

DOI: 10.5846/stxb201406041153

洪佳, 卢晓宁, 王玲玲. 1973—2013 年黄河三角洲湿地景观演变驱动力分析. 生态学报, 2016, 36(4): - .

Hong J, Lu X N, Wang L L. Quantitative Analysis of the Factors Driving Evolution in the Yellow River Delta Wetland in the Past 40 Years. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): - .

1973—2013 年黄河三角洲湿地景观演变驱动力分析

洪 佳^{1,2}, 卢晓宁^{1,2,3,*}, 王玲玲^{1,2}

1 成都信息工程大学, 成都 610225

2 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225

3 成都理工大学 国土资源部地学空间信息技术重点实验室, 成都 610059

摘要: 1973—2013 年间, 日益加剧的人类活动和愈发严峻的自然环境对黄河三角洲湿地景观形成巨大威胁。人与自然双重影响下黄河三角洲湿地发生了怎样的变化, 哪些因素、多大程度上导致了这种变化的发生, 科学解答这些问题对于加强黄河三角洲湿地保护具有重要意义。以 Landsat 卫星 1973—2013 年 40a 9 期影像为数据源, 利用人工目视解译方法构建研究区景观数据库, 在分析研究区景观特征的基础上, 通过主客观相结合的方法, 构建了能够反映黄河三角洲地区景观湿地化和人工化状态的表面湿地/人工状态指数 (SWCSI)。结合黄河入海水沙、区域降水以及地方生产总值 (GDP)、水产品产量和原盐产量, 分别从区域尺度和像元尺度上, 定量分析了过去 40 年黄河三角洲湿地景观演变的驱动力及其空间差异。研究表明: (1) 过去 40 年来, 黄河三角洲自然湿地面积不断萎缩, 人工湿地增加, 湿地总面积减小, 黄河三角洲整体上呈现出人工化或湿地退化趋势, 同时也存在明显的空间异质性: 滨海地区以人工化和湿地退化趋势为主, 黄河入海口地区以湿地化趋势为主, 中西部和西南部传统农耕地基本无变化。(2) 黄河三角洲湿地景观的人工化或湿地退化趋势是过去 40 年来黄河水沙减少、人类活动加剧共同作用的结果。区域尺度上, 人类社会经济活动对黄河三角洲湿地景观演变起主导作用, 黄河径流量和输沙量的作用明显弱于社会经济因素。像元尺度上, 驱动因素的空间异质性是导致黄河三角洲湿地景观演变空间异质性的原因。湿地的发展主要归因于自然因素, 以黄河水沙作用最为关键; 湿地的人工化或退化过程以人类社会经济活动的强制改造为主导, 但是否伴随黄河水沙变化的潜在影响, 对特定区域而言应是确定的, 但仍很难从像元尺度进行量化。

关键词: 黄河三角洲; 湿地; Landsat; 遥感; 驱动力

Quantitative Analysis of the Factors Driving Evolution in the Yellow River Delta Wetland in the Past 40 Years

HONG Jia^{1,2}, LU Xiaoning^{1,2,3,*}, WANG Lingling^{1,2}

1 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China

2 Open Research Fund Program of Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China

3 Key Laboratory of Geo-special Information Technology, Ministry of Land and Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The Yellow River delta is one of the most active regions in the world, where wetlands play a significant role in balancing the regional eco-environment. However, in past decades, it has been subjected to severe disturbance by nature and by humans. Thus, it is critical to figure out what changes have occurred during this period and what could be done in this region now to protect the local wetland system. Therefore, in this study, we took Landsat satellite imagery from 9 years (1973, 1979, 1985, 1992, 1995, 2000, 2005, 2010, and 2013) as data sources to build wetland thematic databases

基金项目: 高原大气与环境四川省重点实验室开放课题 (PAEKL-2014-Y1); 国土资源部地学空间信息技术重点实验室开放基金 (KLGST2014-8); 四川省科技计划应用基础研究 (2014JY0084); 国家自然科学基金 (41401103)

收稿日期: 2014-06-04; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lxn@cuit.edu.cn

using the method of visual interpretation. Based on these databases, a Surface Wetland and Construction State Index (SWCSI) was constructed to indicate the state of the land cover. These were combined with Yellow River runoff and sediment data, regional precipitation, local GDP, aquatic product output, and crude salt output. Then, the driving forces and corresponding spatial heterogeneity of wetland variations in the past 40 years in regions of the Yellow River delta were quantitatively analyzed at regional and pixel scales. From this research, we concluded that the area of wetland in the Yellow River Delta declined during the years 1973—2013, accompanied by large-scale conversion of natural wetlands to artificial wetlands and non-wetland. In the past 40 years, the area of natural wetlands decreased by 42.67% (annual reduction of 30.58 km²). In contrast, the area of artificial wetlands increased by 490.52% (annual increase of 24.47 km²). As a result, the total wetland area was reduced by 7.99% (annual reduction of 6.13 km²). The variations of wetland in the Yellow River delta showed high spatial heterogeneities. Wetlands in coastal regions experienced artificial enhancement or wetland degradation, while those in estuarine regions experienced wetland construction and development; however, there were no changes in the western and southwestern traditional farming districts. On the regional scale, GDP was the dominant driving force for wetland variation in the Yellow River Delta. In the past 40 years, intensifying human activities and decreasing Yellow River runoff and sediment made a number of important changes (decreases in natural wetlands, increase in artificial wetlands, and degradation of regional wetlands) more serious. In contrast, a large area of natural wetland was constructed and developed in the estuary of the Yellow River because of the continuous runoff and sediment supply, although there has been an overall decline in these factors during the past 40 years. Therefore, the Yellow River runoff and sediment still played an important role in the evolution of wetlands in the Yellow River Delta, but this role was not very significant because these influences were regionally limited. The influence of regional precipitation on wetland evolution was extremely limited. This was perhaps due to the severe dependence of the regional wetlands on runoff. At the pixel scale, the driving factors of evolution of the Yellow River delta wetlands showed obvious spatial heterogeneity. This was mainly due to the spatial heterogeneity of driving force factors themselves.

