

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.02.016

# 基于 Sentinel-1 影像的浙江省沿海养殖池塘提取与管理

蔡丹丰<sup>1</sup> 胡求光<sup>2,3</sup> 魏昕伊<sup>2,3</sup>

(1. 宁波大学科学技术学院, 宁波 315211; 2. 宁波大学东海战略研究院, 宁波 315211;

3. 宁波大学商学院, 宁波 315211)

**摘要:** 沿海养殖池塘建设能带来巨大的经济效益,对保障海产品供给和丰富居民食物多样性具有重要意义。而养殖池塘的快速扩张也会带来严重的环境危机,故有效揭示养殖池塘的时空分布特征对有序管理沿海养殖池塘至关重要。但养殖池塘大多分布于岸线曲折、靠近海洋的潮滩一侧,有效且高精度识别养殖池塘具有难度。对此,提出结合 Google Earth Engine 云平台 and ArcGIS 本地端分类后处理的养殖池塘识别方法,基于地区水体频率、对象特征和精细处理得到了浙江省沿海 2016—2021 年较高精度的养殖池塘空间分布数据。结果表明:养殖池塘总体精度均大于 93%,Kappa 系数均大于 82%,表明研究方法具有较好的适用性。浙江省沿海养殖池塘面积趋于下降,2016、2019、2021 年分别为 30 360.60、24 375.35、21 700.02 hm<sup>2</sup>。养殖池塘地级市集中分布于宁波市、台州市、绍兴市和杭州市,县域聚集于慈溪市、宁海县、三门县、萧山区、上虞区和象山县。浙江省养殖池塘集聚性下降,聚集于海湾、河口、沿海平原与潮滩,如杭州湾、象山港、三门湾、浦坝港和乐清湾。养殖池塘空间差异性突出,其海侧大于陆侧、北部大于南部。

**关键词:** 养殖池塘; Google Earth Engine; 时空特征; 浙江省; Sentinel-1 影像

中图分类号: S127

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)02-0169-12

OSID:



## Extraction and Management of Coastal Aquaculture Ponds in Zhejiang Province Based on Sentinel-1 SAR Images

CAI Danfeng<sup>1</sup> HU Qiuguang<sup>2,3</sup> WEI Xinyi<sup>2,3</sup>

(1. College of Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China

2. Donghai Academy, Ningbo University, Ningbo 315211, China

3. Business School, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** The construction of coastal aquaculture ponds has huge economic benefits and is of great significance to ensuring the supply of seafood and enriching the food diversity of residents. The rapid expansion of aquaculture ponds will also bring about a huge environmental crisis, so effectively revealing the spatial and temporal distribution characteristics of aquaculture ponds is crucial for orderly management of coastal aquaculture ponds. However, aquaculture ponds are mostly distributed on the side of tidal flats with tortuous coastlines and close to the ocean. It is challenging to identify aquaculture ponds effectively and with high precision. In response to this problem, an aquaculture ponds identification method that combined Google Earth Engine cloud platform and ArcGIS local classification post-processing was proposed. Based on water body frequency, object characteristics and fine processing, the spatial distribution of coastal aquaculture ponds in Zhejiang Province from 2016 to 2021 with high precision was obtained. The results showed that the overall accuracy of the aquaculture ponds was greater than 93%, and the Kappa coefficient was greater than 82%, indicating that the research method showed good applicability. The area of coastal aquaculture ponds in Zhejiang Province tended to decrease in 2016, 2019 and 2021, which was 30 360.60 hm<sup>2</sup>, 24 375.35 hm<sup>2</sup> and 21 700.02 hm<sup>2</sup>, respectively. The prefecture-level cities of aquaculture ponds were concentrated in Ningbo, Taizhou, Shaoxing and Hangzhou, and the counties were concentrated in Cixi, Ninghai, Sanmen, Xiaoshan, Shangyu and

收稿日期: 2022-10-24 修回日期: 2022-11-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71874092)

作者简介: 蔡丹丰(1991—),男,副教授,主要从事海岸带环境遥感研究,E-mail: caidanfeng@nbu.edu.cn

通信作者: 胡求光(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事渔业经济管理研究,E-mail: huqiuguang@nbu.edu.cn

Xiangshan. The agglomeration of aquaculture ponds in Zhejiang Province was decreased, and they were concentrated in bays, estuaries, coastal plains and tidal flats, such as Hangzhou Bay, Xiangshan Port, Sanmen Bay, Puba Port and Yueqing Bay. The spatial differences of aquaculture ponds were prominent, that in the sea side was larger than that in the land side, and that in the north was larger than that in the south.

**Key words:** aquaculture pond; Google Earth Engine; spatiotemporal features; Zhejiang Province; Sentinel-1 image

## 0 引言

近年来,我国渔业经历了巨大发展<sup>[1-2]</sup>。但我国水产养殖仍面临着空间分布不均、布局不合理、优质产品供给不足、生产空间被侵占和挤压、产业面广而不强、环境污染等突出问题<sup>[3]</sup>。因此,科学开展区域养殖池塘的高精度制图对揭示其空间布局、生产空间、生态环境管理等的科学性和合理性具有参考价值。

随着遥感技术的快速发展与应用,以其具备时效性、低成本和广范围等特征,被广泛运用于区域地表生态环境监测和地物识别制图等工作中<sup>[4-5]</sup>。RS(Remote sensing)和GIS(Geographic information system)技术可增强对水产养殖的可持续管理,故开展养殖池塘的高精度制图已成为沿海生态环境监测和保护的重要途径<sup>[6]</sup>。沿海复杂多变的云雨天气对光学卫星具有较大的限制<sup>[7-9]</sup>。而雷达卫星可突破恶劣天气的影响,实现全天时和全天候的动态监测,因此被广泛运用于地表水资源(河流、湖泊)和以洪涝为主的自然灾害监测<sup>[10-12]</sup>。此外,SPOT、WorldView-2、中国GF等高分辨率数据能够最大程度上实现养殖池塘的高精度提取,但影像成本过高且影像带宽限制了大尺度制图,故多运用于面积较小区域<sup>[13]</sup>。2014年起欧空局陆续发布的Sentinel-1、Sentinel-2等中高分辨率系列影像,空间分辨率较高(10 m)且获取周期短(12 d),具有光学和雷达两种类型,较好应用于大尺度养殖池塘提取工作中<sup>[14-15]</sup>。Landsat-TM/ETM+/OLI系列陆地卫星,影像分辨率为30 m和重返周期为16 d,该影像时间序列长,但对面积较小的养殖池塘难以实现单目标提取,故识别精度有限<sup>[16-17]</sup>。鉴于沿海区域天气影响、制图成本和制图效果,且考虑到Sentinel-1 SAR数据对水体信息更为敏感,因此,应用该影像具有较好的实用性和可操作性<sup>[14]</sup>。而在养殖池塘提取方法上,光学与雷达影像识别算法具有一定差异性,光学影像提取养殖池塘水体主要包括阈值法、分类器法和其他方法<sup>[18]</sup>,其中阈值法以多波段构建水体指数较为常见,如归一化水体指数(NDWI)<sup>[19]</sup>、改进的归一化水体指数

(MNDWI)<sup>[20]</sup>、地表水指数(LSWI)<sup>[21]</sup>和自动水体提取指数(AWEI)<sup>[22]</sup>等;分类器法包括支持向量机、决策树和面向对象等;其他方法以深度学习为主。深度学习的优势在于实现了图像特征的自适应学习,从而能够提取到更高层级、可分性更强的图像特征,在光学影像水体识别中得到了较好效果<sup>[23-24]</sup>。雷达影像提取养殖池塘水体算法主要基于阈值法、滤波法和灰度共生矩阵<sup>[18]</sup>,且深度学习算法不断运用于水体提取工作中<sup>[25-26]</sup>。而衍生于雷达卫星的SDWI(Sentinel-1 dual-polarized water index)具有较好的增强水体信息与其他地物差异的特征<sup>[27]</sup>,也具有较好的实用性。此外,学者多结合养殖池塘光学特征<sup>[15]</sup>、生物特征<sup>[28]</sup>、对象特征<sup>[29]</sup>对潜在养殖池塘进行筛选,以此得到较为准确的养殖池塘分布数据。

综上,关于养殖池塘提取工作的影像与方法较为成熟,但仍存在以下问题:受影像数据限制和养殖池塘分布散乱的特征,前人养殖池塘识别结果难以将养殖池塘进行单个目标化分割,其结果多混杂着其他水体或池塘埂面的大斑块,故提取面积远大于实际养殖池塘面积;以区域单个时期单张影像难以有效地区分养殖池塘和其它误差来源,易导致养殖池塘的误识;大尺度养殖池塘提取需要消耗大量的时间与精力。因此,本文基于区域Sentinel-1 SAR影像,结合Google Earth Engine(GEE)云端平台和水体频率获取浙江省沿海大范围内潜在养殖池塘,同时结合养殖池塘对象特征可进一步保证实现养殖池塘的较高精度提取,最后进一步分析2016—2021年浙江省养殖池塘时空分布特征,以期浙江省沿海养殖池塘可持续管理提供一定的理论与数据支撑。

