

许宁,高志强,宁吉才. 基于分形维数的环渤海地区海岸线变迁及成因分析[J]. 海洋学研究, 2016, 34(1): 45-51, doi:10.3969/j.issn.1001-909X.2016.01.006.

XU Ning, GAO Zhi-qiang, NING Ji-cai. Spatial-temporal variations of coastlines in Bohai Rim based on fractal dimension and their causes analysis[J]. Journal of Marine Sciences, 2016, 34(1): 45-51, doi:10.3969/j.issn.1001-909X.2016.01.006.

基于分形维数的环渤海地区海岸线变迁及成因分析

许宁^{1,2,3}, 高志强^{*1,3}, 宁吉才^{1,3}

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东烟台 264003)

摘要:利用遥感和GIS技术提取了环渤海地区1980年、1990年、2000年和2010年4期海岸线信息,采用网格法计算每期海岸线的分形维数;分析了海岸线及其分形维数的时空变化特征,并探讨了其与海岸开发活动之间的关系。研究表明:在1980—2010年间,研究区海岸线长度持续增加,变化强度逐渐增大,海岸线共增加了1 074.35 km;从时间过程看,2000年以后海岸线长度进入快速增长时期;从区域范围看,以天津市和河北省所在的渤海湾地区海岸线的变迁最显著。研究期间,环渤海地区海岸线整体向海推进,海岸线分形维数逐渐增大,岸线形状趋于复杂。人为的海岸开发活动是海岸线变迁的主导因素,2000年之前海岸开发以围垦养殖、盐田为主;之后,港口码头建设和城镇建设型的海岸工程逐渐增多。海岸线的分形维数与海岸带的物质组成与演变过程有直接关系,大量规模不等的海岸工程的建设是海岸线分形维数变化的主导因素。

关键词:海岸线;分形维数;时空变化;GIS;遥感

中图分类号:P737.1

文献标识码:A

文章编号:1001-909X(2016)01-0045-07

Doi:10.3969/j.issn.1001-909X.2016.01.006

0 引言

海岸线处于海陆界面的交汇处,不仅为平均大潮高潮时的海陆分界线,还载负着丰富的环境信息,对海平面升降、新构造运动、沿海滩涂、湿地生态系统及近岸海洋环境等有着重要的指示意义^[1]。海岸带是全球变化的敏感地区,研究海岸线变化及其成因对于了解海岸带生态环境变化具有重要意义^[2]。

遥感具有宏观、高时效、可重复观测地表地物的

优点。利用遥感和GIS技术,能够快速准确地提取海岸线信息,进行动态监测,从而及时掌握海岸开发对海岸线的影响^[3-5]。目前基于遥感图像处理方法提取的海岸线大部分是卫星过顶时的海陆分界线,即瞬时“水边线”^[6-9],而非真正地理学意义上的海岸线^[10]。围绕环渤海地区海岸线变迁及相关科学问题,国内许多学者作了大量研究^[11-14],这些研究多是针对较短时期或典型小区域进行,缺少大尺度、长时间过程的海岸线时空变迁规律分析^[5]。

收稿日期:2015-04-23

修回日期:2015-11-16

基金项目:科技部基础支撑项目资助(2014FY210600);中国科学院战略性先导科技专项(A类)项目资助(XDA11020000);中国科学院重点部署项目资助(KZZD-EW-14);中国科学院海岸带研究所人才引进项目和烟台市科技发展计划项目资助(2014ZH085)

作者简介:许宁(1987—),男,博士,山东单县人,主要研究海岸带遥感与GIS应用。E-mail:nxu@yic.ac.cn

*** 通讯作者:**高志强(1966—),男,研究员,主要从事遥感和模型模拟研究。E-mail:zqgao@yic.ac.cn

分形是指事物的形状、形态与组织的分解、分割、分裂与分析,它在一定程度上代表了一个由局部到整体的对事物的认识过程,而分形维数则是用来描述分形不规则特征的参数^[15]。海岸线是分形领域最传统的研究课题,MANDELBROT^[16] 1967 年在《Science》杂志上发表题为“*How long is the coast of Britain*”一文,独特分析了海岸线本质,阐述了海岸线长度不确定性的问题。具体到海岸线来说,就是海岸线的分形维数与海岸线的曲折程度呈互为正相关关系。许多科学家对海岸线分形科学进行了更加深入的研究,并构建了两种分形维数计算模型:量规法^[17]和网格法^[18]。