Key Words: the Yellow River delta; Wetland; Landsat; Remote Sensing; Driving Force

现代黄河三角洲主要指 1934 年黄河分流点下移后形成的以垦利县渔洼为顶点的三角洲,北起挑河湾,南至宋春荣沟口^[1]。是中国温带最年轻、增长最快、景观变化最剧烈的土地^[2]。黄河三角洲湿地以其原始性、脆弱性和作为珍稀濒危鸟类重要栖息地的作用在国际上备受重视^[3]。近年来,许多学者借助包括 3S 技术、景观生态学方法等各种方法和手段对黄河三角洲湿地景观的演变进行了研究^[4-8],并从自然和社会经济等多方面因素考虑,对其驱动力进行分析和探讨^[9-12],对认识和把握黄河三角洲湿地景观演变规律,开展黄河三角洲湿地生态保护提供了一定的帮助。然而,这些研究仍多以定性分析和现象描述为主,对湿地景观演变的驱动力的定量区分尚显不足。同时,多数研究时间序列相对较短、空间尺度相对单一。由于黄河三角洲湿地景观演变是一个长期动态过程,短期研究往往难以揭示长期规律;同时,由于人类活动与黄河水沙等的影响在特定空间位置上又是具体,且在不同区域是有差异的,因此也必然导致湿地景观演变在空间上的异质性。这就要求要从更长的时间序列和不同的尺度来开展黄河三角洲湿地景观驱动力研究,才能更为系统全面地把握黄河三角洲湿地景观演变规律,从而为黄河三角洲湿地保护提供更加合理的指导。

鉴于上述,本研究以 Landsat 卫星 1973—2013 年 40 年 9 期影像为数据源,利用人工目视解译方法建立相对长时间序列的高精度的黄河三角洲湿地景观数据库,以该数据库为基础,依据其是否为湿地、湿地化程度和人工化程度,通过定性和定量相结合的方法对区域各景观类型进行排序赋值,用于构建能够反映黄河三角洲景观湿地化和人工化倾向的表面湿地/人工状态指数(SWCSI),进行湿地景观演变的定量分析;并进一步结合黄河水沙、区域降水以及地方生产总值(GDP)、水产品产量和原盐产量,分别从区域尺度和像元尺度上,对黄河三角洲湿地景观演变的驱动力进行定量区分,并揭示其在空间上的差异。

1 数据源

为了研究的方便,本文所选黄河三角洲指的是除广饶县以外的东营市所辖各区县。使用的数据主要包括:1)黄河三角洲 1973—2013 年 9 期 Landsat 影像。数据来自美国联邦地质调查局(USGS)网站(<http://earthexplorer.usgs.gov/>)。2)研究 2005 和 2010 年的 MODIS 植被指数产品,来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。3)黄河三角洲实地考察数据。2013 年 9 月从东营市区出发沿海堤、黄河口镇、大汶流站、自然保护区、仙河镇、孤东采油区、黄河港(东营港)区域、一千二保护区、刁口乡(挑河口)、东营市区路线采集得到的 71 个点的地表覆被数据。4)黄河利津水文站径流量和输沙量(1973—2012)、区域降水量(1973—2012)、东营市 GDP(1978—2012)、水产品产量(1978—2012)、原盐产量(1989—2012)等社会经济数据。数据来自东营市情资料库和统计年鉴。

对获取的 Landsat 影像进行几何校正,使误差控制在一个像元以内。对遥感影像进行波段组合,并通过直方图均衡化图像增强处理技术,增强图像对比度。实地采样数据空间化,以便与遥感影像以及解译的数据结果叠加,建立解译标识和进行精度验证。

2 研究方法

2.1 影像解译和景观数据库构建

依据国内外分类标准及黄河三角洲湿地分类的相关研究成果^[13-15],并结合野外调查所掌握的研究区实际特点,对黄河三角洲湿地景观进行分类。考虑到研究区的整体性和景观之间的相互影响,将非湿地景观也纳入研究范围,因此,总体上共分为自然湿地、人工湿地和非湿地三大类。各类别具体信息如下表 2 所示。

