

doi: 10. 6046/zrzyyg. 2022186

引用格式: 盛德志,邢前国,刘海龙,等. 基于混合像元分解的池塘养殖动态遥感监测[J]. 自然资源遥感,2022,34(4):53–59.
(Sheng D Z,Xing Q G,Liu H L,et al. Remote sensing monitoring of the spatio-temporal changes in pond aquaculture based on mixed pixel decomposition[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2022,34(4):53–59.)

基于混合像元分解的池塘养殖动态遥感监测

盛德志^{1,2,3}, 邢前国^{1,2,3}, 刘海龙^{1,2,3}, 郑向阳^{1,2,3}

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所,中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室,烟台 264003;
2. 山东省海岸带环境过程重点实验室,烟台 264003; 3. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:水产养殖是人类获取食品的重要途径,养殖池塘是水产养殖的主要生产方式之一。珠江三角洲是我国南方重要的渔业养殖基地,在过去 30 a 间,其空间分布发生巨大变化。本研究面向中山市及其邻近区域,基于 Landsat 和 Sentinel-2 卫星遥感数据,使用线性混合像元分解方法进行混合像元分解,通过目视对比分析,选取了 70% 及以上水体丰度对应的归一化水体指数阈值范围,获取了 1990—2021 年典型养殖池塘的时空分布。研究结果显示,中山市及邻近区域的养殖池塘在 1990 年以来经历了先增加后减少的过程;中山市及邻近区域 1990—2000 年养殖池塘面积增加了近一倍,2000—2010 年相对平稳,2010—2021 年养殖面积则减少了近 50%。本研究可减少混合像元对于养殖池塘监测的影响并为大湾区渔业科学养殖与可持续发展提供参考。

关键词: NDWI; 混合像元分解; 养殖池塘; 中山市; 珠江三角洲

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)04-0053-07

0 引言

动物水产品是人类获取蛋白质的重要来源,根据联合国粮食及农业组织 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 统计,2018 年全球鱼类产量约为 1.79 亿 t,其中水产养殖产品占总产量的 46%^[1]。2019 年中国水产养殖产量超 500 万 t,其中养殖池塘产量占约 49%^[2]。低洼沿海地区是水产养殖最有利的地区,水产养殖业在中国沿海地区迅速扩张^[3]。珠江三角洲的基塘农业是我国水产养殖的重要方式之一。塘基上种桑、甘蔗和果树等,塘中养殖鱼、虾等,结合成为基塘系统。基塘系统是人工湿地的重要代表,具有保护生物多样性、蓄水调洪、固碳、风暴防御和净化水质等^[4-7]功能。而随着国内外对水产品需求的不断增长,水产养殖业迅猛发展,养殖池塘面积发生巨大变化,养殖池塘水面面积不断扩张,造成了一系列的环境和社会经济问题^[8-9]。因此对于水产养殖的研究是十分必要的。

相比于传统实地调查,遥感具有大范围、可持续、成本低的优势,能提供长时序的空间信息^[10]。为了有效地绘制水产养殖池塘地图,遥感方法已逐渐从目视判读^[11-12]发展到指数法^[13]再到面向对象分类^[14]和深度学习^[15],已有学者运用这些方法进行了单时相和长时序的养殖池塘监测^[16-18]。而中山市及邻近区域桑基鱼塘的养殖模式,具有鱼塘分布密集连片,与塘基上的菜地、农田等混杂的特点,再加上遥感图像空间分辨率的限制,导致养殖池塘边界普遍存在混合像元。若不考虑混合像元对于养殖池塘监测的影响,往往会将养殖池塘配套设施(如塘基),错误识别为养殖池塘,难以得出准确的养殖池塘水面面积,对估算产量等后续工作造成困扰。

因此,本研究以中山市及邻近区域为研究对象,基于 30 m 空间分辨率的 Landsat 数据和 10 m 空间分辨率的 Sentinel-2 数据,进行光谱混合实验,在实验基础上通过目视选取水体和植被的端元波谱,利用完全约束最小二乘法进行混合像元分解,根据 70% 及以上水体丰度对应的归一化水体指数 (nor-

