

浙江三门湾湿地遥感时间序列演变分析

刘永超^{1,2,3}, 李加林^{1,2,3}, 王新新⁴, 何改丽⁵, 李东霖⁶,
赵赛帅⁷, 赵冰雪⁵, 孙超^{1,2,3}

(1. 宁波大学地理与空间信息技术系, 宁波 315211; 2. 浙江省新型重点专业智库宁波大学东海战略研究院, 宁波 315211; 3. 宁波陆海国土空间利用与治理协同创新中心, 宁波 315211; 4. 复旦大学生物多样性与生态工程教育部重点实验室, 上海 200438; 5. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 6. 宁波市发展规划研究院, 宁波 315040; 7. 宁波市测绘和遥感技术研究院, 宁波 315042)

摘要: 海湾湿地演变的时空特征分析, 对明晰海湾资源环境基底、了解综合开发潜力, 促进湾区可持续发展具有重要意义。以浙江三门湾湿地为研究区, 利用 1984—2019 年 Landsat TM/ETM+/OLI 遥感影像数据, 基于湿地地物光谱指数时间序列变化特征, 对三门湾湿地信息进行提取并分析了其动态变化。结果表明: 1984 年以来三门湾湿地面积变化显著, 主要位于宁海县南部、三门县东北部以及象山县西南部地区; 从海湾面积变化趋势看, 1984—2002 年呈波动下降趋势, 2003—2009 年呈加速下降趋势, 2010—2019 年则呈平稳发展趋势。围填海等人类活动导致海湾形态变化显著, 海岸带管理政策的供给过程变化成为海湾湿地演变的重要因素之一。研究可为后围填海时代湾区建设与海湾可持续发展提供决策支持。

关键词: Landsat 影像; 时间序列; 潮滩; 盐沼; 围垦; 动态监测; 浙江三门湾

海湾是深入陆地的重要海岸带区域^[1], 其湿地包括潮滩(不长植被的光滩)和植被(以盐沼植被为主)以及湾内海水, 是滨海地区特有的战略和生态空间^[2,3]。一般而言, 依托海湾会在地理单元意义上产生经济集群中心^[4], 如中国粤港澳大湾区和美国旧金山湾等。但在全球变暖、海平面上升和人类活动加剧影响下^[5,6], 海湾形态和生态系统变得更加敏感和脆弱。特别是围垦^[6]、养殖^[7]、互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel.)引种^[8]等人类活动, 重塑了海湾区域的地形结构^[9], 改变了湿地沉积动力环境的均衡态^[10]。因此, 分析人类活动影响下海湾湿地演变的时空分异特征, 对保育海湾湿地资源和湾区科学建设管理尤为必要。

传统野外调查能够获取高精度和第一手信息, 但潮滩宽阔、滩面泥泞、滩浅水急等, 使得常规野外调查条件恶劣, 工作难度很大, 仅能获取短期内、可达区域、小范围的湿地信息, 难以应用于长期、动态、大范围湿地演化监测^[11]。遥感技术具有大范围、长时间、快速、动态观测等优势, 可规避野外调查数据获取匮乏等难点^[12], 已有海湾研究较多关注岸线^[13,14]和形态变化^[1,2]、景观格局演变^[13]、围填海过程^[15]、开发利用强度^[16,17]、

收稿日期: 2020-09-20; 修订日期: 2021-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41976209, 41901121); 浙江省省属高校基本科研业务费专项资金(SJWY2022012)

作者简介: 刘永超(1990-), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 助理研究员, 研究方向为海岸带资源环境演变。

E-mail: lycgeo@163.com

通讯作者: 李加林(1973-), 男, 浙江台州人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为海岸带资源开发与规划管理。

E-mail: nbnj2001@163.com

水动力环境^[18]及资源开发的生态效应^[19,20]等内容。然而,针对长时间尺度下,提取及重构湿地变化信息的相关研究仍有待深入。此外,卫星遥感数据的增多和地理分析平台的发展^[21](如Google Earth Engine, GEE),促使地表过程的监测从多时相格局的描述,向持续格局的刻画方向发展,也为海湾湿地演化过程的连续监测提供了可能^[11,22]。

浙江省地处中国大陆海岸中部,位置优越、岸线曲折、资源丰富,半封闭淤泥质海湾相间分布。在长期陆海相互作用影响下,三门湾形成了完整而独特的海湾湿地生态系统,是浙江重要的半封闭港湾之一。随着2018年《浙江省大湾区建设行动计划》正式发布,三门湾生态规划和区域可持续发展有了更高要求。同时,海湾湿地演变研究也是落实国家适应气候变化战略,推动滨海可持续发展的重大需求。基于此,本文以浙江三门湾湿地为研究区,以时间序列Landsat系列遥感影像为数据源,剖析1984年以来围填海等人类活动影响下海湾湿地演变的时空特征,以期为三门湾湿地保护与开发研究提供基础数据,为我国其他海湾可持续发展提供决策支持。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

三门湾位于浙江省大陆海岸带中部,地处我国大陆海岸线和长江黄金水道“T”型交汇处,是西北—东南走向的大型半封闭海湾。三面环陆,沿岸多低山丘陵分布,舌状滩地与潮汐汊道相向排列;属于亚热带季风湿润气候区,四季分明,年平均降水量为1372~1650 mm,潮汐为正规半日潮^[20];湾内滩涂、岸线、渔业等资源丰富,水产养殖等海洋产业发达,区位优势明显。三门湾核心区包括宁波市的宁海县和象山县,以及台州市的三门县(图1)。大湾区联动发展是三省发展的机遇和优势;作为长三角南翼环杭州

