Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2019.06.013

基于淤涨速率的潮滩围垦适宜性评价

梅亚萍[1]，蔡廷禄[2]，王欣凯[2]，夏小明[2]，贾建军[1]
（1. 华东师范大学 河口海岸科学研究院，上海 200241；
2. 自然资源部第二海洋研究所 国家海岛开发与管理研究中心，浙江 杭州 310012）

摘 要：潮滩既具有重要的生态服务功能，亦是潜在的土地资源。过去几十年来，中国沿海潮间带的开发以围垦为主要驱动力，表现为海岸线主体向海推进。随着围垦规模和速度加快加大，出现了一系列生态、环境及土地利用问题，因此对于围垦适宜性的研究具有现实意义。本文以浙江省为例，利用遥感技术首先获取了大陆海岸线阶段性变化特征。接着从地貌均衡的角度，依据潮滩垂向淤涨速率和垂直岸线的潮滩剖面形态估算适宜的潮滩围垦速率。最后，比较海岸线实际推进速率与估算所得的围垦适宜速率，进行围垦适宜性分级评价。研究表明，1985-2015 年间，围垦活动是浙江省大陆海岸线向海推进的主要原因。从时间进程来看，1985-1995 年浙江省大陆海岸线向海推进缓慢，受围垦活动影响较小；1995-2015 年间围垦活动频繁，人工岸线比例增加较多。围垦适宜速率的估算显示，杭州湾南岸围垦 1 km 后所需恢复时间最短，围垦适宜速率为 12.5~64.3 m/a，其次为象山港和台州湾，围垦适宜速率分别为 2.0~38.3 m/a 和 6.0~22.2 m/a；三门湾和温州湾围垦后所需恢复时间最长，围垦适宜速率分别为 1.2~18.5 m/a 和 1.7~3.8 m/a。基于潮滩淤涨速率的围垦适宜性评价表明，1985-2015 年间，浙江省主要围垦区域中围垦速率过快的是三门湾的下洋涂、蛇蟠岛和温州湾岸段，围垦速率较快区域为杭州湾南岸庵东浅滩部分岸段和象山港的莼湖镇、涂茨镇岸段以及台州湾的南洋涂，围垦速率略快的是庵东浅滩以及台州湾的北洋涂，围垦速率适宜的岸段仅有象山港的高湖塘和蒲门村岸段。浙江省过去 30 年的围垦进程和岸线变化启示，围垦活动应充分考虑潮滩环境的地貌动力均衡和自然恢复潜力。

关键词：潮滩；剖面地形；淤涨速率；围垦
中图分类号：P748 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-6932(2019)06-0707-12

Evaluation on the suitability of mud flat reclamation based on intertidal morphodynamics

MEI Ya-ping[1], CAI Ting-lu[2], WANG Xin-kai[2], XIA Xiao-ming[2], JIA Jian-jun[1]
(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China;
2. State Research Centre for Island Exploitation and Management, Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The mud flat as potential land resource, has important ecological service function. In the past decades, reclamation has been the main driving force for the development of intertidal zones along the coast of China, which resulting in the coastline progressing towards the sea. With the increase of reclamation size and speed, a series of ecological, environmental and land-use problems appear, so it is of practical significance for the study of reclamation suitability. Taking Zhejiang Province as an example, this paper firstly collected the change characteristics of the mainland coastline between 1985 and 2015 by using remote sensing technology. Then, from the perspective of geomorphological equilibrium, the feasible reclamation rate of tidal flat is estimated according to the vertical siltation rate of tidal flat and the tidal profile shape of vertical shoreline. Finally, the propelling speed of coastline was compared with the estimated feasible reclamation rate, and the reclamation suitability was graded. The results show that reclamation is the main reason for the coastline of Zhejiang Province to move towards the sea from 1985 and 2015. In terms of time, during 1985 to 1995, the coastline of Zhejiang

收稿日期：2019-07-14；修订日期：2019-09-09
基金项目：国家自然科学基金（41876092）。
作者简介：梅亚萍（1994-），硕士研究生，主要从事河口海岸空间资源管理的支撑技术研究。电子邮箱：51173904006@stu.ecnu.edu.cn。
通讯作者：贾建军，博士，研究员，主要从事海洋沉积动力过程及其地貌效应与沉积记录研究。电子邮箱：jjjia@sklec.ecnu.edu.cn。

mainland pushed slowly toward the sea and was less affected by reclamation activities. During 1995 to 2015, reclamation activities were frequent, and the proportion of artificial coastline increased. The estimation of the reclamation feasible rate shows that the recovery time of the south coast of Hangzhou Bay is the shortest after 1 km reclamation. The feasible reclamation rate of south coast of Hangzhou Bay is 12.5~64.3 m/a, followed by Xiangshan Harbour and Taizhou Bay which feasible reclamation rates are 2.0~38.3 m/a and 6.0~22.2 m/a. Sanmen Bay and Wenzhou Bay need the longest recovery time after reclamation, and the feasible reclamation rates are 1.2~18.5 m/a and 1.7~3.8 m/a respectively. The evaluation on the suitability of mud flat reclamation based on intertidal morphodynamics shows that from 1985 to 2015, in the main reclamation areas of Zhejiang Province, the areas with excessive reclamation rate are Sanmen Bay, Shepan Island and Wenzhou Bay, and the areas with relatively fast reclamation rate are part of Andong tidal flats in the Southern Coast of Hangzhou Bay and Chunhu Town, Tuci Town in Xiangshan Port, and Nanyang tidal flats in Taizhou Bay. The areas with slightly faster reclamation rate are Andong tidal flats and Beiyang tidal flats in Taizhou Bay, while only the reclamation rate of Gaohutang and Pumencun are feasible. Enlightenment from the reclamation process and coastline changes in Zhejiang Province during past 30 years indicates that reclamation activities should take full account of the geomorphological dynamic balance and the potential of natural restoration of tidal flat environment.

Keywords: tidal flat; intertidal morphodynamics; accretion rate; reclamation

潮滩具有重要的生态服务功能，是潜在的土地资源，因而潮间带围垦是沿海国家和地区用于缓解人地矛盾的主要方式。荷兰有近 800 年的围海造地历史，累计围海造地约 9 000 km^2，相当于该国陆域总面积的 1/4（黄日富，2006；李荣军，2006）。日本、英国和韩国等国家和地区也进行了大量的海域围垦（Trewartha，1950；Pethick，2002；Moores et al，2016）。我国围垦历史悠久，为沿岸地区开发提供了空间资源的支撑服务。适度的围垦需要在人类对土地的需求和自然岸滩演化之间取得微妙的平衡，过度的围垦会对海岸系统产生强烈扰动，对海岸带的沉积动力过程、物质循环以及生态系统都会产生影响（李加林 等，2007）。在沉积物来源稳定的情况下，淤泥质潮滩的岸滩动态表现为垂向上的淤高和水平方向上的扩展；围垦之后假以时日，围堤前的潮滩会逐渐恢复至原来的高度和宽度，因而选择与潮滩淤涨速度相适宜的围垦速率对于潮滩的自然恢复以及制定潮滩规划和保护策略有着重要的意义。

