

doi: 10.6046/zrzyyg.2022037

引用格式: 李叶繁,王琳,张冬珠. 光谱特征和空间卷积相协同的近岸海域养殖塘遥感信息提取[J]. 自然资源遥感,2022,34(4):42-52. (Li Y F, Wang L, Zhang D Z. Information extraction of coastal aquaculture ponds based on spectral features and spatial convolution[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4):42-52.)

光谱特征和空间卷积相协同的近岸 海域养殖塘遥感信息提取

李叶繁^{1,2,3}, 王琳^{1,2,3}, 张冬珠^{1,2,3}

(1. 福州大学环境与安全工程学院,福州 350108; 2. 福州大学地理与生态环境研究院,福州 350108;
3. 福建省水土流失遥感监测评估与灾害防治重点实验室,福州 350108)

摘要: 为控制水产养殖塘无序发展带来的负面效应,促进水产养殖业进一步发展,首要解决的就是对其快速、准确识别和提取的问题。水产养殖塘是被复杂道路和堤坝分割的特殊网状水体,单纯的光谱特征或空间纹理特征都不足以对其准确提取,且混合特征规则集对计算机性能要求越发苛刻。鉴于此,以 Landsat 影像序列为数据源,基于谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)平台,提出了一种结合影像光谱信息、空间特征和形态学操作的沿海水产养殖塘自动提取方法。该方法联用了双特征水体光谱指数(改进型组合水体指数(modified combined index for water identification, MCIWI)与改进的归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI))以突出大面积水体与养殖塘的网格特征,再利用低频滤波空间卷积运算拉伸养殖与非养殖水体之间的差异特征,将水产养殖塘区作为一个整体准确识别和快速提取。研究结果表明:①该方法总精度达到93%,Kappa系数为0.86,典型区域叠加比对检验流程验证,提取结果和实际结果重叠比例均在90%以上,平均重叠比例达92.5%,反映了提取方法的高精度和可靠性;②2020年福建省近岸海域水产养殖塘区总面积为511.73 km²,主要分布在漳州市、福州市和宁德市;③核密度分析结果表明漳州市的水产养殖塘集聚度高,相应其养殖塘管理压力也较大。该方法可以实现近岸海域水产养殖塘的自动化提取,对促进渔业养殖的有序管理和科学发展具有重要的意义。

关键词: 水产养殖塘区; 阈值分割; 空间卷积; GEE 平台

中图法分类号: TP 751 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)04-0042-11

0 引言

改革开放后,我国渔业重心逐步由捕捞业转向了养殖业,成为世界少数水产养殖产量远高于捕捞量的国家之一,也是世界水产养殖总产量最高的国家^[1]。海岸带区域的养殖塘是水产养殖的主要承载形式,随着水产养殖的迅速发展,星罗棋布的滨海养殖塘在带来可观的经济效益外,也导致养殖管理的难度不断加大,对区域环境的负面影响不断增强,如养殖布局不合理^[2]、超容量与超规划养殖^[3],养殖污水超标排放^[4]及碳排放等问题。为控制其无序发展带来的负面效应,促进水产养殖业进一步发展,首要解决的就是养殖塘快速、准确地识别和提取的问题。

传统渔业实地调查受人力、物力和可达性限制,费时费力,而官方公布的渔业统计数据只有分类养殖面积,难以从宏观上反映对象的空间分布和时空协同变化趋势。因此能实现高精度、短周期、大面积同步监测的遥感技术成为渔业调查稳定、可靠的技术手段。目视解译是利用遥感影像提取水产养殖区的经典方法^[5-10],但其操作主观性强,解译者的先验知识对提取精度影响较大,效率低。有学者从光谱特征入手,采用光谱分类^[11-15]或是构建光谱特征指数^[16-17]的方式尝试水产养殖区的自动提取,但光谱分类易受“同物异谱”及“同谱异物”现象的影响,而光谱特征指数则较多针对某一区域或某一传感器构建,可移植性和鲁棒性较低。近年来,面向对象的提取方法也开始被广泛使用^[18-23],学者们通常采用多尺度分割,结合形状、光谱和纹理等信息建立特征

收稿日期: 2022-02-11; 修订日期: 2022-06-02

基金项目: 国家自然科学基金重点支持项目(促进海峡两岸科技合作联合基金)“闽台高植被覆盖区台风暴雨型滑坡孕灾环境、成灾机制与动态预警”(编号: U2005205)资助。

第一作者: 李叶繁(1999-),女,硕士研究生,研究方向为环境与资源遥感。Email: liyefan990104@163.com。

通信作者: 王琳(1981-),男,博士,副教授,研究方向为环境与资源遥感。Email: wanglin@fzu.edu.cn。

规则集以实现自动提取,但其计算需耗费大量系统资源,对计算机性能及遥感影像数量、质量的要求都较为苛刻。因此,高效、可靠、准确的水产养殖塘提取方案仍然是一大挑战。

谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)是一个基于“云”的平台,能高效处理大规模地理空间数据集,且包含来自各种卫星传感器获取的免费公开影像数据^[24],大大降低了海量数据分析系统的门槛、突破了遥感多源数据获取的瓶颈。鉴于此,本文基于 GEE 平台,以中等分辨率 Landsat 影像序列为数据源,提出了一种结合影像光谱信息、空间特征和形态学操作的沿海水产养殖塘自动提取方法,以期准确识别和全面评估福建省沿海水产养殖塘及其空间分布,为有效降低沿海养殖塘管理难度,显著控制养殖塘对环境的负面影响,保护海洋水质提供了理论参考和数据支持。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

福建省位于我国东南沿海,陆域介于 $N23^{\circ}33' \sim 28^{\circ}20'$, $E115^{\circ}50' \sim 120^{\circ}40'$ 之间,南与广东省相邻,北与浙江省相接,东与台湾省隔海相望。陆域面积为 12.4 万 km^2 ,海域面积为 13.60 万 km^2 ,陆地海岸线长达 3 752 km,岸线曲折,港湾众多。福建水产养殖业发达,是传统的水产养殖大省,2020 年全省渔业经济总产值为 3 135.60 亿元,其中渔业产值为 1 422.64 亿元,在第一产业总产值中的占比接近 30%,排名全国第二。福建海岸线绵长,福州、宁德等地都是全国有名的水产养殖区,拥有良好的海岸

带养殖基础。本文以福建省域内具有海岸带养殖条件的 6 个沿海城市(宁德市、福州市、莆田市、泉州市、厦门市和漳州市)为研究区,进行养殖塘的自动识别和提取算法研究,并分析其空间集聚特征。研究区位置如图 1 所示。

