

DOI: 10.20103/j.stxb.202405161123

智烈慧, 马田田, 高原, 李晓文, 邵冬冬, 郭卫华, 崔保山. 围垦开发下滨海湿地格局演变的自然-人为复合驱动过程. 生态学报, 2024, 44(21): 9626-9635.
Zhi L H, Ma T T, Gao Y, Li X W, Shao D D, Guo W H, Cui B S. Human-natural coupling driving processes for spatiotemporal dynamics of coastal wetlands under reclamation. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9626-9635.

围垦开发下滨海湿地格局演变的自然-人为复合驱动过程

智烈慧^{1,2}, 马田田³, 高 原¹, 李晓文^{1,*}, 邵冬冬¹, 郭卫华⁴, 崔保山¹

1 北京师范大学环境学院, 北京 100875

2 河北师范大学地理科学学院, 石家庄 050024

3 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191

4 山东大学生命科学学院, 青岛 266237

摘要:滨海湿地具有重要的生物多样性保护价值及生态功能, 围垦开发下经济快速增长的同时滨海湿地生态受损且大面积丧失。探究自然-人为复合影响下格局演变的关键驱动机制, 可以为区域的生态保护和高质量发展提供指示。以围垦开发影响剧烈的黄河三角洲为研究区, 克服了当前研究中驱动力的时空动态表征以及湿地格局演变的综合驱动时空交互机制研究的不足, 研究构建了一套基于土地利用变化轨迹分离自然和人为驱动并表征湿地格局演变的动态驱动过程的方法, 为区域尺度有效评估外界干扰对滨海湿地的影响提供了更加全面的支持。结果表明: 尽管黄河三角洲滨海湿地格局演变的驱动过程轨迹类型多样, 但主要受少数类型影响, 以单一围垦开发为主。各驱动过程间存在着不同程度的时空交互, 伴随围垦、修复、逆向演替过程的发生和转换, 新生湿地的淤积及生态系统演替的自然增长过程被阻断, 甚至可能对已修复湿地产生负面影响, 区域湿地持续减少; 人为驱动过程的影响远大于自然驱动过程, 人为、自然及自然-人为复合驱动的湿地格局演变面积占比分别为 55.5%、26.1% 和 18.4%。研究结果指示应严格管控部分生境敏感区的滩涂围垦, 未来难以避免的滨海开发活动应由陆向海逐步推进, 采用与新生湿地淤积方向一致的“滚动开发”模式, 在兼顾经济效益的同时, 维护滨海湿地生态系统的完整性和演替的连续性。

关键词:围垦开发; 驱动过程; 土地利用变化轨迹; 时空表征; 黄河三角洲

Human-natural coupling driving processes for spatiotemporal dynamics of coastal wetlands under reclamation

ZHI Liehui^{1,2}, MA Tiantian³, GAO Yuan¹, LI Xiaowen^{1,*}, SHAO Dongdong¹, GUO Weihua⁴, CUI Baoshan¹

1 School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 School of Geographical Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China

3 Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Agro-Environmental Protection Institute, Tianjin 300191, China

4 School of Life Science, Shandong University, Qingdao 266237, China

Abstract: Coastal wetlands provide globally significant biodiversity and enormous multiple ecosystem services. The intensified anthropogenic reclamation with economic development leads to loss and degradation in coastal wetlands and their multiple ecosystem services. Understanding the spatiotemporal dynamics of coastal wetland patterns in relation to its key natural and anthropogenic driving processes can facilitate evidence-based preservation, restoration and wise use of coastal wetland resources. This study proposes a methodology to identify and capture the spatiotemporal trajectory of the dynamic

基金项目:国家重点研发计划(2019YFE0121500); 国家自然科学基金委-山东联合基金项目(U22A20558); 国家自然科学基金项目(3217130131); 河北省社会科学发展研究课题(20230303050)

收稿日期:2024-05-16; **采用日期:**2024-09-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lixw@bnu.edu.cn

driving process of coastal wetland pattern based on the characteristics of regional land use change, and to explore the effects of different types of natural and anthropogenic driving processes on spatiotemporal dynamics of the coastal wetlands and their pairwise spatial interactions. The proposed methodology separated the spatiotemporal pattern of natural and human disturbance driving forces, and spatialized and quantified the influence of driving processes on coastal wetlands. Meanwhile, it breaks the static analytical frameworks reliant solely on statistical evaluations of current wetland patterns and overcomes the insufficient research on the spatiotemporal interaction mechanism within the comprehensive driving mechanism of wetland pattern dynamic change. This approach is important and generally applicable for clarifying the complex driving mechanism of the region with drastic landscape pattern evolution under the long-term compound influence of natural and human. The case study of the Yellow River Delta (YRD) showed that: (1) Although multiple driving process trajectories exist for the coastal wetland transformation in the YRD, the spatiotemporal dynamics of coastal wetlands were mainly determined by a few types, among which coastal land reclamation is the most prominent with its greater spatial interaction to the other driving processes, leading continuous loss in coastal wetlands by the encroachment of tidal area and termination of ecosystem succession; (2) Spatiotemporal interactions among the driving processes varied each other, however, the anthropogenic driving processes exhibited greater magnitudes than that of the natural driving processes with their largest impacting percentage (55.5%) of wetland areas in comparison with that under natural (26.1%) and natural-anthropogenic coupled driving processes (18.4%), respectively. The results demonstrate that the land reclamation in those ecological and habitat-sensitive areas should be strictly regulated, and the “scrolling development mode” as a spatial strategy for coastal land reclamation is suggested, which addresses planning and organizing reclamation activities gradually from the inland area onward tidal wetlands by mainly utilizing marginal or fragmented habitats instead of encroaching tidal wetlands directly.