遥感技术具有宏观、快速、综合、高频、动态和成本低等优势，被广泛运用于研究海岸滩涂促淤围垦以及海岸线变迁和滩涂面积演变（Alesheikh et al，2007）。国内外大量研究运用遥感技术在海岸线的动态监测（Hilary et al，2002；Mujabar et al，2013）和围垦过程（廖甜 等，2016；王志明 等，2011；徐俊杰 等 2011）等方面取得了很好的研究成果，在围垦适宜性方面主要应用多目标适宜性（王繁 等，2008）及关联分析和系统聚类结合方法（赵国峰 等，2008）进行评价，但未能从人类活动（围垦）与自然演变相宜的角度来评价围垦合理性和适宜性。本文基于实测数据、收集资料及 RS 技术获取浙江省大陆海岸线信息和主要围垦区淤泥质潮滩的剖面形态及潮滩沉积速率，利用 GIS 技术分析由于围垦带来的岸线推进速率，尝试从潮滩淤涨平衡的视角分析潮滩围垦的适宜性，以期对于围垦的合理性以及科学性提出评价和建议。

1 研究区域概况

浙江省位于长江三角洲南翼，海域面积 4.44 万 km^2，滩涂面积约 2 300 km^2，岸线总长 6 910 km，其中大陆岸线长 2 200 km，境内自北向南有苕溪（属太湖流域）、运河（属太湖流域）、钱塘江、曹娥江、甬江、椒江、瓯江、飞云江、鳌江等九大水系，以及众多的独流入海和注入邻省的小河流，钱塘江等七大水系多年平均入海泥沙约为 1 200 万吨，不过，长江入海泥沙仍然是浙江沿海滩涂淤积的主要物源（夏小明 等，2011）。受季风影响，浙江海区波浪秋冬大、春夏小，远岸海区波高明显大于近岸海区，近海潮汐类型基本为正规半日潮，沿海潮流主要是不规则半日浅海潮流。浙江近海是我国的强潮海区之一，杭州湾、三门湾、乐清湾、温州湾等港湾区平均潮差均超过 4 m，钱塘江口至澉浦岸段甚至增至 5.58 m（夏小明 等，2011）。

浙江省基岩海岸与淤泥质海岸相间发育，其中粉砂淤泥质潮滩广泛分布（图 1）。根据《浙江省滩涂围垦总体规划（2005–2020）》资料，20 世纪 50 年代以来，围涂的速度和规模都达到了前所未有的程度，1949–2004 年，全省共围垦海涂1 880 km²，并计划在 2020 年之前新围垦 1 280 km²。随着围垦规模和速度加大加快，出现了海水倒灌、城市内涝、生物多样性丧失等一系列问题（李加林 等，2007），而已围垦范围的土地利用效率也不尽如人意。在这样的背景下，进行围垦适宜性的研究变得极为紧迫且具有其现实意义。

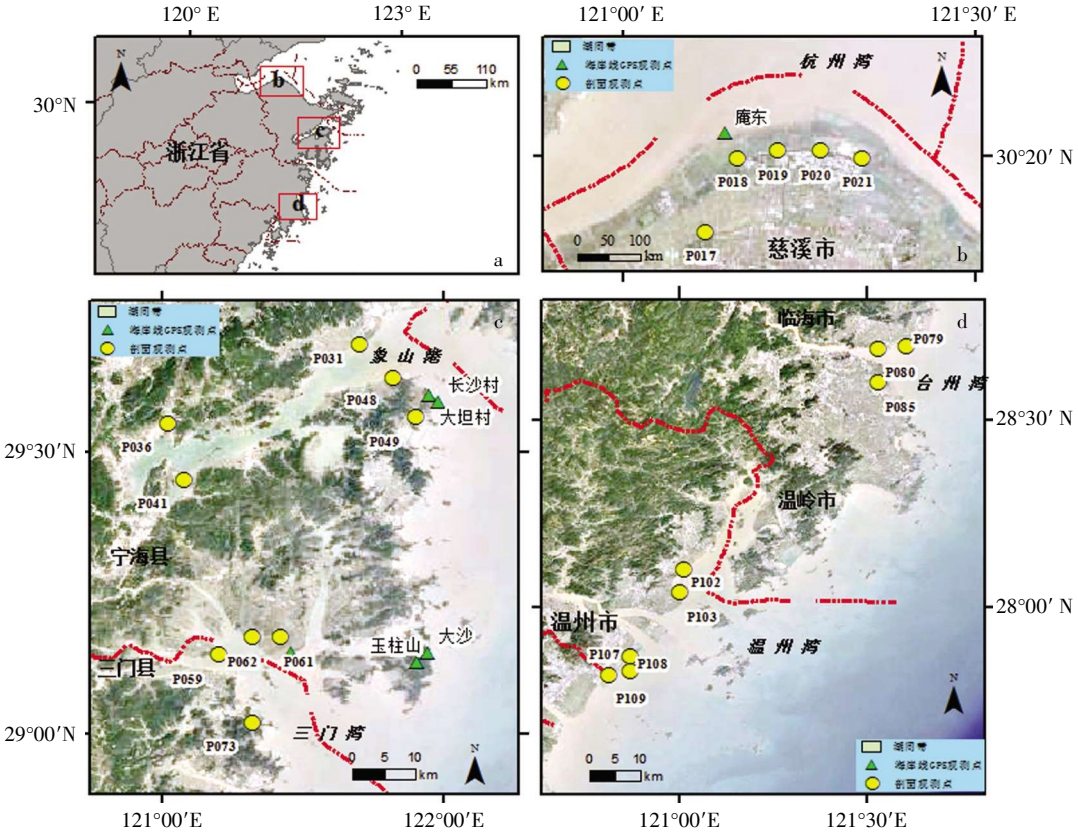

图 1　研究区域（a）及观测站位分布（b. 杭州湾南岸；c. 象山港及三门湾；d. 台州湾及温州湾）

2　材料与方法

2.1　资料来源

2.1.1　沉积速率及剖面数据

本文收集了 908 专项浙江省海岸带调查的资料（夏小明 等，2011）及有关文献（夏小明 等，1997；韩震 等，2003），获得了庵东浅滩、象山港、三门湾、台州湾、温州湾等地潮间带 23 站的现代沉积速率；同时收集了 908 专项浙江省海岸带调查的潮间带剖面地形测量资料，选择与沉积速率站位相近的 22 个剖面用于分析，典型潮间带剖面形态如图 2 所示。

2018 年 10 月 17 日–2018 年 10 月 25 日，在慈溪市庵东浅滩，象山县大坦村、长沙村、大沙村沙滩和玉柱山海塘，宁海县下洋涂等六地进行海岸线实地测量，实测岸线类型包括人工岸线（海塘）、砂砾质岸线和基岩岸线，用来评估 RS 数字化海岸线的质量。使用中海达 Q5 差分 GPS 定位，定位精度优于 1 m，共获取 GPS 实测数据点 278个，实测六段岸线总长 2 307 m。剖面调查区域站位及海岸线位置采集地点如图 1(b)、(c)、(d)所示。

2.1.2　岸线数据来源

Google Earth（GE）是结合卫星照片、航空照相和 GIS 三种功能的三维地球模型，通过将多幅卫星地图拼接并进行颜色、对比度等色阶处理，将卫星切割成多个层级、矩形区域最后再叠加处理，就可使用户在线浏览多时相遥感影像并提取岸线，不

