

doi: 10.6046/zrzyyg.2022021

引用格式: 郑修诚,周斌,雷惠,等. 基于 GEE 的杭州湾慈溪段潮滩提取及时空变化分析[J]. 自然资源遥感,2022,34(1):18–26. (Zheng X C,Zhou B,Lei H,et al. Extraction and spatio-temporal change analysis of the tidal flat in Cixi section of Hangzhou Bay based on Google Earth Engine[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2022,34(1):18–26.)

基于 GEE 的杭州湾慈溪段潮滩提取及时空变化分析

郑修诚^{1,2,3}, 周斌^{1,2,3}, 雷惠^{1,2,3}, 黄祺宇³, 叶浩林³

(1. 杭州师范大学遥感与地球科学研究院, 杭州 311121; 2. 浙江省城市湿地与区域变化研究重点实验室, 杭州 311121; 3. 杭州师范大学信息科学与技术学院, 杭州 311121)

摘要: 当前常见的潮滩遥感提取方法往往通过估算来确定潮滩的边界,难以保证较高的提取精度。本研究结合 GEE 遥感云计算平台和 GIS 技术,选用 1990—2021 年间共 77 景 Landsat 卫星影像,通过目视解译人工海岸线作为平均高潮线,利用水边线拟合平均低潮线,实现了对杭州湾南岸慈溪段的潮滩提取和面积估算,分析了潮滩区域时空变化。研究表明,杭州湾南岸慈溪段潮滩面积基本维持在 20 000 ~ 24 000 hm² 区间;空间变化趋势是由南向北迁移,迁移速度为 286.9 m·a⁻¹;影响潮滩面积和空间变化的最主要驱动力是地方政策。

关键词: 潮滩; Google Earth Engine; DSAS; 水边线; 杭州湾

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)01-0018-09

0 引言

潮滩是指淤泥质海岸潮间带浅滩^[1],处在海陆交汇的敏感地带,是沿海城市发展的重要物质基础和后备资源,也是沿海地区生态安全体系不可或缺的一部分,因此研究潮滩的发展和变化具有重要的意义^[2]。由于潮滩范围广,变化快,并且在潮滩区域行动极为不便,部分区域难以到达,使用传统的实地勘测法调查潮滩具有明显的复杂性,勘测效率低下,难以实现动态监测,而遥感技术则因其具有大范围、高分辨率、多光谱和多时序等优势,非常适用于潮滩的动态监测。

目前基于遥感技术的潮滩提取方法主要有“八分算潮法”^[3]和“相似三角形原理”^[4]等。张春桂^[3]采用“八分算潮法”来确定高、低潮时,选用过境时间与这些时刻最为接近的 MODIS 数据,实现了福建省海岸带潮滩的提取,但 MODIS 数据空间分辨率偏低且该方法只是一种潮时的近似估算方法,存在一定的误差;王小龙等^[4]采用“相似三角形原理”,结合海岛多年的潮汐数据,利用高分辨率遥感数据计算了东沙岛潮滩和湿地的范围,该方法将潮滩地形剖面视作一个直角三角形,是一种理想的估算方法,

王小丹等^[5]研究曹妃甸地区潮滩演变时使用的“相同潮位对比法”以及王靖雯等^[6]和韩倩倩等^[7]研究中使用的“潮位校正法”也都以此方法为基础。总体来看,当前常见的潮滩遥感提取方法往往通过估算来确定潮滩的边界,难以保证较高的提取精度。而张媛媛等^[8]采用穷举法,应用多时相环境卫星数据作为数据源提取序列水边线,通过面向对象分类,实现了江苏省如东县潮滩的提取,该方法摆脱了对高、低潮线的“估算”,使用若干条水边线拟合高、低潮线,具备较高的精度。

近年来,随着 Google Earth Engine(GEE)平台的诞生和广泛应用,穷举法所面临的数据量大、依赖人工等问题迎刃而解,本研究基于 GEE 平台,选用时序覆盖较广的 Landsat 系列影像数据,目视解译人工海岸线作为平均高潮线,利用水边线拟合平均低潮线,实现了对杭州湾潮滩变化最为显著的慈溪段潮滩区域的提取,并分析了其变化情况,为该地区潮滩湿地的保护提供技术参考。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

以杭州湾南岸的慈溪市为研究区(图 1),其隶

收稿日期: 2022-01-17; 修订日期: 2022-01-21

基金项目: 浙江省重点科技创新团队项目“城市湿地生态修复与资源利用科技创新团队”(编号: 2010R50039)和攀登工程二期“湿地生态系统保护与治理”(编号: PD2015306)共同资助。

第一作者: 郑修诚(1999-),男,硕士研究生,主要研究方向为滨海湿地遥感监测。Email: 2017210214034@stu.hznu.edu.cn。

通信作者: 周斌(1972-),男,博士,教授,主要研究方向为环境遥感。Email: zhoubin@hznu.edu.cn。

属于浙江省宁波市,东接镇海区,西连余姚市,地势南高北低,面向杭州湾呈现丘陵、平原、滩涂3级阶梯状。由于杭州湾独特的空间形态,大量的泥沙在杭州湾南岸北凸弧段淤积,形成了典型的平原型潮滩,为慈溪市填海造陆提供了得天独厚的自然条件,使其成为浙江省土地后备资源最丰富的地区之一。