表 2 非湿地景观排序
Table 2 Non-wetland landscapes order sorting table

景观类型 Landscape pattern	排序 Sort order	总排序 Total order	排序说明 Ordering instructions
居民地/ Habitation	1	1	建筑物和硬化地面为主,少量植被着生,人工程度极高。
油田/Oil field	2	2	一定程度的硬化,少量植被着生,人工程度较高。
盐碱地/Alkaline land	3	3	少量植被,人工程度较弱,但生态服务功能亦弱。
旱地 Dry land	4	4	以各类农作物为主,兼具鸟类、昆虫等简单动物类型,人工程度高,能够固定 CO ₂ ,释放 O ₂ ,促进土壤发育,调节区域气候等。
草地 Grassland	5	5	具有简单的生态系统,能够固定 CO ₂ ,释放 O ₂ ,促进土壤发育,调节区域气候等,人工程度较低。
林地 Woodland	6	6	具有较为复杂的生态系统,能够固定 CO ₂ ,释放 O ₂ ,促进土壤发育,调节区域气候等,人工程度低。

本文参考文献[16]的解译标志和研究区实际采样点数据,运用人工目视解译的方法进行黄河三角洲湿地景观解译。对解译结果进行实地验证发现,误判 5 个采样点,分别位于虾蟹田与盐田(1 处)、翅碱蓬沼泽与翅碱蓬柃柳沼泽(2 处)、芦苇沼泽与人工柳林(1 处)、翅碱蓬柃柳沼泽与芦苇柃柳沼泽(1 处),总体解译精度在 91%以上。修正之后,得到高精度的黄河三角洲 1973—2013 年 40 年 9 期湿地景观专题信息数据,见附图 1。

2.2 表面湿地/人工状态指数构建

在对研究区景观演变特征研究的基础上,从景观的生态功能角度出发,构建表面湿地/人工状态指数,对黄河三角洲景观的湿地化和人工化状态进行定量化,为研究区湿地保护和恢复提供可量化的科学依据。借鉴陈述彭院士所提出的地学信息图谱思想^[17],在研究区景观类型数据库基础上,首先在非湿地、人工湿地和自然湿地内部,以定性和定量相结合的方式对各景观类型进行排序赋值,然后再按照非湿地-人工湿地-自然湿地的总顺序进行最终的排序赋值,结果见下表 2—表 4。

表 3 人工湿地景观排序

Table 3 Artificial wetland landscapes order sorting table

景观类型 Landscape pattern	排序 Sort order	总排序 Total order	排序说明 Ordering instructions
盐田/Salt pan	1	7	服务人类盐业生产,基本无生物生存,生态服务功能微弱。
虾蟹田 Shrimp and crab farm	2	8	以鱼虾为主要生物类型,少量植物,整体上以耗 O ₂ 、释放 CO ₂ 为主,有一定的区域气候调节功能。
水库坑塘、沟渠 Reservoir and ditch	3	9	蓄水功能为主,兼具鱼虾、水草等少量水生动植物,固碳和释放 O ₂ 功能有限,有一定的区域气候调节功能。
水田 Paddy field	4	10	以水稻等农作物为主,兼具鸟类、昆虫等简单动物类型。能够涵养水源、固定 CO ₂ ,释放 O ₂ ,促进土壤发育,调节区域气候等。

表 4 自然湿地景观排序

Table 4 Natural wetland landscapes order sorting table

景观类型 Landscape pattern	排序 Sort order	总排序 Total order	NDVI	排序 Sort order	排序说明 Ordering instructions
柳林沼泽/ Osier bed marsh	1	21		1	
河漫滩/ Floodplain	2	20	0.4402	2	1)统计各自然湿地景观 2005 年和 2010 年两年的 NDVI,依据其大小进行排序。
芦苇沼泽/ Reed swamp	3	19	0.4334	3	2)由于 NDVI 空间分辨率为 1000m,对于狭长的水体而言,易产生混合像元问题,致使永久性河流和潮沟这两种湿地景观类型的 NDVI 畸大。
草甸沼泽/ Meadow bog	4	18	0.3699	5	
芦苇怪柳沼泽 Tamarisk reed marsh	5	17	0.3342	6	
翅碱蓬怪柳沼泽 Seepweed Tamarisk marsh	6	16	0.1420	8	3)水体的 NDVI 理论上应为负值,同时,永久性河流由于水中含有较多的悬浮泥沙和藻类,应比潮沟 NDVI 大。
翅碱蓬沼泽/ Seepweed marsh	7	15	0.1249	9	
泥沙质滩涂/ Sandy beach	8	14	0.1139	10	4)依据上述对永久性河流和潮沟的排序进行调整。
永久性河流/River	9	13	0.3916	4	
潮沟/Tidal creek	10	12	0.1358	7	

