

doi: 10.6046/zrzyyg.2022214

引用格式: 朱琳,黄玉玲,杨刚,等. 基于 GEE 的杭州湾海岸线遥感提取与时空演变分析[J]. 自然资源遥感,2023,35(2):50-60. (Zhu L, Huang Y L, Yang G, et al. Information extraction and spatio-temporal evolution analysis of the coastline in Hangzhou Bay based on Google Earth Engine and remote sensing technology[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(2): 50-60.)

基于 GEE 的杭州湾海岸线遥感提取与时空演变分析

朱琳¹, 黄玉玲¹, 杨刚¹, 孙伟伟¹, 陈超², 黄可¹

(1. 宁波大学地理与空间信息技术系, 宁波 315211; 2. 苏州科技大学地理科学与测绘工程学院, 苏州 215009)

摘要: 持续海岸线动态变化监测对于掌握海岸线变迁规律和演变特征至关重要。长时间序列的海岸线数据集能够在时空维度上详细刻画海岸线的动态变化,进而反映人为活动和自然因素对滨海区域的影响,有利于滨海湿地空间资源的科学管理和可持续发展。该研究基于 Google Earth Engine (GEE) 平台,利用长时间序列 Landsat TM/ETM+/OLI 影像,研究了 1990—2019 年杭州湾海岸线的变化特征;利用像元级修正归一化水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)时间序列重构技术方法,结合 Otsu 算法阈值分割和数字化海岸分析系统,实现长时间序列海岸线信息自动提取和时空变化分析。结果表明,1990—2019 年间杭州湾海岸线总长度增加了约 20.69 km,陆域面积增加了约 764.81 km²,年均增加速率为 0.35%,平均终点变化速率和平均线性回归变化速率分别为 110.07 m/a 和 119.06 m/a。文章通过对 30 a 间杭州湾海岸线进行时空演变分析,为实现杭州湾海岸线资源的可持续发展和综合管理提供了基础支撑。

关键词: 海岸线; 杭州湾; Google Earth Engine; 时空演变

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)02-0050-11

0 引言

海岸线是海洋与陆地的分界线,是描述海岸地区生态环境的重要地理要素和土地资源的重要组成部分,已被国际地理信息委员会认定为 27 个最重要的地标特征之一^[1]。海岸线作为海洋开发的主体,是保护环境、维持海岸带生态平衡的重要载体。从 20 世纪开始,沿海国家的经济重心逐渐向沿海地区转移,全球近 50% 的人口居住在海岸线 100 km 以内的地区^[2]。随着经济发展重心的转移,海岸线资源发生较大变化,对沿海地区的经济、社会、生态和环境等方面产生了较大影响^[3]。近岸地区人类开发强度加剧,海岸线资源萎缩,导致海岸线开发与保护矛盾日益突出^[4]。因此,了解海岸线资源开发现状对于区域可持续发展具有重要作用。

实现海岸线信息准确、快速提取是海岸线研究

的关键。在长期的海岸线监测中,传统的人工实地测量方法通常存在耗时长、时效性差、人工成本高等问题,而且易受到复杂地理环境条件的制约^[5]。相对而言,遥感具有覆盖范围广、重访周期短、获取成本低等优势,逐渐成为海岸线监测的重要手段。海岸线提取方法可分为目视解译和自动提取^[6-8]。目视解译主要根据遥感影像解译标志,采用人机交互的方式识别海岸线^[9],该方法对研究人员的海岸识别技能要求高,且容易受到主观因素的影响,难以满足大规模、长时间序列的海岸线信息提取。自动提取方法依靠影像地物光谱特征差异识别海岸线,相比目视解译方法,其普适性和时效性更好,成为海岸线遥感提取的重要手段^[10-11]。

基于遥感影像的海岸线自动提取方法主要有影像分类、图像处理和指数阈值分割等方法^[12-14]。影像分类利用监督或无监督的分类方法^[15-16]对沿海地区土地覆盖类型进行划分,能够获得较高的海岸

收稿日期: 2022-05-24; 修订日期: 2022-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目“海岸带高光谱遥感”(编号: 42122009)、“多时相高光谱遥感自适应解混的滨海湿地精细变化分析”(编号: 41971296)、“人类活动影响下的群岛区域海岸线时空演变机制分析”(编号: 42171311)、宁波市科技创新 2025 重大专项项目“地空星遥感协同的作物病虫害信息智能感知与测报系统研发及示范应用”(编号: 2021Z107)、宁波市公益项目“多源遥感信息融合的长三角城市群热环境精细监测关键技术研发”(编号: 2021S089)、中国博士后科学基金项目“顾及先验知识的遥感时间序列数据时域重建方法”(编号: 2020M670440)和浙江省省属高校基本科研业务费专项资金资助项目“国产高分辨率遥感影像支撑下的大尺度赤潮变化检测方法研究”(编号: SJLZ2022002)共同资助。

第一作者: 朱琳(1997-),女,硕士研究生,研究方向为海岸带资源与环境监测。Email: zll003485528@163.com。

通信作者: 杨刚(1986-),男,博士,副教授,研究方向为遥感影像数据质量改善与信息提取理论和方法、遥感滨海健康监测技术与应用研究。Email: yanggang@nbu.edu.cn。

线精度和属性信息,但其精度会受到分类器选择以及样本点选取的影响。图像处理方法主要包括边缘活动轮廓模型和边缘检测算子模型^[17-18],通过检测图像中灰度变化最明显的点获取边缘信息,当水陆边缘特征不清晰时,该方法得到的分割效果不理想。指数阈值分割方法利用光谱指数,通过选择适当的阈值对水体和其他地物进行区分,从而获取水体边界。常见的用于水体提取的指数包括归一化水体指数(normalized difference water index,NDWI)、修正归一化水体指数(modified normalized difference water index,MNDWI)和陆表水指数(land surface water index,LSWI)^[19-23]。Cao 等^[24]基于 Landsat 影像,使用 MNDWI 阈值并结合像元出现频率实现对水体、陆地以及潜在潮滩的划分,确定详细的海岸动态变化;Guo^[25]使用 NDWI,MNDWI 和 Otsu 阈值算法,得到水体和非水体二值化图像,通过 Canny 边缘检测提取水体边界。相比影像分类和图像处理方法,指数阈值分割简单高效、易于实现,更适合于长时间序列数据处理。

杭州湾作为中国经济高度发达的地区之一,城市化水平高,人口密度高,沿岸湿地资源丰富,具有重要的生态和经济价值^[26]。随着经济的快速发展,杭州湾地区空间格局发生变化,对海岸线造成影响。Chu 等^[27]使用 1985—2018 年 Landsat 影像并结合夜间灯光数据监测杭州湾海岸线变化和人类活动,发现在热点地区,人类活动显著增加并且海岸线移动达到 5 km 以上,揭示了人类活动对海岸线的影响;Wang 等^[28]使用 1976—2015 年多时相 Landsat 数据,分析杭州湾宁波地区海岸线时空变化特征,结果表明海岸线形态由曲折转换为平直,且海岸线年平均净移动达到 85 m/a,向海一侧不断推进。针对长时间序列的杭州湾海岸线变化分析,多数研究基于若干时间节点(例如监测周期为 5 a 或 10 a)的遥感影像展开,往往易丢失连续变化的信息,难以准确反映海岸线的精细变化特征。

