

渤海湾近 30 年海岸线变迁与分析

叶小敏^{1,2,3}, 丁静^{1,3}, 徐莹^{1,3}, 刘宇昕^{1,3}

(1. 国家海洋局 国家卫星海洋应用中心 北京 100081; 2. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室 (国家海洋局第二海洋研究所) 杭州 310012; 3. 国家海洋局空间海洋遥感与应用研究重点实验室 北京 100081)

摘要: 海湾岸线是海湾变迁监测的重要对象。文章利用美国陆地资源卫星 Landsat - 5/TM、Landsat - 7/ETM 和中国环境减灾星 HJ - 1A、B/CCD 遥感数据, 对渤海湾 1986 - 2014 年近 30 年来的水域面积、岸线长度和岸线分形维数进行了解译测算。结果表明, 渤海湾平均高潮位的水域面积呈现不断减小的趋势, 其数值由 1986 年的 $(13\ 909.97 \pm 3.53)\text{ km}^2$ 减少至 2014 年的 $(12\ 641.99 \pm 11.50)\text{ km}^2$; 岸线长度呈现先减小再增加的变化规律, 其数值由 1986 年的 $(968.41 \pm 1.84)\text{ km}$ 减少至 1998 年的 $(642.43 \pm 2.59)\text{ km}$, 再增加至 2014 年的 $(850.94 \pm 10.78)\text{ km}$; 渤海湾岸线分形维数从 1986 年的 1.110 2 下降至 2014 年的 1.064 9; 同时分析发现养殖场建造、围填海和港口建设等海洋工程是渤海湾岸线变迁的主要驱动力因素; 渤海湾岸线分形维数与天津市国内生产总值 (GDP) 的倒数变化呈现线性相关系数为 0.95 的高相关性。文章的测算和分析结果对海湾动力学研究、环境变迁评估和海湾开发管理具有参考价值。

关键词: 渤海湾; 岸线变迁; 分形分析; 遥感

中图分类号: P7 文献标志码: A 文章编号: 1005 - 9857(2016)02 - 0056 - 07

On the Changes of the Coastline in Bohai Bay during the Last 30 Years

YE Xiaomin^{1,2,3}, DING Jing^{1,3}, XU Ying^{1,3}, LIU Yuxin^{1,3}

(1. National Satellite Ocean Application Service, State Oceanic Administration, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Hangzhou 310012, China; 3. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, State Oceanic Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: The coastline of a bay is an important object to be monitored for the changes of the Bay. In this paper, the surface area of sea water in Bohai Bay, length and fractal dimension of its coastline in the last 30 years from 1986 to 2014 were interpreted by using American Landsat - 5/TM, Landsat - 7/ETM and Chinese HJ1A, B/CCD remote sensing images. The results showed that the sea water surface area has been decreasing with the value of $13\ 909.97 \pm 1.84\text{ km}^2$ in 1986 and $12\ 641.99 \pm 11.50\text{ km}^2$ in 2014; the length of the coastline decreased at first 12 years with the value of $968.41 \pm 1.84\text{ km}$ in 1986 and $642.43 \pm 2.59\text{ km}$ in 1998, and then increased with the value of $850.94 \pm 10.78\text{ km}$ in 2014; The fractal dimension decreased from 1.110 2 in 1986 to 1.064 9 in 2014. The results also showed that sea reclama-

基金项目: 卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放课题——基于多源卫星遥感数据的渤海海岸线变迁分形分析 (SOED1411)。

作者简介: 叶小敏, 博士研究生, 助理研究员, 研究方向为海洋遥感研究, 电子信箱: yxm@mail.nsoas.org.cn

tion, the construction of marine farm and port were the driving factors of the changes of the coastline in Bohai Bay; the fractal dimension was correlated with the reciprocal of the Gross Domestic Product (GDP) of Tianjin Municipality linearly with the linearly correlation coefficient of 0.95. The results of measurement and analysis could be a reference for dynamic research of a bay and, changes of environment evaluation and management of bay development.