## 1 研究区概况

浙江省沿海地理位置优越(图1),河流、湖泊水系发达。海湾众多且岸线曲折,从北至南分布着杭州湾、象山港、三门湾、台州湾、乐清湾、温州湾等,海区光照条件较好,滩涂资源与大陆架为各种水生生物(鱼、虾、蟹、贝、藻等)提供了优越的生产繁殖条件,故沿海渔业资源尤为丰富。以浙江省沿海县域城市为研究区,主要包括36个县域行政单元,鉴于

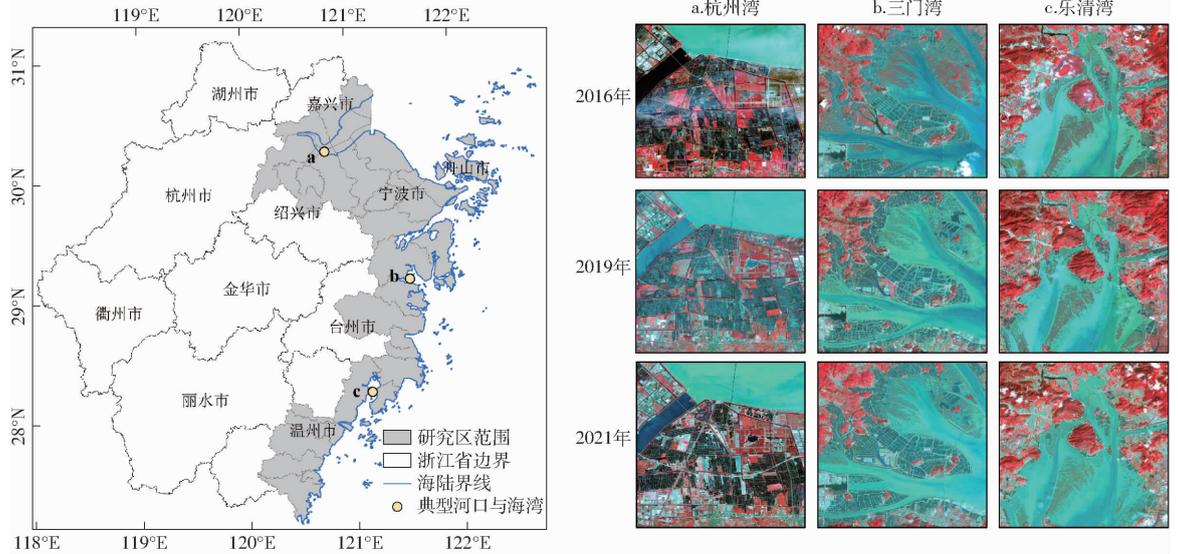


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of study area

部分养殖池塘分布于行政边界外侧,故以最新行政边界向海侧延伸 10 km<sup>[16]</sup>。此外,养殖池塘面积差异较大,主要选取养殖池塘面积大于 0.01 hm<sup>2</sup>,以保证全面提取沿海养殖池塘。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 数据来源

Sentinel-1 是欧空局发射的首颗对地观测雷达遥感卫星,具备全天时和全天候的雷达成像系统,重访周期短(12 d)并提供中高分辨率(10 m)的卫星影像,尤其是搭载的 C 波段合成孔径雷达(SAR)对地表水体反映更为敏感,使其具有广泛的适用性<sup>[4,11]</sup>。GEE 平台中可免费获取 Sentinel-1 的 Level-1 级产品,即 GRD(Ground range detected),该数据集已在干涉宽幅模式下进行了预处理,如去噪声、辐射和地形校正等<sup>[30]</sup>。研究基于 GEE 平台获取了研究区

2016、2019、2021 年(4 月 1 日至 10 月 31 日)的所有的双极化(VV + VH)图像,分别为 109、202、146 幅(图 2)。

本文还包括地表永久水体数据集(JRC global surface water mapping layers, v1.3),该数据集包含全球 1984—2020 年地表水位置和时间分布信息,由 Landsat 长时序遥感影像生成,详细信息参考文献<sup>[31]</sup>。DEM(Digital elevation model)数据选取了 NASA 提供的 SRTM V3 产品,该数据集空间分辨率为 30 m,并使用多种其他 DEM 源(ASTER GDEM2、GMTED2010 和 NED)进行空白填充。此外,借助于 Google Earth 高分影像和 Sentinel-2 中高分辨率影像数据为养殖池塘分类后处理提供科学可信的参考源。为验证养殖池塘的提取结果,参考了《30 m 分辨率中国滨海养殖池空间分布数据集》<sup>[7]</sup>,该数据集以 Landsat 影像为数据源,采样面向对象分割获取

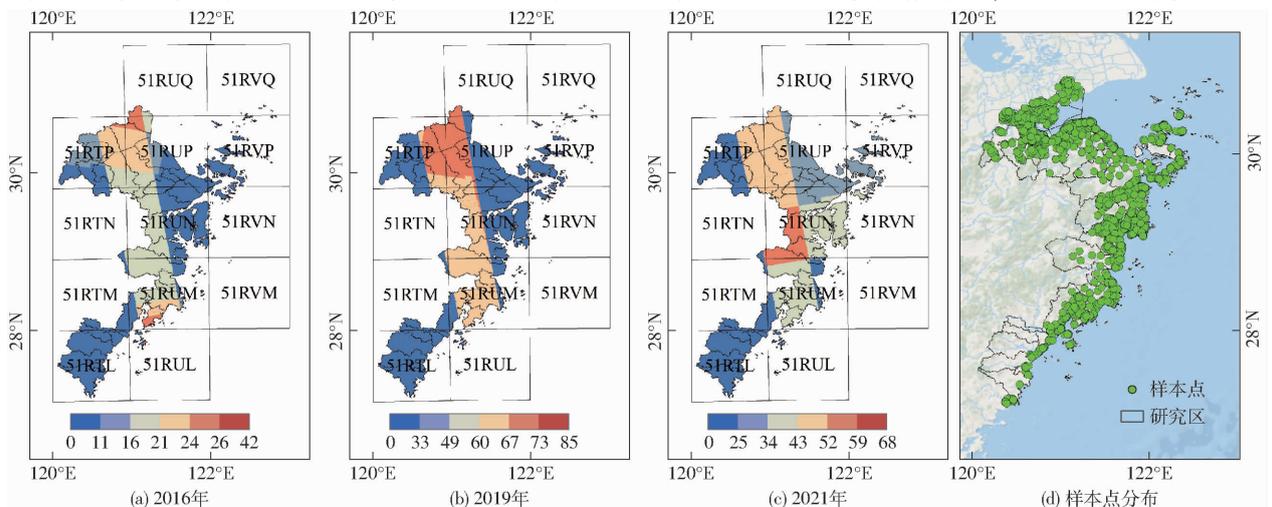


图 2 研究区可利用影像数量与样本点分布

Fig. 2 Number of available images and distribution of sample points in study area

了中国沿海 50 km 的养殖池塘,总体解译精度达 94%,具有较好的参考意义。本文涉及的行政边界数据来自于全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn>),部分社会经济数据则来自于《中国渔业统计年鉴》。

## 2.2 研究方法

浙江省沿海养殖池塘提取的总体流程主要包括(图3):数据准备与处理;潜在养殖池塘提取;养殖

池塘精细处理;养殖池塘精度验证。前期实地调研可知,养殖池塘作为特殊的地表水体,浙江省范围内养殖池塘一般在4—10月保持浅水状态,而其他时间可能处于清塘、晒塘等干塘阶段,故在每年4—10月内养殖池塘水体信息丰富,可被有效捕捉与识别。在识别潜在养殖池塘基础上,由于养殖池塘与河流、湖泊、水库等其他地表水体同时被获取,故仍需要分类后处理来识别真实的养殖池塘。