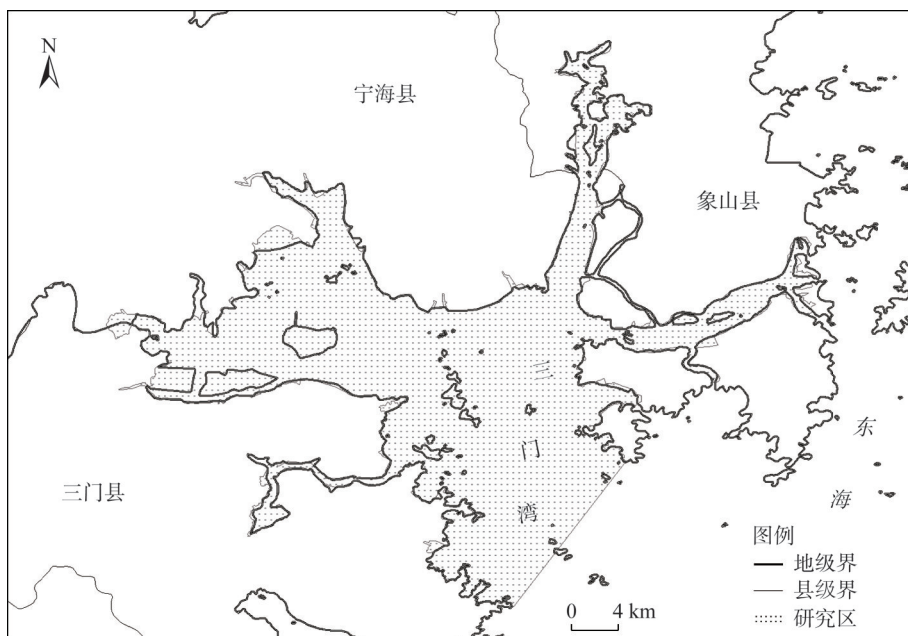


图1 研究区范围

Fig. 1 The scope of the study area (Sanmen Bay)

湾经济区和温台产业带的重要节点,三门湾紧邻国际主航道,腹地广阔,是浙江对外开放的前沿地带之一。

1.2 数据来源及处理

研究以 Landsat TM/ETM+/OLI 遥感影像为数据源,影像行列号为 118-40,空间分辨率为 30 m;共计处理 1984—2019 年可用的 Landsat 影像 1442 景,其中包括 Landsat TM 影像 613 景, Landsat ETM+ 影像 520 景,以及 Landsat OLI 影像 309 景(图 2),并采用 QA 质量评价波段去除云和阴影等无效观测,在 GEE 云平台完成影像处理与分析。顾及研究时段内早期数据较少的实际,研究在执行地物信息提取算法过程中,采用三个年份为间隔,即 1984—1986 年、1987—1989 年、1990—1992 年、1993—1995 年、1996—1998 年、1999—2001 年、2002—2004 年、2005—2007 年、2008—2010 年、2011—2013 年、2014—2016 年和 2017—2019 年。

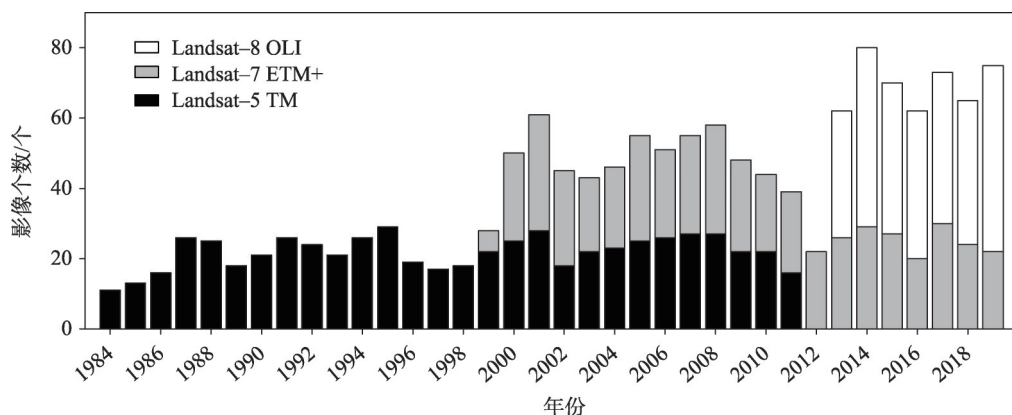


图2 Landsat 遥感影像数据统计

Fig. 2 The statistics of Landsat images

为便于数据处理,依据三门湾野外工作经验和三个间隔年份内海岸线变化幅度较小实际,选取间隔的中间年份,即1985年、1988年、1991年、1994年、1997年、2000年、2003年、2006年、2009年、2012年、2015年和2018年高质量影像,进行假彩色合成;并根据海湾地物纹理和形态等信息,借助Google Earth高分影像,结合国家海岸基本功能区划要求^[23],通过人机交互解译方式,提取1985年各类自然岸线和人工岸线^[2,24],得到研究区向陆一侧边界;根据《中国海湾志》的研究^[25],以湾口两个对应岬角连线,形成海湾向海一侧边界。此外,研究还利用了浙江省1:250000地理背景数据和行政区划等辅助数据。

1.3 研究方法

海湾湿地陆海作用影响明显,地表覆盖类型主要包括地表水和潮滩混合区域,地表水、潮滩和植被混合区域以及植被区域等^[12]。因此,利用广泛使用的地物光谱指数,对植被和水体在单一时相上进行识别,再对水体和植被像素进行年尺度累加,最后选取最优阈值提取海湾湿地植被和潮滩。

1.3.1 地物光谱特征指数计算

归一化植被指数(Nominalized Difference Vegetation Index, NDVI)^[26]和增强植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)^[27]用来指示绿色植被;陆地表面水体指数(Land

Surface Water Index, LSWI)^[28]与植被含水量和土壤水有关;修正的归一化水体指数(modified Normalized Difference Water Index, mNDWI)^[29]对陆地表面水较为敏感。因此,考虑联合使用以上指数进行湿地信息提取^[30],如计算得到2019年研究区地物光谱特征指数(图3)。