因此,本研究基于 Google Earth Engine(GEE)平台,提出光学遥感影像的水体指数时间序列重构方法,获得高频次的长时间序列水体指数数据集,通过 Otsu 算法进行水陆分割,实现长时间序列杭州湾海岸线自动提取,并使用专业的数字化海岸线分析系统,深

入分析海岸线特征,对海岸线时空演变特征进行研究。

1 研究区及其数据源

1.1 研究区概况

杭州湾(图 1)位于中国东海岸长江三角洲南部,浙江省东北部,与上海、浙江嘉兴、杭州、绍兴、宁波毗邻。杭州湾是钱塘江河口外海滨部分,呈喇叭状,属于河口海岸^[29]。该区地势平坦,南部有大片滩涂湿地,属于亚热带海洋性季风气候^[30]。作为全国第二大湾区,长江经济带、长江城市群与“一带一路”等国家战略的交汇点,经济发展具有举足轻重的地位。本研究以杭州湾南北两岸的海岸线为研究对象,海岸线范围以芦潮港为起点,甬江河口为终点。



图 1 研究区示意图
Fig.1 Location of study area

1.2 数据源

GEE 平台可提供高性能计算能力和丰富的地理空间数据集^[31-32]。基于 GEE 平台(<https://earthengine.google.com/>),选取了研究区 1990—2019 年所有可用的行列号为 118/039 的 Landsat5 TM, Landsat7 ETM+ 和 Landsat8 OLI 系列表面反射率遥感影像共 379 景,空间分辨率 30 m,时间分辨率为 16 d。考虑到南方云雾天气和潮汐的影响,在云掩模的基础上利用谐波线性拟合函数对时间序列数据进行重构以获取高质量的时间序列数据,最终选取每年 6—9 月接近高潮位时的影像(表 1)用于海岸线提取。

表 1 用于海岸线提取的 Landsat 影像
Tab.1 Landsat imagery for coastline extraction

序号	传感器	获取时间	高潮位/cm	时间 ^①	序号	传感器	获取时间	高潮位/cm	时间
1	TM	1990/08/14(09:45:22)	272	06:01	16	TM	2005/06/04(10:12:51)	324	11:24
2	TM	1991/09/18(09:49:21)	252	08:50	17	TM	2006/06/23(10:18:07)	287	10:31
3	TM	1992/10/22(09:46:50)	319	09:43	18	TM	2007/07/12(10:19:06)	287	10:31
4	TM	1993/06/03(09:47:57)	350	11:42	19	TM	2008/07/14(10:12:16)	278	10:22

①高潮位及对应时间来自于海黄山港。

(续表)

序号	传感器	获取时间	高潮位/cm	时间	序号	传感器	获取时间	高潮位/cm	时间
5	TM	1994/05/05 (09: 45: 06)	326	08: 09	20	TM	2009/08/18 (10: 14: 45)	305	10: 53
6	TM	1995/07/11 (09: 30: 25)	300	12: 23	21	TM	2010/08/21 (10: 15: 43)	274	10: 09
7	TM	1996/06/11 (09: 37: 59)	315	09: 46	22	TM	2011/08/08 (10: 14: 18)	287	06: 02
8	TM	1997/07/16 (09: 55: 54)	278	10: 22	23	ETM+	2012/05/14 (10: 20: 08)	327	07: 15
9	TM	1998/08/04 (10: 03: 45)	287	11: 33	24	ETM+	2013/07/20 (10: 20: 45)	287	11: 33
10	TM	1999/08/23 (10: 02: 52)	296	11: 17	25	OLI	2014/07/31 (10: 25: 21)	373	15: 23
11	ETM+	2000/06/14 (10: 17: 16)	294	10: 40	26	OLI	2015/07/18 (10: 24: 58)	329	14: 22
12	ETM+	2001/07/03 (10: 14: 45)	294	10: 40	27	OLI	2016/07/04 (10: 25: 16)	318	12: 57
13	ETM+	2002/07/22 (10: 13: 40)	287	11: 33	28	OLI	2017/07/07 (10: 25: 12)	300	12: 23
14	TM	2003/10/21 (10: 03: 22)	285	08: 47	29	OLI	2018/07/10 (10: 24: 32)	276	09: 44
15	TM	2004/06/01 (10: 06: 26)	350	11: 42	30	OLI	2019/07/29 (10: 25: 26)	283	10: 02

2 研究方法

本研究把遥感成像时刻的水陆边界线定义为海岸线,使用 1990—2019 年 Landsat 数据,基于指数阈值分割方法进行杭州湾海岸线信息提取,并对其进行时空演变分析。首先,基于像素计算 MNDWI,并使用时间序列谐波分析 (harmonic analysis of time series,HANTS) 对 MNDWI 时间序列数据进行重构;其次,使用 Otsu 算法确定阈值区分水体和陆地以获取水体边界;然后,利用 ArcGIS 10.4 软件进行矢量转换和后处理;最后,基于生成的海岸线进行时空变化分析。具体技术路线如图 2 所示。

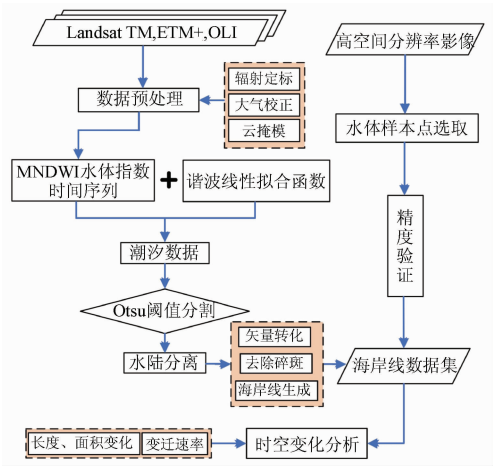


图 2 海岸线提取技术路线

Fig. 2 Technology route of coastline extraction

2.1 海岸线遥感提取

基于 Landsat 影像计算 MNDWI 对陆地和水体进行区分,该方法优于 NDWI,在海岸线提取方面得到广泛应用^[33]。其计算公式为:

$$MNDWI = (Green - MIR)/(Green + MIR), \quad (1)$$

式中 *Green* 和 *MIR* 分别为绿光波段反射率和中红外波段反射率,分别对应 Landsat5/7 影像的 B2 和 B5 波段,Landsat8 影像的 B3 和 B6 波段。

HANTS^[34]是一种基于快速傅里叶变换改进的

算法,通过傅里叶变换和最小二乘法拟合,可以有效去除异常值。本研究使用 HANTS 对 MNDWI 时间序列数据进行重构,去除 1990—2019 年期间的异常观测值,并通过拟合填补云掩模生成的空洞。

Otsu^[35]是一种使用灰度直方图选择阈值分割水体和陆地的方法。该方法通过选择一个合适的阈值,使用最大类间方差分离背景和目标对象^[36]。本研究使用 Otsu 自动阈值分割得到 MNDWI 二值图像,利用 ArcGIS 10.4 软件将二值图像转换为矢量,得到包括湖泊、河流的水域范围。为了提取海岸线边界,通过计算最大水体面积得到海洋区域,并去除面积小于 0.036 km² (4 个像元大小) 碎斑。然后将面矢量转换为线矢量,并使用 SmoothLine 工具去除边界锯齿,最后生成 1990—2019 年杭州湾海岸线数据集。