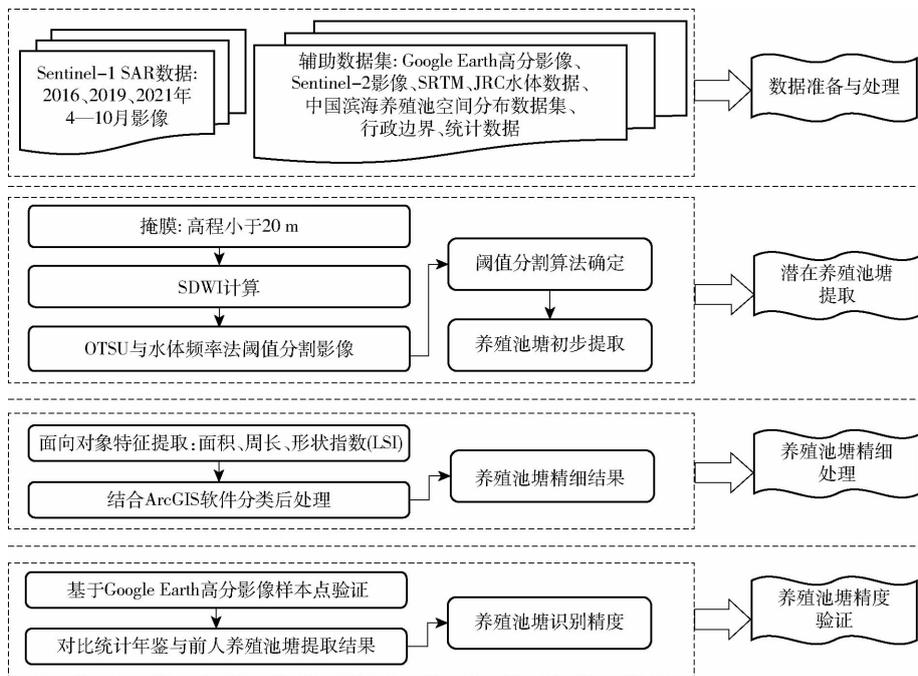


图3 养殖池塘提取的技术流程图

Fig. 3 Technical process of extraction from aquaculture ponds

### 2.2.1 潜在养殖池塘提取

SAR 影像广泛应用于地表水体的识别研究中,故文献[27]基于 Sentinel-1 SAR 影像,提出了 SDWI 来提取地表水体信息,该指数充分考虑了双极化波段中水体和其他物体之间的信号差异,可以增强水体信息,并同时消除土壤和植被的影响。该指数已被广泛运用于湖泊、河流、养殖池塘等地表水体识别研究<sup>[14,32]</sup>,具有较好的适用性。SDWI 表达式为

$$K_{SDWI} = \ln(10V_V V_H) - 8 \quad (1)$$

式中  $K_{SDWI}$ ——水体提取指数

$V_V$ 、 $V_H$ ——VV、VH 图像中的像素值

以 2021 年台州市三门县浦坝港影像为案例进行养殖池塘提取说明(图 4a),由于浙江省沿海丘陵地貌仍广泛分布,且文献[16]研究发现沿海养殖池塘一般分布于地形起伏较小的平原和滩地(DEM 小于 20 m)。此外,浙江省养殖池塘每年 4—10 月保持充水状态,故在 GEE 平台上对区域原始影像进行地形掩膜和时间筛选。

通过计算浦坝港原始影像的 SDWI(图 4b),已可

以清楚地展示区域地表的所有水体信息,如河流、养殖池塘。SDWI 具有明显的峰值(图 5),故如何选取阈值对养殖池塘的提取效果至关重要。本文主要选取了两种方法来确定阈值:OTSU 算法与水体频率法。

OTSU 算法,即最大类间方差法<sup>[33]</sup>,可以根据图像的灰度属性自动选取分割阈值,是当前地物识别、图像分割中广泛运用的阈值分割方法(图 4c)。该算法可将 SDWI 指数图像进行类方差区分,自动识别像素直方图存在的明显“峰谷”,以此进行阈值分割<sup>[34]</sup>。

由于养殖池塘 4—10 月基本保持水体状态,故通过计算区域 4—10 月水体出现的频率来识别地表水体,即水体频率法。引入区域该年份地表永久水体数据集,对该数据集进行分层随机抽样,建立水体样本点并过滤异常值,以 Sample regions 函数获取样本点的 SDWI 属性值,且以样本点的均值减去两倍方差得到区域 SDWI 的置信区间<sup>[15]</sup>。由于地表永久水体较为稳定,故得到的分割阈值变化较小,以此进一步统计研究期内所有水体样本点的观测值,计算大于水体阈值的样本点,从而得到区域 4—10 月

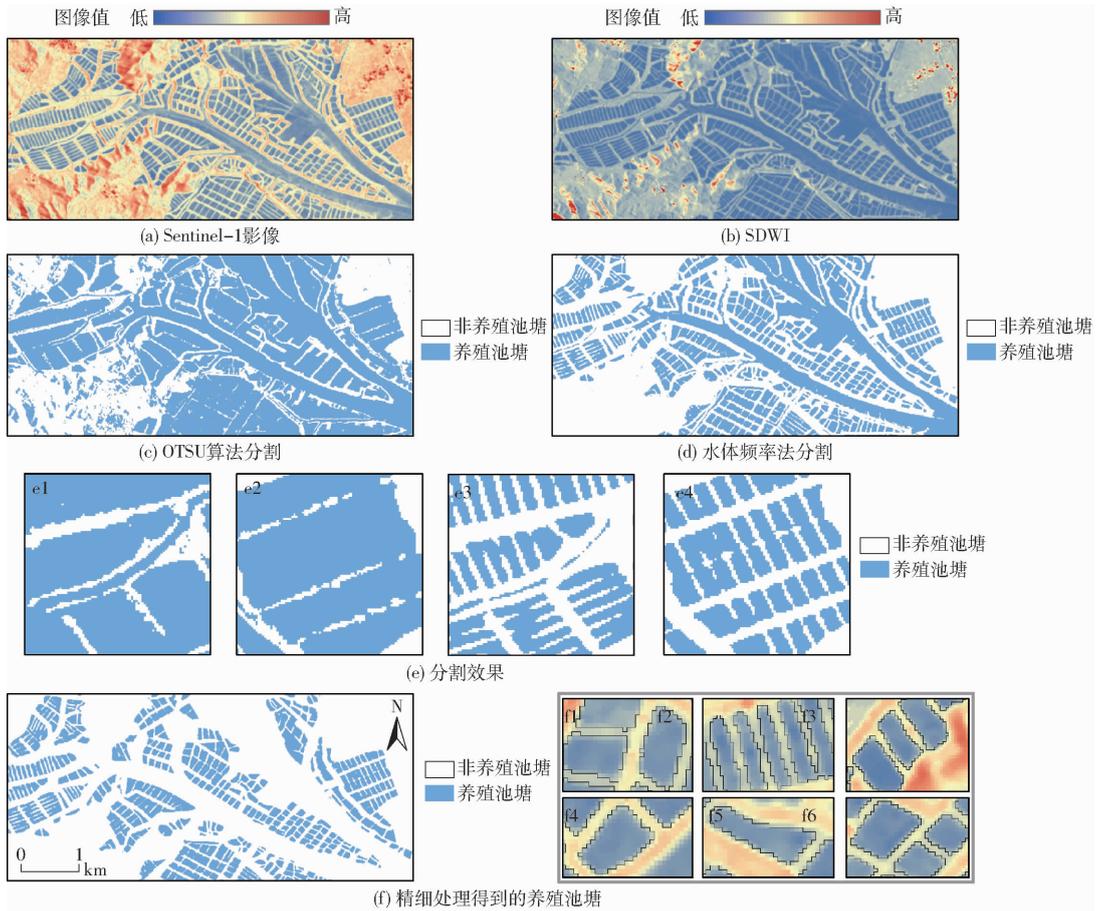


图 4 浙江省养殖池塘提取关键过程

Fig. 4 Key process of extraction from aquaculture ponds in Zhejiang Province

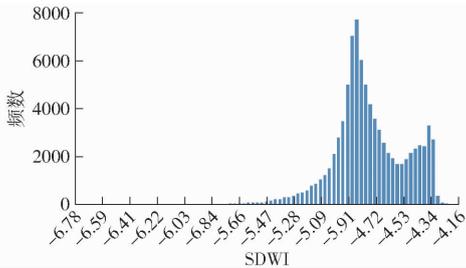


图 5 区域 SDWI 指数的直方图

Fig. 5 Histogram of regional SDWI index

内的水体频率,如河流、湖泊、养殖池塘等均可被有效识别(图 4d)。

对比 OTSU 与水体频率的阈值分割效果对比,如图 4e 所示,图 4e 中 e1 和 e2 为 OTSU 算法分割效果,e3 和 e4 为水体频率法分割效果。可以发现 OTSU 虽将地表水体(河流、养殖池塘)完全识别,但很难精细提取养殖池塘,尤其是实现单个养殖池塘的提取。而水体频率法则较好地 将河流、养殖池塘区分开,且各个养殖池塘间能够有效得到区分。故本文主要选取水体频率法来进行阈值分割。通过多次试验,水体频率小于 60%,地表水体容易被过度提取,而水体频率大于 75%,部分地表水体易被忽略,而水体频率保持在 60% ~ 70%,地表水体能够

有效识别,且较好保留地表水体信息(图 6)。

### 2.2.2 养殖池塘精细处理

#### (1) 养殖池塘对象特征分类处理

随着养殖池塘的标准化建设,养殖池塘的形状、面积等基本特征较为明显。故为有效区分河流、水库坑塘、湖泊等地表水体信息,选取养殖池塘的面积、周长、形状指数(LSI)来进一步提取养殖池塘<sup>[14,22]</sup>。试验发现,浙江省养殖池塘保持在 100 hm<sup>2</sup> 以下,故消除面积较大的斑块(面积大于 100 hm<sup>2</sup>)和面积过小的斑块(面积小于 0.01 hm<sup>2</sup>)。周长则一般大于 50 m,故消除周长偏短(小于 50 m)的斑块,形状指数一般大于 100。基于此,可基本提取形状规则、较为标准的养殖池塘。

