



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

黄河三角洲区域海水养殖时空演变及其对滩涂湿地资源的影响

王紫阳, 吴晓青, 王晓杰, 张雨寒

引用本文:

王紫阳, 吴晓青, 王晓杰, 张雨寒. 黄河三角洲区域海水养殖时空演变及其对滩涂湿地资源的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 291–301.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0065>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

1984—2015年黄河三角洲人工湿地的演变及主要驱动因子

任玲玲, 栗云召, 于淼, 杨继松, 战超, 周迪

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 493–502 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0111>

黄河三角洲滨海湿地退化过程的时空变化及预测分析

于淼, 栗云召, 屈凡柱, 周迪, 战超, 王雪宏

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 484–492 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0110>

土地利用变化对农业文化遗产系统结构的影响——以浙江省德清县为例

杨晓, 焦雯珺, 闵庆文, 杨伦

农业资源与环境学报. 2022, 39(5): 885–893 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0410>

改革开放以来珠三角地区农业功能转变与景观形态演变

何可, 叶昌东, 陈当然, 黄安达

农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 957–966 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0481>

京津冀潮白河区域2001—2017年耕地利用变化时空特征分析

苏锐清, 曹银贵, 王文旭, 邱敏, 宋蕾

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 574–582 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0266>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王紫阳, 吴晓青, 王晓杰, 等. 黄河三角洲区域海水养殖时空演变及其对滩涂湿地资源的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 291–301.

WANG Z Y, WU X Q, WANG X J, et al. Spatio-temporal evolution of mariculture in the Yellow River Delta and its impact on tidal flat wetland resources[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(2): 291–301.

黄河三角洲区域海水养殖时空演变及其对滩涂湿地资源的影响

王紫阳^{1,2}, 吴晓青^{1,3*}, 王晓杰¹, 张雨寒⁴

(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. 鲁东大学资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025)

摘要:为揭示典型区域滩涂湿地海水养殖陆海时空演变特征及其生态影响,本研究结合遥感和海域使用确权数据,采用GIS空间分析方法,获取并分析1985—2020年间黄河三角洲区域池塘养殖、开放式养殖空间演变过程及其对滩涂湿地资源结构和景观格局的影响。结果表明,2010年之前区域陆域池塘养殖规模持续增加,面积最高达到1 480.1 km²,形成1985—1990年和2000—2005年两个增长高峰;2010年后池塘养殖面积减少,海域开放式养殖快速发展,2019年已达到1 601.8 km²,2007—2019年增速为84.9 km²·a⁻¹;空间增长格局表现为由沿海滩涂湿地不断向离岸海域纵深拓展,陆域养殖池塘质心在1990年后持续向区域西北方向迁移;海水养殖空间增长累计导致1 011.7 km²滩涂资源消失,使得滩涂湿地和沼泽湿地的面积比例从期初的53.5%降低为15.2%,区域湿地景观复杂性和异质性增加。研究表明,黄河三角洲区域海水养殖空间增长具有明显的时间波动性,2010年前后黄河三角洲区域海水养殖空间增长的重点从池塘养殖转向海域开放式养殖,陆域池塘养殖空间增长导致沿海滩涂资源大面积减少,促使滩涂不断向外海推进,同时加剧了自然湿地的破碎化,使得区域自然湿地和人工湿地呈现均衡化发展态势。

关键词:黄河三角洲;海水养殖;时空演变;滩涂湿地;景观格局

中图分类号:X171;X714;S967 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2023)02-0291-11 doi: 10.13254/j.jare.2022.0065

Spatio-temporal evolution of mariculture in the Yellow River Delta and its impact on tidal flat wetland resources

WANG Ziyang^{1,2}, WU Xiaoqing^{1,3*}, WANG Xiaojie¹, ZHANG Yuhan⁴

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 4. School of Resource and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract: In this study, to understand the spatio-temporal evolution of mariculture in typical tidal flat wetlands, based on remote sensing and sea area use confirmation data obtained, using GIS spatial analysis methods, we analyzed the space evolution process of pond aquaculture and ocean aquaculture in the Yellow River Delta region from 1985 to 2020. We also investigated its impact on the wetland structure and landscape pattern of tidal flat wetland resources. The results revealed that before 2010, the scale of aquaculture in terrestrial ponds in the region increased, with the maximum area being 1 480.1 km²; two growth peaks were observed in 1985—1990 and 2000—2005. After 2010, the area of pond aquaculture began to decrease, while open ocean aquaculture developed rapidly that the average annual growth rate was 84.9 km²·a⁻¹ from 2007 to 2019, and reached 1 601.8 km² in 2019. The spatial distribution of aquaculture showed a growth from the tidal flat wetlands toward the offshore waters in the land-ocean gradient, and the spatial centroid of aquaculture ponds continued

收稿日期:2022-02-15 录用日期:2022-04-18

作者简介:王紫阳(1998—),男,河南许昌人,硕士研究生,从事GIS与遥感应用研究。E-mail:1011990625@qq.com

*通信作者:吴晓青 E-mail:xqwu@yic.ac.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD0900705)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2019YFD0900705)

<http://www.aed.org.cn>

to migrate to the northwest of the region after 1990. The cumulative increase in mariculture area led to a reduction in 1 011.7 km² of tidal flat resources, which resulted in a decrease in the proportion of area of tidal flat wetlands to that of marsh wetlands from 53.5% at the beginning of the period to 15.2%, and the complexity and heterogeneity of regional wetland landscapes increased. This study concluded that the spatial growth of mariculture in the Yellow River Delta region exhibited obvious temporal fluctuations. Around 2010, the focus of spatial increase shifted from pond aquaculture to open ocean aquaculture. The increase in space for aquaculture in terrestrial ponds has led to a large-scale reduction in coastal tidal flat resources and has promoted continuous outward movement from coastal tidal flats to offshore waters. In addition, it has aggravated the fragmentation of natural wetlands and led to balanced development of human-made and natural wetlands in the Yellow River Delta region.

Keywords: Yellow River Delta; mariculture; spatio-temporal evolution; tidal flat wetland; landscape pattern

黄河三角洲及其莱州湾沿岸拥有广袤的滩涂湿地,为海水养殖业发展提供了良好的资源条件^[1]。过去几十年,随着水产养殖技术的进步,在经济利益驱使下,连片的滩涂湿地被开发建设为养殖池塘,海水养殖面积和产量大幅增加,为地方经济带来巨大收益的同时^[2],也加速了沼泽湿地、滩涂湿地等自然湿地的退化,对区域土地覆被变化、湿地景观格局以及生态环境演变产生明显影响^[3-5]。随着我国生态文明战略的实施,以及严格管控围填海、严格保护滨海湿地等一系列政策措施的出台,滩涂海域保护与开发利用的矛盾越来越突出^[1],陆域池塘养殖发展空间受到明显约束,海水养殖重点转向近岸海域和深远海,并在“蓝色粮仓”战略推动下,养殖模式逐步走向多元化、生态化^[6]。在此背景下,有必要统筹陆、海资源,综合分析海水养殖从陆向海的时空演变过程,揭示不同养殖方式空间布局演变特征及其对滩涂湿地资源的影响,有助于指导海水养殖陆海统筹优化布局,促进滨海湿地资源保护与合理利用。