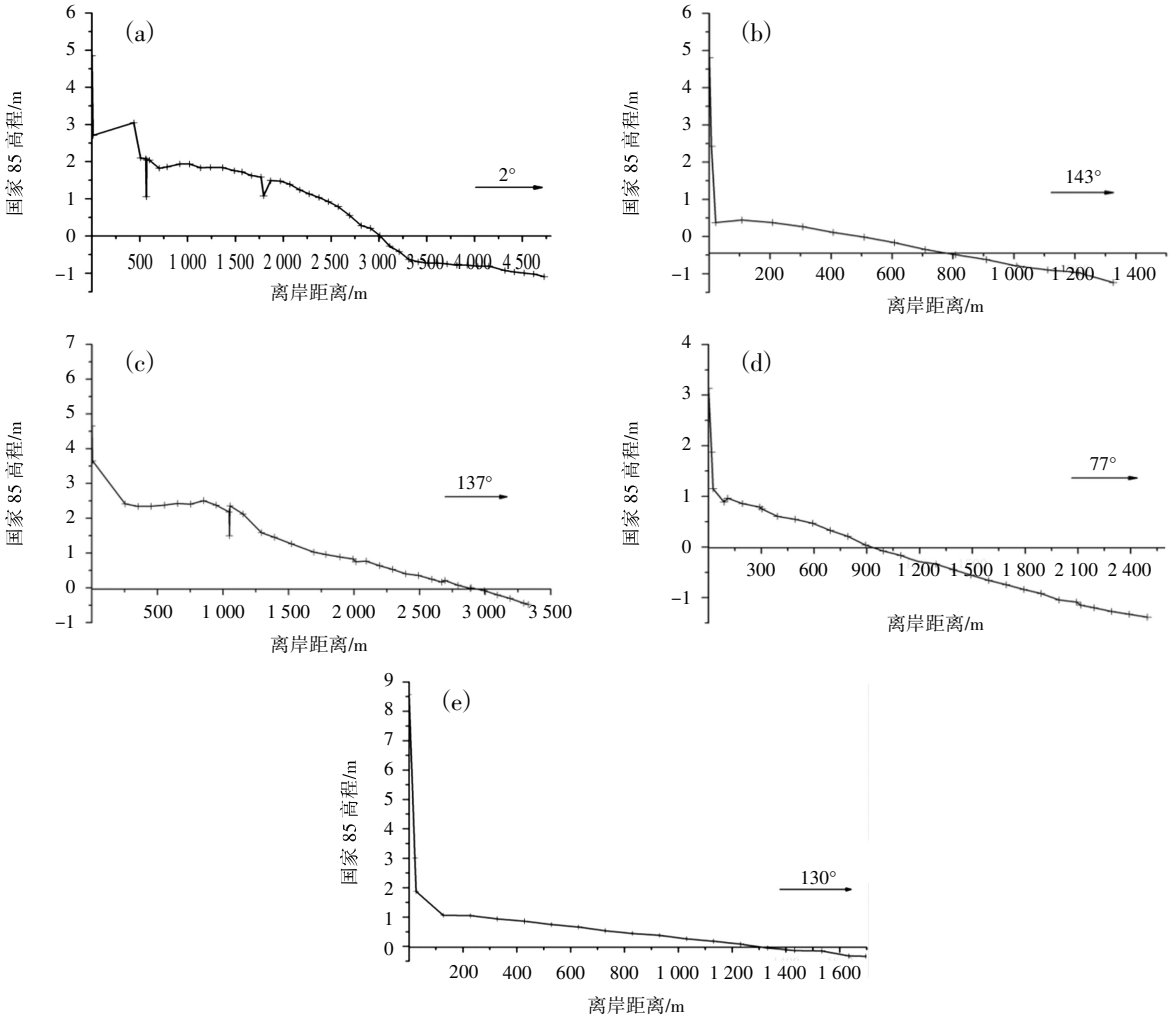

图 2 浙江省典型潮间带剖面图（夏小明 等，2011）

（a）杭州湾南岸（P019 剖面）；（b）象山港（P049 剖面）；（c）三门湾（P061 剖面）；（d）台州湾（P085 剖面）；（e）温州湾（P109 剖面）

同年份使用的大地坐标系均为 WGS 84 坐标系。本研究所使用的浙江省大陆海岸线数据来源于 GE 1985 年、1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年以及 2015 年的遥感影像，在数字化时将视域比例尺统一设置为 1：1000。各期遥感影像的来源及空间分辨率见表 1（张世富，2013）。

2.2 海岸线提取方法与技术

2.2.1 海岸线定义及分类

海岸线是陆地和海洋的分界线，受到地质、水文、气候和植被等多种因素影响，所有这些因素使得海陆分界位置始终处于动态变化之中（Moore，2000；Doody，2004）。我国各种辞书、国家标准和行业规范多采用高潮位时海陆分界线作为海岸线，例如，现行国家标准《海洋学术语·海洋地质学》将海岸线定义为“多年大潮平均高潮位时海陆分界痕迹线”（GB/T 18190–2017）。依据《浙江省地方标准——海岸线调查统计技术规范》（DB33/T 2106–2018）和有关技术规程，本文将海岸线定义为“平均大潮高潮时水陆分界的痕迹线”。结合海岸线的自然属性及开发情况，本文将海岸线分为自然岸线、人工岸线和河口岸线。

2.2.2 目视解译原则

与传统海岸线现场测量相比，基于遥感影像并建立海岸线解译标志能够在提取海岸线细节方面更加合理和高效（Boak et al，2005；孙伟富 等，2011），在分析较长岸线的时空变化时，由于潮情对岸线的影响南北差异较大，采用建立目视解译标志库的方法对海岸线进行提取（高义 等，2013）。

表 1　各期遥感影像参数

影像获取时期	卫星来源	多光谱影像分辨率/m
1985/05/20	Landsat 5 TM	30
1990/07/31	Landsat 5 TM	30
1995/12/05	Landsat 5 TM	30
2000/03/10	Landsat 7 ETM+	30
2005/04/22	QuickBird	2.44
2010/06/10	Worldview-2	1.8
2015/08/12	Worldview-3	1.24

本文参考 908 专项有关技术规程（国家海洋局 908 专项办公室，2005）及以往研究（刘善伟 等，2011；Woodroffe，2013），提取海岸线时遵循以下原则：在遥感影像上，基岩海岸可以看到灰白色的礁石与海洋交界（图 3（a）、（b））；淤泥质潮滩一般向岸一侧植被较茂盛，颜色较深，向海一侧颜色较浅；砂砾质岸线位置一般定在滩脊的顶部向海一侧（图 3（c）、（d））；人工岸线一般界定在人工构筑物向海侧的海陆分界处（图 3（e）、（f））。河口岸线一般定在两岬角曲率最大处，或者在最接近海洋的防潮闸或跨河桥梁处。

2.2.3　岸线解译结果质量评估

采用基于特征点的评估方法对遥感解译岸线的质量进行评估，即按照较高精度的岸线上数据集中的岸线点至待评估岸线的垂直距离计算中误差（RMS）（刘善伟 等，2011），具体计算公式如下。

