#### DOI: 10.20103/j.stxb.202211203355

尹小岚,谭程月,柯樱海,周德民.1973—2020年黄河三角洲滨海盐沼湿地景观格局演化模式和驱动因素.生态学报,2024,44(1):67-80. Yin X L, Tan C Y, Ke Y H, Zhou D M.Evolution and driving factors of salt marsh wetland landscape pattern in the Yellow River Delta in 1973—2020.Acta Ecologica Sinica,2024,44(1):67-80.

# 1973—2020年黄河三角洲滨海盐沼湿地景观格局演化 模式和驱动因素

**尹**小岚<sup>1,2,3</sup>,谭程月<sup>2</sup>,柯樱海<sup>1,2,3,\*</sup>,周德民<sup>1,2,3</sup>

1 首都师范大学城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地,北京 100048

2 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048

3 首都师范大学水资源安全北京实验室,北京 100048

摘要:明晰滨海盐沼湿地景观格局演化模式和驱动因素,有助于制定合理的盐沼湿地修复策略、维护区域生态系统健康和可持续发展。以黄河三角洲滨海盐沼湿地为例,基于 Landsat 系列卫星影像获取 1973—2020 年共十个时期土地利用/覆被数据,得出盐沼湿地时空变化及其与周边土地利用/覆被的相互转化;利用改进的景观格局状态与演化识别模型(SEDMS),分析盐沼湿地景观格局演化模式,并利用地理探测器探究其空间分异驱动因素。结果表明:(1)1973—2020 年,盐沼湿地面积减少了 252.35 km<sup>2</sup>,空间范围总体向外海迁移且趋于集中。盐沼湿地转出类型主要为草地、养殖池/盐田和耕地,转入类型主要为滩涂未利用地和水体。(2)盐沼湿地景观格局演化模式呈明显的阶段性特征:1973—1995 年为动荡期,演化模式以消失和破碎为主导;1995—2010 为过渡期,格局演化模式逐渐由消失和破碎为主导转变为扩张为主导;2010 年后为稳定期,格局发生演化的区域较少,总体以新增和扩张为主。(3)36%的盐沼湿地出现了多次格局演变模式的转变,滩涂未利用地、耕地对于景观格局演化频数的影响最为显著,人工表面、养殖池/盐田和道路堤坝的建设导致了盐沼湿地的破碎和消失。 关键词:盐沼湿地;遥感;黄河三角洲;景观格局演化模式;地理探测器

# Evolution and driving factors of salt marsh wetland landscape pattern in the Yellow River Delta in 1973—2020

YIN Xiaolan<sup>1,2,3</sup>, TAN Chengyue<sup>2</sup>, KE Yinghai<sup>1,2,3,\*</sup>, ZHOU Demin<sup>1,2,3</sup>

1 State Key Laboratory Cultivation Base of Urban Environment Process and Simulation, Capital Normal University, Beijing 100048, China

2 Beijing Laboratory of Water Resources Security, Capital Normal University, Beijing 100048, China

3 College of Resource of Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract: Understanding the dynamics and driving factors of the coastal salt marsh landscape patterns is critical for effective wetland restoration and sustainable development of the regional ecosystem. This study aims to investigate the spatiotemporal evolution and the driving factors of the salt marsh landscape patterns in the coastal wetlands in the Yellow River Delta. First, we obtained the land use/cover maps during ten periods from 1973 to 2020 based on Landsat series satellite images, based on which we analyzed the spatiotemporal variations of the spatial extent of salt marshes and the conversion between salt marshes and other land use/cover types. We then adopted an improved State-and-Evolution Detection models (SEDMS) to analyze the landscape pattern evolution characteristics of salt marshes and utilized the geographic detector to analyze the driving factors of the spatial variation. The results showed that: (1) from 1973 to 2020, the area of salt marshes decreased

收稿日期:2022-11-20; 网络出版日期:2023-09-27

基金项目:国家自然科学基金项目(42071396)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yke@ cnu.edu.cn

by 252.35 km<sup>2</sup>, and the spatial extent moved seaward and tended to be concentrated. The lost salt marshes were mainly converted to grassland, aquaculture ponds, salt pans, and cultivated lands, while the restored salt marshes were mainly converted from tidal flats and unutilized land, water bodies. (2) The evolution of the salt marsh landscape showed obvious three stages: the unstable period from 1973 to 1995, during which the landscape pattern change types were dominated by disappearance and fragmentation; the transitional period from 1995 to 2010, during which the landscape pattern change types gradually transitioned from disappearance/fragmentation-dominated to expansion-dominated; the stable period after 2010, during which the area with landscape pattern change were relatively small, and the landscape pattern change types were dominated by emergence and expansion. (3) Nearly 36% of the salt marsh wetlands experienced multiple alterations in landscape pattern changes and the artificial surface, aquaculture ponds/salt pans, road and dams led to the fragmentation and disappearance of salt marsh wetlands.

Key Words: salt marsh wetland; remote sensing; Yellow River Delta; landscape pattern evolution model; geographic detector

滨海盐沼湿地位于海陆过渡区域,是具有较高草本或低灌木植被覆盖度的一种湿地生态系统<sup>[1]</sup>;其生产 力高,生物多样性丰富,是"蓝碳"生态系统的重要组成部分<sup>[2]</sup>,在应对全球气候变化、推动区域可持续发展等 方面发挥着重要的作用<sup>[3]</sup>。近年来,在自然与人为因素的共同影响下,全球范围内的滨海盐沼湿地正面临面 积损失和功能退化的风险<sup>[4]</sup>,对盐沼湿地的监测、保护和修复成为全球关注的热点问题<sup>[5]</sup>。黄河三角洲拥有 我国暖温带最完整、最年轻的滨海湿地生态系统,是黄河流域生态系统健康的"晴雨表",分布着大量的盐沼 湿地,具有突出的保护和科学研究价值。我国于 2021 年发布的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》 中,将保护修复黄河三角洲湿地作为推进下游生态治理的重要工作<sup>[6]</sup>。近五十年来,黄河尾闾河段先后于 1976 年、1996 年、2007 年发生三次改变<sup>[7]</sup>;2002 年起黄河实施的调水调沙工程增加了黄河人海水沙量,补充 了淡水资源,减轻了由于黄河断流造成的三角洲湿地生态环境恶化<sup>[8]</sup>;而孤东油田的建设和耕地、养殖池/盐 田的开发又改变了湿地的水文和生物连通<sup>[9]</sup>。多重影响下的黄河三角洲具有显著的复杂性和特殊性,正确 认识黄河三角洲盐沼湿地景观格局演化及其驱动机制,对于理解滨海湿地生态过程并制定合理的保护、恢复 策略,推动黄河流域高质量发展具有重要的理论意义与应用价值。