环渤海地区是继珠江三角洲和长江三角洲后中国经济发展新的引擎,是改革开放以来经济发展的热点地区之一。另外,许多较大河流如黄河、海河、辽河和滦河等均汇入渤海,河口的淤积与海浪侵蚀等自然条件的变化以及人类填海造陆、滩涂围垦、修筑港口码头等不同规模的海岸工程的实施,必然导致海岸线变化较为频繁,进而影响到海岸带生态环境。本文将海岸线的分形维数作为海岸带变化状况的依据,探究环渤海地区海岸开发活动对海岸线及其分形维数的影响,对海岸资源科学规划、合理利用,解决海岸生态环境问题具有重要的指导意义。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

本文研究的环渤海地区包括辽宁省、河北省、天津市和山东省,其海域广阔,海岸线曲折而漫长,沿岸拥有大连港、营口港、秦皇岛港、天津港、黄骅港、烟台港和青岛港等著名港口,是国民经济增长的重要支撑。本研究区海岸线范围起自辽宁省鸭绿江河口,终至山东省与江苏省交界处的绣针河口,经度在 $117^{\circ}30'E \sim 124^{\circ}20'E$ 之间,纬度在 $35^{\circ}05'N \sim 41^{\circ}00'N$ 之间(图 1)。

1.2 数据来源

本文选取的遥感数据有 1980 年 Landsat MSS 数据、1990 年 Landsat TM 数据、2000 年和 2010 年 Landsat ETM+ 数据。所有卫星影像数据均从美国地质调查局官网下载(<http://glovis.usgs.gov/>)。所有时期的遥感影像都进行了几何精纠正,误差不超过 1 个像元。用到的辅助资料主要包括海图、地形图、行政区划图和统计年鉴等,并且进行了关于环渤海地区海岸线类型的外业调查,为海岸线遥感解译提供了重要支持。

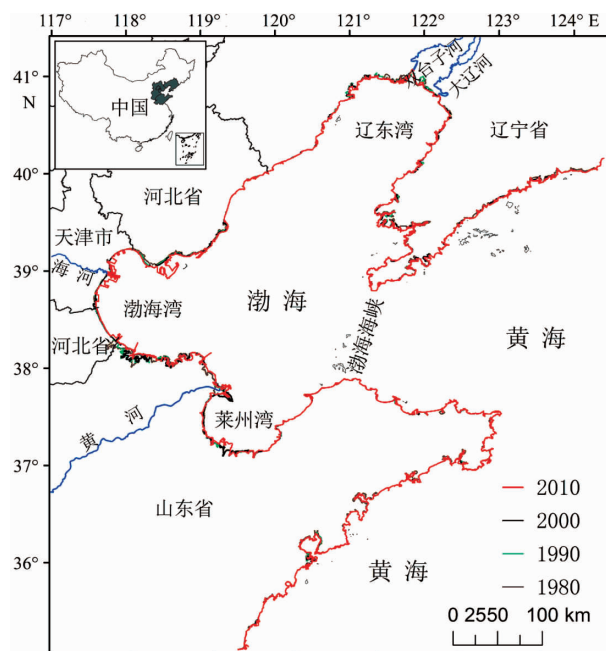


图 1 1980—2010 年环渤海地区海岸线分布
Fig. 1 The coastline distribution in Bohai Rim
from 1980 to 2010

2 研究方法

2.1 海岸线遥感信息提取方法

海岸线分为大陆海岸线与岛屿海岸线,本文所提取的是大陆海岸线。根据“908 专项”的定义将海岸线限定为平均大潮高潮时水陆分界的痕迹线。按照如下原则提取海岸线^[19]: (1)沿海河口海陆分界线的划分原则:保留大型河口的港湾特征;反映河口处沙嘴、沙洲和潟湖地貌;表现河口的喇叭状形态,不对称河渠视河口形态择定,河口分界线一般定在河流缩窄或两岬曲率最大处。(2)淤泥质海岸滩上的陆地(高潮时不被淹没)作为岛屿处理,该岛屿岸线不计算在内。