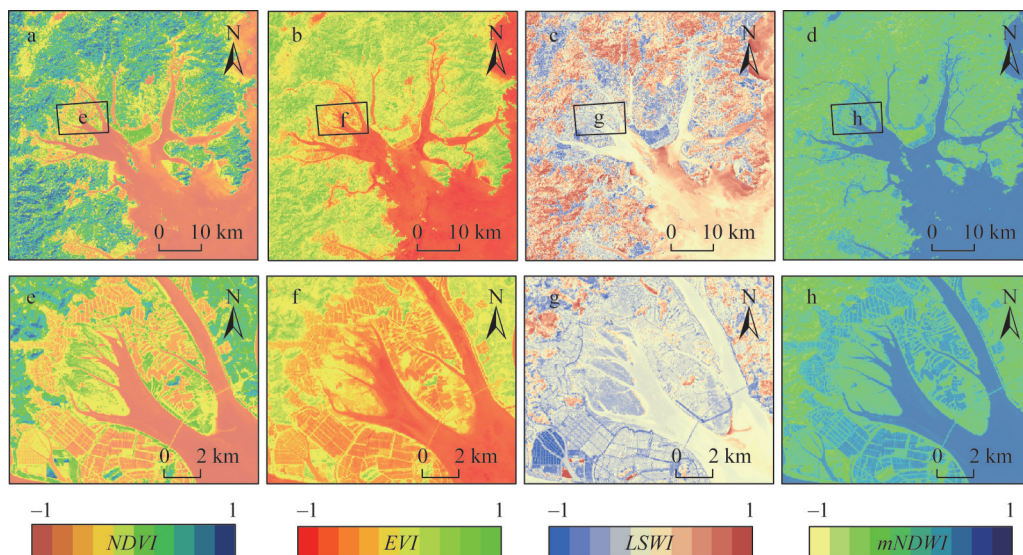


图3 2019年地物光谱特征指数

Fig. 3 The spectral index of remote sensing in 2019

1.3.2 海岸植被和潮滩信息提取

(1) 开放地表水体和植被单时相影像识别

海岸区域受控于风、浪、流、沙等水动力因素^[31],使其环境常常处于动态变化之中,特别是在水和植被混合的海湾湿地区域最为明显^[12,30]。 $mNDWI$ 指数常用于检测水体^[29],但在水体和植被的混合像素中,识别水体时却存在误差^[22]。为减少植被对水体识别的影响,将 $mNDWI$ 指数和植被指数 EVI 和 $NDVI$ 相结合,来检测开放地表水体。因此,地表水的检测方法是 $mNDWI > EVI$ 或 $mNDWI > NDVI$ 且 $EVI < 0.1$ ^[22,32]。此外,利用植被指数 $NDVI$ 和 EVI 分析植被变化时,会受到水和土壤的影响,然而 $LSWI$ 指数对植被含水量和土壤水分敏感。因此,联合使用光谱指数对湿地植被进行识别,计算方法是 $EVI \geq 0.1$, $NDVI \geq 0.2$ 且 $LSWI > 0$ ^[22,30]。

(2) 水体和植被像素年尺度累加

为减少低质量观测的影响和潮汐周期性作用干扰,充分利用有效的海岸带植被物候信息,将单一时相识别像素结果,进行年内时序叠加后,结合全年优质观测影像,得到年尺度水体频率 F_{water} 和植被频率 $F_{vegetation}$ (图4)。计算公式如下^[30]:

$$F_{water} = \frac{\sum_{water}}{\sum_{Good}} \quad (1)$$

$$F_{vegetation} = \frac{\sum_{vegetation}}{\sum_{Good}} \quad (2)$$

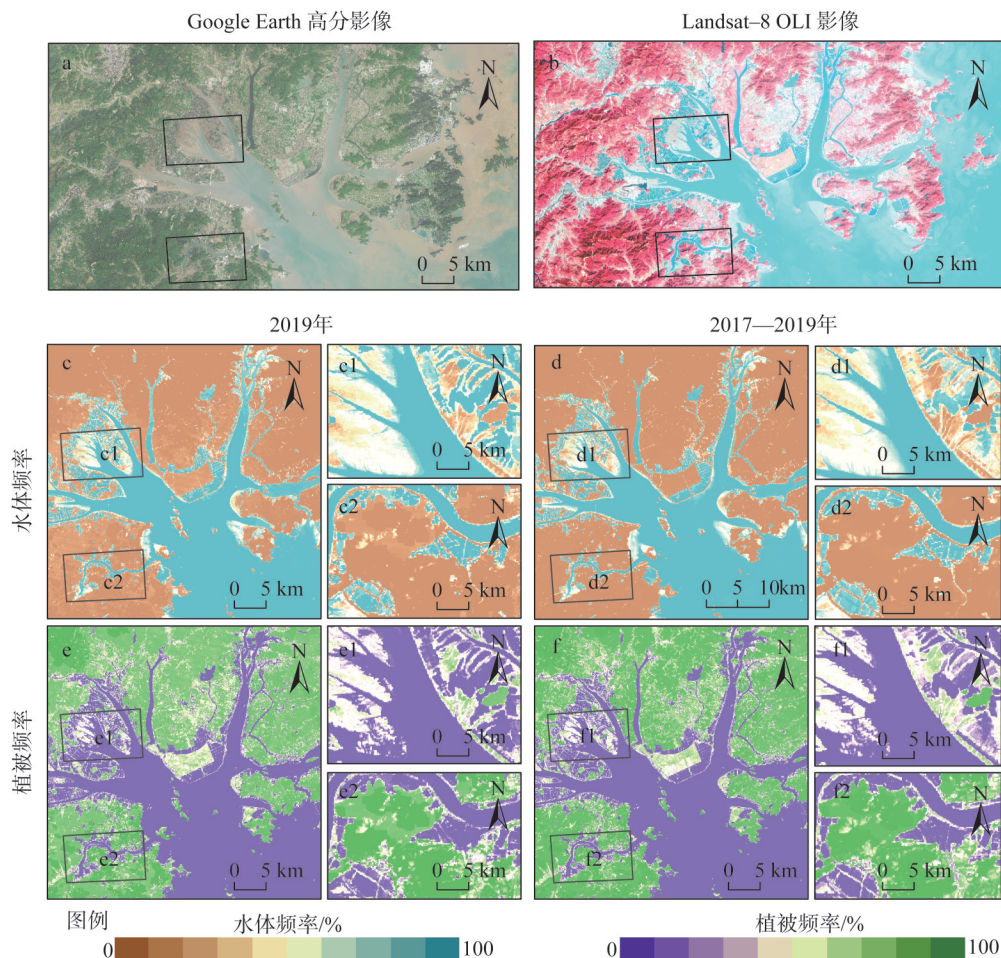


图4 水体和植被频率

Fig. 4 The frequencies of surface water bodies and vegetation

式中： F_{water} 是年尺度水体频率（%）； \sum_{water} 是年尺度水体观测数量（次）； $F_{vegetation}$ 是年尺度植被频率（%）； $\sum_{vegetation}$ 是年尺度植被观测数量（次）； \sum_{Good} 是一年中有效观测数量（次）。