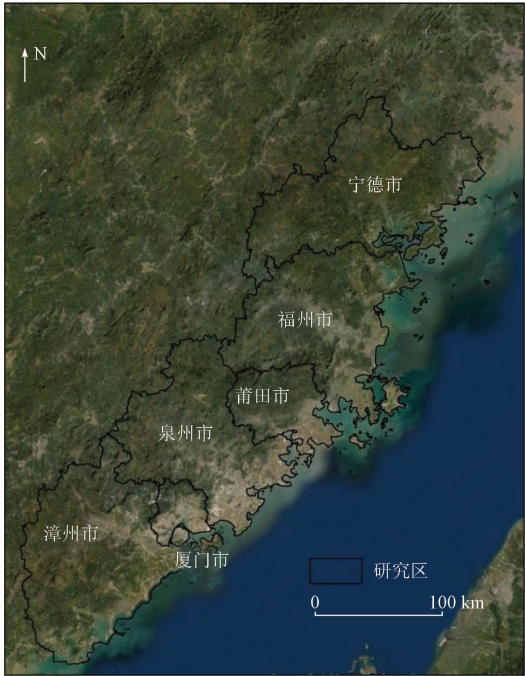
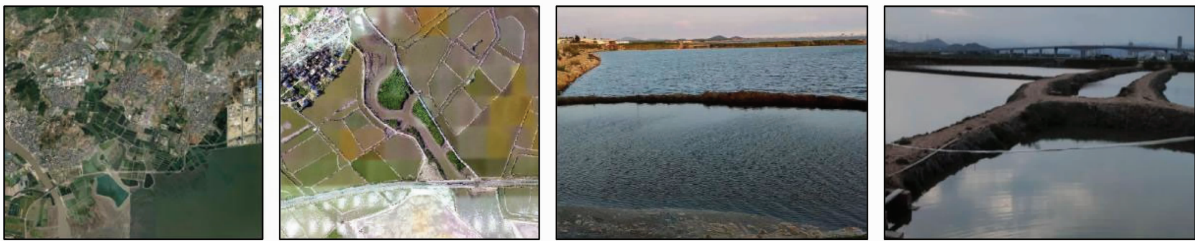


图 1 研究区位置
Fig.1 Location of study area

本研究中所提取的水产养殖塘指的是位于近岸海域的陆地养殖池,由池塘构成,养殖池之间由垄地隔开,在遥感影像中一般以规则或不规则网格水体的形式呈现。养殖池水体主要由海水或淡水组成,其光谱特征与水体类似。典型水产养殖塘的 Google Earth 影像及实地调研照片见图 2。



(a) 养殖塘 Google Earth 影像 (b) 养殖塘无人机影像 (c) 养殖塘 1 现场照片 (d) 养殖塘 2 现场照片

图 2 养殖塘遥感影像与现场照片

Fig.2 Objects of aquaculture pond in remote sensing images and in situ photos

1.2 数据源及其预处理

本研究使用的数据主要为来源于美国地质调查局的 Landsat 系列遥感影像,空间分辨率为 30 m,重返周期为 16 d。GEE 平台上可用代码直接调用经过大气校正的覆盖研究区的 Landsat 影像(GEE 内

部调取代码为 LANDSAT/LC08/C02/T1_L2),镶嵌、裁切等预处理流程也均在此平台上完成。由于水产养殖塘一般在春、冬 2 季排水清塘^[25],因此将影像的采集时间设定在 2020 年的 3—10 月间,以最大限度避开干塘期^[26-27]。同时,使用质量评估波段

(quality assessment band) 消除云和云阴影的影响, 最终获取覆盖福建省近岸海域研究区的 10 景 Landsat8 遥感影像。

此外, 本研究使用的数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 数据是由美国航空航天局提供的 SRTM (shuttle Radar topography mission) V3 (即 SRTM plus) 产品, 空间分辨率为 1" (约 30 m), 也可在 GEE 平台上通过代码直接调用 (GEE 内部调取代码为 USGS/SRTMGL1_003)。研究涉及的其他基础地理数据来源于国家地理信息中心 1:400 万地图数据库。

2 研究方法

在 GEE 平台上, 利用研究区 Landsat8 数据集和对应的 DEM, 结合实地调研数据构建福建省近岸海域水产养殖塘提取决策模型 (图 3), 该模型可以概括为以下 4 个流程: ①DEM 支持下的水产养殖覆盖区划定; ②基于形态学和光谱特征的非水体信息剔除; ③基于空间卷积的非养殖水体信息剔除; ④识别结果后处理。在研究区中挑选 2 个典型水产养殖塘区域作为试验区来展现分步骤提取的流程和效果。

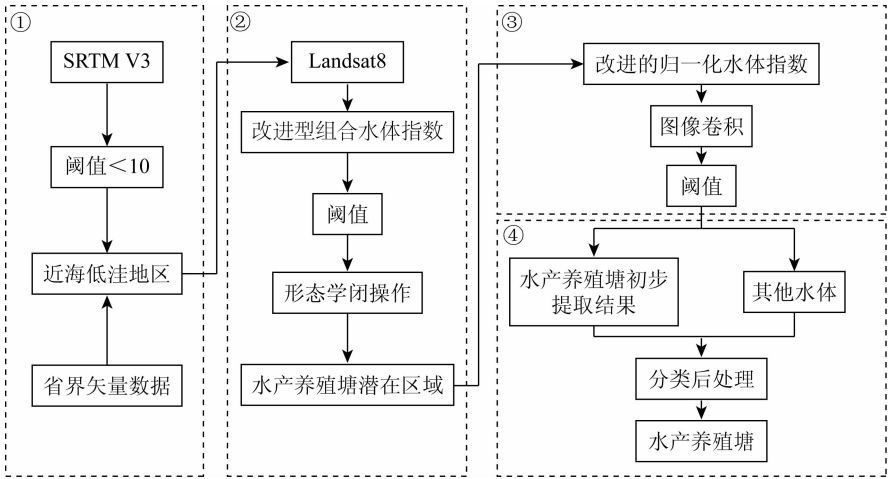


图 3 水产养殖塘区提取流程

Fig. 3 Flowchart of the aquaculture pond region extraction procedure

2.1 DEM 支持下的水产养殖覆盖区划定

由于近海水产养殖塘主要分布在平缓的海岸带区域, 可利用 SRTM 高程数据, 以 10 m 为阈值^[28], 将内陆较高海拔地区掩模, 以此确定水产养殖塘分布的潜在覆盖区。通过这个步骤所获取的对象, 主要由海岸带平缓区域上的非水体信息 (如建筑物、

植被或滩涂等), 以及养殖塘水面或海水等水体信息构成。如图 4 所示, 试验区 A 和 B 主要由中部的水系以及依附水系的养殖塘组成, 周边覆盖着建筑物、裸土及植被等地类。经 SRTM 高程阈值掩模后, 仅留下本地水系及养殖塘水面, 以及小部分低海拔区的裸土、植被及建筑物信息 (图 4(b) 和 (d))。

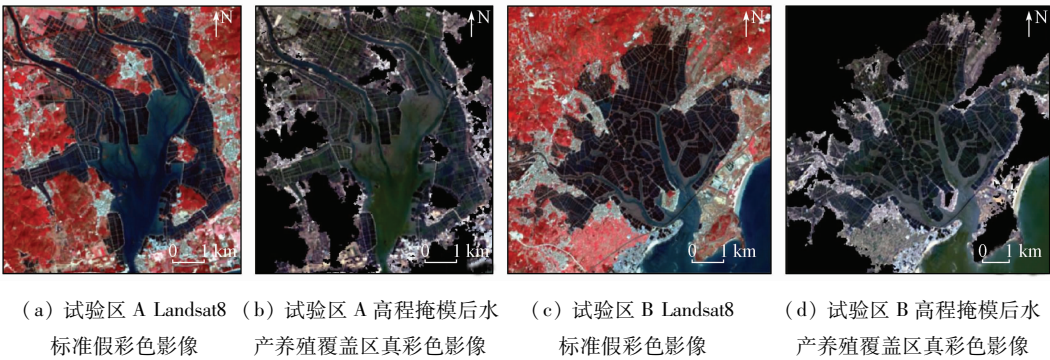


图 4 试验区水产养殖覆盖区划定

Fig. 4 Delineation of potential aquaculture covered areas in test area

2.2 基于形态学和光谱特征的非水体信息剔除

获取水产养殖塘覆盖区后, 针对其中余留的低海拔区裸土、植被和建筑物等非水体信息, 进行进一

步剔除。水体遥感指数一直是大面积水体提取、水陆界线区分的主要技术。依据海岸带的土地利用类型和地表覆盖特点, 采用改进型组合水体指数

(modified combined index for water identification, MCIWI)^[29]进行水产养殖覆盖区非水体信息的剔除,并使用大津法(OTSU)^[30]进行自动阈值分割。

