doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.039

1986—2021 年江苏省沿海养殖池塘年际时空特征分析与优化管理

蔡丹丰[1,2]　王慧南[2,3]　田　鹏[2,3]　胡求光[2,3]

(1. 宁波大学科学技术学院, 宁波 315211; 2. 宁波大学东海研究院, 宁波 315211;
3. 宁波大学商学院, 宁波 315211)

摘要: 沿海养殖池塘对保障食物供给、提供优质蛋白和促进沿海社会经济发展具有重要作用,但养殖池塘快速扩张对区域生态系统稳定带来巨大挑战,急需加强沿海养殖池塘时空监测和可持续管理,而目前缺乏长时序养殖池塘年际空间分布数据集。本文基于 1986—2021 年长时序 Landsat 遥感影像,借助 Google Earth Engine 平台与 ArcGIS 软件生成了江苏省沿海 36 年的养殖池塘空间分布数据,并探究其时空变化特征。结果表明:江苏省沿海养殖池塘识别总体精度和 Kappa 系数均大于 91% 和 81%,分类结果准确。江苏省沿海养殖池塘快速增长,1986—2021 年增长 761.75 km^2,且突出表现为缓慢增长阶段(1986—1996 年)、快速增长阶段(1997—2001 年)、波动增长阶段(2002—2005 年)、快速增长阶段(2006—2013 年)、波动下降阶段(2014—2021 年)。空间分布集中于盐城市的大丰区、射阳县、响水县和东台市。江苏省沿海养殖池塘空间聚集于河口、港口和沿海平原,如临洪河河口、灌河河口、新淮河河口、新洋港、晚庄港和川东港,且空间聚集性加强。江苏省沿海养殖池塘扩张集中发生于 1995—2015 年,转入来源主要为其它建设用地、高覆被草地和滩涂。

关键词: 沿海养殖池塘; MNDWI 指数; Google Earth Engine; 空间格局; 江苏省; 时空特征

中图分类号: S127　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0410-14　　**OSID**:

Interannual Spatiotemporal Characteristics and Optimal Management of Coastal Aquaculture Ponds in Jiangsu Province from 1986 to 2021

CAI Danfeng[1,2]　WANG Huinan[2,3]　TIAN Peng[2,3]　HU Qiuguang[2,3]

(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: Coastal aquaculture ponds play a key role in ensuring food supply, providing high-quality protein, and promoting coastal socioeconomic development. However, the rapid expansion of aquaculture ponds poses huge challenges to the stability of regional ecosystems. Therefore, it is necessary to strengthen the spatial and temporal monitoring and sustainable management of coastal aquaculture ponds, but currently there is a lack of long-term inter-annual spatial distribution data sets of aquaculture ponds. Based on long-term Landsat images from 1986 to 2021, the Google Earth Engine platform and ArcGIS software were used to generate 36 years of spatial distribution data of aquaculture ponds along the coast of Jiangsu Province, and its spatiotemporal change characteristics were explored. The results showed that the overall accuracy and Kappa coefficient of coastal breeding pond identification were both greater than 91% and 81%, and the classification results were accurate. Jiangsu Province coastal aquaculture ponds were growing rapidly, with an increase of 761.75 km^2 from 1986 to 2021, and were characterized by slow growth (1986—1996), rapid growth (1997—2001), fluctuating growth (2002—2005), rapid growth (2006—2013), volatility and decline (2014—2021). The spatial distribution was concentrated in Dafeng District, Sheyang County, Xiangshui County and Dongtai City of Yancheng City. Jiangsu Province

收稿日期: 2024-01-18　修回日期: 2024-02-27

基金项目: 浙江省哲学社会科学规划项目(23NDJC124YB)、国家自然科学基金面上项目(71874092)和宁波市会展与旅游发展研究基地项目

作者简介: 蔡丹丰(1991—),男,副教授,主要从事海洋渔业经济管理研究,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

coastal aquaculture ponds were spatially clustered in estuaries, ports and coastal plains, such as Linhong River Estuary, Guanhe River Estuary, Xinhuai River Estuary, Xinyang Port, Wanzhuang Port and Sichuan Port, and the spatial aggregation was enhanced. The expansion of coastal aquaculture ponds occurred mainly from 1995 to 2015, and the main sources of transfer were other construction lands, high-cover grasslands and tidal flats.

Key words: coastal aquaculture ponds; MNDWI index; Google Earth Engine; spatial pattern; Jiangsu Province; spatiotemporal characteristics

0　引言

沿海水产养殖池塘作为重要的粮食生产系统和水生生态系统,在保障粮食供应、促进区域社会经济发展和维持生态系统稳定等发挥重要作用[1-2]。据联合国粮食及农业组织(FAO)统计,世界水产养殖对全球鱼类产量的贡献从 2000 年的 25.7% 迅速上升至 2020 年的 49.0%,突出反映了水产养殖迅猛的增长势头[3]。而随着沿海养殖池塘的快速增长,对沿海脆弱的生态系统带来了巨大威胁[4-5],引发了水体富营养化、生物多样性丧失、红树林栖息地损失等系列生态环境问题[6-8]。而我国水产养殖发展更为迅速,2020 年中国水产养殖占全球水产养殖总产量比例达到 60% 以上[9],其中沿海养殖池塘贡献突出。故充分了解我国沿海养殖池塘长时序的时空演变特征对于沿海地区养殖池塘可持续发展至关重要[10]。

水产养殖可持续发展需要加强对其时空动态监测,可高效调整区域水产养殖规划并提供预警信号[11-12]。传统养殖池塘监测方法依托现场采样和统计报告,费时费力且难以及时有效对其变化进行反馈和应对[13]。而遥感技术的快速发展为水产养殖池塘监测提供了更加有效的支持,尤其是卫星影像数据的开放获取以及集成开源算法的云计算平台快速推动了 GIS 和 RS 技术在水产养殖监测中的应用[13-14]。从沿海养殖池塘的卫星影像数据源上看,光学遥感具有数据源丰富、时间尺度长、开源数据充足等优点[15-16],光学图像已广泛应用于沿海养殖池塘监测研究,以 Landsat TM/ETM +/OLI、Sentinel-2 应用最为广泛,WorldView 系列和 GF 系列虽具有高分辨率但覆盖范围小且价格昂贵使其应用较少[6, 14]。沿海地区易受云雨天气影响,使得光学遥感影像质量波动变化较大[17]。合成孔径雷达(SAR)系统不受天气影响且对水体敏感,使其在监测养殖池塘层面具有更大潜力,主要包括 Sentinel-1 影像、ENVISAT 卫星(ASAR)和欧洲遥感卫星(ERS)等[18-19]。该类型影像空间分布分辨率高而时空分辨率低。故从长时序和分辨率来看,Landsat 以 1972 年至今的时间分辨率和空间分辨率 30 m,对准确揭示区域养殖池塘时空演变具备独特优势。

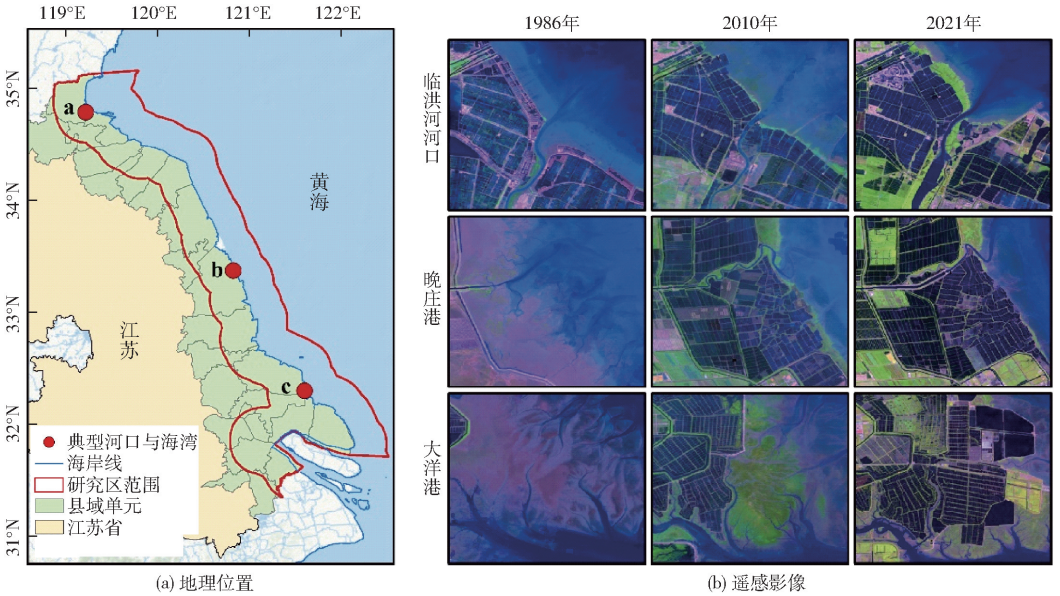
在沿海养殖池塘识别方法上,面向对象分类、阈值分割、机器学习和深度学习等方法广泛应用于水产养殖池塘制图中[12,14,20]。随机森林和决策树算法是水产养殖池塘制图中最常用的机器学习分类器[21-22]。此外,众多学者结合水体指数(Normalized difference water index (NDWI)[23], modified normalized difference water index (MNDWI)[24], auto-mated water extraction index (AWEI)[25] 等)与分类器对养殖池塘进行水体阈值分割,该方法实现简单且计算量小,较好适用于大尺度养殖池塘制图。深度学习方法通过组合不同的卷积层来构建神经网络,需预先选择样本再不断更新迭代模型参数,从而实现自动学习目标特征来识别养殖池塘[12,14,26]。但该方法需要大量样本点、泛化性差且不具备大规模可扩展性。而鉴于养殖池塘独特的几何形状特征,部分学者基于面向对象分类方法结合养殖池塘的光谱和形状特征来建立分类规则[22,27-28]。目前沿海养殖池塘监测尺度不断扩展,集中于国家[16,21]、国家间[15,18]、大洲[17]及全球[20],使得该研究主题较为丰富。但仍存在不足:①长时序的养殖池塘空间监测不足,表现为以 5 a 作为时间间隔,缺乏长时序养殖池塘年际变化分布图。②大尺度下的养殖池塘时空监测仅集中分析核心聚集区,而难以全面表征各区域养殖池塘的演变特征,故地区性的养殖池塘空间分布特征有待进一步揭示。

