

文章编号:1673-9469(2023)03-0091-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.03.013

# 基于遥感的黄河三角洲湿地时空变化特征及驱动因素研究

牛馨卿<sup>1,2</sup>, 张新<sup>1\*</sup>, 朱长明<sup>3</sup>, 郭浩然<sup>1,2</sup>, 王雷<sup>4</sup>

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100094; 2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049; 3. 江苏师范大学 地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州 221116; 4. 中国科学院空天信息研究院海南研究院, 海南 三亚 572029)

**摘要:** 为适应黄河三角洲湿地快速频繁变化的特点并提高数据解释力度, 为黄河三角洲科学规划和管理保护提供必要参考, 基于 Landsat 影像密集观测 1986—2021 年 15 个时期的黄河三角洲湿地, 研究湿地时空变化, 定量分析驱动因素。结果表明: (1) 黄河三角洲湿地存在波动变化和阶段性特征, 自然湿地减少 1 579.07 km<sup>2</sup>, 滩涂和草甸灌丛损失率均超过 60%; 人工湿地面积增加了 1 210.67 km<sup>2</sup>。(2) 农田、建设用地和人工湿地扩张与自然湿地萎缩显著相关, 相关系数分别为 -0.682、-0.963、-0.976; 2009 年后因退耕还湿, 开垦的影响减弱。(3) 输沙量与自然湿地面积相关系数为 0.614, 在水文因素中起主导作用; 1993 年以前河口泥沙淤积效应强于海洋侵蚀作用, 随后反转。(4) 气温升高和干旱事件加剧了湿地损失。

**关键词:** 黄河三角洲; 遥感监测; 湿地; 时空变化; 驱动因素

中图分类号: P942; TP79

文献标识码: A

## Study on Spatio-temporal Characteristics and Driving Factors of Yellow River Delta Wetland Based on Remote Sensing

NIU Xinqing<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>1\*</sup>, ZHU Changming<sup>3</sup>, GUO Haoran<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 4. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Hainan Research Institute, Sanya, Hainan 572029, China)

**Abstract:** In order to adapt to the characteristics of rapid and frequent changes of the Yellow River Delta wetland, improve the strength of data interpretation, and provide necessary references for the scientific planning, management and protection of the Yellow River Delta, the temporal and spatial changes of wetland were studied from the perspective of intensive observation and the driving factors were quantitatively analyzed based on the Landsat image intensive observation of the Yellow River Delta wetland in 15 periods from 1986 to 2021. The results show that: (1) the Yellow River Delta wetland has the characteristics of fluctuation and stage change, the natural wetland reduces 1 579.07 km<sup>2</sup>, the loss rate of mudflat and meadow shrubs is more than 60%, while the area of artificial wetland increases by 1 210.67 km<sup>2</sup>; (2) the expansion of farmland, construction land and constructed wetland is significantly correlated with the shrinkage of natural wetland, with the correlation coefficients of -0.682, -0.963 and -0.976, respectively. After 2009, the impact of reclamation weakens due to the return of farmland to wetlands; (3) the correlation coefficient between sediment transport and natural wetland area is

收稿日期: 2023-02-03

基金项目: 海南省重点研发计划资助项目(ZDYF2021SHFZ105); 国家重点研发计划资助项目(2021YFB3901300); 国家自然科学基金资助项目(41971310); 内蒙古自治区科技重大专项资助项目(2021ZD0045)

作者简介: 牛馨卿(1997-), 男, 山东淄博人, 硕士研究生, 从事地图学与地理信息系统方面的研究。

\* 通讯作者: 张新(1974-), 男, 河北保定人, 博士, 研究员, 从事遥感监测理论与技术方面的研究。

0.614, which plays a dominant role in hydrological factors, the sedimentation effect of estuary is stronger than that of ocean erosion effects before 1993 and then reversed. (4) Elevated temperatures and drought events have exacerbated wetland losses.

**Key words:** Yellow River Delta; remote sensing monitoring; wetlands; spatio-temporal changes; driving factors

湿地是自然生态系统的重要组成部分之一,在涵养水源、净化水土、防洪抗旱等多个方面发挥着重要的作用,支持了人类社会的可持续发展<sup>[1]</sup>。作为珍贵的自然资源,湿地具有不可替代的综合功能,因此被称为“地球之肾”。然而,受全球气候变化和经济发展的影响,湿地的退化和丧失正在全球范围内广泛发生,并引起高度关注<sup>[2-3]</sup>。黄河三角洲位于渤海沿岸的黄河入海口,是我国温带最宽阔、最完整的湿地<sup>[4]</sup>。伴随山东经济社会的高速发展,农业开垦、水产养殖和城市扩张等人类活动,以及气候条件、水文水质和海洋环境的恶化,黄河三角洲湿地资源的萎缩和退化速率加快<sup>[5-6]</sup>,进而导致植被退化、调蓄能力下降等问题,威胁生态系统健康,制约可持续发展<sup>[7]</sup>。作为黄河入海的最后一环,黄河三角洲生态环境与健康发展对整个黄河流域具有深远影响,国家对此高度重视,并提出生态保护和高质量发展等多项举措。