Key words: Bohai Bay, Changes of coastline, Fractal analysis, Remote sensing

1 引言

海岸线长度是海湾的基本参数之一,它被广泛地应用于海湾动力学研究、海湾环境变迁评估、海岸带开发与管理以及海岸工程设计。海岸线可反映海域使用情况,用于沿岸海域开发情况变迁监测与分析,为海域合理使用与开发提供基础参考数据。海岸线为分数维图形,岸线长度的测量结果具有一定程度的不确定性^[1]。分形维数可统一不同尺度下测量的海岸线长度,同时也可反映沿岸海域的人工开发程度。

渤海的海洋环境不仅影响着环渤海地区的气候,而且影响着环渤海地区乃至整个中国的经济、生态等方面的长期可持续发展。利用卫星遥感的优势,对渤海湾海岸线进行监测,并对其监测结果进行分析,可研究分析渤海近岸海域开发现状与历史变化,对海域使用动态监测与评价具有一定的作用和意义。

利用卫星遥感不仅可对海湾的水域面积、岸线长度、水深、纳潮量等环境属性开展监测和历史变迁研究^[2-8],还可在海岸线分形研究中发挥其资料来源广、大面积和可长时间序列监测的优势。不同测尺下,所获得的海岸线具有不同的长度,即海岸线具有分数维,使用分形维数可以表达海岸线这一特性。

对海岸线分形维数计算和分形维数历史变迁分析研究中,国内外学者进行了大量工作。Mandelbrot^[1]分析了海岸线长度的不确定性问题,首次提出了海岸线的分形与分维概念,并且计算了英国等国海岸线的分形维数。朱晓华等研究海岸线分形维数计算方法并进行了比较研究,研究结果表明,不同方法计算的分形维数可能不同,但使用同一种方法对不同海岸线进行分形维数比较,不会影响海

岸线的分形维数比较结果^[9-10]。高俊国和边淑华^[11]使用分形分析法,以胶州湾为研究实例,根据其面积和总岸线长度的变化情况定性分析了海岸线分形维数的变化状况。叶小敏等^[12]以 Landsat - 5/TM 卫星图像为基础资料,计算了胶州湾海岸线的分形维数,并分析了胶州湾海岸线分形维数历史变迁趋势与原因。马小锋等^[13]和张华国等^[14-15]利用分形维数理论对海岸线开展了土地覆盖类型分析、遥感信息空间尺度、遥感分类与变迁研究。

渤海湾三面环陆,位于渤海西部,在河北省唐山,天津,河北省沧州和山东省东营市黄河口之间,北起河北省乐亭县大清河口,南到山东省黄河口。平均潮差(塘沽)2.5 m,最大可能潮差 5.1 m,平均高潮潮位 3.63 m,平均低潮潮位 1.18 m。渤海湾海底地势由岸向湾中缓慢加深,平均水深 12.5 m。渤海湾中有丰富的石油储藏和著名的旅游和度假区,西部塘沽是重要港口——天津港,是京津的海上门户,华北海运枢纽。大规模的围填海工程导致人为改变海岸线形状和位置,威胁着岸线和近海的生态平衡。渤海湾的海洋环境不仅影响着环渤海地区的气候,而且影响着环渤海地区乃至整个中国的经济、生态等方面的长期可持续发展。利用卫星遥感监测对渤海湾海岸线进行监测并对其监测结果进行分析,可间接反映渤海近岸海域开发现状与历史变化,对环渤海海域使用动态监测与评价具有一定的作用和意义。

本文以渤海湾为研究区域,利用卫星遥感数据对 1986—2014 年近 30 年来的海岸线变迁进行测算,并进行历史变迁分析。

2 卫星资料与处理方法

2.1 卫星资料

用于本文的卫星资料包括美国陆地卫星 5 号

(Landsat-5) 主题绘图仪 (TM) 图像资料、陆地卫星 7 号 (Landsat-7) 增强主题绘图仪 (ETM) 图像资料和中国环境与灾害预报小卫星星座 A、B 星 (HJ-1A/B) CCD 图像资料。

Landsat-5 为光学观测卫星, 是美国陆地卫星系列 (Landsat 卫星) 的第 5 颗卫星, 于 1984 年 3 月发射, 成功在轨运行 27 年。其主题绘图仪为 7 个波段扫描成像仪, 第 1~5 (0.45~0.52 μm 、0.52~0.60 μm 、0.63~0.69 μm 、0.76~0.90 μm 、1.55~0.175 μm)、第 7 (2.08~2.35 μm) 波段的地面分辨率为 30 m, 第 6 (10.40~12.50 μm) 波段的地面分辨率为 120 m。Landsat-7 为 Landsat-5 的后续星, 于 1999 年 4 月发射。相比于 Landsat-5/TM, Land-

sat-7/ETM 的主要差别为增加了 15 m 分辨率的全色波段 (0.52~0.90 μm); 第 6 波段分辨率从 120 m 提高到 60 m。本文所用的 Landsat-5/TM 和 Landsat-7/ETM 数据资料为 L2 级几何校正产品。