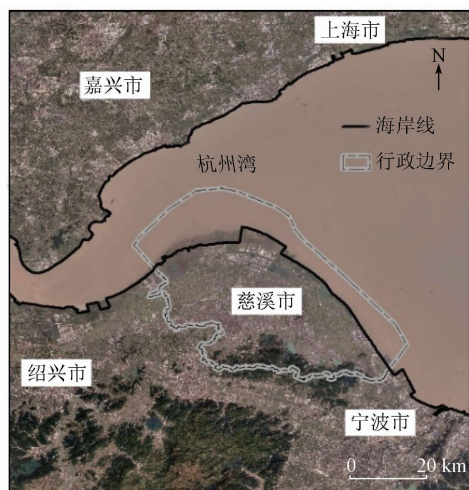


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

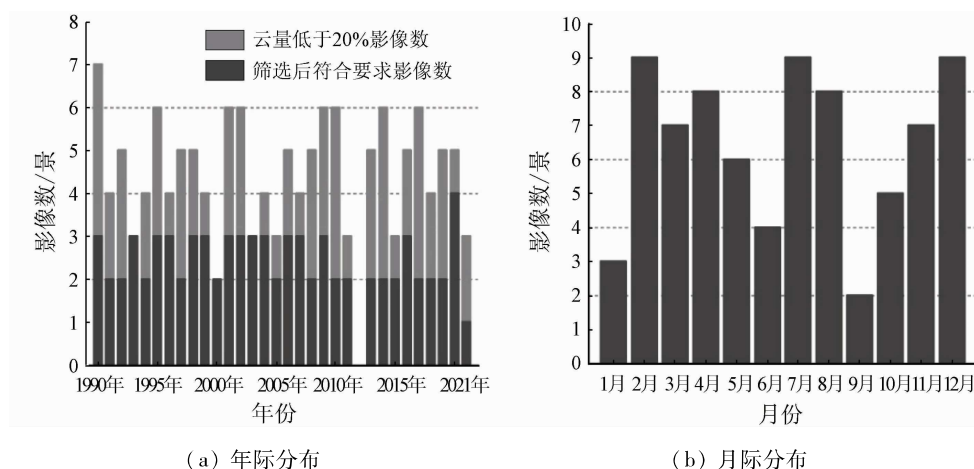


图2 影像年际及月际分布

Fig. 2 Annually and monthly distribution of images

行政区矢量边界数据获取自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。

研究区潮汐预报数据获取自国家海洋科学数据中心(<http://mds.nmdis.org.cn/>)。

2 研究方法

本文研究的潮滩范围是介于平均大潮高潮线和平均大潮低潮线之间的潮侵地带,结合前人的相关研究^[8,11],平均大潮低潮线可以认为是水边线集中距离陆地最远的外界线,这通常不是集中的某一条线,而是多条线段的组合;而海岸线则可以被认为多年平均大潮高潮位形成的痕迹线^[12-14]。平均

慈溪市也具有悠久的填海造陆历史,从明末至20世纪末,慈溪市海岸线外移的速度为 $28 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[9]。20世纪90年代以后,围涂筑塘技术趋于成熟,施工设备和施工工艺逐步先进,围塘砌筑标准级别提高,单块围涂规模不断扩大^[10]。

1.2 数据源

GEE是由Google提供的基于云计算的全球尺度地理空间分析平台,其存储的大量公开的地理空间数据集能够省去影像下载的时间,而其强大的计算力则能批量处理较大规模的数据,为较大时空尺度的研究提供便捷。出于对数据可获得性和逐年监测的需求,本研究选用30 m空间分辨率的Landsat系列数据作为遥感影像数据源,所有数据均来自于Earth Engine Data Catalog。本研究对数据源进行了2轮筛选。首先筛选覆盖完整研究区(条带号118/39)的1990—2021年间云量低于20%的影像,累计得到142景影像;再对这些影像逐景目视筛选,确保潮滩区域无明显厚云覆盖,并尽量保证1 a内有2景间隔90 d以上的影像,最终得到77景符合条件的影像(图2)。

高、低潮线合围形成的区域就是本文的潮滩区域。结合现有数据,本文拟提取1990—2021年间5~6 a时间间隔的6期潮滩区域。

2.1 瞬时水边线提取

瞬时水边线的提取本质上是对数字图像中的陆地区域和水体区域进行分割,2类区域的分界线就是瞬时水边线。本研究主要使用基于水体指数的阈值分割法提取水边线,其中阈值的选取起着至关重要的作用^[15]。通常经过水体指数计算得到的灰度图像直方图会出现“双峰”特性^[16],选取谷底所对应的灰度值作为阈值能够有效地对灰度图像进行分割。再对阈值分割后的二值图像矢量化。技术路线如图3所示。

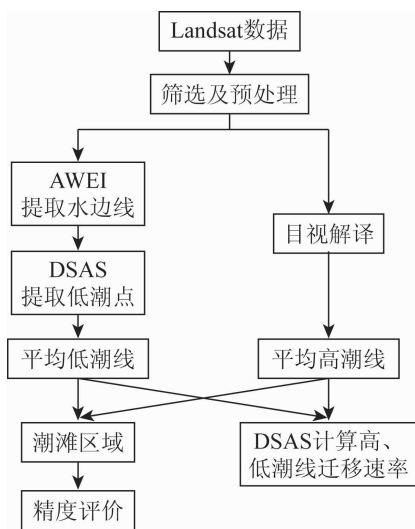


图3 潮滩提取技术路线

Fig. 3 Technology roadmap for tidal flat extraction

2.1.1 自动水体提取指数 AWEI

2014 年, Feyisa 等^[17]提出了一种基于 TM 多波段的自动水体提取指数 (automated water extraction index, AWEI), 并且证实了该指数相较于常用的改进的归一化差异水体指数 (modified normalized difference water index, MNDWI)^[18] 具有更高的精度。AWEI 通过给 TM 影像不同波段赋予相应的系数并进行加减计算实现水体像元和非水体像元之间最大程度的分割, 该指数由 2 个独立的方程组成, 公式分别为:

$$AWEI_{sh} = \rho_{BLUE} + 2.5 \rho_{GREEN} - 1.5(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1}) - 0.25 \rho_{SWIR2}, \quad (1)$$

$$AWEI_{nsh} = 4(\rho_{GREEN} - \rho_{SWIR1}) - (0.25 \rho_{NIR} + 2.75 \rho_{SWIR2}), \quad (2)$$