湿地的地形和水文条件复杂,可通达性较差,传统的野外实地调查工作难度较高。而遥感卫星影像具备覆盖面广、重访周期短等优势,成为长期监测湿地变化和制图的有效方式<sup>[8]</sup>。研究者利用遥感技术对黄河三角洲湿地进行了大量研究,主要包括湿地面积变化研究、湿地景观格局变化研究、土地利用转化和轨迹研究、湿地未来预测以及生态健康评价、湿地变化驱动因素研究等<sup>[9-15]</sup>。由于湿地易受环境压力影响,其类型和空间分布会发生快速频繁的变化,持续观测和更新湿地数据成为迫切需求<sup>[16]</sup>。相关研究中,长时序湿地观测和制图的步长逐渐缩短<sup>[17]</sup>。黄河三角洲湿地是生态系统变化最快、陆海相互作用最剧烈的三角洲之一,且近年来受人为开发影响较为严重<sup>[18]</sup>。而目前的研究通常以5~10年为步长进行观测,以3~6个时期的观测结果分析几十年的变化特征<sup>[19-21]</sup>,增加了时空变化趋势和驱动机制分析的不确定性<sup>[9]</sup>,显然不利于揭示快速变化的黄河三角洲湿地景观演变特征及规律,也不足以支撑对驱动因素的量化分析。鉴于此,本文以1986—2021年黄河三角洲湿地为研究对象,筛选同季相、

高质量的 Landsat 5/8 遥感影像,通过缩短观测步长,制作了15个时期的黄河三角洲湿地数据。结合多源数据,对其时空变化特征及驱动因素展开研究。通过扩充观测样本,揭示黄河三角洲湿地相对完整的变化规律,从量化的角度支撑驱动因素分析,从而为黄河三角洲湿地的科学规划与管理提供有价值的参考。

## 1 数据源与研究方法

### 1.1 研究区概况

黄河三角洲位于山东省东北部的黄河入海口,地处渤海沿岸,毗邻莱州湾,与辽东半岛隔海相望。其主体位于山东省东营市境内,涵盖东营区、河口区、垦利区和利津县(37°16′—38°0′N, 118°06′—119°18′),总面积约为6 000 km<sup>2</sup><sup>[22]</sup>。为便于研究工作的开展,通常可以以行政边界为依据进行划分。

### 1.2 数据源与方法

#### 1.2.1 数据源及预处理

影像通过美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)网站进行下载(<http://glovis.usgs.gov/>),并进行定标、矫正和裁剪等预处理工作。数据及处理结果均采用WGS 1984坐标系和横轴墨卡托投影。该地区湿地观测常用5—11月的影像<sup>[9-10]</sup>。为排除季节性干扰,同时考虑到5月前后湿地特征更易与其他地类区分<sup>[23-24]</sup>,本文选取了时相接近的15期影像进行湿地专题解译制图工作(表1),陆地云量最高为3.69%,满足质量要求,保证数据的可靠性和年际可比性。

表1 遥感影像数据信息

Tab. 1 Information of remote sensing data

卫星	传感器	成像日期
Landsat-5	TM	1986/06/05; 1988/06/26; 1990/06/16; 1993/05/23; 1996/05/31; 1999/06/25; 2001/06/06; 2004/05/05; 2007/05/14; 2009/06/04
		2013/05/30; 2015/06/05; 2017/05/25; 2019/05/31; 2021/06/05
Landsat-8	OLI	2013/05/30; 2015/06/05; 2017/05/25; 2019/05/31; 2021/06/05

驱动分析所用数据包括东营气象站观测的1985—2020年每日气温和降水量、利津水文站监测的1985—2020年黄河年均径流量和输沙量。基于气温和降水数据,利用R语言包和索恩维特算法处理得到了区域标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)。

### 1.2.2 湿地专题解译方法

本文根据《湿地公约》以及黄河三角洲研究现状,根据研究区实际情况以及Landsat影像的可分性,将一级类别分为自然湿地、人工湿地、非湿地。自然湿地包括森林湿地、草甸/灌丛湿地、河流、滩涂;人工湿地包括养殖池、盐田、水田、水库坑塘;非湿地包括旱地、建设用地、未利用地、油田。其中油田区形状规则,分类前可通过目视解译直接提取。解译采用Google Earth高分辨率影像进行辅助。

湿地专题解译基于eCognition Developer 9.0和ArcGIS Desktop 10.8软件,利用面向对象的随机森林算法进行。首先通过分型网络演化分割算法对地物对象进行分割,该法从像素层开始自下而上迭代,使异质性较小的相邻像素合并,实现对同质对象提取。随后根据地面调查数据和高分辨率影像,勾绘和标注对象级样本。为优化常规制图流程费时费力、自动化水平不高的特点,本文采用基于向量相似度的变化检测对比两期影像之间变化和不变区域,使未变化区域内已标注的样本能够迁移到其它影像上直接使用<sup>[23,25]</sup>,从而为每年的影像制作样本集。最后采用随机森林算法进行分类。

随机森林算法的核心思想是以多棵决策树为基础的集成分类器。具体过程包括:(1)采用Bootstrap自助抽样从原始训练样本集中抽取K个样本子集;(2)利用递归的方式训练单棵决策树,使用未参与当前树构建的样本测试当前树的准确率,直到准确率达标为止;(3)N个单棵决策树最终加入到树的集合中,形成随机森林;(4)N个决策树所提取出的全部特征参数为总特征参数K,从K中选取x个最具分类能力的特征参数作为每颗树分类节点,选择的标准为每个子节点达到最高的纯度,即落在子节点中所有观测值都属于同一个分类,此时基尼系数最小,纯度最高,不确定度最小。对于构成随机森林的决策树,假如总共有N类,样本属于第n类的概率为 $P_n$ ,则该概率分布的基尼系数为<sup>[26]</sup>

$$\text{Gini}(D) = 1 - \sum_{n=1}^N P_n^2 \quad (1)$$

分类输入的光谱特征包括各波段的平均值和标准差;指数特征包括归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、增强植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)、归一化水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)和改进归一化水体指数(Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI);几何特征包括形状指数(shape index)和长宽比(length/width);考虑到湿地分布存在一定的空间规律,例如滩涂主要沿海分布,引入对象质心坐标作为分类特征之一。根据特征参数,内部决策树分支参与投票。每一棵决策树给出独立结果,然后使用简单多数投票法输出最终分类结果。