海水养殖研究涉及学科广泛,早期注重养殖品种繁育、污染物排放^[7]特征研究,后期随着养殖集约化、规模化发展及生态环境问题的产生,地理学、环境生态学领域的研究成果日益增多,海水养殖的时空演变特征^[8-9]、驱动机制^[10-11]、生态压力^[12]及其遥感识别技术^[13]、动态检测方法^[14]和产业发展战略^[15]等方面逐渐受到关注,为海水养殖业健康发展和滨海湿地资源合理开发与利用提供了有益的决策支持。但是,大部分学者是从土地利用/覆被变化、湿地景观格局变化角度间接揭示陆域养殖池塘及其对自然湿地资源和区域生态环境的影响^[9,16],鲜有学者从陆海统筹角度将陆域池塘养殖与近岸海域养殖进行整体分析,揭示海水养殖从陆向海的空间演变过程及其对滨海湿地资源的影响^[17]。本研究基于遥感、海域使用确权数据和相关专项调查资料,揭示黄河三角洲区域 1985—

2020 年间海水养殖陆海空间演变特征,分析其对自然湿地及湿地景观格局变化的影响,以期为海水养殖陆海统筹布局优化和滩涂海域整体性保护提供决策支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东半岛北部渤海沿岸,西起鲁冀交界的漳卫新河河口,东至龙口砣矶岛,地理位置在 117°39′~120°29′E, 36°51′~38°32′N 之间,主要包括渤海湾南岸、黄河三角洲、莱州湾沿岸,行政区涉及滨州、东营、潍坊以及烟台市的莱州、招远、龙口等沿海县(市)(图 1)。研究范围自海岸线向陆延伸 15 km,其中滨州地区向陆再扩展 20 km,向海范围至 -6 m 水深线和离岸 10 km 的最外边界(图 1)。该区域属暖温带大陆性半湿润季风气候,处于河海交汇处,营养物质丰富,发育着多种多样的湿地类型,生态保护重要性突出,是我国落实黄河流域生态保护和高质量发展战略的核心区之一,面临着经济发展与环境保护相互协调发展的重大挑战。

1.2 数据来源与预处理

本研究所采用的 Landsat 系列影像时间跨度为 1985—2020 年,成像时间选取池塘处于养殖期且植被长势较好的 7—8 月,通过地理空间数据云平台下载获取,共计 24 景,在 ENVI 中进行影像预处理,包括辐射校正、大气校正、波段融合、几何校正、图像镶嵌等,其中几何校正误差小于一个像元。谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)平台提供的哨兵 2 号 L2A 级别影像共计 155 景,时间为 2019 年,依据国家海洋科学数据中心的潮汐数据选取低潮影像。辅助解译数据包括高分影像、地形图、海图和 20 世纪 80 年代全国海岸带和海涂资源综合调查资料以及地方土地调查成果。近岸海域养殖数据来自历史时期的海域使



图1 研究区位置

Figure 1 Location of the study area

用确权数据和我国近海海洋综合调查与评价成果,主要包括底播养殖、筏式养殖等开放式养殖用海类型,时间跨度为2007—2019年。所有数据均统一到GCS_WGS_1984坐标系。

1.3 湿地分类与遥感解译

(1) 湿地分类体系

参照《拉姆萨尔公约》《全国湿地资源调查与监测技术规程(试行)》和已有研究成果^[2,10],结合研究区自然环境条件和研究目的,将黄河三角洲区域湿地分为自然湿地和人工湿地两个一级类,前者又分为河流湖泊、沼泽湿地、滩涂湿地、海域湿地等类型,后者包括养殖池塘、盐田、水库坑塘、水田、沟渠。

(2) 湿地类型遥感解译方法

采用不同方法获取研究区湿地类型分布数据,具体流程见图2。其中,养殖池塘、水库坑塘、水田、沟渠和盐田等人工湿地主要采用目视解译的方法获取,结合专项调查资料和实地考察情况进行修正。河流湖泊的分布主要借助谷歌地球引擎,提取每期年内7个月及以上均有水的稳定水面。滩涂湿地的提取:首先从典型岸段的验潮站^[18]潮汐数据出发,获取GEE平台多幅低潮影像,采用水边线集法^[19]获取的平均低潮线作为滩涂下边界,再结合目视解译植被线、围垦大堤线得到滩涂上边界,最后矢量相减获得滩涂范围。海域湿地以滩涂下边界作为其分布的上边界,其下边界使用水深点插值生成的-6 m等深线,并假定这一

水深线在研究时段内保持不变。在eCognition Developer软件中使用面向对象的方法对沼泽湿地进行提取,主要步骤为多尺度分割、特征选取^[14,20]、规则构建和对象提取。将上述湿地解译结果空间叠加,进行人工矢量化修正,以分层提取的方式得到1985—2020年共计8期黄河三角洲区域沿海养殖池塘及各类湿地空间分布情况(图3)。结合高分影像、高清谷歌影像以及实地调查点位结果,进行随机采点验证,解译精度均在88%以上,Kappa系数均大于0.87,满足本研究需要。

1.4 动态检测分析方法

(1) 自然湿地耗减度

自然湿地耗减度(C_{NW})表达的是单位时间内某种自然湿地类型被海水养殖开发利用而实际消耗的程度,其表达式为:

$$C_{NW} = \frac{A_T}{a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_T 是指 T 时间段内某种自然湿地类型被消耗的面积,即该类型湿地转变为海水养殖的面积总和, km^2 ; a 表示起始时刻该湿地类型的面积, km^2 ; T 为研究时段长, a 。

