

## 黄河三角洲地区沿海养殖池塘空间演变阶段性划分及特征分析

王紫阳<sup>1,2,3</sup>, 吴晓青<sup>1,3\*</sup>, 豆晓<sup>4</sup>, 王晓杰<sup>1</sup> (1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东烟台 264003; 4. 山东农业大学公共管理学院, 山东泰安 271000)

**摘要** 基于1984—2020年遥感影像数据, 获取连续长时间序列的养殖池塘空间分布数据, 并采用时空热点分析和PLR\_FP方法对黄河三角洲地区养殖池塘空间演变的阶段性进行划分。结果表明, 黄河三角洲地区养殖池塘面积呈现波动增长态势, 年均增加29.3 km<sup>2</sup>, 时空增长模式多样化, 且具有明显的空间分异性; 增长热点分布在滨州沿海、东营河口区西部、垦利黄河口南部, 成为目前黄河三角洲地区池塘养殖重点分布区, 而莱州湾沿岸池塘养殖规模逐渐萎缩。养殖池塘的空间演变过程可划分为起步期(1984—1992年)、平稳期(1993—1998年)、扩张期(1999—2013年)和缩减期(2014—2020年)4个阶段, 不同阶段养殖池塘时空增长模式和养殖业发展特征差异明显。

**关键词** 养殖池塘; 空间演变; 阶段划分; 变化特征; 黄河三角洲

**中图分类号** S967.4 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2023)11-0050-06

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.11.012



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Stage Division and Characteristics Analysis of the Spatial Evolution of Coastal Aquaculture Ponds in Yellow River Delta

WANG Zi-yang<sup>1,2,3</sup>, WU Xiao-qing<sup>1,3</sup>, DOU Xiao<sup>4</sup> et al (1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003; 4. College of Public Administration, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271000)

**Abstract** Based on the remote sensing image data from 1984 to 2020, this study obtained the spatial distribution data of aquaculture ponds in a long-term continuous sequence, and the spatio-temporal hotspot analysis and PLR\_FP method were used to divide the stages of the spatial evolution of aquaculture ponds in Yellow River Delta. The results showed that the area of aquaculture ponds in the Yellow River Delta showed a fluctuating growth trend, with an average annual increase of 29.3 km<sup>2</sup>. The spatiotemporal growth patterns were diverse, with obvious spatial differentiation. Growth hotspots were distributed along the coast of Binzhou, the west of Dongying Estuary and the south of Kenli Yellow River Estuary, which had become the key distribution areas for pond aquaculture in the Yellow River Delta, while the scale of pond aquaculture along the Laizhou Bay was gradually shrinking. The spatial evolution process of aquaculture ponds could be divided into four stages: the initial stage (1984–1992), the stable stage (1993–1998), the expansion stage (1999–2013) and the shrinking stage (2014–2020), and there were significant differences in the spatiotemporal growth patterns and aquaculture characteristics of aquaculture ponds at different stages.

**Key words** Aquaculture ponds; Spatial evolution; Staged division; Change characteristics; Yellow River Delta

池塘养殖是海水养殖的一种重要模式, 作为“优质粮食”的生产场所, 其生态灾害风险较低, 经济收益较高, 对我国“蓝色粮仓”建设具有重要意义<sup>[1]</sup>。现代黄河三角洲及莱州湾沿岸为典型的三角洲海岸和淤泥质海岸, 滩涂资源丰富、池塘养殖历史悠久、养殖规模大, 是山东省重要的养殖基地<sup>[2]</sup>。近几十年来, 随着社会经济发展水平的提高和养殖技术的进步, 黄河三角洲地区池塘养殖不断向渤海扩张, 占用了大量自然滩涂湿地, 造成滨海湿地萎缩、生物多样性下降、土壤次生盐渍化、碳封存环境破坏等问题<sup>[3-7]</sup>。与此同时, 养殖池塘也是重要的人工湿地, 具有补充地下水和调节气候等生态功能<sup>[8-9]</sup>, 科学合理地进行池塘养殖还能够成为践行碳中和战略的重要负排放途径<sup>[10-11]</sup>。在推动黄河流域生态保护和高质量发展战略背景下, 实现池塘养殖功能优化布局, 成为化解滨海湿地生态保护与高效生态化养殖之间矛盾的重要管理手段之一。而研究沿海池塘养殖时空演变特征作为其优化布局的一项重要基础性工作, 有助于揭示该地区海水养殖业发展历程, 获取地区池塘养殖的独特性, 为黄河三

角洲地区滩涂湿地池塘养殖空间优化布局和生态保护修复工程规划建设提供数据和理论支持。

当前学者多从土地利用和景观格局变化的角度揭示黄河三角洲地区养殖池塘的时空演变特征及其对滨海湿地的生态影响<sup>[12-15]</sup>, 但是由于其时空分布数据不具备连续性, 或仅使用经济统计数据, 造成对养殖池塘时空演变特征和变化趋势的把握不够准确, 不能对海水养殖业发展过程作出有效判断。该研究基于遥感、相关专项调查资料等数据, 重点揭示黄河三角洲地区1984—2020年池塘海水养殖时空演变过程, 划分其空间演变阶段, 探讨不同阶段空间增长特征及其驱动因素, 以期对池塘养殖可持续管理与开发和环境保护提供技术支持。