其中,非湿地依据人类活动对自然地表的硬化改造程度,结合谢高地等^[18]在对我国 200 位生态学者进行问卷调查基础上制定的中国不同陆地生态系统单位面积生态服务价值表,依据生态服务价值大小进行排序(表 2),硬化程度越高、生态服务价值越小,则排序值越小,人工化程度越高;人工湿地依据其对水源、有机质、二氧化碳、氧气、区域气候、土壤等生态服务功能角度进行定性排序(表 3),湿地的生态服务功能越高,则排序值越大,湿地化状态越好;自然湿地的排序,考虑到湿地植物作为水陆交错地带中生态系统的一个重要的组成部分,及其在水体修复、维持生态平衡和生物多样性上具有的重要作用^[19],将各湿地类型按归一化植被指数(NDVI)大小进行定量排序(表 4),NDVI 越大,排序值越大,湿地化状态越好。与此同时,考虑到实际存在的海陆演变问题,将海域也纳入其中,在自然湿地和人工湿地之间,总排序为 11。以总排序为 value 字段,将排序赋值后的矢量数据转成栅格数据,设置像元大小为 100m,之后对其做极差归一化处理,得到黄河三角洲 9 年的表面湿地/人工状态指数(Surface Wetland and Construction State Index,SWCSI)空间数据。该指数越大说明湿地化程度越高、人工化程度越低。

2.3 湿地景观演变的趋势分析

为考察研究区各像元景观演变情况,借助 ArcGIS 软件平台,通过建模,对表面湿地/人工状态指数 (SWCSI) 的变化趋势应用公式 (1) 进行计算,并通过自然断点法对结果进行分级 (图 2)。公式如下:

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times SWCSI - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n SWCSI}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中, slope 为变化趋势 (线性回归的斜率), slope > 0 表明呈湿地化趋势,反之呈人工化或湿地退化趋势; n 为数据总期数 (9 期); i 为时序号,范围 1—9; SWCSI 为表面湿地/人工状态指数。

2.4 湿地景观演变的定量驱动分析

2.4.1 区域尺度驱动力定量分析

目前,已有大量研究探讨了黄河三角洲湿地景观演变的驱动力,但是,由于考虑的角度、选取的因子、分析的方法等的不同,导致结果有所差异,甚至得出相反的结论。比如,有学者指出,黄河水资源是维持黄河三角洲湿地平衡的主导因素^[11,21]。同时,也有学者指出,人类活动是黄河三角洲滨海湿地景观格局变化的主要驱动因子^[5,7]。那么,黄河水沙和人类活动因素究竟对黄河三角洲湿地景观的演变各产生多大影响,还有哪些因素也会产生影响,以及产生多大影响,需要通过合理选取因子从定量角度来进行研究。

为此,选取径流量 (X₁)、输沙量 (X₂)、降水量 (X₃)、GDP (X₄) 和水产品产量 (X₅) 五个可能引起研究区湿地景观演变的驱动因素,分别同自然湿地面积、人工湿地面积及区域湿地总面积和表面湿地/人工状态指数 (SWCSI) 构建多元回归模型。依据回归模型标准系数大小,确定各驱动力因子在区域自然湿地、人工湿地和整体景观演变中的定量作用。为得到较好的回归模型,多元回归分析前,通过回归对各因变量进行序列插补,得到完整的 1973—2013 年各因变量时间序列数据。各因变量序列插补的回归模型见下表 5。

表 5 数据插补

Table 5 Data interpolation

因变量 Dependent variables	回归方程 (x: 年份, y: 面积/km ²) Regression equation (x: year, y: area/km ²)	R ² R Square
自然湿地/Natural wetland	$y = 0.031857863x^3 - 191.6757074x^2 + 384351.2248x - 256860178.1$	0.979
人工湿地/Artificial wetland	$y = 0.515273239x^2 - 2027.510981x + 1994636.432$	0.983
湿地总面积/Total area of wetland	$y = 0.028534364x^3 - 171.2872485x^2 + 342713.5013x - 228549866.2$	0.887
表面湿地/人工状态指数/Surface Wetland and Construction State Index, SWCSI (* 10000)	$y = -0.838753114x^2 + 3314.616811x - 3270100.233$	0.975

2.4.2 像元尺度驱动力分异分析

人类活动与黄河水沙等的影响在特定空间位置上应是具体的,且在不同区域是有差异的,从而导致黄河三角洲湿地景观演变的空间异质性。分析湿地景观演变与驱动因素的时空配置关系,有助于明确不同驱动因素的具体影响范围和程度。为此,选取径流量、输沙量和降水量三个自然因子,GDP、水产品产量和原盐产量三个社会经济因子分别同 9 期黄河三角洲表面湿地/人工状态指数 (SWCSI) 进行逐像元的相关分析。相关分析在 ArcGIS 中,通过建模完成计算,其计算公式如下:

$$R = \frac{\sum (SWCSI_i - \overline{SWCSI})(Y_i - \overline{Y})}{\sqrt{\sum (SWCSI_i - \overline{SWCSI})^2 \sum (Y_i - \overline{Y})^2}} \quad (2)$$

式中, R 为相关系数, SWCSI 为表面湿地化和人工状态指数, Y 为各自然和社会经济因子。相关系数 R 大时表明 SWCSI 同该因子关系紧密,反之不紧密。随后,根据已知自由度通过查表方式对相关系数进行显著性检验,结合显著性水平大小得到相关分析图 (图 3)。由于样本量的差异,各因子在显著性检验时在 0.05 和 0.01 水平显著性 p=0 的临界值 r 稍有不同: SWCSI 同径流量、输沙量、降水量分别为 0.6664 和 0.7797; 同 GDP、水