解译完成后,结合调查样本和高分辨率遥感影像为每个地类选取不少于50个、整体不少于600个验证样本进行精度评价。

### 1.2.3 驱动因素分析方法

湿地驱动因素通过相关分析进行研究,设n年中第k年的湿地面积为 $x_k$ ,单一类别驱动指标取值为 $y_k$ ,则湿地面积与该驱动指标之间的相关系数计算公式为<sup>[27]</sup>

$$r = \frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 \cdot \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

相关系数越大,则二者相关性越强。同时利用P检验查验结果的显著性。检验结果小于0.05为显著,小于0.01为极显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄河三角洲湿地时序变化特征分析

通过遥感解译,研究得到了1986—2021年黄河三角洲湿地专题地图(图1)。由精度评价结果可知,全部解译结果的OA精度均在80%以上(表2),能够满足使用的基本要求。同时在分类后进行了进一步订正和校验,以保证后续分析的准确性。

从空间上看,早期草甸灌丛湿地在沿海和内陆均有广泛分布,随后内陆地区的草甸灌丛湿地在农田开垦、城市扩张的影响下逐渐消亡,沿海地区主要被人工湿地侵占,因此表现为向北部和东部收缩的趋势。森林湿地主要分布于黄河故道和现行河道以及二者形成的三角区域内,空间变化相对稳定。黄河来水量变化和断流事件影响了河