依据各种类型海岸线在遥感影像上的色调、纹理以及空间形态与分布等特征,并参照研究区地形图、海图、野外调查数据等辅助资料,通过人工目视判读确定海岸线的位置。不同类型海岸的海岸线遥感判读标准参照前人的研究^[5,10]。

考虑到 1980 年 MSS 遥感影像分辨率较低,为了提高精度、保证前后两期海岸线位置没有变化的部分保持严格一致,在 ArcInfo 软件平台上先对 1990 年的海岸线分布进行人机交互解译,并以 1990 年海岸线作为本底数据,只对其它时期海岸线变化部分进行动态更

新,从而有效地避免了 MSS 影像与 TM、ETM+影像分辨率不一致而造成的岸线尺度效应的影响,以及不同时相遥感影像进行海岸线提取时产生的“双眼皮”现象。

2.2 海岸线分形维数

本文采用网格法^[18]计算海岸线的分形维数。网格法的基本思路是使用不同长度的正方形网格连续且不重叠地去覆盖被测海岸线,当网格长度 r 取不同值时,覆盖整条海岸线所需网格数目 $N(r)$ 会出现相应的变化,根据分形理论:

$$N(r) \propto r^{-D} \quad (1)$$

对(1)式两边同时取对数,可以得到:

$$\ln N(r) = -D \ln r + C \quad (2)$$

式中: C 为待定常数, D 即为被测海岸线的分形维数。采用不同的 r 值和 $N(r)$ 值,通过拟合分析即可得到分形维数 D 。其值域是 $1 < D < 2$, D 值越大,海岸线越曲折和复杂。考虑到本文所使用的遥感图像像元的空间分辨率为 30 m,即相当于测量用的最小测尺长度可为 30 m,则网格长度取为 30 m 的整数倍,即 30、60、90、120、150、180、210 和 240 m。利用 Arc-Map 软件 Feature to Raster 工具,对以上 8 个网格长度指标的网格数目进行统计。根据公式(2),利用最

小二乘法拟合,进行回归分析,便可得到分形维数。

3 结果分析

3.1 海岸线长度时空变化特征

根据遥感监测结果,2010 年环渤海地区海岸线总长度为 6 191.96 km。1980—2010 年间,全区海岸线长度持续增加,总共增加了 1 074.35 km,年均增加 35.81 km。其中,辽宁省海岸线长度变化最大,增加了 425.25 km,年均增加 14.18 km;其次是山东省,增加了 293.15 km,年均增加 9.77 km;再次是河北省,增加了 217.12 km,年均增加 7.24 km;最后是天津市,增加了 138.82 km,年均增加 4.63 km。研究期间,各省(市)海岸线长度始终保持山东省 > 辽宁省 > 河北省 > 天津市的格局(表 1)。

为了客观地比较各时段海岸线长度变化速度的时空差异,采用某一时间段内海岸线长度的年均变化百分比来表示海岸线的变化强度(表 1):

$$LCI_{ij} = \frac{L_j - L_i}{L_i(j-i)} \times 100\% \quad (3)$$

式中: LCI_{ij} 为第 i 年至第 j 年海岸线长度变化强度, L_i 和 L_j 分别为第 i 年和第 j 年海岸线长度。

表 1 1980—2010 年环渤海地区海岸线变化统计

Tab.1 The changes of coastlines in Bohai Rim from 1980 to 2010

地区	海岸线长度/km				海岸线变化强度(%)			
	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	1980—1990 年	1990—2000 年	2000—2010 年	1980—2010 年
辽宁省	1 920.40	1 976.58	2 012.14	2 345.66	0.29	0.18	1.66	0.74
河北省	383.68	395.72	438.46	600.80	0.31	1.08	3.70	1.89
天津市	130.61	148.49	158.22	269.43	1.37	0.66	7.03	3.54
山东省	2 682.92	2 647.40	2 767.18	2 976.08	-0.13	0.45	0.75	0.36
全区	5 117.62	5 168.17	5 376.01	6 191.96	0.10	0.40	1.52	0.70

