

doi: 10.6046/zrzyyg.2022182

引用格式: 李毅,程丽娜,鲁莹莹,等. 基于最大值合成和最大类间方差法莱州湾滨海滩涂变化研究[J]. 自然资源遥感,2022,34(4):68-75. (Li Y, Cheng L N, Lu Y Y, et al. A study on the changes in coastal tidal flats in the Laizhou Bay based on MSIC and OTSU[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4):68-75.)

基于最大值合成和最大类间方差法 莱州湾滨海滩涂变化研究

李毅^{1,2}, 程丽娜^{2,3}, 鲁莹莹^{2,4}, 张博淳^{1,2}, 于森^{1,2}, 贾明明²

(1. 吉林建筑大学测绘与勘查工程学院, 长春 130118; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102; 3. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061; 4. 长春新区北湖英才学校, 长春 130000)

摘要: 滨海滩涂是一种重要的滨海湿地类型,在维护生物多样性、影响全球气候和环境变化等方面具有重要的生态价值。由于滨海滩涂只在最低潮时期短暂全部呈现,先前的遥感解译结果中,滩涂信息存在明显的漏分和误分现象。基于 Google Earth Engine(GEE)平台和 Landsat 系列卫星数据,构建 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年 4 个时间段的高质量密集时间序列影像堆栈,结合最大光谱指数合成算法(maximum spectral index composite, MSIC)和最大类间方差算法(Otsu algorithm, OTSU),对我国莱州湾滨海滩涂资源进行快速、自动提取。基于面向对象分析技术和模糊逻辑分析方法(fuzzy-based segmentation parameter, FbSP)最优尺度对滨海滩涂周边土地覆被进行解译,分析滨海滩涂的时空演变规律。结果表明:1990—2020 年间莱州湾滨海滩涂呈现持续减少的趋势,2020 年莱州湾滨海滩涂面积为 822.38 km²,相较于 1990 年减少了约 40%,其中,2000—2010 年缩减幅度最大,为 304.78 km²;除黄河口区域滨海滩涂向海迁移,莱州湾其他区域的滨海滩涂斑块整体呈向陆迁移趋势;人类活动是近 30 a 间莱州湾滩涂变化的主导因素,其中,养殖池/盐田的扩张直接侵占了 414.20 km² 的滨海滩涂。

关键词: 滨海滩涂; Landsat 影像; MSIC; OTSU 算法; Google Earth Engine(GEE)

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)04-0068-08

0 引言

滨海滩涂位于海陆生态过渡地带,受潮汐作用的影响,在高潮时被海水浸没,低潮时露出海面^[1]。由于其独特的海陆双重特征,在稳定海岸线、维持生态平衡和保护生物多样性等方面起着重要作用^[2-3]。此外,滩涂湿地作为重要的后备土地资源,有着巨大的开发潜力^[4]。但随着开发为养殖池、围填造地等滩涂围垦利用情况的加剧^[5-6],滨海滩涂正面临着极大的威胁^[7]。因此,对滩涂资源开展准确详实的遥感监测,进一步分析其时空演变驱动机制,不仅可以为滩涂资源的科学开发提供重要依据,而且对保护其可持续发展具有重要意义。

全面掌握滨海滩涂变化情况的关键在于滩涂斑块信息的高精度完整提取。其困难来源于卫星过境

时潮位的不确定性,一定时间段内的遥感影像并不能提取出准确完整的滩涂信息。针对这一问题,国内外学者进行了一系列的相关研究。Murray 等^[8]利用区域潮汐模型获取海水高潮与低潮时的遥感影像,以确定瞬时水边线,并进行叠加,完成了东亚滨海的潮间带湿地地图的绘制;Wang 等^[9]基于 GEE(Google Earth Engine)使用 Landsat 时序影像,通过计算像元的年度水体频率值,确定最高潮位线和低水线的水体频率阈值范围来识别和划分潮间带,然后根据 AOIs(areas of interest)的植物频率分布阈值进行滩涂和植被的分类;Jia 等^[10]利用最大光谱指数合成算法(maximum spectral index composite, MSIC)和最大类间方差算法(Otsu algorithm, OTSU),基于 GEE 使用 Sentinel-2 数据绘制了中国 10 m 空间分辨率滩涂分布图;智超等^[11]借助 GEE 构建时序遥感指数,基于样本分析遥感指数特征分类水

收稿日期: 2022-05-09; 修订日期: 2022-07-18

基金项目: 科技基础资源调查专项项目“中国主要沼泽植物种质资源数据库和信息共享平台建设”(编号: 2019FY100607)和中国科学院青年创新促进会项目“中国滨海生态系统遥感”(编号: 2021227)共同资助。

第一作者: 李毅(2002-),男,本科生,研究方向为滨海湿地遥感。Email: liyi@iga.ac.cn。

通信作者: 程丽娜(1996-),女,硕士研究生,研究方向为滨海湿地遥感。Email: chengln20@mails.jlu.edu.cn。

体与植被,根据潮间带不同植物物候及动力特征进行潮间带湿地提取;Zhao 等^[12]通过计算长时序影像中每个像元的分位数,分别选取第 5 和第 95 分位数像素合成低、高潮位基准面影像,然后使用自适应二分类器对基准面影像进行水体和陆地的二分类,根据潮滩高潮时淹没、低潮时露出水面的特性,绘制了中国南方的潮滩地图;李振等^[13]建立各类土地利用类型的叠合光谱图,通过建立决策树法进行地物分类,绘制了胶州湾海岸带土地利用图;张康永^[14]基于 GEE 平台,通过分析滩涂光谱信息的周期性变化规律,选取分类特征进行影像合成,综合随机森林分类法和面向对象的图像分割技术,开展了杭州湾以北滨海滩涂 30 a 来的遥感监测和驱动力分析研究。然而目前,尚缺乏针对莱州湾地区滩涂变化的相关研究。