江苏省具有大江大河优越的地理位置和沿海狭长且平坦的海岸带,渔业经济尤为发达,2021 年渔业总产值达 1.919×10^{11} 元,水产养殖面积约 5 853.33 km^2,位居全国第 1 位和第 3 位,沿海养殖池塘更是发展迅速。但江苏省沿海养殖池塘扩展对区域经济发展和生态环境带来不同程度的影响,对其加强时空监测至关重要[7,29]。本研究基于长时序的 Landsat 遥感影像,生成江苏省沿海长时序且具有较高分辨率的养殖池塘空间分布数据集,探究其时空变化特征,以期为区域养殖池塘高效管理提供建议。

1　研究区概况

江苏省位于中国东部沿海,地形平坦,沿海平原

广布。沿海河流自西向东注入黄河,从北向南港口众多(图 1)。海岸线约 1 000 km,人类活动聚集于狭长的海岸带平原上,其中以养殖池塘生产活动最为突出[30]。2020 年江苏省海洋渔业养殖面积达到 1 776.29 km^2,约占全国海洋渔业总养殖面积的 8.90%。沿海大量传统农田和滩涂已转变为利润更高的水产养殖池塘,使其成为江苏省沿海地区最主要的土地利用类型之一。



(a) 地理位置 (b) 遥感影像

图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of study area

以江苏省海岸线为基准,参考 DUAN 等[21,27]研究生成 30 km 缓冲区。该缓冲区包括江苏省沿海所有县域,且能覆盖深入海侧的养殖池塘,故以此作为本文的研究区范围。由于南侧靠近长江入海口,养殖池塘广泛分布,亦将其考虑在内。故研究区涵盖了江苏省的苏州、南通、连云港和盐城 4 个地级市及 24 个县域单元。以江苏省陆侧的养殖池塘为研究对象,仅提取面积大于 0.001 km^{2}的养殖池塘。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

在 GEE 平台上搜集研究区 1986—2021 年 Landsat 遥感影像数据集(图 2),主要包括 USGS Landsat 5 Surface Reflectance Tier 1 (1986—2011 年)、USGS Landsat 7 Surface Reflectance Tier 1 (2012 年)和 USGS Landsat 8 Surface Reflectance Tier 1 (2013—2021 年)。参照文献[16,18,21,27],中国沿海养殖池塘生产活动集中于 4—10 月,故本研究各幅影像数据限制于每年的 4—10 月。Landsat 遥感影像数据集分辨率为 30 m,该类数据集已进行大气校正和掩膜处理,可直接运用。而 2012 年的 Landsat 7 影像存在条带问题,参考 ZHU 等[31]的研究在 GEE 平台上对其进行去云、线性拉伸、插值填充等步骤去除条带对影像质量的影响。共搜集江苏省沿海 1986—2021 年共计 2 249 幅 Landsat 影像,其中包括 1 437 幅 Landsat 5 TM 影像、63 幅 Landsat 7 EM + 影像和 749 幅 Landsat 8 OLI 影像(图 2d)。

此外,研究还涉及海岸线、河流湖泊、土地利用、谷歌高分影像数据。海岸线矢量数据来自于 Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database (GSHHG)平台。河流湖泊数据免费获取于 OpenStreetMap 平台。土地利用数据选取 1990、2020 年中国科学院资源环境科学与数据中心的土地利用遥感监测产品,该数据集包括二级土地利用分类,其分类类型和具体含义参考该数据集的分类系统介绍(https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=54)。谷歌高分影像来自于 Google Earth 地图,可较为清晰地判别沿海土地利用类型。

2.2 研究方法

2.2.1 养殖池塘提取

养殖池塘作为沿海地表水体的重要组成部分,提取养殖池塘的关键在于区分水体与非水体[16,29]。主要流程包括前期数据处理、潜在养殖池塘识别、养殖池塘分类后处理,并根据该提取流程对研究区 1986—2020 年每年度遥感影像进行分开处理(图 3)。

(1)数据前期处理

在 30 km 缓冲区内筛选遥感影像,对其进行日期筛选、云量去除、条带去除、影像裁剪,并用 Medium 函数取每年 4—10 月的中值影像。OTTINGER 等[17,19]研究表明中值影像能有效改善

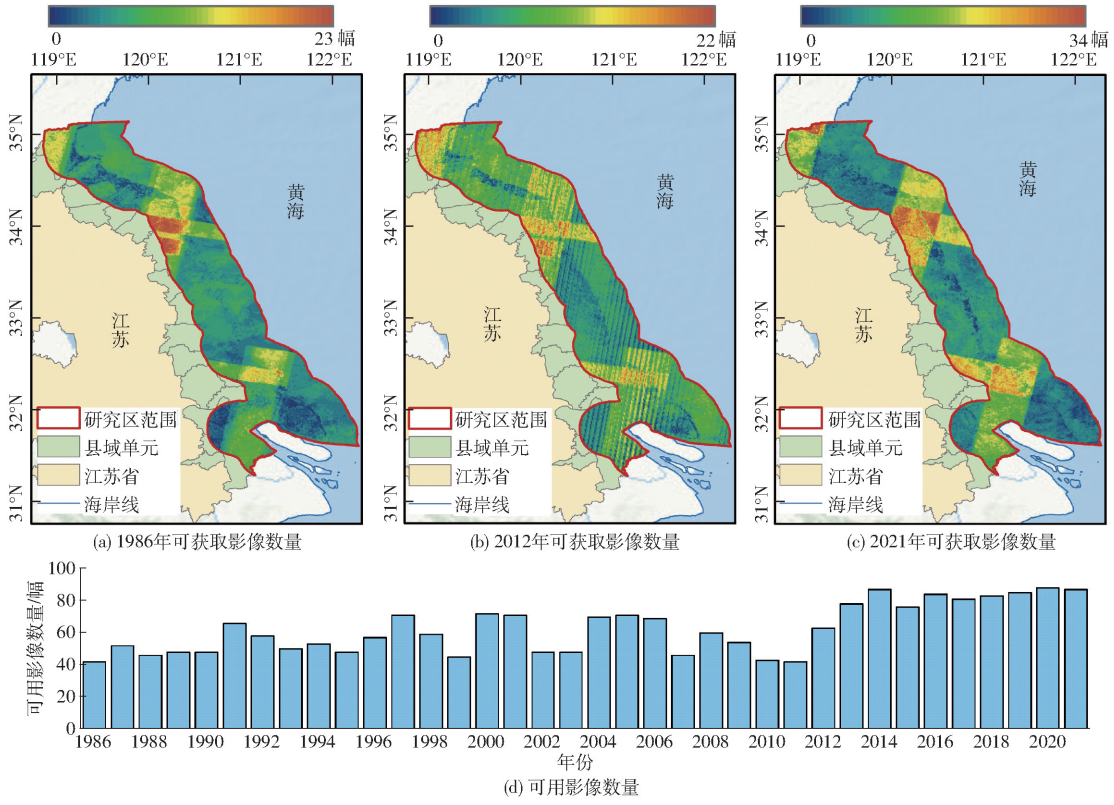


图 2　研究区可利用遥感影像数量

Fig. 2　Number of available remote sensing images in study area

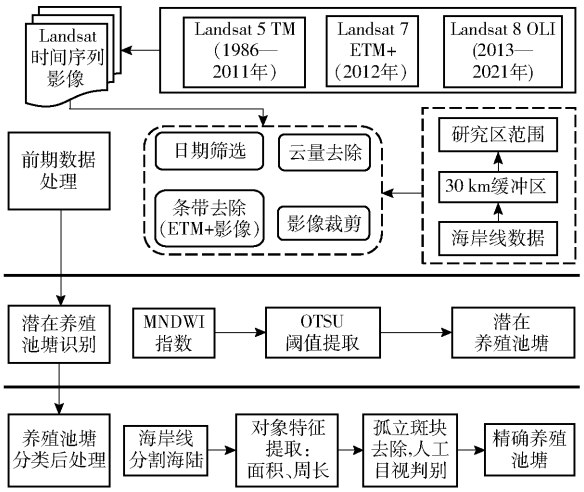


图 3　养殖池塘提取流程图

Fig. 3　Aquaculture pond extraction process

水坝和堤坝(周围池塘)等狭窄、细长线结构的外观,这有助于检测和识别单池塘水平的水产养殖。

(2)潜在养殖池塘识别

参考 DUAN 等[27]和 FU 等[32]研究,水体指数 MNDWI 具有较好的识别效果,故采用 MNDWI 指数来增强水体与非水体的光谱差异,从而识别沿海地表水体信息,其计算公式参考文献[23]。在江苏省沿海选取 3 个案例区作为方法介绍,在中值影像基础上 MNDWI 指数能有效增强水体与非水体的光谱信息(图 4)。然后选取大津法(OTSU)来进一步区分水体与背景信息,OTSU 算法可自动将研究区地物进行背景与前景有效区分,其地物间的类间方差越大,地物信息差异性更明显,由此分割水体与非水体效果更佳[18, 33]。3 个案例区在 OTSU 算法下自动确定分割阈值,且该阈值一般位于峰谷(图 5)。通过该步骤即可实现研究区范围内潜在养殖池塘识别。

