

# 黄河三角洲湿地生态退化修复的应用研究进展

蔡馨燕<sup>1</sup>, 王毅<sup>2</sup>, 陈英凯<sup>3</sup>

(1.山东省科学技术情报研究院, 山东 济南 250101; 2.鲁东大学 资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025;  
3.山东省农业科学院, 山东 济南 250131)

**摘要:**系统综述了黄河三角洲湿地生态退化现状及退化原因,并对其进行生态修复技术进行概括归纳。发现黄河三角洲湿地退化严重,总体面积逐年缩减,同时组成结构发生改变,自然湿地不断减少而人工湿地逐渐增加,景观格局呈现破碎化趋势,生态系统服务功能严重退化。造成黄河三角洲湿地生态退化的原因主要包括黄河水沙通量减少、海-陆交互作用增强、土壤盐渍化加剧、气候暖干化、外来物种入侵和人类活动。目前采用的生态修复技术包括生物组分修复、水体修复、土壤改良和综合生境修复。最后针对性地提出黄河三角洲湿地修复建议,对实践黄河流域生态保护和高质量发展的国家重大战略具有重要意义。

**关键词:**黄河三角洲;退化湿地;湿地环境;生物多样性;生态修复;环境污染;海岸景观

中图分类号:X-1 文献标志码:A 文章编号:1002-4026(2023)06-0112-09

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



## Progress of applied research on the ecological degradation and restoration of wetlands in the Yellow River Delta: a review

CAI Xinyan<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>2</sup>, CHEN Yingkai<sup>3</sup>

(1. Shandong Institute of Scientific and Technical Information, Jinan 250000, China;  
2. College of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China;  
3. Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250131, China)

**Abstract:** A systematic review was conducted on the current status and causes of the ecological degradation of wetlands in the Yellow River Delta (YRD), and the ecological restoration technologies were summarized. The results revealed that the wetland areas in the YRD are currently in a serious state of degradation, with the total area of wetlands shrinking year by year. Along with the shrinking of the wetland area, the wetland composition has changed, natural wetlands are decreasing while artificial wetlands are gradually increasing, the pattern of the landscape shows a trend toward fragmentation, and the service function of the ecosystem has been seriously degraded. The main causes of wetland ecological degradation in the YRD include the reduction of water and sediment fluxes from the Yellow River, increased

收稿日期:2023-08-28

基金项目:山东省民盟省委 2022 年重点调研项目(盟鲁[2022]13 号)

作者简介:蔡馨燕(1977—),女,副研究员,研究方向为科技战略规划与科技情报研究。E-mail:191523972@qq.com

sea-land interactions, intensified salinization of the soil, climate change, invasive species, and human activities. Current ecological restoration techniques for wetland restoration include biocomponent restoration, water body restoration, soil improvement, and comprehensive habitat restoration. This study will ultimately provide specific recommendations for wetland restoration in the YRD, which is of great significance for the national strategy of ecological protection and the high-quality development of the YRD.

**Key words** : Yellow River Delta; degraded wetlands; wetland environment; biodiversity; ecological restoration; environmental pollution; coastal landscape

黄河三角洲湿地是黄河流域保存最为完整、面积最大的一片湿地,以浅海、滩涂、沼泽等为主要内容,具有保护生物多样性、控制污染、蓄水调洪、调节气候等多种生态功能。黄河三角洲拥有丰富的自然资源,是实现海洋、渔业、盐业、石化工业可持续发展的先决条件,是整个黄河三角洲地区经济健康发展的重要保障<sup>[1-5]</sup>。黄河三角洲作为黄河流域生态保护与治理的四大重点区域之一,维护黄河三角洲地区生态平衡对实现黄河流域生态保护和高质量发展的国家重大战略目标具有重要意义<sup>[6-8]</sup>。

由于人类活动干扰和自然因素的综合影响,黄河三角洲湿地面积大幅降低。在人为方面,开垦湿地、修建水利工程等活动,改变了黄河三角洲水文过程,导致区域内湿地水体营养不足以及高度盐渍化<sup>[9]</sup>;在人为活动干扰严重的地方,湿地植被类型单一,植被群落的各种指标均较低<sup>[10]</sup>。在自然方面,黄河流域连年干旱少雨,枯水期增长,湿地水资源短缺,导致湿地生态系统不断退化<sup>[11]</sup>。这一系列人为与自然因素导致黄河三角洲湿地环境、生态、灾害和资源4大问题凸显<sup>[12]</sup>。因此,黄河三角洲湿地亟待生态环境保护与修复<sup>[13-14]</sup>。