MCIWI 指数将归一化建筑指数(normalized difference building index, NDBI)和归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)结合。其中,NDVI 对林地、耕地等植被较敏感,并能消除部分薄云和辐射带来的影响;NDBI 凸显了建设用地特征,能提升水体与建筑物、植被等非水体的差异。其公式为:

$$MCIWI = NDVI + NDBI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} + \frac{MIR - NIR}{MIR + NIR}, \quad (1)$$

式中 RED, NIR 和 MIR 分别为影像红光、近红外和中红外波段的反射率。

图 5 展示了研究区 MCIWI 指数对于水体/非水体地类信息的区分能力。对水体、植被、建筑物和裸土等海岸带地表覆盖类型各选取 200 个随机点,提取并统计随机点位的 MCIWI 值,可以看出绝大多数水体的 MCIWI 值位于 (-1,0) 区间。相对的,植被、建筑物和裸土等非水体信息的 MCIWI 值全部大于 0,体现了与水体信息的可分离性和自动阈值分割的可行性。

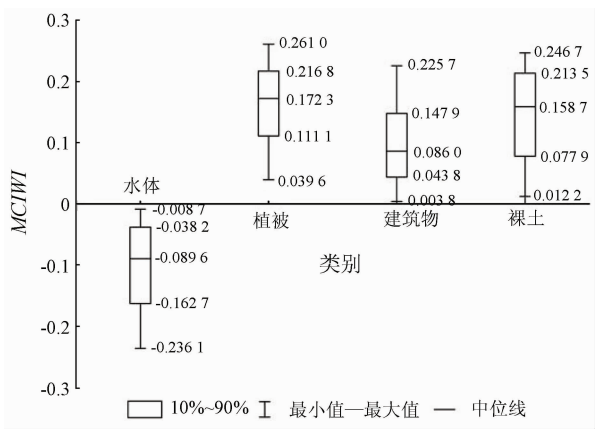


图 5 研究区水体/非水体地类 MCIWI 值对比
Fig. 5 Comparison of MCIWI values of water body/non - water body in the study area

OTSU 算法是基于灰度直方图一阶统计特性的自动阈值分割方法,不受图像亮度和对比度的影响,运算速度快,存储效率高,被广泛应用在图像的阈值分割研究中^[31-33]。采用 OTSU 算法获取试验区水体/非水体分割的最佳阈值,对 MCIWI 结果(图 6 (a)和(d))二值化以确定水陆边界(图 6 (b)和(e)),并进行形态学闭操作以清除养殖水体内部不相连的空洞,最终获取了水体覆盖区(图 6 (c)和(f))。

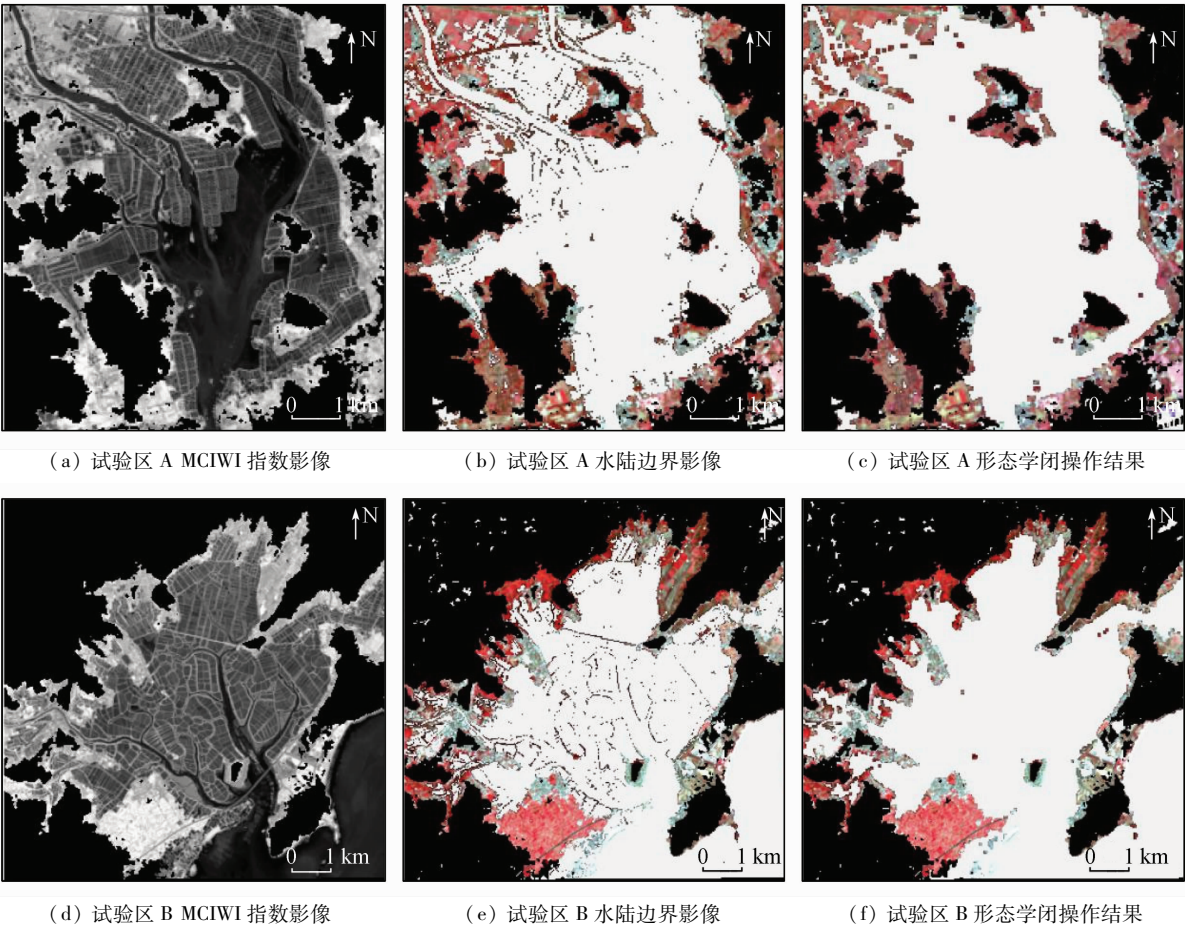


图 6 试验区非水体信息剔除

Fig. 6 Elimination of non - waterbody information in test area

2.3 基于空间卷积的非养殖水体信息剔除

2.2 节中获取的水体信息由水产养殖塘水体和非养殖水体混合构成,因此本步骤的关键在于这 2 种类别水体的区分。水体的光谱反射率低,光谱响应弱,提取精度本就不高,要将一类水体与另一类水体区分开来则更加困难,这就需要一种针对性的识别手段以增强其谱间差异,才能实现有效分离。