式中: ρ_{BLUE} , ρ_{GREEN} , ρ_{NIR} , ρ_{SWIR1} 和 ρ_{SWIR2} 分别代表 Landsat 影像蓝光、绿光、近红外、短波红外 1 和短波红外 2 波段的反射率值; $AWEI_{sh}$ 是为研究场景下有明显阴影存在的情况设计, $AWEI_{sh}$ 能够有效去除阴影像元^[19]; $AWEI_{nsh}$ 则是为研究场景下阴影问题并不明显的情况设计^[20], $AWEI_{nsh}$ 能够有效地去除易与水体混淆的黑色建筑地表。本研究聚焦的潮滩区域没有明显的阴影干扰, 因此选用 $AWEI_{nsh}$ 进行水边线提取。经过实验, $AWEI_{nsh}$ 同样适用于 Landsat8 OLI 数据^[19]。

2.1.2 大津算法提取阈值

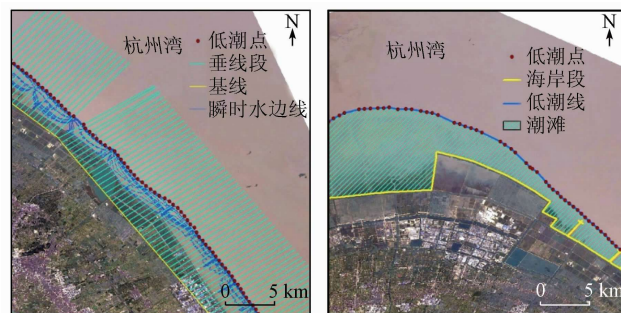
大津算法 (OSTU)^[21] 是日本学者大津于 1979 年提出的一种确定图像二值化分割阈值的算法, 从原理上讲, 用该方法提取的阈值对图像进行二值化分割后, 前景与背景图像类间方差最大, 因此该方法又被称为最大类间方差法。通过在 GEE 平台中编写代码, 可以自动获取经过水体指数计算的每景

灰度图像的阈值, 并对其进行二值化分割。

2.2 平均低潮线提取

受潮汐作用、泥沙淤积等因素的影响, 瞬时水边线之间会出现交叉现象, 并且随着泥沙的不断淤积、地形不断改变, 时间间隔越长、水边线数量越多, 交叉现象就越复杂^[8], 通过目视解译的方法从水边线集中提取平均低潮线就需要耗费大量的时间, 并且受人为干扰较大, 因此本研究使用基于 ArcGIS 软件开发的数字岸线分析系统 (digital shoreline analysis system, DSAS)^[22], 通过提取离陆地最远的潮位点, 拟合一条平均低潮线。

DSAS 模块通过对一条 Baseline 作若干条间隔相同、长度固定并与水边线集充分相交的垂线, 记录垂线与水边线集的所有交点数据, 这些交点包含了其所在垂线编号、至 Baseline 距离以及空间坐标等信息。经过多次测试, 结合研究区实际情况, 选定垂线间隔为 500 m, 垂线长度为 18 000 m, 最后通过 Python 编程对交点数据进行分析, 筛选出同一垂线编号中距离 Baseline 最远的潮位点, 将以上潮位点按其属性中的垂线编号依次相连, 拟合生成的折线即认为是平均低潮线 (图 4)。共生成 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2021 年 6 期平均低潮线。



(a) DSAS 模块提取低潮点

(b) 低潮线生成

图4 DSAS 模块提取平均低潮线

Fig. 4 Average low tide line extracted by DSAS module

2.3 平均高潮线提取

慈溪市有悠久的围海筑堤历史, 域内以人工海岸线为主, 因此本研究对平均高潮线的提取实质上是对人工海岸线的提取。人工海岸线在遥感影像中纹理清晰、辨识度高, 因此本文采用目视解译法直接提取。结合研究区 Landsat 影像和 Google Earth 历史影像, 遵循海岸线判别依据^[23], 在 ArcGIS 10.2 软件中绘制与平均低潮线对应的 6 期海岸线, 作为本研究所需要的平均高潮线。

2.4 潮滩区域提取及精度评价

潮滩提取实质上是将研究区内地物分为潮滩和其他地物 2 类, 而精度评价是检验分类结果与地表真实

信息吻合程度的过程,以此来评价分类结果可信度。误差矩阵又称混淆矩阵,广泛应用于遥感土地利用分类精度评价,能简单地对分类精度信息进行概括^[24]。

本研究通过构建缓冲区、创建随机采样点,统计每个采样点在提取结果和影像数据中分别是否属于潮滩,并构建统计结果的混淆矩阵从而对潮滩提取的精度进行评价。为使采样点分布合理、覆盖均匀,以提取的潮滩结果为中心作半径 5 km 的缓冲区,作为提取结果精度评价的区域(图 5)。每期缓冲区内使用 Create Random Point 工具随机生成 240 个点作为采样点,每个采样点的间距不小于 100 m。借助研