(3)养殖池塘分类后处理

在得到潜在养殖池塘基础上,前景地图上分布着养殖池塘、河流、湖泊、盐田、水库、潮滩湿地等水体信息(图 6),这也是养殖池塘准确提取可能存在的误差来源。首先,盐田在遥感影像分布图上呈现明显的亮蓝色(Landsat 影像的短波红外/近红外/红波段组合),故盐田能够通过人工目视有效去除[16]。其次,江苏省沿海平原养殖池塘密集,但养殖池塘转换活动也较为频繁,其中存在大量废弃养殖池塘。但废弃养殖池塘光谱信息与水体具有一定差异,且水面不完全覆盖养殖池塘,故可借助 Google 地图高分影像进行区分。此外,研究对养殖池塘面积、周长进行了进一步限制,如养殖池塘面积大于 0.001 km^2、周长大于 100 m,并借助 OpenStreetMap 提供的河流、湖泊等分布矢量数据,去除区域大型水体信息。最后,江苏省沿海平原养殖池塘呈现密集分布特征,去除沿海平原上大量孤立的养殖池塘斑块,既减少工作量也增加了养殖池塘识别精度。经过机器识别和人工分类后处理得到了研究区较为准确的长时序养殖池塘空间分布数据集。

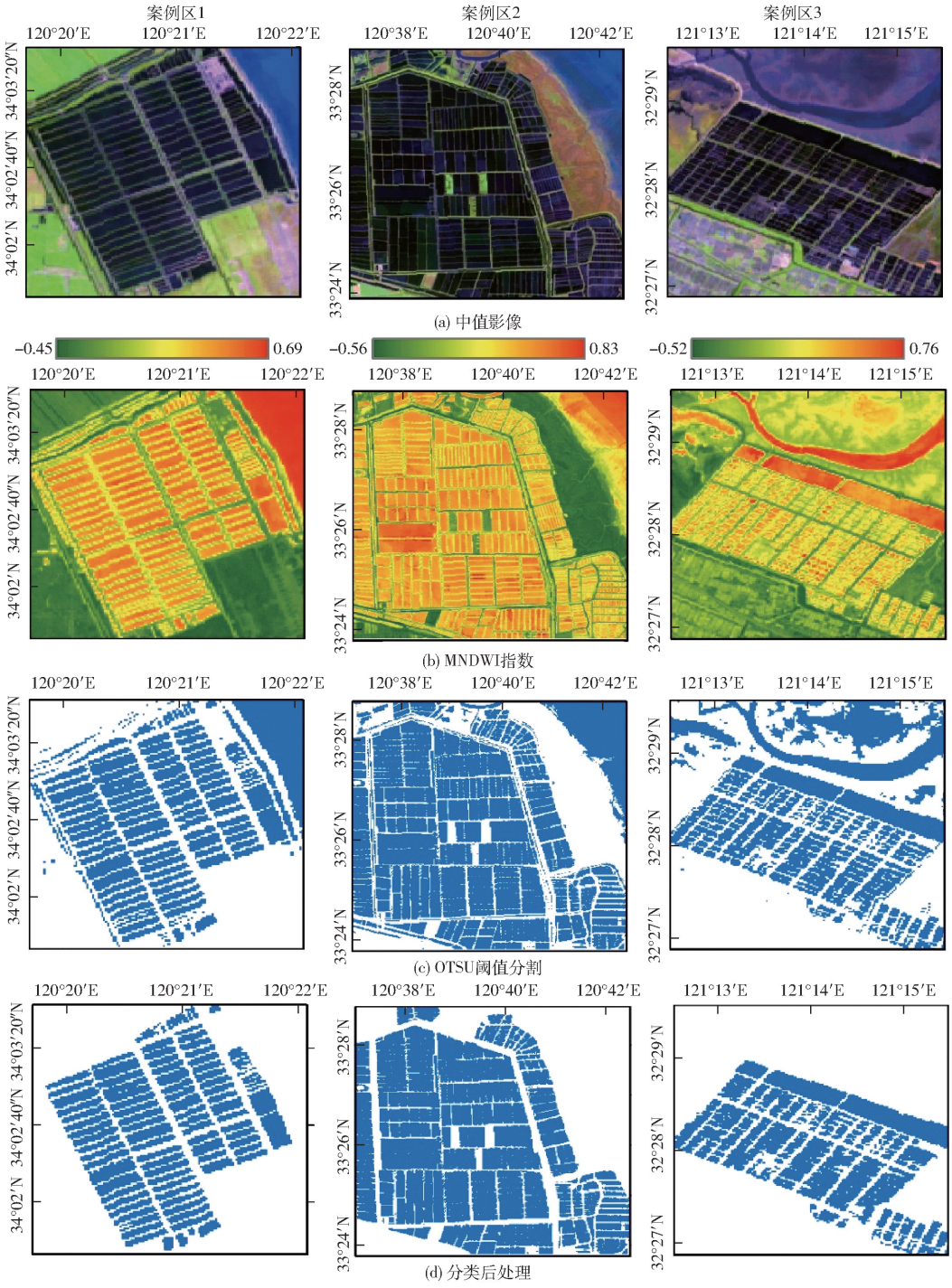


图 4 养殖池塘提取关键步骤

Fig. 4 Key steps for extraction from aquaculture ponds

2.2.2 养殖池塘精度验证

应用 Sample 函数在研究区范围内创建随机点，借助 Google Earth 地图高分辨率影像对样点属性（养殖池塘和非养殖池塘）进行判别，以此构建不同年份养殖池塘混淆矩阵，从而评估其识别精度[14,16,18]。根据不同年份养殖池塘的时空变化，创建的随机点具有差异性。如 1986 年共创建 5 224 个采样点，包括 1 885 个非养殖池塘点和 3 339 个养殖池塘点；2021 年共创建 6 221 个采样点，包括 2 253 个非养殖池塘点和 3 968 个养殖池塘点。借助混淆矩阵计算养殖池塘提取的总体精度（OA）、Kappa 系数、用户精度（UA）和生产者精度（PA），各指标详细计算公式参考文献[17]。

2.2.3 养殖池塘空间集聚与转换特征

以核密度分析揭示研究区不同年份养殖池塘的空间集聚特征，运用 ArcGIS 10.5 软件的空间分析模块（Nuclear Density）进行操作[34]。为探究研究区养殖池塘由何种地类转入，以 1990—2020 年新增养殖池塘空间分布范围去裁剪 1990 年和 2020 年土地利用数据，并对其进行土地利用转移分析。统计该