## 1 资料与方法

**1.1 研究区概况** 研究区位于山东半岛北部, 西起鲁冀交界的漳卫新河口, 东至烟台、潍坊交界的胶莱河口, 地理位置为117°76'~119°61'E、36°92'~38°28'N, 包括黄河三角洲、莱州湾自海岸线向陆延伸15 km的海岸带地区, 行政区涉及滨州、东营、潍坊3个地级市。此区域为粉砂淤泥质平原海岸, 地势低平, 滩涂范围宽广, 有黄河、小清河、潍河、胶莱河等十余条淡水河流入海, 近岸海域营养盐、有机质多, 饵料充盈, 是山东省重要的海水养殖基地。

**1.2 数据源与预处理** 遥感数据源主要为Landsat系列卫

**基金项目** 国家重点研发计划项目(2019YFD0900705)。  
**作者简介** 王紫阳(1998—), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 研究方向: GIS与遥感应用。\*通信作者, 正高级工程师, 博士, 从事海岸带规划管理、GIS与遥感应用研究。  
**收稿日期** 2022-07-06

星,时间跨度为 1984—2020 年,通过地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 平台下载获取,共计 74 景影像。在 ENVI 中进行预处理,包括辐射校正、大气校正、全色波段和多光谱的融合等。辅助数据包括地形图、历史年份的高清影像和海岸带专项调查数据等。海水养殖相关统计数据来源于省、市统计局历年统计年鉴,部分年份缺失数据采用移动平均法进行补充。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 遥感信息提取。**养殖池塘的提取首先借助水体指数并参照明显的解译标志<sup>[16]</sup>识别其潜在区域;然后,结合地物遥感解译判别标志、专家经验知识、海岸带土地利用调查资料以及实地调研,采用人工目视解译方法对养殖池塘和盐田、水库坑塘进行区分,处理获得 1984—2020 年黄河三角洲地区连续 37 年的养殖池塘分布数据。利用同时期高清谷歌影像、高分一号等高分辨率遥感数据及研究团队近几年实地调查点位进行解译精度验证,结果显示 37 年养殖池塘总体解译精度均在 79% 以上,满足研究需要。

**1.3.2 阶段性划分方法。**该研究基于养殖池塘空间分布连续多年的遥观测数据,采用基于特征点的分段线性表示法 (piecewise linear representation based feature points, PLR\_FP) 提取时间序列数据分段特征点<sup>[17]</sup>,进行池塘养殖空间扩展阶段性划分。PLR\_FP 方法可以概化时间序列数据的主要状态特征,进行有效的数据压缩和局部噪声过滤。具体做法:首先,识别时间序列数据的局部极值点;然后,采用阈值  $R$  限

定前后极值点数据的垂直差比,将符合要求的点识别为不同尺度下的分段特征点<sup>[17-18]</sup>;最后,借助双样本 Wilcoxon 秩和检验将不具有显著性的特征点进行排除<sup>[19]</sup>,依据最终分段线性表示的拟合系数与常数 0 之间的关系判断每阶段的具体趋势。

其中,秩和检验用于检验 2 个独立的养殖序列样本是否来自相同的总体。从 2 个独立总体抽取样本并将所有观测值由大到小排列后,每一个观测值在混合排列中所占位置的名次称为它的秩,当其中某样本秩和 (statistic) 较小,混合样本为一个随机混合样本,秩和检验中  $P$  值小于 0.05,可以认为该分段点前后时间序列数据具有明显差异,可对前后 2 个时段内养殖池塘演变特征相同这一假设提出质疑。

**1.3.3 空间演变模式判别方法。**对于连续性面状空间分布数据,采用时空热点分析方法量化分析近 37 年养殖池塘的空间格局类型及其出现频率和时空位置<sup>[20]</sup>,揭示池塘养殖空间演变分异规律。

该方法首先基于 ArcGIS 热点分析方法计算各时间截面 Getis-Ord  $G^*$  统计量并进行显著性检验;空间权重矩阵采用邻接标准中的“Queen”,即面要素有公共边或结点即为相邻,采用“CONTIGUITY\_EDGES\_CORNERS”工具计算,邻域步长设置为 1 年;然后,分析各区域截面 Getis-Ord  $G^*$  统计量的 Mann-Kendall 趋势;其中,区域截面的构造采用覆盖研究区范围的 1 km 网格;最后,结合养殖池塘面积遥观测数据,按照模式分类规则 (表 1) 对比归类为不同时空模式<sup>[20]</sup>。