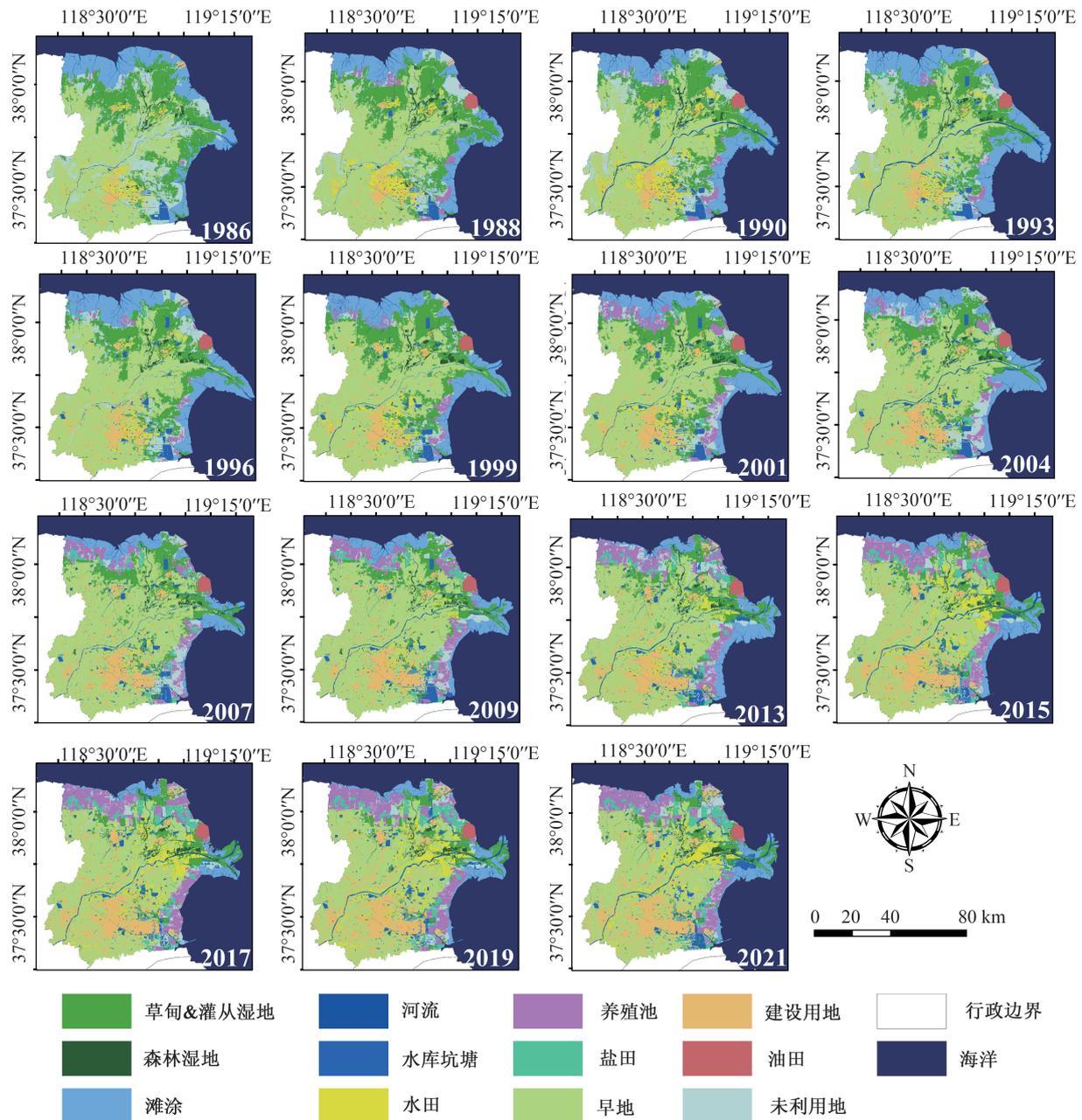


图1 黄河三角洲土地利用类型解译结果

Fig. 1 Interpretation result of land use type in the Yellow River Delta

表2 OA 精度验证结果

Tab. 2 Verification results by OA accuracy

2021年	2019年	2017年	2015年	2013年	2009年	2007年	2004年
87.96%	89.65%	89.12%	88.43%	86.23%	91.00%	90.03%	88.91%
2001年	1999年	1996年	1993年	1990年	1988年	1986年	
87.36%	85.05%	82.72%	84.70%	82.83%	81.32%	80.88%	

流的宽度,部分年份河道出现干涸,1996—1999年期间和2007—2009年期间入海口河道发生过明显改道。滩涂湿地分布于陆海交界区域,长期受到外侧海洋侵蚀和内侧人为扩张的影响,原有滩涂仅中间地带得以留存。现行黄河口在淤积作用

下,有向西北侧延伸的趋势。盐田和养殖池在沿海区域爆发式增长,水库则在内陆地区均匀扩建。水田早期主要分布在研究区南部,在城市建设中被取代,随后黄河口附近地区水田重新投入开发。

表3 1986—2021年黄河三角洲湿地面积(单位:km<sup>2</sup>)Tab.3 Wetland area of the Yellow River Delta from 1986 to 2021 (unit: km<sup>2</sup>)

年份	草甸灌丛湿地	森林湿地	滩涂	河流	水库坑塘	水田	养殖池	盐田	自然湿地	人工湿地
1986	1 505.43	58.91	960.25	78.99	84.25	177.84	15.80	3.57	2 603.58	281.45
1988	1 405.76	91.84	836.71	66.28	117.46	288.67	127.53	4.44	2 400.59	538.10
1990	1 213.52	90.07	925.98	125.66	146.38	410.85	120.21	9.14	2 355.23	686.58
1993	1 226.39	57.36	1 206.71	137.08	161.15	190.93	82.26	32.91	2 627.54	467.25
1996	1 209.73	72.60	1 035.98	51.96	164.43	165.49	105.51	26.81	2 370.28	462.24
1999	1 271.14	83.29	926.54	74.87	205.95	190.75	153.03	21.21	2 355.84	570.94
2001	1 124.18	71.20	795.77	63.90	222.97	124.55	359.57	29.74	2 055.06	736.84
2004	884.79	67.75	841.82	92.37	246.00	47.12	230.14	50.22	1 886.74	573.49
2007	815.17	73.23	521.58	80.57	225.40	51.67	364.18	107.30	1 490.56	748.54
2009	659.50	66.49	564.50	83.45	243.06	108.72	479.70	129.71	1 373.93	961.19
2013	671.66	56.13	586.85	96.07	255.57	203.91	553.77	155.26	1 410.71	1 168.51
2015	554.42	57.95	538.69	114.07	236.17	370.74	612.77	215.50	1 265.13	1 435.18
2017	520.96	86.74	281.90	103.23	199.77	392.63	639.84	217.84	992.83	1 450.08
2019	478.67	89.38	373.57	104.20	219.97	406.20	654.31	237.86	1 045.82	1 518.34
2021	455.25	98.13	367.56	103.56	298.82	353.62	606.13	233.55	1 024.50	1 492.12

从时间上看(表3),1986—2021年,黄河三角洲面积共萎缩124.34 km<sup>2</sup>,整体呈现波动下降的趋势。相比之下,湿地变化的阶段性特征更为明显。1986—1993年湿地以73.24 km<sup>2</sup>/a的速率缓慢增长;1993—2007年以158.01 km<sup>2</sup>/a的速率迅速萎缩;2007—2015年以162.77 km<sup>2</sup>/a的速率实现较快增长;2015—2021年以42.98 km<sup>2</sup>/a的速率再次缓慢退化。

自然湿地共计损失1 579.07 km<sup>2</sup>,其中滩涂和草甸灌丛损失较大(表3)。滩涂湿地面积呈波动减少的状态,减少约592.69 km<sup>2</sup>,损失率高达61.7%;草甸灌丛湿地在1990—1999年面积相对平稳,末期小幅回升,在1986—1990年和1999—2009年这两个时段迅速下降,2013年以后的五个时期内,草甸灌丛湿地仍在萎缩,但下降趋势减缓。在整个研究时期内有约1 050.18 km<sup>2</sup>的草甸灌丛出现退化,损失率高达69.8%;森林湿地在1986—1988年增长明显,随后开始围绕60~70 km<sup>2</sup>波动,到2015年下降至57.95 km<sup>2</sup>,直到2017年明显回升,2021年恢复到98.13 km<sup>2</sup>,比1986年增加了30.47 km<sup>2</sup>;河流面积早期显著波动,1990年和1993年相对较大,而在1986—1988年和1996—2001年这两个时段面积相对较小。进入21世纪,河流湿地面积有平稳上升的趋势,2017年以后趋于稳定。