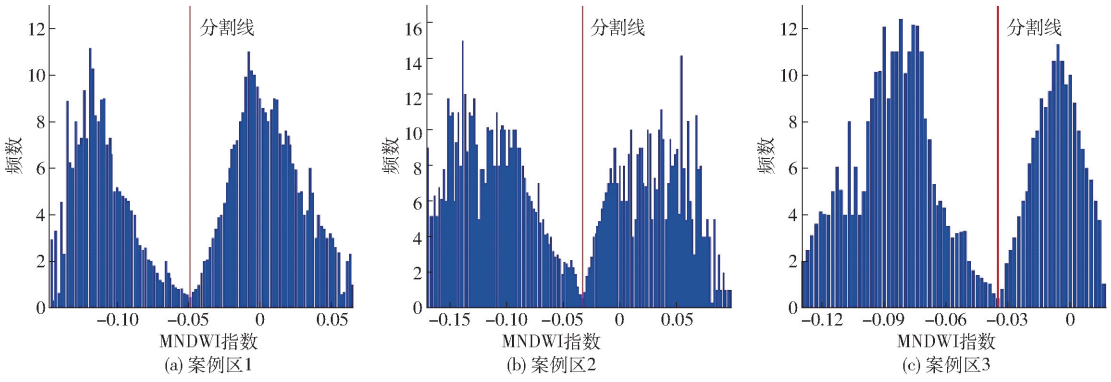


图 5　养殖池塘 MNDWI 指数分布特征

Fig. 5　Distribution characteristics of MNDWI index of aquaculture ponds in case

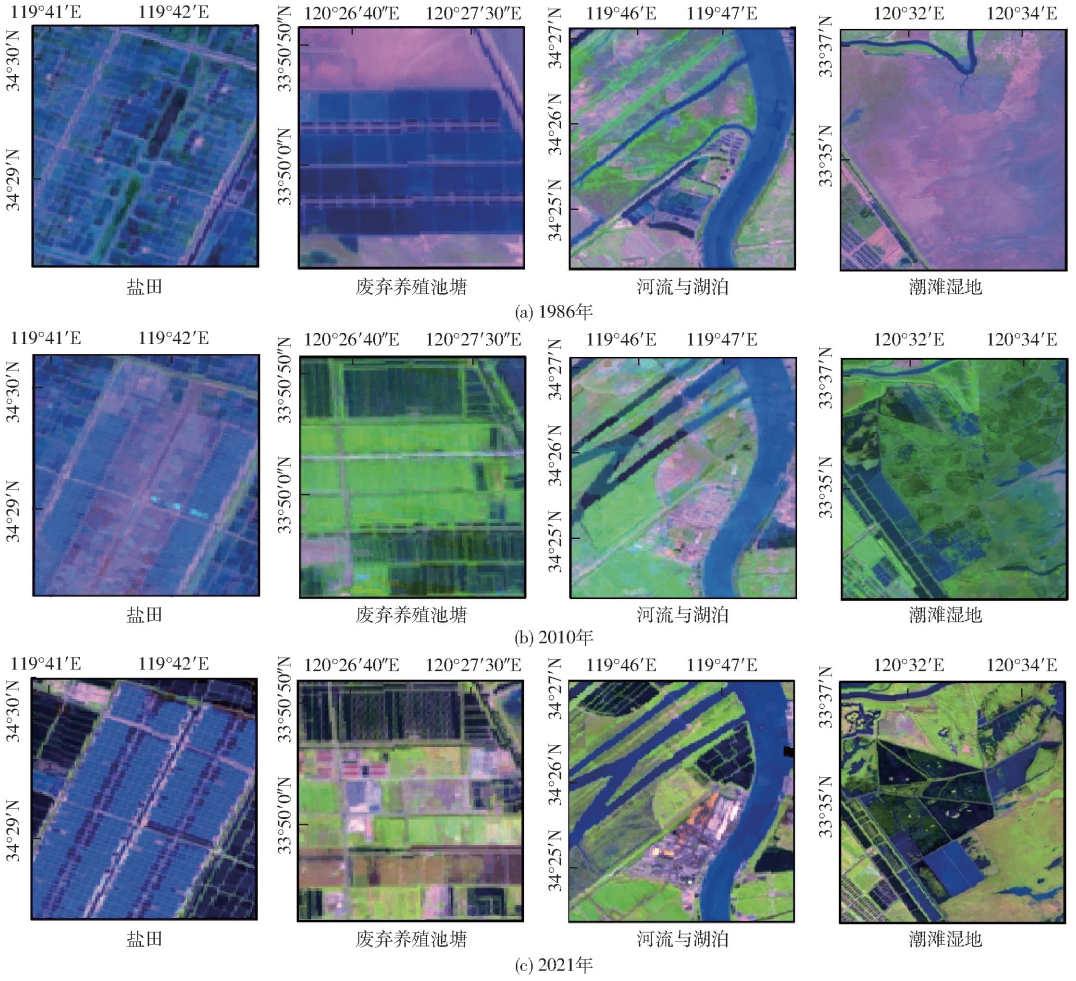


图 6　养殖池塘识别误差来源

Fig. 6　Sources of errors in aquaculture pond identification

转移矩阵中养殖池塘的转入类型，以此表征养殖池塘的主要土地利用来源。

3　结果与分析

3.1　养殖池塘提取结果验证

江苏省沿海养殖池塘识别精度较高，其总体精度均大于 91%，Kappa 系数均大于 81%，鉴于年份较多，仅列出 1986、2000、2010、2021 年 4 年详细的混淆矩阵（表 1）。混淆矩阵中用户精度、生产者精度均大于 85% 和 88%，其养殖池塘用户精度与生产者精度明显大于非养殖池塘。养殖池塘精度评价的各项指标均表明本研究方法识别精度高，能够有效且准确地提取研究区范围内的养殖池塘。将本研究结果与尹玉蒙等[10]中国沿海养殖池塘数据集进行对比。选取 3 个案例区进行叠加分析，结果表明两者能够有效叠加，但尹玉蒙等[10]结果对 Landsat 影像地表水体信息存在过度识别现象。如 1990 年的案例区 2 和案例区 3、2010 年的案例区 3，该区域

表 1 养殖池塘识别精度评价

Tab. 1 Accuracy evaluation of aquaculture pond identification

年份	类型	非养殖池塘数量	养殖池塘数量	总计	用户精度/%	总体精度/%	Kappa系数/%
1986	非养殖池塘数量	1 649	236	1 885	87.48	91.41	81.32
	养殖池塘数量	213	3 126	3 339	93.62		
	总计	1 862	3 362	5 224			
	生产者精度/%	88.56	92.98				
2000	非养殖池塘数量	1 764	198	1 962	89.91	92.61	84.03
	养殖池塘数量	201	3 237	3 438	94.15		
	总计	1 965	3 435	5 400			
	生产者精度/%	89.77	94.24				
2010	非养殖池塘数量	1 567	229	1 796	87.25	92.65	83.32
	养殖池塘数量	167	3 428	3 595	95.35		
	总计	1 734	3 657	5 391			
	生产者精度/%	90.37	93.74				
2021	非养殖池塘数量	1 984	269	2 253	88.06	91.87	82.34
	养殖池塘数量	237	3 731	3 968	94.03		
	总计	2 221	4 000	6 221			
	生产者精度/%	89.33	93.28				

无养殖池塘但仍被误识(图 7)。

3.2 养殖池塘时空分布特征

3.2.1 养殖池塘时序变化特征

江苏省沿海养殖池塘快速增长,养殖池塘面积从 1986 年的 114.59 km^2 扩增到 2021 年的 876.34 km^2,增长 761.75 km^2,增长幅度达 664.77%(图 8a)。充分表明了江苏省沿海养殖池塘生产活动发展迅速且经济效益高。不同发展阶段上,可将研究区养殖池塘扩张划分为 5 个重要阶段,分别为缓慢增长(1986—1996 年)、快速增长(1997—2001 年)、波动增长(2002—2005 年)、快速增长(2006—2013 年)、波动下降(2014—2021 年)。具体上,缓慢增长阶段,养殖池塘面积从 1986 年的 114.59 km^2 增长到 1996 年的 239.21 km^2,仅增长 124.62 km^2。快速增长阶段,养殖池塘面积从 1997 年的 257.16 km^2 增长到 2001 年的 562.51 km^2,快速增长 305.35 km^2,增长幅度达 118.74%。而后进入波动增长阶段,该阶段养殖池塘面积呈先增长后下降特征,2003 年达到该阶段最大值(635.63 km^2)。然后养殖池塘继续保持快速增长,该阶段养殖池塘从 2006 年的 619.45 km^2 增长到 2001 年的 874.17 km^2,增长 254.72 km^2。最后养殖池塘面积趋于波动下降,呈现倒 U 形下降特征,2017 年达到最大值(920.03 km^2),而后 2017—2021 年养殖池塘面积不断下降,表明养殖池塘扩张速率得到了一定控制。

江苏省沿海养殖池塘集中分布于盐城市,其次为连云港市和南通市,苏州市养殖池塘面积最小(图 8b)。盐城市沿海平原广布且地形平坦,海岸线长度远大于其他地级市,为发展养殖池塘提供了优越的地理条件。盐城市养殖池塘面积占沿海养殖池塘总面积的 58% 以上,2001 年和 2011 年养殖池塘占比分别达到 71.08% 和 70.06%,表明盐城市养殖池塘在江苏省整个水产养殖中具有重要地位,尤其是海水养殖。连云港市和南通市养殖池塘面积占比较小,如 2021 年其养殖池塘分别占总面积的 21.48% 和 9.21%,连云港市沿海养殖池塘面积大于南通市。而苏州市养殖池塘面积最小,该区域经济发达,发展养殖池塘的土地资源有限。4 个地级市养殖池塘均趋于快速增长,以盐城市养殖池塘增长面积最为突出,1986—2021 年增长 521.05 km^2,各年份变化与研究区养殖池塘面积整体变化趋势具有相似性(图 8c)。

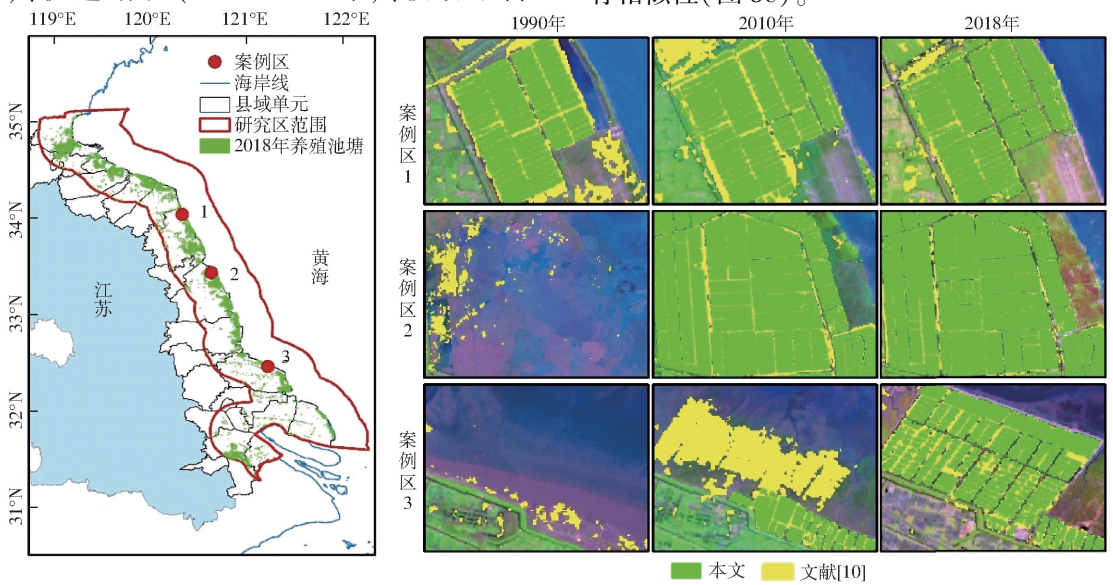


图 7 研究结果与文献[10]空间叠加对比

Fig. 7 Comparison of spatial superposition between research results and reference [10]