表 1 时空冷热点模式

Table 1 Spatial-temporal cold and hot spots pattern

序号 No.	取值 Value	Mann-Kendall 检验 Mann-Kendall test	模式类别 Mode category
1	50% 及以上的时间截面 $G_i^* \geq 1.65 \times 0.9$	上升趋势显著	潜在热点
2	50% 及以上的时间截面 $G_i^* \leq -1.65 \times 0.9$	下降趋势显著	潜在冷点
3	50% 以下的时间截面 $G_i^* \geq 1.65 \times 0.9$ 或 $G_i^* \leq -1.65 \times 0.9$	—	一直不显著
4	$G_i^* \sim G_i^{n-1}$ 均为热 (冷) 点	上升 (下降) 趋势显著	增强的持续热 (冷) 点
5	$G_i^* \sim G_i^{n-1}$ 均为热 (冷) 点	下降 (上升) 趋势显著	减弱的持续热 (冷) 点
6	$G_i^* \sim G_i^{n-1}$ 均为热 (冷) 点	趋势不显著	连续热 (冷) 点
7	$G_i^* \sim G_i^{n-1}$ 存在热 (冷) 点且数量小于 $n$	上升 (下降) 趋势显著	逐渐增强的热 (冷) 点
8	$G_i^* \sim G_i^{n-1}$ 存在热 (冷) 点且数量小于 $n$	下降 (上升) 趋势显著	逐渐减弱的热 (冷) 点
9	$G_i^*$ 不显著, $G_i^* \sim G_i^{n-1}$ 50% 及以上时间截面有热 (冷) 点	趋势不显著	历史热 (冷) 点
10	$G_i^*$ 为热 (冷) 点, $G_i^* \sim G_i^{n-1}$ 不显著	趋势不显著	新增热 (冷) 点
11	$G_i^*$ 不显著, $G_i^* \sim G_i^{n-1}$ 50% 以下时间截面有热 (冷) 点或 $G_i^*$ 为热 (冷) 点, $G_i^* \sim G_i^{n-1}$ 存在冷热点	趋势不显著	分散的热 (冷) 点
12	$G_i^*$ 为热点, $G_i^* \sim G_i^{n-1}$ 既有热点也有冷点	—	振荡的热点
13	$G_i^*$ 为冷点, $G_i^* \sim G_i^{n-1}$ 既有热点也有冷点	—	振荡的冷点

热点分析是局部自相关的统计量,可以用来识别池塘养殖分布的热点和冷点。其计算公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n (\omega_{ij} x_j) - \bar{X} \sum_{j=1}^n \omega_{ij}}{S \sqrt{\frac{1}{n-1} [n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n \omega_{ij})^2]}} \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^2 - \bar{X}^2} \quad (2)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (3)$$

式中,  $x_j$  是第  $j$  个养殖单元的密度值;  $\bar{X}$  是所有养殖单元的密度均值;  $\omega_{ij}$  是养殖单元  $i$  和  $j$  的空间权重系数;  $n$  为研究区域内所有养殖单元的总数量。  $G_i^*$  为正且显著时,表明养殖单元  $i$  与周围研究单元的值相对较高 (高于均值),为热点区;反之,若  $G_i^*$  为负且显著时,则说明养殖单元  $i$  为冷点区。当

$|G_i^*|$ 取值为 1.65,对应的  $P$  值为 0.1(置信度为 90%的热点或冷点)。采用非参数的 Mann-Kendall 检验法对养殖池塘近 37 年的面积等要素时间序列进行显著性检验,定量反映变化趋势的显著性,计算公式见文献<sup>[21]</sup>。

## 2 结果与分析

**2.1 养殖池塘时空演变总体特征** 从图 1 可以看出,1984—2020 年黄河三角洲地区沿海养殖池塘规模呈现波动

增长的态势,从期初的 66.7 km<sup>2</sup> 增长至 1 150.7 km<sup>2</sup>,增长约 16.3 倍,年均增速为 29.3 km<sup>2</sup>。其中,1986—1989、2000—2005、2010—2013 年养殖池塘面积增速较快,并于 2013 年达到最高峰(1 359.9 km<sup>2</sup>);2016—2018 年养殖池塘规模出现缩减,3 年共减少 231.1 km<sup>2</sup>;而 1990—1999 年养殖池塘面积保持在相对稳定的水平,可见养殖池塘规模长时间序列年度增长呈现明显的阶段性变化特点。

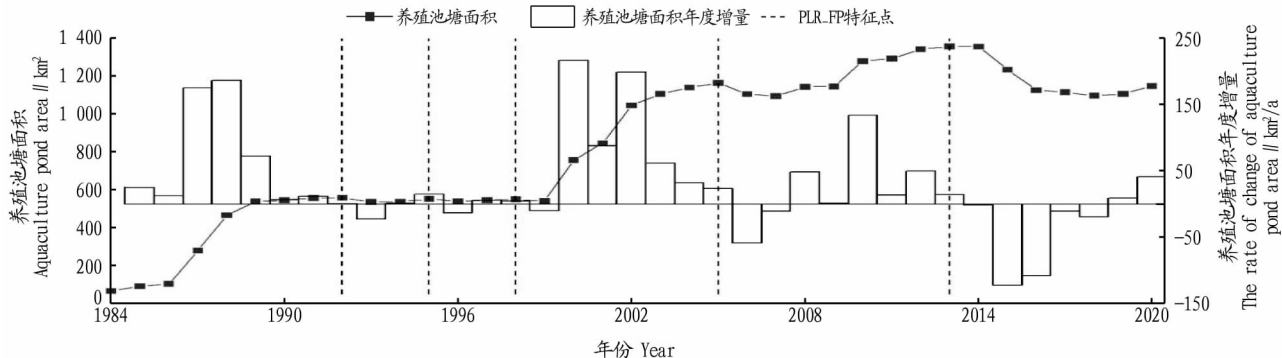


图 1 1984—2020 年黄河三角洲地区沿海养殖池塘面积增长变化趋势及 PLR\_FP 特征点分布

Fig. 1 Growth change trend of coastal aquaculture pond area and distribution of PLR\_FP feature points in Yellow River Delta area from 1984 to 2020