人工湿地呈显著扩张的趋势,从1986年的281.45 km<sup>2</sup>增长到2021年的1 518.34 km<sup>2</sup>,共增加1 210.67 km<sup>2</sup>。其中,养殖池面积变化最大,从

15.80 km<sup>2</sup>增长至606.13 km<sup>2</sup>。其次为盐田,从3.57 km<sup>2</sup>上升至233.55 km<sup>2</sup>;水库坑塘面积从84.25 km<sup>2</sup>上升至298.82 km<sup>2</sup>。除个别年份部分养殖池、盐田因荒废而转入未利用地以外,其他时间面积则持续增加。水田早期面积较大,1990年因城市扩张导致面积开始大幅下降,2004年相对较低,面积仅为47.12 km<sup>2</sup>。随着三角洲核心区域水田重新开发,到2021年回升至353.62 km<sup>2</sup>。

## 2.2 黄河三角洲湿地驱动因素分析

根据地学理论,湿地变化主要受到自然因素例如气候、水沙条件改变的影响,以及人类活动例如开垦、城市化的影响<sup>[5,13]</sup>。在以往的研究中,黄河三角洲湿地变化驱动模式多以定性和描述的方式展开分析。由于数据量少,难以支撑定量分析,降低了结果的可靠性。本文通过加密观测提供的更丰富的样本,定量评估和分析了黄河三角洲湿地变化的驱动模式。

### 2.2.1 人类活动对自然湿地的影响

在东营经济发展的带动下,人类活动较为频繁,人工景观面积相比1986年有较大幅度的提升。考虑到水田的土地利用性质,将其从人工湿地中剔除,并与旱地合并,作为表征开垦力度的指标进行研究。根据相关分析结果,人工湿地对自然湿地面积和湿地植被面积的相关系数分别为-0.976 ( $p < 0.01$ )、-0.972 ( $p < 0.01$ )。主要原因是自20世纪90年代以来,东营沿海地区建设频繁,港口、堤坝建设阻碍了海陆之间的物质能量交换<sup>[28]</sup>。人

工湿地的扩张导致大量滩涂和湿地植被为盐田和养殖池所取代,同时也加剧了滩涂盐碱化的进程,降低了植被盖度和丰度,破坏了原有的湿地群落,从而引发自然湿地的锐减。建设用地的面积与自然湿地面积、湿地植被面积的相关系数分别为 $-0.963(p<0.01)$ 、 $-0.972(p<0.01)$ 。城市和工业扩张直接挤占了自然湿地原有的生存空间,内陆地区的草甸、灌丛被破坏从而为城市提供土地资源。社会生产和生活引起了需水量的提升,间接导致湿地水资源补给受到抑制,为局地水资源分配带来较大的压力。同时,经济建设也不可避免地要排放大量污染物,例如温室气体、工业废水和生活污水等,导致下游生态环境恶化,对自然湿地生态系统结构和功能造成破坏。农田面积对自然湿地面积和湿地植被面积的相关系数分别为 $-0.682(p<0.01)$ 、 $-0.699(p<0.01)$ 。人口规模的增长对耕地产生了更多需求,人地矛盾尖锐而突出,迫于人口压力,近三十年来东营地区大量开荒垦殖,导致自然湿地被破坏并直接转变为农田用作耕种。围垦过程中周边土壤逐渐干化,灌溉等过程也需要更多的淡水资源维持,大量取水加剧了水资源分配的不均。同时农药、化肥的过量使用,也对自然湿地生态系统产生较大环境压力<sup>[29]</sup>。2009年国务院通过了《黄河三角洲高效生态经济区发展规划》,随着保护政策的完善,2009年以后农田面积轻微减少,通过分段分析可知,在2009年以前农田面积与自然湿地、湿地植被面积的相关系数均为 $-0.839(p<0.01)$ ,负面作用显著大于整个时期。由此可以说明,在退耕还湿政策的影响下,近年来农田开垦对自然湿地的危害有所缓解。

整体来看,主要人工景观面积和自然湿地面积之间的相关性均表现出0.01水平的显著性,说明开垦、城市化和人工湿地建设等人类活动对黄河三角洲自然湿地有着显著的负面作用,也是自然湿地面临的重要压力源。

### 2.2.2 水沙条件对自然湿地的影响

实测数据显示,1984年到2020年黄河入海的年平均径流量为 $1.84 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ ,年平均输沙量为 $2.84 \times 10^8 \text{ t/a}$ 。径流量和输沙量呈下降趋势,2001年前后黄河入海年均径流量和年均输沙量处于整个时期的最低值。

输沙量与自然湿地面积和湿地植被面积均存在显著的正相关关系,分别为 $0.614(p<0.05)$ 和 $0.556(p<0.05)$ ,说明泥沙输送和补给有效维持了

自然湿地的面积,沉积物的淤积对自然湿地发育和外扩也具有促进作用。黄河径流量则表现出微弱的负相关关系( $-0.164, -0.149$ )。通常认为,径流量的增加能够携带更多的泥沙从而促进湿地发育<sup>[30]</sup>。然而2001年末小浪底水利枢纽工程完成以后,当地进行了调水调沙工作,水库大量泄水提升了下游的径流量,但输沙量无明显改善。以2001年为分界,在1986—2001年期间,径流量对自然湿地和湿地植被均存在正向作用,相关系数分别为 $0.604$ 和 $0.645$ 。此时径流量能够提高土壤含水量,对湿地所需水资源进行补给,同时泥沙携带较多,通过淤积等方式,进一步维持湿地面积。但此后伴随水利枢纽的建设,含沙量有所降低,来水量的增大对周边沼泽和滩涂起到了冲刷和淹没的作用,反而导致了自然湿地的流失。由此推断,相比径流量,输沙量在自然湿地变化中起到主导的作用。