基于以上分析,考虑到数据的获取性、一致性及空间分辨率,本研究借助 GEE 平台构建 Landsat 高质量密集时序影像堆栈,基于 MSIC 和 OTSU 算法实现 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年莱州湾地区滩涂信息的高精度提取,结合滩涂周边土地覆被变化数据集从自然和人为因素方面探讨 30 a 间莱州湾滩涂资源的数量变化以及时空分布特征,分析其演变驱动机制,以期为该地区科学开发和合理保护滩涂资源提供技术参考和数据基础。

1 研究区概况及其数据源

1.1 研究区概况

莱州湾位于山东省北部,地理坐标为 E118°39' ~ 120°35',N36°55' ~ 38°00',主要包括东营市、潍坊市和烟台市部分地区,内有以黄河为主的多条河流以及龙口港等重要港口,坐落着黄河三角洲国家自然保护区,拥有丰富的滩涂资源,区内气候为温带季风气候。本研究依据海岸带环境地质调查规范(1:25 万),以莱州湾地区海岸线为中心,向陆海两侧做 10 km

缓冲区作为研究区边界(图 1)。研究区内受不规则半日潮影响,平均潮差为 1.01 m,最大潮差为 2.97 m。

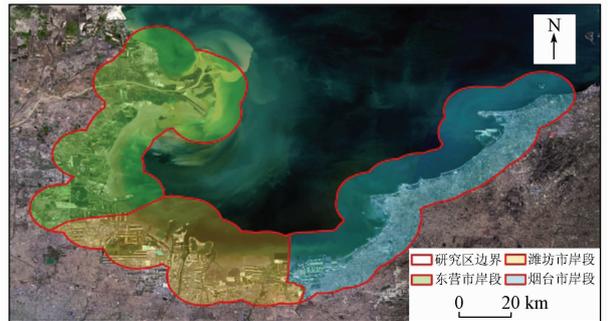
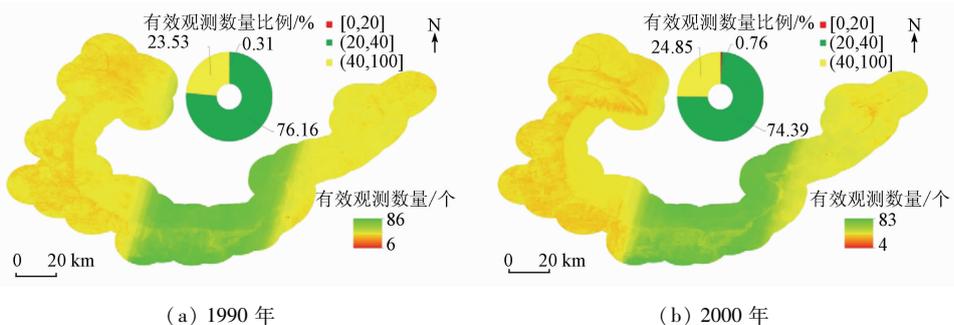


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

1.2 数据源及处理

本研究以 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年为研究年份,基于 GEE 云计算平台,便捷调用覆盖研究区域目标年份及其前后 1 a(时间窗口为 3 a)所有符合云量要求的 Landsat TM 和 OLI 地表反射率影像集合,构建初始密集时间序列影像堆栈。利用对应的去云函数进行云掩模以获取有效观测像素,构成研究区域目标年份的高质量密集时间序列影像堆栈。经统计,研究区域目标年份每个像素的有效观测数量空间分布及整体分布比例如图 2 所示。2000 年、2010 年和 2020 年滨海滩涂以及其周边土地覆盖类型(内陆地物)验证样本均在 Google Earth 高空间分辨率影像中直接获取。其中,采集的滩涂验证样本均选取低潮时期位于滩涂边缘的点。1990 年验证样本通过文献检索,查找历史地图等方式获取。最终,1990 年验证样本共 1 022 个(其中滩涂 232 个,其他土地覆被 790 个);2000 年验证样本共 1 136 个(其中滩涂 251 个,其他土地覆被 885 个);2010 年验证样本共 1 127 个(其中滩涂 281 个,其他土地覆被 846 个);2020 年验证样本共 1 068 个(其中滩涂 231 个,其他土地覆被 837 个)。