(2) 质心迁移模型

海水养殖空间分布质心的变化可以反映某一时段海水养殖的热点区域,质心位置因某时段主要养殖区域分布的变化而改变,其迁移方向也可反映海水养

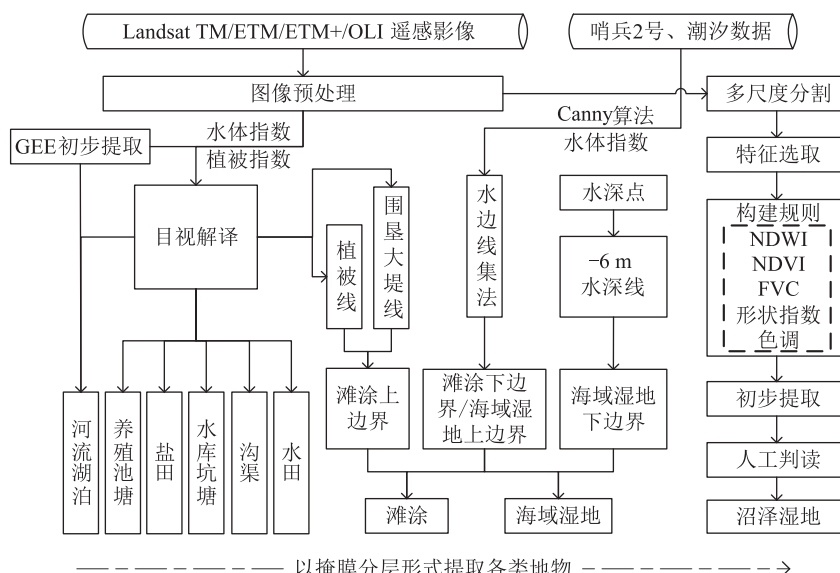


图2 湿地类型遥感解译方法

Figure 2 Remote sensing interpretation method of wetland types

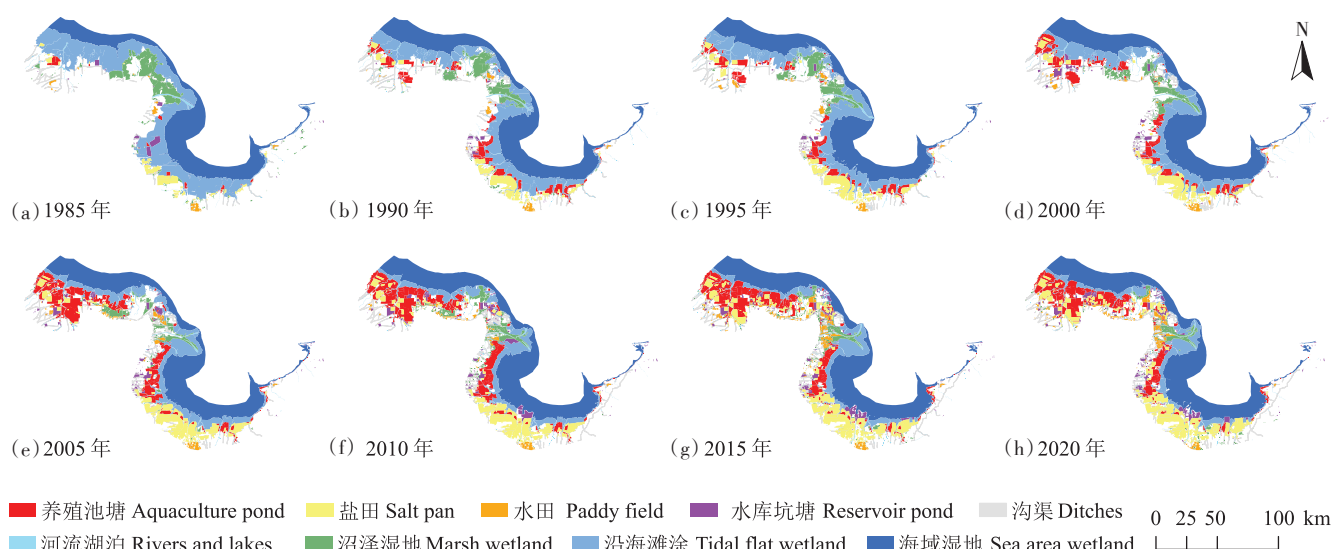


图3 1985—2020年黄河三角洲区域沿海湿地分布格局演变

Figure 3 Spatial distribution pattern of wetlands in the Yellow River Delta during 1985—2020

殖的空间分布情况。

$$\left\{ \begin{array}{l} X_c = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times X_i}{\sum_{i=1}^n C_i} \\ Y_c = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times Y_i}{\sum_{i=1}^n C_i} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: X_c 和 Y_c 分别表示海水养殖质心的经度和纬度; X_i 和 Y_i 是海水养殖第 i 个斑块质心的经度和纬度坐

标; C_i 为该养殖斑块的面积, km^2 ; n 为海水养殖斑块的总数^[21]。

(3) 景观格局指数

选取斑块密度(PD)、聚集度指数(AI)、复杂度指数(LSI)分别描述养殖池塘、自然湿地、人工湿地以及整个湿地景观斑块破碎化程度、聚集程度和形状复杂化程度, 选用香农多样性指数(SHDI)和香农均匀度指数(SHEI)指标分析自然湿地、人工湿地和区域湿地景观类型的多样性和斑块均匀分配程度。各景观指数值利用Fragstas软件计算得到, 指标含义、计算公

式参考相关研究^[22-23]。

2 结果与分析

2.1 陆域池塘养殖演变时空特征

2.1.1 规模结构变化

从图4可以看出,1985—2010年黄河三角洲区域养殖池塘规模持续增长,从1985年的102.5 km²增长到2010年的1 480.1 km²,增长约13.4倍,年均增速为55.1 km²·a⁻¹。之后,养殖池塘规模有所下降,到2020年回落至1 329.2 km²,10年间共减少150.9 km²。

从各时段来看,1985—1990年和1995—2010年间的几个时间段为养殖池塘扩张期,面积增长较快,年均增速最高达到112.3 km²·a⁻¹,2010年以后出现负增长,养殖池塘规模开始萎缩,其余时间段处于相对稳定期,养殖池塘面积变化不大,说明黄河三角洲区域池塘养殖空间增长变化具有较强的时间波动性。

2.1.2 分布格局演变

黄河三角洲海水养殖池塘的建设首先从莱州湾弥河、潍河等河口区域多点兴起,且在随后5年内迅速连接成片,使得区域养殖池塘质心从西北快速转向

东南方向(图5),莱州湾沿岸成为养殖重点区。1990年以后,区域池塘养殖质心开始不断向北偏西方向迁移(图5),滨州-东营北部、东营南部滨海地带的池塘养殖迅速发展,而莱州湾沿岸池塘养殖自2005年后开始萎缩,这主要是受到盐业和港口、临海工业发展的影响。位于区域中部的现代黄河三角洲岸段因受自然保护区建设管理的影响,湿地围塘养殖受到严格限制。

2.2 近岸海域开放式养殖变化特征

基于养殖用海确权数据统计表明,2007—2019年黄河三角洲区域近岸海域开放式养殖大规模增长,由2007年的583.3 km²增长至2019年的1 601.8 km²,超过了陆域池塘养殖最大规模,增长了约1.7倍,年均增加84.9 km²(表1)。其中,2007—2010年和2010—2014年两个时段的增长速度分别达到166.8 km²·a⁻¹和99.6 km²·a⁻¹,均大于陆域池塘养殖最高增速,说明2007年以后海域开放式养殖成为黄河三角洲区域海水养殖空间增长的重点。

从空间分布(图6)来看,研究区海域开放式养殖主要集中在莱州湾离岸10 km以内海域,并且随时间变化表现出从近岸滩涂不断向离岸深水海域纵深拓

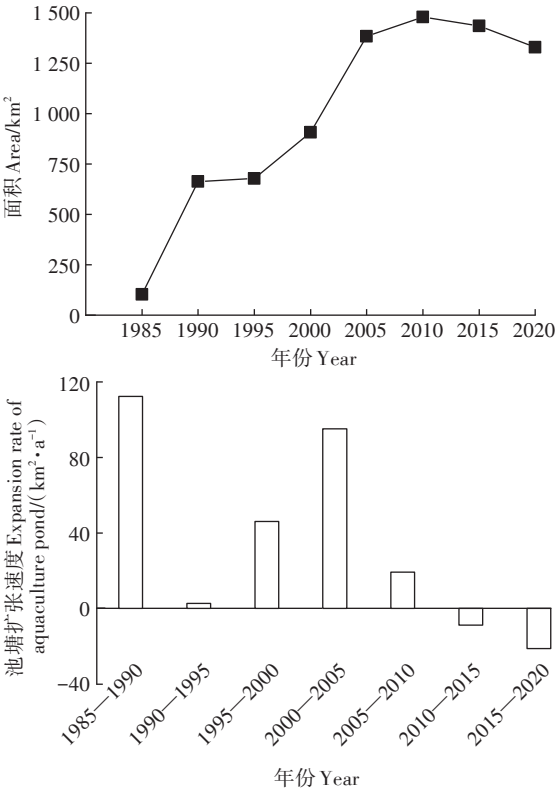


图4 1985—2020黄河三角洲陆域池塘养殖规模及增长速度变化
Figure 4 Changes in the scale and growth rate of pond culture in the Yellow River Delta during 1985—2020

