

毋亭, 侯西勇. 1940s 以来中国大陆岸线变化的趋势分析[J]. 生态科学, 2017, 36(1): 80-88.

WU Ting, HOU Xiyong. Tendency of coastline variations on Mainland China since 1940s[J]. Ecological Science, 2017, 36(1): 80-88.

1940s 以来中国大陆岸线变化的趋势分析

毋亭^{1,2,3,4}, 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
3. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002
4. 福建省土壤环境健康与调控重点实验室, 福州 350002

【摘要】基于 1940s—2014 年六个时相的中国大陆岸线数据, 利用基于剖面计算的岸线变化速率, 在全国、省域与区域三个尺度定量分析中国大陆岸线变化的时空特征, 结论如下: 1) 1940s 以来, 中国大陆岸线总体以扩张趋势为主; 大规模扩张趋势主要发生于淤泥质海岸, 空间分布较为集中和连续, 而后退趋势主要表现为砂砾质海岸的侵蚀后退, 空间分布较为分散; 2) 在 10 省市层面, 岸线均是扩张与后退并存, 但以扩张趋势为主, 其中, 天津、河北、上海、江苏岸线的不稳定性最高; 3) 在 32 个区域层面, 除海州湾至江苏废黄河口岸段, 绝大多数区域的岸线均以扩张趋势为主; 黄河三角洲、莱州湾南岸、江苏废黄河口至长江三角洲岸段岸线动态度较高; 4) 近 70 年来, 辽河三角洲至莱州湾南岸岸线持续向海扩张, 1990 年后, 虽然扩张规模有所减小, 强度却显著增加; 长江三角洲至杭州湾岸段, 岸线扩张势头强劲且 1990 年后更趋增强; 杭州湾以南岸线, 扩张强度始终较为平稳。总的来说, 从位移方向的角度分析中国大陆岸线变化的时空特征, 尤其是对扩张与后退热点区域的识别, 将有助于海岸带区域环境与生态问题的防治、资源的优化配置以及经济社会的可持续发展。

关键词: 中国大陆岸线; 端点速率; 线性回归速率; 加权线性回归速率; 岸线扩张; 岸线后退; 1940s—2014 年

doi:10.14108/j.cnki.1008-8873.2017.01.011 中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 1008-8873(2017)01-080-09

Tendency of coastline variations on Mainland China since 1940s

WU Ting^{1,2,3,4}, HOU Xiyong¹

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 10049, China*
3. *College of Resources and Environmental Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China*
4. *Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Health and Regulation, Fuzhou 350002, China*

Abstract: Based on coastlines of Mainland China at six instants in time during the period of 1940s-2014 and by using End Point Rate, Linear Regression Rate and Weighted Linear Regression Rate that were calculated along transects, quantitative analysis concerning spatio-temporal characteristics of coastline variations of Mainland China since 1940s was conducted at national, provincial, regional scales respectively. The results are as follows. 1) Since 1940s, coastline of Mainland China had an overall dominant trend to advance seaward; intensive and continuous large-scale trend of advancing seaward generally occurred on muddy coast; on the other hand, landward retreat mainly dispersed in the form of gravel coast recession. 2) At provincial scale, although advancing seaward and retreating landward coexisted in each administrative unit, advancing seaward dominated

收稿日期: 2016-02-01; 修订日期: 2016-02-29

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项—应对气候变化的碳收支认证及相关问题(XDA05130703); 国家自然科学基金(No.31461143032); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-TZ-15)

作者简介: 毋亭(1988—), 女, 河南焦作人, 博士, 讲师, 研究方向为海岸线变化监测、海岸带脆弱性评估、海岸带环境监测与模拟。E-mail: twu@yic.ac.cn

*通信作者: 侯西勇(1975—), 男, 山东泰安人, 博士, 研究员, 博士研究生导师, 主要从事海岸带土地利用变化监测、海岸线变化监测、海岸带脆弱性评价、海岸带综合管理等研究。E-mail: xyhou@yic.ac.cn

the coastline change trend, and among the ten administrative units, Tianjin, Hebei, Shanghai and Jiangsu were the units that held the most instable coastlines. 3) At regional scale, except the subcells of Haizhou Bay and the abandoned Yellow River Estuary in Jiangsu province, the majority had a dominant trend of advancing seaward; the dynamic degrees of coastline at the Yellow River Delta, the south coast of Laizhou Bay and the coast stretched from the abandoned Yellow River Estuary in Jiangsu province to Yangtze River Delta were relatively higher than other areas. 4) The coast stretched from Liaohe Delta to the south coast of Laizhou Bay kept advancing seaward all along the last 70 years, and after 1990, its intension increased dramatically in spite of the decrease in its extension; the intension of advancing seaward of the coast stretched from the Yangtze River Delta to Hangzhou Bay had been powerful and increased remarkably since 1990; the intension of advancing seaward of the south coast of Hangzhou Bay remained mild, smooth and steady in the last 70 years. In general, from the perspective of movement direction, spatio-temporal characteristics of coastline change in Mainland China were analyzed, and the identification of hotspots referring to coastline advance as well as coastline retreat would contribute to the prevention and governance of eco-environmental pollution, resource optimizing configuration and sustainable development of economy and society in coastal areas.