(a) 1990 年

(b) 2000 年

图 2-1 研究区域目标年份有效观测数量空间分布及比例

Fig. 2-1 Interannual distribution and proportion of each image stack

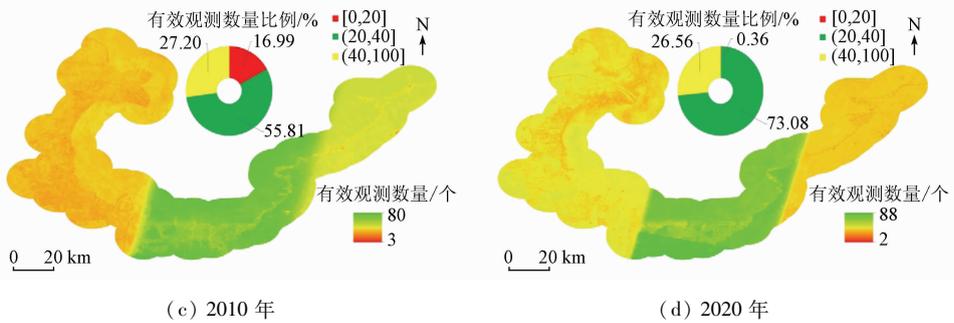


图 2-2 研究区域目标年份有效观测数量空间分布及比例

Fig. 2-2 Interannual distribution and proportion of each image stack

2 研究方法

2.1 技术路线

由于潮汐的不确定性,为了提取完整的滩涂斑块信息,本研究结合前人的相关研究^[1,10]。首先,通过构建 Landsat 高质量密集时序影像堆栈代替单景影像获取遥感信息的方法;其次,基于 MSIC 算法获取研究区目标年份最高、最低潮影像;最后,利用 OTSU 算法进行图像二值化分类,实现 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年莱州湾地区滩涂信息的高精度提取。结合模糊逻辑分析方法(fuzzy-based segmentation parameter, FbSP)和面向对象分析技术获取滩涂的周边土地覆被变化数据集,在此基础上探讨近 30 a 间莱州湾滩涂资源的数量变化以及空间分布特征,分析该地区滩涂演变驱动机制,具体流程如图 3 所示。

元,逐像素计算指定光谱指数值,并利用内置的排序函数进行排序,以最大值像素作为合成影像中对应位置的像素。对所有位置的像素重复该过程即可得到指定光谱指数最大值合成影像。

OTSU 算法又名大津算法,是 Otsu^[15]提出的一种自动选取最优阈值进行图像分割的方法。该方法根据图像灰度值,自动选取使类间方差最大、类内方差最小的最优分割阈值,对图像进行二值化分割,实现图像自动化的二分类。

面向对象的分类是通过对影像分割,基于分割得到的对象为基本元素进行分类的方法。在分割得到的单个对象中,所有的像素均可认为是同质像素^[16]。该方法不仅考虑像素的光谱特征,还考虑到影像的纹理和质地等因素。因此,面向对象的分类结果可以很好地避免噪声的影响,具有良好的整体性^[17]。在本研究中,为了提高分割精度和效率,采用 FbSP 自动确定多尺度分割的最佳分割参数。

2.2 滩涂及周边土地覆盖类型提取

2.2.1 滩涂提取

本文将滩涂定义为涨潮时被海水浸没,退潮时露出海面的砂质、淤泥或软泥质的无植被海岸浅滩。由于水体像素的改进型归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, mNDWI)值明显高于非水体像素,因此选取 mNDWI 指数进行 MSIC 合成,一方面能够突出水体与非水体像素的特征差异,同时能够更好地获取目标年份水体信息的最大覆盖区域,即最高潮影像;另外,水体像素的归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)值低于非水体像素(植被、滩涂),使用 NDVI 指数获取最低潮影像可显著增强植被、滩涂与水体间的特征差异,还可有效避免因潮汐的不确定性对滩涂提取产生的干扰^[1]。因此,本研究采用 MSIC 算法,分别选用 mNDWI 指数、NDVI 指数从 Landsat 高质量密集时序影像堆栈中合成目标年份的最高、最低潮影像。利用 OTSU 算法对最高潮影像进行二值分割,实现水体和非水体的分离,通过保

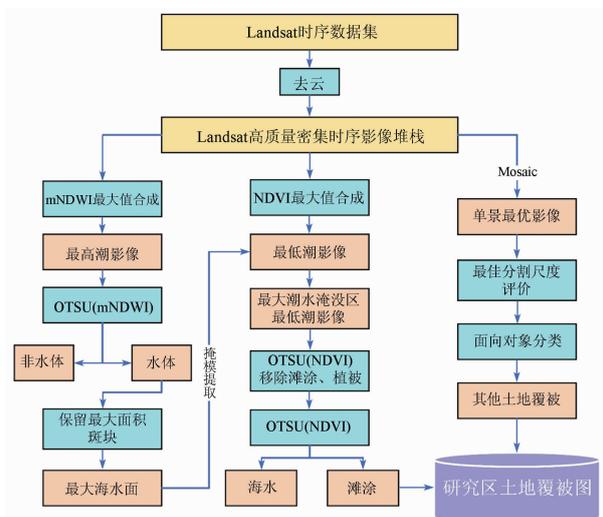


图 3 技术流程

Fig. 3 Technical flowchart

GEE 是谷歌公司推出的一个基于云计算的全球尺度遥感数据处理平台,其 API 库中提供了 MSIC 方法。该方法是对影像堆栈中同一位置的所有像

留最大面积斑块的方法获取目标年份的最大海水水面,对最低潮影像进行掩模提取得到最大潮水淹没区影像。为了去除淹没区植被的影响,再次采用OTSU算法进行二值分类,实现滩涂信息的高精度提取。

2.2.2 滩涂周边土地覆盖类型提取

针对莱州湾地区潮间带的景观特点,从研究的目的和遥感制图的角度出发,将研究区中除滩涂以外的地物类型分为:内陆植被、滨海植被、养殖池/盐田、人工表面、农田、裸地、内陆水体、海水。

本研究基于 eCognition9.2 平台,通过 FbSP 方法自动确定目标年份单景最优影像多尺度分割的最佳分割参数,在获取最佳分割尺度下基于面向对象技术目视解译获取滩涂周边土地覆被图。并以2020年的滩涂周边土地覆被图作为底图参考制作1990年、2000年、2010年的滩涂周边土地覆被图。