当前,国内外许多学者围绕滨海湿地时空演变开展了大量工作,这些研究涉及滨海湿地的动态监测、景观 格局、景观演变驱动力分析等方面。如,卢晓宁等通过分析黄河三角洲人工湿地和自然湿地斑块数量、斑块面 积等景观指数的变化,探究了研究区湿地的景观破碎化趋势<sup>[10]</sup>;Zhou 等选择斑块数量、斑块密度、香农多样 性指数等 10 个景观指数分析了黄河三角洲湿地景观格局变化<sup>[11]</sup>;Wei 等通过转移矩阵和重心移动研究了 2015—2021 年黄河三角洲自然和人工湿地的转化特征<sup>[12]</sup>;Zhang 等选取 6 个景观指数,分析了 1980—2018 年 黄河三角洲自然湿地和人工湿地景观的破碎性、连通性和多样性等特征<sup>[13]</sup>;任玲玲等基于 1984—2015 年 7 期 Landsat 影像,选择破碎程度、形状特征、多样性、均匀性的景观指数对黄河三角洲人工湿地景观特征进行分 析<sup>[14]</sup>。目前,滨海湿地时空格局演变分析普遍应用一系列景观指数来量化各时期湿地景观的形状、破碎度、 聚集度等,并通过各时期景观指数值的差异来分析景观格局演变特征;虽然能够体现湿地景观格局的整体变 化趋势,但难以反映变化的空间分布规律和过程机制<sup>[15]</sup>。另外,在研究区内,多种景观格局变化类型往往会 同时出现,如在不同空间位置上分别出现了破碎、扩张、消失等类型,而传统方法仅将每种变化类型归纳为一 种变化(如破碎、或扩张)<sup>[16—17]</sup>,无法全面体现景观格局多种变化模式<sup>[18]</sup>。

为应对上述不足,近年来提出了状态与演化识别模型(State-and-Evolution Detection models, SEDMS)<sup>[18]</sup>, 是一种基于空间形态学规则识别景观生态过程的方法。不同于单一景观指数,SEDMS 模型利用多个景观指数的组合设置阈值,在景观单元(给定窗口内的一组土地利用/覆被像素)尺度上对格局演化模式进行更加全 面的表征(如景观破碎可以分为收缩、穿孔、切割等多种模式),可反映景观格局多种演化模式的空间分异和 过程规律,有助于深入理解自然和人类多重影响下景观格局复杂演变机制<sup>[18]</sup>。

基于长时间序列 Landsat 系列卫星影像,获取 1973—2020 年黄河三角洲滨海区域土地利用/覆被分类数据,以盐沼湿地为主要研究对象,利用并改进 SEDMS 模型进行盐沼湿地景观格局演化模式识别,随后,采用地理探测器分析盐沼湿地格局演化模式空间分异的驱动因素,剖析黄河改道、海岸线变迁、保护区建设、围垦开发等自然和人类活动因素对滨海盐沼湿地景观格局演化的影响。

## 1 研究区概况

现代黄河三角洲位于山东省北部沿海地区,渤海湾与莱州湾之间,北起套尔河口,南至支脉沟口<sup>[19]</sup>,在东部入海口处设有黄河口国家级自然保护区,北部设有一千二自然保护区。黄河三角洲是中国北方滨海盐沼湿地的典型分布区,拥有我国乃至世界独一无二的河口原生湿地生态系统<sup>[20]</sup>。选择黄河三角洲滨海地区为研究区,总面积 4623.6 km<sup>2</sup>。具体来说,选择 1973、1980、1985、1990、1995、2000、2005、2010、2015、2020 年的低潮位无云 Landsat 卫星影像,分别通过目视解译勾画海岸线,将历年海岸线叠加后选择最偏向内陆的海岸线,分别向海陆两侧做 10 km 缓冲区,将缓冲区与一千二和黄河口两个自然保护区合并,共同构成研究区范围(图1)。本区四季分明,属北温带亚湿润气候区,土地资源、石油资源、黄河水沙资源、生物资源等自然资源丰富<sup>[21]</sup>。由于处于黄河与渤海交互地带,孕育出多种湿地类型,包括滨海盐沼湿地和淡水湿地<sup>[22]</sup>。本区盐沼湿地的植被类型主要包括:芦苇、盐地碱蓬、柽柳及互花米草(2008 年以后)等。



图 1 研究区位置示意图 Fig.1 Location diagram of the study area

## 2 数据来源和研究方法

#### 2.1 1973—2020年土地利用/覆被数据

以 Google Earth Engine(GEE)谷歌地球引擎云平台、e-Cognition 9.0 软件为支撑,结合 1973 年至 2020 年 30 m 空间分辨率的 Landsat 系列卫星影像、JRC-GSW 全球地表水数据集<sup>[23]</sup>、中国多时期土地利用土地覆被遥 感监测数据集(CNLUCC)<sup>[24]</sup>。由于覆盖黄河三角洲的 Landsat 数据从 1973 年开始提供,因此本研究以 1973 年为起始年份,对 1973、1980、1985、1990、1995、2000、2005、2010、2015、2020 年黄河三角洲滨海地区进行土地 利用/覆被分类。JRC-GSW 数据集以月为时间尺度记录了 1984 年以来全球地表水体的范围,并根据水体淹 没频率将水体分为永久性水体和季节性水体。CNLUCC 是以 Landsat 遥感影像作为主要信息源,通过人工目 视解译构建的国家尺度多时期(1980、1990、1995、2000、2005、2010、2015、2018、2020)土地利用/土地覆盖专题 数据库,总体精度可达到 91.2%以上<sup>[24]</sup>。本文针对研究区的景观特点将土地覆盖类型分为:滨海盐沼湿地