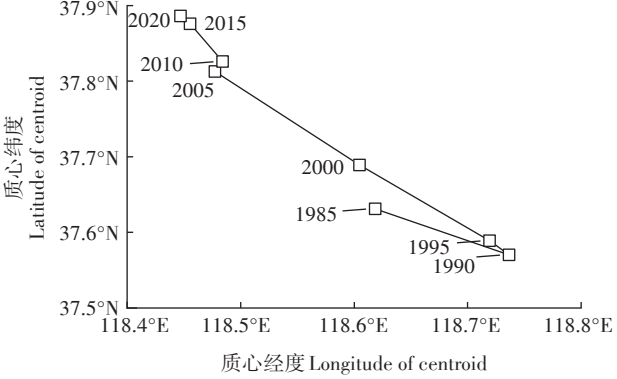


图5 1985—2020黄河三角洲区域养殖池塘分布质心迁移轨迹
Figure 5 Migration trajectory of the centroid of pond culture in the Yellow River Delta region during 1985—2020

表1 黄河三角洲区域开放式养殖规模及增长速度变化
Table 1 Changes in the scale and growth rate of open aquaculture in the Yellow River Delta region

年份 Year	离岸不同距离内开放式养殖面积占比 Proportion of open aquaculture area in different distance offshore/%			面积 Area/km ²	年变化速率 Annual rate of change/ (km ² ·a ⁻¹)
	3 km	5 km	>10 km		
2007	46.3	24.5	14.5	583.3	—
2010	37.9	20.7	13.1	1 083.6	166.8
2014	25.0	16.6	30.3	1 481.8	99.6
2019	16.4	11.3	46.6	1 601.8	24.0

展的发展趋势。海湾西部海域养殖斑块面积较大,以底播养殖为主;东部海域养殖斑块规模小而聚集,筏式养殖方式具有一定优势。

2.3 海水养殖时空演变对湿地资源的影响

2.3.1 对湿地资源结构的影响

养殖池塘、盐田等湿地围堰建设引发区域土地利

用/覆被的快速变化,使得湿地资源类型结构发生明显改变。由图7可知,1985—2020年,黄河三角洲沿海滩涂由期初的3 588.2 km²下降至1 004.8 km²,年均减少73.8 km²;沼泽湿地由期初的808.5 km²减少到期末的291.2 km²,年均减少14.8 km²,两者合计占区域湿地的比例从53.5%降低至15.2%,其资源优势地位