(3) 植被和潮滩年度信息提取

已有研究表明，水体频率较大时常年海水会保持稳定状态^[30]，Wang等^[22]以此对中国海岸带湿地研究发现，采用95%的水体频率阈值，可以提取常年海水。同时，顾及算法本身和云掩膜算法潜在的不确定性，考虑5%的误差范围，以5%的水体频率来确定平均高潮线^[30]。因此， $5\% \leq F_{water} < 95\%$ 作为水体频率阈值，确定海湾潮间带区域。在此基础上，凭借海湾湿地潮滩和植被易被目视判别的优势，在植被分布区域，选取随机点作为感兴趣样点（图5a、图5b），研究水体频率和植被频率的分布，以提取海湾湿地植被（图5c、图5d）。因此，使用25%作为阈值提取湾区湿地植被（ $25\% \leq F_{vegetation}$ 且 $F_{water} \leq 55\%$ ）和非植被的潮滩（ $F_{vegetation} < 25\%$ ）。

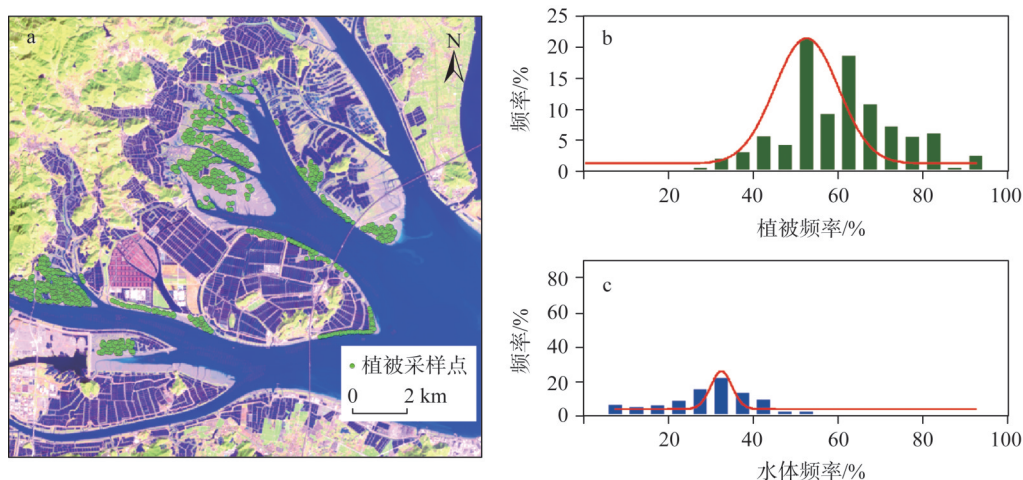


图5 海湾湿地植被感兴趣样点分布和像素频率特征

Fig. 5 Distribution of sample points and pixel frequency characteristics of vegetation in bay wetland

2 结果分析

2.1 三门湾湿地变化时空特征分析

从三门湾湿地信息空间分布格局来看(图6), 1984—2019年, 研究区湿地信息空间分布变化较大的区域, 主要分布在宁海县南部、三门县东北部近海低地地区以及象山县西南部。该区域是浙江面积较大的沿海低地区域之一, 开发较早, 人口众多, 形成了近海城镇发展带; 沿海基础设施相对完善, 建成区面积较大, 是人类活动最为剧烈的区域。

此外, 研究期间不同县域范围内湿地类型面积的变化有所差异(表1)。1984—1986年象山县、三门县和宁海县湿地面积分别为18.93 km²、43.19 km²和21.19 km², 至2017—2019年象山县、三门县和宁海县湿地面积分别为8.14 km²、10.13 km²和5.04 km²。海湾湿地信息变化的影响因素较多, 如三门湾潮汐汊道纵横, 随着城镇化发展和海岸人工地貌向海延伸, 大量以突堤围填海、区块组团围填海、连岛工程等方式, 在小部分滩涂淤积区域进行围垦后, 大多用于养殖池塘和城镇建设, 以顺岸平推的方式向海扩展。特别是20世纪90年代以来, 养殖、围垦等人类活动在此大规模兴起, 围垦强度增加, 使潮滩面积逐渐减少。

2.2 海湾变化及围垦响应分析

2.2.1 三门湾海湾面积变化

海湾局部或全局面积的变化, 能够反映人类活动对其湿地演化的影响程度, 分析海湾面积变化对科学地保护湾区湿地环境具有重要意义。基于多期遥感影像提取的岸线位置, 得到了研究时段内海湾面积, 并按照行政范围细化至县域尺度进行分析(图7)。总体来看, 海湾面积从1985年的67.53 km²减少至2018年的21.11 km²。其中2010—2019年三门湾面积变化保持着平稳趋势, 其余时间段海湾面积呈下降趋势, 而1984—1994年和2003—2009年下降较为明显。此外, 虽然各县海湾面积呈不断下降趋势, 但不同海湾面积的下降幅度和速率有所差异。三门湾潮滩湿地处在缓慢淤涨趋势, 而研究时段内围填海速度已高于淤涨速度, 导致集中连片分布的高潮带滩涂大多被围垦, 中低潮带海涂被