Key Words: land reclamation; human-natural coupling drives; land use change trajectory; coastal wetlands; Yellow River delta

滨海湿地是陆地、海洋和大气复杂交互作用下的生态过渡带,不仅承载着丰富的生物多样性,并对海陆间物质循环、能量流动和信息传递等发挥着廊道、过滤器和屏障等关键生态功能^[1-2]。黄河三角洲是我国北方重要的滨海湿地,具有全球意义的生物多样性保护价值,是全球尺度特别是东亚-澳大利亚鸟类迁徙网络的重要节点^[3],同时发挥着碳固存、净化水质和海岸防护等多种重要生态功能^[4-5]。自 20 世纪 70 年代以来,随着我国社会经济快速发展,不断增长的用地需求带动沿海地区大规模、高强度的围垦开发活动,导致以黄河三角洲、长江三角洲等为代表的滨海区域生态保护与社会经济发展矛盾日益突出,成为我国乃至全球滨海湿地保护和经济发展矛盾突出的典型代表^[6-7]。

2013 年起,国家海洋局与沿海地方各级人民政府划定海洋生态保护红线,开展海岸带整治修复,加强围填海管控。2018 年中共中央国务院发布了《国务院关于加强滨海湿地保护严格管控围填海的通知》;2019 年 2 月山东省人民政府办公厅发布《关于印发山东省打好渤海区域环境综合治理攻坚战行动方案的通知》指出严格实施滨海湿地面积总量管控。2020 年国家发展改革委与自然资源部联合印发《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》明确“海岸带生态保护和修复工程”为规划的重大工程。强化围填海管控是从政策和实践层面对自然湿地的“节流”,湿地生态的保护修复规划和实践则需要合理“开源”。

理解高强度围垦开发下滨海湿地时空演变的驱动机制是开展受损滨海湿地修复,乃至构建兼顾“目标-成本-效益”协同的滨海湿地一体化保护修复规划的重要基础^[8-10]。当前景观演变研究往往局限于对比前后两个时间点的异同,难以揭示连续长时间序列多重驱动力下的时空动态格局。此外,目前对格局演变驱动机制的研究多关注气候、地形、人口、经济指标等驱动因子的影响,驱动力研究多采用地理探测器和多元回归分析实现,如最小二乘法(OLS)、地理加权回归(GWR)和时空地理加权回归(GTWR)等^[11-13]。这些基于统计相关的方法更多关注现状格局的静态驱动,在应用和发展中虽不断将格局演变的时空因素纳入考虑,但忽视了

驱动力本身的时空动态特性,自然-人为复合驱动的综合分析^[14],以及格局演变特征与自然-人为驱动力时空动态的对应关系。土地利用轨迹分析方法是针对同一地域的连续多时期(三个及以上)土地利用类型持续变化的分析方法^[15-16],能够表征景观格局的连续变化,但当前多用于揭示某一单一驱动下的景观演变动态,如森林砍伐、耕作、城市化或土壤侵蚀^[17],同样缺乏对综合驱动力的系统分析,且较少关注到不同驱动过程间的时空交互关系。然而,辨析自然-人为驱动力与湿地格局演变的时空耦合特征,明确湿地格局演变的关键驱动机制,这对于受高强度围垦开发剧烈影响的三角洲滨海湿地制定生态保护修复及合理的资源开发策略尤为重要^[18]。

因此,本研究将基于统计相关的自然-人为静态驱动分析推进到时空动态过程表征,量化分离不同类型人为活动和自然过程的贡献,在识别黄河三角洲滨海湿地演变驱动过程的基础上,通过追踪土地利用连续变化轨迹,构建滨海湿地景观演变的驱动过程轨迹,清晰展现空间单元在围垦开发期间多个时期土地利用剧烈变化的驱动过程时空格局。从而,分析围垦开发背景下综合驱动力对黄河三角洲滨海湿地格局演变的影响,辨析不同驱动过程类型之间时空耦合关系,揭示关键驱动机制,为黄河三角洲滨海湿地保护修复和生态管理提供相关的策略和建议。

1 研究区概况

黄河三角洲(36°48'22"N, 38°24'14"E, 117°59'20"E, 120°36'55"E)是我国北方典型的淤长型河口三角洲^[19],地处山东省北部,东临渤海,西接华北平原,总面积约 $1.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。黄河三角洲具有典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,雨热同季,年降水量分布不均,冷热干湿界限明显^[20],生态风险类型众多,风暴潮尤其多发^[21],生态敏感脆弱。

自 20 世纪 70 年代起,黄河三角洲所属东营、潍坊、莱州、滨州市的国内生产总值(GDP)呈现持续高速增长趋势,围垦开发的强度与日俱增。依托滨海地带蕴含丰富的地下油气资源,1974 年建立的我国第二大胜利油田带动了港口及其他工业的建设发展;莱州湾南岸地下卤水资源丰富,自 20 世纪 70 年代大规模的晒盐场不断扩增;此外,广阔的滩涂湿地促成了发达的沿海养殖产业。盐化工、渔业养殖和油气化业在历史发展中为山东省总经济发展提供了最高达 23%、56% 和 12% 的贡献率^[22]。虽然滨海湿地的围垦开发主导产业带来的经济增速十分可观,但却以牺牲自然生态系统及环境为代价,除占用相当面积的滨海湿地、直接破坏湿地格局、干扰生态过程和减弱生态功能的直接重大破坏外^[23],也给区域生态环境带来了潜在压力,严重威胁了黄河三角洲滨海湿地生态系统的健康发育。

2 研究方法

2.1 数据来源

六个时期(1976、1980、1990、2000、2010、2015 年)黄河三角洲土地利用数据由科技部国家重点基础研究发展计划(973/2013CB430400)“围填海活动对大江大河三角洲滨海湿地影响机理与生态修复”项目组提供,本文将原始分类合并为水体、滩涂、沼泽、养殖池、盐田、建设用地、林草地、耕地及未利用地九种用于研究(图 1)。该数据集基于美国地质勘探局(www.USGS.gov.)下载的 Landsat 系列遥感影像,经几何、正射校正,波段融合、裁剪等预处理,并将原始影像分辨率统一重分类为 30 m,后在 eCognition 软件中采用基于目标的监督分类方式对土地利用进行分类。最终,该数据实现了对滨海区各地类的有效提取和精细化分类^[24],经各年代的