(后文简称盐沼湿地)、水体、淡水湿地、滩涂未利用地、草地、海草、养殖池/盐田、人工表面、耕地、道路堤坝, 各种类型具体的定义如表1所示。

具体分类方法为:针对每一时期,首先利用 Landsat 系列卫星影像计算年内最大 NDVI(NDVI<sub>max</sub>),根据 NDVI<sub>max</sub>设置阈值来区分植被和非植被区域。由于盐沼湿地中的盐地碱蓬密度一般较低,因此参照 2020 年野 外踏期记录和无人机影像解译结果,在 2020 年 Landsat NDVI<sub>max</sub>图层上选择 160 个低密度碱蓬样本点,计算得 到低密度碱蓬的 NDVI<sub>max</sub>均值为 0.102。因此为了兼顾低密度的碱蓬,将年 NDVI<sub>max</sub> ≥ 0.1 的像元确定为潜在 植被生长区,将 NDVI<sub>max</sub> ≤ 0 的区域定为水体,0<NDVI<sub>max</sub> <0.1 的确定为滩涂未利用地。对于 1985 年及之后 的数据,利用 JRC 数据集区分内陆植被和潮间带植被,即被 JRC 季节性水体覆盖的植被区域判定为潮间带的 盐沼湿地。1973 年和 1980 年则通过道路堤坝对于潮水的阻隔作用,根据道路堤坝为边界区分潮间带植被和 内陆植被;非水体的植被覆盖区定义为内陆草本植物,即为草地;永久性水体淹没区域的植被定义为海草;根 据海陆位置将内陆水体确定为淡水湿地;海洋水体被命名为水体;人工表面、耕地、养殖池/盐田数据继承 CNLUCC 的分类结果;道路堤坝用地通过目视解译提取。通过以上方法得到分类结果,最终选择生长季(7—9月)低潮位影像,根据影像的颜色纹理特征、环境特征、几何特征、光谱差异、地理位置等特征对各分类的结果进目视解译修正。根据以上分类方法,最终得到研究区内 1973、1980、1985、1990、1995、2000、2005、2010、2015、2020 年共 10 期土地利用/覆被数据。

Table 1 Land use/cover types and definition					
 类型 Type	定义 Definition				
滨海盐沼湿地 Coastal salt marsh	位于潮间带区域,具有较高草本或低灌木植被覆盖度的湿地系统				
水体 Water body	海洋水体				
淡水湿地 Freshwater wetland	包括河流和沟渠、湖泊、水库坑塘等大潮高潮位之上的湿地				
滩涂未利用地 Tidal flat and unutilized land	指潮间带及内陆的未利用及难利用的土地				
草地 Grassland	生长以草本植物为主,指潮间带以上的各类草地,包括低覆盖度的各类草地、灌丛草地及 林草地				
海草 Seagrass	指生长于近海水下的单子叶高等植物,在沿海潮下带形成的海草床				
养殖池/盐田 Aquaculture ponds/salt pan	鱼、虾养殖池塘、晒盐池、采盐场等				
人工表面 Artificial surface	城乡居民点建设用地、工矿用地				
耕地 Cultivated land	种植农作物的土地,本区包括水田、旱地				
道路堤坝 Road and dam	道路、养殖池/盐田周边堤坝、滨海堤坝等				

表1 土地利用/覆被类型和定义

在研究区内基于 Google Earth 高分辨率历史影像(2000—2020年)<sup>[25]</sup>、GF-1卫星影像(2015、2020年)、以及 2020年野外踏勘记录共计选择 4700个验证点,对研究区内 2000、2005、2010、2015、2020年土地利用/覆被数据进行精度验证,采用混淆矩阵评价分类精度,总体分类精度依次为:89.36%、85.59%、85.70%、85.45%、90.47%;Kappa 系数为 0.88、0.84、0.84、0.89。盐沼湿地分类的用户精度、制图精度分别为:94.59%、84.55%、82.88%、85.37%、89.04%和 82.03%、92.08%、91.09%、85.89%、89.66%;分类精度基本符合进一步分析的要求。

#### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 标准差椭圆

标准差椭圆法(Standard deviational ellipse,SDE)是一种度量地理要素空间分布的研究方法<sup>[26]</sup>。基于盐 沼湿地分布范围建立 SDE,描述盐沼湿地的重心位置及偏移距离、偏移方向研究其空间分布的变化;根据椭圆 的旋转角度、面积定量研究盐沼湿地分布的空间格局。利用 ArcGIS 进行盐沼湿地的标准差椭圆参数计算和 结果的可视化显示<sup>[27]</sup>。

2.2.2 土地利用转移矩阵

本文利用土地利用转移矩阵<sup>[28]</sup>对盐沼湿地与其它用地类型的净转化量进行计算分析,用于衡量盐沼湿

地的动态变化过程,研究盐沼湿地的面积变化和类型的转移<sup>[29]</sup>。

# 2.2.3 状态与演化识别模型(SEDMS)

SEDMS 模型于 2021 年由 Tian 等提出<sup>[18]</sup>,该模型将研究区以规则格网空间化,对于每个格网,计算四个 景观指数(Landscape Index,LI),即斑块数量(LI<sub>1</sub>)、斑块面积(LI<sub>2</sub>)、斑块周长(LI<sub>3</sub>)、平均斑块分形维数 (LI<sub>4</sub>)在两个相邻时期的变化(ΔLI<sub>i</sub>(*i* = 1,2,3,4)),并利用基于形态规则的方法定义景观格局演化的类型 (表 2),即切割(D型)、收缩(S型)和穿孔(P型)、聚合(A型)、扩张(E型)和增加(C型),前三种为破 碎<sup>[30]</sup>,后三种为扩张(图2), *T<sub>a</sub>*和*T<sub>b</sub>*为两个相邻研究时间点。相比现有景观格局演化识别方法,SEDMS 可以 更加全面地表征各种景观变化类型,并可将变化类型进行空间化,反映格局演化的空间分异特征<sup>[32]</sup>。考虑到 黄河三角洲盐沼湿地变化剧烈,本研究在原有 SEDMS 模型的基础上进行了改进,除破碎和扩张两种类型外, 定义了新增和消失两种景观格局演化模式类型。景观新增则为区域内某类斑块面积从 0%到 100%,反之则 为景观消失。具体判断规则如表 2 所示。

为兼顾遥感影像 30 m 分辨率,且能反映出盐沼湿地格局演变的细节特性,通过对比不同尺度实验计算结 果与遥感影像的真实特征,发现 500 m 格网比较能够正确反映格局演化模式的类型,因此本文在研究区内部 构建 500 m×500 m 的格网,以 1973—1980 年为一个时间段,其后每5 年为一个时间段,共9 个时段,分别计算 各时段的盐沼湿地格局演化模式类型。同时,统计每个格网中9 个时间段不同格局演化模式类别的总数,称 为格局演化频数,一定程度上可反映格局演化的复杂程度。