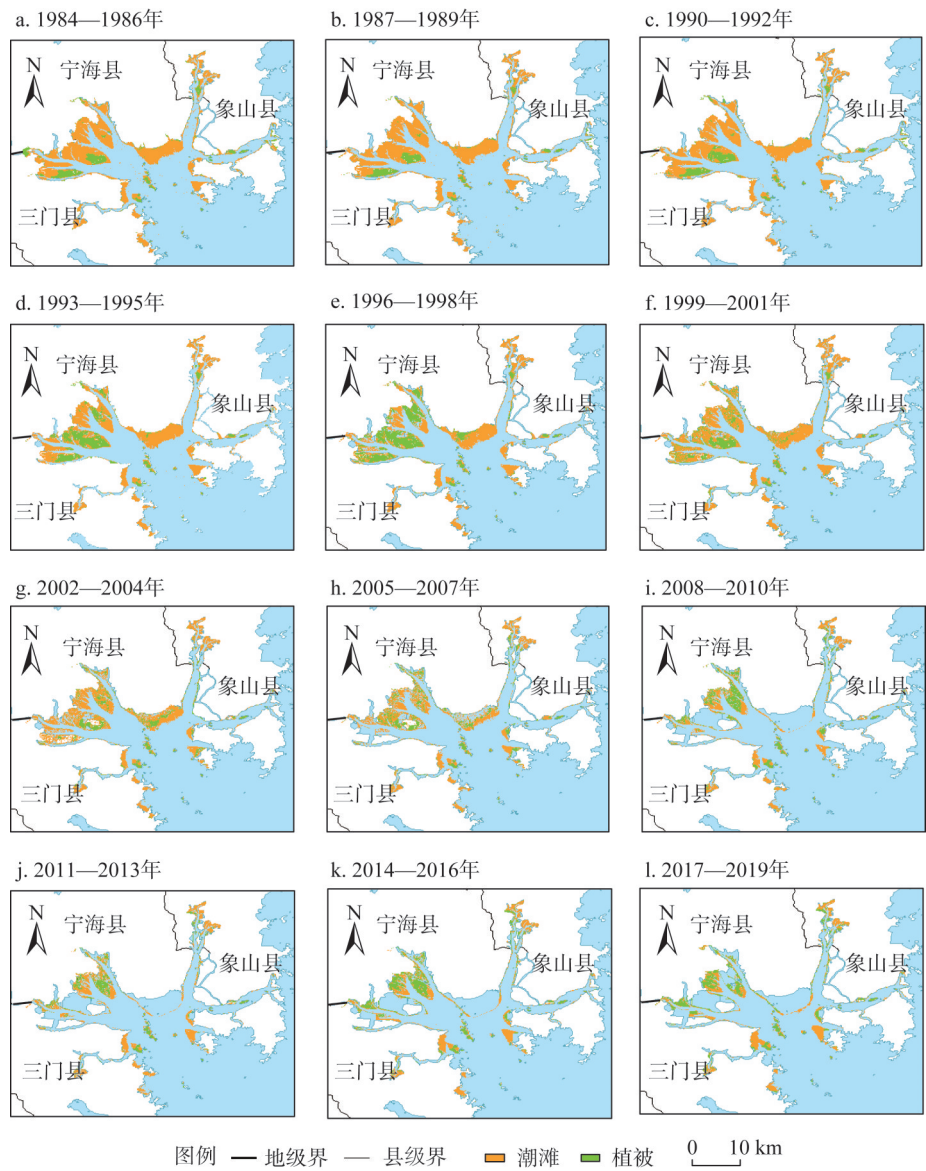


图6 三门湾湿地潮滩和植被空间分布变化

Fig. 6 Changes in the spatial distribution of tidal flats and vegetation

利用进行了水产养殖。综上可以认为海湾面积变化与其所属县域行政范围、海岸轮廓形态和围填海强度有关，宁海和象山所属海湾范围较小，且海岸潮滩基本稳定，所以面积减少幅度较小；而三门县所属海湾的潮汐汉道，深入内陆的比例较高，加之县域范围较大，因此海湾面积减少幅度较大。

三门湾岸线曲折，湿地面积在空间上的变化会直接导致海湾面积发生变化。多年的海湾面积空间变化结果表明（图8），35年间海湾北部整体减少幅度低于南部，北部和南部两地海湾面积差值较大，但缩减率差距偏小，南部海湾水域面积及其面积缩减总量大于北部。北部的象山县海湾中开敞型湿地占比高，海湾面积相对较小；而三门湾南部三

表1 1984—1986年三门湾湿地类型及湾内海水县域分布

时段/年	象山县			三门县			宁海县			合计
	植被	潮滩	海水	植被	潮滩	海水	植被	潮滩	海水	
1984—1986	8.94	7.21	2.78	24.28	15.09	3.82	4.94	15.09	1.16	83.31
1987—1989	7.08	8.58	2.33	21.45	15.26	3.82	2.90	15.26	1.02	77.7
1990—1992	7.30	7.60	3.14	22.55	14.25	3.90	3.42	14.25	1.02	77.43
1993—1995	5.34	6.10	1.87	21.51	10.88	4.07	2.99	10.88	0.71	64.35
1996—1998	5.09	5.94	1.88	23.95	8.20	3.51	3.14	8.20	0.57	60.48
1999—2001	4.12	5.53	1.83	18.94	12.49	4.57	2.74	12.49	0.57	63.28
2002—2004	3.14	4.23	2.46	11.35	13.02	10.84	2.29	13.02	0.97	61.32
2005—2007	3.30	4.39	1.76	8.86	4.53	6.79	2.58	4.53	1.03	37.77
2008—2010	3.10	3.60	1.72	5.57	2.53	2.91	2.88	2.53	0.85	25.69
2011—2013	3.12	3.24	1.56	5.10	2.44	3.18	2.15	2.44	0.95	24.18
2014—2016	3.70	2.95	1.37	5.48	1.90	2.79	3.08	1.90	0.98	24.15
2017—2019	4.08	2.86	1.20	5.81	1.67	2.65	2.77	1.67	0.60	23.31

注：海水是指研究区中的湾内海水。

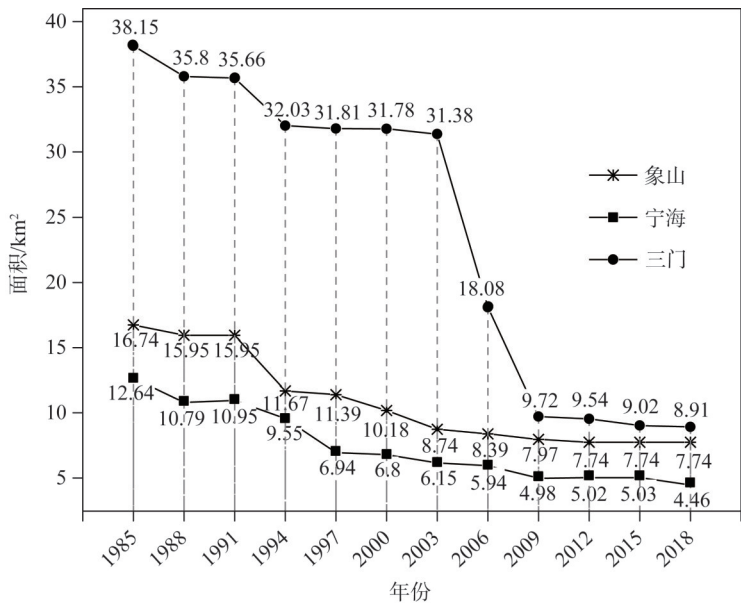


图7 三门湾海湾面积县域尺度变化

Fig. 7 Changes in the area of Sanmen Bay at the county scale

门县域海湾中封闭或半封闭型的湿地占比高，海湾水域面积相对较大；西部的宁海县海湾，由于以淤泥质海岸为主，岸线曲折且深入内陆等特征，岸线较复杂，人类开发建设活动较多，海湾空间处于多变状态，平均面积最小。