HJ-1A/B 卫星于 2008 年 9 月发射。其上装载的 CCD 相机以星下点对称放置, 平分视场、并行观测, 联合完成对地 700 km 刈幅宽度、30 m 地面像元分辨率、4 个谱段推扫成像。4 个光谱波长范围分别为 0.43~0.52 μm 、0.52~0.60 μm 、0.63~0.69 μm 和 0.76~0.90 μm 。本文所用 HJ-1A/B 星 CCD 相机多光谱数据为 2 级系统几何校正产品, 已经过辐射校正和系统几何校正。

本文使用的卫星数据资料详细信息见表 1。

表 1 渤海湾海岸线变迁使用的卫星数据信息

序号	景序列号	卫星/成像仪	成像时间(标准时间)	过境潮位/cm*
1	LT51210331986140HAJ00	Landsat-5/TM	1986-05-20T02:06:05	291
2	LT51210341986156HAJ00	Landsat-5/TM	1986-06-05T02:06:01	338
3	LT51220331986275HAJ00	Landsat-5/TM	1986-10-02T02:07:45	324
4	LT51210331990135HAJ00	Landsat-5/TM	1990-05-15T02:01:49	182
5	LT51210341990071HAJ00	Landsat-5/TM	1990-03-12T02:02:36	280
6	LT51220331990254HAJ00	Landsat-5/TM	1990-09-11T02:07:34	72
7	LT51220331994249HAJ00	Landsat-5/TM	1994-09-06T02:04:31	358
8	LT51210331994290HAJ00	Landsat-5/TM	1994-10-17T01:57:09	311
9	LT51210341994290HAJ00	Landsat-5/TM	1994-10-17T01:57:33	309
10	LT51210331998253HAJ00	Landsat-5/TM	1998-09-10T02:20:15	175
11	LT51210341998253HAJ00	Landsat-5/TM	1998-09-10T02:20:39	175
12	LT51220331998276HAJ00	Landsat-5/TM	1998-10-03T02:26:34	266
13	LT51210332002264BJC01	Landsat-5/TM	2002-09-21T02:15:18	343
14	LE71220332002279EDC00	Landsat-7/ETM	2002-10-06T02:35:26	365
15	LE71210342002288HAJ01	Landsat-7/ETM	2002-10-15T02:29:39	139
16	LT51220332006266IKR00	Landsat-5/TM	2006-09-23T02:41:37	347
17	LT51210332006275IKR00	Landsat-5/TM	2006-10-02T02:35:33	140
18	LE71210342006267EDC00	Landsat-7/ETM	2006-09-24T02:31:25	311
19	303237	HJ-1B/CCD2	2010-05-12T02:57:02	321
20	1242745	HJ-1A/CCD2	2014-08-20T01:48:56	222

*注:表中潮高基准面在平均海平面下 241 cm。

当潮间带大部分或全部被海水淹没时, 目视解译法能较容易地确定海岸线的位置, 为此本文选择的覆盖渤海湾或覆盖渤海湾主要部分的遥感影像

成像时间均尽量接近高潮时刻。

2.2 岸线提取

海岸线是指平均大潮高潮时水陆分界的痕迹

线,一般可根据当地的海蚀阶地,海滩堆积物或者海滨植被确定。海陆相互作用的结果,使得受潮汐作用的地带在微地貌和纹理结构上与未受作用的地带迥然不同,这种差异导致了地物光谱特性的不同,从而在遥感影像上呈现不同的灰度或色调^[2]。相关文献的研究与实践结果证明, TM/ETM 卫星遥感资料采用第 7 (2.08 ~ 2.35 μm)、第 4 (0.76 ~ 0.90 μm)、第 3 (0.63 ~ 0.69 μm), HJ-1 卫星 CCD 资料采用第 4 (0.76 ~ 0.90 μm)、第 3 (0.63 ~ 0.69 μm)、第 2 (0.52 ~ 0.60 μm) 波段合成的假彩色图像,海岸线信息清楚,易于判定。不同类型的岸线具有明显的信息特征和提取标准^[12,16];河口两侧的水陆分界线与河口入海口门两岸交点之连线定义为河口的水陆分界线;渤海湾分界点分别为黄河口和清河口,河口的分界点定义为海岸线与河口交线的中心点;渤海湾的海上分界线为清河口和黄河口海岸线中心点的海上连线。对于面积测算,海湾中的岛屿与人工建筑均分别量算出面积,再从海湾总面积中减去^[8]。由于河口泥沙冲积的原因,不同历史时期黄河口的位置有所改变,为了便于定量比较不同历史时期渤海湾的水域面积和岸线变化,以 2014 年黄河口作为渤海湾的分界点。