**Fig.2** Sketch map of the state-type discrimination using the morphological-rule-based pattern recognition approach<sup>[31]</sup> D:切割;S:收缩;P:穿孔;A:聚合;E:扩张;C:增加;*T<sub>a</sub>*,*T<sub>b</sub>*:两个相邻研究时间点

					_
Table 2	Mornhological	rule-based	nattern	recognition	annroact
I able 2	monogical	Ture-baseu	pattern	recognition	approaci

演化模式 Evolution patterns	判断规则 Decision rule	演化模式 Evolution patterns	判断规则 Decision rule
破碎 Fragmentation	D 型, if $\Delta LI_1 > 0$ , $\Delta LI_2 < 0$ , $\Delta LI_4 \ge 0$		E型, if $\Delta LI_1 = 0$ , $\Delta LI_2 > 0$ , $\Delta LI_4 < 0$
	S 型, $if \Delta LI_1 = 0$ , $\Delta LI_2 < 0$ , $\Delta LI_3 \leq 0$ , $\Delta LI_4 \ge 0$		C 型, if $\Delta LI_1 > 0$ , $\Delta LI_2 > 0$ , $\Delta LI_4 < 0$
	P型, if $\Delta LI_1 = 0$ , $\Delta LI_2 < 0$ , $\Delta LI_3 > 0$ , $\Delta LI_4 \ge 0$	新增 Increase	$\Delta LI_2 = 0.25 \ km^2$
扩张 Expansion	A 型, if $\Delta LI_1 < 0$ , $\Delta LI_2 \ge 0$ , $\Delta LI_4 < 0$	消失 Disappearance	$\Delta LI_2 = 0$

D:切割 dissection;S:收缩 shrinkage;P:穿孔 perforation;A:聚合 aggregation;E:扩张 enlargement;C:增加 creation

#### 2.2.4 地理探测器

利用地理探测器中的因子探测器<sup>[33]</sup>研究自然和人为因素对盐沼湿地格局演化空间分异的影响程度<sup>[34]</sup>。 选取的因子包括:每个格网中耕地、人工表面、养殖池/盐田、道路堤坝、滩涂未利用地的多年累计变化量,累计 变化量即格网内该种用地类型各个阶段发生变化(净增加和净减少的绝对值)的面积之和、距海距离共计6

44 卷

项指标。通过以下公式探测各影响因子对演化频数空间分异的解释程度[35]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \tag{1}$$

式中, $h=1,2\cdots,L$ 表示变量 Y(格局演化频数)或因子 X 的格网分区; N<sub>h</sub>和 N 分别为子区域和全区域内格局 $演化频数; <math>\sigma_h^2$ 和  $\sigma^2$  分别为子区域和全区域内格局演化频数的方差。q 值为因子对因变量的解释力,值域为 [0,1],值越大表示该因子对盐沼湿地格局演化频数的解释力越强<sup>[36]</sup>。将因子影响程度划分为显著(>0.5)、 较显著(0.3—0.5)、一般(0.1—0.3)及不显著(<0.1)。

# 3 结果

3.1 土地利用/覆被时空变化特征

1973—2020年黄河三角洲滨海区域的土地利用/覆被动态变化显著(图3)。其中盐沼湿地面积由1973年的507.04 km<sup>2</sup>减少到2020年的254.69 km<sup>2</sup>,总体上呈现减少趋势,其中1973—1995年基本稳定在410 km<sup>2</sup>以上,随后迅速减少,2010年减少到190.79 km<sup>2</sup>,2010—2020年则增加了63.91 km<sup>2</sup>。滩涂未利用地减少明显,到2020年仅为324.98 km<sup>2</sup>,平均每年减少23.43 km<sup>2</sup>。草地在2000年前占有较大面积,到2020年仅为39.96 km<sup>2</sup>。养殖池/盐田增加最为显著,截止到2020年净增加1015.71 km<sup>2</sup>,平均每年增加21.61 km<sup>2</sup>。耕地面积由1973到2020年增加371.30 km<sup>2</sup>,是增加面积仅次于养殖池/盐田的用地类型。淡水湿地由1973年的67.53 km<sup>2</sup>增加到2020年的200.99 km<sup>2</sup>。人工表面和道路堤坝呈现持续增加趋势,分别扩张32倍和12倍。





空间分布上(图4)可以发现以下几个特征:①黄河口地区陆地面积增加明显,河口区海岸线明显向外海 推移;②盐沼湿地的分布范围逐渐缩小,2000年以后,广泛分布于黄河口和一千二自然保护区内及其他沿海 狭长地区,黄河口地区新增大量盐沼湿地;西北部和东南部沿海地区盐沼湿地减少明显。③土地开发程度逐 渐提高,养殖池/盐田、耕地及道路堤坝等人类活动用地增加显著,滩涂未利用地、盐沼湿地、草地等自然用地 减少明显。总之,大部分盐沼湿地退化地区被人类的土地开发所占用,包括耕地、人工表面、养殖池/盐田、道 路堤坝用地的建设。

如图 5、表 3 中的盐沼湿地重心和标准差椭圆的空间分布图和统计参数所示,1973—1980 年盐沼湿地重 心呈现由南向北偏移,年均移动 1352.02 m;1980—2005 向东部偏移显著,且偏移幅度较大,年均移动 1707.28 m;2005—2020 年间则向西部偏移,移动速度有所减缓;总体上是向东偏移的趋势,其中 1973—1980 年和 2000—2005 年空间位移最为剧烈。不同时间盐沼湿地标准差椭圆图代表了盐沼湿地空间分布的方向性 (图 5),总体上盐沼湿地呈现东南—西北向的分布特征。盐沼湿地分布的标准差椭圆面积经历了一个"增— 减—增"的变化过程,表明从蔓延空间分布的覆盖范围上看,2000年之前盐沼湿地分布呈现逐渐分散状态, 2000—2010年间,其分布较为集中,2010年后则再次出现小幅度分散状态。



#### 图 4 研究区 1973—2020 年土地利用/覆被分类图

Fig.4 Land use/cover classification map of the study area from 1973 to 2020

表 3 1973—2020 年黄河三角洲盐沼湿地的重心和标准差椭圆参数

.