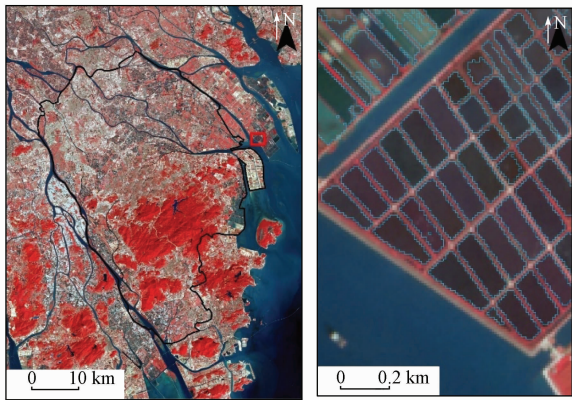
收稿日期: 2022-05-09; 修订日期: 2022-07-01
基金项目: 国家自然科学基金项目“海表漂浮大型藻空间分布特征及其在覆盖面积卫星遥感估算中的应用研究”、“面向冬季大型藻类高分遥感的海表耀光消减与利用研究”(编号: 42076188 和 41676171)、中国科学院 A 类战略性先导科技专项“地球大数据科学工程”(编号: XDA19060203 和 XDA19060501)和中国科学院仪器设备研制重点项目“沿海水色环境污染和资源机载高光谱成像探测仪”(编号: YJKYYQ20170048)共同资助。
第一作者: 盛德志(1997-),女,硕士研究生,研究方向为海洋遥感。Email: dzsheng@yic.ac.cn。
通信作者: 邢前国(1975-),男,博士,研究员,研究方向为海洋遥感。Email: qgxing@yic.ac.cn。

malized difference water index, NDWI) 的阈值范围提取养殖池塘,以减少混合像元的影响。利用本研究方法获取中山市及邻近区域水产养殖池塘的时空分布,并对中山市及邻近区域 1990—2021 年水产养殖池塘的时空变化规律进行分析。

1 研究区及其数据源

1.1 研究区概况

中山市及邻近区域位于珠江口西岸,是珠江三角洲的中心地区之一。研究区内地形平坦,以平原为主,河网密布(图 1)。该区域内的灌溉水源充足,农业用水十分丰富,为鱼塘的用水提供了保障,而且该研究区内自古以来就有修筑基塘、种桑养蚕的传统^[19]。



(a) Sentinel-2 珠江河口标准假彩色遥感影像 (b) 局部红框养殖池塘影像

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

1.2 数据源及其预处理

本研究以美国地质勘探局网站(https://earth-explorer.usgs.gov/)提供的 Landsat5 TM 和 Landsat8 OLI 的 L1 级影像作为数据源,选取 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年和 2021 年研究区域内云覆盖率低的遥感影像作为研究数据,其中每期遥感影像全覆盖研究区域需要 2 景,共选取 10 景(表 1)。

表 1 卫星图像信息

Tab. 1 Information of satellite images

日期	卫星影像	空间分辨率/m
1990-10-13	Landsat5 TM	30
2000-09-06	Landsat5 TM	30
2010-03-26	Landsat5 TM	30
2020-02-08	Landsat8 OLI	30
2021-02-20	Landsat8 OLI	30
2020-10-26	Sentinel-2 MSI	10
2021-02-23	Sentinel-2 MSI	10

此外,选取 2020 年和 2021 年的 Sentinel-2 影像,用于对比分析混合像元对不同空间分辨率影像的影响。在数据预处理阶段,使用 FLAASH 模型对 Landsat5 TM 和 Landsat8 OLI 的 L1 级数据进行大气校正,以及使用 Sen2Cor 大气校正模型对 Sentinel-2 的 L2A 级数据进行大气校正,得到大气底层表观反射率数据。