2.3 精度验证

本研究基于混淆矩阵,计算总体分类精度和 Kappa 系数,用以评价滩涂和周边地物的分类精度。混淆矩阵是根据像元的地表真实情况与该像元的分

类情况进行比较计算得出的。总体分类精度是被正确分类的像元数与总像元数的比值,是分类结果和检验数据一致性的评价指标。Kappa 系数采用一种多元技术,综合考虑混淆矩阵所有因素的一种精度评价指标。通常认为介于 0.61 ~ 0.80 则具有高度一致性;高于 0.80 则几乎完全一致^[18]。

3 结果与分析

3.1 滩涂及周边地物分类精度

利用选取的验证点对4期分类结果分别进行精度验证,计算得到了各研究年份的总体分类精度和 Kappa 系数。表1是根据选取的验证样本生成的研究区2020年滩涂及周边地物遥感解译结果的混淆矩阵,结果表明2020年滩涂及周边土地覆被分类结果总体精度为94%,Kappa系数为0.92。1990年、2000年和2010年分类结果的整体分类精度分别为88%、91%和90%,Kappa系数分别为0.85、0.89和0.88,表明分类结果与地表真实情况具有高度的一致性,各年份的分类精度均能满足进一步分析的要求。

表1 2020年滩涂及周边地物土地覆被分类结果的混淆矩阵

Tab.1 Confusion matrix of land cover classification results of tidal flats and surrounding land covers in 2020

类别	海水	养殖池/盐田	滨海植被	农田	内陆植被	滩涂	人工表面	内陆水体	裸地	总计
海水	105	0	0	0	0	7	0	1	0	113
养殖池/盐田	1	224	0	2	0	0	0	4	0	231
滨海植被	0	2	65	0	0	2	0	0	0	69
农田	0	4	0	222	1	0	2	0	1	230
内陆植被	0	0	4	0	17	0	0	0	0	21
滩涂	7	5	6	0	0	220	0	2	0	240
人工表面	0	0	1	9	1	0	110	0	1	122
内陆水体	2	0	0	0	0	2	0	31	0	35
裸地	0	0	0	0	0	0	0	0	7	7
总计	115	235	76	233	19	231	112	38	9	1 068

3.2 莱州湾滨海滩涂时空变化分布特征

莱州湾滨海地区1990—2020年土地覆盖变化情况如图4所示,叠加分析可知,2020年莱州湾地区的滩涂总面积为822.38 km²,较之1990年的1365.84 km²减少了543.46 km²,缩减幅度约为40%。近30 a期间,该地区的滩涂面积呈现持续减少的趋势。1990—2000年滩涂面积减少了150.94 km²;2000—2010年间的减少幅度最大,共减少304.78 km²;2010—2020年滩涂的缩减速率明显减缓,10 a间仅减少了87.74 km²。由于莱州湾地区涵盖范围较广,包含潍坊和烟台等多个市,各市对于滩涂湿地的保护力度和开发程度均不同,从而导致了莱州湾地区各岸段的滩涂变化状况之间也有所差异。根据围垦程度和岸线侵占情况,本研究将研究区分为东营市岸段、潍坊市岸段和烟台市岸段。

从整体上来看,东营市岸段滩涂面积占比最大,潍坊市岸段次之,烟台市岸段最小;缩减幅度最大的是潍坊市岸段,为323.56 km²,最小的是烟台市岸段,仅82.01 km²。东营市岸段的滩涂在3个岸段中是最广阔的,占莱州湾滩涂总面积的一半以上,该岸段在1990—2000年的减少幅度较小,为51.82 km²,在2000—2010年的减幅最大,达到了131.40 km²,在2010—2020年有小幅度的增加,增幅为45.32 km²。该岸段除黄河口地区附近滩涂海一侧边界整体上不断向海推进,且有较大的推进幅度外,其余地区滩涂海一侧边界均不断后移,陆侧边界持续向海推进。潍坊市岸段的滩涂整体上宽幅变化不大,呈现较规则的条状分布,在1990—2000年、2000—2010年、2010—2020年滩涂的面积减幅先增大后减小,同样在2000—2010年达到峰值,为144.31 km²,滩涂面

积呈持续减少的趋势,滩涂海一侧边界缓慢的向陆推进的同时,陆一侧边界不断向海推移。烟台市岸段的滩涂宽幅变化较大,呈现西宽北窄的形式,是滩涂面积最小的一个岸段,在1990—2000年、2000—

2010年和2010—2020年滩涂面积的减少幅度逐渐升高,分别为10.65 km²、29.09 km²和42.27 km²,滩涂面积同样呈持续减少的趋势,整体边界变化与潍坊市岸段相同。