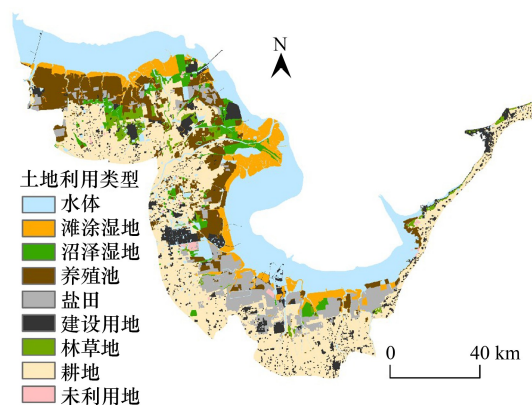


图 1 2015 年黄河三角洲土地利用类型分布

Fig.1 Land use types in the Yellow River Delta in 2015

现场调研资料、国家测绘地图及航片资料等进行土地利用类型分类准确性验证,制图精度 PA (Producer's accuracy)、用户精度 UA (User's accuracy) 和总体分类精度 OA (Overall accuracy) 均达到 82% 以上, Kappa 系数在 0.8 以上, 可满足研究的分析需求^[25]。该数据涵盖了黄河三角洲围垦开发强度最大的时段, 同时兼顾了本研究对数据精度、时效性和长时序的需求。

2.2 湿地格局演变驱动过程识别与驱动轨迹分析

滨海湿地格局演变受人为和自然复合驱动力的交互影响^[26]。针对复合驱动的时空动态特点, 建立了利用湿地景观演变的驱动过程轨迹研究驱动机制的方法, T1、T2、T3 和 T4 四个时期驱动过程变化轨迹的概念示意如图 2。景观演变的驱动过程指的是在某种驱动力下一种景观类型被转化为另一种的过程, 可通过前后两期景观类型间转化所反映出的驱动力、转换过程及生态关系等进行判识^[27]。为了从空间尺度上分析各驱动力对滨海湿地影响的过程, 本研究提出通过属性和空间关联实现驱动过程和湿地景观类型变化对应来表征景观演变的驱动过程。属性关联即驱动过程类型的识别。滨海湿地类型与其他土地利用类型间存在多种相互转化类型, 根据已有研究对其主导驱动力及转换过程分析^[28], 将复合驱动下三角洲滨海湿地的景观演变判识为六种驱动过程^[5] (表 1), 包括滨海湿地向海的淤积过程, 海水对海岸带的侵蚀冲刷, 滨海湿地生态系统由简

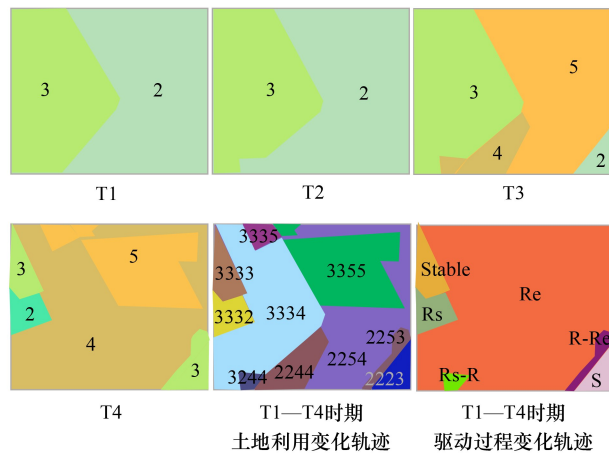


图 2 基于土地利用变化轨迹的驱动过程变化轨迹分析示意图

Fig.2 Schematic diagram of driving process change trajectory analysis based on land use change trajectory

图中 T1 至 T4 代表四个时期的景观分布情况示意, 图中数字代表各景观类型, 2: 滩涂湿地, 3: 沼泽湿地, 4: 养殖池, 5: 盐田; stable 代表在 T1—T4 时期内景观类型未发生变化, Rs: 逆向演替, Re: 围垦, R: 修复, S: 演替

表 1 滨海湿地格局演变的驱动过程类型

Table 1 Types of driving processes in the spatiotemporal dynamics of coastal wetland landscape patterns

驱动过程 Driving process	土地利用类型转换 Land use change	过程描述 Description of driving process	驱动过程属性 Attribute of driving process
淤长 Accretion	水体→滩涂/沼泽湿地	泥沙沉积淤长为新生湿地	自然
演替 Succession	滩涂湿地→沼泽湿地 未利用地→滩涂/沼泽湿地 滩涂/沼泽湿地→林草地	生态系统有简单到复杂演化	自然
逆向演替 Regressive	沼泽湿地→滩涂湿地 沼泽/滩涂湿地→未利用地 林草地→滩涂/沼泽湿地	生态系统由复杂到简单演化	自然
侵蚀 Erosion	滩涂/沼泽湿地→水体	水体冲刷/海平面上升等侵蚀淹没滨海湿地	自然
围垦 Reclamation	滩涂/沼泽湿地→养殖池/盐田/耕地/建设用地	人类对滨海湿地的围垦开发	社会经济
修复 Restoration	养殖池/盐田/耕地/建设用地→滩涂/沼泽湿地	围垦开发类型废弃后滨海湿地的修复	社会经济/自然

单到复杂的演替及由复杂到简单的逆向演替过程,滨海湿地被养殖池、盐田、耕地和建设用地等占用的围垦过程,以及围垦开发类型转化为滨海湿地的修复过程。接着,利用 ArcGIS 中的地图代数工具获取各时段(T1—T2、T2—T3、T3—T4)土地利用类型转换的空间格局,进而得到对应的驱动过程的空间分布格局,实现空间关联。最后将其依次连续叠加获得整个研究期内(T1—T4)包含时间动态的驱动过程变化轨迹。