2 研究方法

2.1 养殖池塘初步提取

养殖池塘作为人工水体,蓝光和绿光波段的反射率较高,在近红外和中红外波段,反射率很低^[13]。为突出养殖池塘水体信息,使用 NDWI 对绿光波段和近红外波段进行组合运算,其计算公式为:

$$NDWI = \frac{R_{Green} - R_{NIR}}{R_{Green} + R_{NIR}}, \tag{1}$$

式中: R_{Green} 为绿光波段的反射率; R_{NIR} 为近红外波段的反射率。

利用 NDWI 计算结果,根据经验及目视判别,选取阈值进行水陆分离。由于不同年份含沙量和悬浮物浓度等水体性质不同,阈值需要适当调整,本研究选取不同年份的阈值如表 2 所示。利用城镇、水系和林地矢量数据,对提取的水体进行擦除处理,根据假彩色遥感影像进行目视修正,剔除非水体和天然湖泊等非养殖池塘水体,初步得到养殖池塘的分布数据。由于城镇区域地物复杂,光谱混合现象严重,目前计算机自动提取的结果精度很难满足精细化提取的需求。因此,基于 Landsat 及 Sentinel 影像及相关的地图信息,本研究采用目视解译的方式提取了各期遥感影像中的城镇区域。

表 2 不同年份 NDWI 阈值

Tab. 2 NDWI thresholds in different years

年份	数据源	NDWI 阈值
1990 年	Landsat5	[-0.15, 1]
2000 年	Landsat5	[-0.12, 1]
2010 年	Landsat5	[-0.03, 1]
2020 年	Landsat8	[-0.09, 1]
	Sentinel-2	[-0.11, 1]
2021 年	Landsat8	[-0.10, 1]
	Sentinel-2	[-0.07, 1]

2.2 混合像元分解方法

由于空间分辨率的限制,以及地物分布复杂性的影响,混合像元普遍存在于遥感影像中,影响了影像的分类精度和解译结果。30 m 空间分辨率的 Landsat 数据相较于 10 m 空间分辨率的 Sentinel-2 数据受混合像元的影响较大,使得养殖池塘的提取

结果可能误差较大^[20],通过混合像元分解,能够有效减少误差。混合像元分解的关键步骤^[21]可分为:①确定光谱混合模型;②获取端元波谱;③利用分解方法进行混合像元分解。

在珠江三角洲的基塘农业模式中,塘基上多有菜园和花田等绿色植被分布,使得植被和水体的混合像元普遍存在于 NDWI 初步提取结果中,因此本研究只利用水体和植被端元波谱进行混合像元分解,不再考虑水体与裸土、建筑物的混合像元。

常见的混合像元分解模型分线性模型和非线性模型 2 类。在线性模型中,一般认为单一像元的反射率为端元组分的特征反射率与各自丰度的线性组合。线性分解模型为:

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij} x_j) + e_i \quad (2)$$

式中: $i=1,2,3,\cdots,m$; $j=1,2,3,\cdots,n$; γ_i 为混合像元的反射率; a_{ij} 为第 i 个波段第 j 个端元组分的反射率; x_j 为该像元第 j 个端元组分的丰度; e_i 为第 i 个波段的误差; m 为波段数; n 为选定的端元组分数^[22]。

在无约束或者半约束线性分解模型中,会出现负值或者大于 1 的情况,这与实际的物理意义相违

背。因此,利用完全约束最小二乘法进行混合像元的分解,其具有模型结构简单、端元数目较少的情况下计算速度快的特点^[23]。利用完全约束最小二乘法进行混合像元的分解,保证了像元中的组分所占比例位于 $[0,1]$ 范围内,所有组分之和为 1。

3 结果与分析

3.1 混合像元分解结果

以 2020 年的 Landsat8 和 Sentinel-2 遥感影像为数据源,进行光谱混合实验,从而获取遥感影像混合像元分解的先验知识^[24]。在 Landsat8 影像和 Sentinel-2 影像的对应位置和相同区域,通过目视选取水体和植被纯净像元,其中在 30 m 空间分辨率的 Landsat8 影像上选取水体和植被纯净像元各 400 个像素,对应到 10 m 空间分辨率的 Sentinel-2 影像中为水体和植被纯净像元各 4 900 个像素。通过调整水体和植被纯净像元的像元个数配比,输出不同混合比例的平均光谱,以模拟不同情况下的光谱混合现象。随着水体纯像元占比增加和植被纯像元占比减少,模拟混合光谱的特征由类似植被光谱转向类似水体光谱(图 2)。