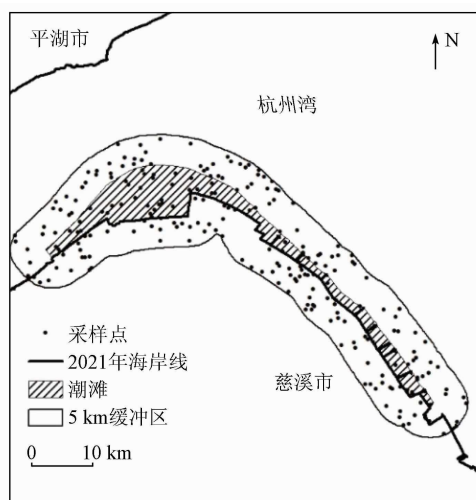


图 5 缓冲区和采样点构建

Fig. 5 Construction of buffers and sample points

究区低潮期遥感影像以及 Google Earth 历史影像,目视解译将采样点分为潮滩和其他 2 类,最后构建混淆矩阵评价潮滩提取精度。

2.5 平均高、低潮线迁移速率计算

对于 2.2 节中的任一垂线段 i , 计算其与某 2 期高(低)潮线的交点间的距离 d_i , 作为该时期内在该垂线段上的潮线位移距离。任意 2 期高(低)潮线的平均迁移速率 V 的计算公式为:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n\Delta t}, \quad (3)$$

式中: n 为生成垂线段总数; Δt 为 2 期高(低)潮线间的年份差值。

3 结果与分析

3.1 潮滩提取结果及精度评价

3.1.1 潮滩提取结果

图 6 反映了 1990—2021 年间 6 期潮滩的空间位置,底图为 1990 年 Google Earth 历史影像,可见潮滩区域呈现明显向北发展的态势。依次统计各期潮滩的面积(图 7),通过图 7 可知,研究区内潮滩的面积大部分时间维持在 20 000 ~ 24 000 hm^2 区间,在 2000—2005 年间陡然减少至 10 344 hm^2 ,随后又恢复到 20 000 hm^2 以上。

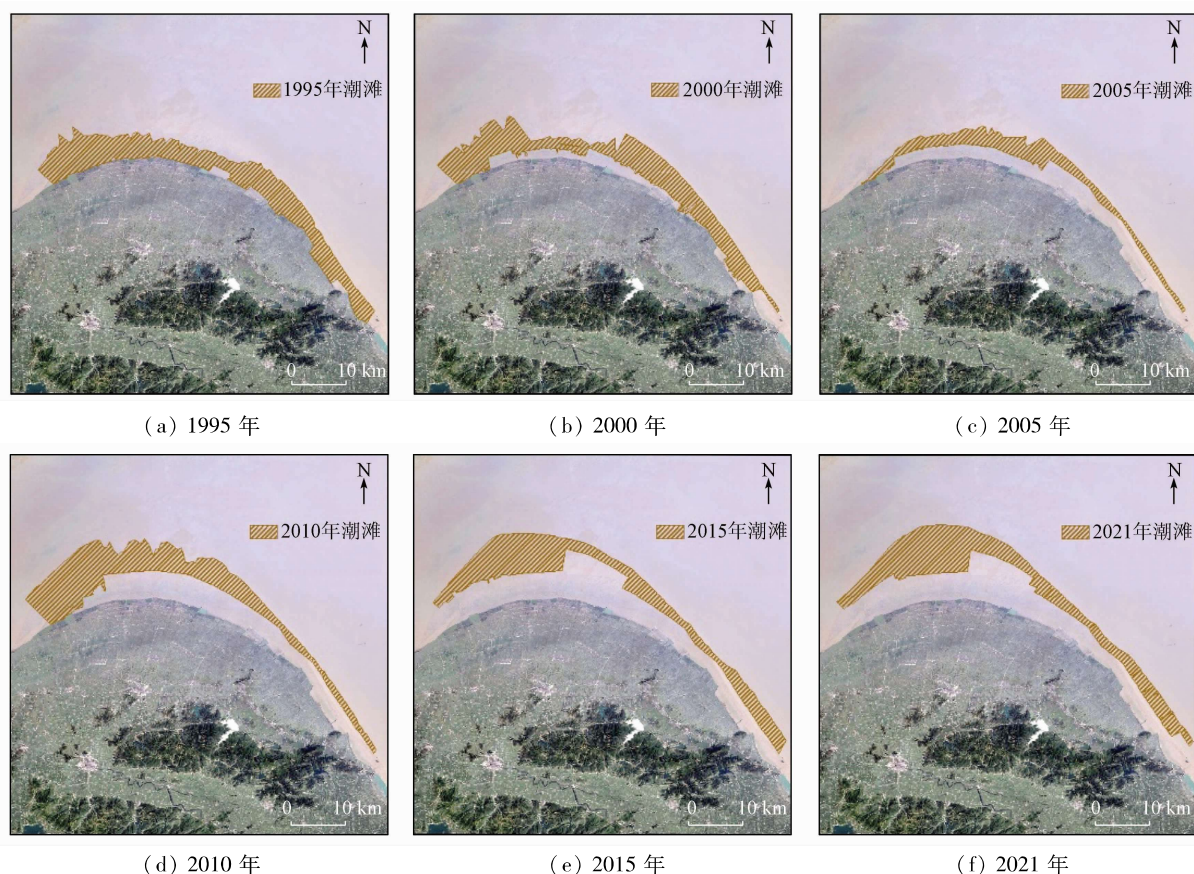


图 6 潮滩提取结果

Fig. 6 Extraction results of tidal flat

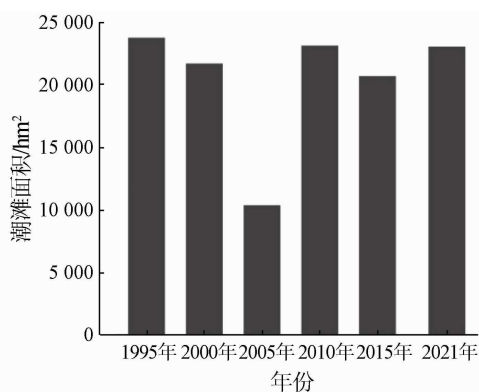


图 7 潮滩面积统计

Fig. 7 Statistics of tidal flat area

3.1.2 精度评价

根据目视分类结果,构建分类结果混淆矩阵(表1),并统计各期潮滩精度(表2)。总体精度表示所有正确分类的土地覆盖类别的检验点数所占总抽取的检核点数的百分比;用户精度表示分类结果中样本点的类别与地面实际类别相同的条件概率;生产者精度表示地面获得的实际资料参考点类别与分类结果中对应点类别相一致的条件概率;Kappa系数是1960年由Cohen首先提出的一种应用于遥感影像分类结果评价的一致性检验方法,一般而言,Kappa值介于0~1之间,Kappa值越大表示分类精度越高(表2)。