产品产量分别为 0.7067 和 0.8343;同原盐产量分别为 0.8114 和 0.9172。据此,可对图 3 各位置相关系数大小进行大致判断。

3 结果与分析

3.1 黄河三角洲湿地景观组成结构分析

2013 年黄河三角洲湿地总面积 2821.54 km²,占研究区总面积的 42.64%,是黄河三角洲生态环境的重要组成部分,对于黄河三角洲生态安全与发展具有重要作用。其中,自然湿地 1643.40 km²,占湿地总面积的 58.24%,表明黄河三角洲湿地生态环境总体良好。人工湿地共计 1178.14 km²,占湿地总面积的 41.76%,体现出人类活动对黄河三角洲湿地的重要影响。

3.2 黄河三角洲湿地景观演变总体特征

1973—2013 年 40 年间,黄河三角洲自然湿地面积下降趋势显著(线性倾向率-36.39083, $R^2 = 0.8805$,图 1-a),面积缩小了 42.67%,年均减少量高达 30.58 km²。其中,1985 年面积达到最大,为 3143.21 km²,2010 年面积最小,为 1609.48 km²。与之相反,人工湿地面积则呈线性上升趋势(线性倾向率 26.75974, $R^2 = 0.9524$,图 1-a),年均增加 24.47 km²,增幅达 490.52%。1973 年时人工湿地面积最小,仅为 199.51 km²,2010 年面积达到最大,达 1183.51 km²。在黄河造陆运动持续进行的情况下,自然湿地和人工湿地向非湿地类型的转换,导致了研究区湿地总面积的大幅缩小。40 年间,黄河三角洲湿地总面积共计缩小了 7.99%,年均减少 6.13 km²。这种转出趋势又以自然湿地的输出为主。如表 6 所示,整个研究时期内,共有 835.76 km²的自然湿地转换为非湿地,占非湿地类型总转入面积的 84.27%。人工湿地面积的增长亦主要来自自然湿地的转入,40 年间,有 881.40 km²的自然湿地转化为人工湿地,占总转入面积的 80.21%。而自然湿地的增加则主要来自造陆运动,40 年间,造陆形成的自然湿地达 472.96 km²,占自然湿地总转入面积的 68.60%。在区域湿地面积减少的背景下,造陆成为黄河三角洲湿地景观面积增加的源动力。总体上看,黄河三角洲湿地面积在 1973—1985 年是增加的,在 1985 年时湿地面积达到最大(3512.41 km²),随后持续下降,2013 年时面积最小(2334.77 km²)。

表 6 湿地景观面积转移矩阵(km²)

Table 6 The area transfer matrix of wetland landscapes(km²)

1973—2013	非湿地 Non-wetland	海域 Sea area	人工湿地 Artificial wetland	自然湿地 Natural wetland	总计 Total
非湿地/ Non-wetland	2803.31	7.88	192.07	198.33	3201.58
海域/Sea area	53.97	6799.10	25.38	472.96	7351.42
人工湿地/ Artificial wetland	102.05	0.00	79.29	18.17	199.51
自然湿地/ Natural wetland	835.76	195.37	881.40	953.94	2866.47
总计/ Total	3795.08	7002.35	1178.14	1643.40	—

就具体类别而言,自然湿地面积的减少主要由于翅碱蓬柽柳沼泽、芦苇柽柳沼泽和芦苇沼泽的转出。1973—2013 年,翅碱蓬柽柳沼泽净转出 403.55 km²,转出方向主要是虾蟹田(160.42 km²)、水库坑塘(143.35 km²)和海域(81.62 km²);芦苇柽柳沼泽净转出 363.68 km²,转出方向主要是旱地(126.40 km²)、芦苇沼泽(76.54 km²)、虾蟹田(75.31 km²)和水库坑塘(73.99 km²);芦苇湿地净转出 854.55 km²,转出方向主要是旱地(371.56 km²)、虾蟹田(108.97 km²)、水库坑塘(81.93 km²)和盐田(63.06 km²)(表 7)。由于上述转换过程,人工湿地的增长尤其体现为水库坑塘和虾蟹田面积的增长。40 年间,水库坑塘面积由 55.35 km²增加到 431.43 km²,增长了 779.46%;而虾蟹田面积则由 1973 年的几乎为零,增长到 2013 年的 405.90 km²,且二者线性增长趋势显著(图 1-b)。

由此可见,黄河三角洲近 40 年湿地景观面积变化以自然湿地向人工湿地和非湿地的转换为主要特征。种植业、养殖业的发展和水资源安全政策的实施是推动黄河三角洲湿地生态系统演变的重要驱动因素。