长久以来,我国一直在实施许多湿地生态恢复项目,主要是通过自然恢复和工程修复相结合,进行退耕还湿、退耕还滩,从而恢复其退化的生态系统,但这些修复措施耗时长、成本高、成效低<sup>[15]</sup>,不符合当前绿色低碳发展需求。国内外研究人员针对湿地生态保护与修复,创新了一系列的技术和产品,比如生物组分修复、水体修复、土壤改良和生态修复等技术,以及土壤改良剂和污染物吸附消纳材料等<sup>[16-17]</sup>。但黄河三角洲正在遭受剧烈变化的人类发展活动与自然环境演变的影响,部分修复手段和产品起到的作用并不明显<sup>[18]</sup>。因此,本文分析黄河三角洲湿地生态退化现状及原因,以目前的生态修复手段为研究重点,系统地探究我国黄河三角洲湿地生态退化修复领域的总体研究进展与热点,明确现状问题,为黄河三角洲湿地以及其他河口滨海湿地的生态退化修复提供有效建议。

## 1 黄河三角洲湿地生态退化现状

黄河三角洲湿地不断退化和萎缩,导致湿地生态健康和可持续发展受到严重影响。遥感影像数据分析表明,1990—2020年,黄河三角洲湿地面积呈现先减少后增加的趋势,从1990年的1 459.5 km<sup>2</sup>减少到2000年的1 437.4 km<sup>2</sup>再增加到2020年的1 975.5 km<sup>2</sup>。滩地湿地显著减少约35.3%,养殖池塘显著增加约644.3 km<sup>2</sup><sup>[19]</sup>。

近年来,黄河三角洲湿地环境、生态、灾害和资源4大问题凸显,严重影响湿地生态服务功能。工农业污染、围海造地导致湿地环境受到污染,湿地面积锐减,湿地水土质量也受到严重影响<sup>[20]</sup>;生物多样性降低、景观多样化受损,导致湿地生态平衡受到负面影响;赤潮、海岸侵蚀、海水入侵和油田开发等自然和人为导致的灾害,严重影响湿地资源的可持续发展;渔业资源的短缺和人为养殖的增加,导致湿地环境压力增大,湿地生态不断退化<sup>[21]</sup>。此外,外来物种的入侵也严重影响湿地功能,例如,互花米草的外来侵入,导致黄河口湿地的芦苇、盐碱蓬等原生植物物种的分布面积减小,减少速率分别为0.72 km<sup>2</sup>/y与0.39 km<sup>2</sup>/y,芦苇斑块数目、斑块密度均有明显的降低<sup>[22]</sup>。这些问题相互交织,对黄河三角洲湿地的生态服务功能和景观功能造成严重影响<sup>[23]</sup>。

## 2 黄河三角洲湿地生态退化原因

黄河三角洲湿地生态环境的恶化,是人类活动与自然过程相互作用的结果。黄河三角洲内油田开发、围

垦、养殖、堤坝、公路等大规模的人类活动,侵占了沿海地区的大片土地,直接导致海岸湿地的结构和功能遭受了严重的损害<sup>[24]</sup>,工业和农业活动所产生的废水、生活污水以及油污等排放,长期以来未受到有效控制,造成了滩涂水体、盐沼以及土壤环境的严重污染,还对周边海洋生态系统造成了不可逆转的影响<sup>[25]</sup>。除了人为干扰,自然因素也在加剧湿地生态恶化。黄河入海水量的减少以及泥沙供应的不足,直接影响了三角洲湿地的自然补给,造成湿地面临淡水资源短缺的困境<sup>[26]</sup>。同时,海洋动力的加强也进一步削弱了湿地的稳定性,加速了湿地的退化进程<sup>[27-28]</sup>。

### 2.1 黄河水沙通量减少

黄河三角洲湿地的形成与发展,以黄河水、沙资源为基础。上世纪70年代开始,黄河入海流量和泥沙淤积量显著下降,并有越来越严重的趋势。虽然黄河自2000年调水调沙后,没有出现过断流现象,但泥沙流量很低<sup>[29]</sup>。2009年利津水文站的年径流量为140.9亿吨,是近50年来平均径流量的41%;年泥沙输送能力只有1.34亿吨<sup>[30]</sup>。黄河水沙通量缩小,造成三角洲湿地生态系统中淡水资源量大幅降低,土壤含盐量增加,不仅引起植被多样性减少,更加重湿地生态系统的破坏与退化<sup>[31]</sup>。同时,黄河来水量减少,也会造成河道对氮磷营养盐的消纳持留能力下降,河口湿地氮磷污染加重,提高了近海赤潮发生几率,危及湿地环境治理与生态系统服务功能<sup>[32]</sup>。