黄河三角洲地区沿海养殖池塘空间演变也呈现出明显的时空分异特征,不同时间段养殖池塘增长的冷热点发生迁移变化,时空演变模式呈现多样化(图 2)。研究期初,滨州的无棣、沾化和潍坊市的昌邑、寒亭等县(市、区)的  $G_i^*$  统计量较高,为区域内沿海池塘养殖的起步区;随后一段时间,各县(市、区)养殖池塘增长变化的  $G_i^*$  统计量分布相对均匀,无明显的热点区,仅在寿光、河口、利津等县(市、区)保持较低水平。但是在 2000 年之后,养殖池塘区域增长的冷热点分布逐渐变得两级分明,沾化、无棣的  $G_i^*$  统计量骤增,出现

了新一轮的池塘养殖高潮,并带动与其毗邻的东营河口区池塘养殖的扩张,成为“逐渐增强的热点”,也是目前池塘养殖的重点分布区;而莱州湾西南部沿岸县(市、区)  $G_i^*$  统计量明显降低,归为“逐渐减弱的热点”,因盐化工、临港产业发展和城镇化建设,该区域养殖池塘规模大面积萎缩。养殖池塘空间增长的冷点分布较为分散,其中“逐渐增强的冷点”和“分散的冷点”位于黄河三角洲国家级自然保护区,说明自然保护地建设管理对养殖池塘空间扩展具有明显的约束作用。

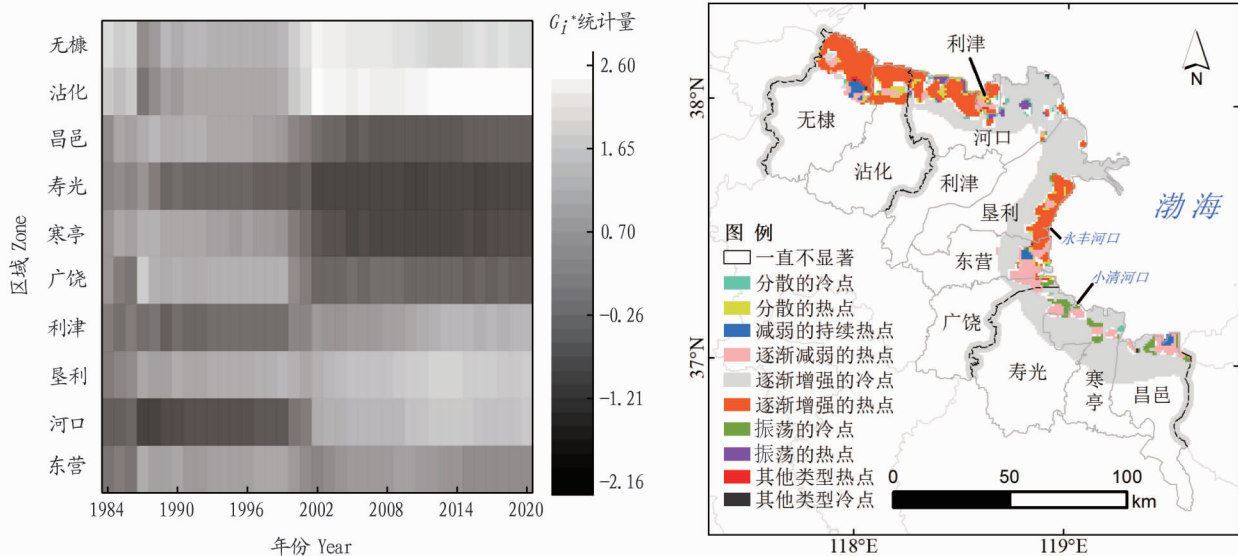


图 2 1984—2020 年黄河三角洲地区沿海养殖池塘时空热点演变及其分布

Fig. 2 Evolution and distribution of spatial-temporal hotspots of coastal aquaculture ponds in Yellow River Delta area from 1984 to 2020

**2.2 养殖池塘规模变化阶段性划分** 为准确划分养殖池塘规模变化的阶段,分析不同阶段空间演变模式及特征,该研

究采用 PLR\_FP 方法对养殖池塘面积连续遥感观测数据进行特征点识别(图 1),通过调整常数  $R$  阈值( $0 \leq R \leq 20.39$ )

的大小,将符合要求的特征点识别为不同分割等级下的分界点(表 2)。由于从第五级分割等级开始,不显著点多于 50%,故保留前 4 个等级的特征点,进行秩和检验后,最终确

定养殖池塘面积变化分段特征显著的特征点为 1992、1998、2005 和 2013 年。

表 2 养殖池塘空间扩展分段特征点分级与显著性检验

Table 2 Classification and significance test of spatially expanded subsection feature points in aquaculture ponds

分割等级 Division level	分段特征点(年份) Segmented feature points(year)	检验序列 Inspection sequence	显著性检验 Significance test
一级 Level 1	2013	1984—2013、2014—2020	statistic = 45, $P = 0.018 5$ , 特征点显著
二级 Level 2	2005、2013	1984—2005、2006—2013	statistic = 8, $P = 2.289 5 \times 10^{-5}$ , 特征点极显著
三级 Level 3	1992、2005、2013	1984—1992、1993—2005	statistic = 20, $P = 0.011 2$ , 特征点显著
四级 Level 4	1992、1995、1998、2005、2013	1993—1995、1996—2005 1993—1998、1999—2005	statistic = 4, $P = 0.076 9 > 0.05$ , 特征点不显著 statistic = 3, $P = 0.008 0$ , 特征点极显著