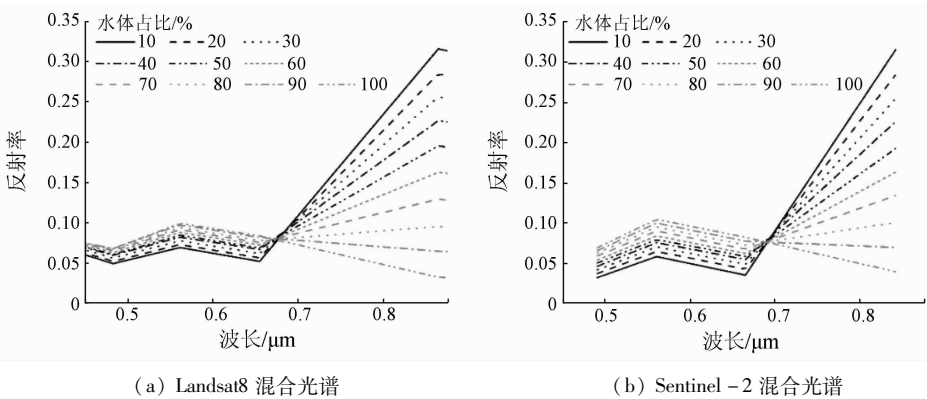


图 2 水体和植被不同比例混合的光谱曲线
Fig.2 Spectral curves of mixing water and vegetation in different proportions

利用光谱混合实验选取的植被和水体的纯净像元,计算纯净像元的平均波谱,作为水体和植被的端元波谱(图 3),对 2020 年和 2021 年 Landsat8 和 Sentinel-2 影像提取的养殖池塘进行解混,得到水体丰度图(图 4)。根据水体丰度的统计分析和目视对比(表 3),误提取的区域(塘基和道路)水体丰度比较低,而养殖池塘水面丰度高。因此本研究最终选取水体丰度 70% 及以上的区域,作为养殖池塘水面的范围。2010 年及以前影像没有 Sentinel-2 数据辅助,难以选取纯净像元,因此不能利用水体丰度进行 NDWI 阈值的调整。本文通过选取样本点建立