### 2.2 海-陆交互作用增强

黄河近岸和河口的沉积动态变化十分显著。首先,黄河流域每年调沙活动不仅使河口潮汐动力变化,还会对泥沙沉积进程造成一定影响<sup>[33]</sup>。其次,黄河三角洲潮间带海岸线发生演变,随着新淤泥的生成,潮间带海岸线正在逐渐变浅,导致原有的潮汐作用减弱甚至消失。由于黄河三角洲海岸湿地淡水补充和潮汐效应的削弱,导致盐碱化问题日益突出<sup>[34]</sup>。再次,黄河河道变化频繁也是一个重要的问题,每当改道入海时,河口就会出现一个巨大的沙嘴,而废弃水道也会受到海力的侵蚀,导致黄河流线经常性处于“淤积-抬高-漫流-摇摆-改道”的周期性变化中<sup>[35]</sup>。这种剧烈变化的海-陆交互作用加剧了黄河三角洲海岸湿地生态环境的恶化。

### 2.3 气候暖干化

受全球变暖影响,黄河三角洲呈现暖干化趋势,区域降水量下降明显。黄河三角洲平均降雨量592 mm,多年平均蒸发量1550 mm,且年内降水分配极其不均,7~8月占全年降水的48.9%,冬春季的蒸降比高于2,甚至超过6<sup>[36]</sup>,降水量减少导致湿地水源的匮乏,难以维持正常的生态功能,尤其是冬春季节性干早期。冬春季节性干早期会导致冬春土壤返盐严重<sup>[37-38]</sup>。气候暖干化趋势造成的年降水量减少和季节性干旱频率增加,将使土壤盐碱化程度进一步加剧,一些盐分耐受能力不强的本土植物产生胁迫影响,可能导致植被的改变和生态系统的不稳定,从而引起湿地盐生植物群落演替和湿地生态环境恶化<sup>[39-40]</sup>。

### 2.4 人类经济活动加剧

导致黄河三角洲湿地退化的人类活动主要包括油田开采、围海养殖、农业发展、城镇化活动等<sup>[41]</sup>。这些活动导致了大量的土地开发和围垦,这直接引起了湿地面积的减少,破坏了湿地的完整性和生态功能。黄河三角洲天然湿地面积在1976—2014年间呈逐年递减趋势,耕地面积不断扩大。到2015年,黄河三角洲自然湿地的碎裂化程度和斑块形态的复杂性都明显提高,而滩涂面积则显著减少。以农业活动为例,一方面,农田频繁的引黄灌溉,与湿地竞争淡水资源,水资源的匮乏使得湿地难以维持正常的水生态系统<sup>[42]</sup>;另一方面,农业施用的大量化肥与退水排盐,造成下游受纳湿地盐、氮、磷、农药、抗生素输入量增加,加重了湿地生态净化功能负担并危及湿地生态系统的健康<sup>[43]</sup>。

### 2.5 互花米草入侵威胁湿地生物多样性

互花米草(*Spartina alterniflora*)原产于北美地区,具有生长迅速、耐盐碱、强大的生殖能力等特点,在引入中国后迅速扩张成为入侵物种。自2010年起,互花米草在黄河三角洲的分布面积和规模不断扩大,截至

2015年,互花米草覆盖面积超过 $20\text{ km}^2$ <sup>[44]</sup>。互花米草入侵导致黄河三角洲湿地生态系统趋向简化,系统内能流和物流中断或不畅,系统自我调控能力减弱,生态系统稳定性和功能有序性降低。研究表明,互花米草的生长会消耗大量水分,导致湿地水源减少,加剧湿地退化<sup>[45]</sup>。互花米草生长也会改变湿地微地形和水流状况,影响湿地的水动力学过程。互花米草的竞争性生长还会使得本土植物难以存活,威胁本土湿地植物的多样性<sup>[46]</sup>。由于互花米草的侵入,黄河口湿地内芦苇和盐碱蓬的分布范围逐渐减少,湿地景观斑块呈现破碎化,景观类型趋于多样化与均匀化,景观异质性降低,对湿地植被多样性、底栖动物与鸟类的生存环境产生负面影响<sup>[47-48]</sup>。

### 3 黄河三角洲湿地生态修复技术

湿地生态修复是指根据自然、可行性等原则,选择合理的生态修复策略,以恢复退化湿地原有的结构和功能,并尽量保持其稳定<sup>[49]</sup>。生态修复包括自然恢复与人工修复。自然修复指在消除了外部环境的压力和干扰后,经过一段时间的自然恢复,形成了一个比较理想的生态系统<sup>[50]</sup>。人工修复指在排除了外部的压力和干扰后,仅靠自然过程是很难或无法恢复到预期的,需要借助人为干预手段来进行修复,通常是对破坏超过一定阈值、不能恢复的湿地生态系统进行修复。根据上文所提到的黄河三角洲湿地退化原因,本文将黄河三角洲退化湿地生态修复技术归纳为生物组分修复、水体修复、土壤改良和综合生境修复4个部分<sup>[51]</sup>。