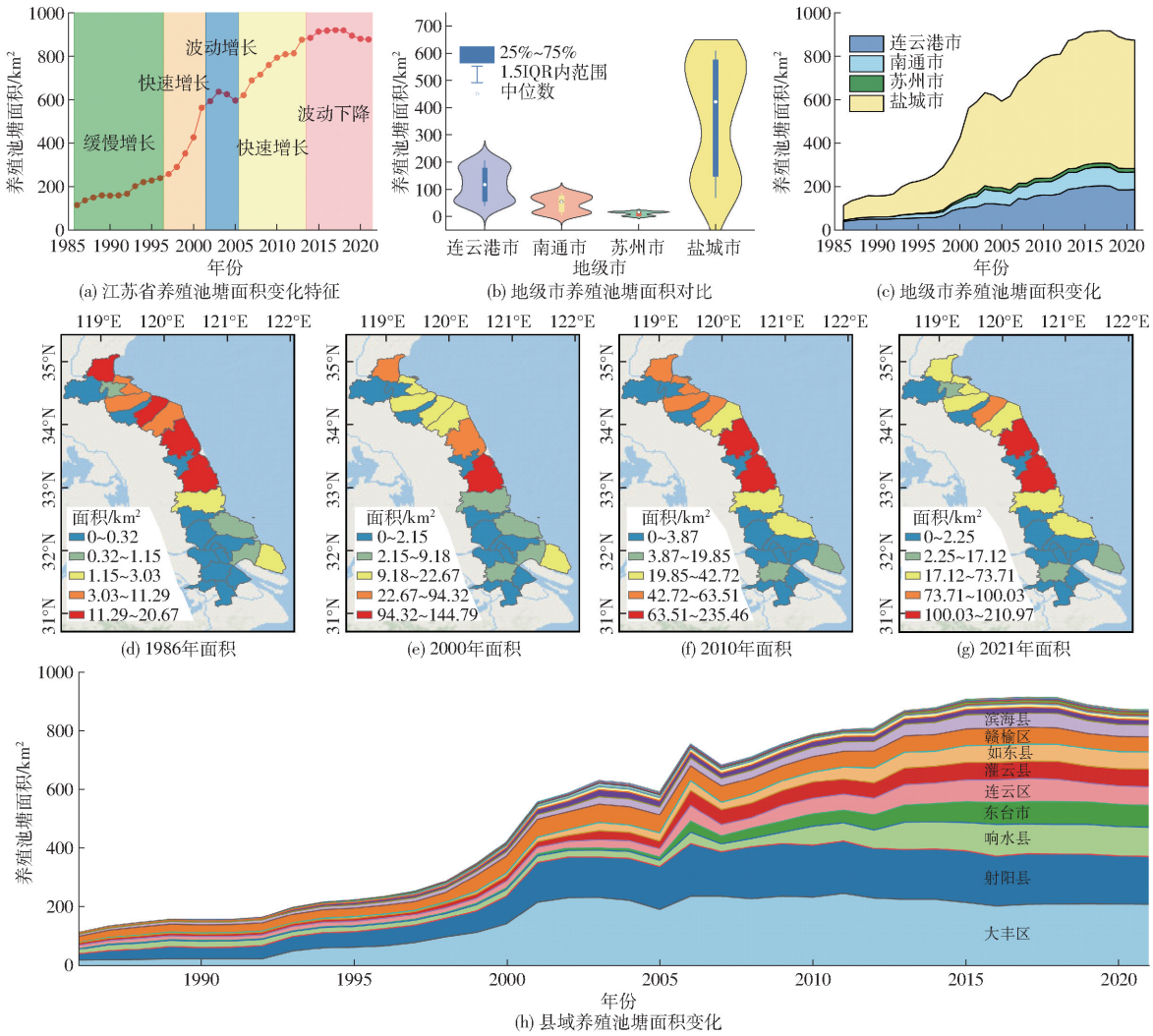


图 8　1986—2021 年养殖池塘面积变化特征

Fig. 8　Change characteristics of aquaculture pond area from 1986 to 2021

县域单元，选取 4 年进行空间展示（图 8d～8g），如 1986 年养殖池塘面积高值区集中于大丰区、射阳县、响水县和赣榆区，2000 年高值区集中于大丰区，2010、2021 年高值区以大丰区和射阳县为主。高值区仍聚集于盐城区域。而综合 1986—2021 年养殖池塘平均面积，前 10 名县域单元分别为大丰区、射阳县、响水县、东台市、连云区、灌云县、如东县、赣榆区、滨海县和启东市。大丰区（29.4%）和射阳县（22.2%）县域单元养殖池塘面积之和已达到全域养殖池塘面积 1/2 以上。各县域养殖池塘面积时序变化上呈波动增长特征，2006 年具有明显的峰值特征，2017 年后则表现为明显的缓慢下降态势。

3.2.2　养殖池塘空间分布特征

江苏省沿海养殖池塘空间集聚性突出且不断加强，选取其中 4 个年份进行核密度分析（图 9）。1986、2000 年呈现 4 个明显的空间集聚中心，而 2010、2021 年集聚中心增加至 6 个。该类空间集聚中心分布于江苏省沿海的北部和中部，如临洪河河口、灌河河口、射阳河口、晚庄港，南部南通市大洋港养殖池塘亦呈现集聚特征。整体上看，1986—2021 年研究区养殖池塘空间集聚态势明显，其核密度最大值从 1986 年的 0.89 上升至 2021 年的 0.96，空间分布高值区在前一年基础上呈现向四周扩张特征和进一步集聚，如 1986 年的聚集中心 2 在 2021 年扩张为集聚中心 2、3；1986 年的集聚中心 3、4 在 2010、2021 年集聚态势更为明显；2010 年养殖池塘在前期基础上增加了集聚中心 6。

江苏省沿海养殖池塘集中分布于河流入海口、沿海平原和港口，从北向南养殖池塘重要的分布区域为临洪河河口、善后河河口、响水沿海平原、扁担港、横南港、腰洼港、晚庄港、川东港和大洋港。2000 年以前各典型区域养殖池塘分布较少，而后呈现快速扩张特征，其空间扩张表现为：①在原养殖池塘基础上快速向海洋扩张。在该类型分布下原先为盐田的区域不断转向经济效益更高的养殖池塘（图 10 中典型区 a、b、c、e、f），如响水沿海平原 2005 年以前