以上述分段特征点进行养殖池塘面积变化的分段线性拟合,结果显示 1984—1992、1999—2005、2006—2013 年 3 个时段的拟合系数大于 0,说明这些时段池塘养殖规模呈现增长趋势;1993—1998 年的线性拟合斜率近乎为 0,池塘养殖规模基本没发生变化;2014—2020 年的线性拟合斜率为负值,说明此阶段池塘养殖规模出现缩减。由此将黄河三角洲地区沿海养殖池塘空间扩展过程划分为 4 个时段,即池塘养殖起步期(1984—1992 年)、平稳期(1993—1998 年)、扩张期(1999—2013 年)、缩减期(2014—2020 年)。

**2.3 黄河三角洲地区养殖池塘空间演变阶段性特征** 依据养殖池塘演变划分的 4 个阶段,进一步分析不同阶段黄河三角洲地区沿海养殖池塘空间演变特征、养殖业发展特点及驱动因素。

(1) 池塘养殖起步期(1984—1992 年)。养殖池塘空间增长总体上自滨州沿海地区开始起步,随后在潍坊沿岸多点兴起,最终在滨州和莱州湾西南部海岸带地区呈现大幅扩张(图 3a);至期末,养殖规模已达到 559.33 km<sup>2</sup>,年均增速为 54.74 km<sup>2</sup>。山东黄河三角洲国家级自然保护区的建设,限制了东营市河口区与垦利区的围海养殖活动。这一时期,受益于对虾、扇贝养殖技术的突破和改革开放的良好发展环境,沿海池塘对虾、贝类养殖获得快速发展,全省渔业总产值达到期初的 3.83 倍。但是,养殖品种单一,养殖方式粗放,且由于过度追求产量和规模,高密度养殖和盲目用药造成水环境恶化,给附近滩涂及海域造成巨大生态压力<sup>[22]</sup>。

(2) 池塘养殖平稳期(1993—1998 年)。养殖池塘空间增长热点规模小,且分布相对分散(图 3b),主要位于东营和滨州沿海,养殖规模稳定在 547 km<sup>2</sup> 左右。这一时期,在“海上山东”和黄河三角洲综合开发战略的推动下,经过养殖结构调整,池塘养殖种类逐渐多样化,实现了从追求产量和规模向注重质量和效益的重大转变<sup>[23]</sup>。此阶段后期受 1993 和 1996 年对虾、栉孔扇贝大规模死亡事件的影响,黄河三角洲地区开始积极探索各种鱼虾贝立体混养、轮养的模式,依靠科技进步开展对虾池的综合利用,不断挖掘生态效益<sup>[24]</sup>。

(3) 池塘养殖扩张期(1999—2013 年)。养殖池塘呈现大面积快速扩张态势,养殖规模由 1999 年的 542.18 km<sup>2</sup> 迅

速增长至 2013 年的 1 359.87 km<sup>2</sup>,年均增速 54.51 km<sup>2</sup>,远高于其他时段;扩张热点区变得更为集中,滨州东部、垦利沿岸成为新的增长核心区域,莱州湾南岸池塘养殖规模缩小,最终形成了滨州北部的广阔滩涂以及现今黄河入海口以南的东营市沿岸两大重点养殖区(图 3c)。这一时期,多种池塘混养模式技术探索获得成功及应用,养殖种类日益多样化,三疣梭子蟹、中国明对虾、日本囊对虾、凡纳滨对虾、刺参和鲍都具有一定规模,养殖生态意识进一步增强,可持续、集约化发展成为各地海水养殖追求的新发展方向<sup>[25-26]</sup>。

(4) 池塘养殖缩减期(2014—2020 年)。2014—2016 年养殖池塘面积缩减 230.14 km<sup>2</sup>,之后基本稳定在 1 113.93 km<sup>2</sup>;养殖池塘空间增长受到城市化、工业化进程不断推进和黄河三角洲滩涂湿地生态修复工程建设的影响,寿光、寒亭、广饶以及利津、垦利北端的池塘规模缩减(图 3d),陆域空间发展受到挤压,而海域开放式养殖获得快速发展<sup>[27-28]</sup>。这一时期,“东参西养”以及各种生态混养模式技术获得成功,并且在现代生态高效农业示范区建设带动下,各地注重引导发展生态与经济利益相协调的海水养殖业<sup>[24,29]</sup>,黄河三角洲地区海参、凡纳滨对虾养殖以及青蛤、菲律宾蛤仔、褐牙鲆、缢蛏、卤虫、海蜇养殖业蒸蒸日上,一定程度上实现了经济效益和生态效益的双赢<sup>[30]</sup>。

### 3 讨论

该研究基于连续长时间序列的养殖池塘面积遥感观测数据和 PLR\_FP 方法对黄河三角洲地区沿海养殖池塘空间演变过程进行阶段性划分,识别出 4 个明显的变化阶段,并分析得出不同时段养殖池塘时空增长模式和养殖特征具有明显差异,较好地揭示了区域池塘养殖业发展历程。阶段性划分结果比较客观,与已有研究也存在一致性。如宋媛等<sup>[31]</sup>研究揭示 1994—1999 年莱州湾、渤海湾等海湾养殖池塘面积保持均衡变动,2004 年起因莱州湾盐业迅速发展,养殖池向盐田发生转换,以及 2009—2014 年渤海湾养殖业重大改革带来的快速发展等,都符合该研究区养殖池塘规模变化的重要时间节点。