由表 1 可知,1980—2010 年研究区整体海岸线的变化强度为 0.70%。1980—1990 年全区海岸线变化强度最小,为 0.10%;随着时间的推移,全区整体海岸线的变化强度逐渐增大,呈现加速增长的趋势。除了山东省在 1980—1990 年间,海岸线长度略微减少外,研究期间,各省(市)海岸线长度都呈现增长趋势。特别是 2000 年以后,研究区各省(市)海岸线的变化强度都高于之前,进入快速增长期。河北省海岸线变化强度的趋势与全区一致,呈现加速增长的趋势;辽宁省和天津市在 1990—2000 年变化强度有所放缓。从区域范围上看,1980—2010 年间,天津市海岸线变化最剧烈,变化强度为 3.54%;其次是河北省,变化强度为 1.89%;再次为辽宁省,变化强度为 0.74%;山东省变化强度最小,为 0.36%。

研究期间,在人为海岸开发作用下,一些“凸”字型围垦养殖、盐田以及港口码头的建设是导致全区海岸线长度增长的主要原因。有些近岸的岛屿被开发,彻底与大陆连接成片,形成新的海岸线,也增加了海岸线的长度。另外,入海河流泥沙沉积、沙坝增长等因素也使海岸线总长度增加。

天津市在 1980—1990 年和 2000—2010 年间海岸线变化强度在全区最高,2000—2010 年高达 7.03%。其中 1980—1990 年,海岸开发紧贴岸线,层层向海推进,以滩涂围垦养殖和盐田为主,开发规模相对较小。2000—2010 年,滨海新区的建设,特别是天津港与临港工业区的建设,是天津市海岸线长度急剧增加的主导因素。1990—2000 年,天津市海岸线变化强度有所回落,但在全区也仅次于河北省。

河北省海岸线的变化强度呈加速增长的趋势, 1980—2000 年期间, 海岸开发以围垦养殖、盐田为主, 主要的海岸工程有滦河口滩涂围垦养殖、渤海湾北岸围垦盐田和养殖。2000 年以后, 曹妃甸工业园区的新建以及黄骅港的扩建, 是海岸线长度大幅增长的主导因素。

辽宁省在 2000 年之前, 海岸线长度的变化强度较小。这一时期, 大连西部沿海围垦盐田、辽河口附近滩涂围垦养殖, 是导致该省海岸线长度增加的主要原因。2000 年之后, 辽宁省沿海地区出现大规模的工业园区和港口的建设, 极大促进了海岸线长度的增加。由于辽宁省多天然港湾, 海岸开发存在截弯取直的开发状况, 减弱了辽宁省海岸线长度的增加。

1980—1990 年, 山东省海岸线长度略微减少, 主要是由在黄河口西侧岸段, 曲折的淤泥质海岸被围垦盐田、养殖, 以及为了石油开采修筑防潮堤所致。1990 年以后, 海岸线长度呈现加速增长的趋势, 但与其它三省(市)相比, 海岸开发利用程度最低。渤海湾南部的滨州市、东营市沿岸、黄河三角洲、莱州湾南岸、胶州湾沿岸是山东省海岸线变化相对集中的区域。

天津市和河北省所在的渤海湾地区是研究区海岸线变化最剧烈的区域。如果将天津市与河北省(合称京津冀地区)海岸线合并在一起统计, 那么 1980—2010 年, 研究区海岸线变化强度始终保持京津冀地区 > 辽宁省 > 山东省的态势。

3.2 海岸线分形维数时空变化特征

为保证海岸线的连续完整性, 在计算环渤海地区海岸线分形维数时, 将天津市和河北省海岸线合并在一起计算, 见图 2。通过网格法计算的研究区的分形维数值与之前的研究数值相近^[20-21]。全区各期海岸线分形维数并不等于各分段区域海岸线分形维数的算术平均值, 而是与局部海岸线分形维数的最大值接近, 这与海岸线分形维数以往的研究结论相符合^[5,20]。

1980—2010 年期间, 在环渤海地区各省(市)中, 山东省海岸线的分形维数最大; 辽宁省海岸线的分形维数除了在 2000 年略低于京津冀地区, 其它时期都高于京津冀地区。至 2010 年, 环渤海地区海岸线形状曲折程度排序依次为山东省 > 辽宁省 > 京津冀地区。

1980—2010 年, 全区整体海岸线的分形维数持续增大, 说明海岸线的形状趋于复杂。辽宁省和山东省海岸线分形维数的变化趋势与全区一致; 京津冀地区海岸线分形维数在 2000 年之前增大, 之后略微减小。