Key words: Mainland coastline; end point rate; linear regression rate; weighted linear regression rate; coastline advance; coastline retreat; 1940s-2014

1 前言

20 世纪以来, 在全球气候变暖、海平面上升的背景下, 全球至少 70% 的海滩长期处于被侵蚀状态^[1]。频率与强度均日益加剧的灾害性风暴潮^[2]以及日愈强烈的人类对海岸资源与空间的侵占, 以间歇性插入的方式加剧着海岸的侵蚀趋势。海岸侵蚀会导致具有经济价值的土地如耕地、盐场、养殖池的损失与损毁, 也会破坏具有人文价值的建筑物的稳定性, 使海岸带湿地生态系统萎缩及退化, 甚至毁坏海堤等海岸防护工程及其他沿岸设施^[3], 从而造成无法弥补的经济社会损失。因此, 基于岸线侵蚀的岸线变化的研究得到愈来愈广泛的关注^[4-9]。

中国海岸的侵蚀现象也较为普遍^[10], 侵蚀岸段超过三分之一^[3]。从海岸类型方面来讲, 侵蚀现象发生在所有类型的海岸, 包括砂质、淤泥质、基岩质及珊瑚礁海岸; 从地质构造方面来讲, 上升、下降海岸均存在侵蚀; 从岸线形态来讲, 侵蚀又可发生在平直海岸、海湾、开敞海岸甚至有掩护的海岸。虽然大规模的围填海运动及岸线固化工程有效的抑制了岸线的后退趋势, 但海岸侵蚀仍以低滩下蚀、零星等深线向陆后退的形式存在, 且在愈演愈烈的海岸带人类活动的影响下有加趋势。识别侵蚀岸段, 分析岸线的侵蚀速率, 为改善海岸带的风险管理、优化配置有限的经济与社会资源、合理规划与可持续发展提供更加精确有效的信息, 是岸线变化研究的主要目标。

另一方面, 自新中国成立以来, 我国沿海地区经济与社会持续快速发展: 开国初围海晒盐、60 年代围海造田、80 年代围海养殖、近几十年来势头迅猛的临海工业以及港口、码头建设。急剧而强烈的人类活动已成为我国岸线形态变化的主导因素^[11-12], 岸线固化、向海扩张是目前中国大陆岸线最普遍的

变化形式^[13]。经济与社会进步的同时, 海岸带的环境与生态系统却因此遭受着前所未有的考验: 工业及生活用水处理不当造成海水富营养化^[14]、海堤引起地面下沉^[10]与湿地退化^[15]、岸线固化及人类空间的向海扩张改变水生动植物的繁殖、栖息、迁移条件^[16-17]等。识别及探测人类活动较为强烈的热点岸段, 能够为可能出现的、由人类活动引起的环境与生态问题、海岸带灾害事件提供预警信息, 帮助决策者与管理者提前做出反应, 实施预防与保护性措施, 而非被动的在事件发生后给予治理与补救。

本文从全国、沿海省市、空间子单元三个空间尺度出发, 基于剖面线计算不同的岸线变化速率, 定量分析 1940 年代以来中国大陆岸线后退与扩张趋势的空间分布特征与时间阶段特征, 重点识别侵蚀与扩张的热点区域和时段, 通过系统揭示近 70 年来中国大陆岸线位移的时空特征, 以期为海岸带区域的科学规划与管理、可持续发展奠定信息与决策基础。

2 数据与方法

2.1 数据源

岸线数据的信息源包括: 1) 美国陆军制图局依据中国大比例尺地图、日本土地调查(Japanese Imperial Land Survey Sheet)、日本海道测量图(Japanese Hydrographic Charts)、日军参谋部信息(Japanese Army General Staff)等资料编绘的中国沿海 1: 25 万地形图, 共 48 幅, 信息源对应 1904—1945 年间, 但以 1940s 初期为主; 2) 中国沿海 1: 5 万地形图 275 幅, 1: 10 万地形图 39 幅, 测绘年份分布于 1951—1972 年间; 3) 1990、2000、2010、2014 年成像、空间分辨率为 30 m 的 Landsat TM/ETM+/OLI 影像, 均为辐射校正、几何校正和地形纠正后的产品, 可通过 NASA 的 EROS(Earth Resources Observation and Science Center)网站(<http://glovis.usgs.gov/>)免费获取。

2.2 岸线解译原则

综合国内外相关研究结果,并结合十多次覆盖整个中国海岸带区域的野外考察所得的信息,本课题组按照自然状态将中国大陆岸线划分为基岩岸线、砂砾质岸线、淤泥质岸线与生物岸线四大自然类,又按照人为利用方式将岸线划分为丁坝与突堤、港口与码头、围垦(中)岸线、养殖围堤、盐田围堤、交通围堤与防潮堤七大人工类。在本研究中,仅对比分析四种自然类型岸线的变化趋势。

在以上岸线自然类型分类的基础上,利用地形图与遥感影像目视解译 1940s、1960s、1990 年、2000 年、2010 年、2014 年六个时相的中国大陆岸线。

基于地形图提取岸线时,岸线位置取地形图所标注的海陆边界线,岸线类型可根据地图所标注的区域地貌特征、周围地物要素信息等进行判断与划分。

基于遥感影像提取岸线时,可结合各类型岸线的地学与光学特征,总结形成岸线解译标志,并通过野外考察信息的检查与验证,建立遥感影像上各类岸线的解译标志与判绘原则,从而利用遥感影像识别岸线类型,判绘岸线位置,具体如下^[18-19]。

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,而岸线以下海滩因为水的间接或常期淹没作用较为湿润,在影像上较暗,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且偏向于亮白色区域的分界线上。

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,向海一侧植被较为稀疏或没有植被,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向陆一侧的转折处。