#### (2) 养殖池塘人工精细处理

在剔除地表明显非养殖池塘水体(河流、湖泊、水库坑塘)后,仍可能存在形状规则、面积周长与 LSI 符合的地表水体,如断裂的河流、养殖池塘埂面、水渠等。故为实现养殖池塘的精细提取,需结合 Google Earth 高分影像进行目视处理,可有效消除分布较少的其他误差水体信息源。最后得到浙江省较高精度的地表养殖池塘空间分布数据,如图 4 所示,图 4f 中 f1 ~ f6 表示养殖池塘与原始影像的叠加效果。

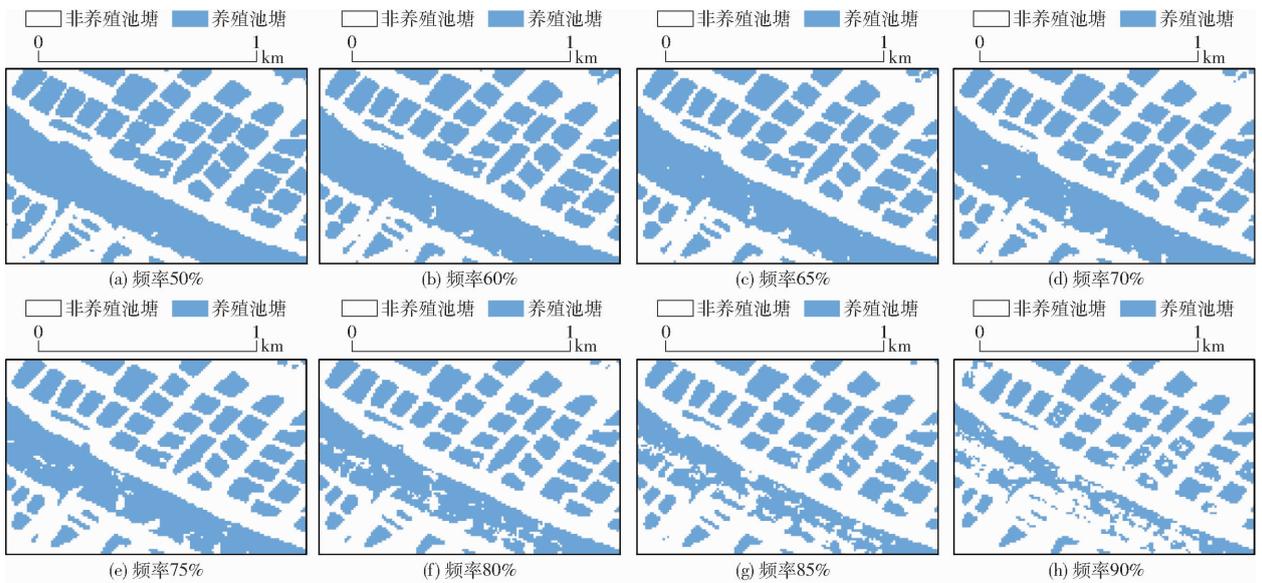


图 6 不同水体频率下养殖池塘识别效果

Fig. 6 Recognition effect of aquaculture ponds under different water frequencies

### 2.2.3 养殖池塘空间集聚性分析

为突出表现浙江省养殖池塘空间集聚特征,结合核密度分析法对养殖池塘这一地理要素进行空间分析,以此展示养殖池塘在空间距离衰减状态下的分布特征和形态变化<sup>[35]</sup>。计算公式为

$$f_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (2)$$

式中  $f_h(x)$ ——核密度表达函数

$h$ ——带宽  $k$ ——核函数

$x-x_i$ ——分析值  $x$  到采样  $x_i$  的距离

通过式(2)可估算所有养殖池塘的空间分布情况,其值越大,地理要素的聚集性越强。

## 3 结果分析

### 3.1 分类验证

为验证浙江省沿海养殖池塘的识别效果,基于研究区随机构建了 4 123 个样本点(图 2d),如 2016 年分别为非养殖池塘 1 052 个、养殖池塘 3 071 个;

2019 年分别为非养殖池塘 974 个、养殖池塘 3 149 个;2021 年分别为非养殖池塘 1 015 个、养殖池塘 3 108 个(表 1)。结合研究区 2016—2021 年 Google Earth 高分影像对样本点进行检验,以此构建不同年份的养殖池塘与非养殖池塘的混淆矩阵。从而计算混淆矩阵的总体精度、用户精度、生产者精度、Kappa 系数。总体精度结果表明,浙江省养殖池塘解译效果较好,2016、2019、2021 年分别达到 93.69%、93.55%、94.30%。各年份养殖池塘的用户精度和生产者精度均大于非养殖池塘,其中 2021 年养殖池塘用户精度(95.85%)和生产者精度(96.62%)最高,非养殖池塘的用户精度以 2021 年最高(89.39%)、生产者精度以 2019 年最高(88.71%)。Kappa 系数均大于 82%,表明该研究对养殖池塘提取效果较好。

为进一步验证该文的识别结果,将本文 2016 年结果与文献[7]提供的 2015 年中国 30 m 养殖池塘空间分布数据进行对比,虽年份有区别,但从前人研

表 1 养殖池塘验证的混淆矩阵

Tab.1 Confusion matrix for aquaculture pond validation

年份	类型	非养殖池塘	养殖池塘	总计	用户精度/%	生产者精度/%	总体精度/%	Kappa 系数/%
2016	非养殖池塘	900	108	1 008	89.29	85.55	93.69	83.18
	养殖池塘	152	2 963	3 115	95.12	96.48		
	总计	1 052	3 071	4 123				
2019	非养殖池塘	864	156	1 020	84.71	88.71	93.55	82.41
	养殖池塘	110	2 993	3 103	96.46	95.05		
	总计	974	3 149	4 123				
2021	非养殖池塘	885	105	990	89.39	87.19	94.30	84.51
	养殖池塘	130	3 003	3 133	95.85	96.62		
	总计	1 015	3 108	4 123				

究结果表明单年份养殖池塘变化相对较小。对本文识别结果创建 5 000 个随机点,通过叠加发现其中 4 464 个随机点均位于参考数据集中,重合度达到了 89.28%。此外将两者进行叠加分析(图 7),该文研究结果基本与参考数据集重合,而且该文基于 Sentinel-1 SAR 数据(10 m)的数据源,故养殖池塘提取结果更为精细,空间上呈现养殖池塘的斑块化分布。而参考数据集空间上呈现大面积分布,即养殖池塘分布区域合并为大斑块,无法清楚识别养殖池塘的边缘面。该叠加结果进一步表明本文研究工作的可行性和合理性。

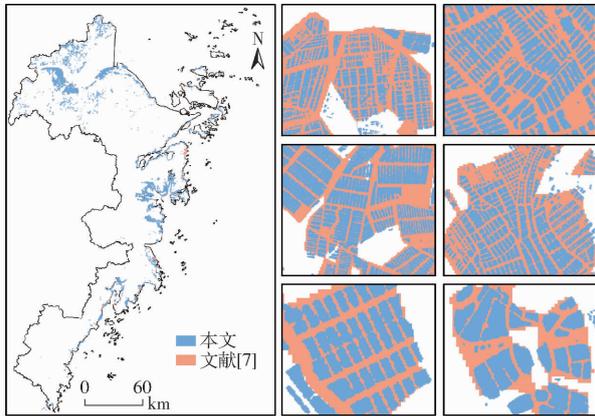


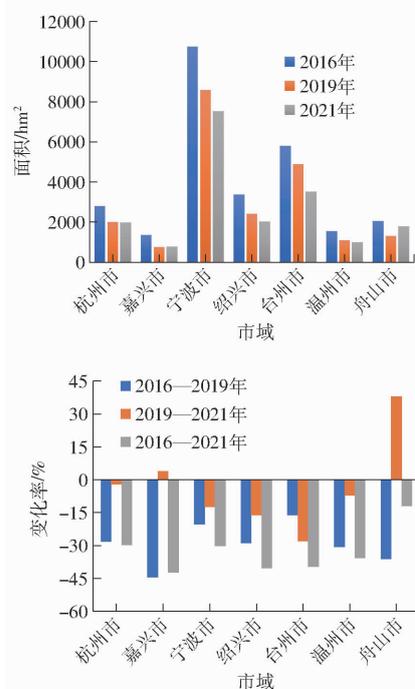
图 7 养殖池塘与文献[7]提取结果对比

Fig.7 Comparison of extraction results between aquaculture ponds and reference [7]

### 3.2 浙江省养殖池塘时空分布特征

#### 3.2.1 养殖池塘时间变化特征

浙江省 2016、2019、2021 年养殖池塘面积为



30 360.60、24 375.35、21 700.02 hm<sup>2</sup>,养殖池塘面积呈下降趋势,该趋势与《中国渔业统计年鉴》中浙江省养殖池塘面积变化趋势一致。此外,所提取的养殖池塘面积略微小于统计年鉴中各年份的面积,主要原因在于提取过程中对面积进行了限制(0.01 hm<sup>2</sup>以上),且提取过程中由于原始影像分辨率限制可能忽略了部分面积较小的池塘。