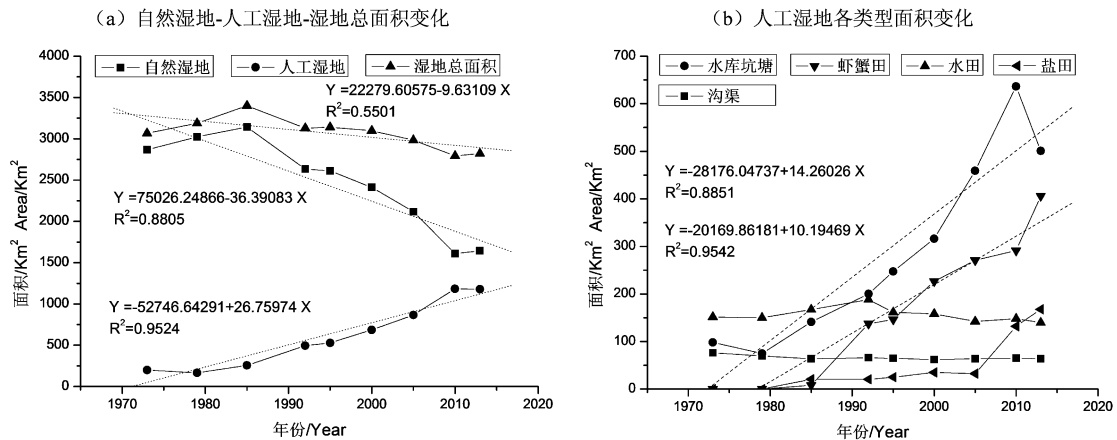


图 1 1973—2013 年黄河三角洲湿地景观面积变化

Fig. 1 Area change of wetland landscape in the Yellow River delta during 1973—2013

表 7 1973—2013 年黄河三角洲主要景观类型面积转移矩阵 (km²)

Table 7 The area transfer matrix of some typical landscapes in the Yellow River delta during 1973 and 2013 (km²)

1973—2013	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
L1	79.96	81.62	17.15	14.37	143.35	160.42	33.05	166.67
L2	77.58	6799.10	4.49	27.18	15.35	6.04	0.66	421.00
L3	0.28	0.01	2233.19	22.58	73.17	8.22	10.33	286.80
L4	38.13	2.55	126.40	33.70	73.99	75.31	34.53	153.09
L5	0.30	0.00	24.95	0.63	16.28	0.36	2.20	10.64
L8	96.78	119.07	579.22	75.57	164.63	155.56	87.00	—

L1:翅碱蓬柽柳沼泽 (Seepweed Tamarisk marsh) L2:海域 (Sea area) L3:旱地 (Dry land) L4:芦苇柽柳沼泽 (Tamarisk reed marsh) L5:水库坑塘 (Reservoir) L6:虾蟹田 (Shrimp and crab farm) L7:盐田 (Salt pan) L8:其他 (Others)

实际上,黄河三角洲湿地景观演变在具有上文所述的总体特征的同时,也具有一定的阶段性(图 1-a、1-b)。这种阶段性变化是黄河三角洲自然与社会经济因素阶段特征的具体反映,深入分析这些阶段变化有助于深化对其驱动因素的认识和把握。限于篇幅,难以详述,已另撰文对此进行深入分析和讨论。

3.3 黄河三角洲湿地景观演变趋势的空间异质性

40 年间,SWCSI 指数总体呈显著下降趋势($y = -8E - 05x^2 + 0.3315x - 327.01, R^2 = 0.9755$),表明黄河三角洲景观整体向着人工化和湿地退化方向演变。但是,这种演变存在显著的时空差异,概括而言,黄河三角洲滨海地区以人工化和湿地退化趋势为主,黄河入海口地区以湿地化趋势为主,中西部和西南部传统农耕区则基本无变化。

具体来说,湿地化进程主要发生在 1992 年建立的黄河三角洲国家级自然保护区内,以现行黄河入海口附近和一千二管护区南部地区最为集中(图 2),其他区域偶有零星分布,总面积 1178.95 km²,占研究区总面积的 16.64%。发生湿地化的这些区域,以向芦苇沼泽的转入最为显著,40 年间,向芦苇沼泽的累计转入面积达 705.95 km²。其次是向翅碱蓬柽柳沼泽(461.84 km²)和翅碱蓬沼泽(456.67 km²)的转入。泥沙质滩涂和芦苇柽柳沼泽也有较大面积的转入,分别累计转入 440.13 km²和 397.26 km²。这些类型的转入面积占全部湿地类型总累计转入面积的 90.83%。而就其来源来看,造陆产生的湿地面积最大,累计达 449.27 km²,其次是泥沙质滩涂向其他湿地类型的转换,累积转出 250.96 km²。再次是翅碱蓬沼泽向翅碱蓬柽柳沼泽等类型的转换,累计转出 229.91 km²。与此同时,也存在非湿地向自然湿地的转换,以旱地向芦苇沼泽的转换为主,累计转换面积为 196.38 km²。湿地化的这种位置特征及发生湿地化区域的景观类型转换特征再次表明,黄河水沙及其造陆运动为黄河三角洲湿地发展提供了源动力。