改进的归一化水体指数(modified normalized difference water index,MNDWI)^[34]自提出至今,以其精细水体分辨能力成为实践引证和研究引用最多的水体指数之一,其公式为:

MNDWI = (GREEN - MIR) / (GREEN + MIR), (2)

式中 GREEN 为影像绿光波段的反射率。

本研究尝试利用 MNDWI 指数增强养殖水体的低反射信息,提高养殖塘网格特征的清晰度。在研究区养殖水体和非养殖水体中分别选取 200 个随机点,提取并统计随机点位的 MNDWI 值(图 7)。可以看出,在 MNDWI 指数作用下大部分养殖水体能够与非养殖水体区分开,但 MNDWI 在(0.113 9, 0.119 4)区间内仍易产生混淆。

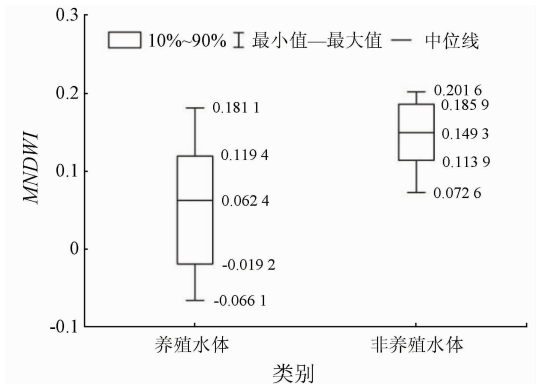


图 7 研究区养殖/非养殖水体的 MNDWI 值对比
Fig. 7 Comparison of MNDWI values between aquaculture/non-aquaculture water body in the study area

为了完全区分养殖与非养殖水体,利用空间卷积进一步增大 2 类水体之间的光谱差异。采用 5 × 5 的低频滤波卷积核(公式(3))对 MNDWI 指数影像进行空间卷积运算。与之前的验证方式相同,在卷积运算结果中选取 2 类水体共 400 个随机点进行数值统计分析(图 8),可以看到 90% 养殖水体卷积值在(0.121 2,2.428 8)之间,而 90% 非养殖水体卷积值在(2.767 6,4.428 0)之间,实现了 2 类水体的有效分离。

K = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. (3)

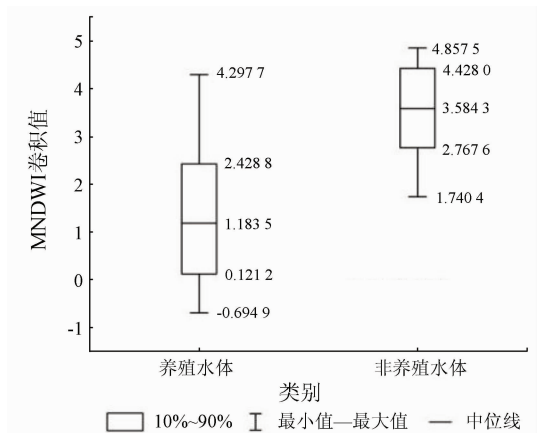
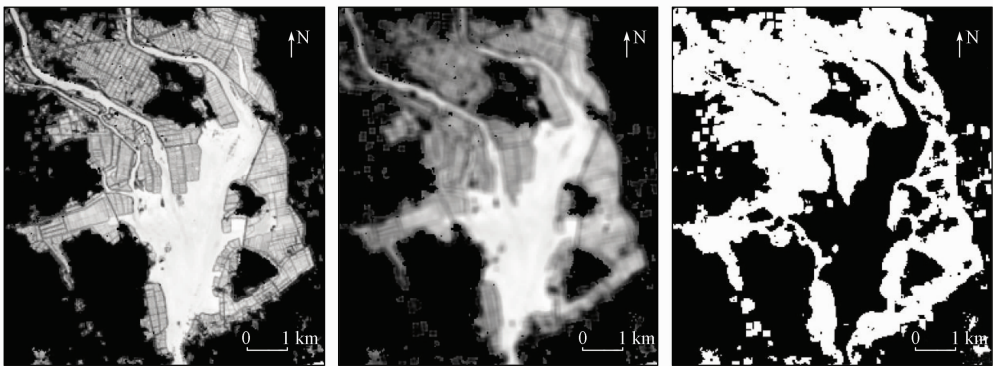


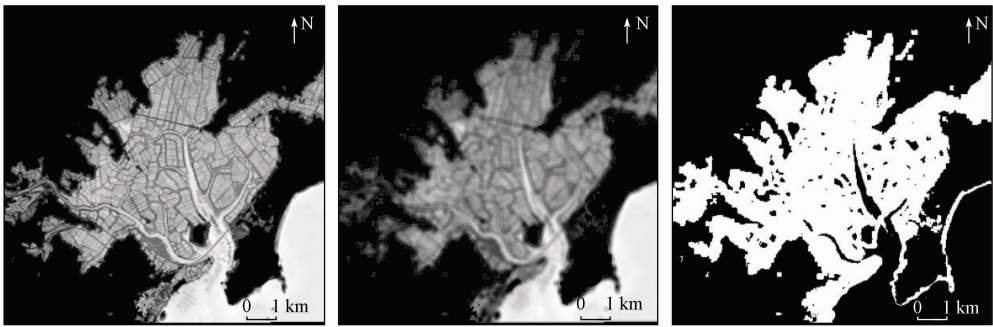
图 8 研究区养殖/非养殖水体的 MNDWI 卷积值对比
Fig. 8 Comparison of MNDWI convolution values of aquaculture/non-aquaculture water body in the study area

如图 9 所示,经 MNDWI 指数处理后,2 类水体细节特征得以凸显(图 9(a)和(d)),而卷积操作后的 MNDWI 影像进一步增强了水产养殖塘的低频信息,在获取清晰水体边界的同时,弱化水体的内部细节(图 9(b)和(e))。将卷积后的影像二值化,利用



(a) 试验区 A MNDWI 影像 (b) 试验区 A MNDWI 卷积影像 (c) 试验区 A 卷积影像二值化后养殖塘区域

图 9-1 试验区养殖水体提取
Fig. 9-1 Extraction of aquaculture water in test area



(d) 试验区 B MNDWI 影像 (e) 试验区 B MNDWI 卷积影像 (f) 试验区 B 卷积影像二值化后养殖塘区域

图 9-2 试验区养殖水体提取

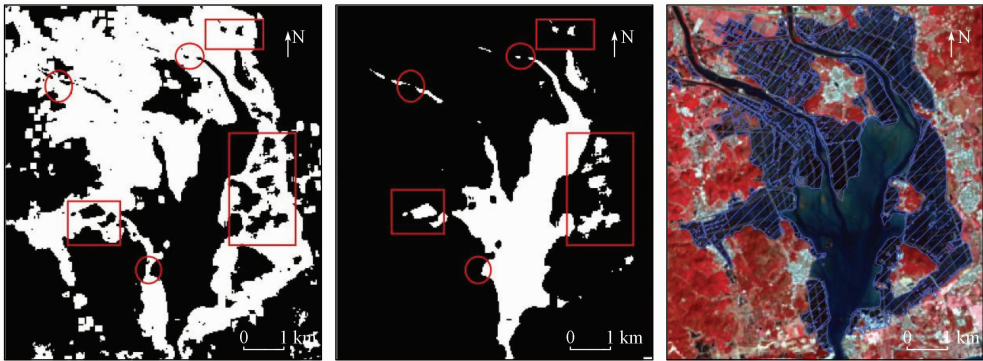
Fig.9-2 Extraction of aquaculture water in test area