2.3 驱动过程的时空相关性分析

本研究采用时空相关性分析进一步揭示滨海湿地格局演变驱动过程的时空交互特征。具体而言,基于上述动态轨迹分析方法串联连续多个时间要素的特点,能够将时间动态纳入空间分布。对于空间评价单元,根据各类型湿地格局的驱动过程在空间评价单元中的时间累积发生次数,进行相关性程度计算及相关性检验。基于 Pearson 相关性检验,通过 Ochiai 关联度指数(Ochiai index)分析各驱动过程间的相关性程度^[29],其计算方法如公式(1)。

$$K = \frac{n(A \cap B)}{\sqrt{n(A) \times n(B)}} \quad (1)$$

该公式为驱动过程类型 A 和 B 同时出现的评价单元数 n 与 A 和 B 分别出现的评价单元数乘积平方根的比值^[30]。式中, K 值表示时空相关性程度,A 和 B 代表驱动过程类型, n 表示评价单元数。对于通过了显著性检验的两个驱动过程, K 值为正表明正相关(Pearson 相关性检验),值越大表示驱动过程间时空耦合发生概率越大;负值表明负相关性,绝对值越大则表示二者时空越离散、越不可能发生时空交互。因不同尺度的评价单元对结果有所影响,一般采用多尺度梯度实验对结果比较后择优选择。因此,在研究区内建立 0.5 km×0.5 km、1 km×1 km、2 km×2 km、5 km×5 km 和 10 km×10 km 格网单元作为多尺度实验的评价单元。

3 研究结果

3.1 湿地格局演变的驱动过程动态特征

通过地图代数计算得到 1976—2015 年五个时段的各景观类型前后转化的空间分布数据,根据表 1 的识别方法进行判识,获得了各驱动过程在五个时段的空间分布格局(图 3)。六种驱动过程的空间分布格局体现了滨海湿地景观格局演变受自然和人为复合驱动的特点:淤积和侵蚀过程集中发生于浅海分布的潮下带区域,淤积过程主要发生在黄河入海口附近,其余岸线淤积较少而侵蚀较为严重。演替和逆向演替过程主要分布在滨海湿地生态系统上下层级较为完善的潮间带地区。围垦以及修复等相对聚集在内陆一侧,表明对滩涂和沼泽湿地的围垦开发比直接在浅海区先填海后开发的规模和力度更为严峻。结合各时段各驱动过程下湿地演变的年变化面积比较可知(图 3),1976—1980 年驱动过程以淤积、侵蚀和演替等湿地景观的自然变化为主,而 1980 年以后人为驱动的围垦逐渐突出。湿地修复的年均面积极不稳定,但从 1980 年以后其对湿地增加的年均贡献量超过湿地的演替和淤积等自然增长。

各驱动过程在不同时段引起的滨海湿地增加或减小的累积面积和净变化面积表明(图 3):围垦开发驱动下滨海湿地面积的损失比重最大(围垦开发的湿地损失速率为 76.7 km²/a),围垦开发占用湿地的面积远超过湿地的淤长(淤积下湿地扩增速率 26.96 km²/a)和演替(演替下湿地增长速率 16.92 km²/a)等自然扩张面积的总和。湿地修复的累积面积(湿地修复速度 52.2 km²/a)远超自然的淤长和演替面积,可见湿地修复是增加湿地面积中不可忽视的重要驱动过程;而湿地修复的净变化面积小,二者差距较大,表明随着时间变化,修复后的湿地又在其他驱动力作用下被改变为非自然湿地类型,由此导致累积面积和净面积的显著差异。

3.2 景观格局演变的驱动过程轨迹分析

黄河三角洲滨海湿地格局演变驱动过程轨迹的空间分布如图 4,其中面积贡献率大于 0.1%有 61 种。14 种主要类型(面积占比>1%)贡献了滨海湿地格局演变总面积的 81.9%,可见近 40 年来黄河三角洲滨海湿地格局演变的驱动过程轨迹类型尽管复杂多样,但仍主要受少部分驱动类型主导(图 4),其中围垦这一驱动过程对湿地总演变面积贡献度最大,占比为 22.4%。