• .•

...

Table 3	Gravity center and sta	andard devi	ation empse parame	eters of salt ma	rsnes in the Yellow Rive	r Delta from	1973 to 2020
年份 Year	重心迁移距离 Gravity center migration distance/km	年份 Year	椭圆面积 Area of ellipse/km <sup>2</sup>	年份 Year	重心迁移距离 Gravity center migration distance/km	年份 Year	椭圆面积 Area of ellipse/km <sup>2</sup>
		1973	1992.78	1995—2000	7.77	2000	3849.38
1973—1980	10.22	1980	2969.54	2000—2005	15.64	2005	1496.71
1980—1985	7.25	1985	2790.96	2005—2010	7.62	2010	1328.49
1985—1990	5.51	1990	3030.33	2010—2015	2.88	2015	2409.52
1990—1995	2.20	1995	3343.82	2015—2020	1.64	2020	2313.42



Fig.5 Movement track of the gravity center and standard deviation ellipse of the salt marsh

# 3.2 盐沼湿地与周边土地利用/覆被的相互转化

1973—2020年盐沼湿地与周边土地利用/覆被的相互转化如图 6 所示。从各时间段来看,1973—1980年 盐沼湿地与滩涂未利用地、草地和耕地之间转化剧烈,盐沼湿地有少量增加;1980—1990年草地占用盐沼湿 地面积最大(75.85 km<sup>2</sup>),其次是养殖池/盐田(48.33 km<sup>2</sup>),盐沼湿地面积下降;1990—2000年盐沼湿地转化 为滩涂未利用地的面积最高(162.45 km<sup>2</sup>),滩涂未利用地又大量转化为养殖池/盐田,养殖池/盐田也直接占 用大量盐沼湿地(46.58 km<sup>2</sup>);2000—2010年,盐沼湿地减少的趋势有所放缓,主要转化为养殖池/盐田 (57.3 km<sup>2</sup>)和淡水湿地(27.18 km<sup>2</sup>),同时大量滩涂未利用地(58.18 km<sup>2</sup>)恢复为盐沼湿地,滩涂未利用地转 化为养殖池/盐田依然明显;2010—2020年盐沼湿地以增加为主,主要由滩涂未利用地(13.32 km<sup>2</sup>)和水体 (59.94 km<sup>2</sup>)转化而来。

总体来说,2010年之前,养殖池/盐田、淡水湿地、人工表面对于盐沼湿地主要以占用为主,2010年后则部

分恢复为盐沼湿地;草地和耕地对于盐沼湿地的占用也 比较明显,侵占盐沼湿地的面积逐年下降;道路堤坝直 接占用盐沼湿地面积较小;而盐沼湿地的增加则主要来 源于滩涂未利用地和水体。

3.3 盐沼湿地景观格局演化模式

表4中各类演化模式的格网数量可以体现盐沼湿地的演化程度和主要格局演化模式。1995年之前,出现各类格局演化模式的格网数量都较多,表明1995年之前是盐沼湿地景观格局变化较为剧烈的时期,该阶段出现消失、破碎的格网数量总体多于新增和扩张的格网数量;其中,1980年之前以消失为主,1980—1995年以破碎为主。1995年之后,尤其是2000—2010年间,发生格局变化的格网数量明显减少,表明盐沼湿地的景观格局在此期间趋于稳定,此时格局演化模式由消失、破碎为主逐渐转变为扩张为主;2010年后,四种格局演化模式的总体数量较为稳定,出现新增、扩张的格网数量明显多于消失、破碎的格网数量。这表明盐沼湿地的消



图 6 1973—2020 年盐沼湿地与其它土地利用/覆被类型的转化 Fig.6 Conversion between salt marshes and other land use/cover types from 1973 to 2020

失和破碎化程度逐渐减弱,逐渐向着恢复和增加的趋势发展,现有的盐沼湿地得到了较好的保护。总体而言, 盐沼湿地景观格局演化模式可分为三个阶段:1995年之前的动荡期、1995—2010年的过渡期,以及 2010年以 后的稳定期。

表 4 各时间段演化模式的格网数量统计 Table 4 Statistics of grid number of evolution patterns in each time period

演化模式 Evolution Patterns	1973—1980	1980—1985	1985—1990	1990—1995	1995—2000	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2015-2020	
消失 Disappearance	593	285	341	219	186	63	34	87	54	
破碎 Fragmentation	375	468	515	487	249	132	49	112	115	
新增 Increase	545	149	218	148	16	59	32	117	49	
扩张 Expansion	212	438	210	203	200	110	253	244	249	

#### 3.4 景观格局演化频数空间分布特征

图 7 展示了每个格网的演化频数空间分布,可以看 出,盐沼湿地格局演化频数具有明显的空间差异性,且 具有一定的空间聚集特性,36%的区域出现了多次演化 模式的改变。其中,演化频数较高的地区主要集中在北 部一千二自然保护区至黄河口保护区,且偏向内陆地 区,位于盐沼湿地与人类活动用地的交界处(图4),相 当部分的频数达到4次以上,说明其内部的盐沼湿地在 48 年间景观格局变化频繁,盐沼湿地生境不稳定。在 黄河口和一千二保护区内,格局演化频数呈现内陆高、 沿海低的特征;在保护区以外,格局演化频数也较低,表 明其盐沼湿地的格局演化模式类型较为单一,格局演化 频数较高的区域则为盐沼湿地生境脆弱的区域,多位于 人类活动用地(如耕地、养殖池/盐田等)与盐沼湿地分



图 7 盐沼湿地全部格局演化频数空间分布图

Fig.7 Spatial distribution of frequencies of salt marsh landscape changes

76

布的交界地区。

3.5 盐沼湿地景观格局演化空间分异归因分析

图 8 显示了各影响因子的空间分布情况;其中,耕地、人工表面、养殖池/盐田、道路堤坝和滩涂未利用地的值分别为其网格内面积的多年累积变化量。表 5 所示,对全部格局演化频数解释力最强的因子为滩涂未利用地(q值=0.520),其次主要的因子为耕地>养殖池/盐田>距海距离>人工表面>道路堤坝。对盐沼湿地破碎频数、新增频数解释力最强的因子从高到低排序相同,依次为:滩涂未利用地>耕地>养殖池/盐田>人工表面> 道路堤坝>距海距离。对盐沼湿地消失解释力最强的因子从高到低依次为:耕地>滩涂未利用地>养殖池/盐田>人工表面> 道路堤坝>距海距离>道路堤坝。扩张解释力的因子依次为:滩涂未利用地>耕地>养殖池/盐田>人工表 面>距海距离>道路堤坝。