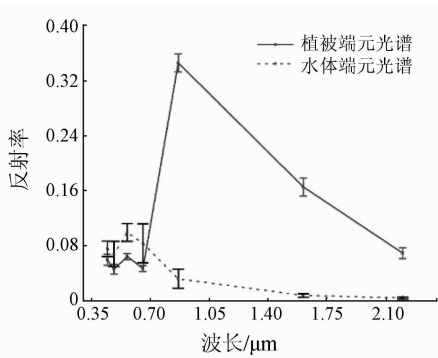


Fig.3 Reflectance of water and vegetation in the Landsat8 image in 2020

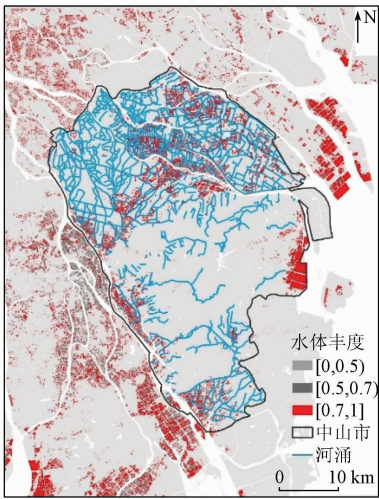


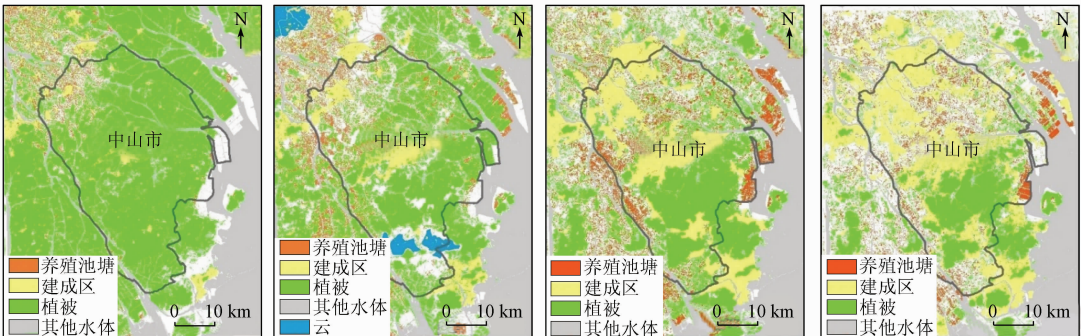
图 4 基于 2020 年 2 月 8 日遥感图像反演的养殖池塘水体丰度

Fig. 4 Abundance of aquaculture pond water based on remote sensing image inversion on February 8, 2020

表 3 水体丰度 0.7 及以上的养殖池塘统计

Tab. 3 Statistics of aquaculture ponds with abundance of water bodies above 0. 7

年份/卫星	池塘面积/km ²	面积占比/%	NDWI 阈值
2020 年/Landsat8	357	73	[- 0. 09, 0. 69]
2020 年/Sentine - 2	426	99	[- 0. 10, 0. 90]
2021 年/Landsat8	303	68	[- 0. 10, 0. 69]
2021 年/Sentinel - 2	360	77	[- 0. 08, 0. 80]



(a) 1990 年 10 月 13 日 (b) 2000 年 9 月 6 日 (c) 2010 年 3 月 26 日 (d) 2020 年 2 月 8 日

图 5 1990—2020 年养殖池塘分布

Fig. 5 Distribution of aquaculture ponds from 1990 to 2020

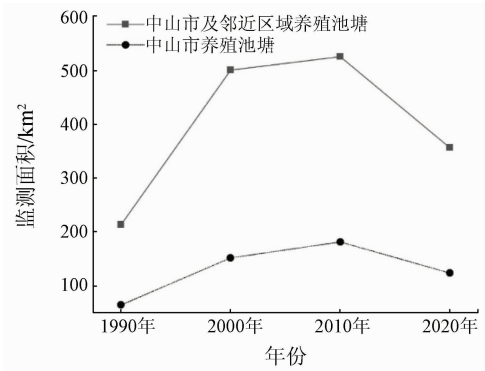


图 6 研究区养殖池塘年际变化

Fig. 6 Interannual variation of aquaculture ponds in the study area

Landsat5 NDWI 和 Landsat8 NDWI 的转换关系,将 Landsat8 的阈值转换为 Landsat5 的结果。在 1990 年、2000 年和 2010 年的 Landsat5 影像和 2021 年 Landsat8 影像上目视选取植被和水体像元,各 80 个,并统计其对应 NDWI 的值,建立 2021 年 Landsat8 NDWI(x)与其他各年份 Landsat5 NDWI(y)的线性关系。根据 2021 年 NDWI 选取的阈值范围利用线性关系调整其他年份阈值(表 4),利用调整后的阈值提取养殖池塘水面范围。

表 4 NDWI 阈值调整

Tab. 4 NDWI threshold adjustment

年份	线性关系	调整前阈值	调整后阈值
1990 年	$y = 0.66x + 0.01$	[- 0. 15, 1]	[- 0. 06, 0. 47]
2000 年	$y = 0.78x - 0.03$	[- 0. 12, 1]	[- 0. 10, 0. 51]
2010 年	$y = 0.39x - 0.05$	[- 0. 03, 1]	[- 0. 01, 0. 22]

3. 2 养殖池塘时空变化

根据养殖池塘遥感监测结果,计算每年的养殖池塘面积,研究区养殖池塘年际变化情况如图 5 所示。1990 年中山市及邻近区域的养殖池塘主要分布于西北部,随着时间推移,养殖池塘向东部和南部扩展,养殖池塘分布重心也由西北部转移到中西部。中山市及邻近区域养殖池塘的面积,经历了一个先快速增加,然后增长趋于稳定,而后逐渐减少的过程(图 6),这与其他学者的研究结果相一致^[25-26]。