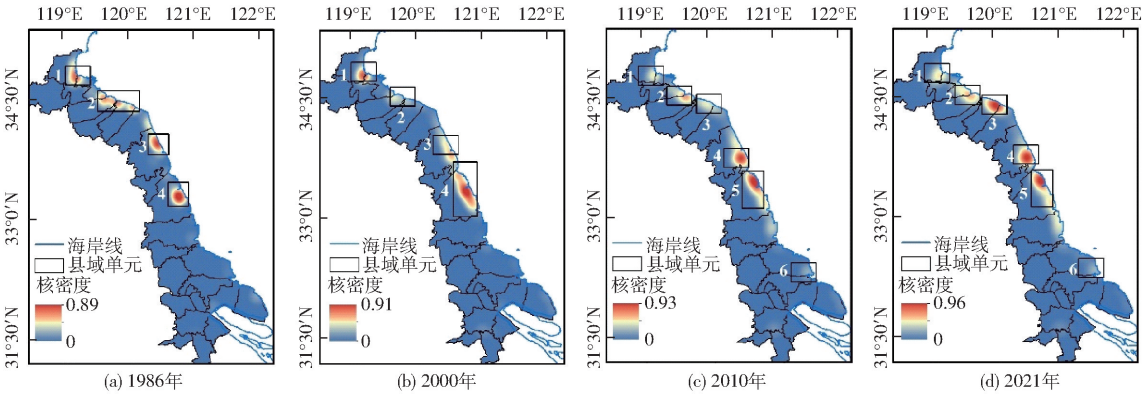


图 9 养殖池塘空间集聚特征

Fig. 9 Spatial agglomeration characteristics of aquaculture ponds

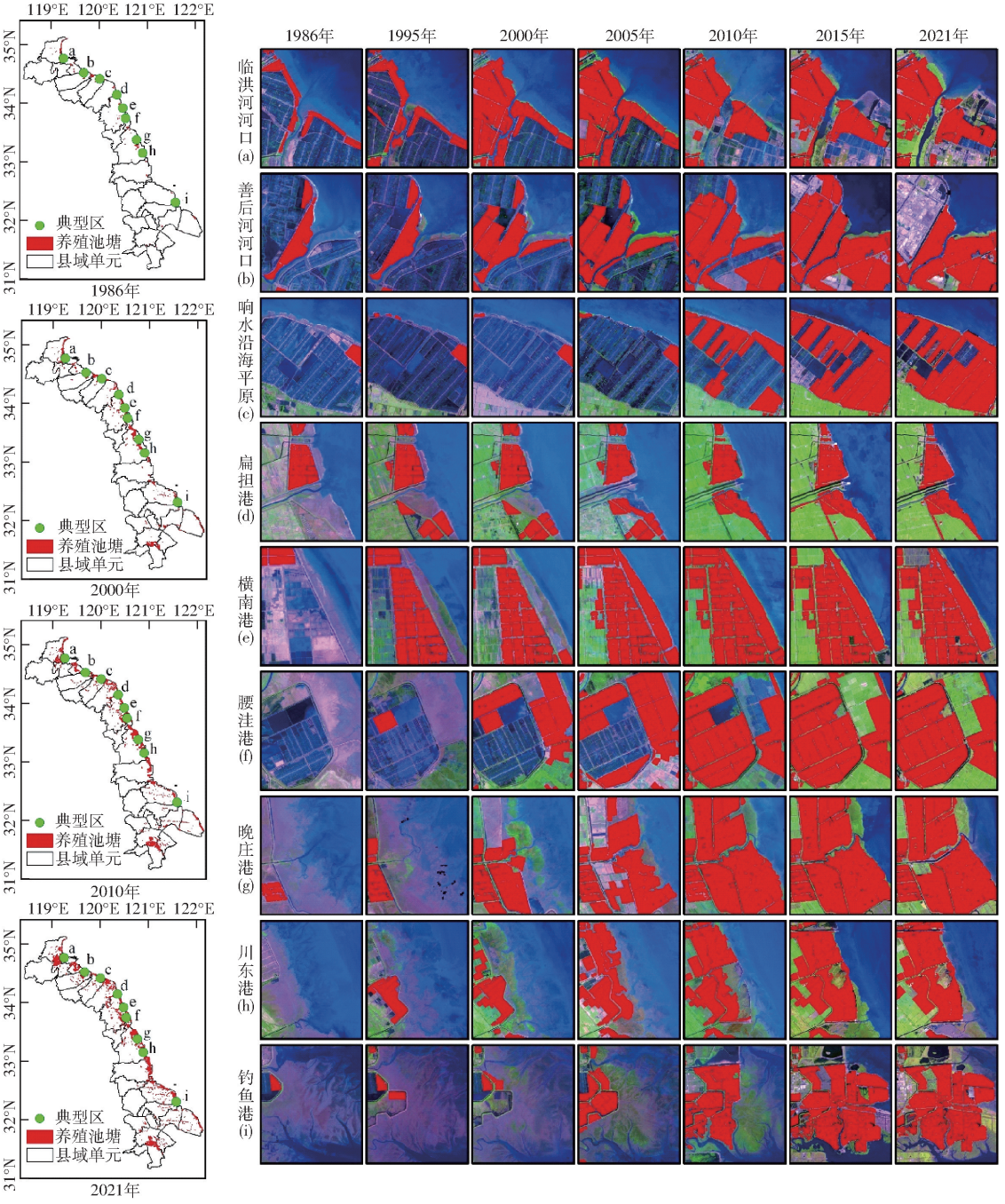


图 10 养殖池塘空间分布特征

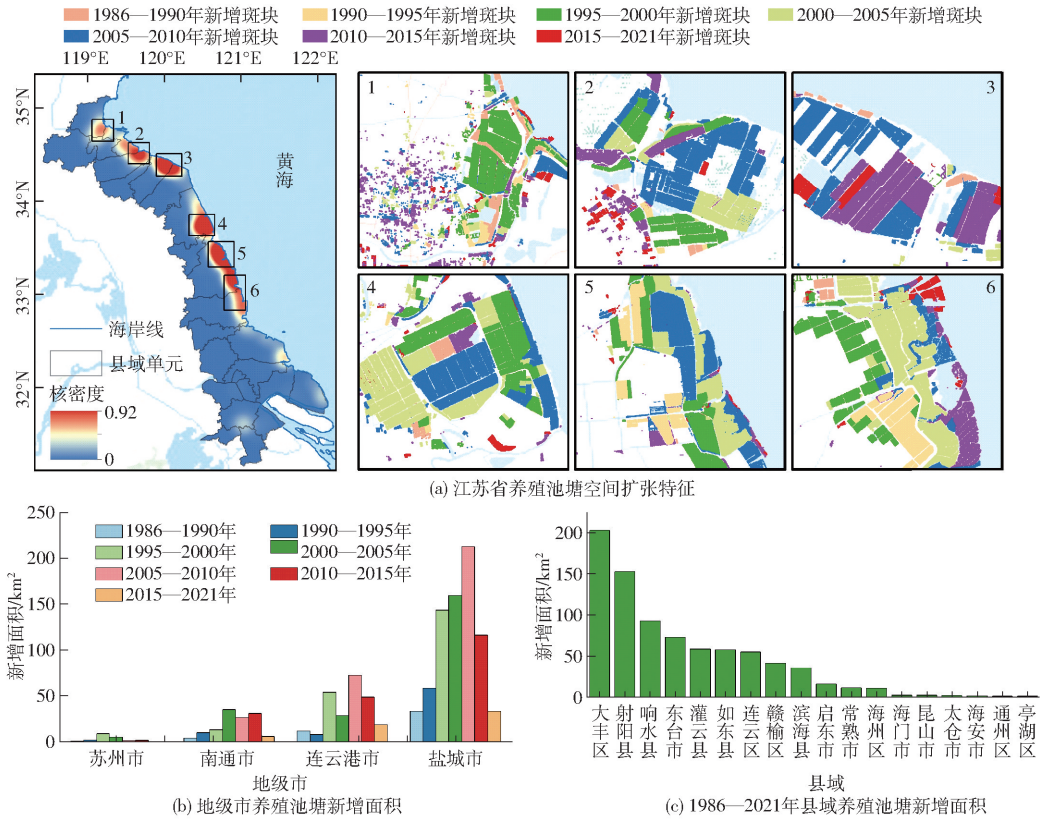
Fig. 10 Spatial distribution characteristics of aquaculture ponds

分布着密集的盐田，该类遥感影像相对养殖池塘更亮且具有明显的盐田生产特征，故能够有效区分。在 2010 年后该区域盐田不断向养殖池塘转移，2021 年仅保留其核心的盐田生产区。②在潮滩湿地围垦基础上养殖池塘扩张（图 10 中典型区 d、g、h、i）。该类型集中于中部区域，尤其是盐城市的大丰区和射阳县两县域单元，2000—2015 年前后沿海围垦活动密集，为养殖池塘扩张提供了充足的土地资源。该类型 2000 年前区域养殖池塘零星分布，潮滩湿地面积宽阔。而随着围垦活动进行，养殖池塘快速向海洋扩张。但在 2015 年以后养殖池塘扩张速度明显放缓，且养殖池塘空间格局较为稳定，如横南港、晚庄港、川东港和大洋港的养殖池塘空间分布变化较小。内陆一侧养殖池塘亦趋于快速扩张，但空间集聚规模远低于沿海平原，仅南部苏州市靠近长江入海口区域有较为密集的养殖池塘分布，该区域位于阳澄湖东北部，河湖密集、地形平坦、水域面积广阔且远离城区，发展养殖池塘具备优越的地理与经济区位条件。

3.3　养殖池塘空间扩张特征

1986—2021 年江苏省沿海新增养殖池塘集聚热点呈现 6 个明显的高值区（图 11a），分布于盐城市与连云港市沿海区域，从北至南分别为临洪河河口、灌河河口、新淮河河口、新洋港、晚庄港和川东港北部。临洪河河口海侧养殖池塘大面积增长，集中发生于 1995—2000 年新增斑块，且海侧新增斑块快速增长。陆侧新增养殖池塘斑块面积较小，集中发生于 2010—2015 年。灌河河口新增养殖池塘斑块密集增长，集中发生于 2005—2010 年，此外 2000—2005 年、2010—2015 年新增斑块较多。新淮河河口新增养殖池塘斑块集中发生于 2005—2010 年、2010—2015 年，且新增斑块面积较大。新洋港和晚庄港新增养殖池塘斑块大，集中发生于 1995—2000 年、2000—2005 年、2005—2010 年。川东港北部沿海平原新增养殖池塘斑块集中发生于 1995—2000 年、2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年。新增养殖池塘斑块均集中发生于 1995—2015 年，而 2000 年以前及 2015 年以后研究区养殖池塘新增斑块较少。

地级市单元上，以盐城市养殖池塘新增斑块面积最大（图 11b），集中发生于 1995—2000 年、2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年，新增斑块面积分别达 143.19、159.75、212.49、115.99 km^2，以 2005—2010 年新增斑块最大。连云港市养殖池塘新增斑块集中发生于 1995—2000 年、2005—2010 年和 2010—2015 年，新增斑块面积分别达 53.81、72.16、48.57 km^2。南通市养殖池塘新增斑块面积集中发生于 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015



(a) 江苏省养殖池塘空间扩张特征

(b) 地级市养殖池塘新增面积

(c) 1986—2021年县域养殖池塘新增面积

图 11　养殖池塘空间扩张及扩张面积变化特征

Fig. 11　Spatial expansion and expansion area change characteristics of aquaculture ponds

年,新增斑块面积分别达 35.06、26.40、30.82 km^2。苏州市养殖池塘新增斑块面积较小。

县域单元上,整体上看,以大丰区和射阳县新增养殖池塘斑块最为突出(图 10c),1986—2021 年增长斑块面积达 203.40、153.03 km^2,远大于其他县域单元。其次养殖池塘新增斑块较高的县域单元分别为响水县、东台市、灌云县、如东县、连云区、赣榆区、滨海县,该类县域新增斑块面积均大于 35 km^2,启东市、常熟市和海州区县域新增养殖池塘斑块面积均大于 10 km^2,其他县域单元新增养殖池塘斑块面积均较低。不同增长阶段上看(表 2),大丰区与射阳县新增养殖池塘斑块集中发生于 1995—2000 年、2000—2005 年、2005—2010 年,该 3 个阶段奠定了两县新增养殖池塘面积的基本分布格局。响水县、连云区、灌云县、东台市和启东市新增养殖池塘集中发生于 2005—2010 年,赣榆区和常熟市新增养殖池塘斑块集中发生于 1995—2000 年,如东县、滨海县和海州区新增斑块密集发生于 2010—2015 年。