在 ArcGIS9.3 软件平台下对表 1 中所列的卫星遥感资料进行处理和岸线解译。TM 和 HJ 星 CCD 的 2 级产品已基本达到了定量量算地物面积的要求,对于少量畸变较严重的图像则进行几何精校正。为了突出水陆边界线,对假彩色合成的影像进行适当的线性拉伸以增强信息。本文使用的 1986 年 Landsat-5 卫星 TM 遥感影像和 2014 年 HJ-1A 卫星 CCD 卫星遥感影像及渤海湾海岸线见图 1。

2.3 分形维数计算

分形或分维是指具有分数维数的几何体,分形的主要特征在于它具有自相似性,即局部与整体相似。如直线是 1 维的,平面是 2 维的,而普通空间是 3 维的。而描述海岸线这一类具有弯曲非规则几何形态的几何体特征时,需要引入分数维数,即分形维数(或分维数)。

在海岸线分形维数的计算方法中,常用的有量规法和网格法。网格法就是使用不同长度的正方

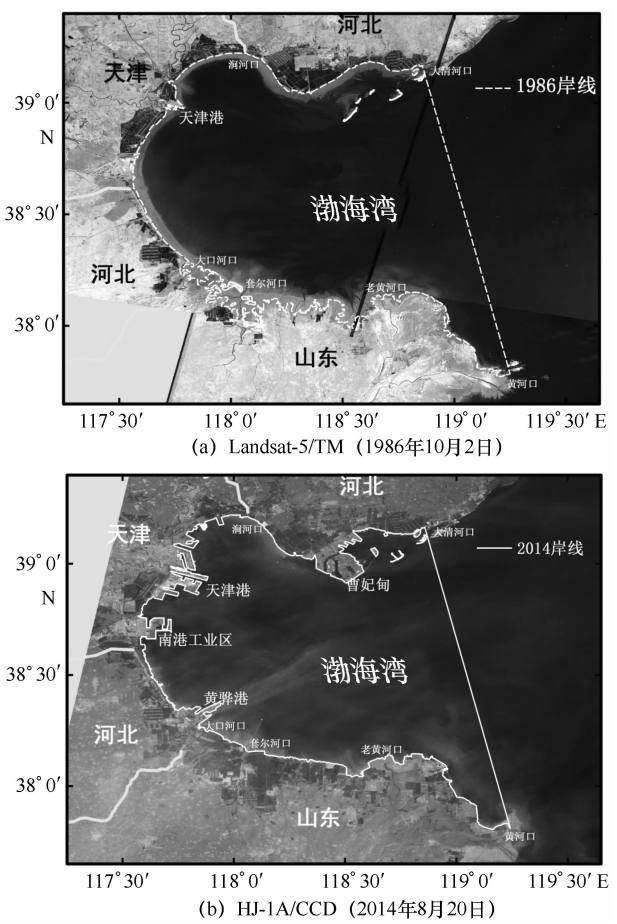


图1 Landsat-5 卫星 TM,HJ-1A 卫星 CCD 卫星遥感影像及 1986 年和 2014 年渤海湾海岸线

形网格去覆盖被测海岸线。当正方形网格长度 r 出现变化时,则海岸线覆盖的网格数目 $N(r)$ 也发生变化,根据分形理论有以下方程式成立^[1]:

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

当网格长度 r 取不同值时, $N(r)$ 也对应不同的值。对式(1)两边同时取对数,可以得到:

$$\ln N(r) = -D \ln r + C \tag{2}$$

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 值和对应的 $N(r)$ 值,通过拟合分析即可得到分形维数 D 。

计算同一条海岸线的分形维数,通常网格法计算得到的结果小于量规法得到的结果。然而,如使用同一种方法对不同海岸线进行分形维数比较的话,不会影响比较结果^[6]。相比较而言,网格法较其他计算方法简单方便。因此,本文采用网格法计