#### 3.1 生物组分修复

##### 3.1.1 植物群落重建技术

在滨海盐沼和淡水湿地的基础上,通过引入种植碱蓬、盐碱蓬、芦苇等本土湿地植物,增加生物多样性、提高湿地生产力<sup>[52]</sup>。或者通过优化和提升土壤种子库,如盐地碱蓬种子库的强化与促发技术,柽柳和芦苇群落的种子库的改造技术,促进湿地植被物种更新和植被演替。植物群落重建可以结合生态工程方法,如建立湿地过滤系统、植物滨岸带和人工湿地,缓解湿地盐渍胁迫、减轻水土污染。例如辽河河口正在实施的修复工程,采用了本土先锋植物碱蓬,修复效果明显,但工程对时间和人力需求比较大,对气象和气候条件要求严格,且后期监管和维护也需额外的资源<sup>[53]</sup>。

##### 3.1.2 生物入侵防治技术

采取工程、物理、化学等多种方法对外来植物进行杀死和清理,防止其再次侵入。工程措施包括围堰、淹水、晒地、引水;物理措施包括刈割、铲除、火烧等,防止其在当地建立繁殖种群;或者修建屏障、围栏等,限制入侵物种的移动和传播;化学防治方法以滩涂米草除控剂为主<sup>[54]</sup>。在采取防治技术后,常移栽本地植物,加速受损生态系统的修复和恢复,提高湿地生态系统对抗入侵物种的抵抗力,但此技术除成本高以外,其在黄河三角洲湿地实施的工程复杂性和风险也比较高。

##### 3.1.3 增殖和释放技术

在黄河三角洲湿地和海洋资源逐渐减少的情况下,根据水生动物种类构成,释放各种鱼类、虾、蟹、螺、贝等水生动物,使水生生态系统结构得到合理优化,恢复鱼类的种群与数量<sup>[55-56]</sup>。尤其在黄河三角洲地区,利用这种技术可以提高鱼类的数量和多样性,保持水生生态系统的完整性,维护渔业水体的生态平衡。在实施增殖和释放技术时,需要考虑水生动物生存率、遗传多样性、生态位竞争等问题,同时也需要系统追踪和评估实施过程对黄河三角洲湿地生态系统的影响<sup>[57]</sup>。

生物组分修复技术主要针对黄河水沙通量减少、影响湿地景观结构与功能稳定、生物多样性等问题,对黄河三角洲的水土进行固持,提升生态系统的稳定性及生态服务功能有较好作用。

#### 3.2 水体修复

##### 3.2.1 生态补水技术

生态补水技术主要靠水库、堤坝等蓄水方式,实现淡水资源的季节均匀分配,缓解湿地盐碱化程度,为湿地

中各类生物提供所需的生存和繁衍场所<sup>[58]</sup>。黄河三角洲湿地淡水资源短缺,可以通过历史径流量和生态-水文过程分析,优化湿地的生态补水方式、数量和补水时间,并建立起一种长效补水机制维持湿地咸淡水体系平衡<sup>[59]</sup>。但也需考虑水量不足,当地生产生活对水资源争夺等社会问题。

### 3.2.2 水系连接技术

水系连接技术主要通过疏通潮沟、涵洞改造、堤防拆除等措施强化水体直接的连续和水文交换。比如,有研究表明潮水可以保证翅碱蓬不会因为盐结晶而导致死亡,从而避免翅碱蓬群落退化<sup>[60-61]</sup>;但海堤会使地形抬高并造成潮汐作用减弱,造成翅碱蓬群落的退化。通过拆除堤坝,恢复潮汐作用,增加湿地的水流动性,可以促进翅碱蓬群落恢复<sup>[62]</sup>,但是相关技术实施时的水质变化、病害传播、维护和管理成本等问题也需考虑。

水体修复技术主要针对黄河三角洲黄河来水来沙持续减少,流路固化,河床下切,黄河与湿地、滩涂的水文联通性降低,淡水补给减少等问题,有利于调控区域内的海陆交汇总作用<sup>[63]</sup>。