阈值分割剥离非养殖水体,留下养殖水体区域(试验区最佳阈值为 2.0)(图 9(c)和(f))。需要注意的是,卷积影像的二值化阈值并非是固定值,根据研究区水体信息的不同,以 2.0 为中心上下轻微波动。

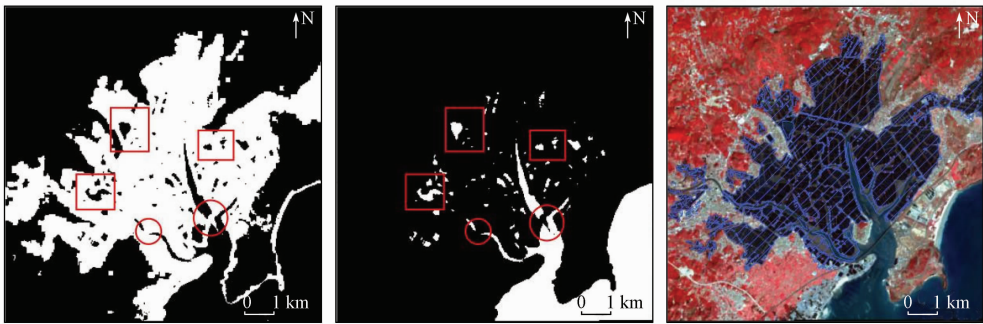
2.4 识别结果后处理

上述识别结果中,有部分未被形态学填充的养殖水体区域缺失(图 10(a)和(d)矩形框标识),亦存在部分细小的水体支流和排水沟渠等非目标冗余水体(图 10(a)和(d)圆形框标识)。针对存在部分细小的水体支流的问题,通过对比可以发现,缺失的

养殖水体孔洞均不与非养殖水体主体存在黏连,只要将这些孔洞转为实体并分离出来加回养殖水体区就能解决。通过影像空间差值技术,求取水体覆盖区(图 6(c)和(f))和养殖水体覆盖区(图 9(c)和(f))的差值影像即可获得缺失的养殖水体实体(图 10(b)和(e)矩形框标识)。针对与养殖水体存在连接的水体支流和排水沟渠等冗余水体的问题,可进一步结合 Google Earth 高分辨率影像进行目视解译并予以剔除。识别结果图像的后处理完成后,得到最终的水产养殖塘区范围(图 10(c)和(f))。



(a) 试验区 A 养殖塘水体覆盖区识别结果 (b) 试验区 A 差值影像 (c) 试验区 A 水产养殖塘区最终范围



(d) 试验区 B 养殖塘水体覆盖区识别结果 (e) 试验区 B 差值影像 (f) 试验区 B 水产养殖塘区最终范围

水产养殖塘区

图 10 试验区养殖水体识别结果后处理

Fig.10 Post-processing of aquaculture water identification results in the test area

3 结果与分析

3.1 水产养殖塘区提取结果与精度评价

利用上述方法对福建省近岸海域水产养殖塘区进行识别和提取,获得福建省近岸海域水产养殖塘区域分布(图 11)。从图 11 中可以看出,福建省近岸海域水产养殖塘在空间上沿海岸线自北向南呈线状不均匀分布。北部和南部的宁德市、福州市和漳州市养殖塘区域分布较多、面积较大,且存在成规模的集聚型水产养殖塘区,而中部的莆田市、泉州市和厦门市则以小面积、低密度分布为主。

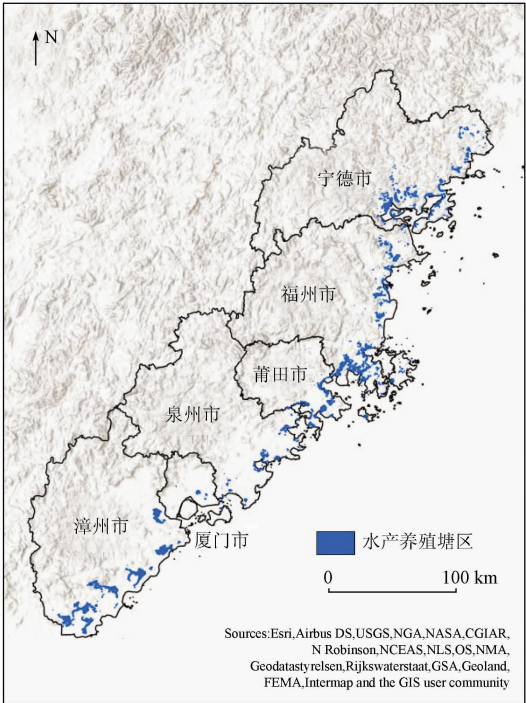


图 11 福建省近岸海域水产养殖塘空间分布
Fig. 11 Spatial distribution of aquaculture ponds in coastal waters of Fujian Province

为了评价和检验提取结果,通常是将其像元二值化,分为养殖塘和非养殖塘区,然后随机产生验证点,利用混淆矩阵和 Kappa 系数进行精度验证。但水产养殖塘的提取误差通常出现在塘体边缘的水陆或不同水体交界处,随机验证点若过多分布在远离养殖塘区的陆地部分,不但无法起到有效的检验和控制作用,反而易高估整体的检验精度。因此,本文设计了限制性随机验证点采样方式以代替完全随机采样,并追加了典型区域叠加比对检验流程。

首先,基于水体信息提取结果生成随机采样点,合并实测点位,形成 500 个点容量的验证数据集

(验证点空间分布见图 12),然后根据 Google Earth 高分辨率卫星影像和实地采样数据计算混淆矩阵(表 1)。检验结果表明,光谱特征和空间卷积协同下的近岸海域养殖塘区提取方法具有较高的准确性,提取总精度达到 93%,Kappa 系数为 0.85。

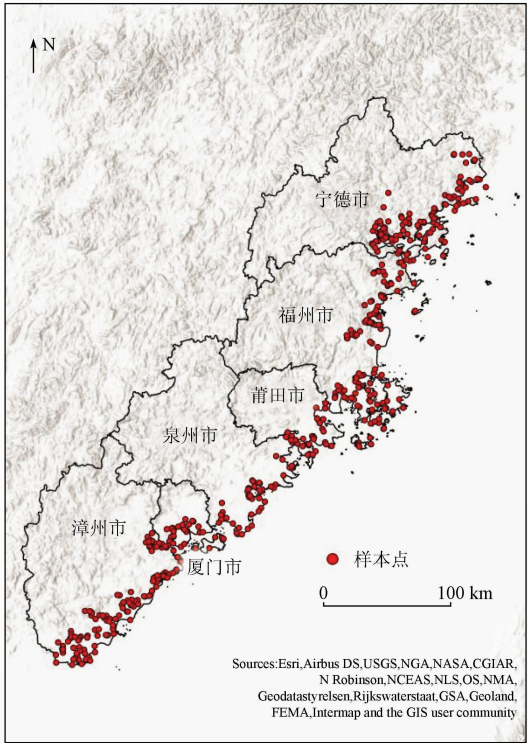


图 12 验证样本点空间分布
Fig. 12 Spatial distribution of validation sample points

表 1 提取结果混淆矩阵

属性数据	验证数据		用户精度/%
	养殖塘	非养殖塘	
养殖塘	205	27	88
非养殖塘	8	260	97
生产者精度/%	96	91	

为进一步检验提取方法的有效性,追加了典型区域叠加比对检验流程。基于 Google Earth 高分辨率影像,对试验区 B 漳州市前湖湾(图 13(b))、试验区 A 漳州市诏安湾宫口港(图 13(c))的水产养殖塘区域进行目视解译,并将目视解译结果与自动提取结果进行空间叠加比对,计算重叠区域比例。结果表明,2 个试验区水产养殖塘区域的自动提取结果和目视解译结果的重叠比例均在 90% 以上,其中诏安湾宫口港的重叠比例为 91%,而前湖湾的重叠区域比例达到了 94%,平均重叠比例达 92.5%,进一步检验了提取方法的准确性。