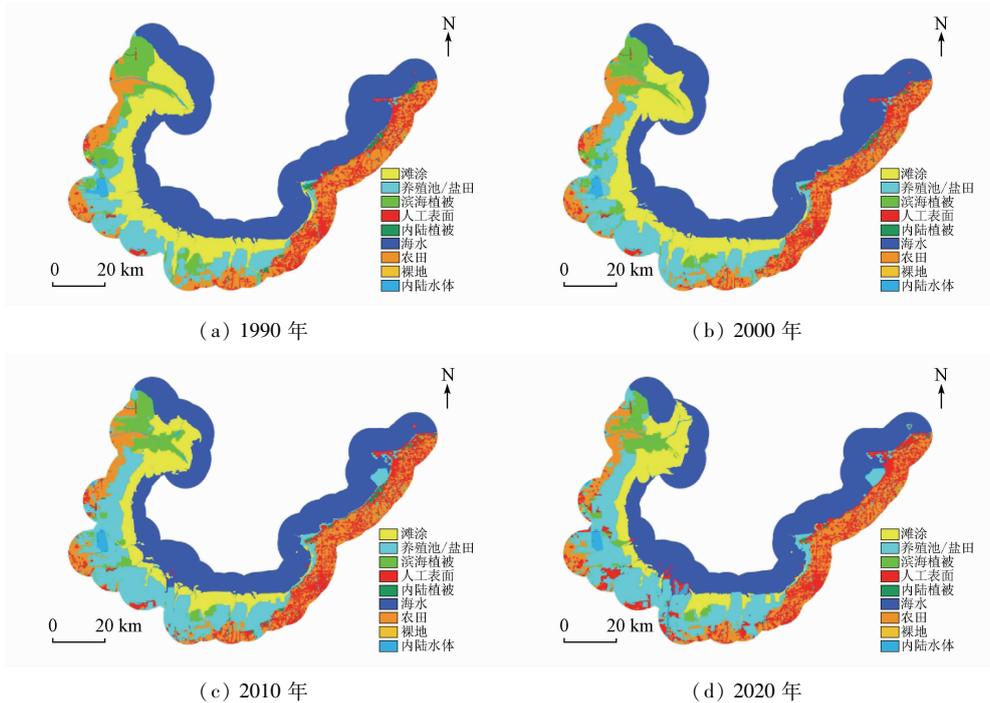


图4 1990—2020年莱州湾地区潮间带土地覆被
Fig. 4 Land cover of intertidal zone in Laizho Bay from 1990 to 2020

3.3 滩涂与周边土地覆被的相互转化

1990—2020年滩涂与周边地物相互转化的情况如图5所示,滩涂面积呈净流出状态,滩涂持续被侵占,最主要的侵占类型为养殖池/盐田,莱州湾沿岸除黄河口地区以外,侵占滩涂的情况均十分严重。其次是滨海植被,虽总体上不断减少,但仍有相当一部分滩涂转化为了滨海植被。滩涂与海水、内陆水体(河流)的相互转化量虽然较大,但面积总体变化上几乎持平,一方面是海平面上升使滩涂边界缩退,另一方面是河流泥沙输入使滩涂边界向海扩张,二者对滩涂的影响呈均势,整体对滩涂面积变化影

响不大。人工表面对滩涂的侵占虽然对比养殖池/盐田类型少,在1990—2000年间几乎没有侵占情况,然而,在2000—2010年和2010—2020年2个时段中侵占面积剧烈增加,有持续增长的趋势,空间上主要发生在潍坊市岸段,主要表现为围海圈地。其他地物如裸地和内陆植被等,虽然与滩涂也存在相互转化,但转化量较小。

1990—2020年间滩涂与周边地物的转化量如表2所示。可见,养殖池/盐田的面积急剧扩张,在30 a间增长了多达672.27 km²,增长率达到了45%以上。其中侵占滩涂面积为414.20 km²,滩涂面积的减少量对于养殖池/盐田面积增长的贡献率达到了62%,是最主要的贡献者,在1990—2000年、2000—2010年和2010—2020年间养殖池/盐田分别侵占滩涂135.42 km²、163.16 km²和95.04 km²,在2010年侵占量达到峰值之后减少。人工表面直接侵占滩涂的面积较少,30 a间共侵占24.68 km²。莱州湾地区互花米草等滨海湿地植被扩张侵占滩涂的面积较大^[19],近30 a间共有100.30 km²的滩涂转化为滨海植被。滩涂分别向海水和内陆水体转化了129.08 km²和46.06 km²,同时亦有155.58 km²海水和10.17 km²内陆水转化为滩涂,整体对滩涂面积影响较小。

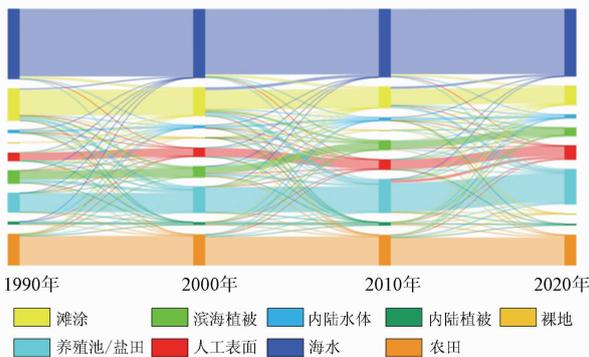


图5 1990—2020年滩涂与周边地物相互转化
Fig. 5 Mutual transformation tidal flats and surrounding features from 1990 to 2020

表2 1990—2020年土地利用转移矩阵
Tab.2 Land use transition matrix from 1990 to 2020

(km²)