## 3.3 土壤改良

### 3.3.1 微生物修复技术

黄河三角洲的胜利油田开采对湿地土壤环境造成巨大负面影响。虽然传统物理和化学修复方法能够有效减少土壤中的石油碳氢化合物,但成本过高,可能造成二次污染,对退化土壤生态功能的修复不足<sup>[64]</sup>。有研究表明,芽孢杆菌属(*Bacillus* spp.)和假单胞菌(*Pseudomonas* spp.)等特定微生物能较好地降解碳氢化合物,常常与生物表面活性剂一起用于土壤修复领域<sup>[65]</sup>。生物炭等富碳材料能够促进盐沼土壤中一些有利于植物生长的细菌(如根瘤菌和芽孢杆菌)繁殖,抑制一些有害真菌的生长,从而重塑微生物群落结构及其碳代谢功能,也能从微生物层面实现改善退化盐沼的生态系统服务功能<sup>[66]</sup>。对于黄河三角洲湿地,需考虑微生物修复技术是否适用于治理当地的污染物,技术实行是否符合当地的法律法规。

### 3.3.2 盐碱地改良技术

盐碱地改良技术主要采用水利、生物、物理、化学等方法,通过对土壤特性进行优化,建立适合于盐沼湿地生态修复的土壤环境<sup>[67]</sup>。主要途径有:

(1)水利改造。以排水方式将多余盐分排出农田,以减少土壤含盐量,常用的有暗管、明沟、竖井排水等<sup>[68]</sup>。

(2)生物改良。通过种植耐盐植物,能有效降低土壤水分蒸发和避免表面盐渍化,同时还能减少地下水含盐量,改善土壤生态环境<sup>[69]</sup>。

(3)物理改造。通过改变土壤和土体物理构造来调节水盐运移过程,以降低土壤水分蒸发和减少深层土壤盐上行输运<sup>[70]</sup>。

(4)化学改造。利用化学改良剂改变土壤中的吸附离子,以达到降低土壤pH、碱化度以及改善土壤结构的目的。常用的化学改良剂包括石膏、脱硫石膏、硫磺、腐殖酸、糠醛渣等<sup>[71]</sup>。

盐碱地改良技术可以较好地修复黄河三角洲湿地的盐碱状况,但此技术的可持续性也是需考虑和解决的问题。

## 3.4 综合生境修复

### 3.4.1 鸟类生境仿真技术

黄河三角洲湿地是鸟类主要栖息地,由于湿地退化造成的鸟类栖息地环境破坏,要根据鸟类生存习性,采取人工方法建立栖息环境,吸引鸟来栖息,从而使湿地鸟类的多样性得到恢复和提高。常用措施包括生境岛的隔绝、微细地貌改造、生态补充、围堰矮化、人工鸟窝、设置鸟食区、干扰隔离等<sup>[72]</sup>,但是此技术对气候、食物和栖息地要求较高,人工管理依赖程度也较高。

### 3.4.2 人工礁石技术

人工礁石是一种人造的结构,它可以模仿自然礁石的某些特征,为湿地水生动物提供安乐窝,可为湿地

鱼类的生长创造良好的生态环境,对保护渔业资源、保持海洋多样性、促进渔业资源的稳定和增殖有重要作用<sup>[73]</sup>,但其对黄河三角洲湿地水流和沉积也会产生影响。常见的人工礁石技术主要是在水体中放置混凝土构件、废旧船体、塑料和竹制建筑等。

综合生境修复技术整体技术要求高,且经济成本高,具体效果还有待进一步证实。

#### 4 结论与展望

黄河三角洲湿地退化严重,生态系统服务功能严重退化。造成黄河三角洲湿地生态退化的原因主要包括黄河水沙通量减少、海-陆交互作用增强、土壤盐渍化加剧、气候暖干化、外来物种入侵和人类活动的影响。尽管学界已经初步认识黄河三角洲海岸生态系统退化的一般成因,但对退化因子的互作机理及其调节机制还缺乏足够认识。因此,需要加强对湿地生态系统结构、过程、功能及调控的系统深入研究,并依托黄河三角洲典型的盐沼、滩涂等湿地建立生态修复技术示范区,创新和示范植被恢复、地表径流控制、海陆水文调节、滩涂微地形改良、土壤改良、水盐调节、水环境净化、土壤修复、生境重建、生物多样性恢复等综合修复技术,为黄河三角洲湿地生态恢复工程设计与建设提供技术支撑。结合已有研究进展,从以下方面提出未来研究建议:

(1)在充分考虑黄河三角洲地区的自然和社会环境问题下,开展湿地生态修复技术的大规模筛选、中试与示范应用,对黄河三角洲湿地生态修复非常重要。

(2)需进一步优化与升级湿地生态修复技术。一方面,降低技术的生态风险,提升修复效果;另一方面,降低技术实施成本,提高实施效果的可持续性。

(3)在使用土壤添加剂进行土壤改良时,应着重注意材料本身的环境安全性,以防对原生生态系统造成二次污染。

#### 参考文献:

- [1]邵鹏帅,韩红艳,孙景宽.黄河三角洲湿地退化和恢复对柽柳土壤有机碳含量及红外碳组分的影响[J].生态学杂志,2022,41(7):1258-1265. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202207.026.
- [2]王岩,陈永金,刘加珍.黄河三角洲湿地植被空间分布对土壤环境的响应[J].东北林业大学学报,2013,41(9):59-62. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2013.09.001.
- [3]王永丽,于君宝,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. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2012.06.013.
- [4]路广,韩美,王敏,等.近代黄河三角洲植被覆盖度时空变化分析[J].生态环境学报,2017,26(3):422-428. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.03.009.
- [5]刘峰.黄河三角洲湿地水生态系统污染、退化与湿地修复的初步研究[D].青岛:中国海洋大学,2015.
- [6]战琦梦.黄河三角洲潮滩自然资源资产价值评估[D].烟台:鲁东大学,2020.
- [7]黄玉芳,葛雷,单凯,等.黄河下游河道湿地演变与河防工程建设时空关系分析[J].环境影响评价,2021,43(3):13-18. DOI: 10.14068/j.ceia.2021.03.003.
- [8]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. DOI: 10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2019.01.109.
- [9]安乐生,周葆华,赵全升,等.黄河三角洲植被空间分布特征及其环境解释[J].生态学报,2017,37(20):6809-6817. DOI: 10.5846/stxb201607261518.
- [10]陈柯欣,丛丕福,雷威.人类活动对40年间黄河三角洲湿地景观类型变化的影响[J].海洋环境科学,2019,38(5):736-744. DOI: 10.13634/j.cnki.mes.2019.05.014.
- [11]张心茹,曹茜,季舒平,等.气候变化和人类活动对黄河三角洲植被动态变化的影响[J].环境科学学报,2022,42(1):

56-69. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0492.

- [12] 王薇, 陈为峰, 王燃黎, 等. 黄河三角洲新生湿地景观格局特征及其动态变化:以垦利县为例[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 82-87.
- [13] 于君宝, 王永丽, 董洪芳, 等. 基于景观格局的现代黄河三角洲滨海湿地土壤有机碳储量估算[J]. 湿地科学, 2013, 11(1): 1-6. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2013.01.006.
- [14] 贾文泽, 田家怡, 潘怀剑. 黄河三角洲生物多样性保护与可持续利用的研究[J]. 环境科学研究, 2002, 15(4): 35-39. DOI: 10.13198/j.res.2002.04.37.jiawz.011.
- [15] 任葳. 基于微地形营造的黄河三角洲退化滨海湿地修复模式研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017.
- [16] ZHANG X Q, HE S Y, YANG Y. Evaluation of wetland ecosystem services value of the Yellow River Delta[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(6): 353. DOI: 10.1007/s10661-021-09130-x.
- [17] 张绪良, 张朝晖, 徐宗军, 等. 黄河三角洲滨海湿地植被的碳储量和固碳能力[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(6): 145-149.
- [18] 高瑞, 王志勇, 周晓东, 等. 利用多时相遥感监测与分析黄河三角洲湿地变化动态[J]. 测绘通报, 2021(4): 22-27. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0105.
- [19] LIU X Z, QI S Z. Wetlands environmental degradation in the Yellow River Delta, Shandong Province of China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11: 701-705. DOI: 10.1016/j.proenv.2011.12.109.
- [20] 张婉婷. 基于生态系统崩溃风险的滨海湿地生态退化诊断方法研究[D]. 厦门: 自然资源部第三海洋研究所, 2022.
- [21] 钱逸凡, 刘道平, 楼毅, 等. 我国湿地生态状况评价研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3372-3382. DOI: 10.5846/stxb201805181093.
- [22] 杨俊芳. 现代黄河三角洲入侵植物互花米草遥感监测与分析[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2017.
- [23] YAN J F, ZHU J, ZHAO S Y, et al. Coastal wetland degradation and ecosystem service value change in the Yellow River Delta, China[J]. Global Ecology and Conservation, 2023, 44: e02501. DOI: 10.1016/j.gecco.2023.e02501.
- [24] 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]. The Science of the Total Environment, 2021, 787: 147644. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147644.
- [25] 韩美, 张翠, 路广, 等. 黄河三角洲人类活动强度的湿地景观格局梯度响应[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 265-274. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.06.034.
- [26] 韩美, 张晓慧. 黄河三角洲湿地主导生态服务功能价值估算[J]. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(6): 37-43. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2009.06.007.
- [27] 孙志高, 牟晓杰, 陈小兵, 等. 黄河三角洲湿地保护与恢复的现状、问题与建议[J]. 湿地科学, 2011, 9(2): 107-115. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2011.02.002.
- [28] 范延辉, 王君. 黄河三角洲石油污染土壤中微生物多样性与耐盐性初探[J]. 滨州学院学报, 2010, 26(3): 35-40. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2618.2010.03.008.
- [29] 王学金, 陈立强, 宋玉敏, 等. 三角洲地区黄河水资源利用现状及对策[J]. 水利规划与设计, 2013(1): 18-19. DOI: 10.3969/j.issn.1692-2469.2013.01.007.
- [30] REN G B, ZHAO Y J, WANG J B, et al. Ecological effects analysis of *Spartina alterniflora* invasion within Yellow River delta using long time series remote sensing imagery[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2021, 249: 107111. DOI: 10.1016/j.ecss.2020.107111.
- [31] LU C X, ZHAO C, LIU J, et al. Increased salinity and groundwater levels lead to degradation of the *Robinia pseudoacacia* forest in the Yellow River Delta[J]. Journal of Forestry Research, 2022, 33(4): 1233-1245. DOI: 10.1007/s11676-021-01422-9.
- [32] 郑明喜, 解伏菊, 侯传美. 黄河三角洲退化湿地植被与土壤的恢复研究[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(1): 11-16. DOI: 10.3969/j.issn.1673-503X.2012.01.002.
- [33] DING Z, SU F Z, ZHANG J J, et al. Clustering coastal land use sequence patterns along the sea-land direction: A case study in the coastal zone of Bohai Bay and the Yellow River Delta, China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(17): 2024. DOI: 10.3390/rs11172024.
- [34] WU X A, BI N S, SYVITSKI J, et al. Can reservoir regulation along the Yellow River be a sustainable way to save a sinking