2.2 海岸线时空变化分析

数字海岸线分析系统 (digital shoreline analysis system, DSAS) 5.0 版于 2018 年 12 月发布,是美国地质调查局研发的用以分析海岸线时空变化速率的分析系统,在 ArcGIS 软件内操作。通过 DSAS 可以生成海岸带剖面,并计算时间序列海岸线变化率^[37]。本文使用 DSAS (v5.0) 分析近 30 a 间杭州湾海岸线的变化率,包括终点变化速率 (end point rate, EPR) 和线性回归变化速率 (linear regression rate, LRR)^[38-39]。EPR 计算公式为:

$$EPR = \frac{NSM}{SP}, \quad (2)$$

式中: *NSM* 为最远年份和最近年份的海岸线距离海岸线基线距离, *m*; *SP* 为最近年份与最远年份之间的时间间隔, *a*。

LRR 通过将最小二乘法拟合剖面线与海岸线相交的点来确定,计算海岸线的变化速率。线性回归方法使用所有的数据,不考虑趋势和准确性的变化。计算公式为:

$$y = a + bx, \quad (3)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \tag{4}$$
$$a = \bar{y} - b \bar{x}, \tag{5}$$

式中： x 和 y 分别为年份的自变量和海岸线的空间位置； x_i 为第 i 年； y_i 为第 i 年剖面与海岸线交点到基线的距离； $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为 x_i 和 y_i 的平均值； a 为拟合常数的截距； b 为回归斜率，即 LRR。

3 结果与分析

3.1 海岸线提取结果精度评价

通过本文方法得到了 1990—2019 年杭州湾海岸线数据集，如图 3 所示。通过 Google Earth 高空间分辨率影像随机选取了 1990 年、2000 年、2010 年和 2019 年各 100 个样本点，并以这 4 个年份的海岸线为基准建立半径 30 m 和 60 m 的缓冲区，统计样本点落在缓冲区内的个数和误差允许范围内（30 m）的数量，并计算其平均误差和精度。海岸线提取精

度如表 2 所示，平均误差控制在 1 个像元以内，精度都在 90% 以上，满足对海岸线变化分析的要求。

表 2 海岸线提取结果精度评价

Tab. 2 Accuracy assessment of coastline information

年份	样本个数/个	大于 2 像元个数 (>60 m)/个	小于 1 像元个数 (<30 m)/个	平均误差/m	准确度/%
1990 年	100	4	92	26.41	92
2000 年	100	7	92	24.88	92
2010 年	100	7	91	23.53	91
2019 年	100	4	96	20.78	96

3.2 海岸线时空演变分析

3.2.1 1990—2019 年海岸线长度及面积变化分析

1990—2019 年的杭州湾海岸线长度、长度变化、所围陆域面积和面积变化情况如图 4 所示。在研究时间段内，杭州湾海岸线长度从 1990 年的 479.12 km 增加到 2019 年的 499.81 km，增加了 20.69 km，增长率为 4.32%，年均增长率约为 0.14%。海岸线整体呈现增长趋势，但增长速率缓慢，年际间长度变化幅度大。从海岸线长度变化情况看，海岸线长度增加主要发生在 2003—2004 年、2010—2011 年、2012—2013 年和 2014—2015 年，增加分别为 40.78 km、32.58 km、19.81 km 和 24.91 km；海岸线长度缩减主要发生在 1998—1999 年、2007—2008 年、2009—2010 年、2011—2012 年和 2017—2018 年，分别减少了 17.93 km、32.49 km、18.58 km、38.26 km 和 27.97 km。在面积方面，1990—2019 年杭州湾海岸线所围成的陆域面积呈显著的增长趋势，从 1990 年的 7 202.76 km² 增加到 2019 年的 7 967.57 km²，共增加了约 764.81 km²，增长率为 10.62%，年均增加速率为 0.35%。其中，面积增加较大的年份主要发生在 1996—1997 年、2003—2004 年、2005—2006 年和 2011—2012 年，分别为 94.48 km²、69.71 km²、64.30 km² 和 76.85 km²；极少数面积减小的年份主要发生在 1994—1995 年、1998—1999 年、2002—2003 年和 2018—2019 年，分别为 17.35 km²、4.73 km²、2.76 km² 和 1.54 km²。

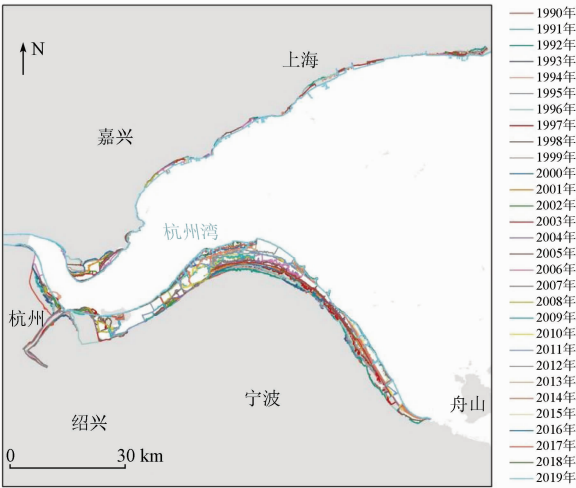


图 3 1990—2019 年杭州湾海岸线分布
Fig.3 Distribution of coastlines over the Hangzhou Bay from 1990 to 2019

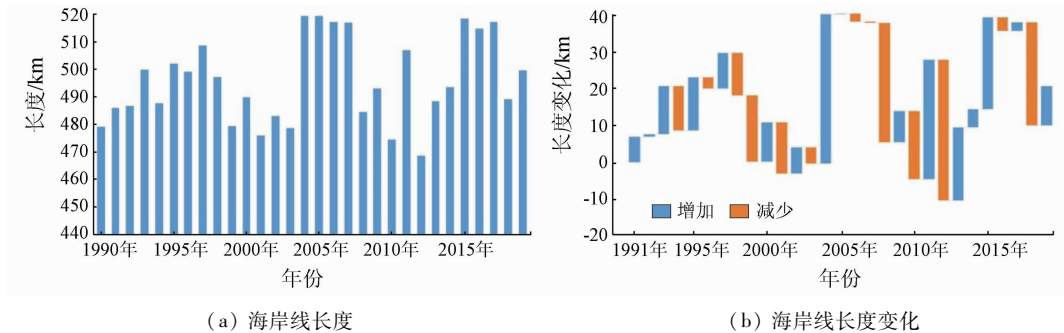


图 4-1 1990—2019 年杭州湾海岸线长度和面积变化
Fig.4-1 Changes of line length and area in Hangzhou Bay from 1990 to 2019