表 2 县域单元上养殖池塘各阶段扩张面积

Tab. 2 Expansion area of aquaculture ponds in various stages in county units km^2

县域单元	1986—1990 年	1990—1995 年	1995—2000 年	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2021 年	县域单元	1986—1990 年	1990—1995 年	1995—2000 年	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2021 年
射阳县	21.79	12.24	48.30	57.20	55.35	10.63	4.71	滨海县	1.29	1.49	4.56	13.63	7.37	19.82	3.64
赣榆区	8.75	3.25	29.90	8.94	5.82	10.96	1.23	灌云县	0.95	1.02	13.76	11.56	35.91	7.82	6.21
大丰区	5.49	43.77	81.63	81.28	72.44	17.37	8.76	海州区	0.35	1.43	0.12	0.46	0.60	7.20	3.64
响水县	4.70	0.95	5.12	1.96	44.69	35.91	9.71	东台市	0.20	0.00	3.59	5.62	32.63	31.22	6.47
连云区	1.62	2.40	9.97	7.37	29.66	22.29	7.30	常熟市	0.17	0.79	6.13	3.65	0.48	0.34	0.01
如东县	1.56	3.17	4.57	19.25	15.57	26.79	4.05	启东市	0.08	5.76	5.39	7.83	8.29	1.94	1.04

4 讨论

基于江苏省沿海长时序遥感影像,构建 MNDWI 水体指数对其进行养殖池塘提取,各项评价指标精度均较高,且与前人研究结果具有一致性。如本研究识别的 2021 年江苏省沿海养殖池塘面积为 876.34 km^2,与 WANG 等[35]识别面积(845.62 km^2)、SUN 等[14]提取结果(931.33 km^2)差异较小,尤其是两者研究均以分辨率 10 m 的 Sentinel 遥感影像为数据源,进一步表明了本研究结果的可靠性,且识别养殖池塘空间精度高。但本研究识别结果与 DUAN 等[27](2 007.75 km^2)、REN 等[28](1 663 km^2)对江苏省沿海养殖池塘提取结果具有差异性,且本研究养殖池塘面积远低于两者结果。虽本文与文献[27 - 28]均采用 Landsat 影像(30 m),但文献[27 - 28]旨在提取面积较大的养殖池塘,将区域内的养殖池塘与堤坝均作为一个整体斑块面积提取,使得识别结果面积较高。

进一步统计了研究区养殖池塘扩张的来源类型(图 12),1990—2020 年江苏省沿海养殖池塘扩张主要由其它建设用地、高覆被草地和滩涂构成。其中其它建设用地作为养殖池塘的主要扩张来源类型,来源面积达 250.81 km^2,以响水县和射阳县发生转换明显。该来源主要包括江苏省沿海区域内的工矿用地、盐田、道路基础设施等,其中研究区大量盐田在研究后期逐渐转向经济效益更高的养殖池塘。其次高覆被草地作为研究区养殖池塘第二大扩张来源类型,指沿海区域覆盖度大于 50% 的天然草地转向了养殖池塘,转入面积为 206.03 km^2,集中发生于大丰区。表明养殖池塘扩张侵占草地生态系统生存空间,且高覆被草地作为沿海净初级生产力较高的生态系统类型,其空间分布面积的压缩降低了高覆被草地生态系统服务功能的发挥。滩涂作为养殖池塘扩张第三大来源类型,转入面积为 89.11 km^2,集中于东台市、大丰区和如东县。滩涂作为沿海重要的生态用地,提供固碳、维持生物多样性等多项生态系统服务,而滩涂大量转向养殖池塘对区域生态系统稳定性带来巨大挑战。此外,农用地也是养殖池塘的重要转入来源,如旱地和农田,而该类型农业用地在江苏省沿海陆侧分布面积较大。养殖池塘转入来源还包括滩地、农村居民点、河渠、有林地等地类,共同推动着养殖池塘的扩张。

江苏省沿海围填海活动强度已大幅度降低,养殖池塘发展格局已趋于稳定,新时代下的渔业经济发展需要高效管理养殖池塘。为进一步推动研究区养殖池塘高效管理和可持续发展,于 2020 年 7 月对江苏省沿海养殖池塘进行了实地调研,并提出以下对策建议。

(1)加快推进养殖池塘标准化建设。建设标准化养殖池塘既能保证高效产出,更能减少养殖池塘带来的环境污染问题。实地调研发现江苏省沿海标准化养殖池塘集中分布,但海侧大量新建的养殖池塘仍然为土塘,且部分聚集性较差的养殖池塘仍未实现标准化建设。故从全域来看,仍需加快推进养

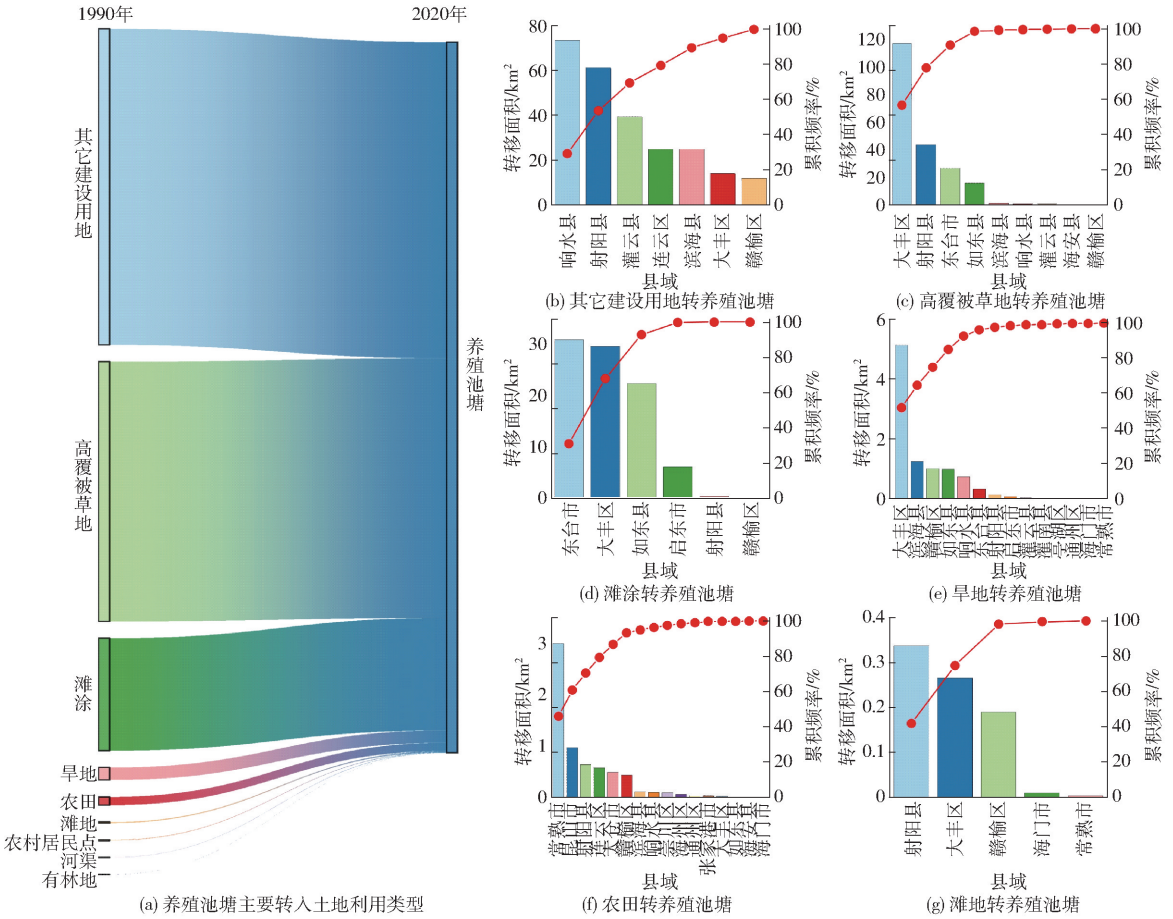


图 12　1986—2021 年养殖池塘转入类型统计

Fig. 12　Statistics of types of aquaculture ponds transferred from 1986 to 2021

殖池塘标准化改造，全面涵盖聚集性高或较低的养殖池塘区域。

（2）建设全域标准化养殖池塘水质监测系统。养殖池塘水质条件对水产产量和周围生态环境具有重要影响。江苏省沿海正大力开展尾水治理工作，建立完善的养殖池塘水质监测系统，有助于定期了解养殖池塘水质情况，为优化、恢复和治理养殖池塘尾水排放奠定基础。对养殖池塘及其排水口建立详细的水质监测标识牌，并进行定期网上公布和线下随机检查。

（3）完善沿海养殖池塘管理制度。可借鉴河长制或湾长制，对不同区域内养殖池塘进行专业针对性管理，让每一块养殖池塘管理落实到主体责任人，完善其养殖池塘长效维护管理方法、各项监管职责和要求、尾水督察、排放尾水登记、公共参与、环境保护等管理制度。

（4）明确养殖池塘各利益主体的主体责任。养殖池塘从建设到运行及产品投放市场，涉及政府、企业、养殖户等不同利益主体，政府需对养殖池塘建设和运行规范进行科学管理和制约，并对其违法或不合理的生产活动进行监督和处罚；企业需加强科技创新，淘汰落后高消耗和高污染的养殖设备，提高鱼产品加工处理效率；养殖户作为养殖池塘切实的操作使用者，需规范使用养殖设备、药品和饵料等，按照行业规范进行科学养殖和尾水处理。