算胶州湾海岸线的分形维数。

3 结果与分析

3.1 测算结果

为降低解译与测算误差,提取岸线采用多次解译,取平均的方法获得渤海湾岸线长度和水域面积。在对同一时间的岸线多次解译的结果中,选择最接近平均岸线长度的解译结果进行分形维数计算。

利用表 1 中的卫星遥感数据,解译提取的渤海湾水域面积和岸线长度结果见表 2。

表 2 渤海湾(1986-2014 年)水域面积、岸线长度和岸线分形维数的卫星遥感影像测算结果

序号	年份	面积/km ²	岸线长度/km	岸线分形维数
1	1986	13 909.97 ± 3.53	968.41 ± 1.84	1.110 2
2	1990	13 912.94 ± 1.98	862.74 ± 0.98	1.081 5
3	1994	13 619.35 ± 1.98	689.82 ± 5.90	1.075 8
4	1998	13 422.17 ± 21.50	642.43 ± 2.59	1.073 1
5	2002	13 366.39 ± 3.42	649.61 ± 3.89	1.072 3
6	2006	13 267.43 ± 0.62	737.34 ± 19.40	1.070 8
7	2010	12 803.08 ± 15.08	775.00 ± 12.12	1.067 6
8	2014	12 641.99 ± 11.50	850.94 ± 10.78	1.064 9

本文测算的水域面积和岸线长度数值和相关文献数量级相同,由于定义的海湾分界点位置和部分人工建筑岸线标准存在差异,致使具体数值不完全相同(如文献[17]中定义老黄河口为渤海湾和莱州湾的分界点,本文定义 2014 年黄河口中间位置为渤海湾与莱州湾的分界点;本文不考虑宽度小于两个像素的栈桥式人工建筑对岸线影响),然而本文在相同标准下解译的岸线,不影响其历史变迁趋势分析。

由表 2 的测算结果可见,渤海湾在 1986-2014 年近 30 年中,平均高潮位下的水域面积从 1986 年的 (13 909.97 ± 3.53) km² 减少至 2014 年的 (12 641.99 ± 11.50) km²,呈不断减小趋势;而岸线长度先减小[从 1986 年的(968.41 ± 1.84) km 减少至 1998 年的(642.43 ± 2.59) km],再增加的变化规律(2014 年增加至 850.94 ± 10.78 km),渤海湾水域

面积与岸线长度变化曲线见图 2。

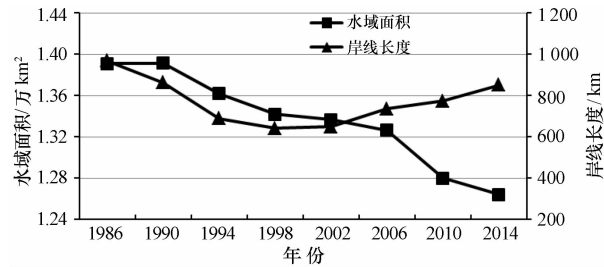


图 2 渤海湾(1986-2014 年)水域面积和岸线长度变化曲线

采用网格法,分别以 150 m、300 m、750 m 和 1.5 km 的网格长度获得有岸线覆盖的网格数,使用最小二乘法和本文公式(2)拟合计算得到的渤海湾岸线分形维数(表 2)。渤海湾分形维数数值从 1986 年的 1.110 2 下降至 2014 年的 1.064 9。

3.2 历史变迁分析

表 2 和图 2 的卫星遥感测算结果显示了渤海湾水域面积和岸线长度的变化,使用表 1 中的一系列卫星遥感影像对比发现:2002 年以前,水域面积和岸线长度同步减少是由于渤海湾海岸带被利用开发,海岸线从陆地逐渐向外推所造成;而 2002 年后,水域面积减少,岸线长度增加,这是由于围填海减小了水域面积,增加了人造海岸线,如图 1(b)和图 3 中所示的曹妃甸、天津港、南港工业区和黄骅港等。