生物岸线 我国大陆生物岸线主要为芦苇岸线与红树林岸线。在标准假彩色合成影像上,红树林海岸表现为红色且形态不规则,芦苇同样表现为红

色且没有明显纹理。因此,生物岸线的位置取颜色转淡、斑块破碎度明显增加处的向陆侧的转折线。

2.3 数据处理

2.3.1 中国大陆岸线提取及精度分析

基于上述数据资料,提取中国大陆 1940s、1960s、1990、2000、2010、2014 年 6 个时相的海岸线,投影至 Albers 投影坐标系下,构建近 70 年来中国大陆岸线时空演变态势数据库。2011 年 11 月—2013 年 10 月期间,课题组对中国大陆沿海区域共开展 10 次野外考察,行程累计超过 1.6 万 km,利用亚米级精度的 Trimble GPS 接收机共采集较稳定的岸线控制点 578 个(图 1)。现场所采集的岸线点分布于基岩岸线、防潮堤、港口码头、路堤、河口闸坝等,因此不仅能反映现代岸线的位置,也能揭示过去某一时期甚至多时期岸线的位置属性。根据这一特点,构建与各时相岸线分别匹配的控制点集合,计算对应控制点集与岸线距离的均方根误差^[20-21],表征各时相岸线的位置精度与误差水平。



图 1 GPS 实测数据点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of control points obtained by GPS receiver

表 1 各时相岸线位置的误差水平

Tab. 1 Errors for six shoreline positions of Mainland China

时相	1940s	1960s	1990	2000	2010	2014
控制点数量/个	74	129	228	245	309	320
均方根误差/m	25.23	28.01	23.46	22.15	19.52	19.36

2.3.2 岸线变化速率

岸线变化速率具有多种定义及相应的计算方法, 并各有优缺点, 具体如下:

端点速率(End Point Rate, EPR): 等于两时相岸线的距离间隔除以时间间隔。由于只利用两个时期的岸线位置, 计算结果可能会出现异常值, 若研究期较长或有中间时相岸线, 岸线位置的真实变化趋势可能会被错误的估计^[22]。具体计算方法如公式(1)所示:

$$EPR = \frac{D}{T} \quad (1)$$

式中, EPR 为某一垂直于岸线走向的剖面上岸线变化的端点速率, D 为该剖面上两时相岸线的距离间隔, T 为时间间隔。

线性回归速率(Linear Regression Rate, LRR): 在残差平方最小的基础上, 对多时相岸线的位置序列进行线性拟合, 用最小二乘法建立回归方程, 所得斜率即为岸线变化的线性回归速率^[23]。具体计算过程如公式(2)、(3)、(4)所示:

$$y = ax + b \quad (2)$$

$$b = \frac{n \sum_i x_i y_i - \sum_i x_i \sum_i y_i}{n \sum_i x_i^2 - (\sum_i x_i)^2} \quad (3)$$

$$a = \frac{\sum_i x_i^2 \sum_i y_i - \sum_i x_i \sum_i x_i y_i}{n \sum_i x_i^2 - (\sum_i x_i)^2} \quad (4)$$

式中, a 与 b 分别为岸线位置序列拟合线的斜率与截距, x_i 为 i 时相的 X 轴坐标位置, y_i 为垂直于岸线走向的某一剖面上 i 时相岸线点与基线点的距离间隔, n 为时相个数。

加权线性回归速率(Weighted Linear Regression Rate, WLRR): 估计各时相岸线的位置误差, 计算速率时, 以误差平方的倒数为权重对多时相岸线位置序列进行最小二乘法线性回归拟合, 拟合线的斜率即为加权线性回归速率^[24-25]。具体计算过程如公式(5)、(6)、(7)、(8)所示:

$$y = ax + b \quad (5)$$

$$b = \frac{\sum_i w_i x_i y_i - (\sum_i w_i x_i)(\sum_i w_i y_i) / (\sum_i w_i)}{\sum_i w_i x_i^2 - (\sum_i w_i x_i)^2 / \sum_i w_i} \quad (6)$$

$$w_i = 1/e_i^2 \quad (7)$$

$$a = \frac{\sum_i w_i y_i - b \sum_i w_i x_i}{\sum_i w_i} \quad (8)$$

式中, a 与 b 分别为回归线的斜率与截距, x_i 为 i 时相的 X 轴坐标位置, y_i 为垂直于岸线走向的某一剖面上 i 时相岸线点与基线点的距离间隔, w_i 为 i 时相岸线位置对拟合线的趋势走向贡献的权重, e_i 为 i 时相岸线的均方根误差。

3 结果分析

作近似平行于中国大陆岸线走向的基线, 垂直于基线, 以 100 m 为间隔, 投射与六个时相岸线均相交的剖面, 共 110537 个。基于剖面, 计算 1940s—2014 年间中国大陆岸线变化的端点速率、线性回归速率、加权线性回归速率, 以及 1940s—1990 年间和 1990—2014 年间岸线变化的端点速率。速率值有正、负、零三种指向, 分别表明岸线位置向海扩张、向陆后退、未发生变化。

3.1 近 70 年中国大陆岸线的变化趋势

提取全国范围内端点速率、线性回归速率与加权线性回归速率指向同时相同的剖面子集-a, 在子集中分别统计三种指向的剖面占剖面全集的百分比; 提取全国范围内线性回归速率与加权线性回归速率指向同时相同的剖面子集-b, 在此子集中分别统计三种指向的剖面占剖面全集的百分比。统计结果如表 2 所示:

超过 99% 的剖面上, 线性回归速率与加权线性回归速率对于岸线变化趋势的指向相同, 而仅有约 80% 的剖面上, 端点速率、线性回归速率与加权线性回归速率对于岸线变化趋势的指向同时一致; 子集-a 中, 三种变化趋势的剖面百分比均小于子集-b。统计结果产生以上差异, 说明: 线性回归与加权线性回归经过相互验证, 较端点速率对于长期岸线变化趋势的指示更为可靠; 中国大陆近五分之一的剖面上, 端点速率对于中国大陆岸线长期变化趋势的指示出现异常; 端点速率对三种岸线变化趋势的指示均有异常值出现, 说明, 端点速率会忽略中间时相岸线位置的波动从而使岸线变化的长期趋势发生偏移甚至扭曲。

表 2 各剖面子集中三种变化趋势的剖面统计
Tab. 2 Transect percentages of different variation tendencies in different subsets of transects

剖面	未变化/%	扩张/%	后退/%	总和/%
剖面子集-a	10.80	53.30	15.64	79.74
剖面子集-b	10.86	64.28	24.05	99.19

中国大陆岸线可分为基岩岸线、砂砾质岸线、淤泥质岸线和生物岸线四类^[26]，基于加权线性回归速率计算结果，分析近 70 年来不同类型岸线的变化特征 (图 2)。

图 2-a 反映了不同变化趋势的大陆岸线的类型结构特征：全国范围约三分之二的岸线为向海扩张趋势，其中，近一半为淤泥质岸线，砂砾质岸线、基岩岸线和生物岸线所占比例则依次较低；后退岸线所占比例接近四分之一，其中，近一半为砂砾质岸线，基岩岸线比例也较大，占其中的三分之一；约十分之一的大陆岸线长期稳定，其中，基岩岸线约占四分之三，砂砾质岸线与生物岸线比例则依次较低。可见，近 70 年间：中国大陆岸线的变化趋势以向海扩张为主，且扩张岸段主要分布于大规模连续成片的淤泥质海岸；海岸的向陆后退主要表现为砂砾质海岸的侵蚀；较为稳定的海岸中基岩海岸占绝对主导。

图 2-b 反映了各种类型岸线不同变化趋势的长度比例特征：砂砾质、淤泥质与生物岸线均以扩张趋势为主，向陆后退趋势为辅，未发生位移的部分所占比例均较小，其中，淤泥质岸线为向海扩张趋势的比例最大，占 83.86%，砂砾质岸线与生物岸线为扩张趋势的比例均超过 50%；基岩岸线也以扩张趋势为主，但所占比例不足一半，占 44.68%，后退岸线与位移保持不变的岸线各约占剩余部分的 50%，但后者比例略高。可见，近 70 年间：中国大陆

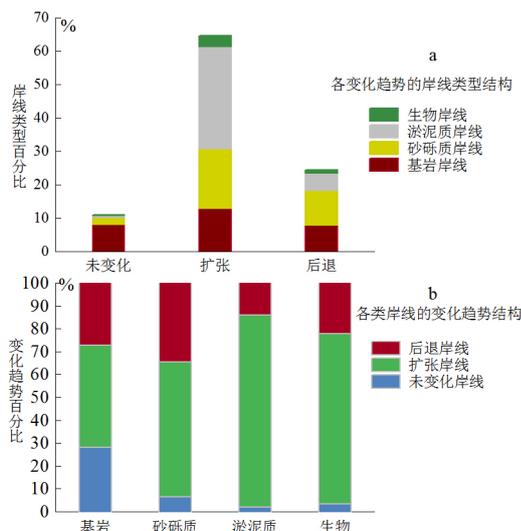


图 2 中国大陆各类型岸线三种变化趋势的剖面统计

Fig. 2 Transect percentages of different variation tendencies for different kind of coastline of Mainland China

各类岸线均以扩张趋势为主；各类岸线中，淤泥质海岸的扩张趋势在四类岸线中最为显著，砂砾质海岸的后退侵蚀趋势最为显著，而基岩海岸较为稳定的趋势最为显著。

3.2 近 70 年沿海各省市岸线变化的趋势

基于加权线性回归速率，统计沿海 10 省市区域内三种变化趋势的岸线比例，并计算扩张与后退趋势的平均速度，结果如图 3 所示：

近 70 年来，中国大陆沿海 10 省市区内岸线均以扩张为主，其中，上海市扩张规模最为显著，几乎全部的海岸被人工化而处于向海扩张趋势，山东扩张规模最小，但扩张岸线的比例也超过了一半；除上海市，沿海各省市区内均有规模较为显著的后退岸线，其中山东与江苏后退岸线的规模最为显著，均超过 30%；以区域内处于动态变化的岸线比例作为衡量该区域岸线的动态性，动态性越高，说明区域内未发生位移的岸线比例越低，则全国 10 省市中，天津、河北、江苏、上海因未发生位移的岸线比例等于或接近于零，区域岸线的动态性相对属于最高范畴。

以区域内三种变化趋势的岸线比例组成作为区域岸线变化趋势结构，则中国大陆区域岸线的变化趋势结构具有较显著的空间聚集性与空间异质性。上海的岸线几乎全为扩张趋势；河北、天津、江苏均以淤泥质海岸为主，岸线的变化趋势均表现为以扩张为主、侵蚀为辅且没有或几乎没有未发生位移的岸线；辽宁、山东、浙江、福建、广东、广西等区域的岸线变化趋势均表现为以扩张为主、侵蚀为辅并有一定规模的未变化岸线，其中，浙江省淤泥质岸线比例相对较高，因此，其处于扩张趋势的岸线比例相对其它区域较高。