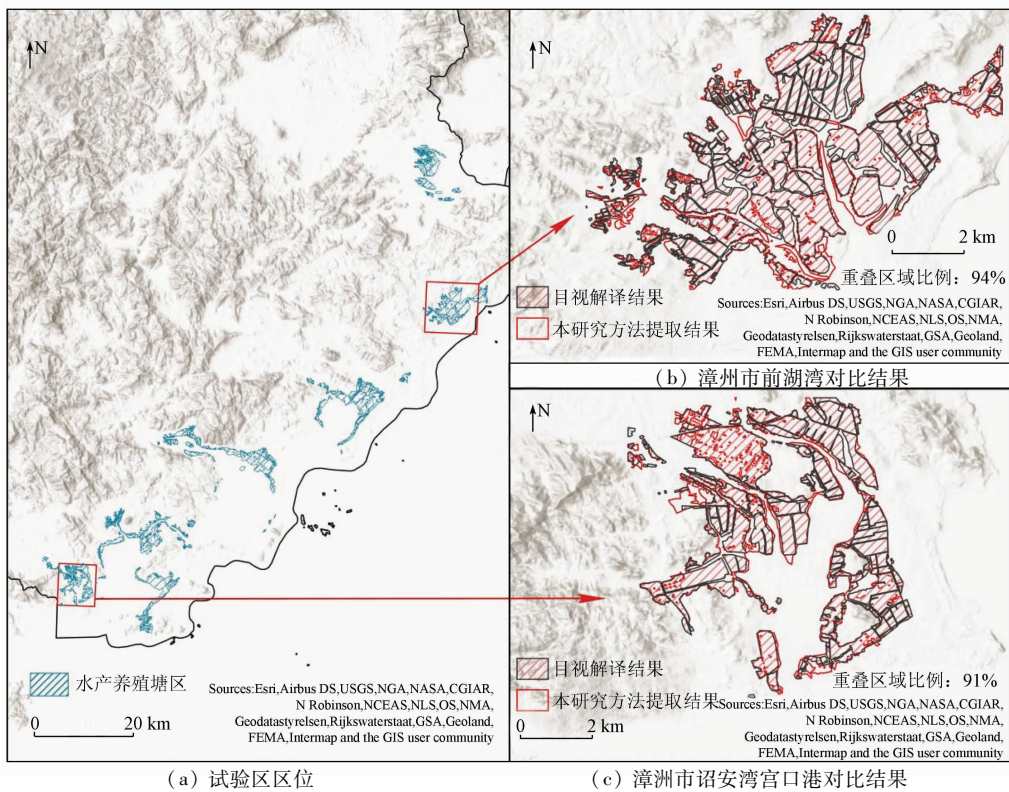


图 13 自动提取与目视解译结果叠加对比

Fig. 13 Overlapping proportions of results between automated extraction and visual interpretation

3.2 水产养殖塘区空间分布与密度分析

根据提取结果,福建省近岸海域水产养殖塘区域合计 511.73 km²。其中,漳州市水产养殖塘面积最大,为 212.89 km²,占全省水产养殖塘总面积的 41.60%;其次是福州市,为 114.61 km²,占总面积的 22.40%;排在第三位的是宁德市,水产养殖塘面积为 90.28 km²,占比 17.64% (图 14(a) 和 (b))。3

市的养殖塘总面积全省占比总和超过了 80%,而莆田市、泉州市和厦门市 3 市的水产养殖塘面积总和不到 100 km²,占比未超过 20%。为了更直观地展示福建省近岸海域养殖塘区的空间集聚程度,采用核密度分析,通过评估邻域变化来表示提取结果中每个栅格的养殖塘密度水平 (图 14(c)),颜色越深代表养殖塘的空间集聚程度越高、密度越大。结合

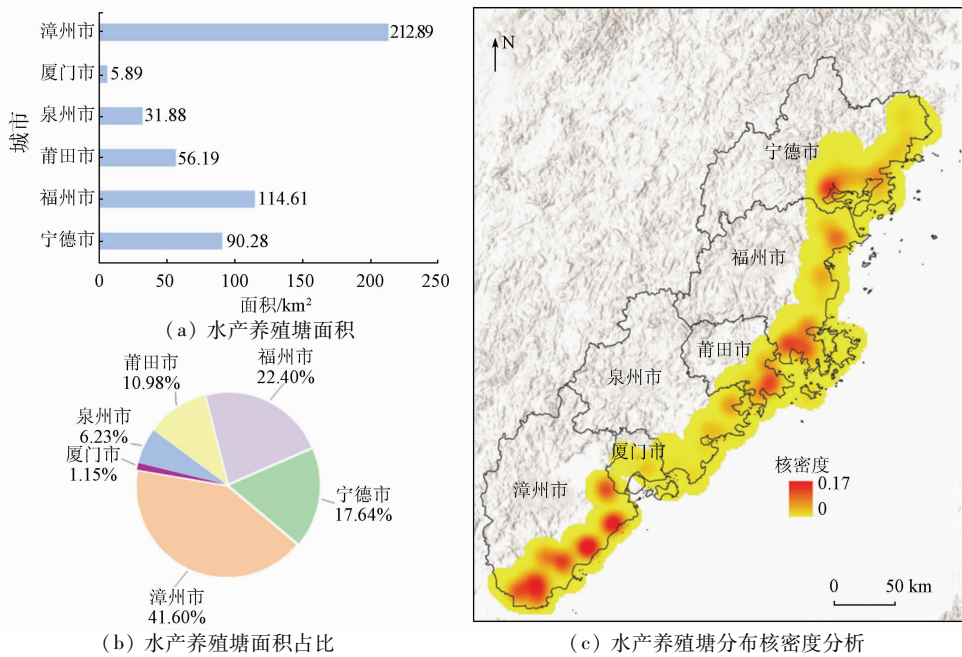


图 14 福建省近岸海域水产养殖塘分布面积统计及核密度分析

Fig. 14 Statistical charts and kernel density analysis of the aquaculture pond region in coastal waters of Fujian Province

福建省近岸海域养殖塘区的面积提取结果可以看出,漳州市沿海出现多个核密度高值区,说明漳州市水产养殖塘集聚程度高,且分布广、面积大;莆田市虽然养殖塘总面积不多,但集聚程度高;因此必须提高这 2 个城市在沿海养殖塘管理上的重视程度。泉州市和厦门市则基本没有形成高密度的水产养殖塘区域,同时分布面积较小,沿海养殖塘管理的压力相对漳州市和莆田市来说较小。