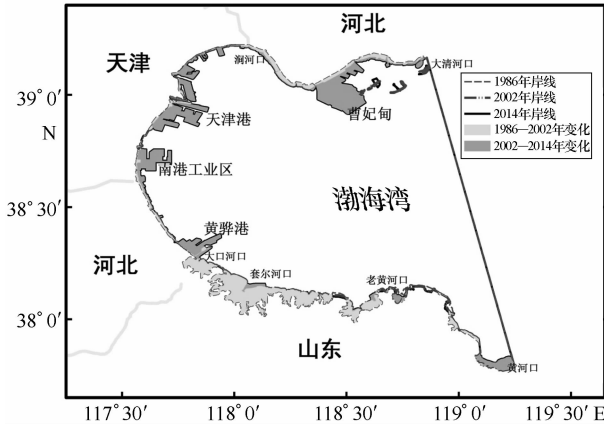


图 3 渤海湾水域面积和岸线历史变迁(1986—2014 年)空间分布

图 3 是使用 1986 年、2002 年和 2014 年解译的结果进行比较获得的渤海湾海岸线和水域面积变

化情况的分布图。

由图3可以看出,1986—2002年间,渤海湾水域面积减少约543 km²,主要变化包括北岸大清河河口至涧河口之间的岸线整体外推,外推距离约2 km;南岸的大河口、套尔河口和老黄河口地带海岸滩涂的开发,减少了水域面积并开发为水产养殖场。这一时期的变迁主要表现为河北唐山市和沧州市、山东滨州市和东营市的近岸海洋养殖业对渤海湾海岸滩涂的开发利用。2002—2014年间,水域面积减少约724 km²,主要为河北的曹妃甸、黄骅港;天津的天津港和南港工业区建设围填海对渤海湾海域的使用,造成了渤海湾水域面积减小,人造岸线增加。

海岸线分形维数的变化大小,可直接反映海湾自然岸线的人为改变程度^[12]。海岸线在自然演化过程中,将趋于固定值,然而港口建设、养殖场开发和其他围填海等大型人工海岸工程将使局部海岸线的变得平直,降低岸线的分形维数。从表1的测算结果分析,渤海湾1986—2014年近30年间海岸线分形维数呈现不断减小的变迁趋势,这表明该历史时期内渤海湾地区的海岸工程建设在逐步开展,不断改变海岸环境。

从图3的测算结果分析,1986—2002年间,岸线改变主要表现为自然岸线被改造为养殖场;2002—2014年间,岸线改变主要表现为港口建设增加了人造岸线。两者均降低了岸线的分形维数。

对海岸线的开发利用,一般伴随着当地经济的发展。搜集天津市国内生产总值(GDP)数据(数据来源于国家统计局,http://data.stats.gov.cn/),分析发现GDP(单位:亿元)的倒数与渤海湾岸线分形维数具有基本一致的变化趋势(图4),两者变化的线性相关系数 $R=0.95$ (图5, $R^2=0.91$)。

本文所使用的岸线为渤海湾海岸线,渤海湾紧邻河北省唐山市和沧州市、天津市、山东省滨州市和东营市,近年来全国各省市均保持较高的经济发展水平,且沿海区域占据整个行政省市经济的一定比例,因此仅利用天津市历年GDP值可代表整个渤海湾沿海地区的经济水平。图4和5的结果表明,渤海湾海岸线的分形维数的变化可反应该地区的

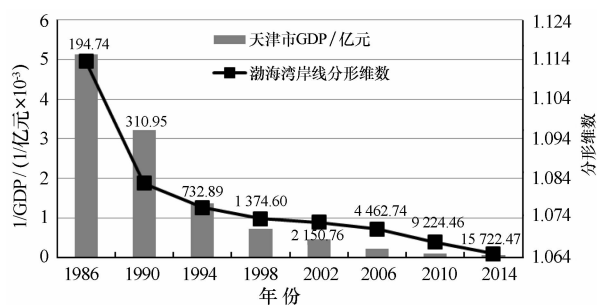


图4 渤海湾(1986—2014年)岸线分形维数与天津市GDP倒数变迁趋势
[直方图上方数值为当年GDP(单位:亿元)]

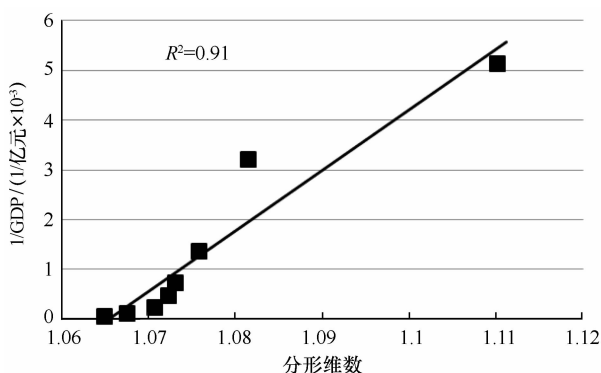


图5 渤海湾(1986—2014年)岸线分形维数与天津市GDP倒数对比

经济发展变化,这是因为沿海地区海洋养殖业发展、围填海和人工港口等海洋工程建设与开发影响了整个地区的GDP数值,此类人类活动直接改变了海湾岸线,进而改变了岸线的分形维数。