由图2可知,随着泥沙在河口和外围沿海地区的沉积,黄河三角洲现行河口面积自1986年到1993年快速外延,此时海洋的侵蚀速率低于沉积物的累积速率,使现行河口面积大幅增加( $y = 7.19x + 586.05, R^2 = 0.96$ )。1996年现行河口面积回落,此后随着累积输沙量的增加,河口增长放缓( $y = 0.63x + 730.2, R^2 = 0.03$ )。与之对应的(图3),黄河三角洲整体面积先上升( $y = 7.85x + 6363.46, R^2 = 0.96$ ),后减少( $y = -3.80x + 6745.00, R^2 = 0.24$ )。而除现行河口以外的其他区域则长期表现为蚀退的趋势( $y = -2.32x + 5848.21, R^2 = 0.63$ )(图4)。由此可见,黄河三角洲地区海洋侵蚀作用明显,造成外围湿地持续消亡,河口地区由于泥沙持续补给,使面积得以增长,但1996年起水沙的淤积速率明显低于海洋侵蚀速率,使河口仅能维持而难以进一步扩张。

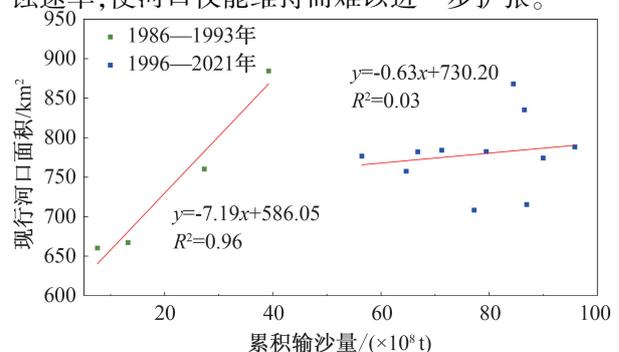


图2 累积输沙量与现行河口面积的关系

Fig. 2 Relationship between cumulative sediment discharge and current estuary area

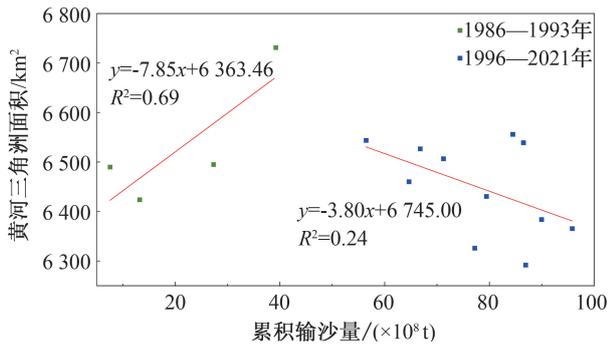


图3 累积输沙量与黄河三角洲面积的关系

Fig. 3 Relationship between cumulative sediment discharge and area of the Yellow River Delta

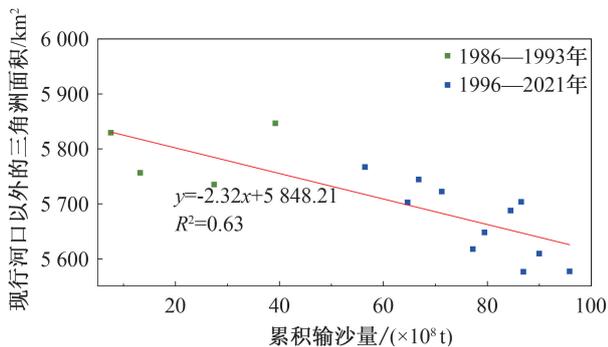


图4 累积输沙量与现行河口以外的三角洲面积的关系

Fig. 4 Relationship between cumulative sediment discharge and delta area outside current estuaries

### 2.2.3 气候条件对自然湿地的影响

气象站观测记录显示,1985—2020年东营年均气温上升了 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,从1987年起年均气温维持在 $13.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。1985年东营年均降水量为 $513.6\text{ mm}$ ,2020年为 $770.5\text{ mm}$ ,增加了 $256.9\text{ mm}$ 。

气温对自然湿地面积和湿地植被面积均有显著的负相关关系,分别为 $-0.701$  ( $p < 0.01$ )、 $-0.637$  ( $p < 0.05$ )。气温上升加速了海平面上涨,通过相关分析发现,黄河三角洲地区海洋向陆地累积扩张面积与气温之间的相关系数为 $0.690$  ( $p < 0.01$ ),与自然湿地和湿地植被面积的相关系数分别为 $-0.63$  ( $p < 0.05$ )、 $-0.456$ ,说明黄河三角洲沿海低洼地区有较多的外围湿地被海水淹没,而气温起到了重要的推动作用。气温不断上升,对植被呼吸作用产生较大影响<sup>[30]</sup>。这显然不利于湿地植被的生长,引起其面积和丰度的损失。同时气温升高也加剧了水分的蒸发,降低土壤和地表的水分含量。降水对自然湿地面积和湿地植被面积表现出微弱的负相关关系( $-0.209$ ,  $-0.267$ ),虽然通过相关分析发现,降水与径流量显著相关( $0.465$ ,  $p < 0.01$ ),但根据前文的研究,径流量的作用权重不