总体而言, 京津冀地区海岸线的分形维数变化最剧烈。

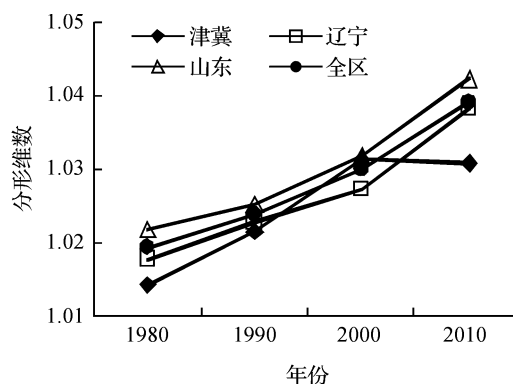


图 2 1980—2010 年环渤海地区海岸线分形维数变化

Fig. 2 The fractal dimensions changes of coastline in Bohai Rim from 1980 to 2010

海岸物质的组成是决定海岸线曲折程度的本质因素。环渤海地区基岩海岸主要分布在辽东半岛的南部和山东半岛, 基岩在海洋的强烈作用下, 形成的岸线大多较为曲折。河北省和天津市所在的渤海湾地区为平原, 以淤泥质海岸为主, 其次是砂质海岸, 岸坡较为平缓, 其在海洋作用下, 总体变化相对较为均一, 岸线比较平直, 分形维数相对较小。

海岸开发活动是海岸线形态变化的主要因素。改革开放以来, 环渤海地区社会经济快速发展, 人地矛盾日益突出。沿海地区进行了大范围的围填海活动, 围垦养殖、盐田, 建设港口码头和临港工业园区等等。随着时间推移, 围填海开发活动呈现面积逐渐增大, 范围逐渐扩大的发展态势。而这些海岸开发活动主要是在易于开发的平原淤泥质海岸进行。环渤海地区淤泥质海岸在辽东湾北部、渤海湾至莱州湾南部、辽宁省东部沿海岸段广泛分布。除在大型河口附近海岸线形态较为曲折外, 其它地方海岸线都比较平滑。平直的海岸线处进行滩涂围垦养殖, 虽开发面积相对较小, 但改变了原有岸线的自然形态, 一定程度上增加了海岸线曲折程度。另外, 陆连岛形成新的海岸线的同时, 也会增加海岸线的曲折程度。

为探究 2000—2010 年, 京津冀地区海岸线分形维数减小的原因, 本文设计实验, 计算在保持其他岸段的海岸线状态不变的前提下, 仅由某一岸段海岸线动

态变化引起的整体海岸线长度变化与分形维数变化。根据前文的分析,选择 2000—2010 年京津冀地区海岸线动态变化规模较大的天津港及临港工业区、曹妃甸工业区和黄骅港开展研究(图 3)。

2000—2010 年,天津港与临港工业区的建设,围填海 148.50 km²,导致海岸线长度增加了 86.41 km,反而使京津冀地区海岸线分形维数降低了 0.002 8;曹妃甸工业园区的新建,围填海 228.16 km²,使海岸线长度增加了 112.11 km,使京津冀地区分形维数降低了 0.002 8;黄骅港的建设围填海 32.93 km²,使海岸线长度增加了 4.39 km,使京津冀地区 2010 年的分形维数降低了 0.002 1。

港口需要建设泊位,临港产业集群需要规则的近似方形的土地,往往一部分向海洋延伸较大的距离,从而增加海岸线长度。另外,大型的海岸工程,形状较为规则,总体上有一定的曲折程度,但在小范围长度上仍是规则的直线形状。综上所述,大量不等规模的人为海岸开发活动是海岸线分形维数变化的主导因素。其中,特大型的曹妃甸临港工业区、天津港与临港工业区和黄骅港等海岸工程的建设,是导致京津冀地区 2000—2010 年海岸线分形维数降低的主要原因。而除此之外,其它海岸开发类型,总体上提高了分形维数。