渔业经济统计指标的变化也可以在一定程度上反映地区渔业发展历程,如许学工<sup>[32]</sup>、周鑫等<sup>[33]</sup>进行黄河三角洲地

区渔业综合效益评估时发现经济效益在 1992、1998 和 2006 年等时间节点同样呈现出明显的阶段性差异,此结果与该研究基于遥感观测数据的时间分段点有所偏差,主要原因是渔业经济统计数据涵盖范围广,而且研究区内海水养殖模式多种多样,除了池塘养殖,还包括工厂化养殖、海域底播养殖、

海域筏式养殖等类型,池塘养殖以外的这些海水养殖模式所带来的养殖产量和养殖效益在海水养殖业中占据较大比重,采用遥感技术手段无法精确获取连续时间段高时空精度的各类养殖模式空间分布信息,而养殖产量和渔业总产值统计指标更是难以剥离出池塘养殖所带来的收益。

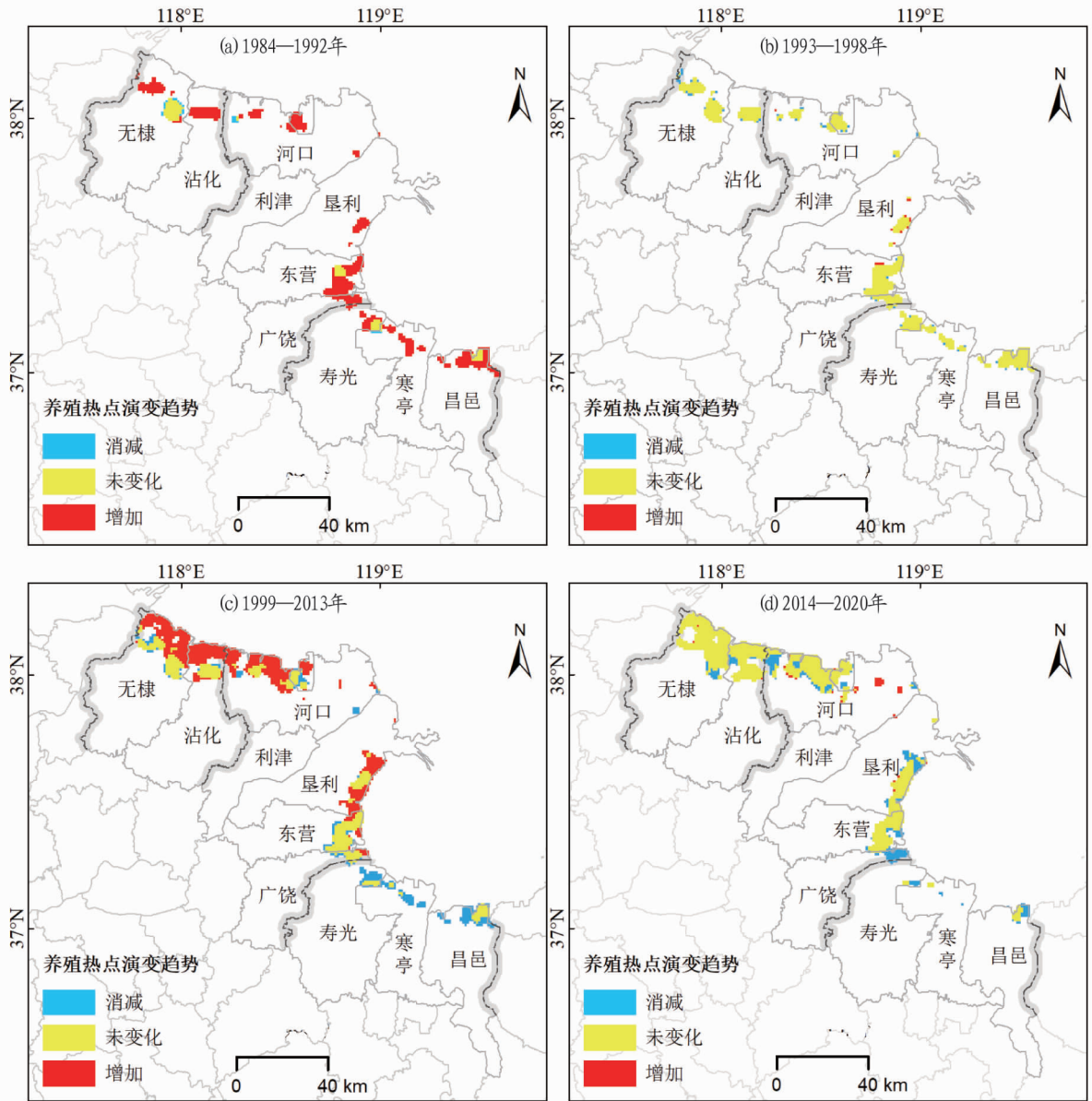


图3 1984—2020年黄河三角洲地区沿海养殖池塘空间增长热点演变

Fig. 3 Evolution of spatial growth hotspots of coastal aquaculture ponds in the Yellow River Delta region during 1984–2020

#### 4 结论

该研究基于遥感、时空热点分析和 PLR\_FP 方法,揭示了 1984—2020 年黄河三角洲地区沿海养殖池塘时空演变过程及阶段性变化特征,主要结论如下:

(1) 黄河三角洲地区养殖池塘规模呈现波动中增长态势,近 37 年间增长了 16.3 倍,年均增速  $29.3 \text{ km}^2$ ,形成 1984—1992 年和 1999—2013 年两大增长高峰期,2013 年养殖面积达到最高峰 ( $1\,359.9 \text{ km}^2$ )。养殖池塘空间增长冷热点变化具有明显的时空分异性,空间增长模式也呈现多样化。养殖池塘空间增长自滨州、潍坊沿海兴起,随后增长热

点在北部地区由滨州自西向东转移至河口区西部,而南部地区则由潍坊沿岸向西、向北迁移到东营黄河口南部,最终形成了滨州沿海、东营河口区西部、垦利黄河口南部等池塘养殖重点区,而莱州湾南岸池塘养殖规模逐渐萎缩。

(2) 黄河三角洲地区沿海养殖池塘的空间演变过程可划分为 4 个阶段,即起步期 (1984—1992 年)、平稳期 (1993—1998 年)、扩张期 (1999—2013 年) 和衰减期 (2014—2020 年);由于海水养殖技术的进步、渔业经济促进政策和湿地生态保护措施的实施,不同阶段池塘养殖空间演变特征、主要驱动因素和渔业生产经营状况有较大差异。