及输沙量,对湿地的促进作用不明显。此外虽然降水能够促进水分的补给,但也要考虑到气温的上升导致蒸发量增大,抵消了降水的作用,加剧了黄河三角洲地区的暖干化趋势。

根据年时间尺度的SPEI(SPEI-12)评估年际干旱水平的标准<sup>[31]</sup>,本文对黄河三角洲地区的干旱情况进行了评估。1986年至今,黄河三角洲共计发生七次中、重度干旱事件,包括1989年、1999年、2000年、2001年、2002年、2008年和2014年。同时根据数据可以发现,在中、重度干旱年份,草甸灌丛湿地和森林湿地转出量较大。1988—1990年湿地植被平均每年转出约 $97\text{ km}^2$ ;1999年—2001年约 $80\text{ km}^2$ ;2001—2004年约 $81\text{ km}^2$ ;2007—2009年约 $81\text{ km}^2$ ;2013—2015年约 $58\text{ km}^2$ 。而无旱年份下年均转出量仅为 $2.95\text{ km}^2$ 。在严重干旱状态下,水资源匮乏严重影响湿地植被的生长,不利于湿地水土保持。水分亏缺和流失容易导致湿地植被的死亡,使湿地植被最终转为其他类型的土地。由于草甸灌丛等湿地植被在自然湿地中所占比例较大,因此植被消亡极大地推动了自然湿地的萎缩和退化。由此可见,干旱事件也是导致黄河三角洲自然湿地明显减少的重要原因之一。

## 3 结论

本文基于1986—2021年15个时期的观测结果,对黄河三角洲湿地进行时空动态分析,定量探究了湿地变化的驱动因素,得出以下主要结论:

1)黄河三角洲整体面积波动下降,湿地面积变化分为四个阶段:1986—1993年缓慢增长阶段,1993—2007年迅速衰退阶段,2007—2015年较快增长阶段,2015—2021年缓慢下降阶段。自然湿地整体损失 $1579.07\text{ km}^2$ ,其中滩涂和草甸灌丛损失较大,分别减少了 $592.69\text{ km}^2$ 和 $1050.18\text{ km}^2$ 。人工湿地扩张 $1210.67\text{ km}^2$ 。

2)人类活动是自然湿地面积遭受损失的重要原因。在退耕还湿政策影响下,开垦的负面影响有所缓解。

3)自然因素中,输沙量能够补给和维持自然湿地,在水文因素中起主导作用;径流量在2001年前后两个时段内分别体现对自然湿地的促进和抑制作用。1993年以前河口淤积效应强于海洋侵蚀,前沿湿地快速演进。此后海洋侵蚀为主导,三角洲表现为蚀退。局地气温升高导致自然湿地减少,干旱事件加剧了湿地植被的损失。因此未来

黄河三角洲湿地保护,应着重降低人工湿地建设和城市化带来的不利影响,继续推行退耕还湿。利用调水调沙工程补给泥沙,同时治理气温升高、海平面上升以及干旱频发等环境问题。

本文制作的是黄河三角洲近 35 年较为完整、全面的湿地专题数据。主要优势包括:(1)通过缩短观测步长可以捕捉湿地的波动变化和阶段性特征,有利于把握相对完整的变化过程;(2)加密观测丰富了抽样调查的样本量,能够从定量角度出发进行分析,准确揭示不同因子的驱动作用。因此未来应进一步缩短观测周期,捕捉更细致的变化,同时提高数据分辨率和精度。

#### 参考文献:

- [1] XIA Y, FANG C Y, LIN H, et al. Spatiotemporal Evolution of Wetland Eco-hydrological Connectivity in the Poyang Lake Area Based on Long Time-Series Remote Sensing Images[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(23):4812.
- [2] FINLAYSON M, CRUZ R D, DAVIDSON N, et al. Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis[M]. Washington DC: Island Press, 2005, 69:344031.
- [3] ASSELEN S V, VERBURG P H, VERMAAT J E, et al. Drivers of Wetland Conversion: a Global Meta-Analysis [J]. *PLOS ONE*, 2013, 8(11):e81292.
- [4] SHAN R, LI J C. Construction of the Landscape Ecological Security Pattern of the Yellow River Delta Based on Circuit theory[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 831(1):012063.
- [5] 孔祥伦,李云龙,韩美,等. 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[J]. *湿地科学*, 2020, 18(5):603-612.
- [6] 黄玉芳,姜广艳,葛雷,等. 基于时间序列遥感的2020年黄河三角洲湿地补水效果监测[J]. *人民黄河*, 2021, 43(7):89-93.
- [7] LIU G L, ZHANG L C, ZHANG Q, et al. Spatio - Temporal Dynamics of Wetland Landscape Patterns Based on Remote Sensing in Yellow River Delta, China [J]. *Wetlands*, 2014, 34(4):787-801.
- [8] ESCORIHUELA M J, QUINTANA-SEGUÍ P. Comparison of Remote Sensing and Simulated Soil Moisture Datasets in Mediterranean Landscapes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 180:99-114.
- [9] 卢晓宁,黄玥,洪佳,等. 基于 Landsat 的黄河三角洲湿地景观时空格局演变[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(11):4314-4324.
- [10] 宋雨桐,张子璇,牛蓓蓓,等. 2005—2018年黄河三角洲景观格局脆弱性的时空变化规律[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3):258-266.
- [11] 王文倩,高明秀,朗坤. 基于模型组的黄河三角洲核心区土地利用变化特征与趋势预测[J]. *山东农业科学*, 2019, 51(3):81-86.
- [12] 郎坤,赵庚星,王文倩,等. 基于多元数据的黄河三角洲核心区生态环境状况评价研究[J]. *山东国土资源*, 2019, 35(12):29-39.
- [13] 徐振田,ALI S,张莎,等. 基于 Landsat 数据的黄河三角洲湿地提取及近 30 年动态研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2020, 3:70-79.
- [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]. *生态学杂志*, 2011, 30(7):1535-1541.
- [15] 李胜男,王根绪,邓伟,等. 水沙变化对黄河三角洲湿地景观格局演变的影响[J]. *水科学进展*, 2009, 20(03):325-331.
- [16] PASHAEI M, KAMANGIR H, STAREK M J, et al. Review and Evaluation of Deep Learning Architectures for Efficient Land Cover Mapping with UAS Hyper-Spatial Imagery: A Case Study Over a Wetland[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(6):959.
- [17] MIZUOCHI H, HIYAMA T, OHTA T, et al. Evaluation of the Surface Water Distribution in North-Central Namibia Based on MODIS and AMSR Series[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(8):7660-7682.
- [18] 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.
- [19] CONG P F, CHEN K X, QU L M, et al. Dynamic Changes in the Wetland Landscape Pattern of the Yellow River Delta from 1976 to 2016 Based on Satellite Data [J]. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(3):372-381.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 汪小钦,王钦敏,励惠国,等. 黄河三角洲土地利用/覆盖变化的微地貌区域分异[J]. *地理科学*, 2008(4):513-517.
- [23] ZHU Q D, WANG Y N, LIU J X, et al. Tracking Historical Wetland Changes in the China Side of the Amur River Basin Based on Landsat Imagery and Training Samples Migration[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(11):2161.