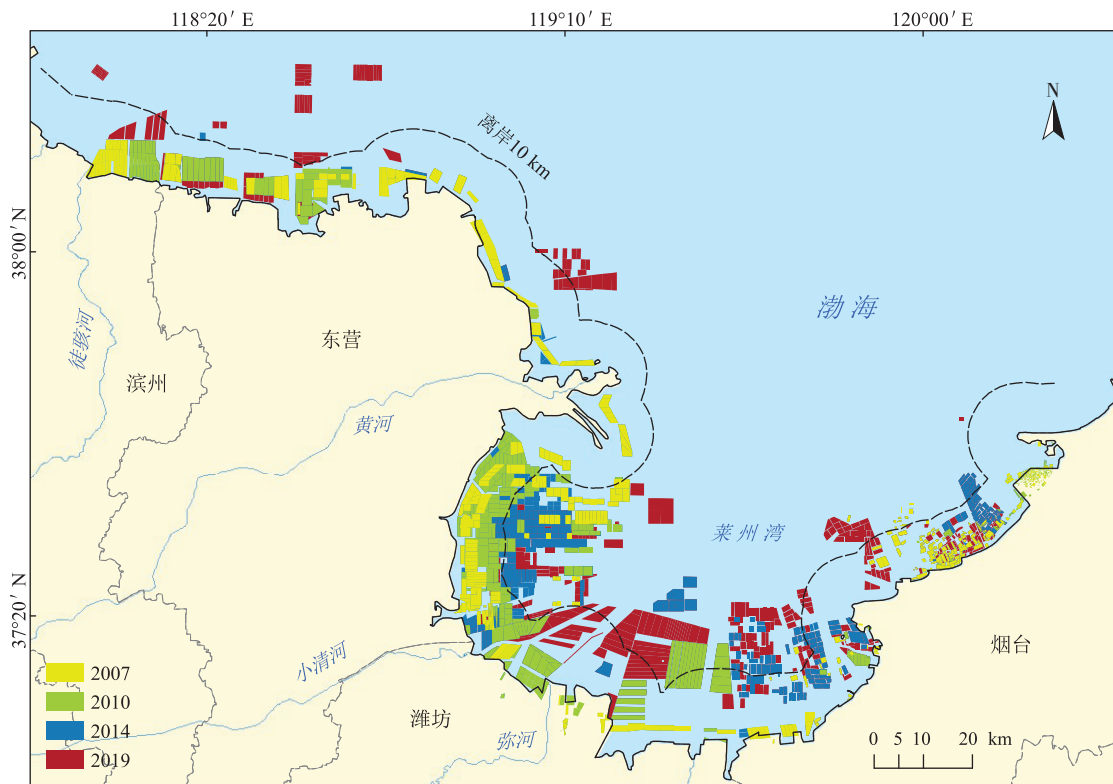


图6 海域开放式养殖空间分布格局

Figure 6 Spatial distribution pattern of ocean aquaculture

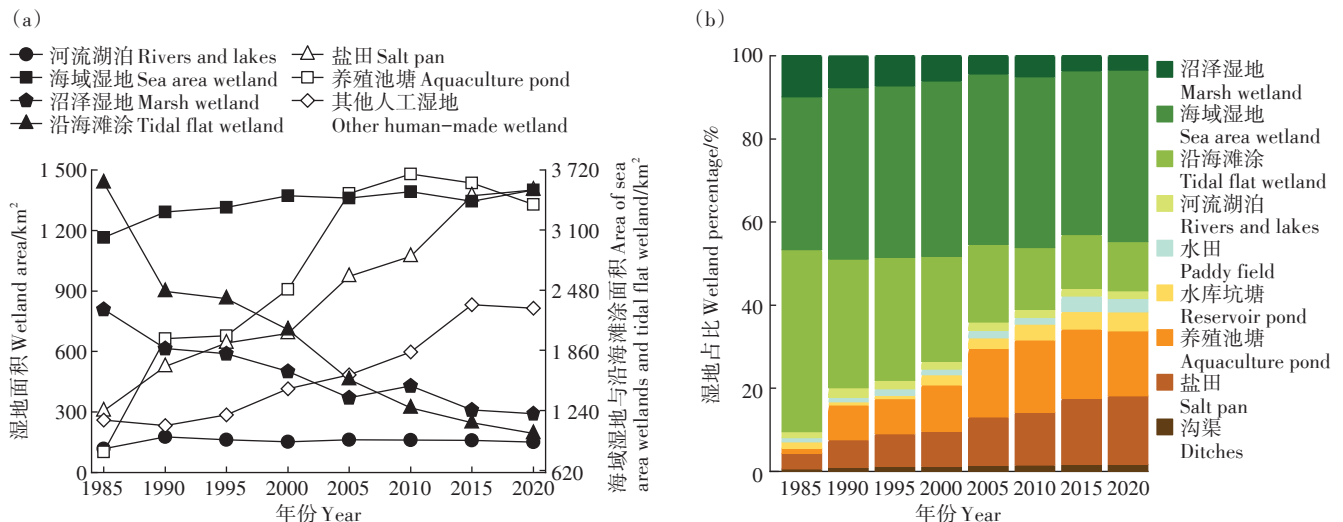


图7 1985—2020年黄河三角洲区域各类湿地面积(a)及其比例变化(b)

Figure 7 Changes in the area(a) and proportion(b) of various wetlands in the Yellow River Delta during 1985—2020

降低。而盐田、水田和水库坑塘等其他人工湿地面积明显增加,特别是盐田,35年间增加了1 094.5 km²,与养殖池塘合计占区域湿地的比例由4.9%上升至32.1%,人工湿地的地位日益突出。

2.3.2 对湿地景观格局变化的影响

自然湿地斑块和区域湿地景观总体上均呈现出斑块密度和复杂度上升而聚集度降低的变化趋势(图8),说明自然湿地在区域湿地景观中仍占主导地位,但是过去近35年来自然湿地却不断破碎化,斑块形态变得日益复杂化。人工湿地类型的斑块密度和复杂度总体上也表现出增加趋势,但是其聚集度变化情况在2010年以前与自然湿地相反,呈逐步上升状态(图8),说明该时段包括养殖池塘在内的人工湿地斑块呈现聚集性增长状态。区域湿地景观香农多样性指数(SHDI)和香农均匀度指数(SHEI)均呈现上升趋势,特别是1985—1990年间增幅明显(图8),说明区域湿地景观复杂性和异质性增加,湿地种类日益多样化,自然湿地优势地位降低,自然湿地和人工湿地呈现均衡化发展。

2.3.3 对自然湿地的占用情况

海水养殖空间增长使得沿海滩涂、沼泽湿地等主要自然湿地类型面积锐减(图9)。研究发现,2005年以前研究区以池塘养殖占用沿海滩涂为主,自然湿地耗减度达到0.56%;不同时段年均耗减量有所不同,其中1985—1990年沿海滩涂耗减面积最大,平均每年有66 km²的沿海滩涂资源被占用;整个研究时段内共计1 077.4 km²的陆域自然湿地被养殖池塘占用,其中1 011.7 km²属于沿海滩涂。2005年以后,海域湿地的耗减量逐渐超过滩涂湿地,其中2005—2010年和2010—2020年两个时间段占用海域面积分别达到777.1 km²和584.6 km²,占用消耗形式主要为底播增养殖、筏架养殖等开放式养殖,海域湿地自然属性未发生明显改变。

被海水养殖占用消耗的自然湿地在空间分布上比较集中,主要位于滨州至东营北部沿海和莱州湾湾顶地区(图10)。其中,滨州部分滩涂湿地养殖开发沿河流向陆纵深拓展较远。因受到自然保护区的管控,海水养殖对沼泽湿地的占用较少,主要位于保护

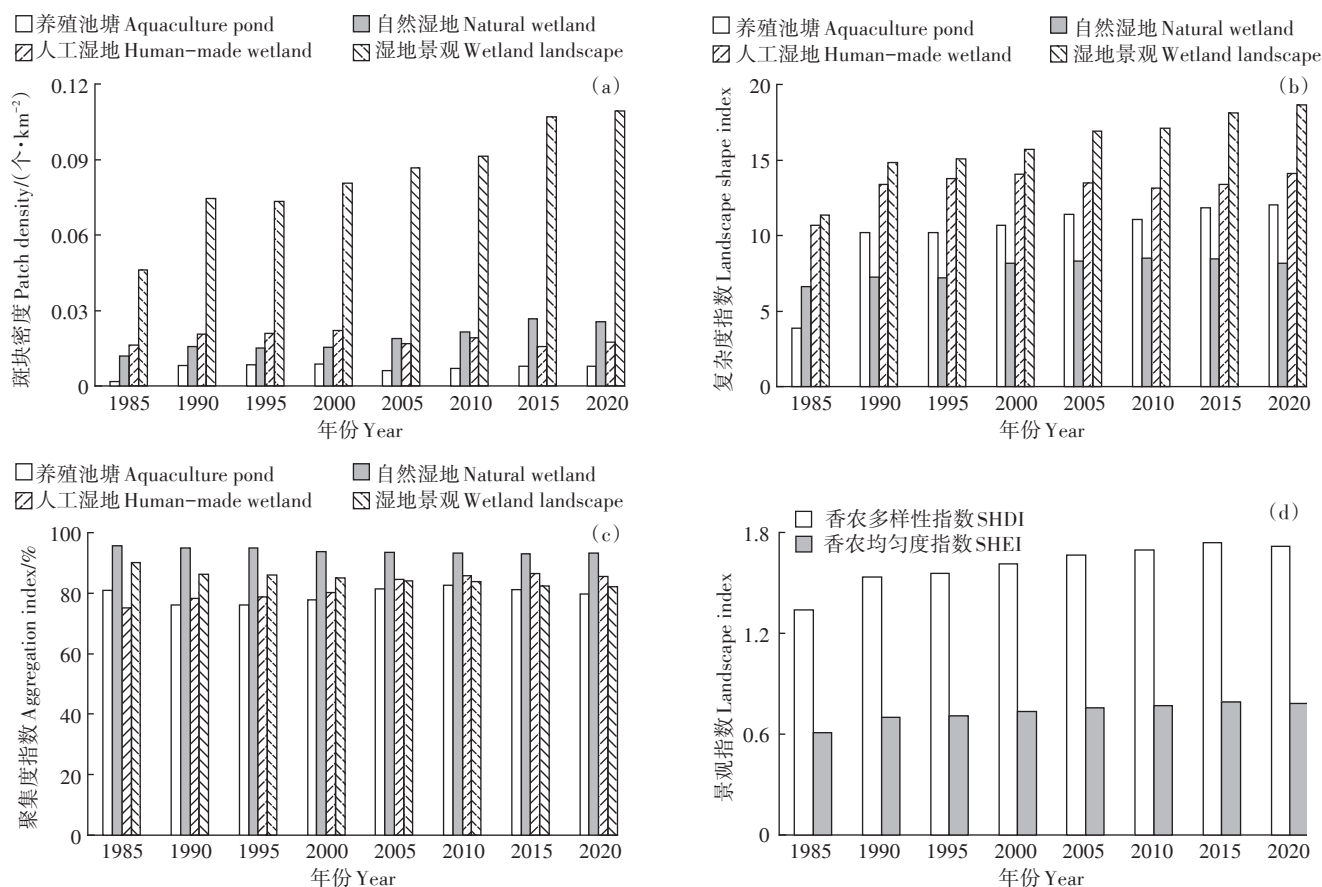


图8 1985—2020年间黄河三角洲区域不同湿地类型景观指数变化

Figure 8 Changes in landscape indices of different wetland types in the Yellow River Delta region during 1985—2020