3.3 误差分析

本研究方法克服了目视解译及单一光谱特征的短板,并且借助 GEE 平台的运算能力和海量数据源,可以轻松移植于其他区域的水产养殖塘识别情景中。提取误差主要来源于以下几个方面:①在 Landsat 影像空间分辨率和省域尺度视角下,以区域为单元进行整体识别的水产养殖塘不可避免地会包含区域内亚像元尺度的密集河道和堤坝,此类地物的宽度在 3 ~ 10 m 之间,面积会被计入养殖塘提取结果;②空间分散或面积较小的夹杂于滩涂、海水间的零星水产养殖塘会与周边地物形成混合像元,造成误分或漏分;③渔民非常规性清塘行为及最佳采集时相的云量影响等客观原因会导致部分概率的干塘,此类信息会被误分为陆地。

4 结 论

遥感技术已经成为渔业调查中稳定、可靠的识别统计手段。养殖塘是海岸带水产养殖的主要承载形式,目前其遥感识别和提取的方法主要可以分为目视解译、光谱特征和面向对象 3 种类型,但在识别效率、提取精度、数据源和操作平台、可移植性和鲁棒性等方面存在着不同程度的短板。有别于前人研究中仅针对单一特征种类或实施单一手段的遥感识别方法,本文提出了一种结合影像光谱信息、空间特征和形态学操作的近岸海域养殖塘自动提取方法,得出如下结论:

1)该方法在 30 m 中等空间分辨率尺度下以养殖塘整体识别代替个体提取,既提升了识别精度,又符合水产养殖的土地利用类型属性,满足了特定尺度下渔业调查对养殖塘空间分布和变化统计的管理需求。

2)联用双特征水体光谱指数(MCIWI 和 MND-WI),并配合低频滤波空间卷积实现了水陆界线和养殖塘水体网格特征的分层识别,弥补了传统单一光谱指数难以实现大规模有效分离的短板。

3)研究区实验结果表明,该方法总精度达到 93%,Kappa 系数为 0.86。典型区域叠加比对检验

流程验证,提取结果和实际结果重叠比例均在 90% 以上,平均重叠比例达 92.5%,反映了高精度和可靠性。

4)研究区提取结果表明,福建省近岸海域水产养殖塘区域总面积为 511.73 km²,沿海 6 市水产养殖塘面积前三甲依次是:漳州市(212.89 km²,41.60%),福州市(114.61 km²,22.40%),以及宁德市(90.28 km²,17.64%)。莆田市、泉州市和厦门市 3 市的水产养殖塘面积总和不到 100 km²,全省占比未超过 20%。

5)研究区核密度分析结果表明,漳州市的水产养殖塘区集聚度高且分布广、面积大,莆田市的水产养殖塘区总面积不大但集聚程度高;泉州市和厦门市的水产养殖塘基本没有形成高密度的聚集区,同时分布面积相对较小,沿海养殖塘管理的压力相对漳州市和莆田市来说也较小。

借助 GEE 平台,该方法能推广至全国其他地区,为有效降低沿海养殖塘管理难度,控制其对环境的负面影响,保护海洋水质提供了理论参考和数据支持。

参考文献(References):

[1] Barange M. FAO yearbook:Fishery and aquaculture statistics 2018 [R]. Roma:Food and Agriculture Organization of the United Nations(FAO),2020.

[2] 吴荔生,杨圣云. 试论养殖水域生态系统结构优化与管理[J]. 海洋科学,2002(7):15-17.

Wu L S,Yang S Y. Study on the structure optimization and management of aquaculture water ecosystem[J]. Marine Science,2002(7):15-17.

[3] 王大海. 海水养殖业发展规模经济及规模效率研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.

Wang D H. Study on scale economy and scale efficiency of mariculture[D]. Qingdao:Ocean University of China,2014.

[4] 李树国. 内陆水产养殖的水域污染及其防治对策[J]. 水产科学,2005,24(3):34-35.

Li S G. Water pollution in inland aquaculture and its control measures[J]. Journal of Fishery Sciences,2005,24(3):34-35.

[5] 王蒙蒙,李国庆,刘逸洁,等. 近 20 年来山东半岛东部海水养殖水面的动态变化[J]. 应用海洋学学报,2017,36(3):319-326.

Wang M M,Li G Q,Liu Y J,et al. Dynamic changes of mariculture surface in eastern Shandong Peninsula during the past 20 years [J]. Journal of Applied Oceanography,2017,36(3):319-326.

[6] 时燕,苏涛,陆莉蓉. 长荡湖围网养殖区长时序时空演变遥感监测[J]. 环境监控与预警,2021,13(3):8-12.

Shi Y,Su T,Lu L R. Remote sensing monitoring of temporal and spatial evolution of seine farming area in Changdang Lake[J]. Environmental Monitoring and Warning,2021,13(3):8-12.

[7] 曹利,顾文俊,李小恕,等. 基于 WorldView 数据的浙江省铁港牡蛎养殖分布遥感调查[J]. 渔业信息与战略,2016,31(4):286-292.