全国范围内，河北至浙江一带岸线扩张的平均速度较快，其中，江苏省内岸线扩张的平均速度在 10 省市中居首位，高达 $47.46 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ，其次为天津与上海，且两直辖市内岸线扩张的平均速度相似；辽宁、广东、广西三省岸线扩张的平均速度则相对较慢；江苏省内部分岸线有着明显的后退趋势，后退平均速度较快，其它省市区内岸线后退趋势则较不明显，但有着空间相似性：上海、浙江、福建后退平均速度均在 $0-1 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 间，辽宁、广东、广西后退平均速度均在 $1-3 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 间，河北、天津、山东后退平

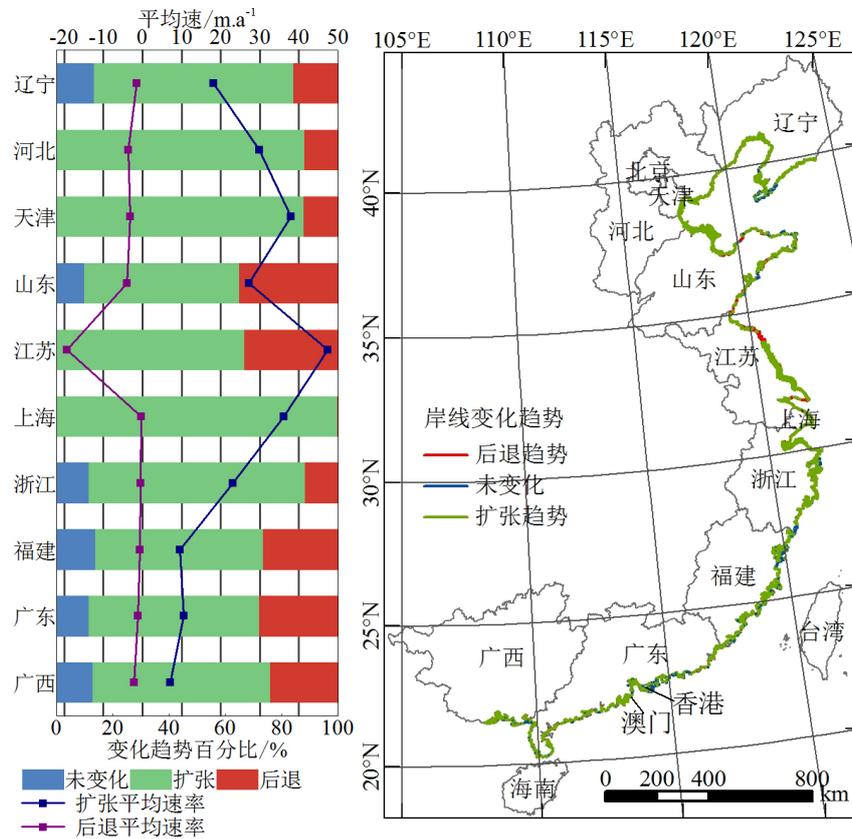


图 3 中国大陆沿海各省市区内岸线变化趋势

Fig. 3 Variation tendencies of coastline in different coastal provinces of Mainland China

均速度则均在 3—4 m·a⁻¹ 间。以区域内岸线的平均变化速度(岸线变化速率绝对值的平均值)作为区域岸线的动态度, 则全国范围内区域岸线的动态度具有显著的南北差异: 福建、广东、广西的岸线动态度较低, 福建以北各省市区的岸线动态度相对较高, 其中江苏的岸线动态度最高, 其次为天津、上海、河北。总体上, 淤泥质岸线的比例越高, 岸线动态度越高。

各省市区域内: 在辽宁, 后退岸线主要分布于大连基岩海岸, 辽东湾东西两岸砂质海岸上零散分布有后退岸线, 辽河三角洲、复州湾及普兰店以东淤泥质海岸则以扩张为绝对主导趋势; 除秦皇岛境内有明显较大范围的后退岸段外, 河北至天津海岸表现为大规模向海扩张; 在山东, 莱州市以西岸段以扩张为主, 以东岸段, 后退与扩张岸段相间分布, 且后退岸段主要分布于较为平直的砂质海滩与较曲折的基岩质海岸, 扩张岸段则主要分布于淤泥质深海湾; 在江苏, 废黄河口附近及长江入海口北岸以向陆后退为主, 其余岸段表现为大规模向海扩张; 长江三角洲至杭州湾岸段表现为大规模向海

扩张; 浙江与福建境内, 砂质海岸与基岩质海岸以后退趋势为主, 淤泥质海岸以扩张趋势为主, 但浙江境内以淤泥质海岸为主, 零散分布有基岩质海岸, 因此其境内以扩张岸段为主而零散点缀着后退岸段, 而福建境内, 福州市以北以基岩海岸为主, 以南为基岩质、砂质与淤泥质海岸相间分布, 因此境内岸线变化表现为福州市以北以向陆后退趋势为主, 以南则为扩张与后退趋势交替分布; 广东与广西境内, 广东珠江三角洲至雷州市东岸、广西钦州市与合浦县海岸, 以淤泥质为主, 岸线变化因此表现为较明显的扩张趋势, 其余岸段以砂质海岸为主, 岸线变化则主要表现为轻微的后退趋势。