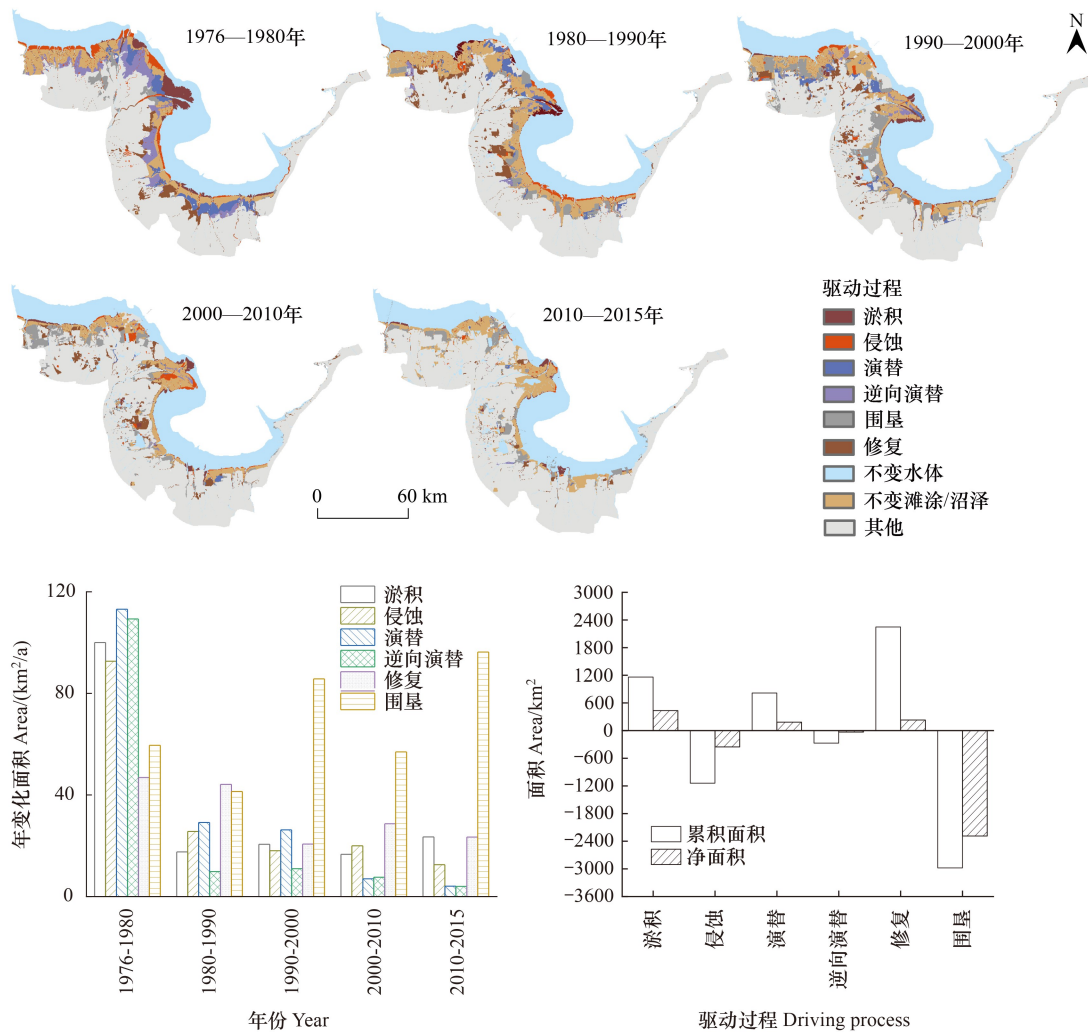


图3 1976—2015年黄河三角洲滨海湿地景观格局演变驱动过程的时空分布及影响面积

Fig.3 Spatiotemporal distribution and area of the driving process of the dynamics of coastal wetland landscape pattern from 1976 to 2015

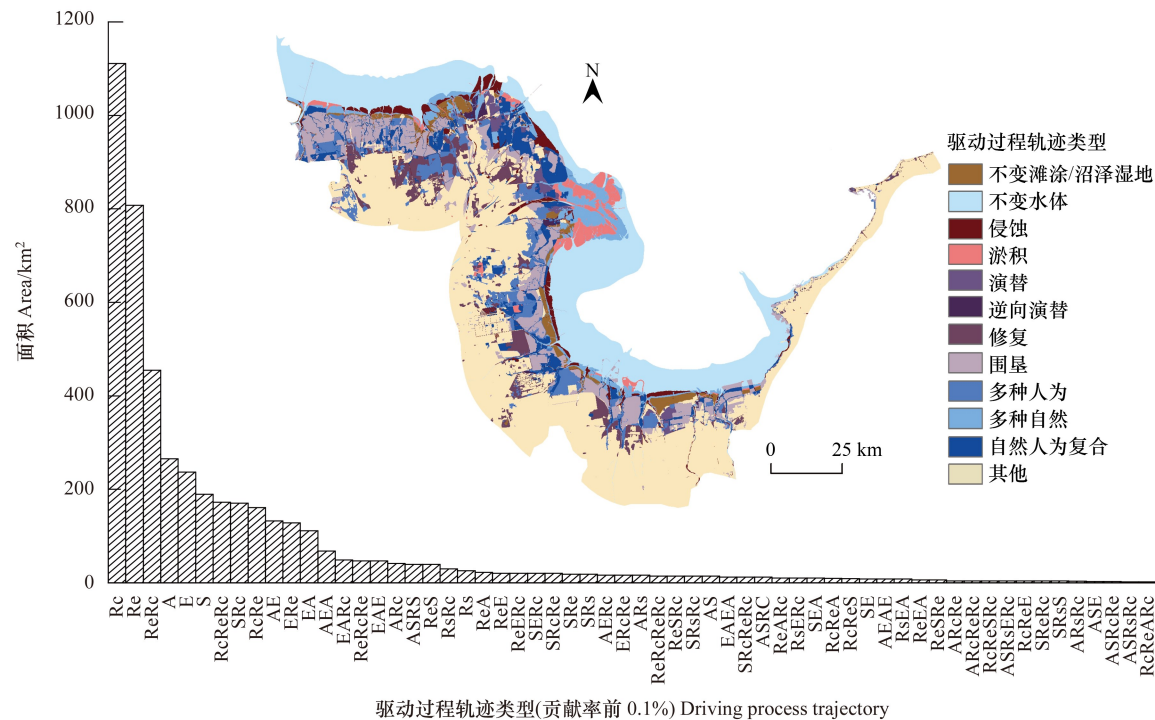
其他指该区域景观格局演变无滨海湿地类型参与

研究进一步分析了组成驱动轨迹的驱动过程转换频次,该值反映了湿地演变驱动力复合机制的稳定性,包含驱动过程越多、转换越频繁,表示湿地演变的复合驱动机制越复杂。转化频次统计分析表明:转换频次在两次及以下的轨迹类型驱动的湿地演变面积占总面积的87.0%;转换频次在两次以上的轨迹类型仅占13.0%(图4)。

6种单一驱动过程影响下的湿地变化面积占总变化面积的53.2%,尤其单一的围垦驱动类型对湿地面积变化的贡献最大,单一修复过程对湿地演变总面积贡献率也较大(图4);132种复合驱动过程轨迹类型(如ASRc类型中A(淤积)和S(演替)属于自然驱动力,Rc(围垦)属于社会经济因素驱动,因此将其归自然人为复合驱动类型)贡献了46.8%的湿地面积变化,其中80种复合类型中均有围垦开发驱动过程参与,占据总演变面积的55.0%。黄河三角洲滨海湿地格局演变中有55.5%的面积受人为驱动因子主导,26.1%为自然驱动因子主导,18.4%受自然-人为复合驱动因子影响;人为驱动是自然驱动和复合驱动的2.1倍和3.0倍(图4)。

3.3 驱动过程的时空交互特征

通过比较五个梯度尺度实验的时空相关性分析结果,5 km×5 km评价单元的可解释性较强且较符合实际情况。根据驱动过程的相关性分析可以探究1976—2015年引起黄河三角洲滨海湿地景观格局演变的各驱动