- delta? [J]. *Earth's Future*, 2020, 8(11): e2020EF001587. DOI: 10.1029/2020ef001587.
- [35] HUO R, CHEN H, LI L, et al. Flood variability in the upper Yangtze River over the last millennium—Insights from a comparison of climate-hydrological model simulated and reconstruction[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66(3): 547-567. DOI: 10.1007/s11430-022-1008-5.
- [36] 郝继祥, 王一帆, 邹荣松, 等. 黄河三角洲盐碱地改良对冬春地下水盐运动的影响[J]. *农业科技与信息*, 2021(17): 22-24. DOI: 10.15979/j.cnki.cn62-1057/s.2021.17.007.
- [37] 杨婧文. 黄河三角洲滨海区土壤质量盐碱退化评价与遥感反演[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [38] 宋静茹, 杨江, 王艳明, 等. 黄河三角洲盐碱地形成的原因及改良措施探讨[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(27): 95-97. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2017.27.030.
- [39] 何敏, 陈萍, 张明增. 黄河三角洲生态保护对策研究[J]. *中国科技信息*, 2012(6): 33. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8972.2012.06.001.
- [40] SHI H H, LU J F, ZHENG W, et al. Evaluation system of coastal wetland ecological vulnerability under the synergetic influence of land and sea: a case study in the Yellow River Delta, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 161: 111735. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111735.
- [41] 肖杨. 黄河三角洲人类活动及其土壤盐碱退化效应[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- [42] ZHANG B L, YIN L, ZHANG S M, et al. Assessment on characteristics of LUCC process based on complex network in Modern Yellow River Delta, Shandong Province of China[J]. *Earth Science Informatics*, 2016, 9(1): 83-93. DOI: 10.1007/s12145-015-0234-2.
- [43] 谢晓天, 陈良, 陈晓鹏, 等. 黄河三角洲农业面源磷污染时空分布研究[J]. *广东化工*, 2020, 47(6): 153-154.
- [44] 刘展航, 张树岩, 侯玉平, 等. 互花米草入侵对黄河口湿地土壤碳氮磷及其生态化学计量特征的影响[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(7): 1360-1369. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.07.008.
- [45] 李昱蓉, 武海涛, 张森, 等. 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[J]. *湿地科学*, 2021, 19(1): 88-97. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2021.01.009.
- [46] ZHANG C, GONG Z N, QIU H C, et al. Mapping typical salt-marsh species in the Yellow River Delta wetland supported by temporal-spatial-spectral multidimensional features[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 783: 147061. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147061.
- [47] 张光亮, 白军红, 贾佳, 等. 互花米草入侵对黄河口盐沼湿地土壤溶解性有机碳空间分布的影响[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(1): 90-97. DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2018.01.012.
- [48] 张晗旭, 李馨宇, 崔保山, 等. 黄河三角洲湿地生态修复工程对底栖动物的影响效果研究[J]. *环境工程*, 2023, 41(1): 222-231. DOI: 10.13205/j.hjgc.202301027.
- [49] 杨薇, 裴俊, 李晓晓, 等. 黄河三角洲退化湿地生态修复效果的系统评估及对策[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(1): 98-103. DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2018.01.013.
- [50] LI S Z, XIE T, BAI J H, et al. Degradation and ecological restoration of estuarine wetlands in China[J]. *Wetlands*, 2022, 42(7): 1-10. DOI: 10.1007/s13157-022-01589-9.
- [51] 马玉蕾, 王德, 刘俊民, 等. 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2423-2430. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2013.0487.
- [52] LIUZ Z, FAGHERAZZI S, MA X, et al. Consumer control and abiotic stresses constrain coastal saltmarsh restoration[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 274: 111110. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111110.
- [53] 郭乾友. 滩涂互花米草防治技术研究[J]. *防护林科技*, 2011(2): 3-5. DOI: 10.13601/j.issn.1005-5215.2011.02.019.
- [54] 芦康乐, 杨萌尧, 武海涛, 等. 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[J]. *生态学报*, 2020, 40(5): 1637-1649. DOI: 10.5846/stxb201901100087.
- [55] 潘怀剑, 田家怡. 黄河三角洲水质污染对淡水鱼类多样性的影响[J]. *水产科学*, 2001, 20(4): 17-20. DOI: 10.16378/j.cnki.1003-1111.2001.04.006.
- [56] SHANG S, HU S X, LIU X X, et al. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on the community structure and diversity of wetland