3.3 中国大陆岸线变化的阶段性

参考中国 1: 400 万地貌(构造地貌)图、《中国海岸带和海涂资源综合调查报告》、研究组的野外调查信息等资料, 综合考虑中国大陆海岸带的地质、地貌、河口与海湾分布、海区划分、省市级行政分界等因素, 将海岸带区域共划分为 32 个空间子单元(图 4)。在空间子单元层面, 分别统计 1940s—1990 年、1990—2014 年以及 1940s—2014 年三个时间段

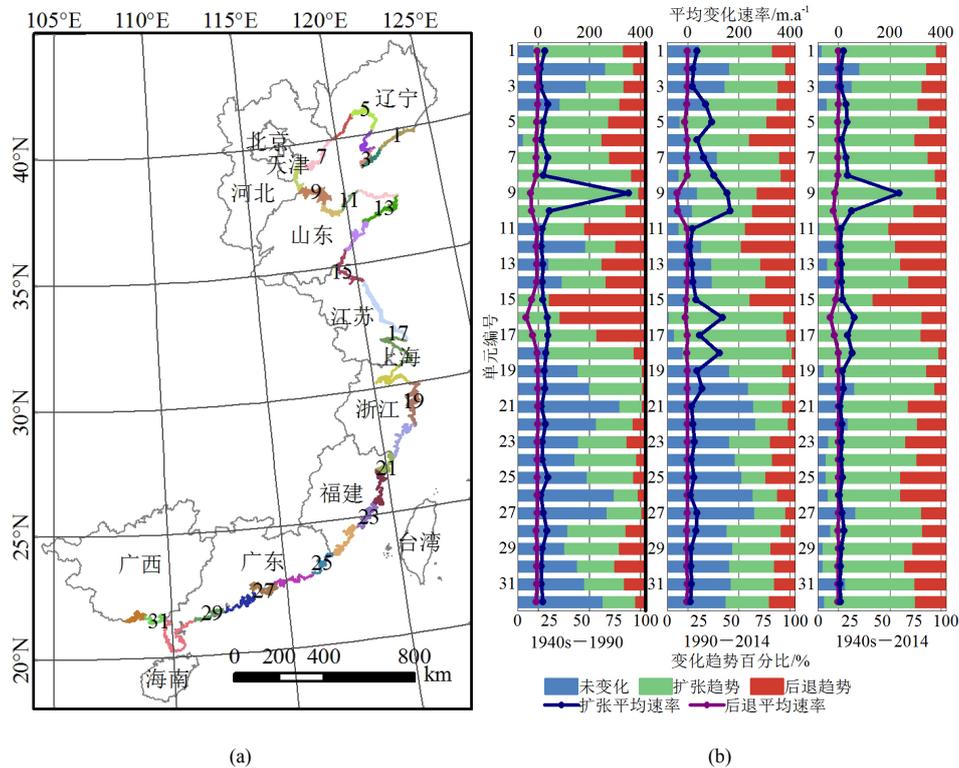


图 4 中国大陆海岸带空间子单元

Fig. 4 Coastal subcells of Mainland China

岸线处于扩张、后退及未变化趋势的剖面百分比,并计算单元内岸线扩张与后退的平均速度(图 4-(b)),分析中国大陆岸线变化趋势的阶段性特征。

1940s—2014 年间,仅海州湾至废黄河口岸段(15)的岸线以向陆后退趋势为主,后退岸线主要分布于日照市、响水县以南至废黄河口岸;其余岸段岸线均以扩张趋势为主,其中河口淤泥质的辽河三角洲(5)、河北秦皇岛至黄河三角洲岸段(7—9)和长江三角洲至浙江中部岸段(17—19),处于扩张趋势的岸线比例较大,均超过 80%;32 个岸段均有岸线处于后退趋势,其中,胶东半岛(11—13)、海州湾至废黄河口岸(15)及广东珠江三角洲以东岸段(25—26),处于后退趋势的岸线比例较高,均超过 35%。由此可见,大规模处于扩张趋势的岸段主要分布于淤泥质海岸,大规模处于后退趋势的岸段则主要分布于砂砾质海岸。

1940s—2014 年间,辽河三角洲(5)、河北至莱州湾南岸(7—10)、海州湾至江苏废黄河口岸附近(15)、长江三角洲岸段(17),未发生位移的岸线比例为零,区域岸线的动态性最高;大连岸段(2—3)、浙江中部至福建中部岸段(20—22)、珠江三角洲东北岸段(27),未发生

位移的岸线比例较高,区域岸线的动态性较低。再次证明区域岸线的动态性与区域岸线的类型组成高度相关:淤泥质岸线比例较大,则区域岸线动态性较高;基岩岸线比例较大,则区域岸线的动态性较低。

1940s—2014 年间,天津至莱州湾南岸岸段(8—10)与江苏废黄河口岸至杭州湾岸段(16—18),岸线扩张平均速率较高,均高于 $34 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$,其中黄河三角洲岸线扩张的平均速率最大,高达 $236.98 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$;莱州湾南岸(10)及江苏废黄河口岸至长江三角洲岸段(16—17)不仅扩张岸线比例较高、扩张平均速度较快,其岸线的平均后退速度也较快。可见,渤海湾至莱州湾南岸、江苏废黄河口岸附近至杭州湾南岸岸段,岸线动态度相对较高。

综合分析近 70 年来空间子单元内岸线的动态性与动态度,结果发现二者具有高度相似的空间聚集性与空间异质性,且与区域内岸线类型结构密切相关。辽河三角洲、渤海湾至莱州湾、海州湾至杭州湾南岸等连续成片的淤泥质海岸,岸线的动态性和动态度均较高;而大连、山东蓬莱头至日照、浙江中北部等基岩海岸比例较大的岸段,岸线的动态性和动态度均较低。