2.2.2 湿地自然演化及围垦响应

围填海为缓解沿海用地压力提供了承载空间，增加了粮食或水产品供给。同时不合理的围垦活动也给滨海生态环境带来了冲击，如晒盐、造田、养殖等方式使潮间带生境

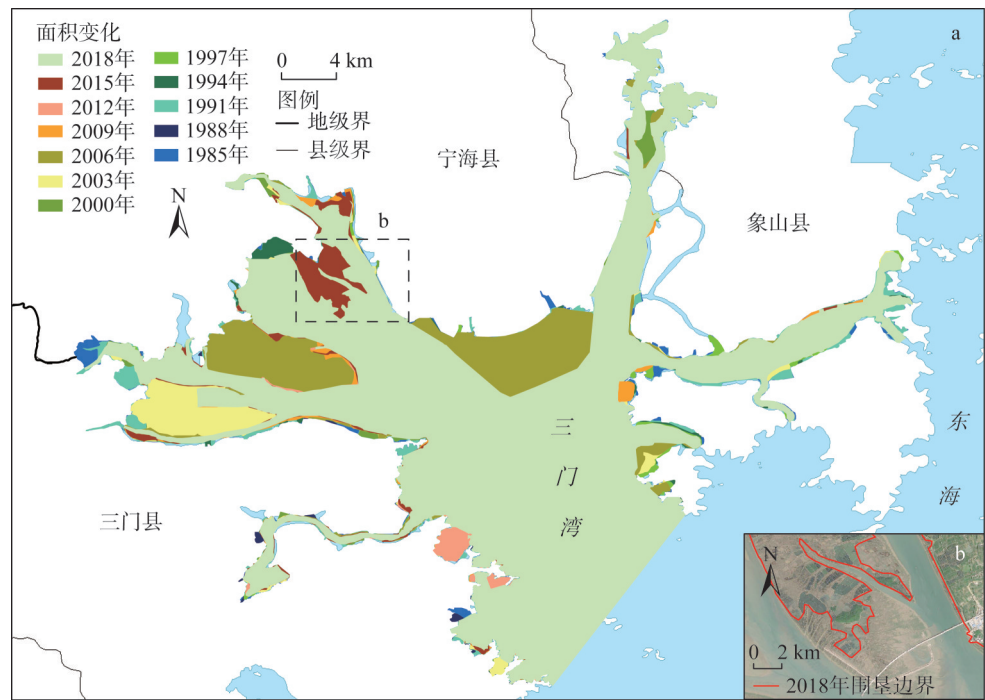


图8 三门湾海湾空间变化
Fig. 8 Spatial changes in Sanmen Bay

发生变化；码头、基础设施等人工地貌建设使近海陆域地表改造，对海湾湿地生态系统造成干扰。三门湾湿地不同类型变化趋势有所不同（图9），从1984—2019年，潮滩面积趋于波动下降趋势；而植被变化则处于波动上升趋势，但在不同时期有所差异，如早期阶段（1984—1995年），因互花米草人工引种，使植被面积有所增加；1996—2010年间，因围垦开发活动加强使得潮滩面积下降，进一步导致植被下降。尽管近年来滨海湿地保护和生态系统恢复工作在不断强化，但是海湾湿地面积损失趋势依然严峻。

毋庸置疑，海岸带管理政策为海岸带发展提供了契机，有助于沿海资源要素在滨海地区实现更好配置，但不同开发阶段海岸带管理政策有所差异（表2）。纵观海岸带管理

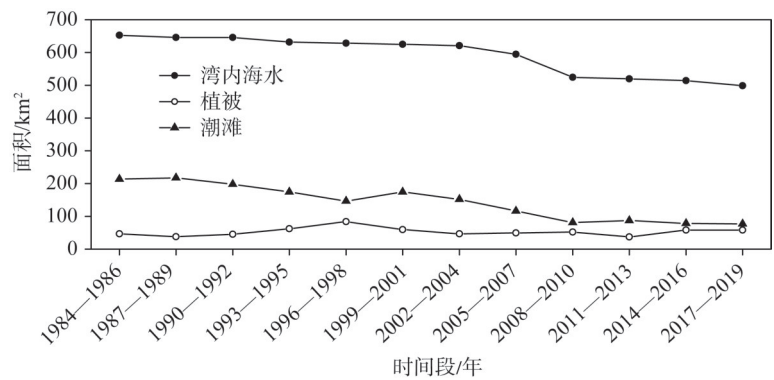


图9 三门湾湿地类型及湾内海水面积整体变化的阶段性差异
Fig. 9 The stages of overall changes in the area of Sanmen Bay Wetland

表2 填海相关主要政策供给演变
Table 2 Main policy evolution related to reclamation

年份	主要内容	文件名称或依据	来源或主管单位
2002	全国海洋功能区划, 围填海需论证	2002年9月10日	原国家海洋局
2008	改进围填海造地工程平面设计	国海管字[2008]37号	原国家海洋局
2009	加强围填海规划计划管理	发改地区[2009]2976号	国家发展改革委、原国家海洋局
2010	加强围填海造地管理	国土资发[2010]219号	原国土资源部、原国家海洋局
2011	规范围填海秩序, 强化围填海计划管理	发改地区[2011]2929号	国家发展改革委、原国家海洋局
2011	财政项目指南需研究围填海环境影响	农办财[2011]130号	农业部办公厅
2012	无居民海岛周边海域开展围填海	国海办字[2012]666号	原国家海洋局
2016	探索海岛与海岛周边海域围填海审批衔接等制度	国海岛字[2016]691号	原国家海洋局
2016	加强杭州湾、象山港、三门湾、台州湾等保护和开发	浙江省政协十一届十八次常委会会议专题协商	浙江省政协
2017	围填海工程生态建设技术指南	国海规范[2017]13号	原国家海洋局
2017	明确提出谋划实施大湾区建设行动纲要, 大力发展湾区经济	浙江省十四次党代会报告	浙江省十四次党代会
2018	加强滨海湿地保护, 严格管控围填海活动	国发[2018]24号	国务院
2018	明确围填海历史遗留问题处理有关要求	自然资规[2018]7号	自然资源部
2018	围填海项目生态评估技术指南	自然资办发[2018]36号	自然资源部办公厅
2019	除国家重大项目外, 全面禁止围填海	党的十九届四中全会报告	党的十九届四中全会