土地利用类型	2020年										
	内陆植被	滨海植被	海水	裸地	内陆水体	农田	人工表面	滩涂	养殖池/盐田	总计	
1990年	内陆植被	49.03	1.51	0.00	0.16	0.69	45.67	20.80	0.00	7.53	125.39
	滨海植被	1.66	219.78	6.39	1.81	8.53	73.29	12.56	9.75	227.43	561.20
	海水	0.00	0.01	2 716.50	0.00	17.62	0.00	29.12	155.58	54.19	2 973.02
	裸地	0.00	0.00	0.00	3.40	0.00	0.11	0.19	0.00	0.92	4.62
	内陆水体	0.09	18.42	4.74	0.07	85.93	8.98	1.20	10.17	8.92	138.52
	农田	9.78	14.22	0.00	0.65	5.84	1 137.57	87.21	0.23	79.62	1 335.12
	人工表面	0.12	0.43	0.82	0.41	0.22	15.53	334.53	0.37	5.98	358.41
	滩涂	3.67	100.30	129.08	0.00	46.06	2.58	24.68	645.27	414.20	1 365.84
	养殖池/盐田	2.02	2.70	0.91	0.73	2.32	16.61	100.21	1.02	694.39	820.91
	总计	66.37	357.37	2 858.44	7.23	167.21	1 300.34	610.50	822.39	1 493.18	7 683.03

3.4 驱动力分析

滩涂的时空变化受到自然因素和人为因素的双重影响。自然因素包括海平面上升、入海河流泥沙输入以及潮流变化等；人为因素则为围海造田和养殖池开发等一系列开发活动。

海平面上升是滩涂面积变化重要的自然原因之一。根据2020年中国海平面公报,山东沿海海平面较常年高65 mm,比2019年高11 mm,预计未来30 a山东沿海海平面还将上升55~165 mm^[20]。自然状态下,海平面上升势必会直接导致滩涂海侧边界被海水侵蚀,在无大量泥沙输入的情况下,引起滩涂面积减少,这也是莱州湾除黄河口地区以外滩涂海侧边界退缩,滩涂面积减少的重要诱因。此外,泥沙输入也是滩涂生长、变化的重要原因。莱州湾地区河流资源丰富,拥有以黄河为主的多条河流,这些河流带来了巨量的泥沙输入,其中黄河的泥沙输入量占总量的99%以上^[21]。黄河口地区附近落潮历时大于涨潮历时的潮流特性^[22],也使得入海的泥沙在黄河口附近淤积成陆,滩涂海侧边界向海延伸。正是在上述因素的共同影响下,黄河口地区滩涂面积总体呈现出与莱州湾整体上相反的增长趋势,仅在2000—2010年期间有短暂下降,后恢复增加。2020年相较于1990年滩涂面积净增长了8.58 km²,在一定程度上减缓了整个莱州湾地区滩涂被侵占的形势。而莱州湾其他地区缺少足够的泥沙输入,并且落潮历时小于涨潮历时的潮流特性不利于泥沙淤积成陆^[23],在海平面上升的驱动下,导致滩涂的海侧边界不断被侵蚀,呈现出逐渐向陆移动的特征。

人类活动也是滩涂面积变化的主要因素,莱州湾滩涂整体上海一侧边界向陆推进的同时,人类活动不断使陆一侧边界向海推进。在这种前追后赶的形式逼迫下,滩涂面积必然持续性的减少。根据第七次全国人口普查公报,到2020年山东省人口为1亿^[24],在人口增加的压力下,向海要地成为了沿

海居民的主要途径^[25]。自1991年山东省政府提出建设海上山东以来,实施耕海牧鱼战略,重视开展滩涂养殖,沿海建立大量盐田,滩涂开发力度逐年增加^[26]。受其影响,仅1990—2000年10 a间,莱州湾地区滩涂面积就减少了150.94 km²。2000—2010年更是达到了304.78 km²的峰值,到2010年山东省的盐田面积在沿海各省市中位居榜首,沿海养殖面积也在剧烈增加^[27]。在滩涂保护刻不容缓的形势下,2015年山东省海洋局发布《中共中央国务院关于加快推进生态文明建设的意见》,明确湿地保护目标,严控围填海总量,控制海洋开发强度;2018年国务院发布《关于加强滨海湿地保护,严格管控围填海的通知》,原则上不再接受省级政府申请的莱州湾地区的围填海项目;2019年山东省政府发布《关于加强滨海湿地保护严格管控围填海的实施方案》,严格管理围填海项目,控制滩涂资源开发。基于这一系列保护措施,使得2010—2020年的滩涂侵占面积较之上一个10 a减少了约71%,侵占面积锐减为87.74 km²,侵占量降低至低谷值。

4 结论

本研究基于GEE平台,采用MSIC-OTSU和面向对象方法进行莱州湾滩涂高精度提取,研究莱州湾地区滩涂资源数量和时空分布特征,构建滩涂及其周边土地覆被数据集,分析1990—2020年莱州湾滨海滩涂时空演变与驱动机制,得出了如下结论:

1) 莱州湾地区1990—2020年30 a间滩涂面积整体呈持续减少的趋势,2020年滩涂面积总量为822.38 km²,比1990年减少了543.46 km²,缩减幅度约40%。在2000—2010年间变化最为剧烈,滩涂面积急剧减少了304.78 km²,在2010—2020年减小幅度变缓,仅减少了87.74 km²。潍坊市岸段滩涂面积缩减量最大,30 a间减少了323.56 km²,烟台

市岸段滩涂面积缩减量最小,仅为 82.01 km²。

2) 莱州湾地区滩涂变化最主要的因素是养殖池/盐田的扩张。2020 年养殖池/盐田的总面积达到了 1 493.18 km²,30 a 间扩展了约 45%,占滩涂减少量的 62%。其次是由于植被在滩涂中的扩张,使滩涂转化为滨海植被,转化量为 100.30 km²。滩涂与海水、内陆水体的相互转化较少。此外,虽然当前人工表面对于滨海滩涂的侵占面积较小,但未来有继续增加的趋势。