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

式中，（X_{Tj}、Y_{Tj}）为实地控制点坐标，（X_{tj}、Y_{tj}）

图 3　各类岸线的 GE 遥感影像解译判读标准及现场照片

（a）（b）浙江省宁波市象山县松兰山度假区基岩岸线；（c）（d）浙江省象山县长沙村砂砾质岸线；（e）（f）浙江省宁波市象山县玉柱山人工岸线（照片由作者拍摄于 2018 年 10 月 17 日-至 10 月 22 日浙江省海岸线考察期间）

为实地控制点在岸线数据影像上的对应点坐标，D 是较高精度的岸线点至待评估岸线的垂直距离，n 为岸线点个数。

本次野外考察实测地点之一是象山县玉柱山海塘，建于 1985 年之前，属于较稳定的岸段，能够代表多时相岸线位置，计算得到 1985–2000 年四个时相 TM 影像及 2005 年、2010 年、2015 年高清影像岸线解译结果的中误差分别为 6.9 m、6.8 m、6.0 m、5.8 m、3.5 m、3.9 m、2.9 m。另外，慈溪市庵东浅滩、象山县大坦村、长沙村、大沙村沙滩和玉柱山海塘、宁海县下洋涂等不同类型海岸线 2018 年高清影像的中误差分别为 3.3 m、3.5 m、3.0 m、3.6 m、2.8 m、3.2 m。由于在本文研究区域内，潮滩围垦导致的岸线推进速率都在 10 m/a 以上，甚至超过 100 m/a，因此基于 GE 遥感资料解译的岸线精度能够满足研究需要。

2.3 海岸线速率变化分析

本研究使用 DSAS（Digital Shoreline Analysis System）来分析浙江省近 30 年来的总体岸线变化特征和阶段性岸线变化特征，所用参数为端点速率（End Point Rate， EPR）（Dolan et al，1991）和加权线性回归速率（Weighted Linear Regression Rate，WLRR）（Kleinbaum et al，1998）。端点速率可用于计算任意两个时相之间的岸线变化速率，计算方法如公式（3）和图 5（a）所示。加权线性回归速率是对多时相岸线数据进行最小二乘法线性回归，其回归线的斜率即为加权线性回归速率，计算方法如公式（4）–（7）和图 5（b）所示。

$$EPR = \frac{D_{mj} - D_{mi}}{T_{m(i,j)}} \tag{3}$$

式中，D_{mi} 与 D_{mj} 分别为 m 剖面上 i 时相与 j 时相岸线与剖面的交点至基线的距离；$T_{m(i,j)}$为 i 时相与 j 时相的时间间隔。

$$b_m = \frac{\sum_i w_i x_i y_i - (\sum_i w_i y_i)/(\sum_i w_i)}{\sum_i w_i x_i^2 - (\sum_i w_i x_i)^2/\sum_i w_i} \tag{4}$$

$$y = a_m x + b_m \tag{5}$$

$$w_i = 1/e_i^2 \tag{6}$$

$$a_m = \frac{\sum_i w_i y_i - b_m w_i \sum_i w_i x_i}{\sum_i w_i} \tag{7}$$

式中，a_m 是 m 剖面上回归线的斜率（即加权线性回归速率），b_m 是 m 剖面上的回归线的截距，x_i 为岸线所代表时相，y_i 为 m 剖面上 i 时相岸线点与基线点间的距离（图 4（b））；w_i 为 i 时相岸线在回归计算中被赋予的权重，e_i 为 i 时相岸线的位置误差。

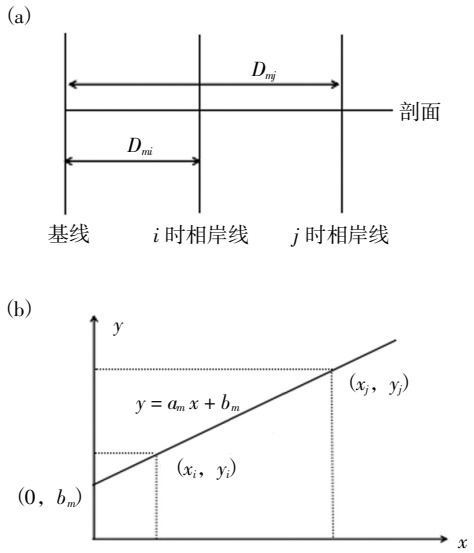

图 4 端点速率与加权线性回归速率计算示意图

（a）EPR（b）WLRR（x 轴代表 m 剖面上各岸线时相，y 轴为对应时相岸线点与基线点间的距离）

DSAS 由 Thieler 等（2009）开发，是进行海岸线变化分析的 ArcGIS 平台插件。本研究运用 DSAS 合并各时期岸线，以各时期岸线外 3 km 范围为半径生成缓冲区，将缓冲区转化成线要素即得基线，垂直于基线以 1 km 为间隔生成与各时相岸线均相交的断面，调整相交的断面，最终获得 923 条剖面线，并由北向南进行编号。

2.4 潮滩围垦适宜性分析

2.4.1 围垦适宜速率

潮滩坡度的变化取决于物质供应和水动力力条件。在沉积物来源和水动力环境稳定的情况下，淤泥质潮滩的淤涨表现为垂向上的淤高和水平方向上的扩展，因而在潮滩不断淤涨的这段时期内，可以认为沉积速率保持稳定，其剖面形态也基本保持不变（高抒 等，1988）。在理想状态下，如果每次围垦之后，潮滩都会逐渐恢复至原潮滩的高度和宽度，则恢复所需要的时间可以用公式（8）（王艳红等，2006）来估算；为了保持潮滩淤涨和围垦速率的动态平衡，潮滩围垦后恢复至原潮滩形态的速率即为围垦适宜速率，计算方法如公式（9）所示。

$$\alpha = WG/R \tag{8}$$

式中，α 为围垦后潮滩恢复地貌形态所需时间(a)；W 为所需恢复潮滩的宽度；G 为潮滩坡度；R 为滩涂平均淤涨速率。围垦适宜速率 S 可由潮滩坡度 G 和滩涂评价淤涨速率 R 导出：

$$S = W/\alpha = R/G \tag{9}$$

2.4.2　围垦适宜性评价

本文评价围垦适宜性标准的主要影响因素是潮滩围垦适宜速率和岸线实际推进速率，基于这两个因素建立评价指标关系式：

$$\gamma = S/(EPR/WLRR) \tag{10}$$

式中，γ 为评价因子。结合围垦现状，将围垦适宜性评价等级分为四级：Ⅰ级（$\gamma \geqslant 0.2$）表示围垦速率适宜，Ⅱ级（$0.1 \leqslant \gamma < 0.2$）表示围垦速率略快，Ⅲ级（$0.05 \leqslant \gamma < 0.1$）表示围垦速率较快，Ⅳ级（$\gamma < 0.05$）表示围垦速率过快；评价因子数值越大、等级数越小，表明围垦速率越适宜，反之则表明围垦速率越快。

3　结果

3.1　围垦主要区域阶段性海岸线变化特征

3.1.1　杭州湾南岸

1985–1995 年间杭州湾南岸总体岸线变化速率保持不变，部分岸段变化速率较大：位于钱塘江口的萧山岸段受大规模围垦活动影响，十年间岸线平均外移速率达到 426.8 m/a，最快速率达到 564.1 m/a（图 5（a））。