政策的供给态势, 经历了围填海到严格管控的围填海过程, 呈现国家层面带头与地方政府响应的特征。从三门湾湿地信息变化和海湾面积等多个指标可以看出, 2014年前后是三门湾湿地演变的“拐点”, 即海湾湿地面积的减少速度在下降, 并在拐点出现后保持了平稳趋势。这归因于围填海管控加强和海岸带整治修复工作的科学推进, 与国家层面重大政策调整和相关政策供给过程相适应。

3 结论与讨论

本文基于时间序列 Landsat 遥感影像, 分析了1984年以来浙江三门湾湿地信息的时空演变特征, 形成以下主要结论: 1984—2019年, 浙江三门湾湿地信息在面积构成、空间位置等方面发生了较大变化, 主要体现在填海区向海运动, 潮滩面积减少显著。三门湾海湾面积变化可分为三个阶段, 即波动下降(1984—2002年)、加速下降(2003—2009年)和平稳发展阶段(2010—2019年), 其变化趋势与经济发展阶段、海岸管理政策供给过程相关。海湾作为陆海生态系统关键带, 是人类活动和气候变化双重影响的地理空间, 也是海岸带保护、开发与管理的基本单元。因此, 在摸清三门湾湿地演变的时空分异特征基础上, 根据湾区资源禀赋和城镇发展需要, 合理有序地保护海湾湿地和进行湾区建设。另外, 纵观海岸带可持续管理的模式与政策, 会因经济建设和发展阶段有所不同, 未来要平衡好生态保护与资源开发的关系, 重视滨海湿地生态安全和社会经

的可持续性,将湿地敏感性和环境承载力深入到湾区发展规划中,以服务后围填海时代湾区的可持续发展。

参考文献(References):

- [1] 侯西勇, 侯婉, 毋亭. 20世纪40年代初以来中国大陆沿海主要海湾形态变化. 地理学报, 2016, 71(1): 118-129. [HOU X Y, HOU W, WU T. Shape changes of major gulfs along the mainland of China since the early 1940s. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 118-129.]
- [2] 李加林, 王丽佳. 围填海影响下东海区主要海湾形态时空演变. 地理学报, 2020, 75(1): 126-142. [LI J L, WANG L J. Spatial and temporal evolutions of the major bays in the East China Sea under the influence of reclamation. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 126-142.]
- [3] NICHOLLS R J, CAZENAVE A. Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 2010, 328(5985): 1517-1520.
- [4] 刘艳霞. 国内外湾区经济发展研究与启示. 城市观察, 2014, (3): 155-163. [LIU Y X. Research and implications of bay zone economy home and abroad. *Urban Insight*, 2014, (3): 155-163.]
- [5] JEVREJEVA S, JACKSON L P, RIVA R E M, et al. Coastal sea level rise with warming above 2 °C. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(47): 13342-13347.
- [6] 李加林, 姜忆涓, 冯佰香, 等. 海湾开发利用强度分析: 以宁波市杭州湾、象山港与宁波市三门湾为例. 应用海洋学学报, 2018, 37(4): 541-550. [LI J L, JIANG Y M, FENG B X, et al. Analysis of intensively exploited bay area with cases of Ningbo Hangzhou Bay, Xiangshan Bay, and Ningbo Sanmen Bay. *Journal of Applied Oceanography*, 2018, 37(4): 541-550.]
- [7] REN C, WANG Z, ZHANG Y, et al. Rapid expansion of coastal aquaculture ponds in China from Landsat observations during 1984-2016. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 82: 101902, Doi: 10.1016/j.jag.2019.101902.
- [8] SUN C, LIU Y, ZHAO S, et al. Classification mapping and species identification of salt marshes based on a short-time interval NDVI time-series from HJ-1 optical imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 45: 27-41.
- [9] 李加林, 刘永超. 人工地貌学学科体系框架构建初探. 地理研究, 2016, 35(12): 2203-2215. [LI J L, LIU Y C. Framework establishment of disciplinary system of anthropogenic geomorphology. *Geographical Research*, 2016, 35(12): 2203-2215.]
- [10] 李加林, 杨晓平, 童亿勤. 潮滩围垦对海岸环境的影响研究进展. 地理科学进展, 2007, 26(2): 43-51. [LI J L, YANG X P, TONG Y Q. Progress on environmental effects of tidal flat reclamation. *Progress in Geography*, 2007, 26(2): 43-51.]
- [11] 刘永超, 李加林, 张宇, 等. 时间序列遥感影像支持下杭州湾南岸植被动态监测. 宁波大学学报: 理工版, 2020, 33(1): 25-31. [LIU Y C, LI J L, ZHANG Y, et al. Dynamic monitoring of vegetation in Southern Hangzhou Bay from time series images. *Journal of Ningbo University: NSEE*, 2020, 33(1): 25-31.]
- [12] LIU Y, LIU Y, LI J, et al. Trajectory of coastal wetland vegetation in Xiangshan Bay, China, from image time series. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 160: 111697, Doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111697.
- [13] 刘永超, 李加林, 袁麒麟, 等. 人类活动对港湾岸线及景观变迁影响的比较研究: 以中国象山港与美国坦帕湾为例. 地理学报, 2016, 71(1): 86-103. [LIU Y C, LI J L, YUAN Q X, et al. Comparative research on the impact of human activities on changes in coastline and landscape in bay areas: A case study with Xiangshan Bay, China and Tampa Bay, USA. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 86-103.]
- [14] 陈晓英, 张杰, 马毅, 等. 近40 a来三门湾海岸线时空变化遥感监测与分析. 海洋科学, 2015, 39(2): 43-49. [CHEN X Y, ZHANG J, MA Y, et al. Monitoring and analysis of coastline changes of the Sanmen Bay with remote sensing during the past 40 years. *Marine Science*, 2015, 39(2): 43-49.]
- [15] 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. 地理科学, 2012, 32(8): 1006-1012. [ZHU G R, XU X G. Annual processes of land reclamation from the sea along the northwest coast of Bohai Bay during 1974 to 2010. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(8): 1006-1012.]