表 1 潮滩提取精度评价混淆矩阵(2021 年)

Tab. 1 Confusion matrix for evaluation of tidal flat extraction accuracy in 2021

识别类型	实测类型		行总数	用户精度/%
	潮滩	其他		
潮滩	43	4	47	91.49
其他	2	191	193	98.96
列总数	45	195	240	
生产者精度/%	95.56	97.95		

表 2 潮滩提取精度评价结果汇总

Tab. 2 Summary of evaluation results of tidal flat extraction accuracy

年份	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2021 年
总体精度/%	95.14	93.87	92.48	93.37	96.50	95.99
Kappa 系数	0.902 7	0.871 2	0.846 3	0.865 6	0.929 8	0.919 3

由表2可见本研究提取的6期潮滩总体精度都在90%以上,并且Kappa系数所反映的分类精度都达到了最佳^[25],表明本研究方法能有效地提取潮滩区域。

3.2 潮滩时空变化分析

3.2.1 潮滩地理中心空间变化

逐一计算6期潮滩区域的地理中心,并统计潮滩中心点位移情况,具体如图8和表3所示。

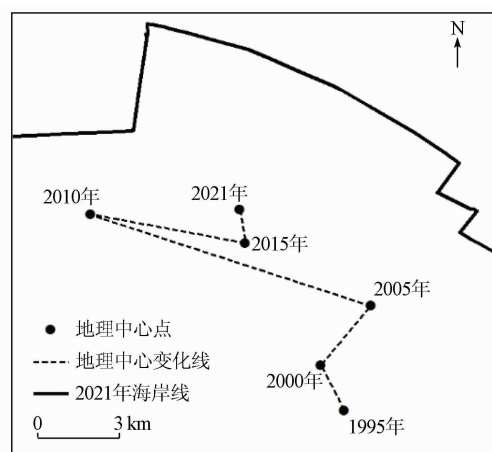


图 8 潮滩地理中心时空变化

Fig. 8 Spatio-temporal variation of geographical center of tidal flat

表 3 潮滩地理中心迁移情况

Tab. 3 Migration of geographical center of tidal flat (m)

迁移时段	迁移距离		总迁移
	西/东迁移	南/北迁移	
1995—2000 年	-701 ^①	1 700	1 389
2000—2005 年	1 614	2 160	2 696
2005—2010 年	-8 893	3 510	9 561
2010—2015 年	4 926	-1 150	5 058
2015—2021 年	-171	1 240	1 252
1995—2021 年	-3 225	7 460	8 127

①向西、南迁移标记为负值。

从中心迁移轨迹(图8)来看,潮滩区域地理中心经历了“西北—东北—西北—东南—西北”的复杂迁移过程,但总体呈现由东南向西北迁移的趋势,累计迁移距离为28 083 m,总迁移距离为8 127 m。从各个迁移方向上看,西移发生在1995—2000年、2005—2010年和2015—2010年,西移距离分别为701 m,8 893 m和171 m,速度分别为 $140.2 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, $1 778.6 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $34.2 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$;东移发生在2000—2005年和2010—2015年,距离分别为1 614 m和4 926 m,速度分别为 $322.8 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $821 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$;南移只发生在2010—2015年,距离为1 150 m,速度为 $230 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$,这主要是由于2010—2015年间研究区西侧海岸线外移潮滩减少,而东南侧潮滩增加明显,导致潮滩地理中心向东南方向迁移;北移连续发生在1995—2010年和2015—2021年,距离分别为7 370 m和1 240 m,速度分别为 $491.3 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $206.7 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

总体上,地理中心向西迁移了3 225 m,速度为 $124 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$;向北迁移了7 460 m,速度为 $286.9 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$,南北方向迁移的跨度距离大于东西方向的迁移跨度表明潮滩南北方向变化大于东西方向变化。从各个迁移阶段看,2005—2010年在东西和南北方向上的迁移距离均为最大,说明这5 a间潮滩发生了最为明显的变化。

3.2.2 高、低潮线空间变化

表4显示,除2000—2005年低潮线向内退缩外,其余时段高、低潮线均以不同速率外扩。高潮线外扩最快的时段是2000—2005年,达到 $233.87\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$;最慢的时段是2015—2021年,仅为 $23.65\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$;低潮线外扩最快的时段是2005—2010年,达到 $461.52\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

表4 高(低)潮线迁移速率

Tab.4 High (low) tidal line migration rate ($\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$)

时段	迁移速率	
	高潮线(海岸线)	低潮线
1995—2000年	215.18	395.22
2000—2005年	233.87	-91.42 ^①
2005—2010年	161.71	461.52
2010—2015年	197.35	132.89
2015—2021年	23.65	60.10

①潮线退缩标记为负值。

3.2.3 潮滩面积及空间变化原因分析

研究发现,30余年间,杭州湾南岸慈溪段潮滩基本保持北移的态势,但是潮滩面积基本维持在相对稳定的水平,仅在2000—2005年间出现骤减,对比图6和表4可知,此时段内海岸线发生了明显外移,但潮滩北界相较于2000年并未明显外移,西侧潮滩还出现了消退的情况,以上因素综合导致了2005年的潮滩面积大幅减少。张华国等^[23]研究了1986年以来杭州湾围垦淤涨状况,发现2000年以后每年围垦面积增长的区域数量急剧上升,并推测在2001—2003年间有一轮较大规模的围垦工程。2001年,慈溪市作出了开发建设杭州湾新区的战略决策^[26];2003年,杭州湾跨海大桥开始奠基建设,大桥又恰好位于潮滩消退明显的西侧。这一系列涉及该区域的重大事件,可能是造成慈溪市2000—2005年海岸线剧烈外移、潮滩显著减少的原因。