- Cao L, Gu W J, Li X S, et al. Remote sensing investigation of oyster culture distribution in Tiegang, Zhejiang Province based on WorldView data [J]. Fisheries Information and Strategy, 2016, 31 (4): 286–292.
- [8] Chen L, Ren C, Zhang B, et al. Spatiotemporal dynamics of coastal wetlands and reclamation in the Yangtze estuary during past 50 years (1960s–2015) [J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28 (3): 386–399.
- [9] Zhou M, Wu M, Zhang G, et al. Analysis of coastal zone data of northern Yantai collected by remote sensing from 1990 to 2018 [J]. Applied Sciences, 2019, 9 (20): 4466.
- [10] Xu M, Cui B, Lan S, et al. Exploring dynamic change of the tidal flat aquaculture area in the Shandong Peninsula (China) using multitemporal Landsat imagery (1990–2015) [J]. Journal of Coastal Research, 2020, 99: 197–202.
- [11] 邵亚婷, 卢霞, 叶慧, 等. 滨海湿地土地覆盖面向对象分类及变化监测[J]. 海洋科学, 2020, 44 (1): 52–66.
- Shao Y T, Lu X, Ye H, et al. Object-oriented classification and monitoring of land cover change in coastal wetland [J]. Marine Science, 2020, 44 (1): 52–66.
- [12] 蒙静, 华璩, 张建兵, 等. 1995年—2015年广西海岸带养殖用地的时空分布[J]. 广西科学, 2017, 24 (2): 135–143.
- Meng J, Hua C, Zhang J B, et al. Spatial and temporal distribution of aquaculture land in Guangxi coastal zone from 1995 to 2015 [J]. Guangxi Science, 2017, 24 (2): 135–143.
- [13] 李纓, 张翠芬, 帅爽, 等. 威海市近海水产养殖信息提取方法研究[J]. 湿地科学, 2017, 15 (5): 651–656.
- Li Y, Zhang C F, Shuai S, et al. Research on extraction method of offshore aquaculture information in Weihai City [J]. Wetland Science, 2017, 15 (5): 651–656.
- [14] Sun N, Zhu W, Cheng Q. GF-1 and Landsat observed a 40-year wetland spatiotemporal variation and its coupled environmental factors in Yangtze River estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2018, 207: 30–39.
- [15] 王宁, 程家骅, 张寒野, 等. 水产养殖水体遥感动态监测及其应用[J]. 中国水产科学, 2019, 26 (5): 893–903.
- Wang N, Cheng J H, Zhang H Y, et al. Remote sensing dynamic monitoring of aquaculture water and its application [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26 (5): 893–903.
- [16] 程博, 刘岳明, 刘旭楠, 等. 基于多源特征融合的高分辨率遥感图像近海养殖区提取方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33 (2): 296–304.
- Cheng B, Liu Y M, Liu X N, et al. Research on extraction method of offshore aquaculture area based on multi-source feature fusion of high-resolution remote sensing image [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33 (2): 296–304.
- [17] 黄帅, 宋开宏, 罗菊花, 等. 基于梯度变换的浅水湖泊围网区遥感提取算法[J]. 湖泊科学, 2017, 29 (2): 490–497.
- Huang S, Song K H, Luo J H, et al. Remote sensing extraction algorithm for shallow lake seine area based on gradient transformation [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29 (2): 490–497.
- [18] 孙裕钰, 应警亮, 王梅, 等. 面向对象的围海养殖用海信息分类提取与动态监测研究[J]. 海洋信息, 2016 (2): 6–11.
- Sun Y Y, Ying J L, Wang M, et al. Study on classification extraction and dynamic monitoring of marine information for aquaculture [J]. Marine Information, 2016 (2): 6–11.
- [19] 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 S W, Wei C Z. Changes of artificial aquaculture bases in coastal cities of Guangdong Province: An empirical study based on Sentinel-1 data from 2015 to 2019 [J]. Tropical Geography, 2021, 41 (3): 622–634.
- [20] 裴亮, 王金鑫, 屈慧慧, 等. 基于 ONDPI 的海岸养殖池塘遥感影像提取研究[J]. 海洋测绘, 2020, 40 (5): 40–44.
- Pei L, Wang J X, Qu H H, et al. Remote sensing image extraction of coastal aquaculture ponds based on ONDPI [J]. Marine Surveying and Mapping, 2020, 40 (5): 40–44.
- [21] 袁鑫, 张丽, 宋茜茜, 等. 海南岛海水池塘养殖遥感监测与时空变化分析[J]. 海洋学研究, 2020, 38 (1): 59–67.
- Yuan X, Zhang L, Song Q Q, et al. Remote sensing monitoring and spatial-temporal analysis of seawater pond aquaculture in Hainan Island [J]. Journal of Oceanographic Research, 2020, 38 (1): 59–67.
- [22] 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 F, Xia L H, Chen Z B, et al. Object-oriented mariculture pattern recognition based on association rules [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (12): 210–217.
- [23] Fu Y, Deng J, Ye Z, et al. Coastal aquaculture mapping from very high spatial resolution imagery by combining object-based neighbor features [J]. Sustainability, 2019, 11 (3): 637.
- [24] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 18–27.
- [25] 杨平, 谭立山, 黄佳芳, 等. 初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH₄ 和 N₂O 通量日变化特征[J]. 环境科学, 2018, 39 (1): 300–309.
- Yang P, Tan L S, Huang J F, et al. Diurnal variation of CH₄ and N₂O fluxes after drainage from aquaculture ponds in the Minjiang River estuary during early winter [J]. Environmental Science, 2018, 39 (1): 300–309.
- [26] 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 Geoinformation, 2019, 82: 101902.
- [27] 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 and Coastal Management, 2020, 188: 105144.
- [28] 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.
- [29] 杨宝钢, 陈昉, 罗攀攀. 基于 MODIS 的改进型组合水体指数 (MCIWI) 提取复杂水体信息的试验[J]. 西南大学学报 (自然科学版), 2011, 33 (1): 112–119.
- Yang B G, Chen F, Luo Z Z. Extraction of complex water information based on MODIS improved combined water index (MCIWI)

[J]. Journal of Southwest University (Science and Technology Edition),2011,33(1):112-119.

[30] 陈冬岚,刘京南,余玲玲. 几种图像分割阈值选取方法的比较与研究[J]. 机械制造与自动化,2003(1):77-80.
Chen D L,Liu J N,Yu L L. Comparison and research on several methods of image segmentation threshold selection[J]. Machine Building and Automation,2003(1):77-80.

[31] 李宝芸,范玉刚,高 阳. 基于 OTSU 和 Canny 算子的红外图像特征提取[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版),2019,35(6):33-40.
Li B Y,Fan Y G,Gao Y. Infrared image feature extraction based on OTSU and Canny operator[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition),2019,35(6):33-40.

[32] Zhang G,Wu M,Wei J,et al. Adaptive threshold model in Google Earth Engine:A case study of ulva prolifera extraction in the South Yellow Sea,China[J]. Remote Sensing,2021,13(16):3240.

[33] Donchyts G,Schellekens J,Winsemius H,et al. A 30 m resolution surface water mask including estimation of positional and thematic differences using Landsat8,SRTM and openstreetmap:A case study in the Murray - Darling basin, Australia [J]. Remote Sensing, 2016,8(5):386.

[34] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报,2005,9(5):589-595.
Xu H Q. Study on water information extraction using improved normalized difference water index (MNDWI)[J]. Journal of Remote Sensing,2005,9(5):589-595.

Information extraction of coastal aquaculture ponds based on spectral features and spatial convolution

LI Yefan^{1,2,3}, WANG Lin^{1,2,3}, ZHANG Dongzhu^{1,2,3}

(1. College of Environmental and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Academy of Geography and Ecological Environment, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory of Remote Sensing of Soil Erosion and Disaster Prevention, Fuzhou 350108, China)

Abstract: To control the negative effects of the disorderly development of aquaculture ponds and promote the further development of the aquaculture industry, the top priority is to realize rapid and accurate identification and extraction of information on aquaculture ponds. Aquaculture ponds are special net-like water bodies divided by complex roads and dikes. Simple spectral features or spatial texture features are not enough for accurate information extraction. Moreover, the mixed feature rule set gets more demanding on computer performance. Therefore, based on the Landsat image sequence and the Google Earth Engine (GEE) platform, this study proposed an automatic extraction method for coastal aquaculture ponds, which combined the image spectral information, spatial features, and morphological operation. In this method, dual characteristic water spectral indices, that is, the modified combined index for water identification (MCIWI) and the modified normalized difference water index (MNDWI), were employed to highlight the grid characteristics of large water bodies and aquaculture ponds. Then, the low-frequency filtering spatial convolution operation was used to stretch the differences between aquaculture and non-aquaculture water bodies. Finally, the information on aquaculture pond areas as a whole was identified and extracted accurately and quickly. The results are as follows. ① This method has overall precision of 93% and a Kappa coefficient of 0.86. According to the test process verification of typical area superposition comparison, the overlapping proportions between the extraction results and the actual results were all more than 90%, averaging 92.5%, reflecting the high precision and reliability of this extraction method. ② In 2020, the coastal aquaculture ponds in Fujian Province had a total area of 511.73 km² and were mainly distributed in Zhangzhou, Fuzhou, and Ningde cities. ③ The kernel density analysis suggested that Zhangzhou had a high concentration of aquaculture ponds and thus had high pressure in the management of aquaculture ponds. This method can realize automatic information extraction of coastal aquaculture ponds. Thus, it is of great significance to promote the orderly management and scientific development of fishery aquaculture.

Keywords: aquaculture pond area; threshold segmentation; spatial convolution; GEE platform

(责任编辑: 张 仙)