空间单元尺度上, 分析 1990 年前后岸线变化趋势的时空特征, 发现岸线的变化趋势及变化速率具有显著的空间差异性和时间阶段性: 杭州湾以南岸段, 在 1940s—1990 年间与 1990—2014 年间, 未变化岸线比例较高, 且扩张速度普遍较北方慢, 也就是说, 杭州湾南岸以南岸段, 因为以自然淤长为主, 1990 年前后两个时间段内, 区域岸线的动态性及动态度均较低, 而北岸因为主要受人类活动影响, 区域岸线的动态性与动态度则相对较高; 长江三角洲至杭州湾岸段, 在 1990 年前后两个时间段内, 扩张趋势均占绝对主导, 但 1990 年前, 岸线扩张以河口岸线的自然淤长为主, 而之后人类活动成为区域岸线扩张的主导因素, 因此区域平均扩张速度在后一时间段内明显加快, 尤其是杭州湾岸段, 1990 年后的平均扩张速度是之前的近 4 倍; 江苏省内废黄河口以南岸段(16), 1990 年以前岸线变化以向陆后退为主, 后退岸线主要分布于废黄河口附近, 且平均后退速度较快, 而 1990 年以后人类活动的增强使得岸线变化的主要趋势反转为向海扩张, 且扩张速度在全部岸段中居于第三位; 海州湾至江苏废黄河口岸段(15), 1990 年以前同样以后退趋势为主, 后退岸线主要分布于海州湾西岸与废黄河口附近岸段, 平均后退速度较 16 号岸段小, 1990 年以后, 岸线变化同样因人类活动的影响逆转为以向海扩张为主, 平均扩张速度也显著慢于 16 号岸段; 辽宁辽河三角洲至莱州湾南岸岸段, 1990 年前后均以扩张趋势为主, 1990 年后, 处于扩张趋势的岸线比例减小, 但扩张的平均速度除黄河三角洲岸段显著减慢外, 其余均为 1990 年之前的 3—5 倍。由中国大陆岸线的阶段性变化特征可以看出: 1990 年后, 我国河流入海泥沙量在人类活动影响下普遍减少, 而沿海区域岸线的人工化强度显著增加, 从而导致岸线的自然淤涨态势显著减弱而人工扩张过程显著增强; 由此说明, 人类活动已成为影响我国岸线变化的绝对主导因素。

4 结论与讨论

基于 1940s—1990、1990—2014 年、1940s—2014 年三个时间段的岸线变化速率, 分析不同类型岸线的变化趋势特征、岸线变化趋势的省际差异, 以及区域尺度上, 近 70 年来中国大陆岸线变化趋势的时空特征。主要结论如下:

1) 1940s 以来, 中国大陆各自然类型岸线均以扩

张趋势为主。岸线扩张主要大规模发生于淤泥质海岸, 如, 辽河三角洲、黄河三角洲、长江三角洲及杭州湾等岸段; 后退趋势主要表现为砂砾质海岸的侵蚀后退, 且分布较为零散; 未发生位移的岸线则主要分布于基岩海岸, 如辽东半岛的大连与浙江中部至福建中部海岸。

2) 岸线的向海扩张方面: 在省域尺度, 全国沿海 10 省市区域岸线变化均以扩张趋势为主, 在空间子单元尺度, 除海州湾至废黄河口岸段岸线以后退趋势为主外(后退岸线主要分布于日照、响水县以南邻近废黄河口海岸), 其余单元内岸段也均以扩张趋势为主; 就扩张规模而言, 辽河三角洲、渤海湾、长江三角洲、杭州湾扩张岸线的规模最大, 这些岸段均为大规模连续的淤泥质海岸, 较其它自然类型的海岸及规模较小的淤泥质海岸, 能提供更宽广、更便利、更小成本的建设与发展空间, 从而吸引并聚集大规模的生产活动与人口, 因此易出现较大规模的岸线扩张。

3) 岸线的向陆后退方面: 在省域尺度, 除上海市, 沿海各省市区域内均有相当规模的后退岸线, 在空间子单元尺度, 各单元内也均有规模较为显著的后退岸线; 后退趋势的岸段多分布于砂砾质海岸, 如胶东半岛与广东珠江三角洲以东岸段, 最大规模的后退趋势分布于海州湾至江苏废黄河口沿岸。

4) 中国大陆区域岸线的动态性及动态度具有高度相似的显著性空间差异, 而这种差异与区域内岸线类型组成密切相关: 淤泥质岸线比例较高的岸段, 区域岸线的动态性及动态度均较高; 基岩质岸线比例较高的岸段, 区域岸线的动态性及动态度均较低。

5) 中国大陆岸线变化具有显著的时间阶段性: 1990 年后, 在人类活动的影响下, 我国大陆岸线的自然淤涨态势显著减弱而人工扩张态势显著增强, 人类活动成为岸线变化的主导因素。

6) 1940s—2014 年, 杭州湾以南海岸以丘陵与低中山地貌为主, 人类活动多集中分布于较为分散的河口三角洲区域, 因此岸线向海扩张趋势分布较为分散, 连续大规模向海扩张的岸段并不多, 扩张强度始终较为平稳且温和; 长江三角洲至杭州湾岸段向海扩张势头始终强劲且 1990 年后强度较之前有增加趋势, 其中杭州湾岸段增加幅度尤为明显; 辽河三角洲至莱州湾南岸岸段也始终以向海扩张趋势为主, 虽然 1990 年后向海扩张活动的规模有所减小,