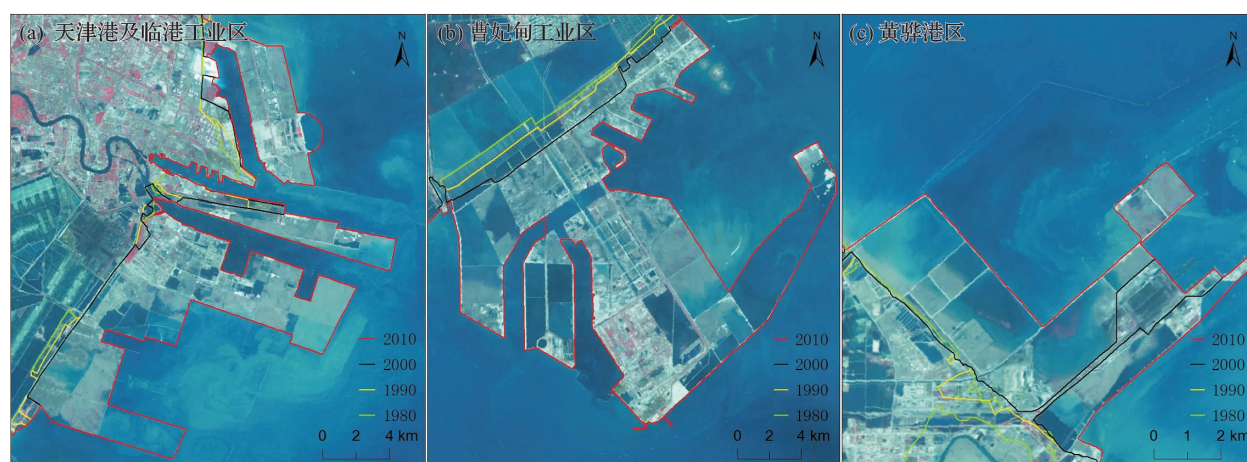


图 3 环渤海地区海岸工程引起海岸线变化举例

Fig. 3 Examples of coastal engineering leading to coastline changes in Bohai Rim

3.3 海岸线变迁原因分析

将研究区前后两期海岸线进行叠加,获得各时段的海岸线变迁范围,结合遥感影像对各时段引起海岸线动态变化的各种人类开发活动和自然变化进行了目视判别。根据遥感解译结果,1980—2010 年引起海岸线变迁的主要人类活动有围垦养殖、围垦盐田、围垦农田、港口建设、城镇建设和交通等;引起海岸线变迁的自然活动主要为淤积和侵蚀。

由图 4 可见,1980—2010 年间,环渤海地区大陆面积增加原因以人为开发为主、河口淤积为辅,其净增加面积为 2 583.2 km²,其中 3 个时期分别净增加 759.1、501.7 和 1 322.4 km²;因海岸侵蚀后退,损失土地 554.9 km²,侵蚀岸段主要分布于黄河口两侧。人为开发海岸用于养殖的面积最多,达 1 100.7 km²;其次是港口码头,为 630.5 km²,再次为盐田,达 630.2 km²。

从时间过程来看,影响海岸线变迁的人为因素有显著差异,1980—1990 年,人类开发活动以围垦养殖

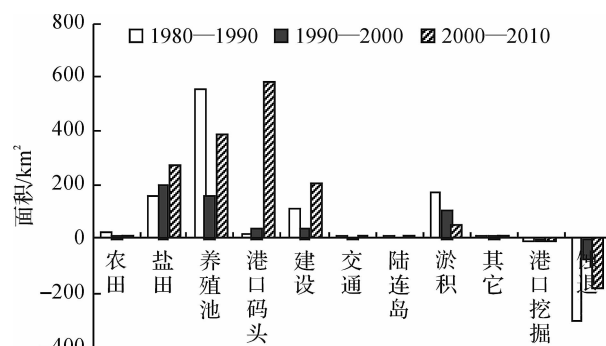


图 4 1980—2010 年导致环渤海地区海岸线变化的主要原因

Fig. 4 Various activities leading to coastline changes in Bohai Rim from 1980 to 2010

为主,其次是围垦盐田;1990—2000 年海岸开发活动相对较平缓,以围垦盐田为主,围垦养殖为辅。2000—2010 年导致海岸线变化的因素呈现多元化,港口码头和建设用地所占比例显著升高。各类海岸工程

的新建与扩建主要使海岸线向海扩展;而使海岸线向陆退缩的开发活动极少。与人类活动相比,自然变化如河口淤积与侵蚀对研究区海岸线影响相对较小。

4 结论

本文利用遥感和 GIS 技术研究了环渤海地区 1980—2010 年海岸线及其分形维数时空变化特征,并分析了其与海岸开发活动的关系。主要结论如下:

(1)1980—2010 年间,受人为开发和自然因素的综合影响,环渤海地区的海岸线总长度呈加速增长的趋势,总共增加了 1 074.35 km。1980—2010 年研究区海岸线的变化强度为 0.70%。从时间过程看,2000 年之后海岸线长度进入快速增长时期;从区域范围看,以天津市和河北省所在的渤海湾地区海岸线变化最剧烈。

(2)1980—2010 年全区海岸线的分形维数持续增大,海岸线的形状趋于复杂。海岸线的分形维数与海岸带的物质组成与演变过程有直接关系,海岸线分形维数的变化,是由大量不等规模的人为开发与自然环境变化决定的。

(3)环渤海地区海岸线整体向海推进,2000 年之前海岸开发以围垦养殖、盐田为主,之后港口码头建设和城镇建设型的海岸工程逐渐增多,且开发规模较大。与人类活动影响相比,自然变化如河口淤积与海岸侵蚀对海岸线影响较小。

随着环渤海地区海岸开发力度的不断加大,海岸线的形态处于不断变化中。海岸线分形维数的变化,是由大量不等规模的人为开发与自然环境变化决定的。下一步应结合海岸物质组成及岸线类型,定量分析人为海岸开发活动对海岸线分形维数变化的影响。另外,海岸线形状变化所造成的影响也还有待进一步的探讨与研究。

参考文献 (References):

- [1] GAO Yi, WANG Hui, SU Fen-zhen, et al. Spatial and temporal of continental coastline of China in recent three decades[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, **35**(6): 31-42.
高义,王辉,苏奋振,等.我国大陆海岸线近 30 a 的时空变化分析[J]. *海洋学报*, 2013, **35**(6): 31-42.
- [2] YU Yong-hai, MIAO Feng-min, WANG Yu-guang, et al. Study on application of 3S techniques in coastline surveying and managing [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2003, **19**(6): 24-27.
于永海,苗丰民,王玉广,等.基于 3S 技术的海岸线测量与管理应用研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2003, **19**(6): 24-27.
- [3] CHU Zhong-xin, YANG Xu-hui, FENG Xiu-li, et al. Temporal and spatial changes in coastline movement of the Yangtze delta during 1974-2010[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, **66**(8): 166-174.
- [4] SUN Wei-fu, MA Yi, ZHANG Jie, et al. Study of remote sensing interpretation keys and extraction technique of different types of shoreline[J]. *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[J]. *测绘通报*, 2011(3): 41-44.
- [5] XU Jin-yong, ZHANG Zeng-xiang, ZHAO Xiao-li, et al. Spatial and temporal variations of coastlines in northern China (2000-2012)[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, **24**(1): 18-32.
- [6] RYU J H, WON J S, KYUNG K D, et al. Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat a case study in Gomso bay, Korea[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**(3): 442-456.
- [7] LIU H, JWZEK K C. Automated extraction of coastline from satellite imagery by integrating Canny edge detection and locally adaptive thresholding methods [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**(5): 937-958.
- [8] ZHU Chang-ming, ZHANG Xin, LUO Jian-cheng, et al. Automatic extraction of coastline by remote sensing technology based on SVM and auto-selection of training samples [J]. *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[J]. *国土资源遥感*, 2013, **25**(2): 69-74.
- [9] GAO Zhi-qiang, LIU Xiang-yang, NING Ji-cai, et al. Analysis on changes in coastline and reclamation area and its causes based on 30-year satellite data in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, **30**(12): 140-147.
高志强,刘向阳,宁吉才,等.基于遥感的近 30a 中国海岸线和围填海面积变化及成因分析[J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(12): 140-147.
- [10] MA Xiao-feng, ZHAO Dong-zhi, XING Xiao-gang, et al. Means of withdrawing coastline by remote sensing[J]. *Marine Environmental Science*, 2007, **26**(2): 185-189.
马小峰,赵冬至,邢小罡,等.海岸线卫星遥感提取方法研究[J]. *海洋环境科学*, 2007, **26**(2): 185-189.
- [11] ZHU Gao-ru, XU Xue-gong. Annual processes of land reclamation from the sea along the northwest coast of Bohai Bay during 1974 to 2010 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, **32**(8): 1 006-1 012.
朱高儒,许学工.渤海湾西北岸 1974~2010 年逐年填海造陆进程分析[J]. *地理科学*, 2010, **32**(8): 1 006-1 012.
- [12] SUN Xiao-yu, LÜ Ting-ting, GAO Yi, et al. Driving force analysis of Bohai Bay coastline change from 2000 to 2010 [J]. *Resources Science*, 2014, **36**(2): 413-419.
孙晓宇,吕婷婷,高义,等.2000-2010 年渤海湾岸线变迁及驱动力分析[J]. *资源科学*, 2014, **36**(2): 413-419.
- [13] LI Xiu-mei, YUAN Cheng-zhi, LI Yue-yang. Remote sensing monitoring and spatial-temporal variation of Bohai Bay coastal zone[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2013, **25**(2):