1995–2005 年间杭州湾南岸围垦规模急剧扩大，平均岸线外移速率约为前十年的三倍。沥海镇在此段时间内围垦呈现出最大速率，其他岸段例如小曹娥水库的建设使得岸线以 166.9 m/a 的速率向海推移。庵东浅滩也受围垦活动不断向外推移，平均岸线变化速率为 234.6 m/a；新浦镇、附海镇、龙山镇岸段持续围垦（图 5（b））。

2005–2015 年间杭州湾南岸几乎所有岸段都进行了不同程度的围垦：萧山岸段在这十年间再次进行了围垦；2008 年杭州湾大桥的建设带动了萧山县岸段以东的曹娥江口至庵东浅滩工业的快速发展，岸线推移也达到了前所未有的速率；新浦镇、附海镇与龙山镇在这段时间内围垦速率略为减小（图 5（c））。杭州湾南岸的人工岸线不断代替原有的粉砂淤泥质海岸并且整体向北推进（图 5（d））。

3.1.2　三门湾岸段

1985–1995 年间，由于粉砂淤泥质海岸的增长，岸线整体保持平缓地向海推移速率，平均每年向海推进 2.1 m，个别岸段的变化速率较快（图 6（a））；1995–2005 年间三门湾岸段岸线几乎没有受

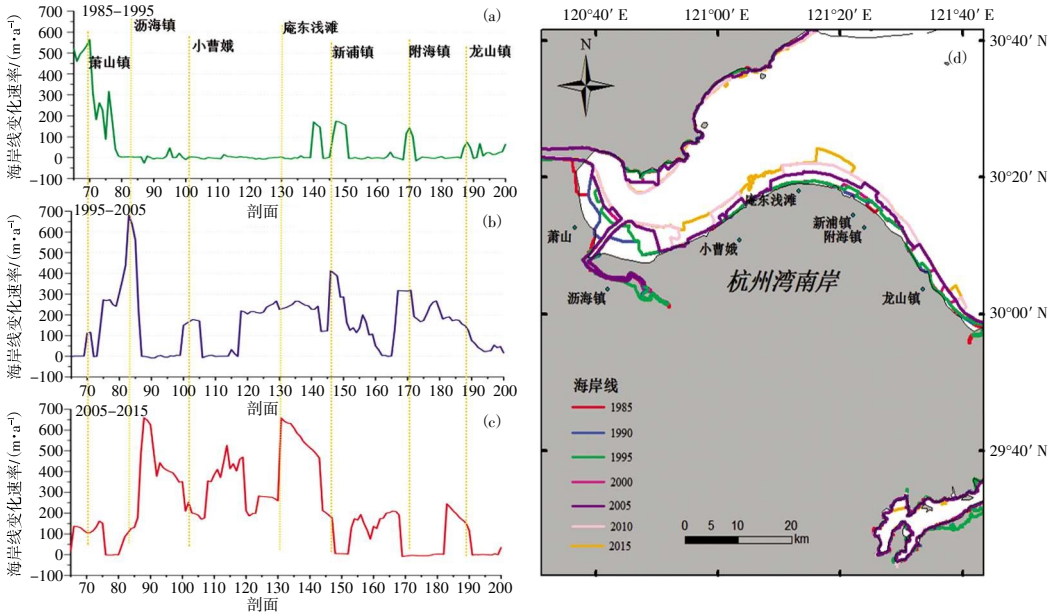

图 5　杭州湾南岸岸线阶段性变化特征图

（a）1985–1995 年间岸线推进速率；（b）1995–2005 年间岸线推进速率；（c）2005–2015 年间岸线推进速率（黄色虚线代表各岸段的剖面位置）；（d）不同时期岸线

到人类活动影响，总体还是以粉砂淤泥质海岸增长为主，平均向海推移速率大约是前 10 年的两倍。其中上长山岸段由于围垦岸线平均每年向海推移 149.2 m，其余岸段几乎没有围垦活动（图 6（b））。

2005–2015 年间三门湾主要进行了下洋涂围垦、蛇蟠岛围垦以及晏站涂围垦这三个围垦工程。下洋涂围垦工程自 2007 年启动至 2010 年合龙，堤线总长 17.3 km，南侧与三门县隔海相望，总共向海推移 4.1 km，是三门湾规模最大的围垦工程，目前用于农业发展；蛇蟠岛围垦规模位于其次，大陆岸线平均每年向蛇蟠岛推移 405.2 m 直至与蛇蟠岛相连，使其岸线成为大陆岸线，旅游业和农业结合发展；晏站涂围垦于 2003 年启动至 2008 年完工，堤线总长 0.8 km，岸线平均每年向海推进 356.2 m 直至与花鼓漫岛连成一体（图 6（c））。三门湾海岸线在 2005–2015 年间，三门湾、蛇蟠岛以及晏站涂围垦活动明显（图 6（d））。

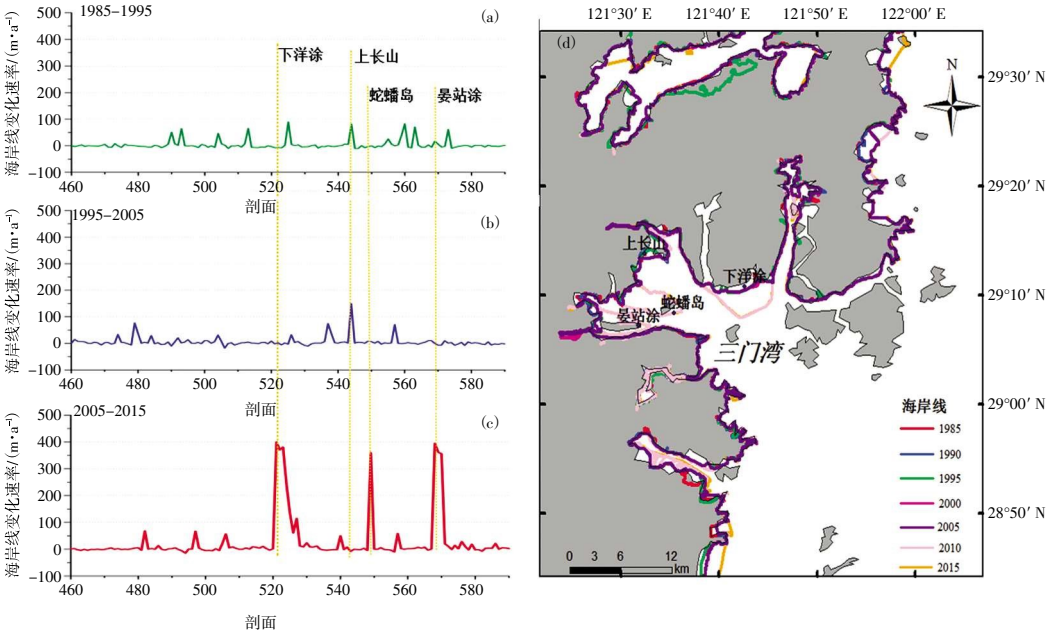

图 6 三门湾岸线阶段性变化示意图

（a）1985–1995 年间岸线推进速率；（b）1995–2005 年间岸线推进速率；（c）2005–2015 年间岸线推进速率（黄色虚线代表各岸段剖面位置）；（d）不同时期岸线