3) 莱州湾地区滩涂变化同时受到自然和人为驱动力影响。莱州湾黄河口以外其他地区由于不利于泥沙淤积成陆使滩涂面积增加,而黄河口地区因局部落潮历时大于涨潮历时的潮流特性使输入的大量泥沙淤积成陆,滩涂海侧边界向海推进,一定程度上减缓了莱州湾整体上滩涂面积缩减的形势。

参考文献 (References):

- [1] 程丽娜,钟才荣,李晓燕,等. Sentinel-2 密集时间序列数据和 Google Earth Engine 的潮间带湿地快速自动分类[J]. 遥感学报,2022,26(2):348-357.
Cheng L N,Zhong C R,Li X Y,et al. Rapid and automatic classification of intertidal wetlands based on intensive time series Sentinel-2 images and Google Earth Engine[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022,26(2):348-357.
- [2] 崔保山,谢 潘,王 青,等. 大规模围填海对滨海湿地的影响与对策[J]. 中国科学院院刊,2017,32(4):418-425.
Cui B S,Xie T,Wang Q,et al. Impact of large-scale reclamation on coastal wetlands and implications for ecological restoration, compensation, and sustainable exploitation framework[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2017,32(4):418-425.
- [3] 李 雅,刘玉卿. 滩涂湿地生态系统服务价值评估研究综述[J]. 上海国土资源,2017,38(4):86-92.
Li Y,Liu Y Q. Review of ecosystem service evaluation of a tidal flat wetland[J]. Shanghai Land and Resources,2017,38(4):86-92.
- [4] 朱明君. 我国滩涂资源可持续性利用战略研究[J]. 中国土地科学,2000,14(2):8-12,47.
Zhu M J. Research on sustainable utilization strategy of tidal flat resources in my country[J]. China Land Science,2000,14(2):8-12,47.
- [5] 薛超波,王国良,金 珊. 海洋滩涂贝类养殖环境的研究现状[J]. 生态环境,2004,13(1):116-118.
Xue C B,Wang G L,Jin S. Review on the culture environment of the marine intertidal shellfish[J]. Ecological Environment,2004,13(1):116-118.
- [6] 张长宽,陈欣迪. 海岸带滩涂资源的开发利用与保护研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(1):25-33.
Zhang C K,Chen X D. Advances in development, utilization, and protection of coastal tidal flats[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(1):25-33.
- [7] Murray N J,Phinn S R,DeWitt M,et al. The global distribution and trajectory of tidal flats[J]. Nature,2019,565(7738):222-225.
- [8] Murray N J,Stuart R P,Robert S C,et al. Continental scale mapping of tidal flats across east Asia using the Landsat archive[J]. Remote Sensing,2012,4(11):3417-3426.
- [9] Wang X X,Xiao X G,Zou Z H,et al. Tracking annual changes of coastal tidal flats in China during 1986—2016 through analyses of Landsat images with Google Earth Engine[J]. Remote Sensing of Environment,2020,238:110987.
- [10] Jia M M,Wang Z M,Mao D H,et al. Rapid,robust, and automated mapping of tidal flats in China using time series Sentinel-2 images and Google Earth Engine[J]. Remote Sensing of Environment, 2021,255:112285.
- [11] 智 超,吴文挺,苏 华. 潮汐和植被物候影响下的潮间带湿地遥感提取[J]. 遥感学报,2020,26(2):373-385.
Zhi C,Wu W T,Su H. Mapping the intertidal wetlands of Fujian Province based on tidal dynamics and vegetational phenology[J]. National Remote Sensing Bulletin,2020,26(2):373-385.
- [12] Zhao C P,Qin C Q,Teng J K. Mapping large-area tidal flats without the dependence on tidal elevations: A case study of southern China[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020,159:256-270.
- [13] 李 振,黄海军. 胶州湾海岸带土地利用/覆被变化研究[J]. 国土资源遥感,2010,22(4):71-76. doi:10.6046/gtzyyg.2010.04.16.
Li Z,Huang H J. Land use and land cover change of the coastal zone around Jiaozhou Bay[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2010,22(4):71-76. doi:10.6046/gtzyyg.2010.04.16.
- [14] 张康永. 基于 Google Earth Engine 平台时序影像分析的滨海滩涂遥感制图及演变分析[M]. 深圳:深圳大学,2019.
Zhang K Y. Remote sensing mapping and evolution analysis of coastal tidal flats based on time series image analysis on Google Earth Engine platform[M]. Shenzhen:Shenzhen University,2019.
- [15] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on System Man and Cybernetics,1979,9(1):62-66.
- [16] 陈云浩,冯 通,史培军,等. 基于面向对象和规则的遥感影像分类研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2006,31(4):316-320.
Chen Y H,Feng T,Shi P J,et al. Classification of remote sensing image based on object oriented and class rules[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2006,31(4):316-320.
- [17] Volker W. Object-based classification of remote sensing data for change detection[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2004,58(3-4):225-238.
- [18] 贾明明,王宗明,毛德华,等. 面向可持续发展目标的中国红树林近 50 年变化分析[J]. 科学通报,2021,66(30):3886-3901.
Jia M M,Wang Z M,Mao D H,et al. Spatial-temporal changes of China's mangrove forests over the past 50 years: An analysis towards the sustainable development goals(SDGs)[J]. Chinese Science Bulletin,2021,66(30):3886-3901.
- [19] 王 琰,牟秀娟,徐承芳. 莱州湾海洋生态环境状况与污染防治策略初探[J]. 海洋环境科学,2021,40(6):823-831,837.
Wang Y,Mu X J,Xu C F. Preliminary study on marine ecological