- 156-163.
李秀梅,袁承志,李月洋. 渤海湾海岸带遥感监测及时空变化[J]. 国土资源遥感,2013,**25**(2):156-163.
- [14] ZHANG Xia, ZHUANG Zhi, ZHANG Xu-kai, 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.
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.
- [15] ZHU Xiao-hua. Fractal and fractal dimensions of spatial Geo-Information[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press,2007.
朱晓华. 地理空间信息的分形与分维[M]. 北京:测绘出版社,2007.
- [16] MANDELBROT B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science,1967,**156**(3775):636.
- [17] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco:W. H. Freeman and Company,1982:269.
- [18] LIEBOVITCH L, TOTH T. A fast algorithm to determine fractal dimensions by box counting [J]. Physics Letters A, 1989, **141**(8/9):386-390.
- [19] ZHU Xiao-hua, WANG Jiao, CHEN Xia. Study on the spatial fractal characteristic of coastline: A case study of Jiangsu Province, China[J]. Scientia Geographica Sinica,2001,**21**(1):70-75.
朱晓华,王建,陈霞. 海岸线空间分形性质探讨:以江苏省为例[J]. 地理科学,2001,**21**(1):70-75.
- [20] ZHU Xiao-hua, CAI Yun-long. Study on fractal dimension of Chinese coastline and its character[J]. Advances in Marine Science,2004,**22**(2):156-162.
朱晓华,蔡运龙. 中国海岸线分维及其性质研究[J]. 海洋科学进展,2004,**22**(2):156-162.
- [21] LIU Xiao-xian, ZHAO Qing. Analysis on the complication-degree for coast line of the Chinese provinces along the sea based on the fractal theory[J]. Journal of Image and Graphics,2004,**9**(10):1 249-1 257.
刘孝贤,赵青. 基于分形的中国沿海省区海岸线复杂程度分析[J]. 中国图象图形学报,2004,**9**(10):1 249-1 257.

Spatial-temporal variations of coastlines in Bohai Rim based on fractal dimension and their causes analysis

XU Ning^{1, 2, 3}, GAO Zhi-qiang^{*1, 3}, NING Ji-cai^{1, 3}

(1. *Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;* 3. *Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China*)

Abstract: The coastline information of Bohai Rim in the year of 1980, 1990, 2000 and 2010 was extracted using remote sensing images of Landsat MSS, TM and ETM+ and GIS techniques, and the fractal dimension of the coastline was calculated by box-counting method. The characteristics of spatial-temporal variations of the coastline's length and the driving forces of coastline changes were assessed, and the relationship between the coastal development activities on various scales and fractal dimension changes were also discussed. The results showed that during the research period, the coastline length of the study area increased by 1 074.35 km and the rising intensity increased progressively. The coastline length entered a period of rapid growth after 2000. The most significant change of coastline length was found in Bohai Bay. During the study period, the coastline mainly expanded to the sea. Human development activities were the leading factor for coast change. Before 2000, coastal development was predominantly constituted by reclamation of aquaculture and salt fields; while after 2000, factors causing coastal change tended to become diversified and rates of harbor construction and construction lands increased. The fractal dimension of the overall coastline was increased steadily, indicating that the geometry of the coastline of the study area became more complex. The magnitude and variations of fractal dimension were directly related to material composition and evolution process in the coastal zone. A large numbers of coastal engineering construction of various scales were the leading factor in fractal dimension variation.

Key words: coastline; fractal dimension; spatial-temporal variations; GIS; remote sensing