而此后的5a间,潮滩则以 $461.52\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率快速淤涨,因此,海岸线的剧烈外移可能会在未来一定时期内推动潮滩的淤涨。孙超等^[27]研究江苏中部沿海盐沼演变与围垦的关系时也认为“围垦活动能够改变原潮滩的沉积环境”,推动盐沼扩张。

另外,2010—2021年间潮滩面积保持在较稳定的水平,2015—2021年潮滩地理中心和高、低潮线迁移也较小,可见近10a,尤其是2015年之后针对潮滩的开发利用强度大幅减弱。近年来,国家为了应对海洋生态环境日益严峻的形势和海洋开发秩序混乱等问题,相继出台政策管控围填海活动。2018年,国务院发布了《国务院关于加强滨海湿地保护严格管控围填海的通知》^[28],严格限制了“向海索地”。因此,在未来一定时期内,研究区内潮滩在空

间形态和空间位置上很可能以稳定的速度缓慢发展。

4 讨论

在本研究中,影像成像时的瞬时潮位会对潮滩提取的精度产生直接影响。潮滩提取精度主要取决于低潮线提取的精度,这就需要研究所使用的影像拍摄时间处于该海域的低潮期,因此需要对影像和其拍摄时间的潮位进行星地数据匹配。潘存鸿等^[29-30]在研究杭州湾潮汐特征的研究时介绍了杭州湾沿岸潮位站分布:杭州湾北岸设有澉浦、乍浦、金山嘴和芦潮港4个长期潮位站,杭州湾南岸仅有镇海口1个长期潮位站。这些潮位站均未在研究区范围内,其提供的潮汐实测数据不能客观地反映研究区潮汐特征。而国家海洋信息中心的全球潮汐预报服务平台(<http://global-tide.nmdis.org.cn/>)提供了1980—2022年全球485个主要港口的潮汐预报数据,其中“海黄山”站点(121.50°E , 30.21°N)处于研究区核心地带,可以作为相对客观的潮位参考数据。本研究统计了所使用的每景影像拍摄时间对应的预报潮高,并对多年潮汐数据做了简单分析,发现该站点的低潮潮高通常在80~120cm之间,经统计,共有14景影像成像时的预报潮位低于120cm,并在本研究设定的6个时段内都有分布,因此本研究提取的潮滩具有一定的可信度。

然而,本研究主要基于“云量”因素筛选影像,最终完成潮滩的提取,是存在一定随机性的。即便低云量的数据量非常丰富,但影像拍摄时间未在低潮期,提取出的水边线也无法认为是低潮线。因此,可以在筛选影像前进行星地数据的匹配,并以此作为影像筛选的依据,例如Landsat系列卫星在本研究区的过境时间约为北京时间上午10:00前后,仅需要统计低潮潮时在上午10:00左右的日期,再与卫星过境日期进行匹配,便可高效筛选目标影像,并大幅降低低潮线提取的不确定性。

当然,这一定程度上还依赖于遥感卫星的重访周期。若非Landsat系列数据在时间尺度上覆盖了此前的几十年,其16d的重访周期会成为星地数据匹配的消极因素。近年来,随着国产卫星遥感数据(如高分、资源、环境等系列数据)获取愈发便捷和Sentinel系列数据可免费获取,大大弥补了原本匮乏的数据源。尽管不同数据间由于传感器设计不同,几何位置和波段设置上存在差异,多源数据交叉使用时,数据匹配存在一定困难,但遥感技术在潮滩监测领域的应用仍具备非常光明的前景。

5 结论

本研究结合 GEE 遥感云计算平台和 GIS 技术, 选用 1990—2021 年间共 77 景 Landsat 卫星影像, 通过提取水边线和海岸线, 实现了对杭州湾南岸慈溪段的潮滩提取和面积估算, 并对潮滩区域的变化情况展开了分析, 为慈溪潮滩湿地的管理与保护提供了技术参考。取得的主要结论如下:

1) 本研究使用 Landsat 卫星影像作为数据源, 在保证影像质量的同时满足了较长时序监测的需要; 使用阈值分割法提取了影像的瞬时水边线; 通过 DSAS 以及 Python 语言编程将研究对象从线要素转变为点要素, 再由经过筛选的点要素拟合出研究所需的平均低潮线; 基于潮滩的定义, 将平均低潮线与海岸线合围, 提取出了 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2021 年 6 期潮滩区域, 并且达到了较高的精度, 说明该方法适用于本研究。

2) 本研究大部分影像数据处理工作在 GEE 遥感云计算平台完成, 自动化程度高, 对数据量较大的时序监测研究非常友好; DSAS 模块通过对研究对象要素的转变, 较为科学客观地实现了低潮线的提取; 在海岸线信息比较明晰的(基岩、人工海岸)区域, 可以比较便捷地提取出潮滩区域, 具备一定的推广性。

3) 本研究发现杭州湾南岸慈溪段潮滩面积基本维持在 20 000 ~ 24 000 hm^2 区间, 2000—2005 年间陡然减少至 10 344 hm^2 , 2010 年又恢复至原先水平; 潮滩空间变化趋势是由南向北迁移, 迁移速度为 286.9 $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中 2005—2010 年潮滩的空间变化最为明显。

4) 本研究认为沿海围垦和潮滩淤涨共同影响了潮滩面积和空间的变化, 大范围的沿海围垦可能在未来一定时期内促进潮滩的淤涨, 而这一切最主要的驱动力是地方政策, 随着针对围填海活动的严控政策相继出台, 潮滩将保持稳定的发展态势。