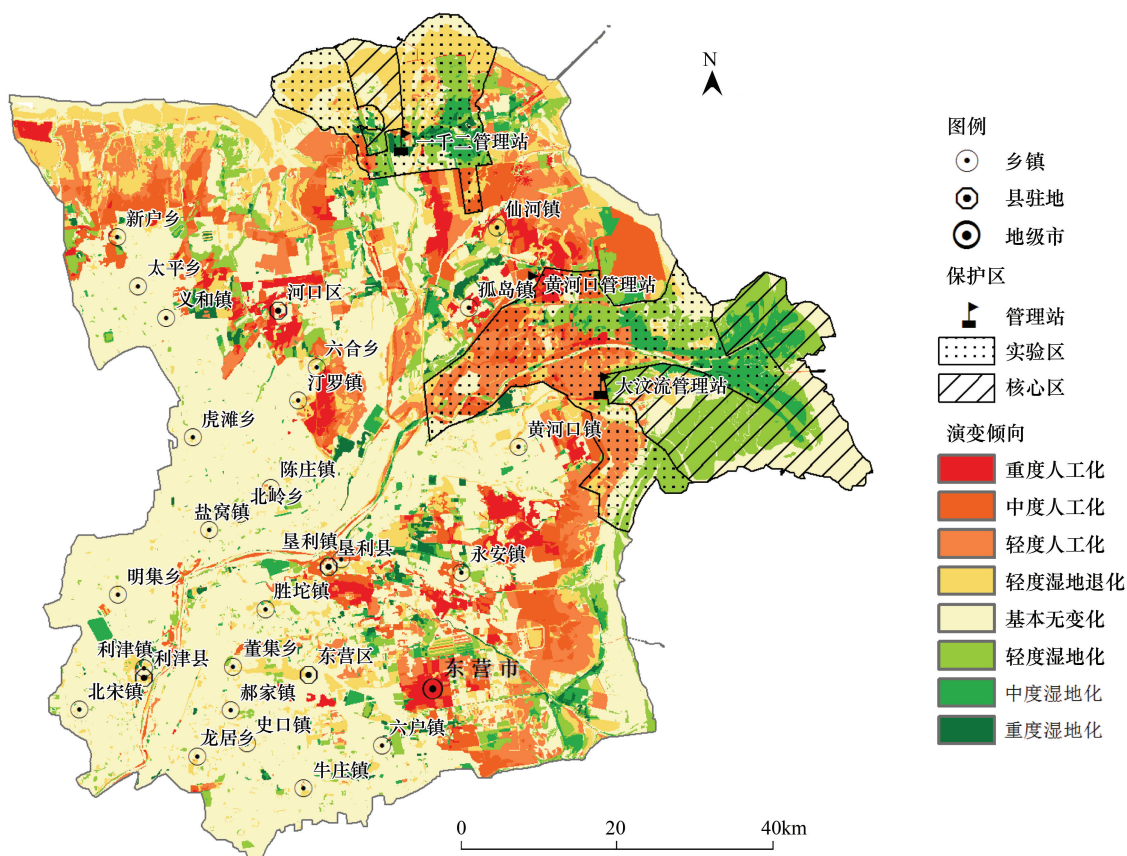


图2 黄河三角洲 1973—2013 景观演变趋势

Fig. 2 The Yellow River delta landscapes evolution trends during 1973 and 2013

发生人工化趋势演变的区域则连片分布,面积 2488.77 km²,占研究区总面积的 35.13%。东营市区附近、永安镇东北方向、仙河镇附近、河口区等地人工化趋势严重。新户乡以北地区、黄河口管护区西部实验区、孤东油田等地也有中度人工化趋势。发生人工化趋势的这些区域,以向旱地的转入最为显著,累计转入面积达 777.80 km²。其次是向水库坑塘的转入,累计面积 431.70 km²。同时,也存在向虾蟹田、盐田和居民地的较大面积的转换,分别累计转入面积 341.83 km²、148.46 km²和 161.29 km²。向上述主要类型的转换占向人工湿地和非湿地总累计转入面积的 88.39%。而就其来源来看,近一半来自芦苇沼泽和芦苇柽柳沼泽向旱地、水库坑塘和虾蟹田的转换,累计转换面积 902.91 km²。其次是翅碱蓬柽柳沼泽向上述三者的转换,累计转换面积 209.31 km²。不难看出,研究区发生人工化区域的景观演变主要是由于种植业、水资源安全政策和水产养殖业发展的驱动,其位置特征显示出人类活动影响在空间上的广泛性。

4 湿地景观演变的驱动力分析

4.1 区域尺度驱动力定量分析

在 SPSS 软件平台支持下,以研究区自然湿地面积、人工湿地面积及区域湿地总面积和表面湿地/人工状态指数(SWCSI)为因变量,选取径流量(X1),输沙量(X2),降水量(X3),GDP(X4)和水产品产量(X5)为自变量,建立多元回归模型,结果见下表 8。对模型结果进行检验,判定系数均大于 0.950,且 $F > F_{0.001}(5, 29) = 5.59$,伴随概率 $P < 0.001$,各回归模型均非常显著。

依据各回归模型标准系数不难看出,研究区 GDP 增长和水产养殖业发展是推动自然湿地减少、人工湿地增加、湿地总面积减少和研究区整体状态呈人工化或湿地退化趋势的重要因素。GDP 除在湿地景观总面积演变中的贡献稍逊于水产品产量外,在自然湿地面积变化、人工湿地面积变化,以及 SWCSI 变化中的贡献均