#### 图 8 研究区影响因子空间分布

Fig.8 Spatial distribution of influencing factors in the study area

Table 5 The q values of influencing factors of the number of evolutions								
格局演化频数 The number of evolutions	耕地 Cultivated land	人工表面 Artificial surface	养殖池/盐田 Aquaculture ponds/salt pan	道路堤坝 Road and dam	滩涂未利用地 Tidal flat and unutilized land	距海距离 Distance to sea		
全部频数 Total frequency	0.45	0.12	0.20	0.10	0.52	0.19		
破碎频数 Frequency of fragmentation	0.46	0.14	0.29	0.13	0.56	0.08		
消失频数 Frequency of disappearance	0.55	0.14	0.25	0.06	0.40	0.08		
扩张频数 Frequency of expansion	0.37	0.14	0.24	0.12	0.62	0.12		
新增频数 Frequency of increase	0.35	0.12	0.14	0.06	0.54	0.05		

表 5 格局演化频数的影响因子 q 值统计 5 The q values of influencing factors of the number of evol

总体而言,研究区内盐沼湿地格局的演化主要受滩涂未利用地和耕地的变化影响最为显著,其中滩涂未利用地的面积变化对于盐沼湿地的破碎、扩张和新增的影响程度均较为显著(q值>0.50),耕地对于盐沼湿地的消失影响最为显著(q值=0.55);人工表面和养殖池/盐田的增加对于盐沼湿地格局演化的直接作用较为有限(0.1—0.3);道路堤坝增加和距离海岸线距离对于盐沼湿地格局演化的作用并不明显。

# 4 讨论

上述结果表明,近五十年来,黄河三角洲盐沼湿地景观格局动态演变复杂、频繁、时空异质性强,且呈现明显的阶段性特征。1973—1995年,盐沼湿地的面积较大,空间分布相对分散,重心总体上向北偏东方向迁移,

各类格局演化模式的格网数量均较多,格局演化频繁,盐沼湿地与滩涂未利用地、草地和耕地之间的转化强 烈;1995年到2010年之间,盐沼湿地面积明显减少,空间范围趋向集中,重心逐渐向东部外海偏移,格局演化 模式处于过渡的时期,由消失、破碎为主逐渐转变为扩张为主,这一时期盐沼湿地主要退化为滩涂未利用地或 被养殖池/盐田占用,养殖池/盐田又大量占用滩涂未利用地,表明该时期人类开发活动对于盐沼湿地生境直 接间接的占用十分明显。2010年以后,盐沼湿地的面积和分布范围有所增加,空间范围趋向分散,重心逐渐 向西部内陆偏移,格局演化模式相对稳定,且以扩张和新增为主,盐沼湿地生境得到恢复,河口处新增了大量 盐沼湿地。

考虑到黄河三角洲盐沼湿地景观格局高强度变化的特点,本文对原有 SEDMS 模型进行了改进,在"扩 张"和"破碎"两种大类的基础上增加了"新增"和"消失"两种变化类型。在 1995 年之前的每个时段内,"新 增"和"消失"的格网数量均较多,表明该时期盐沼湿地空间分布呈现剧烈变化。同时,演化模式的频数,体现 了盐沼湿地格局演化强度的区域差异。结果表明,各种格局演化模式可以很好反映盐沼湿地在各时间段演化 过程的特征及在空间上格局演化的强度的区域差异;根据格局演化频数,发现盐沼湿地格局演化频繁的区域 主要位于人类建设活动用地和盐沼湿地交界处,受到人类的影响较为强烈,使得盐沼湿地的格局演化频繁,表 明该区域的盐沼湿地变化剧烈,生境脆弱,因而应该为盐沼湿地保护和恢复工作的重点区域。沿海新增盐沼 湿地和保护区以外的区域由于盐沼湿地存在时间相对较短,受到人类的直接占用而消失或为新生盐沼湿地, 使得其格局演化频数较低;而演化频数的降低也得益于当地湿地保护措施的实施,使盐沼湿地生境趋于稳定。

地理探测器结果表明,滩涂未利用地和耕地的变化对于格局演化频数的空间分异具有显著影响,人工表面和养殖池/盐田的增加对于盐沼湿地格局演化频数也有不同程度的作用。图9梳理了1973年以来黄河下游和三角洲的主要事件。黄河在1976年、1996年、2007年发生的改道,导致黄河入海口的位置发生剧烈的变化,河口区新增大量滩涂,为盐沼湿地新增和扩张创造了条件;改道后老河口(刁口河、清水沟)受到侵蚀,一定程度上造成了盐沼湿地的破碎和消失。同时,由于黄河改道引起海岸线的向外推移,原本受潮汐影响的盐沼湿地植被逐渐演替为内陆草本植被;改道导致的泥沙淤积,在此过程中易冲毁或淹没植被,又一定程度导致了盐沼湿地的破碎和消失。因此,黄河改道造成的滩涂淤积和蚀退是导致1995年之前盐沼湿地景观格局演化频繁的重要因素。另外,盐沼湿地与上游来水来沙密切相关,1975—1997年间黄河有18个年份出现断流<sup>[8]</sup>。黄河断流造成三角洲地区水资源损失巨大、水质下降、输送的营养盐类减少,造成生态环境恶化,生境质量的下降会造成盐沼湿地的退化;同时,黄河断流导致来沙量减少、海岸蚀退,长期淹水状态不利于盐沼湿地植被的生长,从而导致盐沼湿地向滩涂未利用地转化,1995—2000年,格局演化以破碎和消失为主可能受此影响。2002年起黄河通过联合调度万家寨、三门峡、小浪底水库实施的调水调沙工程,极大地增加了黄河入海水沙量,使得泥沙淤积,同时为盐沼湿地补充了淡水资源,为其恢复起到了积极作用,因此2000—2005年,出现破碎和消失的频数明显减少。

