 70-73, 78-78.

[59] Saranathan E, Chandrasekaran R, Manickaraj D S, Kannan M. Shoreline changes in Tharangampadi Village, Nagapattinam District, Tamil Nadu, India—A case study. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2011, 39(1): 107-115.

[60] Pandian P K, Ramesh S, Murthy M V R, Ramachandran S, Thayumanavan S. Shoreline changes and near shore processes along Ennore Coast, East Coast of South India. Journal of Coastal Research, 2004, 20(3): 828-845.

[61] Kautsky N, Rönnbäck P, Tedengren M, Troell M. Ecosystem perspectives on management of disease in shrimp pond farming. Aquaculture, 2000, 191(1/3): 145-161.

[62] Kuleli T. Quantitative analysis of shoreline changes at the Mediterranean Coast in Turkey. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 167(1/4): 387-397.

[63] Crowell M, Leatherman S P. Coastal erosion mapping and management. Journal of Coastal Research, 1999, (28): 196

[64] Kurt S, Karaburun A, Demirci A. Coastline changes in Istanbul between 1987 and 2007. Scientific Research and Essays, 2010, 5(19): 3009-3017.

[65] Brooks S M, Spencer T. Shoreline retreat and sediment release in response to accelerating sea level rise: Measuring and modelling cliffline dynamics on the Suffolk Coast, UK. Global and Planetary Change, 2012, 80-81: 165-179.

[66] Jayson-Quashigah P N, Addo K A, Kodz K S. Medium resolution satellite imagery as a tool for monitoring shoreline change. Case study of the Eastern coast of Ghana. Journal of Coastal Research, 2013, (65): 511-516.

[67] Douglas B C, Crowell M. Long-term shoreline position prediction and error propagation. Journal of Coastal Research, 2000, 16(1): 145-152.

[68] Chu Z X, Yang X H, Feng X L, Fan D J, Li Y K, Shen X, Miao A Y. Temporal and spatial changes in coastline movement of the Yangtze delta during 1974-2010. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 66: 166-174.

[69] Wu T, Hou X Y, Xu X L. Spatio-temporal characteristics of the mainland coastline utilization degree over the last 70 years in China. Ocean & Coastal Management, 2014, 98: 150-157.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net