- [16] 何改丽, 李加林, 刘永超, 等. 1985—2015年美国坦帕湾流域土地开发利用强度时空变化分析. 自然资源学报, 2019, 34(1): 66-79. [HE G L, LI J L, LIU Y C, et al. Spatio-temporal analysis of land development and utilization intensity in Tampa Bay watershed from 1985 to 2015. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1): 66-79.]
- [17] 张丹丹, 杨晓梅, 苏奋振, 等. 基于 PVS 的海湾开发利用程度评价: 以大亚湾为例. 自然资源学报, 2009, 24(8): 1440-1449. [ZHANG D D, YANG X M, SU F Z, et al. Exploitative degree evaluation of bay based on PVS framework: A case study of Daya Bay. *Journal of Natural Research*, 2009, 24(8): 1440-1449.]
- [18] 刘永超, 李加林, 袁麒麟, 等. 人类活动对象山港潮汐汉道及沿岸生态系统演化的影响. 宁波大学学报: 理工版, 2015, 28(4): 120-123. [LIU Y C, LI J L, YUAN Q X, et al. Tidal inlet and ecological system evolution of coastal area of Xiangshan Bay under influence of human activities. *Journal of Ningbo University: NSEE*, 2015, 28(4): 120-123.]
- [19] 林桂兰, 左玉辉. 海湾资源开发的累积生态效应研究. 自然资源学报, 2006, 21(3): 432-440. [LIN G L, ZUO Y H. Cumulative ecological effects assessment on resource exploitation and utilization in bay. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(3): 432-440.]
- [20] 李加林, 龚虹波, 姜忆涓, 等. 中国东海可持续发展研究报告: 海岸带与海湾资源环境演化卷. 北京: 海洋出版社, 2020. [LI J L, GONG H B, JIANG Y M, et al. *Sustainable Development in East China Sea Evolution of Resources and Environment in Coastal Zone and Bay Area*. Beijing: China Ocean Press, 2020.]
- [21] GORELICK N, HANCHER M, DIXON M. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18-27.
- [22] WANG X, XIAO X, ZOU Z, et al. Tracking annual changes of coastal tidal flats in China during 1986-2016 through analyses of Landsat images with Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 238: 110987, Doi: 10.1016/j.rse.2018.11.030.
- [23] 李加林, 田鹏, 邵姝遥, 等. 中国东海区大陆岸线变迁及其开发利用强度分析. 自然资源学报, 2019, 34(9): 1886-1901. [LI J L, TIAN P, SHAO S Y, et al. The change of continental coastline and its development and utilization intensity in the East China Sea. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(9): 1886-1901.]
- [24] 侯西勇, 毋亨, 王远东, 等. 20世纪40年代以来多时相中国大陆岸线提取方法及精度评估. 海洋科学, 2014, 38(11): 66-73. [HOU X Y, WU T, WANG Y D, et al. Extraction and accuracy evaluation of multi-temporal coastlines of mainland China since 1940s. *Marine Sciences*, 2014, 38(11): 66-73.]
- [25] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志<第五分册>. 北京: 海洋出版社, 1992. [China Gulf History Compilation Committee. *China Gulf History (Fifth Volume)*. Beijing: China Ocean Press, 1992.]
- [26] TUCKER C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 127-150.
- [27] HUETE A, DIDAN K, MIURA T. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1-2): 195-213.
- [28] XIAO X, BOLES S, LIU J. Mapping paddy rice agriculture in Southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(4): 480-492.
- [29] XU H. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [30] WANG X, XIAO X, ZOU Z, et al. Mapping coastal wetlands of China using time series Landsat images in 2018 and Google Earth Engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 163: 312-326.
- [31] 张长宽, 龚政, 陈永平, 等. 潮滩演变研究进展及前沿问题. 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下), 2017: 759-766. [ZHANG C K, GONG Z, CHEN Y P, et al. Research progress and frontier issues of tidal flat evolution. *Proceedings of the 18th China Ocean (Coast) Engineering Symposium*, 2017: 759-766.]
- [32] ZOU Z, XIAO X, DONG J, et al. Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(15): 3810-3815.

Changes of wetland in the Sanmen Bay, Zhejiang province based on Landsat time-series remote sensing images

LIU Yong-chao^{1,2,3}, LI Jia-lin^{1,2,3}, WANG Xin-xin⁴, HE Gai-li⁵, LI Dong-lin⁶,
ZHAO Sai-shuai⁷, ZHAO Bing-xue⁵, SUN Chao^{1,2,3}

(1. Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 2. Donghai Academy, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 3. Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research at Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 4. Key Laboratory of Biodiversity and Ecological Engineering, Ministry of Education, Fudan University, Shanghai 200438, China; 5. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 6. Ningbo Development Planning Research Institute, Ningbo 315040, Zhejiang, China; 7. Ningbo Institute of Surveying, Mapping and Remote Sensing Technology, Ningbo 315042, Zhejiang, China)

Abstract: The bay is a unique strategic and ecological space in the coastal zone. Under the influence of global warming and intensified human activities, the shape and ecosystem of the bay have become more sensitive, fragile, and changeable. It is particularly necessary to clarify the temporal and spatial differentiation characteristics of wetland evolution in the bay areas under the influence of human activities and to find out the root cause of the wetland resource endowment. With the increase of satellite remote sensing data and the development of geographic analysis platforms (i.e., Google Earth Engine, GEE), rapid, low-cost, high-precision continuous monitoring of the evolution of the land surface becomes possible. The analysis of the temporal and spatial characteristics of the evolution of the bay wetland is of great significance for clarifying the resource and environmental base of the bay, understanding the comprehensive development potential, and promoting the sustainable development of the bay area. Taking the Sanmen Bay Wetland (SBW) in Zhejiang province as the study area, using Landsat TM/ETM+/OLI remote sensing image data from 1984 to 2019, based on the change characteristics of the spectral index time series, we extracted the information of the study area to examine its dynamic changes. The results show that the area of SBW has changed significantly since 1984, mainly found in the south of Ninghai county, the northeast of Sanmen county, and the southwest of Xiangshan county. In terms of the area, there was a fluctuating downward trend from 1984 to 2002, an accelerated downward trend from 2003 to 2009, and a steady development trend from 2010 to 2019. Human activities, such as reclamation, have caused significant changes in the shape of the bay, and the supply process of coastal zone management policy has become one of the important factors in the evolution of the bay wetland. The research can provide decision support for the construction of the bay area and the sustainable development of coastal areas in the future.

Keywords: Landsat image; time series; tidal flat; salt marsh; reclamation; dynamic monitoring; Sanmen Bay