4 总结

在海湾动力学的卫星遥感研究领域,水域面积、岸线长度和岸线分形维数是测算海湾变迁的主要参数,它们可用于海湾纳潮量、潮流、泥沙输运、污染物扩散和海水交换速率等海湾动力学参数的计算。

本文通过高分辨率卫星遥感数据对渤海湾海岸线解译和计算,获得了1986—2014年间渤海湾的水域面积、岸线长度和岸线分形维数。通过对测算结果的分析显示高分辨卫星遥感数据不仅可用于测算海湾水域面积和岸线,还可分析其变迁的驱动力因素,同时分析结果显示岸线分形维数与当地

GDP 等经济发展指标具有高相关性。

分析结果表明,影响渤海湾岸线变迁的主要驱动力因素是养殖场开发建造、围填海和港口建设等海洋工程,渤海湾岸线分形维数与天津市年 GDP 的倒数具有一致的历史变迁趋势,其线性相关系数为 0.95。本文解译的海岸线分形维数、水域面积、岸线长度及其历史变迁趋势和驱动力因素分析结果可为渤海湾动力学研究、海洋环境变迁评估和海洋开发与管理提供基础参考数据。

参考文献

[1] MANDELNBROT B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science, 1967, 156: 636-638.

[2] 郑全安,吴隆业,张欣梅,等. 胶州湾遥感研究 I. 总水域面积和总岸线长度量算[J]. 海洋与湖沼,1991,22(3): 193-199.

[3] 吴隆业,吴永森,孙玉星. 海口湾遥感研究 I. 纳潮量及其变化[J]. 海洋学报,1997,19(6): 56-59.

[4] 马荣华,杨桂山. 长江岸线与岛屿演化的空间分形研究:以江苏段为例[J]. 长江流域资源与环境,2004,13(6): 541-545.

[5] 朱晓华. 宏观尺度下基岩海岸岸线分形机制研究:以中国基岩海岸为例[J]. 海洋通报,2004,23(5): 46-50.

[6] 吴永森,辛海英,吴隆业,等. 2006 年胶州湾现有水域面积与岸

线的卫星调查与历史演变分析[J]. 海岸工程,2008,27(3): 15-22.

[7] 叶小敏,郑全安,纪育强,等. 基于 TM 影像的胶州湾水深遥感[J]. 海洋测绘,2009,29(2): 12-15.

[8] 叶小敏,王其茂,丁静,等. 渤海海湾纳潮量现状卫星遥感调查与分析[J]. 海洋测绘,2011,31(6): 48-51.

[9] 朱晓华,王建,陈霞. 海岸线长度与分维在不同比例尺地图上的变化研究[J]. 黄渤海海洋,2001,19(4): 71-75.

[10] 朱晓华. 海岸线分维数计算方法及其比较研究[J]. 黄渤海海洋,2002,20(2): 31-36.

[11] 高俊国,边淑华. 分形分析法用于海湾冲淤演化预测的初步探讨[J]. 海洋科学进展,2004,22(3): 334-339.

[12] 叶小敏,纪育强,郑全安,等. 胶州湾海岸线历史变迁的分形分析[J]. 海洋科学进展,2009,27(4): 495-501.

[13] 马小峰,邹亚荣,刘善伟. 基于分形维数理论的海岸线遥感分类与变迁研究[J]. 海洋开发与管理,2015,32(1): 30-33.

[14] 张华国,黄韦良,周长宝. 分形方法在南麂岛土地覆盖类型分析中的应用[J]. 国土资源遥感, 2002(1): 53-56.

[15] 张华国,黄韦良. 基于分形的海岸线遥感信息空间尺度研究[J]. 遥感学报, 2006, 10(4): 463-468.

[16] 刘林. 胶州湾海岸带空间资源利用时空演变[D]. 青岛:国家海洋局第一海洋研究所,2008.

[17] 候庆志. 渤海湾连片开发对海岸滩涂动力环境及演变过程的影响研究[D]. 南京:南京师范大学,2013.