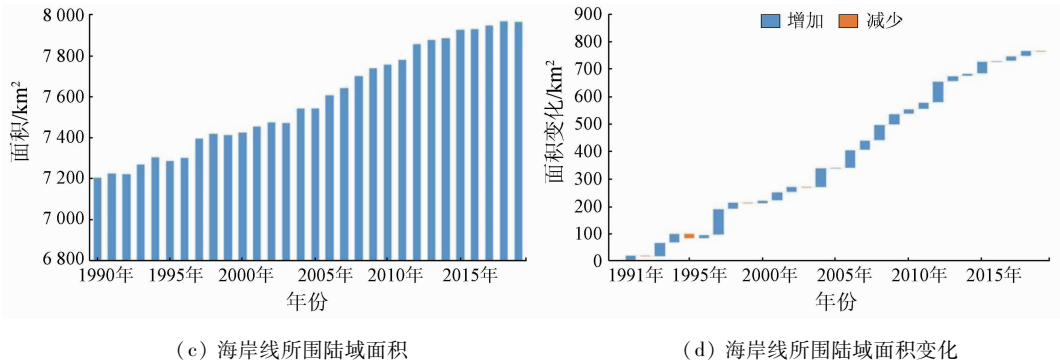


图 4-2 1990—2019 年杭州湾海岸线长度和面积变化
Fig. 4-2 Changes of line length and area in Hangzhou Bay from 1990 to 2019

海岸线扩张或后退过程会引起海岸线的海陆格局发生变化,陆地向海洋扩张表现为陆地面积增加,称为淤积,海洋向陆地退却表现为陆地面积减少,称为侵蚀。陆地面积的变化可以反映海岸线变化的方向和幅度。本文研究了 1990—2019 年间杭州湾陆域面积的变化,并根据陆域面积变化情况,分阶段对杭州湾海岸线海陆格局的时空变化进行分析,结果

如图 5 所示。在整个研究时间段内,杭州湾区域基本处于淤积状态,尤其以南岸为主,北岸基本保持稳定。在 1998—1999 年和 2003—2004 年,杭州湾北岸嘉兴南部区域有明显淤积。2007 年曹娥江大闸枢纽工程竣工,使曹娥江区域海岸线向外扩张,出现淤积情况。从 2003 年开始,杭州湾南岸淤积状态显著,尤其以宁波区域为主,到 2018 年基本趋于稳定。

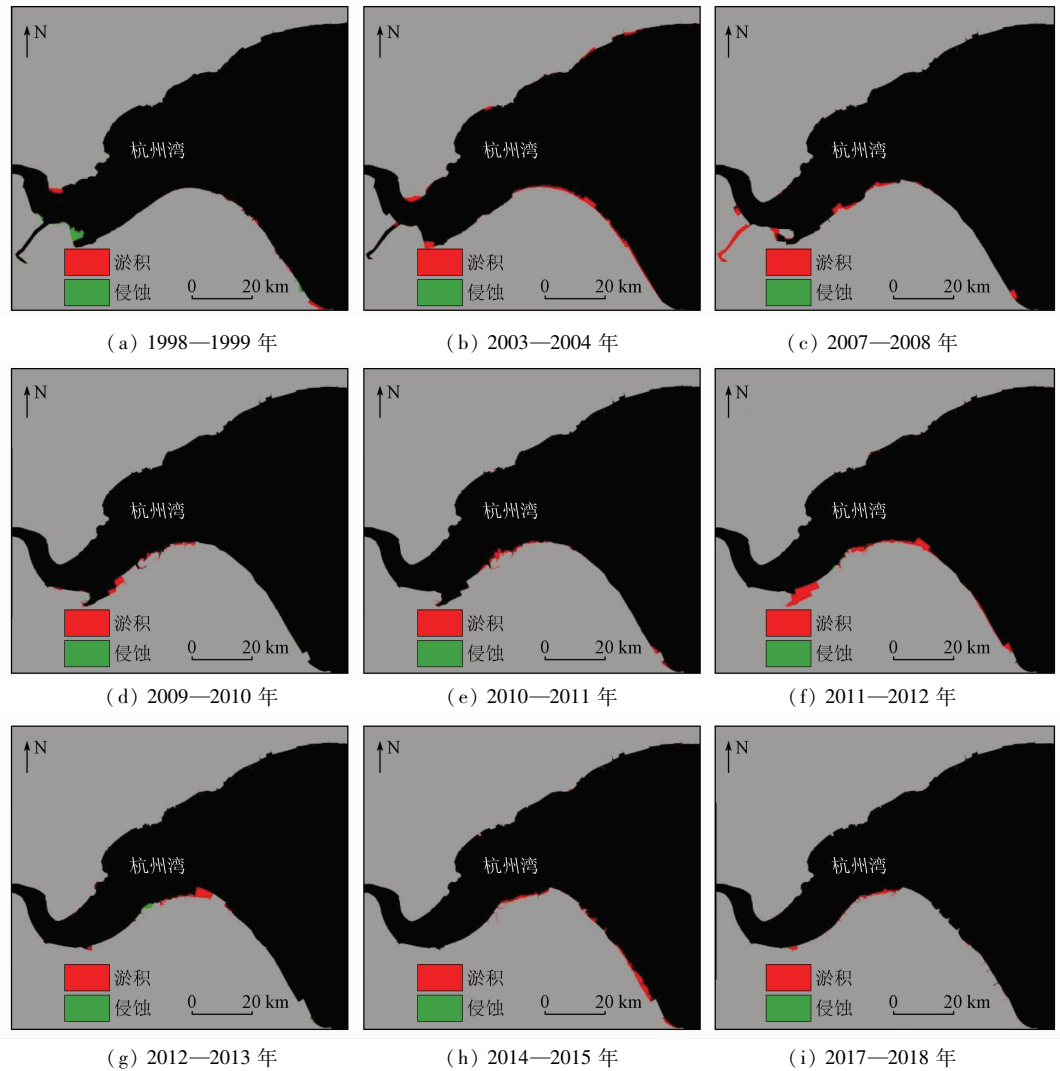


图 5 1990—2019 年杭州湾阶段性冲淤情况
Fig. 5 Staged accretion and erosion areas over the Hangzhou Bay from 1990 to 2019

3.2.2 1990—2019 年海岸线变化率分析

根据 EPR 和 LRR 对 1990—2019 年杭州湾地区海岸线进行分析。结果如图 6—7 所示。海岸线总体上呈现向海一侧扩张的趋势,但在不同区域表现

不同特征,杭州湾北岸海岸线的变化速率整体上慢于杭州湾南岸,变化速率较快的区域主要集中在曹娥江以东至杭州湾新区,平均 EPR 为 110.07 m/a, 平均 LRR 为 119.06 m/a。

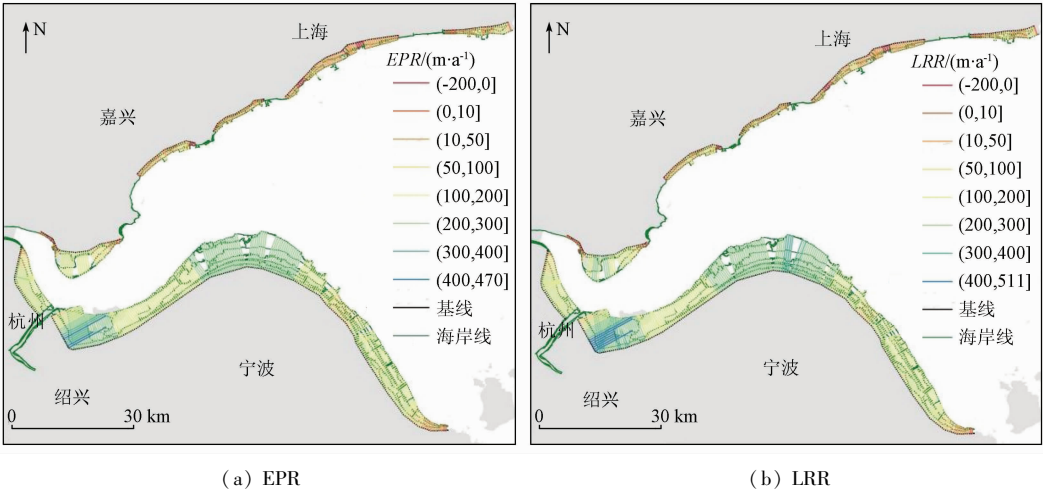


图 6 1990—2019 年杭州湾海岸线变化率分布
Fig. 6 Distribution of coastline change rate of Hangzhou Bay from 1990 to 2019