3.1.3 温州湾岸段

1985–1995 年间温州湾岸段平均每年向海推移 26.1 m/a，蒲岐镇、乐清市以及天河镇岸段有小规模的围垦活动，海岸线变化速率偏大，其中天河镇围垦速率较快；温州湾北岸的乐清市围垦速率位于其次，蒲岐镇最慢（图 7（a））。

1995–2005 年间温州湾围垦活动发生在乐清市和沙城镇，其余粉砂淤泥质岸段岸线向海推移速率缓慢，此段时间内温州湾与前 10 年间岸线整体平均变化速率相差不大。乐清市山环村岸段在此 10 年间向东围垦 795.5 m，沙城镇持续向东围垦，堤线长达 8 km，围垦速率为 136.5 m/a（图 7（b））。

2005–2015 年间人类活动对温州湾影响较大，温州湾岸段岸线变化速率与前 20 年相比较变化较快。蒲岐镇至乐清市岸段岸线持续向东围垦，围垦速率在此段时间内达到最大，为 142.2 m/a；温州湾南岸的沙城镇至天河镇岸段也持续向东围垦，围垦堤线长达 22 km，平均每年向海推进 162.1 m（图 7（c））。温州湾岸段在 2005–2015 年间岸线变化最为明显，主要由围垦活动导致（图 7（d））。

3.2 潮滩围垦适宜性

根据浙江省主要围垦区域的沉积速率信息和剖面信息，利用公式（8）和公式（9）可以分别得出各个区域围垦之后，堤前向海 1 km 范围内潮滩高度和宽度恢复至围垦前的自然岸滩剖面形态所需的时间以及围垦适宜速率；利用公式（10）可以计算出围垦适宜性评价因子并对结果进行分级评价。

本文结合图 8 和表 2 对于 1985–2015 年浙江

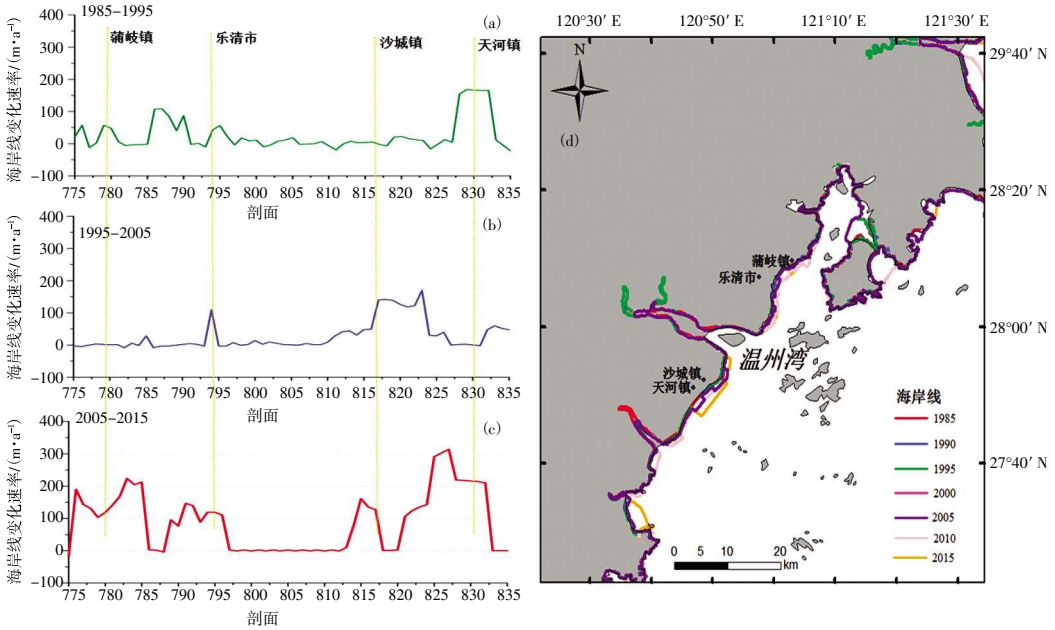

图 7　温州湾岸线阶段性变化特征图

(a) 1985–1995 年间岸线推进速率；(b) 1995–2005 年间岸线推进速率；(c) 2005–2015 年间岸线推进速率（黄色虚线代表各岸段剖面位置）；(d) 不同时期岸线

省主要围垦区域围垦速率进行评价：杭州湾南岸由于滩涂资源丰富，自 1985 年以来受大规模围垦活动影响，岸线每年向海推进 151.3 m。其中慈溪市庵东浅滩岸线的平均推进速率为 166.6 m/a，位于庵东浅滩的 P017 至 P021 站位平均围垦适宜速率为 21.7~48.3 m/a，经计算所得的评价因子为 0.08~0.34，总体上围垦速率略快，其中 P020 站位围垦速率较快。

宁波市以东的象山岸段淤泥质海岸与基岩质海岸相间分布，围垦工程大多依山而建，规模有限，因而近 30 年来平均岸线推进速度较为缓慢，为 10.7 m/a，其中位于大佳何镇的高湖塘的 P041 站位和蒲门村的 P048 站位评价因子均大于 0.2，围垦速率适宜，为 0.22~1.38 m/a。虽然象山港岸线推进速率缓慢，但是由于当地沉积速率较低，位于春晓镇的 P031 站位围垦速率较快甚至过快，位于莼湖镇的 P036 站位和涂茭镇的 P049 站位总体上围垦速率较快。

象山港以南的三门湾岸段总体保持向海推进的趋势，平均向海推进速率为 15.5 m/a。下洋涂围垦工程自 2007 年开工至 2010 年合龙，造成该地在 30年间岸线推进速率达 172.1 m/a，在此的 P061 和 P062 站位评价因子较小，围垦速率较快甚至过快；

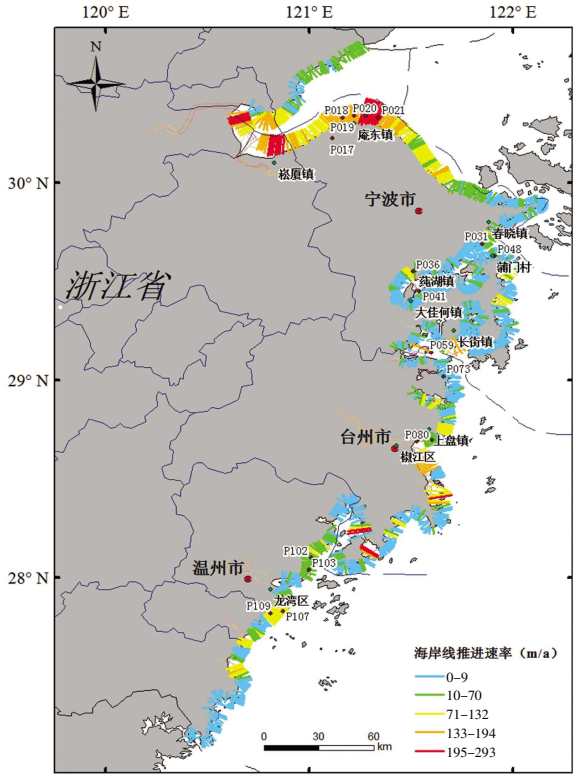

图 8　1985–2015 年浙江省大陆海岸线总体变化趋势图

蛇蟠岛围垦规模位于其次，在此的 P059 站位围垦评价因子为 0.01~0.02，其围垦速率等级属于过快。

台州湾围垦活动较频繁的是上盘镇和椒江区两岸的北洋涂、南洋涂及龙门乡岸段，其岸线外移的平均速率分别为 108.7 m/a 以及 164.3 m/a。位于北洋涂南岸的 P079 和 P080 站位因为岸线推进速率较慢，围垦速率属于适宜至略快，而南洋涂的 P085 站位相比较于前两个站位围垦速率属于略快至较快等级。