当然, 基于“云量”因素筛选影像具有一定的随机性。在后续的研究中将结合潮汐预报数据, 进行星地数据匹配, 从而实现精准、高效的影像筛选, 并尝试引入更高时空分辨率的多源数据, 实现更高精度的潮滩提取和监测。

参考文献 (References):

- [1] 王颖, 朱大奎. 中国的潮滩[J]. 第四纪研究, 1990(4): 291 - 300.
- [2] 时钟, 陈吉余, 虞志英. 中国淤泥质潮滩沉积研究的进展[J]. 地球科学进展, 1996(6): 37 - 44.
- [3] 张春桂. MODIS 遥感数据在福建省海岸带滩涂资源监测中的应用研究[J]. 海洋学报, 2007(4): 51 - 58.
- [4] 王小龙, 张杰, 初佳兰. 基于光学遥感的海岛潮间带和湿地信息提取——以东沙岛(礁)为例[J]. 海洋科学进展, 2005(4): 477 - 481.
- [5] 王小丹, 方成, 康慧, 等. 曹妃甸地区潮间带演变的遥感监测[J]. 海洋通报, 2014, 33(5): 559 - 565.
- [6] 王靖雯, 牛振国. 基于潮位校正的盐城滨海潮间带遥感监测及变化分析[J]. 海洋学报, 2017, 39(5): 149 - 160.
- [7] 韩倩倩, 牛振国, 吴孟泉, 等. 基于潮位校正的中国潮间带遥感监测及变化[J]. 科学通报, 2019, 64(4): 456 - 473.
- [8] 张媛媛, 高志强, 刘向阳, 等. 基于遥感水边线的潮滩面积提取方法研究[J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(3): 56 - 61.
- [9] 胡允和, 施德忠. 慈溪海涂促淤浅析[J]. 浙江水利科技, 1984(2): 22 - 32.
- [10] 王丽佳, 李加林, 田鹏, 等. 杭州湾南岸围垦土地人类活动强度及对滨海湿地覆被类型的影响[J]. 上海国土资源, 2020, 41(1): 4 - 10.
- [11] 韩茜. 基于遥感技术的我国潮滩资源现状研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2011.
- [12] 张振德, 肖继春. 遥感在滩涂演变调查中的应用方法研究[J]. 国土资源遥感, 1995, 7(3): 25 - 28. doi:10.6046/gtzyyg.1995.03.05.
- [13] Wang Y, Zhu D K. Tidal flats of China[J]. Quaternary Sciences, 1990(4): 291 - 300.
- [14] Shi Z, Chen J Y, Yu Z Y. Sedimentation on the intertidal mudflat in China: An overview[J]. Advances in Earth Science, 1996(6): 37 - 44.
- [15] Zhang C G. The application of MODIS data in tidal flat resource monitoring of coastal zone of Fujian Province in China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007(4): 51 - 58.
- [16] Wang X L, Zhang J, Chu J L. Extraction of remotely sensed information of island intertidal zone and wetland: Taking the Dongsha Island as an example[J]. Advances in Marine Science, 2005(4): 477 - 481.
- [17] Wang X D, Fang C, Kang H, et al. Remote sensing monitoring of the Caofeidian tidal zone evolution[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(5): 559 - 565.
- [18] Wang J W, Niu Z G. Remote-sensing analysis of Yancheng intertidal zones based on tidal correction[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(5): 149 - 160.
- [19] Han Q Q, Niu Z G, Wu M Q, et al. Remote-sensing monitoring and analysis of China intertidal zone changes based on tidal correction[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(4): 456 - 473.
- [20] Zhang Y Y, Gao Z Q, Liu X Y, et al. The extraction method of tidal flat area based on remote sensing waterlines[J]. Ocean Development and Management, 2018, 35(3): 56 - 61.
- [21] Hu Y H, Shi D Z. Brief analysis of Cixi sea flat to promote sedimentation[J]. Zhejiang Hydraulics, 1984(2): 22 - 32.
- [22] Wang L J, Li J L, Tian P, et al. Impacts of human activity on coastal wetland land cover changes related to reclamation on the south coast of Hangzhou Bay[J]. Shanghai Land and Resources, 2020, 41(1): 4 - 10.
- [23] Han Q. Research on the status of tidal resources in China using remote sensing technology[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011.
- [24] Zhang Z D, Xiao J C. Remote sensing in tidal flat evolution investigation: Application method research[J]. Journal of Remote Sensing, 1995, 7(3): 25 - 28. doi:10.6046/gtzyyg.1995.03.05.