具体而言,1990 年中山市及邻近区域养殖池塘面积为 213 km²,2000 年养殖池塘面积为 501 km²,1990—2000 年池塘养殖面积增加了一倍多;2000—2010 年养殖池塘面积变化相对平稳,仅增长了 25 km²;2020 年养殖池塘面积为 357 km²,相比 2010 年减少了 169 km²,2010—2020 年养殖面积则减少了近 50%。1990—2020 年,养殖池塘面积的最大变化幅度为 288 km²,最大变化率为 135%。2000 年遥感影像中云的面积约为 118 km²,因有云遮挡影响而少提取的池塘面积约为 52 km²。1990—2020 年,中山市养殖池塘的时空变化与整个研究区类似,养殖池塘的

面积也经历了一个快速增长而后缓慢减少的变化过程。具体来说,1990 年养殖面积为 64 km² 增长到 2000 年的 152 km²,池塘面积增长了 88 km²,是面积增长最快的时间段。2010 年中山市养殖池塘的面积达到顶峰,2010 年以后养殖池塘的面积逐渐减少。

20 世纪 80 年代中国的渔业以捕捞为主,养殖为辅,到了 90 年代尤其是 1993 以后养殖业产量开始远远超过捕捞^[1]; 改革开放以后,在市场经济作用下,区域经济快速发展带动水产业快速发展^[27],再加上基塘生态系统的多种改造完善^[28],共同促成了 1990—2000 年间养殖池塘面积的快速增长。河涌是指用于防洪、排涝、排水、航运的天然河道(河流干流和溪流河流除外)、人工水道或者人工湖泊,具有重要的生态功能和经济功能。河涌是养殖池塘排水、蓄水的重要通道。如图 4 所示,中山市的河涌主要分布于北部。1990 年中山市的池塘养殖区域仅分布于西北部,而 2020 年池塘养殖区域向南部和东部迅速扩张。这里正是中山市河涌较为密集的地区之一,可见河涌的分布是影响养殖池塘空间分布变化的原因之一。

4 结论

本研究基于 30 m 空间分辨率的 Landsat 数据和 10 m 空间分辨率的 Sentinel-2 数据,通过目视选取水体和植被的端元波谱,利用完全约束最小二乘法进行混合像元分解,根据水体丰度 70% 及以上对应的 NDWI 的阈值范围提取养殖池塘,获取中山市及邻近区域水产养殖池塘的时空分布。并分析在城市扩张下中山市及邻近区域 1990—2021 年间水产养殖池塘的时空变化规律,主要结论如下:

1) 本研究使用 Landsat 与 Sentinel-2 卫星影像,通过线性混合像元分解和目视对比,提取水体丰度 70% 及以上的养殖池塘范围作为养殖池塘水面,能够减少混合像元对于池塘面积提取的影响。

2) 研究区养殖池塘由 1990 年仅分布于西北部地区,逐渐向南部和东部扩张,至 2020 年广泛分布于中山市及邻近区域。1990—2000 年养殖池塘面积增长一倍多; 2000—2010 年养殖池塘面积变化相对平稳,增长幅度较小; 2010—2020 年养殖池塘的面积更是不增反降,2020 年养殖池塘面积为 357 km²,相比 2010 年减少了近 50%。

本研究基于水体和植被混合像元分解方法的养殖池塘水体提取方法,在水热条件好、植被生长状况良好的亚热带珠江河口地区有较高的适用性; 该遥感监测结果则可为该区域渔业及经济发展提供数据

参考。当该方法应用于季节差异性较大的其他区域时,如黄河三角洲等,遥感影像时相及混合像元的端元光谱则需结合实际情况选择,并进一步优化该方法的参数。

参考文献 (References):

[1] FAO. The state of world fisheries and aquaculture (SOFIA) [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020.