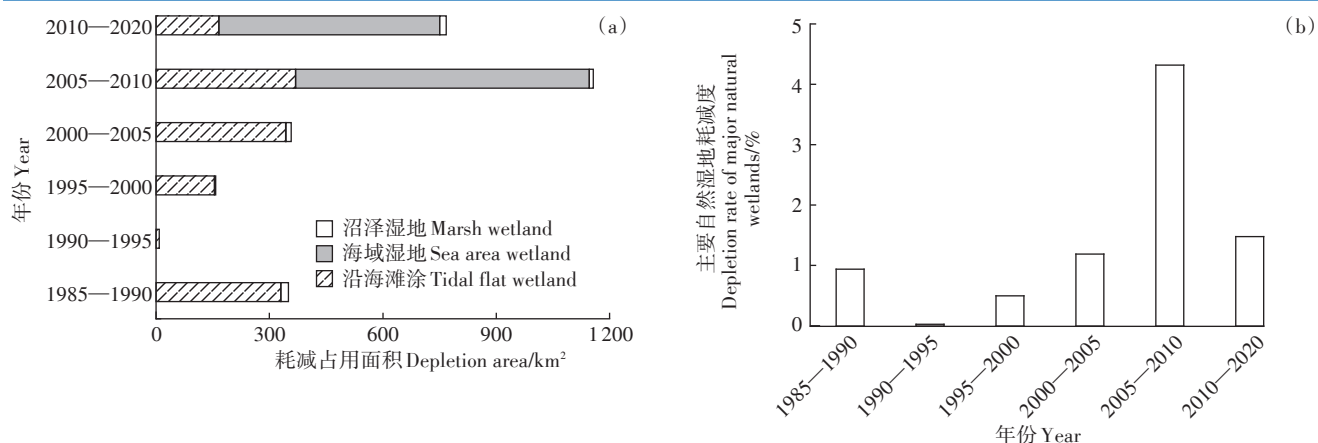


图9 不同时段各类自然湿地耗减、占用面积(a)和速度变化(b)

Figure 9 Changes in the depletion area(a) and rate(b) of various natural wetlands in different periods

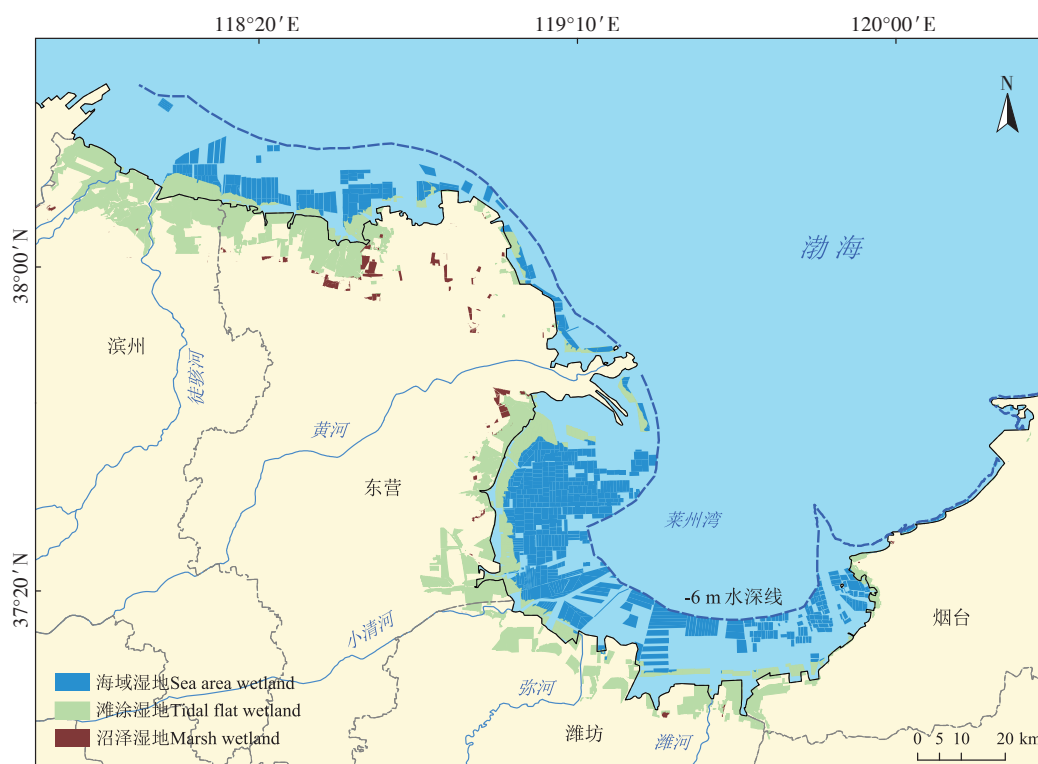


图10 1985—2020年海水养殖对主要自然湿地的累积占用情况

Figure 10 Occupation of main natural wetlands by marine aquaculture during 1985—2020

区的边缘,毗邻已开发利用的滩涂区域。海域湿地被养殖占用的范围较广,对莱州湾海域湿地空间的使用量已超过其面积半数。

2.3.4 对盐田格局演变的影响

盐田也是研究区重要的人工湿地,海水养殖空间增长对盐田规模变化、转入转出特征和空间分布也产生一定影响。由表2可知,整个研究时段累计有370.2 km²的养殖池塘转化为盐田,占盐田面积增量

的29%,主要发生在2000—2005年和2010—2015年两个时间段,转入面积分别达到81.9 km²和177.7 km²,在同时段盐田面积增量中的占比大幅提升,在一定程度上减缓了盐田开发对自然湿地的占用损耗。2015年以后,由于池塘养殖占用滩涂湿地的增长方式受到越来越严格的限制,盐田等其他利用类型向养殖池塘的转换有所增加。

空间分布上,新增盐田与养殖池塘交错分布,主

表2 不同时段盐田面积变化及其转入转出情况

Table 2 Changes in the area of salt pans in different periods and their transfer in and out

时间 Time	盐田转入 Transfer into salt pan				盐田转出 Salt pan transfer out	
	自然湿地 Natural wetland		养殖池塘 Aquaculture pond		养殖池塘面积 Aquaculture pond area/km ²	占比 Percentage/%
	面积 Area/km ²	占比 Percentage/%	面积 Area/km ²	占比 Percentage/%		
1985—1990	77.6	25.4	0.4	0.1	8.0	2.6
1990—1995	24.3	4.6	14.7	2.8	0	0
1995—2000	33.0	5.1	10.8	1.7	3.8	0.6
2000—2005	96.4	14.0	81.9	11.9	4.1	0.6
2005—2010	33.9	3.5	56.1	5.8	4.9	0.5
2010—2015	75.5	7.0	177.7	16.6	1.8	0.2
2015—2020	8.0	0.6	28.6	2.1	8.5	0.6

注:表格中占比均以时间段初的总盐田面积作为分母。

Note:The proportions in the table are based on the total area of salt pans at the beginning of the time period as the denominator.