- Zhang Z D, Xiao J C. The application of remote sensing to investigate tidal flat evolution [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 1995, 7(3): 25–28. doi:10.6046/gtzyyg. 1995. 03. 05.
- [13] 赵明才, 章大初. 海岸线定义问题的讨论[J]. 海岸工程, 1990(1): 91–99.
- Zhao M C, Zhang D C. Discussions on the definition of shoreline [J]. Coastal Engineering, 1990(1): 91–99.
- [14] 盛静芬, 朱大奎. 海岸侵蚀和海岸线管理的初步研究[J]. 海洋通报, 2002(4): 50–57.
- Sheng J F, Zhu D K. Discussion about coastline erosion and management [J]. Marine Science Bulletin, 2002(4): 50–57.
- [15] 吴一全, 刘忠林. 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.
- [16] 杨修国. 图像阈值分割方法研究与分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- Yang X G. Threshold image segmentation research and analysis [D]. Shanghai: East China Normal University, 2009.
- [17] Feyisa G L, Henrik M, Rasmus F, et al. Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 23–35.
- [18] Xu H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(14): 3025–3033.
- [19] 饶萍, 王建力. 最优分区与最优指数联合的水体信息提取[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(5): 702–712.
- Rao P, Wang J L. Water extraction based on the optimal subregion and the optimal indexes combined [J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(5): 702–712.
- [20] 陈星壮. 基于高分辨率遥感影像的城市水体提取算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- Chen X Z. Urban open water extraction from high resolution remote sensing images [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [21] Otsu N. Threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1979, 9(1): 62–66.
- [22] Thieler E, Himmelstoss E, Zichichi J, et al. The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4. 0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change [R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2009.
- [23] 张华国, 郭艳霞, 黄韦良, 等. 1986年以来杭州湾围垦淤涨状况卫星遥感调查[J]. 国土资源遥感, 2005, 17(2): 50–54, 81. doi:10.6046/gtzyyg. 2005. 02. 12.
- Zhang H G, Guo Y X, Huang W G, et al. A remote sensing investigating of inring and silting in Hangzhou Bay since 1986 [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2005, 17(2): 50–54, 81. doi:10.6046/gtzyyg. 2005. 02. 12.
- [24] Foody G M. Status of land cover classification accuracy assessment [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 185–201.
- [25] Congalton R G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data [J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 37(1): 35–46.
- [26] 朱世强. 高水平建设慈溪杭州湾新区[J]. 今日浙江, 2003(19): 33–34.
- Zhu S Q. High-level construction of Hangzhou Bay New District in Cixi [J]. Zhejiang Today, 2003(19): 33–34.
- [27] 孙超, 刘永学, 李满春, 等. 近25 a来江苏中部沿海盐沼分布时空演变及围垦影响分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(9): 1486–1498.
- Sun C, Liu Y X, Li M C, et al. Spatiotemporal evolution of salt marsh and influential analysis of reclamation of Jiangsu middle coast in recent 25 years [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(9): 1486–1498.
- [28] 国务院. 国务院关于加强滨海湿地保护严格管控围填海的通知 [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-07/25/content_5309058.htm.
- The central people's government of the PRC. Notice of the state council on strengthening the protection of coastal wetlands and strictly controlling reclamation [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-07/25/content_5309058.htm.
- [29] 潘存鸿, 郑君, 曾剑, 等. 杭州湾年最大潮差分析[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2021, 36(2): 201–209.
- Pan C H, Zheng J, Zeng J, et al. Analysis of annual maximum tidal range in Hangzhou Bay [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2021, 36(2): 201–209.
- [30] 潘存鸿, 郑君, 陈刚, 等. 杭州湾潮汐特征时空变化及原因分析[J]. 海洋工程, 2019, 37(3): 1–11.
- Pan C H, Zheng J, Chen G, et al. Spatial and temporal variations of tide characteristics in Hangzhou Bay and cause analysis [J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(3): 1–11.

Extraction and spatio-temporal change analysis of the tidal flat in Cixi section of Hangzhou Bay based on Google Earth Engine

ZHENG Xiucheng^{1,2,3}, ZHOU Bin^{1,2,3}, LEI Hui^{1,2,3}, HUANG Qiyu³, YE Haolin³

(1. Institute of Remote Sensing and Earth Science, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Urban Wetlands and Regional Change, Hangzhou 311121, China; 3. School of Information Science and Technology, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China)

Abstract: At present, the common methods for extracting tidal flats using remote sensing images tend to estimate tidal flat boundaries. Therefore, it is difficult to ensure high extraction accuracy. This study combined remote sensing cloud computing platform Google Earth Engine with the geographic information system (GIS) technology

and selected 77 Landsat images during 1990—2021. Meanwhile, the mean high - tide line was set to the artificial coastline obtained through visual interpretation, and the mean low - tide line was determined through the fitting of the shoreline. Based on these, this study extracted the tidal flat in the Cixi section on the south bank of the Hangzhou Bay and estimated its area. Furthermore, this study analyzed the spatio - temporal changes in the area of the tidal flat. The results are as follows. During 1990—2021, the area of the tidal flat in the Cixi section on the south bank of the Hangzhou Bay was roughly maintained in the range of 20 000 ~ 24 000 hm², and the tidal flat migrated from south to north at a speed of 286.9 m · a⁻¹. The main driving force behind the spatial and area changes of the tidal flat was local policies.

Keywords: tidal flat; Google Earth Engine; DSAS; shoreline; Hangzhou Bay

(责任编辑: 陈 理)

下期要目

- 王仁军 基于高分六号 WFV 数据的可可西里湖泊水体识别模型
晏红波 基于高光谱特征的土壤含水量遥感反演方法综述
刘广进 基于 DenseNet 与注意力机制的遥感影像云检测算法
孙 宇 结合随机擦除和 YOLOv4 的高空间分辨率遥感影像桥梁自动检测
殷亚秋 海南岛 2018 年矿山地质环境遥感评价和生态修复对策
黄 佩 植被遥感信息提取方法研究进展及发展趋势
赵玉灵 油气矿山越界开采遥感监测方法探索
吴浩波 基于叶片空间分布的植被遥感适宜尺度方法
王雪洁 基于随机森林算法对 ERA5 太阳辐射产品的订正
朱 琦 基于多时相 Landsat8 影像的海南岛热带天然林类型遥感分类
马晓宇 基于深度学习的边境地区城市发展与安防研究
孔爱玲 基于知识引导的遥感影像融合方法
李 霞 荆南三口地区生态系统服务价值对城乡建设用地扩张的响应机理
叶勤玉 三峡库区(重庆段)水源涵养功能遥感监测及时空分布特征分析
覃 纹 广西糖料蔗种植区干旱遥感时空分析
廖 廓 基于多维卷积神经网络的多源高分辨率卫星影像茶园分类
张 伟 GXL 二次开发在国产卫星数据处理中的应用研究