[2] 于秀娟,徐乐俊,吴反修,等. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020: 1-66.

Yu X J, Xu L J, Wu F X, et al. China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2020: 1-66.

[3] 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.

[4] Orimoloye I R, Kalumba A M, Mazinyo S P, et al. Geospatial analysis of wetland dynamics: Wetland depletion and biodiversity conservation of Isimangaliso Wetland, South Africa [J]. Journal of King Saud University - Science, 2020, 32(1): 90-96.

[5] Hu W, Li G, Li Z. Spatial and temporal evolution characteristics of the water conservation function and its driving factors in regional lake wetlands: Two types of homogeneous lakes as examples [J]. Ecological Indicators, 2021, 130: 108069.

[6] Gallant K, Withey P, Risk D, et al. Measurement and economic valuation of carbon sequestration in Nova Scotian wetlands [J]. Ecological Economics, 2020, 171: 106619.

[7] Liu X, Wang Y, Costanza R, et al. The value of China's coastal wetlands and seawalls for storm protection [J]. Ecosystem Services, 2019, 36: 100905.

[8] 丁疆华,温琰茂. 基塘系统中水产养殖对环境的影响[J]. 资源生态环境网络研究动态, 2001, 12(1): 29-33.

Ding J H, Wen Y M. The effect of aquaculture in the dike-pond ecosystem on environment [J]. Research Trend of Resource Ecological Environment Network, 2001, 12(1): 29-33.

[9] Ma J, Niu X, Zhang D, et al. High levels of microplastic pollution in aquaculture water of fish ponds in the Pearl River Estuary of Guangzhou, China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 744: 140679.

[10] 程田飞,周为峰,樊伟. 水产养殖区域的遥感识别方法进展[J]. 国土资源遥感, 2012, 24(3): 1-5. doi: 10. 6046 /gtzyyg. 2012. 03. 01.

Cheng T F, Zhou W F, Fan W. Progress in the methods for extracting aquaculture areas from remote sensing data [J]. Remote Science for Land and Resources, 2012, 24(3): 1-5. doi: 10. 6046 /gtzyyg. 2012. 03. 01.

[11] Pattanaik C, Prasad S N. Assessment of aquaculture impact on mangroves of Mahanadi delta (Orissa), east coast of India using remote sensing and GIS [J]. Ocean and Coastal Management, 2011, 54(11): 789-795.

[12] 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.

[13] 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. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 589 – 595.

[14] 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. Research on remote image extraction of coastal aquaculture pond based on ONDPI [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2020, 40(5): 40 – 44.

[15] Cheng B, Liang C, Liu X, et al. Research on a novel extraction method using deep learning based on GF – 2 images for aquaculture areas [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(9): 3575 – 3591.

[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] Ren C, Wang Z, Zhang B, et al. Remote monitoring of expansion of aquaculture ponds along coastal region of the Yellow River Delta from 1983 to 2015 [J]. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(3): 430 – 442.

[18] 孙晓宇, 苏奋振, 周成虎, 等. 基于 RS 与 GIS 的珠江口养殖用地时空变化分析[J]. *资源科学*, 2010, 32(1): 71 – 77.

Sun X Y, Su F Z, Zhou C H, et al. Analyses on spatial – temporal changes in aquaculture land in coastal areas of the Pearl River Estuarine [J]. *Resources Science*, 2010, 32(1): 71 – 77.

[19] Chang Z Q, Neori A, He Y Y, et al. Development and current state of seawater shrimp farming, with an emphasis on integrated multi-trophic pond aquaculture farms, in China: A review [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2020, 12(4): 2544 – 2558.

[20] 陈 峰, 邱全毅, 熊永柱, 等. 基于线性光谱模型的混合像元分解方法与比较[J]. *遥感信息*, 2010(4): 22 – 28.

Chen F, Qiu Q Y, Xiong Y Z, et al. Pixel unmixing based on linear spectral mixture model: Methods and comparison [J]. *Remote Sensing Information*, 2010(4): 22 – 28.

[21] 陈 晋, 马 磊, 陈学泓, 等. 混合像元分解技术及其进展[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1102 – 1109.