要位于莱州湾湾顶以及滨州主要河流两侧。其中,莱州湾南岸的小清河、弥河、潍河等河口海域是最早开展池塘养殖的地区,也是首先发生养殖池塘向盐田转换的区域,这与莱州湾沿岸卤水资源丰富、盐场规模聚集以及盐化工产业发达有密切关系。

3 讨论

本研究结果显示,过去近35年间黄河三角洲区域海水养殖时空变化呈现出明显的波动性,养殖规模增长速度、空间分布重心及导致规模增长的养殖方式在不同时段表现出明显差异,这一变化趋势与全国海水养殖热潮阶段性变化^[7,24]和已有研究结果^[25]基本一致。国家鼓励养殖发展的相关政策、养殖技术的进步和湿地生态保护措施是重要的驱动和影响因素^[15]。1985—2000年,伴随着苗种引进、人工育苗及养殖技术的发展,该地区对虾、三疣梭子蟹、文蛤等虾、蟹、贝类养殖产业获得快速发展。不同的是,2000年以后,池塘海参养殖技术获得突破,黄河入海口南部的原有池塘被大规模改造利用,发展海参养殖业。2010年以后,国家严格保护滨海湿地和管控围填海的政策起到了明显成效^[26],池塘养殖发展空间受到很大限制,其养殖规模开始萎缩,而近岸海域生态化、集约化的开放式养殖获得快速发展。若要进一步明晰黄河三角洲区域海水养殖阶段性变化特征及其独特性,还需要获取长时间连续序列的海域开放式养殖分布数据与池塘养殖遥感监测数据进行叠加分析,并结合地区海水养殖产量、面积、产值等渔业统计指标进行较为精准的阶段划分。

海水养殖业发展对黄河三角洲地区滩涂湿地资源的影响不仅仅表现为对自然湿地的占用,引起区域

湿地资源结构组成、空间分布和区域景观格局的变化^[27-29],还会产生长期生态效应和综合影响^[30]。众多研究表明,滩涂围垦养殖破坏了湿地的自然演替过程,增加了环境污染压力,使得区域生物多样性减少,滨海湿地生态系统退化和生态服务功能下降^[31-33]。开放式养殖方式虽然未明显改变海域的自然属性,但高密度养殖和不合理的空间布局,也会破坏海底生物群落结构,带来水质富营养化等生态环境问题^[34]。此外,海水养殖业的发展也会与盐田开发、油田开采、港口和城镇建设等其他湿地开发利用与保护活动产生明显的空间竞争和冲突,共同推动区域土地利用和湿地景观格局发生快速变化,给黄河三角洲区域滨海湿地生态保护与管理带来挑战^[35]。因此有必要从人地关系地域系统角度,综合分析包括不同海水养殖方式在内的各类人为活动对滩涂湿地的综合影响和累积生态效应。

4 结论

本研究针对我国典型滩涂湿地区域,基于遥感、地理信息系统和海域使用确权数据,客观再现了1985—2020年黄河三角洲地区海水养殖(包括池塘养殖和开放式养殖)的空间演变过程,揭示了海水养殖对区域湿地资源结构和景观格局变化的影响,主要结论如下:

(1)海水养殖空间规模持续增长,但不同时段表现出明显的波动性。2010年以前,陆域池塘养殖规模持续增长,形成1985—1990年和2000—2005年两个扩张高峰,2010年养殖面积最高达到1 480.1 km²;2010年以后池塘养殖规模萎缩,而近岸海域开放式养殖在2007—2019年间大面积增加,年均增长84.9

km², 远超池塘养殖平均增速。

(2)海水养殖空间布局总体上呈现从沿海滩涂不断向离岸深水海域纵深拓展的发展态势。其中,池塘养殖从莱州湾入海河口沿岸多点兴起,快速连接成片,重心逐渐向区域西北方向迁移,最终形成滨州—东营北部沿海滩涂和东营南部滨海地带两大重点区;海域开放式养殖的快速发展使得海水养殖空间增长重点重新转回莱州湾海域。

(3)海水养殖时空演变促使区域湿地资源结构和景观格局发生明显改变。近35年间共有1 077.4 km²的陆域自然湿地被养殖池塘占用,导致1 011.7 km²的沿海滩涂资源消失,且主要发生在2005年以前;2005年以后,池塘养殖发展空间受限,开放式养殖对海域湿地的占用量迅速增加;同时,海水养殖空间扩展使得区域自然湿地优势地位降低,加剧了区域自然湿地的破碎化和湿地景观的复杂性、异质性,促使区域人工湿地和自然湿地呈现均衡化发展态势。

黄河三角洲区域滩涂、海域湿地的养殖空间已基本饱和,海水养殖未来发展需要寻求生态保护优先前提下的高质量发展,下一步应重点开展滩涂湿地海水养殖的生态适宜性分析,并实现多目标情景下的陆海空间统筹布局与优化,为海水养殖产业健康发展和滩涂湿地整体性保护提供决策支持。

参考文献:

- [1] 宋守旺. 黄河三角洲保护区自然资源的开发与保护[J]. 环境与发展, 2019, 31(1): 188–189. SONG S W. Development and protection of natural resources in the Yellow River Delta protected area[J]. *Environment and Development*, 2019, 31(1): 188–189.
- [2] 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. REN L L, LI Y Z, YU M, et al. Evolution of artificial wetlands in the Yellow River Delta and related driving factors during 1984–2015[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 493–502.
- [3] 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. KONG M, CAO H M, GAO X G, et al. Remote sensing monitoring and evaluation of land space change in the Yellow River Delta nature reserve[J]. *Marine Environmental Science*, 2021, 40(2): 272–276.
- [4] 秦鹏, 张志辉, 刘庆. 黄河三角洲滨海湿地生态安全评价[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(8): 145–153. QIN P, ZHANG Z H, LIU Q. Ecological security assessment of coastal wetland in the Yellow River Delta[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(8): 145–153.
- [5] 刘玉斌, 王晓利, 侯西勇, 等. 四个时期和模拟情景下2025年黄河三角洲的土地利用格局和生态系统服务价值评估[J]. 湿地科学, 2020, 18(4): 424–436. LIU Y B, WANG X L, HOU X Y, et al. Land use pattern and evaluation of ecosystem service values of Yellow River Delta for 4 periods and in 2025 under simulation scenarios[J]. *Wetland Science*, 2020, 18(4): 424–436.
- [6] 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. YANG H S. Development ideas and implementation approaches of blue granary scientific and technological innovation in China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(1): 97–104.
- [7] HANDY R D, POXTON M G. Nitrogen pollution in mariculture: Toxicity and excretion of nitrogenous compounds by marine fish[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 1993, 3(3): 205–241.
- [8] 孙晓宇, 苏奋振, 吕婷婷, 等. 黄河三角洲湿地资源时空变化分析[J]. 资源科学, 2011, 33(12): 2277–2284. SUN X Y, SU F Z, LÜ T T, et al. Analysis of temporal–spatial changes in wetlands over the Yellow River estuary[J]. *Resources Science*, 2011, 33(12): 2277–2284.
- [9] 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.
- [10] 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. LI D H, PAN K H, CHEN L L. Evolution and development of saltwater aquaculture policy since the reform in China[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2008, 26(3): 57–61.
- [11] JACQUET J, PAULY D, AINLEY D, et al. Seafood stewardship in crisis[J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 28–29.
- [12] 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.
- [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] 栗云召, 于君宝, 韩广轩, 等. 黄河三角洲自然湿地动态演变及其驱动因子[J]. 生态学报, 2011, 30(7): 1535–1541. LI Y Z, YU J B, HAN G X, et al. Dynamic evolution of natural wetlands in Yellow River Delta and related driving factors[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(7): 1535–1541.
- [15] 韩增林, 朱文超, 李博. 中国海洋渔业经济韧性效率协同演化研究[J]. 地理研究, 2022, 41(2): 406–419. HAN Z L, ZHU W C, LI B. Synergistic analysis of economic resilience and efficiency of marine fishery in China[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(2): 406–419.
- [16] 陈琳, 任春颖, 王宗明, 等. 黄河三角洲滨海地区人类干扰活动用地动态遥感监测及分析[J]. 湿地科学, 2017, 15(4): 613–621. CHEN L, REN C Y, WANG Z M, et al. Remote sensing monitoring and analysis on dynamics of land use of human disturbances in coastal area of the Yellow River Delta[J]. *Wetland Science*, 2017, 15(4): 613–621.
- [17] 贺义雄, 宋伟鸣, 杨帆. 长三角海洋资源环境一体化治理策略研究——基于海洋生态系统服务价值影响分析[J]. 海洋科学, 2021, 45(6): 63–78. HE Y X, SONG W M, YANG F. Key areas for integrated governance of marine resources and environment in the

- Changjiang River Delta: Results from the impact analysis of the value of marine ecosystem service[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(6): 63–78.
- [18] 韩倩倩, 牛振国, 吴孟泉, 等. 基于潮位校正的中国潮间带遥感监测及变化[J]. 科学通报, 2019, 64(4): 456–473. HAN Q Q, NIU Z G, WU M Q, et al. Remote-sensing monitoring and analysis of China intertidal zone changes based on tidal correction[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(4): 456–473.
- [19] 张媛媛, 高志强, 宋德彬, 等. 江苏近岸辐射沙洲潮滩变化遥感监测研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(8): 1938–1946. ZHANG Y Y, GAO Z Q, SONG D B, et al. Remote sensing monitoring of tidal flat changes near the radial sand ridges in Jiangsu coastal zone[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(8): 1938–1946.
- [20] 李慧颖, 李晓燕, 贾明明, 等. 2013年三江平原北部洪水对沼泽湿地景观的影响[J]. 湿地科学, 2015, 13(3): 344–349. LI H Y, LI X Y, JIA M M, et al. Impacts of summer flood occurred in north of Sanjiang Plain in 2013 on landscape of marshes[J]. *Wetland Science*, 2015, 13(3): 344–349.
- [21] 林辉, 卢霞, 王晓新, 等. 江苏近海紫菜养殖区的空间扩张模式研究[J]. 海洋通报, 2021, 40(2): 206–216. LIN H, LU X, WANG X X, et al. Research on spatial expansion mode of laver farming area in Jiangsu Province[J]. *Marine Science Bulletin*, 2021, 40(2): 206–216.
- [22] 张党玉, 孙志高, 陈冰冰, 等. 近十年来福建兴化湾湿地景观格局及其驱动力分析[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2020, 36(1): 104–116. ZHANG D Y, SUN Z G, CHEN B B, et al. Variations of wetland landscape pattern in the Xinghua Bay of Fujian Province in recent ten years and its driving factors[J]. *Journal of Fujian Normal University(Natural Science Edition)*, 2020, 36(1): 104–116.
- [23] 陈思明. 三沙湾海水养殖区时空动态变化及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 1137–1145. CHEN S M. Spatiotemporal dynamics of mariculture area in Sansha Bay and its driving factors[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(4): 1137–1145.
- [24] 李大海, 潘克厚, 韩立民. 我国海水养殖业的发展历程[J]. 中国渔业经济, 2005(6): 11–13. LI D H, PAN K H, HAN L M. The development history of marine aquaculture in China[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2005(6): 11–13.
- [25] 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. SONG Y, LI G Q, WU J, et al. Spatial variation of aquaculture ponds in the Bohai Rim region during 1989—2019[J]. *Marine Science Bulletin*, 2021, 40(1): 92–100.
- [26] 王琪, 田莹莹. 我国围填海管控的政策演进、现实困境及优化措施[J]. 环境保护, 2019, 47(7): 26–32. WANG Q, TIAN Y Y. Policy evolution, realistic dilemma and optimization measures for China's reclamation control[J]. *Environmental Protection*, 2019, 47(7): 26–32.
- [27] 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. HUANG J T, ZHENG W, WAN N X, et al. Characteristics of changes occurring in the landscape patterns in the coastal wetlands of the Laizhou Bay in the last 30 years[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(2): 76–90.
- [28] 陈琳, 任春颖, 王灿, 等. 6个时期黄河三角洲滨海湿地动态研究[J]. 湿地科学, 2017, 15(2): 179–186. CHEN L, REN C Y, WANG C, et al. Dynamic of coastal wetlands of the Yellow River Delta for 6 periods[J]. *Wetland Science*, 2017, 15(2): 179–186.
- [29] 王永丽, 于家宝, 董洪芳, 等. 黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析[J]. 地理科学, 2012, 32(6): 717–724. WANG Y L, YU J B, DONG H F, et al. Spatial evolution of landscape pattern of coastal wetlands in Yellow River Delta[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(6): 717–724.
- [30] JAYANTHI M, THIRUMURTHY S, SAMYNATHAN M, et al. Assessment of land and water ecosystems capability to support aquaculture expansion in climate-vulnerable regions using analytical hierarchy process based geospatial analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 270: 110952.
- [31] MITSCH W J, GOSSELINK J G. The value of wetlands: Importance of scale and landscape setting[J]. *Ecological Economics*, 2000, 35(1): 25–33.
- [32] 苏艺, 刘佳, 韩晓庆, 等. 海水养殖对海洋生态环境的影响——以河北省昌黎县为例[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(3): 306–309. SUN Y, LIU J, HAN X Q, et al. The impact of mariculture on the marine ecological environment: Taking Changli County, Hebei Province as an example[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 40(3): 306–309.
- [33] 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. CAO Q, HUANG J F, LUO M, et al. Effect of conversion of coastal marsh into aquaculture ponds on ecosystem carbon stocks in the Min River estuary[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(3): 1335–1345.
- [34] 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. JIA J, CUI Z G, TANG X S, et al. Analysis of purification effects and influences of seawater constructed wetland under different hydraulic conditions[J]. *Fishery Modernization*, 2021, 48(5): 26–35.
- [35] 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]. *Science of the Total Environment*, 2021, 787: 147644.