- soil bacteria in the Yellow River Delta[J]. *Ecology and Evolution*, 2022, 12(5): e8905. DOI: 10.1002/ece3.8905.
- [57]陈静潇, 马梓文, 肖蓉, 等. 生态补水对黄河三角洲盐沼地土壤微生物群落分布特征的影响[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(1): 32-41. DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2018.01.005.
- [58]WANG M J, QI S Z, ZHANG X X. Wetland loss and degradation in the Yellow River Delta, Shandong Province of China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67(1): 185-188. DOI: 10.1007/s12665-011-1491-0.
- [59]刘新宇. 辽河三角洲滨海湿地退化机制与植被修复技术研究[J]. *新农业*, 2014(6): 28-29.
- [60]台培东, 苏丹, 刘延斌, 等. 双台子河口国家自然保护区红海滩景观退化机制研究[J]. *环境污染与防治*, 2009, 31(1): 17-20. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3865.2009.01.006.
- [61]YANG W, LI X X, SUN T, et al. Macrobenthos functional groups as indicators of ecological restoration in the northern part of China's Yellow River Delta wetlands[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 381-391. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.06.057.
- [62]CHEN A, SUI X, WANG D S, et al. Landscape and avifauna changes as an indicator of Yellow River Delta wetland restoration [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 86: 162-173. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.11.017.
- [63]花东文, 李娟, 曹婷婷. 微生物土壤改良剂对复配土养分及作物产量的影响[J]. *西部大开发(土地开发工程研究)*, 2019, 4(9): 37-41.
- [64]宋时丽, 吴昊, 黄鹏伟, 等. 秸秆还田土壤改良培肥基质和复合菌剂配施对土壤生态的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(11): 4562-4576. DOI: 10.5846/stxb201903040406.
- [65]YU L, BAI J H, HUANG L B, et al. Carbon-rich substrates altered microbial communities with indication of carbon metabolism functional shifting in a degraded salt marsh of the Yellow River Delta, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 331: 129898. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129898.
- [66]WU Y J, LIU X P, DONG Q, et al. Remediation of petroleum hydrocarbons-contaminated soil: analysis based on Chinese patents [J]. *Chemosphere*, 2022, 297: 134173. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134173.
- [67]张贺, 杨静, 周吉祥, 等. 连续施用土壤改良剂对砂质潮土团聚体及作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(5): 791-801. DOI: 10.11674/zwyf.20576.
- [68]左强, 吴训, 石建初, 等. 黄河三角洲滨海盐碱地可持续利用的水土资源约束与均衡配置策略[J/OL]. *中国工程科学*, 2023: 1-11. [2023-08-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4421.G3.20230627.2301.004.html>.
- [69]BRIERLEYG, LI X L, CULLUM C, et al. Landscape and ecosystem diversity, dynamics and management in the Yellow River source zone[M]. Berlin:Springer Geography, 2016. DOI:10.1007/978-3-319-30475-5.
- [70]史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(8): 1-17. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2020156.
- [71]XIA J B, REN J Y, ZHANG S Y, et al. Forest and grass composite patterns improve the soil quality in the coastal saline-alkali land of the Yellow River Delta, China[J]. *Geoderma*, 2019, 349: 25-35. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.04.032.
- [72]YU X Y, ZHU W B, WEI J X, et al. Estimation of ecological water supplement for typical bird protection in the Yellow River Delta wetland[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107783. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107783.
- [73]张希涛, 毕正刚, 车纯广, 等. 黄河三角洲滨海湿地生态问题及其修复对策研究[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(5): 84-87. DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.05.023.