## 参考文献

- [1] 杨红生. 我国蓝色粮仓科技创新的发展思路与实施途径[J]. 水产学报, 2019, 43(1): 97-104.
- [2] 徐岩, 朱玉贵. 山东省海水贝类养殖产业变化特征分析[J]. 现代农业科技, 2020(12): 215-216, 220.
- [3] 曹琼, 黄佳芳, 罗敏, 等. 滨海沼泽湿地转化为养殖塘对其碳储量的影响[J]. 中国环境科学, 2022, 42(3): 1335-1345.
- [4] 贾军, 崔正国, 唐小双, 等. 不同水力条件下海水人工湿地净化效果及其影响分析[J]. 渔业现代化, 2021, 48(5): 26-35.
- [5] CHI Y, SHI H H, ZHENG W, et al. Spatiotemporal characteristics and ecological effects of the human interference index of the Yellow River Delta in the last 30 years[J]. Ecological indicators, 2018, 89: 880-892.
- [6] WANG C D, LI X, YU H J, et al. Tracing the spatial variation and value change of ecosystem services in Yellow River Delta, China[J]. Ecological indicators, 2019, 96: 270-277.
- [7] ZHANG X J, WANG G Q, XUE B L, et al. Dynamic landscapes and the driving forces in the Yellow River Delta wetland region in the past four decades[J/OL]. Science of the total environment, 2021, 787[2022-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147644>.
- [8] 吴志峰, 曹峰, 宋松, 等. 粤港澳大湾区湿地遥感监测与评估: 现状、挑战及展望[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8440-8450.
- [9] 张绪良, 谷东起, 丰爱平, 等. 莱州湾南岸滨海湿地的氮、磷循环过程及调控对策[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1127-1133.
- [10] 焦念志, 刘纪化, 石拓, 等. 实施海洋负排放践行碳中和战略[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(4): 632-643.
- [11] 张安琪. 海水养殖助力“蓝碳计划”的途径[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(2): 89-91.
- [12] 孔梅, 曹惠明, 高兴国, 等. 黄河三角洲自然保护区国土空间变化遥感监测与评价[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(2): 272-276.
- [13] OTTINGER M, KUENZER C, LIU G H, et al. Monitoring land cover dynamics in the Yellow River Delta from 1995 to 2010 based on Landsat 5 TM[J]. Applied geography, 2013, 44: 53-68.
- [14] 仇志强, 毛德华, 相恒星, 等. 5个时期黄河流域湿地格局及其变化研究[J]. 湿地科学, 2021, 19(4): 518-526.
- [15] 黄建涛, 郑伟, 万年新, 等. 近30年来莱州湾滨海湿地景观格局变化特征研究[J]. 海洋科学, 2021, 45(2): 76-90.
- [16] 任玲玲, 栗云召, 于淼, 等. 1984—2015年黄河三角洲人工湿地的演变及主要驱动因子[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 493-502.
- [17] 喻高瞻, 彭宏, 胡劲松, 等. 时间序列数据的分段线性表示[J]. 计算机应用与软件, 2007, 24(12): 17-18.
- [18] HUANG L, CHEN X, ZHANG Y, et al. Identification of topic evolution: Network analytics with piecewise linear representation and word embedding[J]. Scientometrics, 2022, 127(9): 5353-5383.
- [19] 代稳, 吕殿青, 李景保, 等. 1951—2014年洞庭湖水沙阶段性演变特征及驱动因素分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 142-150, 176.
- [20] 单宝艳, 张智璇, 陈艳秋, 等. 时空格局分析方法及其实证应用: 以山东省制造业为例[J]. 测绘科学技术学报, 2021, 38(6): 624-630, 638.
- [21] GUO M, LI J, HE H S, et al. Detecting global vegetation changes using Mann-Kendal(MK) trend test for 1982-2015 time period[J]. Chinese geographical science, 2018, 28(6): 907-919.
- [22] 赵广苗. 海水池塘养殖模式的演变与发展趋势[J]. 齐鲁渔业, 2006, 23(7): 1-2.
- [23] 李大海, 潘克厚, 陈玲玲. 改革开放以来我国海水养殖政策的演变与发展[J]. 中国渔业经济, 2008, 26(3): 57-61.
- [24] 李静. 海水养殖污染与生态修复对策[J]. 农家参谋, 2020(15): 114, 116.
- [25] 董双林. 多视角下的新时代水产养殖业发展[J]. 水产学报, 2019, 43(1): 105-115.
- [26] 方建光, 李钟杰, 蒋增杰, 等. 水产生态养殖与新养殖模式发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2016, 18(3): 22-28.
- [27] 李大海, 韩立民. 陆海统筹构建粮食安全保障新体系研究[J]. 社会科学辑刊, 2019(6): 109-117.
- [28] 麦康森, 徐皓, 薛长湖, 等. 开拓我国深远海养殖新空间的战略研究[J]. 中国工程科学, 2016, 18(3): 90-95.
- [29] XU J, HAN L M, YIN W. Research on the ecologicalization efficiency of mariculture industry in China and its influencing factors[J]. Marine policy, 2022, 137[2022-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104935>.
- [30] LIANG Y X, CHENG X W, ZHU H, et al. Historical evolution of mariculture in China during past 40 years and its impacts on eco-environment[J]. Chinese geographical science, 2018, 28(3): 363-373.
- [31] 宋媛, 李国庆, 吴晶, 等. 1989—2019年环渤海地区养殖池的空间变化特征[J]. 海洋通报, 2021, 40(1): 92-100.
- [32] 许学工, 梁泽, 周鑫. 黄河三角洲陆海统筹可持续发展探讨[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 424-432.
- [33] 周鑫, 许学工. 黄河三角洲(东营市)高效生态渔业综合效益评估[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(3): 518-524.
- (上接第34页)
- [3] 王有庆, 唐蓉, 王晋民, 等. 生长调节剂对唐菖蒲茎段培养中器官分化的影响[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2003, 21(3): 4-6, 38.
- [4] 薛寒青, 高霞. 生长调节剂对唐菖蒲继代培养中芽形成的影响[J]. 北方园艺, 2008(7): 217-218.
- [5] 申芸萍. 不同物质对唐菖蒲继代培养试管苗增殖的影响[J]. 青海农林科技, 2014(2): 21-22, 82.
- [6] 李昌禹, 郭太君, 焦培娟, 等. 唐菖蒲组培脱毒技术研究[J]. 园艺学报, 2003, 30(3): 358-360.
- [7] 廖林楠, 孙萍, 徐香玲. 唐菖蒲组织培养初探[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2005, 21(2): 84-86.
- [8] 徐晓峰, 黄学林. TDZ: 一种有效的植物生长调节剂[J]. 植物学通报, 2003, 38(2): 227-237.
- [9] 车代弟, 刘志洋. 唐菖蒲子球茎直接分化再生体系的建立[J]. 分子植物育种, 2004, 2(4): 531-534.
- [10] 张智乾, 何秀丽, 义鸣放. 唐菖蒲离体直接再生技术的研究[J]. 华中农业大学学报, 2008, 27(1): 110-116.
- [11] 张瑞姿. 植物生长调节剂在观赏植物组织培养中的应用[J]. 山西林业, 2012(5): 39-40.
- [12] 张建华. 生长物质对唐菖蒲继代苗芽数增殖的影响[J]. 内蒙古农业科技, 2006, 34(4): 56, 58.
- [13] 胡小燕, 义鸣放. 唐菖蒲的茎尖组织培养与植株再生[C]//庆祝中国园艺学会创建80周年暨第11次全国会员代表大会论文摘要集. 北京:《园艺学报》编辑部, 2009: 196.
- [14] 王小青, 陈刚, 李明军, 等. 植物生长调节剂在植物组织培养中的应用[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [15] 王刚, 龙春林, 赵燕. 唐菖蒲快速繁殖条件的优化[J]. 西南林学院学报, 2001, 21(3): 152-155.
- (上接第49页)
- [5] 时文博, 曹春燕, 宋颖, 等. 基于多元统计分析的黄河山东段水质评价研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(2): 48-53.
- [6] 王雨辰, 徐磊, 叶雪平, 等. 综合水质标识指数法在衢江渔业水域水质评价中的应用[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(2): 60-63.
- [7] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境出版社, 2002.
- [8] 国家环境保护总局. 地表水和污水监测技术规范: HJ/T 91—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [9] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [10] 项颀, 万玲, 庞燕. 土地利用驱动下洱海流域入湖河流水质时空分布规律[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 160-170.
- [11] 林涛, 徐盼盼, 钱会, 等. 黄河宁夏段水质评价及其污染源分析[J]. 环境化学, 2017, 36(6): 1388-1396.
- [12] 马小雪, 王腊春, 廖玲玲. 温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 64-71.
- [13] 高星琪, 董志, 李令军, 等. 官厅水库上游河流水质空间变异多元统计分析[J]. 湿地科学, 2019, 17(1): 106-111.
- [14] 解莹, 李叙勇, 王慧亮, 等. 滦河流域上游地区主要河流水污染特征及评价[J]. 环境科学学报, 2012, 32(3): 645-653.
- [15] 张军莉, 赵磊, 聂菊芬. 云南高原小湖泊水质空间分布特征研究[J]. 环境科学导刊, 2015, 34(2): 26-34.
- [16] 李晓姣, 张岱琼, 乔俊, 等. 基于多元统计方法的某地浅层地下水污染源分析[J]. 中国环境监测, 2020, 36(1): 88-95.
- [17] 郑倩玉, 刘硕, 王鲁河, 等. 松花江哈尔滨段水质环境质量评价及污染源解析[J]. 环境科学研究, 2018, 31(3): 507-513.