强度却显著增加。

综上所述,受海岸地貌、岸线类型、海岸带区域经济社会发展政策和发展水平等因素的综合影响,1940s—2014年间,中国大陆岸线的变化表现出显著的时间阶段性与空间异质性特征,因此,应该在充分了解中国大陆海岸类型的空间分布及各类型岸线的变化趋势特征的基础上,结合区域经济与资源的调控能力,科学制定或调整区域海岸带发展规划与策略,以减少决策滞后失误以及实现理论依据、信息支持与现实管理决策间的高效衔接。例如,1940s以来,中国大陆岸线以扩张趋势为主,人为扩张热点区域主要集中在辽河三角洲、河北至天津、长江三角洲、杭州湾岸段。针对这些区域可能出现的或已经出现的生态与环境健康问题,应给予实时的监测与评估,在积极治理现有问题、预防未来更多更复杂问题的基础上,合理调整其发展规划,建立可持续发展的良性发展模式。近70年来,中国大陆砂砾质及淤泥质海岸均有不同程度的后退趋势,后退热点区域主要集中在胶东半岛及江苏废黄河口附近。对于此类区域,应采取必要而切实的措施予以保护或修复,例如,减少或限制近岸采砂、以补沙形式补充被蚀海滩,修建合理护岸结构如防潮堤、防浪墙等固化岸线,建立生态保护区、人工湿地以促进与保护海岸淤积,等。

参考文献

- [1] DAR I A, DAR M A. Prediction of shoreline recession using geospatial technology: a case study of Chennai coast, Tamil Nadu, India[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 25(6): 1276–1286.
- [2] CAI Feng, SU Xianze, LIU Jianhui, et al. Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(4): 415–426.
- [3] 季子修. 中国海岸侵蚀特点及侵蚀加剧原因分析. *自然灾害学报*[J], 1996, 5(2): 65–75.
- [4] KULELI T, GUNEROGLU A, KARSLI F, et al. Automatic detection of shoreline change on coastal Ramsar wetlands of Turkey[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(10): 1141–1149.
- [5] KULELI T. Quantitative analysis of shoreline changes at the Mediterranean Coast in Turkey[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 167(1–4): 387–397.
- [6] ROELAND H, PIET R. Dynamic preservation of the coastline in the Netherlands[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 1995, 1(1): 17–28.
- [7] MOORE L J, BENUMOF B T, GRIGGS G B. Coastal erosion hazards in Santa Cruz and San Diego Counties, California[J]. *Journal of Coastal Research*, 1999, SI(28): 121–139.
- [8] MORTON R A, MCKENNA K K. Analysis and projection of erosion hazard areas in Brazoria and Galveston Counties, Texas[J]. *Journal of Coastal Research*, 1999, SI(28): 106–120.
- [9] KISH S A, DONOGHUE J F. Coastal response to storms and sea-level rise: Santa Rosa Island, Northwest Florida, U.S.A[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, SI(63): 131–140.
- [10] 冯砚青, 牛佳. 中国海岸环境问题的研究综述. *海洋地质动态*, 2004, 20(10): 1–5.
- [11] 武芳, 苏奋振, 平博, 等. 基于多源信息的辽东湾顶东部海岸时空变化研究[J]. *资源科学*, 2013, 35(4): 875–884.
- [12] CHU Zhongxin, YANG Xuhui, FENG Xiuli, 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.
- [13] 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.
- [14] 崔毅, 陈碧鹃, 陈聚法. 黄渤海海水养殖自身污染的评估[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(1): 180–185.
- [15] 官立新, 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.
- [16] 韩晓庆, 李静, 张芸, 等. 人工干预下河北省淤泥质海岸岸线演变及其环境效应分析[J]. *海洋科学*, 2011, 35(11): 11–18.
- [17] CROWELL M, COULTON K, JOHNSON C, et al. An estimate of the U.S. population living in 100-year coastal flood hazard areas[J]. *Journal of Coastal Research*, 2010, 26(2): 201–211.
- [18] 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, (3): 41–44.
- [19] 毋亭, 侯西勇. 国内外海岸线变化研究综述[J]. *生态学报*, 2016, 36(4): 1170–1182.
- [20] GENZ A S, FLETCHER C H, DUNN R A, et al. The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii[J]. *Journal of Coastal Research*, 2007, 23(1): 87–105.
- [21] EULIE D O, WALSH J P, CORBETT D R. High-resolution analysis of shoreline change and application of balloon-based aerial photography, Albemarle-Pamlico Estuarine System, North Carolina, USA[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2013, 11: 151–160.
- [22] CROWELL M, HONEYCUTT M, HATHEWAY D. Coastal erosion hazards study: phase one mapping[J]. *Journal of Coastal Research*, 1999, SI(28): 10–20.
- [23] FENSTER M S, DOLAN R, MORTON R A. Coastal storms and shoreline change: signal or noise? [J]. *Journal of Coastal Research*, 2001, 17(3): 714–720.
- [24] KEYES T K. Applied regression analysis and multivariable methods[J]. *Technometrics*, 2001, 43(1): 101–101.
- [25] 毋亭, 侯西勇. 1944—2012 年间胶州湾岸线时空动态特征[J]. *科技导报*, 2015, 33(2): 1–7.
- [26] WU Ting, HOU Xiyong, XU Xinliang. Spatio-temporal characteristics of the mainland coastline utilization degree over the last 70 years in China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 98: 150–157.