Chen J, Ma L, Chen X H, et al. Research progress of spectral mixture analysis [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1102 – 1109.

[22] 吕长春, 王忠武, 钱少猛. 混合像元分解模型综述[J]. *遥感信息*, 2003(3): 55 – 58.

Lyu C C, Wang Z W, Qian S M. A review of pixel unmixing models [J]. *Remote Sensing Information*, 2003(3): 55 – 58.

[23] 蓝金辉, 邹金霖, 郝彦爽, 等. 高光谱遥感影像混合像元分解研究进展[J]. *遥感学报*, 2018, 22(1): 13 – 27.

Lan J H, Zou J L, Hao Y S, et al. Research progress on unmixing of hyperspectral remote sensing imagery [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(1): 13 – 27.

[24] 黄竞铖, 邢立新, 潘 军, 等. 混合光谱分解实验研究[J]. *科学技术与工程*, 2011, 11(35): 8785 – 8790.

Huang J C, Xing L X, Pan J, et al. An experiment on spectral unmixing [J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(35): 8785 – 8790.

[25] 李 婧, 王爱军, 李团结. 近 20 年来珠江三角洲滨海湿地景观的变化特征[J]. *海洋科学进展*, 2011, 29(2): 170 – 178.

Li J, Wang A J, Li T J. Variations of coastal wetland landscapes in the Pearl River Delta in the last 20 years [J]. *Advances in Marine Science*, 2011, 29(2): 170 – 178.

[26] 林媚珍, 冯荣光, 纪少婷. 中山市基塘农业模式演变及景观格局分析[J]. *广东农业科学*, 2014, 41(24): 184 – 189.

Lin M Z, Feng R G, Ji S T. Analysis on mode change and landscape pattern of the dike – pond agriculture in Zhongshan [J]. *Agricultural Science of Guangdong*, 2014, 41(24): 184 – 189.

[27] Lian L, Chen J. Spatial – temporal change analysis of water area in Pearl River Delta based on remote sensing technology [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 2170 – 2175.

[28] 陈彩霞, 黄光庆, 叶玉瑶, 等. 珠江三角洲基塘系统演化及生态修复策略——以佛 4 村为例 [J]. *资源科学*, 2021, 43(2): 328 – 340.

Chen C X, Huang G Q, Ye Y Y, et al. Change and ecological restoration of the dike – pond system in the Pearl River Delta: A case study of four villages in Foshan City [J]. *Resources Science*, 2021, 43(2): 328 – 340.

Remote sensing monitoring of the spatio – temporal changes in pond aquaculture based on mixed pixel decomposition

SHENG Dezhi^{1,2,3}, XING Qianguo^{1,2,3}, LIU Hailong^{1,2,3}, ZHENG Xiangyang^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Shandong Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai 264003, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aquaculture is an important way for humans to obtain food, and aquaculture ponds are a major production mode of aquaculture. The Pearl River Delta, as an important aquaculture base in southern China, has undergone great changes in its spatial distribution in the past 30 years. This study investigated Zhongshan City and its adjacent areas. First, the mixed pixels of Landsat and Sentinel – 2 remote sensing data were decomposed using

the linear mixed pixel decomposition method. Then, the NDWI threshold range corresponding to the water abundance of 70% and above was selected through visual comparison and analysis. Finally, the spatio – temporal distribution of typical aquaculture ponds from 1990 to 2021 was obtained. The study results show that the aquaculture ponds in Zhongshan City and its adjacent areas have experienced a process of first increasing and then decreasing since 1990. Specifically, the area of aquaculture ponds nearly doubled from 1990 to 2000, tended to be stable from 2000 to 2010, but decreased by nearly 50% from 2010 to 2021. This study can reduce the impact of mixed pixels on the monitoring of aquaculture ponds and support the scientific aquaculture and sustainable development of fisheries in the Greater Bay Area.

Keywords: NDWI; mixed pixel decomposition; aquaculture pond; Zhongshan City; Pearl River Delta
(责任编辑: 陈 理)