从地级市养殖池塘分布看,浙江省养殖池塘集中分布于宁波市(图 8),其养殖池塘面积占浙江省的 38% 以上,其次为台州市、绍兴市和杭州市,而舟山市、温州市和嘉兴市养殖池塘面积较小。仅 2019—2021 年的嘉兴市和 2019—2021 年的舟山市养殖池塘面积趋于上升,各地级市各年份养殖池塘面积趋于下降,其中嘉兴市在 2016—2021 年下降幅度最大,达到 42.29%,此外绍兴、台州、宁波、温州市养殖池塘面积下降幅度均大于 30%。不同年份上,2016—2019 年下降幅度明显大于 2019—2021 年,这也表明养殖池塘在区域发展过程中不断趋于稳定,变化幅度相对较小,如温州市 2016—2019 年下降幅度(30.72%)远大于 2019—2021 年(7.16%)。

县域单元上看,养殖池塘面积前两名均集中于宁波市,如慈溪市和宁海县,2016 年养殖池塘面积分别为 4 067.74、3 183.50 hm<sup>2</sup>,远大于其它县域。其次为台州市的三门县、杭州市的萧山区、绍兴市的上虞区和宁波市的象山县,该类县域地理位置优越,靠近渔业资源丰富的海湾且地形平坦,养殖池塘优

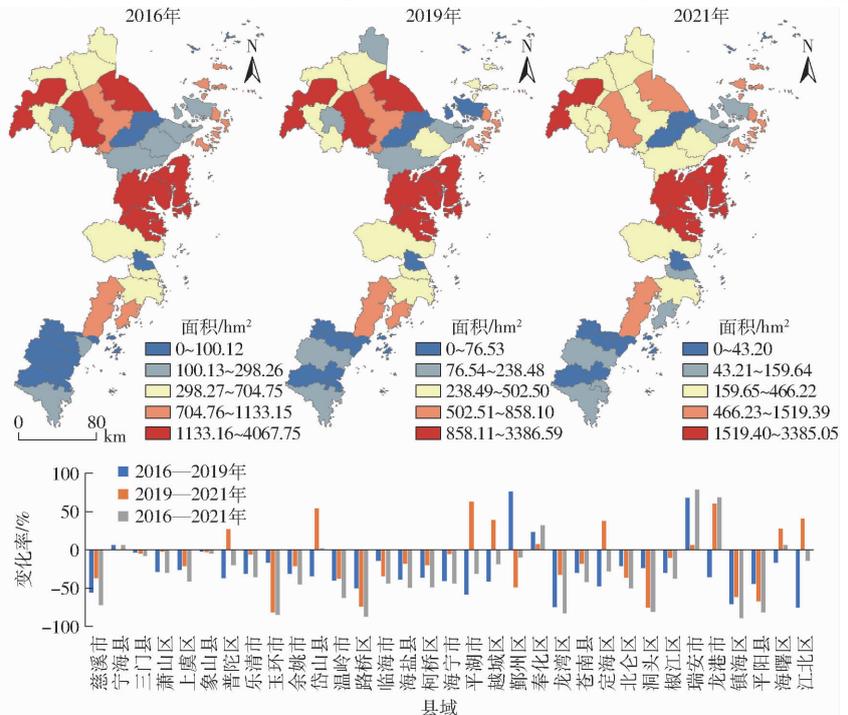


图 8 浙江省地级市与县域养殖池塘面积变化

Fig.8 Changes in area of aquaculture ponds in prefecture-level cities and counties in Zhejiang Province

越。县域单元变化上,各年份仍以下降趋势为主,其中养殖池塘面积排名第一的慈溪市,2019年养殖池塘面积大幅下降,从2016年的4 067.74 hm<sup>2</sup>缩减到2019年的1 804.86 hm<sup>2</sup>,持续下降到2021年的1 140.70 hm<sup>2</sup>,主要原因在于2016年大量沿海滩涂被开垦为养殖池塘,使得养殖池塘面积较高,而随着对滩涂资源的保护,“退塘还滩”增强了对滨海湿地的保护,此外部分养殖池塘直接被转换为工矿用地,使得2019年后养殖池塘面积快速下降。而部分县域单元养殖池塘面积趋于上升,如温州市的瑞安、龙

岗市;舟山市的定海区、岱山县、普陀区;嘉兴市的平湖市;宁波市的江北和海曙区等。

### 3.2.2 养殖池塘空间变化特征

浙江省养殖池塘集中分布于沿海一测的河流入海口、海湾、沿海平原和潮滩附近,呈现海侧大于陆侧、北部大于南部的分布特征(图9)。

浙江省养殖池塘在空间上呈现5个明显的集聚区(图10),分布为杭州湾、象山港、三门湾、浦坝港和乐清湾,空间集聚性北部大于南部,北部突出集中于杭州湾,中部养殖池塘则分布范围较广,以三门湾