温州湾自 1985 年以来基岩质海岸不断被人工海岸代替，瓯江口两岸岸线变化最为显著，北部的岸线平均每年外移 48.3 m，南部的温州浅滩平均每年外移 121.3 m。温州湾的沉积速率在五个岸段中最慢，为 0.4~0.5 m/a，因而围垦适宜速率也较小，最快不超过 3.8 m/a，总体上温州湾的围垦速率评价等级属于过快。

表 2 浙江省主要围垦区域岸线推移情况及其围垦适宜速率

地点	潮滩测量剖面号	潮滩宽度/m	沉积速率/（cm·a^{-1}）	潮滩坡度/‰	围垦后堤前 1 km 潮滩所需恢复时间/a	围垦适宜速率/(m·a^{-1})	近 30 年来岸线推进速率/(m·a^{-1})	围垦适宜性因子(γ)	围垦适宜性评价等级
杭州湾南岸庵东浅滩	P017	1295	2.0~4.5	1.6	36~80	12.5~28.1	158.2	0.08~0.18	I–II
	P018	3885		1.0	22~50	20.0~45.0	131.1	0.15~0.34	I–II
	P019	4222		0.7	16~35	28.6~64.3	211.9	0.13~0.3	I–II
	P020	3632		0.9	20~45	22.2~50.0	293.1	0.08~0.17	II–III
	P021	2218		0.8	18~40	25.0~56.3	173.1	0.14~0.33	I–II
象山港	P031	515	0.5~2.3	2.5	105~481	2.0~9.2	149.9	0.01~0.06	III–IV
	P036	775		1.6	67~308	3.1~14.4	77.3	0.04~0.19	II–IV
	P041	556		0.6	25~115	8.3~38.3	27.8	0.3~1.38	I
	P048	578		1.7	71~327	2.9~13.5	13.4	0.22~1.01	I
	P049	1304		1.2	50~231	4.2~19.2	100.9	0.04~0.19	II–IV
三门湾	P061	3323	0.6~2.4	1.3	54~217	4.6~18.5	172.1	0.03~0.11	III–IV
	P062	856		4.1	171~683	1.5~5.9	102.1	0.01~0.06	IV
	P059	879		5.0	208~833	1.2~4.8	200.6	0.01~0.02	IV
	P073	1134		2.8	117~467	2.1~8.6	22.3	0.09~0.39	I–III
台州湾	P079	1230	2.5~4.0	4.2	105~168	6.0~9.5	61.1	0.1~0.16	II
	P080	1382		3.2	80~128	7.8~12.5	43.7	0.18~0.29	I–II
	P085	2495		1.8	45~72	13.9~22.2	180.6	0.08~0.12	II–III
温州湾	P102	1670	0.4~0.5	1.9	380~475	2.1~2.6	59.9	0.04	IV
	P103	1265		1.4	280~350	2.9~3.6	42.4	0.07~0.08	IV
	P107	716		2.4	480~600	1.7~2.1	59.3	0.03~0.04	IV
	P108	915		1.4	280~350	2.9~3.6	63.9	0.05~0.06	IV
	P109	1671		1.3	260~325	3.1~3.8	117.9	0.03	IV

4 讨论

1985–2015 年间，浙江省岸线总体保持向海推进的特征，岸线推进速率与围垦活动进程息息相关。自 1985 年以来因经济建设的需要，杭州湾南岸、象山港、三门湾、台州湾以及温州湾五个河口港湾地区滩涂资源丰富，是浙江省围垦活动主要发生区域。

1985–1995 年间，浙江省总体受围垦活动影响较少，岸线保持稳定呈缓慢淤涨的状态。局部岸段围垦活动明显，例如萧山自 1966 年开始经过历年筑堤开发建设，1986 年围垦了 34.7 km^2 的土地，大规模整治了钱塘江河口段流道，解决了人多地少的矛盾，在浙江围垦历史上具有重大意义（毛明海，2002）；1995–2015 年间是浙江省围垦相对快速的阶段，多地自然岸线被人工岸线取代，岸线结构发生了较大变化，这一时期岸线变化主要驱动因素是社会经济的发展。海塘建设工程、杭州湾跨海大桥以及养殖活动使得杭州湾南岸不断受到围垦活动影响，自然岸线急剧减少，人工岸线向北推进；三门湾分布在基岩港湾内，环境稳定，长期处于极缓慢的淤涨状态，至 2005 年开始出现下洋涂、蛇蟠岛围垦及晏站涂围垦工程使得自然岸线急剧减

少，种植业和旅游业得到了发展；温州湾也在此段时期大力发展工业，温州土地资源的紧缺使得围垦借地成为一股浪潮，洞头及瓯江口区域岸线大规模向海扩张。

浙江省潮滩资源丰富，但是基岩质海岸和岛屿众多，人多地少，土地资源十分紧缺，因此在近30 年来浙江省的围垦规模和速度都有不断扩大的趋势，在上一次围垦之后潮滩还未淤涨至原来的宽度和高度时就进行了下一次的围垦工程，各个岸段的围垦速率都远大于围垦的适宜速率，尤其是三门湾的下洋涂、蛇蟠岛区域和温州湾区域。略快、较快和过快的围垦速度打破了潮滩动力环境的平衡，可能会对沿海滩涂湿地造成不可逆转的破坏，产生了例如生态系统功能的退化以及生物栖息地丧失、海水富营养化等问题（李加林 等，2007）。本文所运用的一维围垦适宜性评价模型对于二维性质的海湾例如象山港、三门湾、乐清湾的评价应用有限，还有待进一步讨论。

淤泥质潮滩沉积速率受到水动力环境、沉积物供应以及人为因素多方面影响，近 30 年来浙江省淤泥质潮滩沉积速率主要受人为因素影响，围垦后由于水动力格局的变化造成沉积速率较围垦前会有一个很大的提高（李明亮 等，2016），沉积速率是潮滩剖面变化的决定因素（高抒 等，1988），因而围垦后潮滩宽度变窄，坡度变陡。在时间尺度上，潮滩坡度变化较沉积速率变化存在一个滞后效应且变化幅度远小于沉积速率变化幅度，导致围垦后潮滩恢复至原潮滩地貌所需时间会缩短，对于潮滩湿地的恢复和保护具有重要的生态意义。目前已有大量围垦区作为生态保护的重要区域，例如杭州湾国家湿地公园，台州玉环漩门湾湿地公园等，因而考虑到潮滩的地貌动力均衡和自然恢复潜力，围垦的速率应该被严格控制。