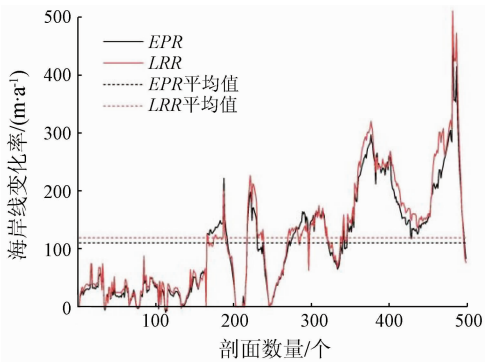


图 7 1990—2019 年杭州湾海岸线变化率
Fig. 7 Coastline change rate of Hangzhou Bay from 1990 to 2019

为了进一步分析杭州湾海岸线的变迁,本文选

取了 5 个重点区域进行研究(图 8),分别为:①北岸嘉兴南部区域;②北岸嘉兴东部区域;③北岸金山和奉贤区域;④南岸绍兴区域;⑤南岸宁波区域。北岸嘉兴南部区域受所处地理位置的影响,河流泥沙大量淤积,形成冲积平原的速度快。1990—2000 年海岸线变化主要是由于围海造田和沿岸水产养殖业的发展造成,2000—2010 年河流入海口沉积物堆积使海岸线不断向海扩张,陆地面积持续增加。2010 年以后,泥沙含量减少,政府不断加强对土地资源的管理,海岸线变化趋于稳定。在北岸嘉兴东部区域,随着城市经济的发展,城市空间需求日益增加,规模性的围海造田以及海堤和港口建设使得海岸线不断向外扩张。北岸金山和奉贤区域围海

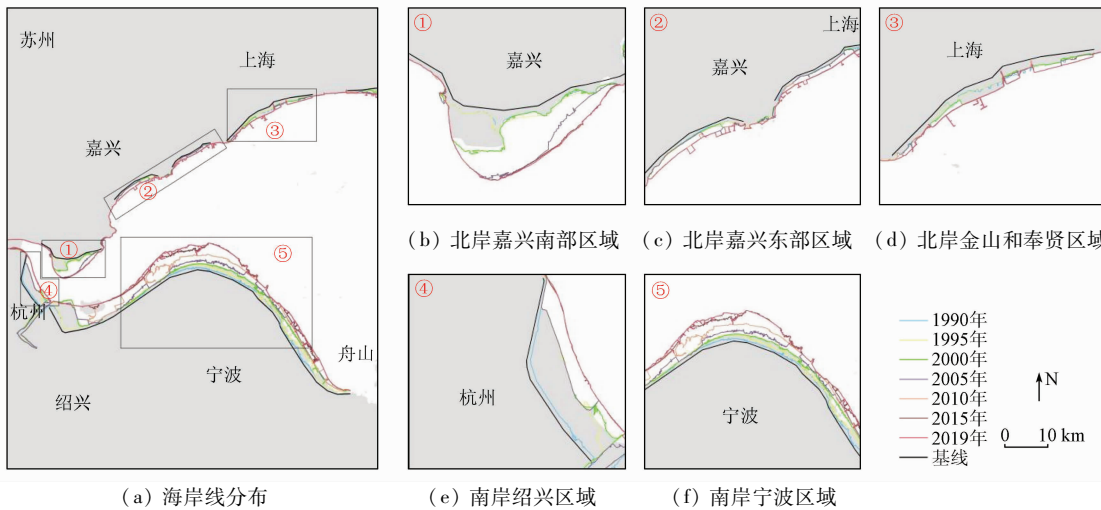


图 8 1990—2019 年杭州湾重点区域海岸线分布
Fig. 8 Coastline distribution in key areas of Hangzhou Bay from 1990 to 2019

造田和河流泥沙淤积加速沿岸沙洲形成,沙洲以外堤坝的修建促使海岸线不断向外扩张。但由于长江上游水利设施建设,河流下游泥沙输送量逐渐减少,使海岸线淤积速度减缓,海浪冲刷作用下该区域某些岸段出现一定程度侵蚀。南岸绍兴区域位于钱塘江和曹娥江之间,处于河流下游入海口,地形较为平坦。当河流泛滥时,泥沙在河岸两侧沉积,并逐渐形成冲积平原。两河的泥沙沉积形成了大范围的滩涂,易于开发,主要受人类活动的影响成为农田和水产养殖区域。南岸宁波区域地势低平,呈现弧形分布形态。在弧度最大,即滩涂凸起最显著地段,海岸线变化率达到峰值。受潮汐影响,杭州湾形成了“北进南出”的水沙输移特征^[40-42]。距离河流入海口越来越远,河口宽度放宽,流速变缓,挟带泥沙能力减弱,沉积物逐渐堆积,在南岸形成大面积滩涂。另外,在人类经济活动的影响下,水产养殖和围海造田逐渐取代自然状态。尤其是在2000年以后,为促进经济发展,满足人民生产生活需要,杭州湾新区建设加速了人工岸线的开发。围涂、丁坝群等工程建设,进一步推动海岸线向海延伸。

图9为1990—2019年间杭州湾重点区域海岸线变化率。1990—2019年北岸嘉兴南部区域海岸平均EPR和LRR分别为74.85 m/a和89.11 m/a,最大增长速率分别为197.51 m/a和226.31 m/a,最大侵蚀速率分别为-0.01 m/a和-0.56 m/a。1990—2019年北岸嘉兴东部区域海岸平均EPR和LRR分别为27.40 m/a和33.26 m/a,最大增长速率分别为65.14 m/a和74.03 m/a,最大侵蚀速率分别为-5.64 m/a和-2.08 m/a。1990—2019年北岸金山和奉贤区域海岸平均EPR和LRR分别为22.23 m/a和27.32 m/a,最大增长速率分别为72 m/a和87.27 m/a,最大侵蚀速率分别为-9.91 m/a和-4.78 m/a。1990—2019年南岸绍兴区域海岸平均EPR和LRR分别为119.22 m/a和106.50 m/a,最大增长速率为221.45 m/a和199.27 m/a。相比北岸嘉兴南部区域,由于其特殊的地理位置和城市发展进程,变化速率更快。1990—2019年南岸宁波区域海岸平均EPR和LRR分别为167.58 m/a和178.01 m/a,最大增长速率分别为296.66 m/a和320.21 m/a,变化速率普遍较快。