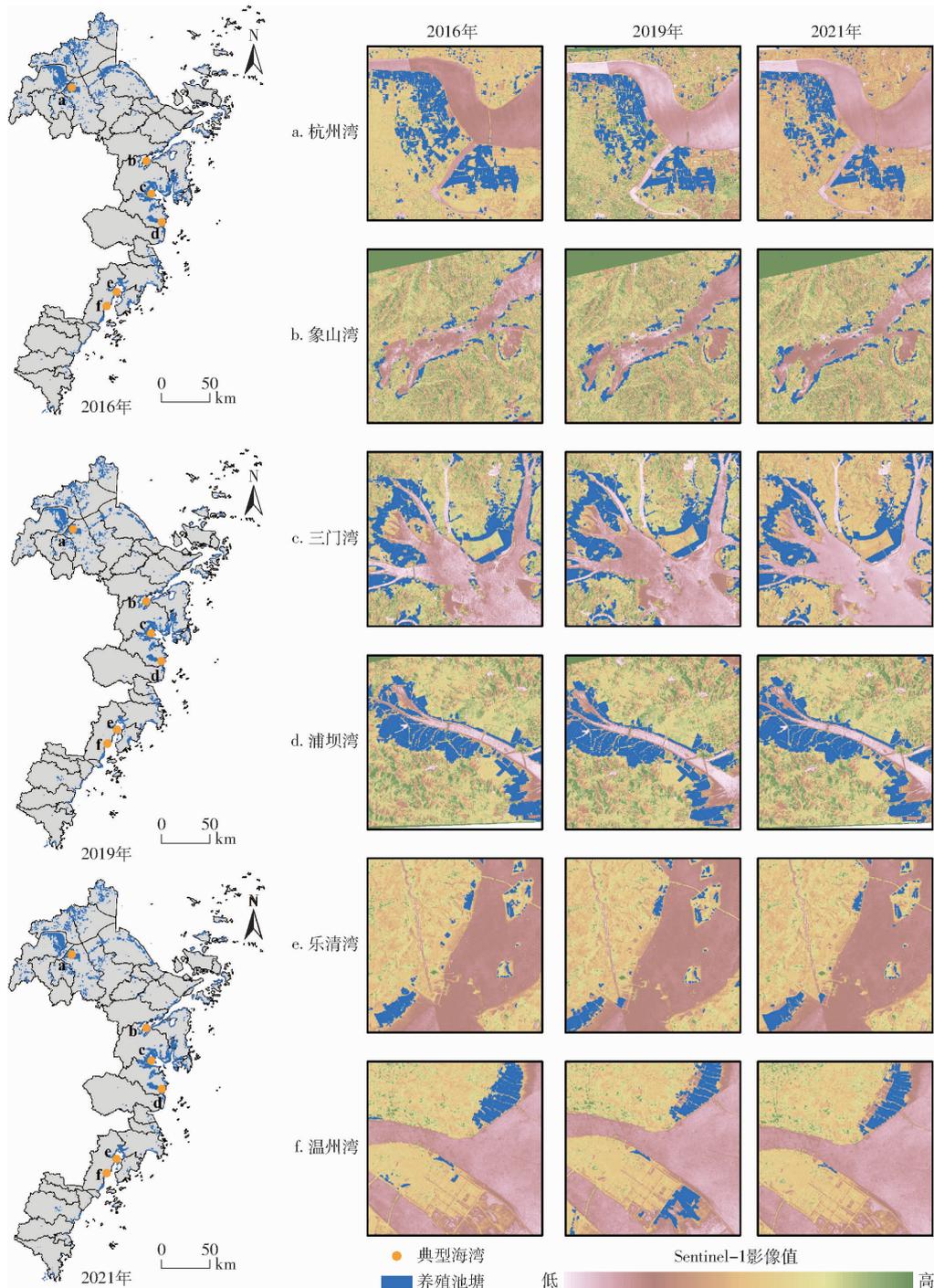


图9 养殖池塘空间分布特征

Fig. 9 Spatial distribution characteristics of aquaculture ponds

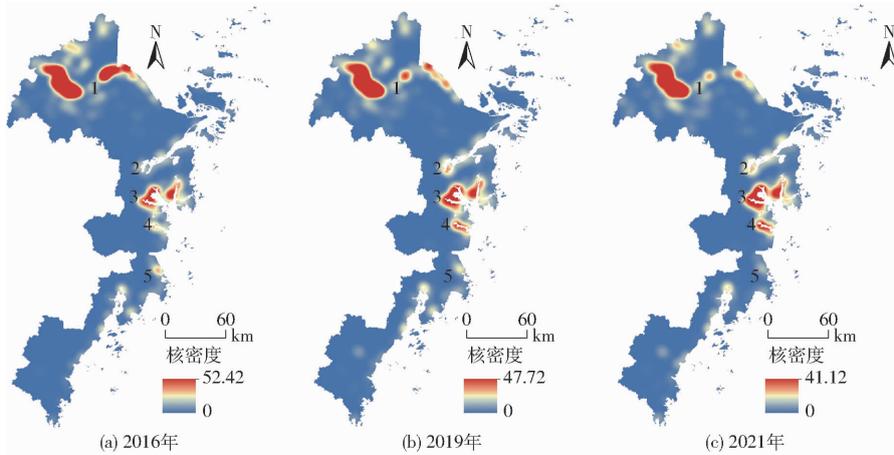


图 10 养殖池塘空间集聚特征

Fig. 10 Spatial clustering characteristics of aquaculture ponds

为核心向附近递减,而南部养殖池塘集聚性较低。整体上看养殖池塘的空间聚集性呈下降趋势,其核密度高值不断下降,最大值从 2016 年的 52.42 下降到 2021 年的 41.12,尤其是杭州湾附近的慈溪沿海一侧,2016 年核密度分布呈现明显的两个高值区,而 2019 年和 2021 年慈溪附近核密度高值明显下降,这也与区域养殖池塘面积快速下降有关。

为探究浙江省养殖池塘的空间变化特征,将 3 期养殖池塘进行叠加,发现浙江省养殖池塘整体上趋于下降,而部分区域养殖池塘亦趋于扩张。主要特征为:①养殖池塘快速下降。该类型区域养殖池塘空间分布快速缩减,如杭州湾慈溪市为例(图 11 中 a),该区域 2016 年养殖池塘面积分布于潮滩一侧,而随着杭州湾国家湿地公园带来的巨大生态效

益和政府对于滨海湿地生态环境的重视,周边区域不断放弃原来的围垦活动,废弃已开垦的养殖池塘,促进该区域人工湿地向自然湿地转变。如图 11 中 d 所示,区域养殖池塘持续快速下降,该区域作为典型的围垦区,渔业养殖经营开发活动频繁,如已成立了台州市路桥顺水水产养殖合作社。但附近工厂(机械、金属和铜业等)不断向养殖池塘扩张,环境污染及生态问题加剧了养殖池塘的废弃。②养殖池塘先增长后下降。该类型区域集中分布于围垦区,如位于三门湾附近的双沙咀(图 11 中 c),作为半封闭型海湾,海侧人工已将其封闭,湾内养殖池塘在 2016—2019 年快速上升,而退塘还湿还林等推动下,湾内养殖池塘面积在 2019—2021 年被大量清除。此外,漩门湾(图 11 中 e)内大部分养殖池塘

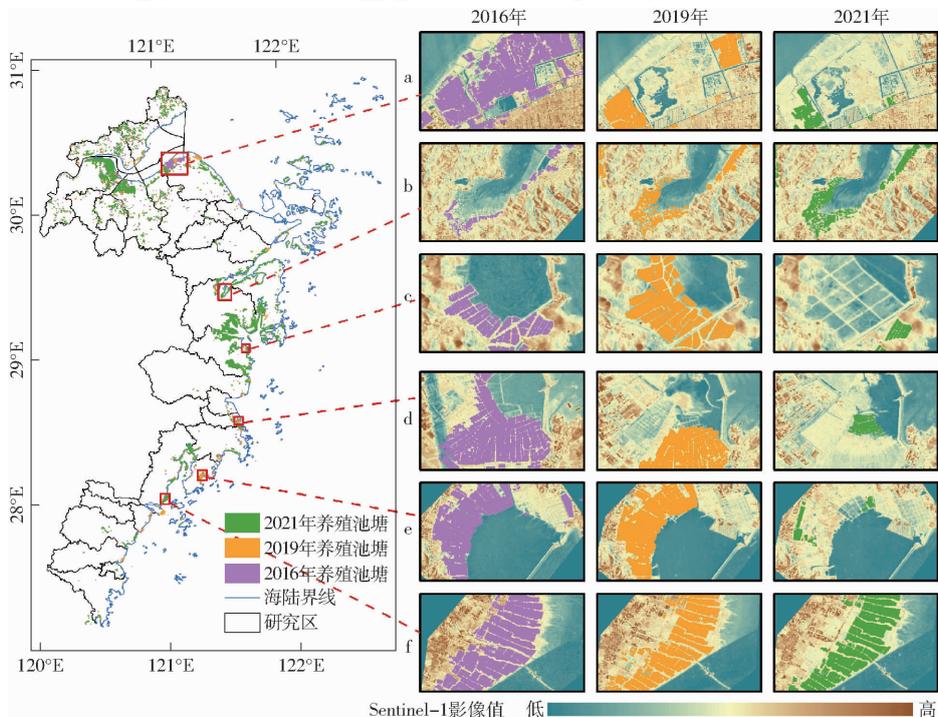


图 11 养殖池塘空间差异特征

Fig. 11 Spatial differences in aquaculture ponds

尤其是第三期围区属于非法养殖活动,故在政府强制清除非法养殖围网下,该区域养殖池塘面积在前期无序增长情况下也快速下降。③养殖池塘面积持续扩张。该类型养殖池塘仍集中分布于潮滩资源丰富的海侧,以象山港内的黄墩港为例(图11中b),湾内中心处于深水区,而靠近陆侧的滩涂则为养殖池塘提供了较好的发展条件,随着社会经济对渔业需求量愈发提高,且黄墩港滩涂不断向外侧沉积,故养殖池塘随着滩涂不断向外扩张,该现象也存在于象山港内的西沪港和铁港。养殖池塘的快速扩张会加剧区域生态风险,如养殖尾水不当处理带来水资源污染、养殖区道路建设带来生境破碎化等。④养殖池塘稳定分布。该类型养殖池塘变化较小,长期稳定开展渔业养殖生产活动。如位于温州湾附近的沿海平原(图11中f),该区域地形平坦,且海水引入方便,淤积的潮滩为其提供充足的土地资源,交通便利,且靠近经济发达的市场地,为稳定生产奠定坚实的自然环境和社会经济基础。

## 4 讨论

基于2016—2021年Sentinel-1中高分辨率影像和水体频率法提取了浙江省沿海水产养殖池塘,并取得了较好的识别效果。相对于前人使用Landsat影像识别的养殖池塘结果,Sentinel-1 SAR

数据能够最大程度上将养殖池塘标记为单个独立单元目标,以此呈现养殖池塘斑块化和具体化。在识别过程中,由于10 m的影像分辨率,可能会忽略部分较小的养殖池塘,故养殖池塘面积略小于实际统计值。而如文献[16]中,其以Landsat影像的识别结果均大于实际养殖面积,这也说明了数据源的不同也会使得识别结果具有差异性。

其次,在实际提取养殖池塘过程中,仍会面临各种误差来源,在前人研究工作中主要面临如废弃鱼塘、潮滩湿地、盐田、废弃河道、水库坑塘等其他水体信息源<sup>[36]</sup>。而本文主要包括(图12,前3列为Sentinel-1影像,第4列为Sentinel-2影像):①废弃鱼塘。作为已不再生产使用的鱼塘,雨季来临后,废弃鱼塘里面仍会充满水,故基于水体频率法识别养殖池塘,该类型会被无差别选中。而废弃鱼塘广泛分布于研究区,故分类后仍需结合Google Earth高分影像和Sentinel-2中高分辨率影像进行精细处理。②光伏面板。太阳能作为新兴清洁能源,当前及未来都具有较好的发展前景,沿海太阳能资源丰富,这也成为建设光伏面板的主要场地。因此,沿海渔光互补光伏发电成为较为流行的新兴发展模式,但与养殖池塘进行区分,本文不考虑充满光伏面板的养殖池塘。③潮滩。潮滩作为养殖池塘主要的扩张来源,为其提供了重要的土地资源,潮滩