(下转第 112 页)

- [13] OLIVER W C, PHARR G M. An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments [J]. *Journal of Materials Research*, 1992, 7 (6): 1564-1583.
- [14] CHENG G, CHOI K S, HU X, et al. Determining Individual Phase Properties in a Multi-phase Q&P Steel Using Multi-scale Indentation Tests [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 652: 384-395.
- [15] TAN Q, ZHU G, ZHOU W, et al. Precipitation, Transformation, and Coarsening of Carbides in a High-Carbon Ni-based Superalloy During Selective Laser Melting and Hot Isostatic Pressing Processes [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 913: 165196.
- [16] BAHL S, MISHRA S, YAZAR K, et al. Non-Equilibrium Microstructure, Crystallographic Texture and Morphological Texture Synergistically Result in Unusual Mechanical Properties of 3D Printed 316L Stainless Steel [J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 28: 65-77.
- [17] 宗学文, 刘文杰, 张树哲, 等. 激光选区熔化 GH3536 镍基高温合金的微观组织和晶体取向 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(9): 3182-3188.
- [18] KANAGARAJAH P, BRENNE F, NIENDORF T, et al. Inconel 939 Processed by Selective Laser Melting: Effect of Microstructure and Temperature on the Mechanical Properties Under Static and Cyclic Loading [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 588: 188-195.
- [19] OLIVER W C, PHARR G M. Measurement of Hardness and Elastic Modulus by Instrumented Indentation: Advances in Understanding and Refinements to Methodology [J]. *Journal of Materials Research*, 2004, 19(1): 3-20.
- [20] 任明星, 李邦盛, 杨闯, 等. 纳米压痕法测定微铸件硬度及弹性模量 [J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(2): 6-12.
- [21] ZHAO Y, GUO Q, MA Z, et al. Comparative Study on the Microstructure Evolution of Selective Laser Melted and Wrought IN718 Superalloy During Subsequent Heat Treatment Process and Its Effect on Mechanical Properties [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 791: 139735.

(责任编辑 王利君)

(上接第 98 页)

- [24] 张晨宇. 黄河三角洲典型湿地植被时空动态遥感监测研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- [25] 宋翔, 颜长珍. 基于知识库的像斑光谱向量相似度土地覆盖变化检测方法 [J]. *生态学报*, 2014, 34(24): 7175-7180.
- [26] 姚明煌, 骆炎民. 改进的随机森林及其在遥感图像中的应用 [J]. *计算机工程与应用*, 2016, 52(4): 168-173.
- [27] 蒋蕊竹, 李秀启, 朱永安, 等. 基于 MODIS 黄河三角洲湿地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征 [J]. *生态学报*, 2011, 31(22): 6708-6716.
- [28] YANG W, LI X X, JIN Y W, et al. The Impact of Multiple Seashore Reclamation Activities on Vegetation Cover in the Yellow River Delta, China: Implications Based on Structural Equation Modeling [J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2018, 22(2): 283-292.
- [29] 孙楠, 朱渭宁, 程乾. 基于多年遥感数据分析长江河口海岸带湿地变化及其驱动因子 [J]. *环境科学学报*, 2017, 37(11): 4366-4373.
- [30] YU D X, HAN G X, WANG X J, et al. The Impact of Runoff Flux and Reclamation on the Spatiotemporal Evolution of the Yellow River Estuarine Wetlands [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2021, 212: 105804.
- [31] 郭晓萌, 佟斯琴, 包玉海, 等. 基于 SPEI 的内蒙古地区近 55 年干旱时空变化趋势分析 [J]. *地理信息世界*, 2021, 28(3): 42-48+79.

(责任编辑 王利君)