驱动过程轨迹类型(贡献率前 0.1%) Driving process trajectory

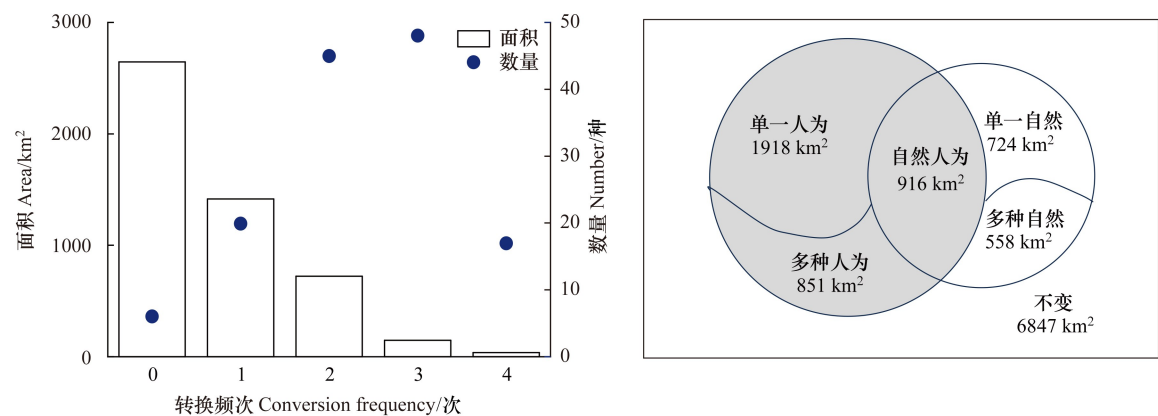


图 4 黄河三角洲滨海湿地格局演变驱动过程轨迹类型的空间分布、面积及转换频次

Fig.4 Spatial distribution, area and conversion frequencies of trajectory types driving the spatiotemporal dynamics process of coastal wetland patterns in the Yellow River Delta

A: 淤积; E: 侵蚀; S: 演替; Rs: 逆向演替; Rc: 围垦; Re: 修复

过程的时空交互特征。结果表明(表 2),共有六组驱动过程表现出显著的时空相关性($P<0.05$)。其中,相关性程度最大的是淤积和侵蚀过程(0.556^{***}),二者分别作为自然状态下维持和削减滨海湿地生长的重要驱动过程,这与实际情况中二者在潮下带频繁交互关系一致。围垦和修复表现出极显著且关联程度较高的时空相关性(0.515^{***}),修复过程在空间分布上多与围垦开发过程毗邻,同时从时间轨迹的动态变化上,二者容易反复发生,这与修复本身是基于围垦开发类型的废弃有关,因此围垦和修复表现出极显著且关联程度较高的时空相关性。侵蚀和逆向演替过程表现出极显著中等关联程度的相关性(0.465^{**}),主要原因是二者在空间上有聚集性倾向,可能由于在海水冲刷或海平面升上淹没情况下水文土壤等理化性质易受影响,更适宜等级较低的滨海湿地生态系统发育,因此易引发较高等级生态系统的逆向演替。淤积和逆向演替(0.370^{*})表现出显著时空相关性,通过分析驱动过程轨迹发现是因为有一部分新淤积的湿地先发生演替,后又发生逆向演替。

围垦和淤积(0.437^{***})以及侵蚀过程(0.195^{*})均表现出显著时空相关性,前者是由于围垦对新淤积湿地的直接占用主导;从驱动过程轨迹分析可知,后者是因为围垦占用的滨海湿地一部分来自受海水侵蚀后的浅海水域,另一部分占据了淤积和侵蚀时空交互密切的新生湿地,间接引起较强的关联。

表 2 各驱动过程间的时空相关性特征

Table 2 Spatiotemporal correlation between different driving processes

驱动过程 Driving process	围垦 Reclamation	修复 Restoration	淤长 Accretion	演替 Succession	逆向演替 Regressive	侵蚀 Erosion
围垦 Reclamation	1					
修复 Restoration	0.515 ^{***}	1				
淤长 Accretion	0.437 ^{***}	0.85	1			
演替 Succession	0.034	-0.06	-0.07	1		
逆向演替 Regressive	0.135	0.47	0.370 [*]	-0.064	1	
侵蚀 Erosion	0.195 [*]	0.206	0.556 ^{***}	-0.055	0.465 ^{***}	1

*** 表示 0.01 检验水平下(双侧)的极显著相关($P < 0.01$), * 表示 0.05 检验水平下(双侧)的显著相关($P < 0.05$)

4 讨论

土地利用变化下持续的湿地格局演变轨迹实质上反映了自然和人为等综合驱动下的时空交互过程^[31]。相对于以往研究^[11-12],通过驱动轨迹方法能够分离自然、人为干扰驱动力的时空格局,分离、识别出的人为驱动导致的湿地退化格局是确定潜在修复区域的重要依据^[8]。驱动轨迹分析结果显示单一的围垦驱动过程对湿地面积变化的贡献最大,表明一旦湿地被开发为社会经济生产用地类型后,其用地性质将较为稳定。尽管已开展部分退养还湿等湿地修复工程,但仍远低于围垦导致的湿地损失,可见,到 2015 年黄河三角洲滨海湿地仍有较大的生态修复空缺。同时,有围垦参与的复合驱动过程中围垦一般发生在湿地自然过程之后,意味着围垦开发破坏了自然过程驱动下湿地演变格局,阻断了湿地自然演替过程,因此,在考虑湿地空间格局优化时,应兼顾围垦前自然过程塑造的湿地类型的修复以及滨海湿地开发的经济效益。