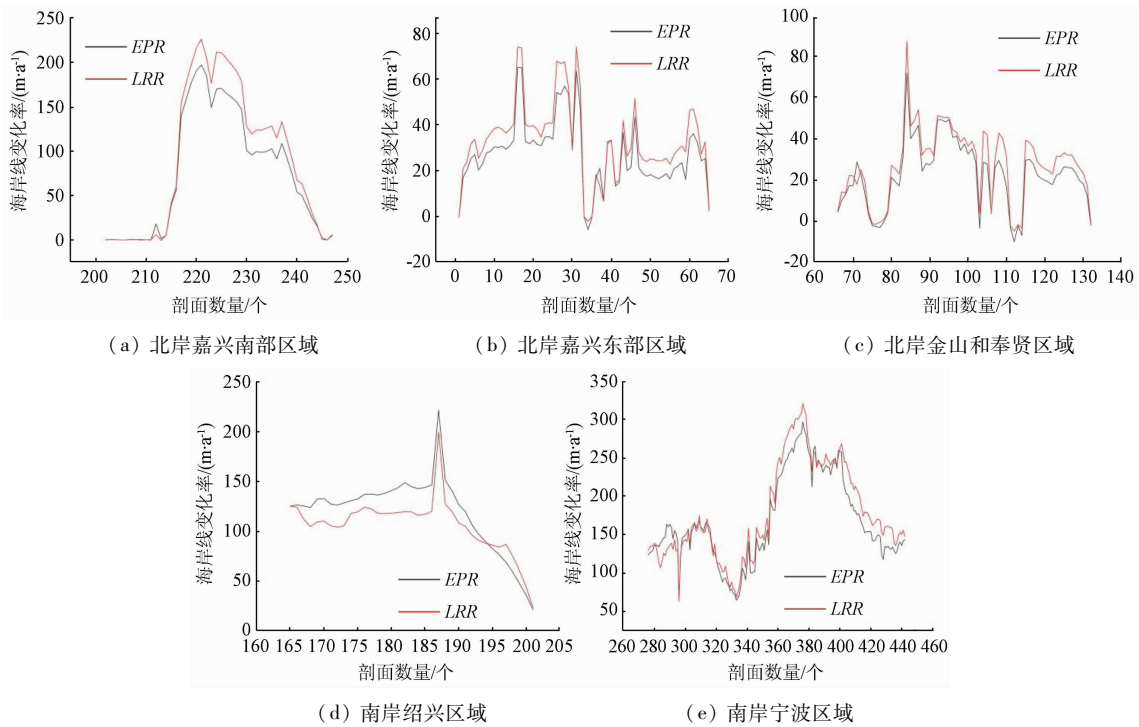


图9 1990—2019年杭州湾重点区域海岸线变化率

Fig.9 Change rate of coastline in key areas of Hangzhou Bay from 1990 to 2019

4 讨论

4.1 河流输沙量的影响

泥沙输送是由水流、风力和重力所驱动的沉积物运移过程,其侵蚀和沉积过程对河口形态演化起

着重要作用^[43],导致海岸增生或侵蚀。杭州湾和钱塘江口的泥沙主要来源于长江^[44]。2003年三峡大坝修建后,导致长江水下三角洲净侵蚀和沙砾粗化,长江三角洲泥沙排放量减少。通过水文调查发现,杭州湾年均泥沙通量在2003年之后略有下降,大约10%^[45]。

从总体发展趋势来看,河流泥沙输送量将随着人类活动的增强而逐渐减少。为进一步了解河流径流量和输沙量对海岸线的影响,收集了杭州湾兰溪水文站(<http://www.mwr.gov.cn/>)年径流量和年输沙量的观测数据(兰溪水文站是杭州湾入海河流钱塘江中控制流域面积最大干流的一个水文站),用于分析 2 种因素与杭州湾海岸线长度和面积的关系。

从图 10 可以看出,海岸线长度与河流径流量、输沙量的相关性很低,甚至呈现负相关,说明径流量和输沙量对海岸线长度的变化影响不大。但杭州湾面积与河流径流量、输沙量呈正相关,并且与输沙量的相关性达到 0.320,说明输沙量对面积变化有一定的影响。径流量和输沙量对杭州湾的影响主要体现在面积上,而不是海岸线长度。

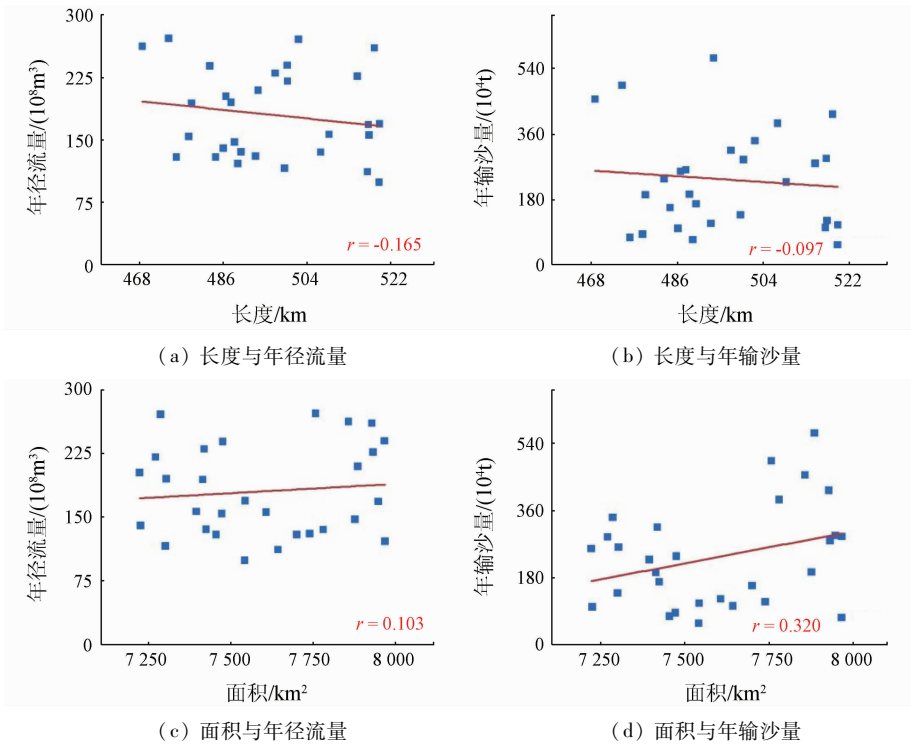


图 10 1990—2019 年杭州湾年径流量、年输沙量、海岸线长度、面积相关性

Fig. 10 Correlation of water discharge, sediment load, coastline length and area in Hangzhou Bay from 1990 to 2019

4.2 人为活动的影响

滨海湿地土地围垦是海洋工程中的重要一项,已成为大多数沿海城市开拓生存空间和生产空间的重要方式^[46]。杭州湾作为中国城市化高度发展的重要区域,经济增长迅速、人口密集、土地资源供应紧张,滩涂围垦是促进其经济发展的重要手段^[47]。研究时间段内,杭州湾地区围垦面积不断增加,特别是在杭州湾以南区域^[30, 48]。结合近 30 a 间的海岸线提取结果可以推断,土地围垦是海岸线变化的重要因素。

根据杭州湾经济发展状况和城市规划要求,土地围垦的利用方式在不同区域有所不同。在杭州湾北岸嘉兴东部以及上海(金山区和奉贤区)土地扩张的主要利用方式是港口、海堤以及少数的养殖池塘建设,而北岸嘉兴尖山区域和南岸大部分区域土地围垦的主要利用方式是耕地、水产养殖和丁坝群建设。