- environment and pollution prevention in Laizhou Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2021, 40(6): 823–831, 837.
- [20] 国家海洋局. 2020年中国海平面公报[EB/OL]. (2021-4-26)[2020-4-20]. http://gi.mnr.gov.cn/202104/t20210426_2630186.html.
- State Oceanic Administration. 2020 China sea level bulletin[EB/OL]. (2021-4-26)[2020-4-20]. http://gi.mnr.gov.cn/202104/t20210426_2630186.html.
- [21] 陈斌,刘健,高飞. 莱州湾悬沙输运机制研究[J]. *水科学进展*, 2015, 26(6): 857–866.
- Chen B, Liu J, Gao F. Suspended sediment transport mechanism in Laizhou bay[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(6): 857–866.
- [22] 孙伟富. 1978—2009年莱州湾海岸线变迁研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2010.
- Sun W F. Research on the shoreline change of Laizhou Bay from 1978 to 2009[D]. Qingdao: Oceanography State Oceanic Administration, 2010.
- [23] 程义吉,高菁. 莱州湾海域水文特征及冲淤变化分析[J]. *海岸工程*, 2006, 25(3): 1–6.
- Cheng Y J, Gao J. Analysis of hydrological characteristics and changes in scour and silting in the Laizhou Bay area[J]. *Coastal Engineering*, 2006, 25(3): 1–6.
- [24] 山东省统计局. 山东省第七次全国人口普查公报(第二号)[EB/OL]. (2020-5-21)[2022-4-20]. http://tjj.shandong.gov.cn/art/2021/5/21/art_6293_10287511.html.
- Shandong Provincial Bureau of Statistics. Bulletin of the seventh national census of Shandong Province (No. 2)[EB/OL]. (2020-5-21)[2022-4-20]. http://tjj.shandong.gov.cn/art/2021/5/21/art_6293_10287511.html.
- [25] 黄皓,陈锦辉,胡自宁. 近50年来广西海岸滩涂变化特征分析[J]. *海洋科学*, 2007, 31(1): 37–42.
- Huang H, Chen J H, Hu Z N. Analysis on the characteristics of changeable intertidal zones along Guangxi coast in the late of 50 years[J]. *Marine Sciences*, 2007, 31(1): 37–42.
- [26] 吴珊珊. 莱州湾南岸滨海湿地的景观格局变化及其生态脆弱性评价[D]. 济南: 山东师范大学, 2009.
- Wu S S. Analysis on landscape pattern change and ecological environmental vulnerability assessment of the Southern coastal wetland of Laizhou bay[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2009.
- [27] 姚云长,任春颖,王宗明,等. 1985年和2010年中国沿海盐田和养殖池遥感监测[J]. *湿地科学*, 2016, 14(6): 874–882.
- Yao Y C, Ren C Y, Wang Z M, et al. Monitoring of salt ponds and aquaculture ponds in the coastal zone of China in 1985 and 2010[J]. *Wetland Science*, 2016, 14(6): 874–882.

A study on the changes in coastal tidal flats in the Laizhou Bay based on MSIC and OTSU

LI Yi^{1,2}, CHENG Lina^{2,3}, LU Yingying^{2,4}, ZHANG Bochun^{1,2}, YU Sen^{1,2}, JIA Mingming²

(1. School of Surveying, Mapping and Exploration Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China; 2. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 3. College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, China; 4. Changchun New District Beihu Yingcai School, Changchun 130000, China)

Abstract: Coastal tidal flats, as a major type of coastal wetlands, have significant ecological value in maintaining biodiversity and influencing global climate and environmental change. Since they are only exposed in their entirety at the lowest tide, the previous remote sensing interpretation results showed significant omissions and misclassifications of the tidal flats. Based on the Google Earth Engine (GEE) platform and the Landsat series satellite data, this study constructed high-quality dense time series image stacks for four time periods, i. e., 1990, 2000, 2010, and 2020. Then, these image stacks were combined with the maximum spectral index composite (MSIC) algorithm and the Otsu algorithm (OTSU) for rapid and automatic extraction of coastal tidal flats resources in Laizhou Bay of China. Furthermore, the land cover around the coastal tidal flats was delineated based on the object-oriented analysis technology and the fuzzy-based segmentation parameter (FbSP) optimal scale. Finally, the spatial and temporal evolution patterns of the coastal tidal flats were analyzed. The results are shown as follows. During 1990–2020, the coastal tidal flats in Laizhou Bay gradually decreased, with an area of 822.38 km² in 2020, a reduction of about 40% compared with that in 1990. The largest reduction was 304.78 km² during 2000–2010. The coastal tidal flats near the Yellow River estuary showed a seaward migration, while the coastal tidal flat patches in other regions of Laizhou Bay showed a landward migration. Human activities were the dominant factors in the changes in tidal flats in Laizhou Bay in the past 30 years. Among them, the expansion of aquaculture ponds/salt fields directly encroached on 414.20 km² of coastal tidal flats.

Keywords: coastal tidal flat; Landsat imagery; MSIC; OTSU; Google Earth Engine (GEE)

(责任编辑: 陈理)