5　结论

（1）提取养殖池塘的各项精度评价指标均较高，表明该研究方法对识别沿海养殖池塘具有较好的应用性和实践性。

（2）江苏省沿海养殖池塘快速增长，研究期间增长 761.75 km^2，增长幅度达 664.77%，发展阶段表现为缓慢增长（1986—1996 年）、快速增长（1997—2001 年）、波动增长（2002—2005 年）、快速增长（2006—2013 年）、波动下降（2014—2021 年）。养殖池塘集中分布于盐城市、连云港市和南通市，县域单元上集中于大丰区、射阳县、响水县、东台市。

（3）养殖池塘空间聚集性增强，集中分布于河流入海口、沿海平原和港口，如临洪河河口、善后河河口、响水沿海平原、扁担港、横南港、腰洼港、晚庄港、川东港和大洋港。

（4）养殖池塘空间扩张集中发生于临洪河河口、灌河河口、新淮河河口、新洋港、晚庄港和川东港

北部,新增养殖池塘斑块均集中发生于 1995—2015 年,而 2000 年以前及 2015 年以后研究区养殖池塘新增斑块较少。

(5)养殖池塘扩张主要由其它建设用地、高覆被草地和滩涂构成,旱地和农田亦是养殖池塘的重要转入来源。

参 考 文 献

[1] NAYLOR R L, HARDY R W, BUSCHMANN A H, et al. A 20-year retrospective review of global aquaculture[J]. Nature, 2021, 591(7851): 551 - 563.

[2] WILLIAMS M, BELL J, GUPTA M, et al. Responsible aquaculture can aid food problems[J]. Nature, 2000, 406(6797): 673 - 673.

[3] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of world fisheries and aquaculture 2022[R]. Rome, 2022.

[4] PHILLIPS M. Getting serious about aquaculture risk[J]. Nature Food, 2022, 3(2): 100 - 101.

[5] JENSEN O P. The changing story of seafood[J]. Science, 2022, 376(6593): 586.

[6] 刘梅, 马启良, 原居林, 等. 基于无人机高光谱遥感技术对内陆养殖池塘水质监测的研究[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(1): 195 - 205.
LIU Mei, MA Qiliang, YUAN Julin, et al. Water quality monitoring of inland aquaculture ponds based on UAV hyperspectral remote sensing technology[J]. Oceans and Lakes, 2022, 53(1): 195 - 205. (in Chinese)

[7] TIAN P, CAO L, LI J, et al. Ecosystem stability assessment of Yancheng coastal wetlands, a world natural heritage site[J]. Land, 2022, 11(4): 564.

[8] PRIMAVERA J H. Mangroves, fishponds, and the quest for sustainability[J]. Science, 2005, 310(5745): 57 - 59.

[9] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of world fisheries and aquaculture 2020[R]. Rome, 2020.

[10] 尹玉蒙, 张英慧, 胡忠文, 等. 中国沿海水产养殖空间分布数据集(1990—2022)研发[J]. 全球变化数据学报(中英文), 2023, 7(2): 215 - 224, 335 - 344.
YIN Yumeng, ZHANG Yinghui, HU Zhongwen, et al. Quadrennial series dataset of coastal aquaculture distribution of China based on Landsat images(1990—2022)[J]. Journal of Global Change Data & Discovery, 2023, 7(2): 215 - 224, 335 - 344. (in Chinese)

[11] 王正, 杜军, 王超, 等. 城市水体信息光学遥感提取方法研究进展报告[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2021, 55(4): 620 - 629.
WANG Zheng, DU Jun, WANG Chao, et al. Research progress report on urban water information extraction methods by using remote sensing way[J]. Journal of Central China Normal University(Natural Sciences), 2021, 55(4): 620 - 629. (in Chinese)

[12] 苏龙飞, 李振轩, 高飞, 等. 遥感影像水体提取研究综述[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(1): 9 - 19.
SU Longfei, LI Zhenxuan, GAO Fei, et al. A review of remote sensing image water extraction[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(1): 9 - 19. (in Chinese)

[13] 文可, 姚焕玫, 黄以, 等. 基于 GEE 的广西北部湾沿海水产养殖池塘遥感提取[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 280 - 288.
WEN Ke, YAO Huanmei, HUANG Yi, et al. Remote sensing image extraction for coastal aquaculture ponds in the Guangxi Beibu Gulf based on Google Earth Engine[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(12): 280 - 288. (in Chinese)

[14] SUN W, HOU T, CHEN C, et al. Mapping China's coastal aquaculture ponds expansion with Sentinel - 2 images during 2017—2021[J]. International Journal of Digital Earth, 2024, 17(1): 2297943.

[15] ZHANG J, YANG X, WANG Z, et al. Mapping of land-based aquaculture regions in Southeast Asia and its spatiotemporal change from 1990 to 2020 using time-series remote sensing data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023, 124: 103518.

[16] TIAN P, LIU Y, LI J, 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] OTTINGER M, CLAUSS K, KUENZER C. Large-scale assessment of coastal aquaculture ponds with Sentinel - 1 time series data[J]. Remote Sensing, 2017, 9(5): 440.

[20] WANG Z, ZHANG J, YANG X, et al. Global mapping of the landside clustering of aquaculture ponds from dense time-series 10 m Sentinel - 2 images on Google Earth Engine[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 115: 103100.

[21] DUAN Y, LI X, ZHANG L, et al. Mapping national-scale aquaculture ponds based on the Google Earth Engine in the Chinese coastal zone[J]. Aquaculture, 2020, 520: 734666.

[22] XIA Z, GUO X, CHEN R. Automatic extraction of aquaculture ponds based on Google Earth Engine[J]. Ocean & Coastal Management, 2020, 198: 105348.
[23] 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.
[24] XU H. 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.
[25] 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.
[26] DINIZ C, CORTINHAS L, PINHEIRO M L, et al. A large-scale deep-learning approach for multi-temporal aqua and salt-culture mapping[J]. Remote Sensing, 2021, 13(8): 1415.
[27] 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.
[28] 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.
[29] DUAN Y, LI X, ZHANG L, et al. Detecting spatiotemporal changes of large-scale aquaculture ponds regions over 1988—2018 in Jiangsu Province, China using Google Earth Engine[J]. Ocean & Coastal Management, 2020, 188: 105144.
[30] 田鹏. 江苏盐城滨海湿地生态系统稳定性评价及未来景观模拟研究[D]. 宁波:宁波大学, 2020.
TIAN Peng. Stability evaluation of coastal wetland ecosystem and future landscape simulation research in Yancheng, Jiangsu[D]. Ningbo: Ningbo University, 2020. (in Chinese)
[31] ZHU X, LIU D, CHEN J. A new geostatistical approach for filling gaps in Landsat ETM + SLC-off images[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 124: 49 – 60.
[32] 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.
[33] 任超, 刘桃林. 针对水体提取的大津布谷鸟自适应阈值方法[J]. 测绘科学, 2022, 47(9): 163 – 169, 180.
REN Chao, LIU Taolin. An adaptive threshold approach for water body extraction in the OTSU-Cuckoo[J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(9): 163 – 169, 180. (in Chinese)
[34] 蔡丹丰, 胡求光, 魏昕伊. 基于 Sentinel – 1 影像的浙江省沿海养殖池塘提取与管理[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 169 – 180, 188.
CAI Danfeng, HU Qiuguang, WEI Xinyi. Extraction and management of coastal aquaculture ponds in Zhejiang Province based on Sentinel – 1 SAR images[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 169 – 180, 188. (in Chinese)
[35] 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.

(上接第 343 页)

[47] MUHAMMAD S, KUMAZAWA K. Use of optical spectrograpiuc ^{15}N-analyses to trace nitrogen applied at tile heading stage of rice[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1972, 18(4): 143 – 146.
[48] MUHAMMAD S, KUMAZAWA K. The absorption, distribution, and redistribution of ^{15}N-labelled ammonium and nitrate nitrogen administered at different growth stages of rice[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1974, 20(1): 47 – 55.
[49] OZAKI K, MITSUI S. Studies on nitrogen metabolism of rice plant with use of isotopically labelled ammonium sulphate[J]. Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 1951, 21(3):179 – 180.
[50] WADA G, SHOJI S, TAKAHASHI J. The fate of fertilizer nitrogen applied to the paddy field and its absorption by rice plant: 4. Distribution of basal and top-dressed nitrogen in rice plant[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1973, 42(1): 84 – 90.
[51] BATTUDE M, AL BITAR A, MORIN D, et al. Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial and temporal resolution Sentinel – 2 like remote sensing data[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 184: 668 – 681.
[52] CLEVERS J G P W, KOOISTRA L. Using hyperspectral remote sensing data for retrieving canopy chlorophyll and nitrogen content[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2011, 5(2): 574 – 583.
[53] VERRELST J, MALENOVSK Z, VAN DER TOL C, et al. Quantifying vegetation biophysical variables from imaging spectroscopy data: a review on retrieval methods[J]. Surveys in Geophysics, 2019, 40: 589 – 629.
[54] 杨海波, 李渊, 尹航, 等. 基于新组合光谱指数的马铃薯植株氮含量遥感估测[J]. 土壤, 2022, 54(2): 385 – 395.
YANG Haibo, LI Yuan, YIN Hang, et al. Remotely estimation of plant nitrogen concentration in potato using new combined spectral index[J]. Soils, 2022, 54(2): 385 – 395. (in Chinese)