大坝建设也是造成海岸线变化的一个重要因

素。如上所述,大坝会对自然状态下河流物质输送造成干扰,而河流泥沙输送会影响海岸线变化。长江三峡水利工程及钱塘江流域建成的 18 个以上中大型水库,在一定程度上都使得输海泥沙通量减少、河口地区泥沙浓度下降。

除土地围垦和大坝建设外,政府政策也是海岸线变化的一个潜在因素。2001 年宁波市提出建设杭州湾新区,2003 年国家提出长三角区域一体化发展战略。杭州湾作为长三角城市群重要区域之一,存在着巨大的发展潜力。为了提供更多空间资源促进经济快速发展,自然岸线越来越多地转变为人工岸线。由此可以看出,海岸带区域方针政策的实施,会影响土地资源的需求,加速海岸线改造,从而导致海岸线变化。

5 结论

本研究提出 MNDWI 时间序列重构结合 Otsu 阈

值分割方法进行海岸线信息提取,利用 Landsat 数据的时序特征,实现了长时间序列的海岸线信息提取。同时,使用高空间分辨率 Google Earth 影像对海岸线提取结果进行了验证,证明了本研究海岸线精度的可靠性。

结果表明,杭州湾地区海岸线时空变化复杂,淤积与侵蚀现象并存,而近 30 a 来,向海扩张是海岸线变化的主要模式,尤其是在杭州湾南岸。在整个研究时间段内,杭州湾海岸线长度从 1990—2019 年增加了 20.69 km,增长率为 4.32%,杭州湾地区面积从 1990—2019 年共增加了约 764.81 km²,增长率为 10.62%。与自然因素相比(如河流沉积物的减少),人为活动对杭州湾滩涂的开发(土地围垦和港口建设)是杭州湾海岸线变化的重要驱动因素。

本研究虽然实现了长时间序列的海岸线信息提取,并进行了时空变化分析,但仍然存在一些问题有待于进一步研究:①杭州湾南岸以含水量高的滩涂区域为主,易与水体混分,仅依靠单一的水体指数阈值分割不能满足复杂地物水陆分离的需求。因此,更加精确地提取淤泥质滩涂区域海岸线将是下一步研究工作的重点;②为进一步分析人类活动对杭州湾海岸线变化产生的作用,可考虑将海岸线类型划分与海岸线分形维数计算相结合来分析海岸线的复杂性。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] Li J, Ye M, Pu R, et al. Spatiotemporal change patterns of coastlines in Zhejiang Province, China, over the last twenty – five years [J]. Sustainability, 2018, 10(2): 477.

[3] Sui L, Wang J, Yang X, et al. Spatial – temporal characteristics of coastline changes in Indonesia from 1990 to 2018[J]. Sustainability, 2020, 12(8): 3242.

[4] Liu L, Xu W, Yue Q, et al. Problems and countermeasures of coastline protection and utilization in China[J]. Ocean and Coastal Management, 2018, 153: 124 – 130.

[5] 梁 立, 刘庆生, 刘高焕, 等. 基于遥感影像的海岸线提取方法综述[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(12): 1745 – 1755.

Liang L, Liu Q S, Liu G H, et al. Review of coastline extraction methods based on remote sensing images[J]. Journal of Geo – Information Science, 2018, 20(12): 1745 – 1755.

[6] 毋 亭, 侯西勇. 海岸线变化研究综述[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1170 – 1182.

Wu T, Hou X Y. Review of research on coastline changes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): 1170 – 1182.

[7] 吴一全, 刘志林. 遥感影像的海岸线自动提取方法研究进展[J]. 遥感学报, 2019, 23(4): 582 – 602.

Wu Y Q, Liu Z L. Research progress on methods of automatic coastline extraction based on remote sensing images[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(4): 582 – 602.

[8] Toure S, Diop O, Kpalma K, et al. Shoreline detection using optical remote sensing: A review[J]. ISPRS International Journal of Geo – Information, 2019, 8(2): 75.

[9] 高 义, 王 辉, 苏奋振, 等. 中国大陆海岸线近 30 a 的时空变化分析[J]. 海洋学报, 2013, 35(6): 31 – 42.

Gao Y, Wang H, Su F Z, et al. Spatial and temporal of continental coastline of China in recent three decades[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(6): 31 – 42.

[10] 陈 超, 陈慧欣, 陈 东, 等. 舟山群岛海岸线遥感信息提取及时空演变分析[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(2): 141 – 152. doi: 10.6046/gtzyyg. 2020248.

Chen C, Chen H X, Chen D, et al. Coastline extraction and spatial – temporal variations using remote sensing technology in Zhoushan Islands[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(2): 141 – 152. doi: 10.6046/gtzyyg. 2020248.

[11] Wang D. Remote sensing of the coastline variation of the Guangdong – Hongkong – Macao Greater Bay Area in the past four decades[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(12): 1318.

[12] Vos K, Harley M D, Splinter K D, et al. Sub – annual to multi – decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery[J]. Coastal Engineering, 2019, 150: 160 – 174.

[13] Wei X, Zheng W, Xi C, et al. Shoreline extraction in SAR image based on advanced geometric active contour model[J]. Remote Sensing, 2021, 13(4): 642.

[14] Sagar S, Roberts D, Bala B, et al. Extracting the intertidal extent and topography of the Australian coastline from a 28 year time series of Landsat observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 195: 153 – 169.

[15] Sekovski I, Stecchi F, Mancini F, et al. Image classification methods applied to shoreline extraction on very high – resolution multispectral imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(10): 3556 – 3578.

[16] Nguyen H Q, Takewaka S. Shoreline changes along northern Ibaraki coast after the great East Japan Earthquake of 2011 [J]. Remote Sensing, 2021, 13(7): 1399.

[17] Donchyts G, van de Giesen N, Gorelick N. Reconstruction of reservoir and lake surface area dynamics from optical and SAR satellite imagery[C]//International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images, 2017.

[18] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986(6): 679 – 698.

[19] Dai C, Howat I M, Larour E, et al. Coastline extraction from repeat high resolution satellite imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 229: 260 – 270.

[20] Xu N. Detecting coastline change with all available Landsat data over 1986—2015: A case study for the state of Texas, USA [J]. Atmosphere, 2018, 9(3): 107.

[21] Jiang W, Ni Y, Pang Z, et al. An effective water body extraction method with new water index for Sentinel – 2 imagery[J]. Water,

2021,13(12):1647.

[22] Bishop – Taylor R,Nanson R,Sagar S,et al. Mapping Australia’s dynamic coastline at mean sea level using three decades of Landsat imagery[J]. Remote Sensing of Environment,2021,267:112734.

[23] Ghosh M K,Kumar L,Roy C. Monitoring the coastline change of Hatiya Island in Bangladesh using remote sensing techniques[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2015,101: 137 – 144.

[24] Cao W,Zhou Y,Li R,et al. Mapping changes in coastlines and tidal flats in developing islands using the full time series of Landsat images[J]. Remote Sensing of Environment,2020,239:111665.

[25] Guo Q. Bangladesh shoreline changes during the last four decades using satellite remote sensing data[D]. Columbus:The Ohio State University,2017.

[26] Chunye W,Delu P. Zoning of Hangzhou Bay ecological red line using GIS – based multi – criteria decision analysis[J]. Ocean and Coastal Management,2017,139:42 – 50.