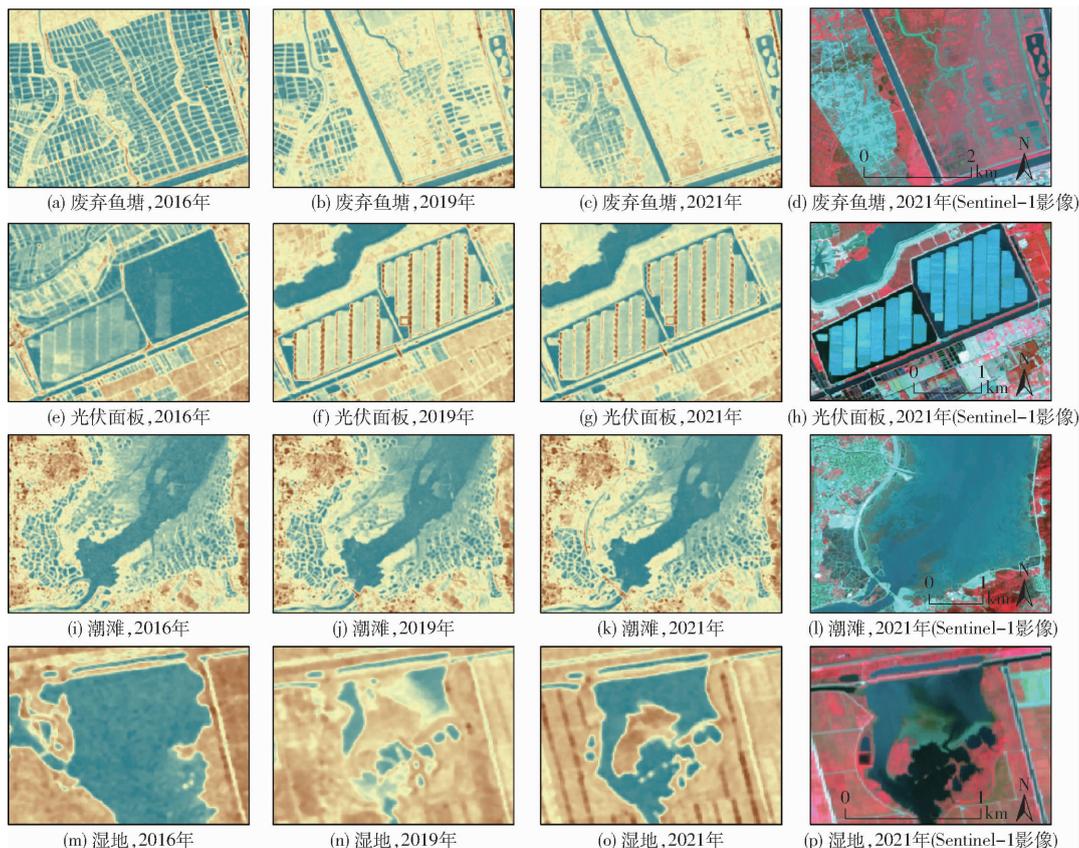


图12 浙江省养殖池塘提取的误差来源

Fig. 12 Source of errors in extraction of aquaculture ponds in Zhejiang Province

在雨水的冲刷下易形成浅水滩,故已被识别为潜在养殖池塘,但该类型潜在养殖池塘已被对象特征识别剔除。④湿地。浙江省沿海分布着众多湿地公园,这也是重要的水体信息源,尤其是部分较为规则的斑块,不易被面向对象特征识别剔除,故结合实际影像进行处理。基于消除上述养殖池塘面临的误差来源后,可得到研究区较为精细的养殖池塘空间分布数据。

基于浙江省养殖池塘的变化特征,政府仍需加强对养殖池塘的有序和可持续管理,主要存在以下问题:①部分养殖池塘的无序管理给当地环境带来巨大的生态危机。尤其是当前其他省份均在快速推进标准化养殖池塘建设,如江苏省、福建省、山东省等,浙江省部分区域虽也取得较好的标准化改造效果,如杭州市萧山区、宁波宁海县、台州市三门县等,但其他区域养殖池塘的标准化建设仍需要快速推进。如在对象山港实地调研过程中,部分区域仍是以土塘分布为主,渔民依靠自身养殖经验进行生产活动,而科学养殖技术的推广性和宣传性仍不足。故加强对沿海养殖池塘的标准化改造和科学化管理,对提升养殖效益和保护沿海生态环境具有显著意义。②沿海养殖池塘非法养殖活动依然存在。在部分滩涂资源丰富的湾区,当地渔民开展非法围垦、非法设网、非法养殖等生产活动,对当地生态环境造成巨大的破坏,虽该种现象也是政府严令禁止,但仍存在不少遗漏。故政府要加大对沿海非法养殖活动摸排,宣传非法养殖的危害,引导有序、科学、环保的开展渔业生产。③浙江省沿海养殖池塘虽呈现集聚

性分布,但集聚性特征可进一步加强。如推动养殖池塘集中连片发展,建设标准化养殖池塘,实现养殖池塘的工厂化、连片化、集约化、高效化,并有效处理净化养殖尾水,实现沿海人类生产活动与沿海生态系统可持续发展。

## 5 结论

(1)浙江省养殖池塘提取精度较高,2016、2019、2021年养殖池塘总体精度分别达到了93.69%、93.55%、94.30%,Kappa系数则均大于82%,养殖池塘提取面积接近实际统计面积,表明GEE平台结合分类后处理具有较好的实际操作能力,也表明该方法具有较好的适用性,并具有一定的推广性。

(2)浙江省养殖池塘面积呈下降趋势,养殖池塘集中分布于宁波市,其次为台州市、绍兴市和杭州市,而舟山市、温州市和嘉兴市养殖池塘面积较小。2016—2019年下降幅度明显大于2019—2021年。县域养殖池塘面积前两名分别为慈溪市和宁海县,其次为台州市的三门县、杭州市的萧山区、绍兴市的上虞区和宁波市的象山县。县域单元变化上,各年份仍以下降趋势为主。

(3)浙江省养殖池塘集中分布于海侧的河流入海口、海湾、沿海平原和潮滩附近,呈现海侧大于陆侧、北部大于南部的分布特征。养殖池塘的空间集聚性呈下降趋势,其核密度高值趋于下降,空间上呈现5个明显的集聚区,分别为杭州湾、象山港、三门湾、浦坝港和乐清湾。

## 参 考 文 献

- [1] 卓友瞻. 改革开放唤醒中国渔业走出了一条有中国特色的渔业发展道路[J]. 中国渔业经济, 2018, 36(6): 4-8. ZHUO Youzhan. The reform and opening up awakened China's fishery and embarked on a fishery development path with Chinese characteristics[J]. China Fishery Economy, 2018, 36(6): 4-8. (in Chinese)
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [3] 彭乐威, 闫周府, 杨正勇. 新发展理念视角下中国渔业现代化发展水平评价及障碍因素研究[J]. 海洋湖沼通报, 2022, 44(3): 166-175. PENG Lewei, YAN Zhoufu, YANG Zhengyong. Evaluation and obstacle factors of China's fishery modernization development from the perspective of new development concepts[J]. Bulletin of Oceans and Lakes, 2022, 44(3): 166-175. (in Chinese)
- [4] OTTINGER M, BACHOFER F, HUTH J, et al. Mapping aquaculture ponds for the coastal zone of Asia with Sentinel-1 and Sentinel-2 time series[J]. Remote Sensing, 2021, 14(1): 153.
- [5] WANG X, XIAO X, XU X, et al. Rebound in China's coastal wetlands following conservation and restoration[J]. Nature Sustainability, 2021, 4(12): 1076-1083.
- [6] 王芳, 夏丽华, 陈智斌, 等. 基于关联规则面向对象的海岸带海水养殖模式遥感识别[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 210-217. WANG Fang, XIA Lihua, CHEN Zhibin, et al. Object-oriented remote sensing recognition of coastal mariculture patterns based on association rules[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 210-217. (in Chinese)
- [7] REN C, WANG Z, ZHANG Y, et al. Rapid expansion of coastal aquaculture ponds in China from Landsat observations during 1984—2016[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 82: 101902.
- [8] MARMORINO G. Investigation of turbulent tidal flow in a coral reef channel using multi-look WorldView-2 satellite imagery[J]. Remote Sensing, 2022, 14(3): 783.