从各时期的土地利用/覆被分布来看,人类生产开发活动始终贯穿着整个研究时期,对盐沼湿地的时空动态特征及景观格局产生重要影响。研究期间耕地净增加674.9 km<sup>2</sup>,耕地垦殖必然要进行湿地排干改造,直接导致湿地干化<sup>[36]</sup>;养殖池/盐田净增加1015.71 km<sup>2</sup>,占用了大量滩涂,进而挤压适宜盐沼湿地生长的空间,水产养殖等产业废水的排放直接污染近岸环境,间接影响盐沼湿地生境。此外,黄河三角洲拥有重要的石油生产基地,孤东油田于1986年开始建设,占用了部分盐沼湿地,大量废弃物的排放也导致环境恶化,对盐沼湿地产生不利影响;道路堤坝建设阻隔了盐沼湿地的水文连通,虽然占地面积较为有限,但是弱化了海洋和陆地的水文循环。2005年之后,由于国家对湿地保护的重视程度加强,各项湿地保护制度的建立和完善、湿地保护政策的实施,使得黄河三角洲地区盐沼湿地得到有效的恢复<sup>[37]</sup>。2010年《山东半岛蓝色经济区发展规划》<sup>[38]</sup>实施,强调了"要加强海洋生态修复与治理,大力实施滨海湿地、柽柳林等典型生态系统的保护与修复工程";2011年设立了黄河三角洲高效生态经济区<sup>[39]</sup>,将维护黄河下游流域生态平衡作为指导原则之一,将黄河三角洲保护区等重点湿地保护区列为禁止开发区域。随着国家对黄河三角洲地区的生态环境保护力度

的加强,对于盐沼湿地的恢复起到了较为显著的作用,盐沼湿地景观格局的消失和破碎明显减少,新增和扩张明显增加,生境得到恢复。另外,互花米草在1989年在黄河三角洲地区出现<sup>[40]</sup>,2011年迅速扩张,到2020年已经遍布黄河口潮间带地区,新增的盐沼湿地也一定程度上来源于河口地区互花米草的扩张。



图 9 黄河下游及黄河三角洲 1973—2020 年主要事件时间轴



# 5 结论

基于 Landsat 系列卫星影像,对 1973—2020 年 10 个时期的黄河三角洲滨海区域进行了土地利用/覆被的精细制图;在此基础上分析了盐沼湿地的时空动态特征、盐沼湿地与邻近土地利用/覆被类型的转移情况;改进了 SEDMS 模型,将各时段盐沼湿地景观格局演化模式分为扩张、新增、破碎、消失四种类型;结合地理探测器,重点剖析了长时序盐沼湿地景观格局演化模式空间分异的驱动因素,主要结论如下:

(1) 盐沼湿地面积总体呈减少趋势,由 1973 年的 507.04 km<sup>2</sup>下降到 2020 年的 254.69 km<sup>2</sup>;1995 年以前较为稳定,1995—2010 年减少明显,随后有所增加;空间重心总体向东迁移,分布范围呈现分散—集中—分散的 演变特征。新增盐沼湿地主要由滩涂未利用地和水体转化而来,草地、养殖池/盐田和耕地则为占用盐沼湿地 的主要类型。

(2)盐沼湿地景观格局演变模式呈现三个明显的阶段:1995年以前的动荡期,1995—2010年的过渡期, 以及 2010—2020年的稳定期。1973—1995年,呈现破碎、消失、扩张、新增格局演化模式的格网数量都较多, 其中主要以消失和破碎为主导;1995—2010年,格局演化模式逐渐由消失和破碎为主导转变为扩张为主导; 2010年后为稳定期,格局发生变化的区域较少,总体以新增和扩张为主。格局演化频繁的区域,主要位于两 大保护区内与人工用地类型的交界地区。

(3)滩涂未利用地的分布和面积变化以及耕地的开发对于盐沼湿地的格局演化直接作用较为显著;人工 表面、养殖池/盐田和道路堤坝的建设一定程度上导致了盐沼湿地的破碎和消失;2005年之后一系列的保护 政策的实施与盐沼湿地的新增和扩张在时间上较为吻合,表明人类的干预对于盐沼湿地生境恢复起到了一定 的作用;互花米草的入侵也直接导致了盐沼湿地的新增和扩张。

#### 参考文献(References):

- [1] Hu Y K, Tian B, Yuan L, Li X Z, Huang Y, Shi R H, Jiang X Y, Wang L H, Sun C. Mapping coastal salt marshes in China using time series of Sentinel-1 SAR. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 173: 122-134.
- [2] Abbott K M, Elsey-Quirk T, DeLaune R D. Factors influencing blue carbon accumulation across a 32-year chronosequence of created coastal marshes. Ecosphere, 2019, 10(8): e02828.