[27] Chu L,Oloo F,Sudmanns M,et al. Monitoring longterm shoreline dynamics and human activities in the Hangzhou Bay,China,combining daytime and nighttime EO data[J]. Big Earth Data,2020,4 (3):242 – 264.

[28] Wang X,Liu Y,Ling F,et al. Spatiotemporal change detection of Ningbo coastline using Landsat time – series images during 1976— 2015[J]. ISPRS International Journal of Geo – Information,2017, 6(3):68.

[29] 贾明明,刘殿伟,王宗明,等. 面向对象方法和多源遥感数据的杭州湾海岸线提取分析[J]. 地球信息科学学报,2013,15(2): 262 – 269.

Jia M M,Liu D W,Wang Z M,et al. Coastline changes in Hangzhou Bay based on object – oriented method using multi – source remote sensing data[J]. Journal of Geo – Information Science, 2013,15(2):262 – 269.

[30] Qiu L,Zhang M,Zhou B,et al. Economic and ecological trade – offs of coastal reclamation in the Hangzhou Bay,China[J]. Ecological Indicators,2021,125:107477.

[31] Zhou Y,Dong J,Xiao X,et al. Continuous monitoring of lake dynamics on the Mongolian Plateau using all available Landsat imagery and Google Earth Engine[J]. Science of the Total Environment, 2019,689:366 – 380.

[32] Gorelick N,Hancher M,Dixon M,et al. Google Earth Engine:Planetary – scale geospatial analysis for everyone[J]. Remote Sensing of Environment,2017,202:18 – 27

[33] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息的研究[J]. 遥感学报,2005,9(5):589 – 595.

Xu H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. Journal of Remote Sensing,2005,9(5):589 – 595.

[34] Zhou J,Jia L,Menenti M. Reconstruction of global MODIS NDVI time series;Performance of harmonic analysis of time series (HANTS)[J]. Remote Sensing of Environment,2015,163:217 – 228.

[35] Otsu N. A threshold selection method from gray – level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems,Man, and Cybernetics,1979,9 (1):62 – 66.

[36] Nausheen N,Seal A,Khanna P,et al. A FPGA based implementation of Sobel edge detection[J]. Microprocessors and Microsystems,2018,56:84 – 91.

[37] Himmelstoss E A,Henderson R E,Kratzmann M G,et al. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide[R]. U. S. Department of the Interior;U. S. Geological Survey,2018.

[38] Zhu Q,Li P,Li Z,et al. Spatiotemporal changes of coastline over the Yellow River Delta in the previous 40 years with optical and SAR remote sensing[J]. Remote Sensing,2021,13(10):1940.

[39] 丁小松,单秀娟,陈云龙,等. 基于数字化海岸分析系统 (DSAS) 的海岸线变迁速率研究:以黄河三角洲和莱州湾海岸线为例[J]. 海洋通报,2018,37(5):565 – 575.

Ding X S,Shan X J,Chen Y L,et al. Study on the change rate of shoreline based on Digital Coastal Analysis System (DSAS):Taking the shoreline of the Yellow River Delta and Laizhou Bay as an example[J]. Marine Science Bulletin,2018,37(5):565 – 575.

[40] 谢东风,高 抒,潘存鸿,等. 杭州湾沉积物宏观输运的数值模拟[J]. 泥沙研究,2012(3):51 – 56.

Xie D F,Gao S,Pan C H,et al. Modelling macroscale suspended sediment transport patterns in Hangzhou Bay,China[J]. Journal of Sediment Research,2012(3):51 – 56.

[41] Xie D,Gao S,Wang Z B,et al. Morphodynamic modeling of a large inside sand bar and its dextral morphology in a convergent estuary: Qiantang Estuary, China [J]. Journal of Geophysical Research, 2017,122(8):1553 – 1572.

[42] 胡成飞,潘存鸿,吴修广,等. 1959—2019 年杭州湾南岸滩涂演变规律及机制[J]. 水科学进展,2021,32(2):230 – 241.

Hu C F,Pan C H,Wu X G,et al. Evolution law and mechanism of tidal flats on the south bank of Hangzhou Bay from 1959 to 2019 [J]. Advances in Water Science,2021,32(2):230 – 241.

[43] Chaudhry M H. Open – channel flow[M]. New York:Springer, 2008.

[44] Jilan S,Kangshan W. Changjiang River plume and suspended sediment transport in Hangzhou Bay[J]. Continental Shelf Research, 1989,9(1):93 – 111.

[45] Xie D,Pan C,Wu X,et al. The variations of sediment transport patterns in the outer Changjiang Estuary and Hangzhou Bay over the last 30 years[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans, 2017,122(4):2999 – 3020.

[46] 叶 翔,王爱军,马 牧,等. 高强度人类活动对泉州湾滨海湿地环境的影响及其对策[J]. 海洋科学,2016,40(1):94 – 100.

Ye X,Wang A J,Ma M,et al. Effects of high – intensity human activities on the environment variations of coastal wetland in the Quanzhou Bay,China[J]. Marine Sciences,2016,40(1):94 – 100.

[47] Shahtahmassebi A R,Wu C,Blackburn G A,et al. How do modern transportation projects impact on development of impervious surfaces via new urban area and urban intensification? Evidence from Hangzhou Bay Bridge,China[J]. Land Use Policy,2018,77:479 – 497.

[48] Tian P,Li J,Cao L,et al. Impacts of reclamation derived land use changes on ecosystem services in a typical gulf of eastern China:A case study of Hangzhou bay[J]. Ecological Indicators,2021,132: 108259.

Information extraction and spatio – temporal evolution analysis
of the coastline in Hangzhou Bay based on Google Earth
Engine and remote sensing technology

ZHU Lin¹, HUANG Yuling¹, YANG Gang¹, SUN Weiwei¹, CHEN Chao², HUANG Ke¹

(1. Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. School of Geography Science and Geomatics Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The continuous monitoring of the dynamic changes in coastlines is crucial to ascertaining the change patterns and evolution characteristics of coastlines. Long – time – series coastline datasets allow for the detailed description of the dynamic changes in coastlines from the spatio – temporal dimensions and further reflect the effects of human activities and natural factors on coastal areas. Therefore, they are conducive to the scientific management and sustainable development of the spatial resources in coastal wetlands. Based on the Google Earth Engine (GEE), this study analyzed the change in the coastline of Hangzhou Bay during 1990—2019 based on long – time – series Landsat TM/ETM + /OLI images. Using the pixel – level modified normalized difference water index (MNDWI) time series reconstruction technology, this study achieved the automatic information extraction of long – time – series coastlines and the analysis of spatio – temporal changes by combining the Otsu algorithm threshold segmentation and the Digital Shoreline Analysis System. The results show that the total coastline length of Hangzhou Bay increased by about 20.69 km during 1990—2019, corresponding to an increase in the land area by about 764.81 km², with an average annual increase rate of 0.35%. In addition, the average end point rate (EPR) and linear regression rate (LRR) of the coastline were 110.07 m/a and 119.06 m/a, respectively. The analysis of the spatio – temporal evolution of the coastline in Hangzhou Bay over 30 years will provide a basis for the sustainable development and comprehensive management of resources along the coastline in Hangzhou Bay.

Keywords: coastline; Hangzhou Bay; Google Earth Engine; spatio – temporal evolution

(责任编辑: 陈 理)