- [9] 刘瑞清,李加林,孙超,等. 基于 Sentinel-2 遥感时间序列植被物候特征的盐城滨海湿地植被分类[J]. 地理学报,2021,76(7):1680-1692.  
LIU Ruiqing, LI Jialin, SUN Chao, et al. Vegetation classification of Yancheng coastal wetlands based on the vegetation phenological characteristics of Sentinel-2 remote sensing time series[J]. Acta Geographica Sinica, 2021,76(7):1680-1692. (in Chinese)
- [10] 郁宗桥,王育红,刘文宋,等. 顾及 GF-3 影像纹理特征的洪涝范围提取方法[J]. 测绘通报,2022(5):26-31.  
YU Zongqiao, WANG Yuhong, LIU Wensong, et al. Flood range extraction method considering texture features of GF-3 image[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(5):26-31. (in Chinese)
- [11] PRASAD K A, OTTINGER M, WEI C, et al. Assessment of coastal aquaculture for India from Sentinel-1 SAR time series [J]. Remote Sensing, 2019, 11(3): 357.
- [12] 睦海刚,赵博飞,徐川,等. 多模态序列遥感影像的洪涝灾害应急信息快速提取[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021,46(10):1441-1449.  
SUI Haigang, ZHAO Bofei, XU Chuan, et al. Rapid extraction of flood disaster emergency information from multimodal sequence remote sensing images[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2021, 46(10): 1441-1449. (in Chinese)
- [13] FU Y, YE Z, DENG J, et al. Finer resolution mapping of marine aquaculture areas using WorldView-2 imagery and a hierarchical cascade convolutional neural network[J]. Remote Sensing, 2019, 11(14): 1678.
- [14] SUN Z, LUO J, YANG J, et al. Nation-scale mapping of coastal aquaculture ponds with Sentinel-1 SAR data using Google Earth Engine[J]. Remote Sensing, 2020, 12(18): 3086.
- [15] WANG M, MAO D, XIAO X, et al. Interannual changes of coastal aquaculture ponds in China at 10-m spatial resolution during 2016—2021[J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 284: 113347.
- [16] DUAN Y, TIAN B, LI X, et al. Tracking changes in aquaculture ponds on the China coast using 30 years of Landsat images [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 102: 102383.
- [17] FU T, ZHANG L, YUAN X, et al. Spatio-temporal patterns and sustainable development of coastal aquaculture in Hainan Island, China: 30 years of evidence from remote sensing[J]. Ocean & Coastal Management, 2021, 214: 105897.
- [18] 赵晨曦,胡敬芳,宋钰,等. 影像图中水体识别与提取技术研究综述[J]. 传感器世界, 2022, 28(8): 1-9.  
ZHAO Chenxi, HU Jingfang, SONG Yu, et al. A review of research on water body recognition and extraction technology in images[J]. Sensor World, 2022, 28(8): 1-9. (in Chinese)
- [19] MCFEETERS S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [20] 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.
- [21] CHANDRASEKAR K, SETHA SAI M V R, ROY P S, et al. Land surface water index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS vegetation index product[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(15): 3987-4005.
- [22] FEYISA G L, MEILBY H, FENSHOLT R, 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.
- [23] HINTON G E, OSINDERO S, TEH Y W. A fast learning algorithm for deep belief nets[J]. Neural Computation, 2006, 18(7):1527.
- [24] LI K, WANG J, CHENG W, et al. Deep learning empowers the Google Earth Engine for automated water extraction in the Lake Baikal Basin[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 112: 102928.
- [25] 冯权龙,牛博文,朱德海,等. 土地利用/覆被深度学习遥感分类研究综述[J]. 农业机械学报,2022,53(3):1-17.  
FENG Quanlong, NIU Bowen, ZHU Dehai, et al. Review for deep learning in land use/cover remote sensing classification [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(3): 1-17. (in Chinese)
- [26] MAYER T, POORTINGA A, BHANDARI B, et al. Deep learning approach for Sentinel-1 surface water mapping leveraging Google Earth Engine[J]. ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 2: 100005.
- [27] 贾诗超,薛东剑,李成绕,等. 基于 Sentinel-1 数据的水体信息提取方法研究[J]. 人民长江,2019,50(2):213-217.  
JIA Shichao, XUE Dongjian, LI Chengrao, et al. Research on water body information extraction method based on Sentinel-1 data[J]. People's Yangtze River, 2019, 50(2): 213-217. (in Chinese)
- [28] PENG Y, SENGUPTA D, DUAN Y, et al. Accurate mapping of Chinese coastal aquaculture ponds using biophysical parameters based on Sentinel-2 time series images[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 181: 113901.
- [29] XIA Z, GUO X, CHEN R. Automatic extraction of aquaculture ponds based on Google Earth Engine[J]. Ocean & Coastal Management, 2020, 198: 105348.
- [30] 黄森文,韦春竹. 广东省沿海城市人工水产养殖基地变化:基于 2015—2019 年 Sentinel-1 数据的实证研究[J]. 热带地理,2021,41(3):622-634.  
HUANG Senwen, WEI Chunzhu. Changes of artificial aquaculture bases in coastal cities in Guangdong Province: an empirical study based on Sentinel-1 data from 2015 to 2019[J]. Tropical Geography, 2021, 41(3): 622-634. (in Chinese)
- [31] PEKEL J F, COTTAM A, GORELICK N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes [J]. Nature, 2016, 540(7633): 418-422.

- hyperspectral remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12):193–201. (in Chinese)
- [12] 牛鲁燕, 蒋风伟, 张俊丽, 等. 基于无人机多光谱遥感的小麦长势监测研究[J]. 山东农业科学, 2021, 53(3):139–145.  
NIU Luyan, JIANG Fengwei, ZHANG Junli, et al. Study on wheat growth monitoring based on UAV multi-spectrum[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2021, 53(3):139–145. (in Chinese)
- [13] 申洋洋, 陈志超, 胡昊, 等. 基于无人机多时相遥感影像的冬小麦产量估算[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(10):1298–1306.  
SHEN Yangyang, CHEN Zhichao, HU Hao, et al. Estimation of winter wheat yield based on UAV multi-temporal remote sensing image[J]. Journal of Triticeae Crops, 2021, 41(10):1298–1306. (in Chinese)
- [14] 申华磊, 苏欲琪, 赵巧丽, 等. 基于深度学习的无人机遥感小麦倒伏面积提取方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9):252–260, 341.  
SHEN Hualei, SU Xinqi, ZHAO Qiaoli, et al. Extraction of lodging area of wheat varieties by unmanned aerial vehicle remote sensing based on deep learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9):252–260, 341. (in Chinese)
- [15] 王晓杰. 基于机器视觉的农田作物行检测方法研究[D]. 焦作:河南理工大学, 2016.  
WANG Xiaojie. Study on crop rows detection with machine vision[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2016. (in Chinese)
- [16] 苏伟, 蒋坤萍, 闫安, 等. 基于无人机遥感影像的育种玉米垄数统计监测[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10):92–98.  
SU Wei, JIANG Kunping, YAN An, et al. Monitoring of planted lines for breeding corn using UAV remote sensing image[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(10):92–98. (in Chinese)
- [17] RAMESH K N, CHANDRIKA N, OMKAR S N, et al. Detection of rows in agricultural crop images acquired by remote sensing from a UAV[J]. International Journal of Image, Graphics and Signal Processing, 2016, 8(11):25–31.
- [18] BASSO M, EDISON P D F. A UAV guidance system using crop row detection and line follower algorithms[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2020, 97:605–621.
- [19] 孙红, 李松, 李民赞, 等. 农业信息成像感知与深度学习应用研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5):1–17.  
SUN Hong, LI Song, LI Minzan, et al. Research progress of image sensing and deep learning in agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):1–17. (in Chinese)
- [20] PANG Y, SHI Y Y, GAO S C, et al. Improved crop row detection with deep neural network for early-season maize stand count in UAV imagery[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178:105766.
- [21] BAH M D, HAFIANE A, CANALS R. CRowNet: deep network for crop row detection in UAV images[J]. IEEE Access, 2019, 8:5189–5200.
- [22] BADRINARAYANAN V, KENDALL A, CIPOLLA R. SegNet: a deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(12):2481–2495.
- [23] CHEN L C, ZHU Y, PAPANDREOU G, et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation[C]//ECCV 2018, Munich, 2018.
- [24] XIE E, WANG W, YU Z, et al. SegFormer: simple and efficient design for semantic segmentation with transformers[C]//Advances in Neural Information Processing Systems, 2021:12077–12090.
- [25] GARCIA-GARCIA A, ORTOS-ESCOLANO S, OPREA S, et al. A review on deep learning techniques applied to semantic segmentation[J]. arXiv preprint arXiv:1704.06857, 2017.

(上接第180页)

- [32] 王晓波, 韩艳伟, 关辅兴. 基于 Sentinel-1 数据的双鸭山市水体信息提取[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(增刊1):97–99.  
WANG Xiaobo, HAN Yanwei, GUAN Fuxing. Extraction of water body information in Shuangyashan City based on Sentinel-1 data[J]. Surveying and Mapping and Spatial Geographic Information, 2022, 45(Supp. 1):97–99. (in Chinese)
- [33] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1):62–66.
- [34] 安成锦, 牛照东, 李志军, 等. 典型 Otsu 算法阈值比较及其 SAR 图像水域分割性能分析[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9):2215–2219.  
AN Chengjin, NIU Zhaodong, LI Zhijun, et al. Comparison of the threshold of typical Otsu algorithms and analysis of water segmentation performance of SAR image[J]. Journal of Electronics and Information, 2010, 32(9):2215–2219. (in Chinese)
- [35] 田鹏, 李加林, 曹罗丹, 等. 基于超效率 SBM 模型的中国海洋渔业经济效率评价及影响因素分析[J]. 海洋通报, 2022, 41(3):290–301.  
TIAN Peng, LI Jialin, CAO Luodan, et al. Evaluation of China's marine fishery economic efficiency and analysis of its influencing factors based on the super-efficiency SBM model[J]. Marine Science Bulletin, 2022, 41(3):290–301. (in Chinese)
- [36] TIAN P, LIU Y C, LI J L, et al. Mapping coastal aquaculture ponds of China using Sentinel SAR images in 2020 and Google Earth Engine[J]. Remote Sensing, 2022, 14(21):5372.