驱动过程的时空交互关系能够为滨海湿地的开发和持续发展提供指示。侵蚀和逆向演替过程显著的空间和因果关联表明:海岸侵蚀导致的新生湿地及盐沼等先锋生境类型的丧失一定程度导致了逆向演替和生境退化,因此,应仔细评估、调控上述人类活动的影响,维持侵蚀与淤长的动态平衡,排除环境因子变差等不利于维持正常的生态系统发育的潜在影响因素,预防湿地生态系统的持续退化,保障自然湿地的无净损失并促进其自然增长和正向演替过程^[32]。围垦与修复、淤长和侵蚀过程均显示较为显著的时空相关性特征,结合驱动力轨迹分析可知点状修复后的湿地仍存在局部重新转化为其他类型用地的现象,一定程度表明历史时期围垦开发的普遍性及人为活动缺乏合理组织管理和区域尺度的空间布局,指示修复湿地应优化布局且修复后的湿地需要进一步强化用途监管。另外,因为泥沙沉积、冲刷等导致的海岸淤长和侵蚀是塑造新生滨海湿地的自然过程,其彼此之间的动态消长决定了新生滨海湿地海向延展和陆向退缩,该区域开展围垦将严重干扰、阻断新生湿地生态系统的自然演替过程,而已修复区域或周边的围垦,显然也将对修复湿地产生新的干扰胁迫^[33]。

综上,研究结果论证了对于类似黄河三角洲等淤长型湿地,应遵循滨海湿地生境演替规律,采取由陆向海逐步推进、与新生湿地淤长方向一致“滚动开发”资源利用模式的合理性^[34]。“滚动开发”模式要求严禁在滨海湿地早期及演替系列生境内部开展围垦等经济活动以免破坏演替系列的完整性和湿地淤长等自然更新机制;应避让滨海湿地具有重要生态功能和保护物种分布的核心生境,主要占用滨海湿地内陆边缘部分。在该模式下,滨海湿地生境演替过程没有被人为活动中断,仍然正常延续并不断生成新生湿地,人为开发活动主要占用滨海湿地内陆边缘部分受人为干扰较严重的退化生境,而这些低质退化生境的损失能通过不断增长的新生湿地得以补偿,以维持自然湿地质量或数量的相对稳定和自然湿地的零净损失。2019 年后,山东黄河三角

洲国家级自然保护区开展了黄河口湿地修复工程,结合其生物学特性、生态群落及立地土壤等条件,开展了盐地碱蓬、海草床等海岸带原生态系统带状修复,以期实现“一次修复、自然演替、长期稳定”,改善了盐碱滩面貌和湿地生境^[35],修复效果验证了本文连通生境演替过程重要性的研究结果。

因此,在滨海湿地开展受损湿地修复并采取“滚动”开发模式符合生态保护和社会经济高质量发展的需求,在考虑经济利益的同时,能有效维护湿地生态系统的完整性和演替的连续性,为滨海湿地生态安全格局构建及优化提供指示。此外,本文的研究基于土地利用数据开展,基础数据存在遥感解译误差,会进一步影响驱动过程及驱动轨迹的判识精度。在后续的研究中可结合实地调研广泛的验证精度,并合理划定驱动过程判定的空间尺度阈值,以优化研究结果。

5 结论

本文依据土地利用变化映射驱动过程,利用动态轨迹分析方法串联连续多个时间要素,将时间动态纳入空间分布,通过综合空间格局分布,驱动过程年度、累积和净变化,驱动轨迹贡献率,轨迹内驱动过程转换频次,以及驱动过程的时空相关性,分离自然、人为干扰驱动力的时空格局,空间化和定量化表征驱动过程对滨海湿地的影响。本文提出的研究方法不仅突破了基于统计分析的现状格局静态驱动机制研究,同时克服了湿地格局演变的综合驱动时空交互机制研究的不足,这对厘清长期受到自然-人为复合影响下景观格局演变剧烈区域的复杂驱动机制很重要且普遍适用。

黄河三角洲滨海湿地景观格局演变 55.54%受人为因素驱动,26.08%受自然驱动,18.38%受自然-人为复合驱动。虽然景观格局演变的驱动过程轨迹类型多样,但以少数驱动过程轨迹类型主导,且驱动过程间复合关系稳定,三次以上频繁转换的景观演变占比较小。淤积与侵蚀和逆向演替,围垦与修复、淤积和侵蚀,侵蚀与逆向演替共六组驱动过程表现出显著的时空相关性。单一的围垦开发对湿地演变贡献率最大,同时通过与其他过程的复合交互,干扰了自然湿地演变发育规律,尤其是阻断了淤积和修复驱动下湿地的增长过程,最终将原本自然状态下的湿地净增长演变方向逆转为负增长。驱动轨迹和驱动过程的时空相关性分析揭示了多驱动时空动态交互对黄河三角洲滨海湿地景观格局的影响机制,为滨海湿地生态安全格局构建及优化提供指示。

参考文献 (References):

- [1] Bianchi T S, Allison M A. Large-river delta-front estuaries as natural “recorders” of global environmental change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(20): 8085-8092.
- [2] Gedan K B, Kirwan M L, Wolanski E, Barbier E B, Silliman B R. The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm. *Climatic Change*, 2011, 106(1): 7-29.
- [3] Cui B S, Yang Q C, Yang Z F, Zhang K J. Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China. *Ecological Engineering*, 2009, 35(7): 1090-1103.
- [4] Fang L L, Wang L C, Chen W X, Sun J, Cao Q, Wang S Q, Wang L Z. Identifying the impacts of natural and human factors on ecosystem service in the Yangtze and Yellow River Basins. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 127995.
- [5] Ma T T, Li X W, Bai J H, Ding S Y, Zhou F W, Cui B S. Four decades' dynamics of coastal blue carbon storage driven by land use/land cover transformation under natural and anthropogenic processes in the Yellow River Delta, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 741-750.
- [6] Barbier E B, Koch E W, Silliman B R, Hacker S D, Wolanski E, Primavera J, Granek E F, Polasky S, Aswani S, Cramer L A, Stoms D M, Kennedy C J, Bael D, Kappel C V, Perillo G M E, Reed D J. Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological functions and values. *Science*, 2008, 319(5861): 321-323.
- [7] Ottinger M, Kuenzer C, Liu G H, Wang S Q, Dech S. Monitoring land cover dynamics in the Yellow River Delta from 1995 to 2010 based on Landsat 5 TM. *Applied Geography*, 2013, 44: 53-68.
- [8] 李晓文, 智烈慧, 马田田, 刘增力, 崔保山, 邵冬冬, 曹宇, 穆泳林. 构筑基于“三线整合”的中国滨海湿地生态安全格局. *中国科学院院刊*, 2023, 38(1): 123-133.