5　结论

基于 GE 遥感影像及目视解译方法，提取了浙江省 1985、1990、1995、2000、2005、2010、2015 年七个时像的岸线数据，利用 DSAS 海岸线分析系统得到了浙江省总体岸线变化速率和主要围垦区域岸线阶段性变化速率，并根据潮滩自然淤涨速率及岸滩剖面信息对浙江省主要围垦区域进行了围垦适宜性评价，主要结论如下。

（1）1985–2015 年间，浙江省总体岸线保持向海推进的特征，从空间格局来看，杭州湾南岸推进速率最快，为 151.3 m/a，其次是台州湾、温州湾和三门湾岸段，象山港岸段推进速率最慢，为 10.7 m/a；从时间格局来看，1985–1995 年间，岸线的变化主要以淤泥质潮滩的自然淤涨为主，个别岸段有小规模围垦活动；1995–2015 年间，全省围垦活动频繁，人工岸线不断取代自然岸线。

（2）主要围垦区域中，杭州湾南岸围垦 1 km 后所需恢复时间最短，围垦适宜速率为 12.5~64.3 m/a，其次为象山港和台州湾，围垦适宜速率分别为 2.0~38.3 m/a 和 6.0~22.2 m/a，三门湾和温州湾围垦后所需恢复时间最长，围垦适宜速率分别为 1.2~18.5 m/a 和 1.7~3.8 m/a。

（3）1985–2015 年浙江省主要围垦区域中：围垦速率过快的区域是三门湾的下洋涂、蛇蟠岛和温州湾等岸段，围垦速率较快区域为杭州湾南岸庵东浅滩部分岸段和象山港的莼湖镇、涂茨镇岸段以及台州湾的南洋涂，围垦速率略快的是庵东浅滩以及台州湾的北洋涂，围垦速率适宜的岸段仅有象山港的高湖塘和蒲门村岸段。略快、较快和过快的围垦速度打破了潮滩地貌动力的均衡，容易对生态环境造成不可逆转的影响，应当被严格控制。

致谢：时连强、刘毅飞、王宁、薛彬等人进行了浙江省 908 岸线调查，薛成凤、杨照祥、魏东运等人协助了海岸线现场验证工作，在论文写作中与赵培培进行了有益讨论，谨致谢忱。

参　考　文　献

Alesheikh A A, Ghorbanali A, Nouri N, 2007. Coastline Change Detection Using Remote Sensing. International Journal of Environmental Science & Technology, 4(1): 61–66.

Boak E H, Turner I L, 2005. Shoreline Definition and Detection: A Review. Journal of CoastalResearch, 21(4): 688–703.

Doody J P. ‘Coastal Squeeze’–An Historical Perspective. Journal of Coastal Conservation, 2004,10(1): 129–138.

Dolan R, Fenster M S, Holme S J, 1991. Temporal Analysis of Shoreline Recession and Accretion. Journal of Coastal Research, 7 (3): 723–744.

Kleinbaum, Kupper D G, Lawrence L, 1998. Applied Regression Analysis and Multivariable Methods. Technometrics, 31(1):117–118.

Moore L J, 2000. Shoreline Mapping Techniques. Journal of Coastal

Research, 16(1): 111–124.

Moores N, Rogers K DI, Rogers, Hansbro P M, 2016. Reclamation of tidal flats and shorebird declines in Saemangeum and elsewhere in the Republic of Korea. Emu,116(2):136–146.

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

Pethick J, 2002. Estuarine and Tidal Wetland Restoration in the United Kingdom: Policy Versus Practice. Restoration Ecology, 10 (3): 431–437.

Stockdon H F, Jr A H S, List J H, et al, 2002. Estimation of Shoreline Position and Change Using Airborne Topographic Lidar Data. Journal of Coastal Research, 18(3), 502–513.

Thieler E R, Himmelstoss E A, Zichichi J L, et al, 2009. The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 –An ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change.

Trewartha G T, 1950. Land Reform and Land Reclamation in Japan. Geographical Review, 40(3): 376–396.

Woodroffe C D, 2013. Historical area and shoreline change of reef islands around Tarawa Atoll, Kiribati. Sustain Sci, 8, 345–362.

高抒, 朱大奎, 1988. 江苏淤泥质海岸剖面的初步研究. 南京大学学报(自然科学版), 24(1): 75–84.

高义, 王辉, 苏奋振, 等, 2013. 我国大陆海岸线近 30 a 时空变化分析. 海洋学报, 35(6): 31–42.

国家海洋局 908 专项办公室, 2005. 海岛海岸带卫星遥感调查技术规程. 北京: 海洋出版社.

韩震, 恽才兴, 蒋雪中, 等, 2003. 温州地区淤泥质潮滩冲淤遥感反演研究. 地理与地理信息科学, 19(6): 31–34.

黄日富, 2006. 荷兰围海拦海工程考察的启示. 南方国土资源, (6): 18–21.

李加林, 杨晓平, 童亿勤, 2007. 潮滩围垦对海岸环境的影响研究进展. 地理科学进展, 26(2): 43–51.

李明亮, 杨磊, 龚绪龙, 等, 2016. 围垦工程影响下的淤涨型潮滩演化: 以江苏弶港潮滩为例. 海洋通报, 35(6): 683–693.

李荣军, 2006. 荷兰围海造地的启示. 海洋开发与管理, (3): 31–34.

廖甜, 蔡廷禄, 刘毅飞, 等, 2016. 近 100a 来浙江大陆海岸线时空变化特征. 海洋学研究, 34(3): 25–33.

刘善伟, 张杰, 马毅, 等, 2011. 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, 26(5): 613–618.

毛明海, 2002. 杭州湾萧山围垦区环境变化和土地集约利用研究. 经济地理(s1): 97–101.

孙伟富, 马毅, 张杰, 等, 2011. 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, (3): 41–44.

王繁, 裘江海, 周斌, 等, 2008. 基于 GIS 的海涂围垦区土地资源多目标适宜性评价研究. 土壤通报, 39(2): 218–222.

王艳红, 温永宁, 王建, 等, 2006. 海岸滩涂围垦的适宜速度研究——以江苏淤泥质海岸为例. 海洋通报(英文版), 25(2): 66–73.

王志明, 李秉柏, 严海兵,等, 2011. 近 20 年江苏省海岸线和滩涂面积变化的遥感监测. 江苏农业科学, 39(6): 555–557.

夏小明, 等, 2011. 浙江省海岸带调查研究报告. 国家海洋局第二海洋研究所.

夏小明, 谢钦春, 李炎, 等, 1997. 港湾淤泥质潮滩的周期变化. 海洋学报(中文版), (4): 99–108.

徐俊杰, 陈勇, 2011. 基于 RS 与 GIS 的南汇东滩围垦研究. 上海国土资源, 32(3): 18–22.

张世富, 2013. 基于 Google Earth 的高分辨率影像获取方法探讨. 电子技术, (12): 16–18.

赵国锋, 宋希杰, 成立, 2016. 基于关联分析和系统聚类的滩涂围垦适宜性评价. 灌溉排水学报, (6): 93–97.

浙江省质量技术监督局, 2018. 浙江省地方标准——海岸线调查统计技术规范: DB33/T 2016–2018.

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准经管理委员会, 2017. 海洋学术语·海洋地质学 GB/T 18190–2017.

（本文编辑：袁泽轶）