- [3] 解雪峰,孙晓敏,吴涛,蒋国俊,濮励杰,项琦.互花米草入侵对滨海湿地生态系统的影响研究进展.应用生态学报,2020,31(6): 2119-2128.
- [4] Murray N J, Worthington T A, Bunting P, Duce S, Hagger V, Lovelock C E, Lucas R, Saunders M I, Sheaves M, Spalding M, Waltham N J, Lyons M B. High-resolution mapping of losses and gains of Earth's tidal wetlands. Science, 2022, 376(6594): 744-749.
- [5] Sun C, Li J L, Liu Y X, Liu Y C, Liu R Q. Plant species classification in salt marshes using phenological parameters derived from Sentinel-2 pixel-differential time-series. Remote Sensing of Environment, 2021, 256: 112320.
- [6] 中国共产党中央委员会,国务院.黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要.2021-10-08.
- [7] 陈琼,张镱锂,刘峰贵,周强,汪生珍,成艺,郭蓉,支泽民,许寰戈.黄河流域河源区土地利用变化及其影响研究综述.资源科学, 2020,42(3):446-459.
- [8] Fan X F, Wang L, Li X P, Zhou J, Chen D L, Yang H B. Increased discharge across the Yellow River Basin in the 21st century was dominated by precipitation in the headwater region. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 44: 101230.
- [9] Ondiek R A, Hayes D S, Kinyua D N, Kitaka N, Lautsch E, Mutuo P, Hein T. Influence of land-use change and season on soil greenhouse gas emissions from a tropical wetland: a stepwise explorative assessment. Science of the Total Environment, 2021, 787: 147701.
- [10] 卢晓宁,黄玥,洪佳,曾德裕,杨柳青.基于 Landsat 的黄河三角洲湿地景观时空格局演变.中国环境科学, 2018, 38(11): 4314-4324.
- [11] Zhou K. Wetland landscape pattern evolution and prediction in the Yellow River Delta. Applied Water Science, 2022, 12(8): 190.
- [12] Wei C X, Guo B, Fan Y W, Zang W Q, Ji J W. The change pattern and its dominant driving factors of wetlands in the Yellow River Delta based on sentinel-2 images. Remote Sensing, 2022, 14(17): 4388.
- [13] Zhang X J, Wang G Q, Xue B L, Zhang M X, Tan Z X. Dynamic landscapes and the driving forces in the Yellow River Delta wetland region in the past four decades. Science of the Total Environment, 2021, 787: 147644.
- [14] 任玲玲, 栗云召, 于森, 杨继松, 战超, 周迪. 1984—2015 年黄河三角洲人工湿地的演变及主要驱动因子. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 493-502.
- [15] Zhang X, Zhou L, Zheng Q. Prediction of landscape pattern changes in a coastal river basin in south-eastern China. International Journal of Environmental Science and Technology, 2019, 16(10): 6367-6376.
- [16] Zhang Y L, Shen W J, Li M S, Lv Y Y. Integrating landsat time series observations and *Corona* images to characterize forest change patterns in a mining region of Nanjing, Eastern China from 1967 to 2019. Remote Sensing, 2020, 12(19): 3191.
- [17] Han Y P, Huang Q X, He C Y, Fang Y Q, Wen J H, Gao J, Du S Q. The growth mode of built-up land in floodplains and its impacts on flood vulnerability. Science of the Total Environment, 2020, 700: 134462.
- [18] Tian L W, Liu X N, Liu M L, Wu L. State-and-evolution detection models: a framework for continuously monitoring landscape pattern change. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 1-14.
- [19] Lopes C L, Mendes R, Caçador I, Dias J M. Assessing salt marsh extent and condition changes with 35years of Landsat imagery: *Tagus* Estuary case study. Remote Sensing of Environment, 2020, 247: 111939.
- [20] 芦康乐,杨萌尧,武海涛,管强,张科.黄河三角洲芦苇湿地底栖无脊椎动物与环境因子的关系研究——以石油开采区与淡水补给区为例.生态学报,2020,40(5):1637-1649.
- [21] 黄俊涵,付梦雨,邱冬冬,倪盼盼,曲荷盈,王萍. 1980—2015 年黄河流域山东段湿地景观格局与干扰度动态变化研究. 国土与自然资源研究, 2023(1):56-63.
- [22] 李昱蓉,武海涛,张森,卢霞,芦康乐.互花米草入侵和持续扩张下黄河三角洲滨海湿地潮沟的形态特征及其变化.湿地科学,2021,19 (1):88-97.
- [23] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, Belward A S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature, 2016, 540 (7633): 418-422.
- [24] 徐新良,刘纪远,张树文,等.中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC).中国科学院资源环境科学数据中心数据注册 与出版系统(http://www.resdc.cn/DOI), 2018.
- [25] 匡文慧,张树文,杜国明,颜长珍,吴世新,李仁东,陆灯盛,潘涛,宁静,郭长庆,董金玮,包玉海,迟文峰,窦银银,侯亚丽,尹哲睿, 常丽萍,杨久春,谢家丽,邱娟,张汉松,张宇博,杨仕琪,萨日盖,刘纪远. 2015—2020年中国土地利用变化遥感制图及时空特征分 析.地理学报,2022,77(5):1056-1071.
- [26] 宋媛,李国庆,吴晶,周洁,王颖. 1989—2019年环渤海地区养殖池的空间变化特征. 海洋通报, 2021, 40(1): 92-100.
- [27] 宋永永, 薛东前, 夏四友, 米文宝. 近 40a 黄河流域国土空间格局变化特征与形成机理. 地理研究, 2021, 40(5): 1445-1463.

- [28] 李辉, 张晓媛, 国洪磊. 基于土地利用的三峡库区近 30 年生态系统服务价值时空变化特征. 水土保持研究, 2021, 28(2): 309-318.
- [29] 张学儒,周杰,李梦梅.基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析.地理学报,2020,75(1):160-178.
- [30] Hermosilla T, Wulder M A, White J C, Coops N C, Pickell P D, Bolton D K. Impact of time on interpretations of forest fragmentation: threedecades of fragmentation dynamics over Canada. Remote Sensing of Environment, 2019, 222: 65-77.
- [31] Fu F, Deng S M, Wu D, Liu W W, Bai Z H. Research on the spatiotemporal evolution of land use landscape pattern in a County area based on CA-Markov model. Sustainable Cities and Society, 2022, 80: 103760.
- [32] Zou L L, Wang J Y, Bai M D. Assessing spatial-temporal heterogeneity of China's landscape fragmentation in 1980 2020. Ecological Indicators, 2022, 136: 108654.
- [33] 廖雯, 胡砚霞, 于兴修, 刘璇璇. 丹江口库区 2010—2020 年土壤保持功能时空特征及其影响因素. 水土保持通报, 2021, 41(6): 288-294, 376.
- [34] 郭付友, 佟连军, 仇方道, 李一鸣. 黄河流域生态经济走廊绿色发展时空分异特征与影响因素识别. 地理学报, 2021, 76(3): 726-739.
- [35] 关伟, 许淑婷, 郭岫垚. 黄河流域能源综合效率的时空演变与驱动因素. 资源科学, 2020, 42(1): 150-158.
- [36] 孔祥伦,李云龙,韩美,田立鑫,牛学锐,朱继前,王敏,黄淑萍.1990年以来3个时期黄河三角洲天然湿地的分布及其变化的驱动因素 研究.湿地科学,2020,18(5):603-612.
- [37] 于冬雪.近40年黄河三角洲滨海湿地时空演变特征及其驱动机制[D].聊城:聊城大学,2021.
- [38] 国家发展与改革委员会.山东半岛蓝色经济区发展规划.(2011-05-06) [2019-12-25]. http://www.china.com.cn/news/zhuanti/kzgl/2011-05/06/content2-2511995.htm.
- [39] 国家发展与改革委员会.黄河三角洲高效生态经济区发展规划.(2019-12)[2019-12-25]. http://www.gov.cn/gzdt/att/att/site1/20091223/00123f3eabca0c9bf64b01.pdf.
- [40] Wang C, Wang G, Dai L J, Liu H Y, Li Y F, Zhou Y, Chen H, Dong B, Lv S C, Zhao Y Q. Diverse usage of waterbird habitats and spatial management in Yancheng coastal wetlands. Ecological Indicators, 2020, 117: 106583.