- [9] 李晓文, 吕江涛, 智烈慧, 梁芳源, 裴元生, 李迎霞, 孟耀斌, 廖丹琦, 穆泳林. 基于“目标-成本-效益”协同优化的山水林田湖草沙一体化生态保护与修复格局. 生态学报, 2023, 43(9): 3625-3635.
- [10] 智烈慧, 周方文, 李晓文, 马田田, 邵冬冬, 白军红, 崔保山, 郭卫华. 基于生态系统服务优化的滨海湿地一体化保护-修复格局构建. 自然资源学报, 2023, 38(12): 3150-3165.
- [11] 祝聪, 彭文甫, 张丽芳, 罗瑶, 董永波, 王梅芳. 2006-2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力. 生态学报, 2019, 39(5): 1583-1594.
- [12] 张瑞, 李朝奎, 姚思好, 李维贵. 融合地理探测器和地理加权回归的太原市建设用地变化因素研究. 测绘通报, 2022(5): 106-109, 119.
- [13] 张初蕊, 陈立欣, 王丽群, 宋午椰, 阎祉祎. 黄河流域生态系统服务价值时空异质性及驱动因素分析. 北京林业大学学报, 2024, 46(6): 70-81.
- [14] Zheng L, Wang Y, Li J F. Quantifying the spatial impact of landscape fragmentation on habitat quality: a multi-temporal dimensional comparison between the Yangtze River Economic Belt and Yellow River Basin of China. Land Use Policy, 2023, 125: 106463.
- [15] Geist H, McConnell W, Lambin E F, Moran E, Alves D, Rudel T. Causes and trajectories of land-use/cover change. Lambin E F, Geist H, eds. Global Change - The IGBP Series. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, 41-70.
- [16] Feng H H, Zhao X F, Chen F, Wu L C. Using land use change trajectories to quantify the effects of urbanization on urban heat island. Advances in Space Research, 2014, 53(3): 463-473.
- [17] Wang D C, Gong J H, Chen L D, Zhang L H, Song Y Q, Yue Y J. Comparative analysis of land use/cover change trajectories and their driving forces in two small watersheds in the western Loess Plateau of China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 21: 241-252.
- [18] Quintero-Gallego M E, Quintero-Angel M, Vila-Ortega J J. Exploring land use/land cover change and drivers in Andean Mountains in Colombia: a case in rural Quindío. Science of the Total Environment, 2018, 634: 1288-1299.
- [19] 肖笃宁, 韩慕康, 李晓文, 刘岳峰. 环渤海海平面上升与三角洲湿地保护. 第四纪研究, 2003, 23(3): 237-246.
- [20] Li S N, Wang G X, Deng W, Hu Y M, Hu W W. Influence of hydrology process on wetland landscape pattern: a case study in the Yellow River Delta. Ecological Engineering, 2009, 35(12): 1719-1726.
- [21] 许学工, 林辉平, 付在毅, 布仁仓. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价. 北京大学学报: 自然科学版, 2001, 37(1): 121-127.
- [22] 姜秉国, 韩立民. 山东半岛蓝色经济区发展战略分析. 山东大学学报: 哲学社会科学版, 2009(5): 92-96.
- [23] 靳宇弯, 杨薇, 孙涛, 李铭. 围填海活动对黄河三角洲滨海湿地生态系统的影响评估. 湿地科学, 2015, 13(6): 682-689.
- [24] Ren C Y, Wang Z M, Zhang B, Li L, Chen L, Song K S, Jia M M. Remote monitoring of expansion of aquaculture ponds along coastal region of the Yellow River Delta from 1983 to 2015. Chinese Geographical Science, 2018, 28(3): 430-442.
- [25] 陈琳, 任春颖, 王灿, 姚云长, 宋开山. 6 个时期黄河三角洲滨海湿地动态研究. 湿地科学, 2017, 15(2): 179-186.
- [26] Kirwan M L, Megonigal J P. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise. Nature, 2013, 504(7478): 53-60.
- [27] Ma T T, Li X W, Bai J H, Cui B S. Tracking three decades of land use and land cover transformation trajectories in China's large river deltas. Land Degradation & Development, 2019, 30(7): 799-810.
- [28] Gedan K B, Silliman B R, Bertness M D. Centuries of human-driven change in salt marsh ecosystems. Annual Review of Marine Science, 2009, 1: 117-141.
- [29] da Silva Meyer A, Garcia A A F, de Souza A P, de Souza C L Jr. Comparison of similarity coefficients used for cluster analysis with dominant markers in maize (*Zea mays* L). Genetics and Molecular Biology, 2004, 27(1): 83-91.
- [30] Jackson D A, Somers K M, Harvey H H. Similarity coefficients: measures of co-occurrence and association or simply measures of occurrence? The American Naturalist, 1989, 133(3): 436-453.
- [31] Watson S J, Luck G W, Spooner P G, Watson D M. Land-use change: incorporating the frequency, sequence, time span, and magnitude of changes into ecological research. Frontiers in Ecology and the Environment, 2014, 12(4): 241-249.
- [32] 尹聪, 兰丽茜, 宋晓晓, 陈默, 严晋. 黄河三角洲湿地发展概述及治理修复建. 海洋开发与管理, 2024, 41(2): 110-114.
- [33] Ma T T, Li X W, Bai J H, Cui B S. Impacts of coastal reclamation on natural wetlands in large river deltas in China. Chinese Geographical Science, 2019, 29(4): 640-651.
- [34] 李晓文, 李梦迪, 梁晨, 诸葛海锦. 湿地恢复若干问题探讨. 自然资源学报, 2014, 29(7): 1257-1269.
- [35] 许明德. 以“黄河口湿地修复模式”促进黄河三角洲生态系统良性循环. 2023-01-08. <https://res.cenews.com.cn/h5/news.html-id=1027651>.