居首要地位,标准系数绝对值大小均在 0.400 以上,平均达 0.477。可见,GDP 对黄河三角洲湿地景观演变起主导作用。黄河径流量和输沙量是推动自然湿地增加、人工湿地减少和研究区整体状态向湿地化趋势发展的重要因素,对黄河三角洲湿地景观的正向演变亦起到重要作用,表现为通过造陆运动产生新湿地,并且通过源源不断的淡水补充,维持湿地水盐平衡,进而促进湿地生态系统的发展。然而,从研究区整体来看,黄河水沙的这种作用明显弱于社会经济因素。一些学者也有类似结果,认为自然驱动力虽然对湿地格局有所影响,但是影响微弱,而人为驱动力对湿地格局却具有颠覆性的影响^[20]。区域降水对研究区湿地景观演变所起到的影响极其有限,标准系数绝对值均在 0.01 以下,且在一些结果中显示出与通常认识不相符的驱动方向的问题。一些学者也发现,黄河三角洲主要湿地景观面积变化与降水量之间不存在明显的相关关系^[21]。同其他自变量与各驱动力因子的回归分析结果相比,表面湿地/人工状态指数(SWCSI)与各驱动力因子的回归分析结果,突出显示了 GDP 在黄河三角洲景观演变中的主导作用,并且各驱动力因子的驱动方向符合常规认识,且标准系数排序合理,反映出 SWCSI 对研究区景观状态的湿地化和人工化特点及其演变规律具有良好的指示作用。

表 8 多元回归分析结果

Table 8 Results of multiple regression analysis

因变量/ Dependent variables	回归公式/标准系数/ Regression equation/standard coefficient	F	R ²	Sig.
自然湿地	回归公式 $Y = 0.953X_1 + 16.024X_2 - 0.033X_3 - 0.244X_4 - 0.001X_5 + 2586.552$	365.993	0.984	0.000
Natural wetland	标准系数 $X_1:0.180 \quad X_2:0.094 \quad X_3:-0.010 \quad X_4:-0.451 \quad X_5:-0.382$			
人工湿地	回归公式 $Y = -0.251X_1 - 34.803X_2 + 0.010X_3 + 0.154X_4 + 0.000X_5 + 635.129$	283.589	0.980	0.000
Artificial wetland	标准系数 $X_1:-0.073 \quad X_2:-0.316 \quad X_3:0.005 \quad X_4:0.439 \quad X_5:0.254$			
湿地总面积	回归公式 $Y = 0.673X_1 - 17.647X_2 - 0.022X_3 - 0.095X_4 - 0.001X_5 + 3213.806$	132.215	0.958	0.000
Total wetland	标准系数 $X_1:0.356 \quad X_2:-0.291 \quad X_3:-0.018 \quad X_4:-0.492 \quad X_5:-0.566$			
SWCSI	回归公式 $Y = 0.602X_1 + 15.927X_2 - 0.018X_3 - 0.208X_4 - 0.001X_5 + 4259.930$	399.471	0.986	0.000
(* 10000)	标准系数 $X_1:0.155 \quad X_2:0.128 \quad X_3:-0.007 \quad X_4:-0.525 \quad X_5:-0.298$			

X_1 : 径流量(五年滑动平均) X_2 : 输沙量(五年滑动平均) X_3 : 年降水 X_4 : 全市生产总值 X_5 : 水产品产量

4.2 像元尺度驱动力分异分析

1)SWCSI 同自然因子的相关性。同入海水沙量显著正相关的区域离散分布于整个研究区,又以北部海岸带和东南部等地较为集中(图 3-a、b),相关系数 $r>0.6664$,部分区域 $r>0.7797$ 。北部海岸由于 1976 年黄河改道清水沟后不再经由该处入海,因此海岸侵蚀严重(附图 1),湿地退化(图 2)。这种侵蚀退化同改道后的黄河径流量和输沙量的减少形成遥相关,且相关性显著。但这种遥相关是否表明黄河径流的减少影响到北部海岸湿地的侵蚀退化,需待探讨。对于已经人工化改造的东南部区域,尽管其同水沙变化有显著的正相关关系,但是否黄河水沙减少为该区域自然景观的人工改造创造了条件,以及人类意志和黄河水沙各发挥了多大作用,实际上很难量化。

值得注意的是,同黄河径流量呈显著负相关,即随着黄河水沙的减少而呈显著湿地化趋势的区域,反而集中地出现在黄河入海口处(图 3-a、b)。出现这种情况的原因大致有两点,其一,1976 年黄河改道清水沟后,清水沟流路入海口经历了由海到陆,再到陆上生态系统逐渐建立和完善的湿地化过程;其二,入海水沙减少形势下,造陆运动趋缓、停滞、甚至海岸有蚀退,部分区域盐渍化加剧,但这种影响仅限于外围新造陆地,内部核心区湿地系统仍能正常维持和发展。因此,近 40 年来黄河水沙的总体减少趋势,同现行黄河入海口处湿地景观的持续发展形成显著负相关。

同样值得一提的是,黄河 1995 年改道清八汉入海形成的新的河口湿地的景观演变同径流量和输沙量的相关性存在差异,表现为同输沙量的相关性显著,而同径流量的相关性则不显著。这表明,对于河口湿地的发展而言,输沙量起到比径流量更为关键的作用。

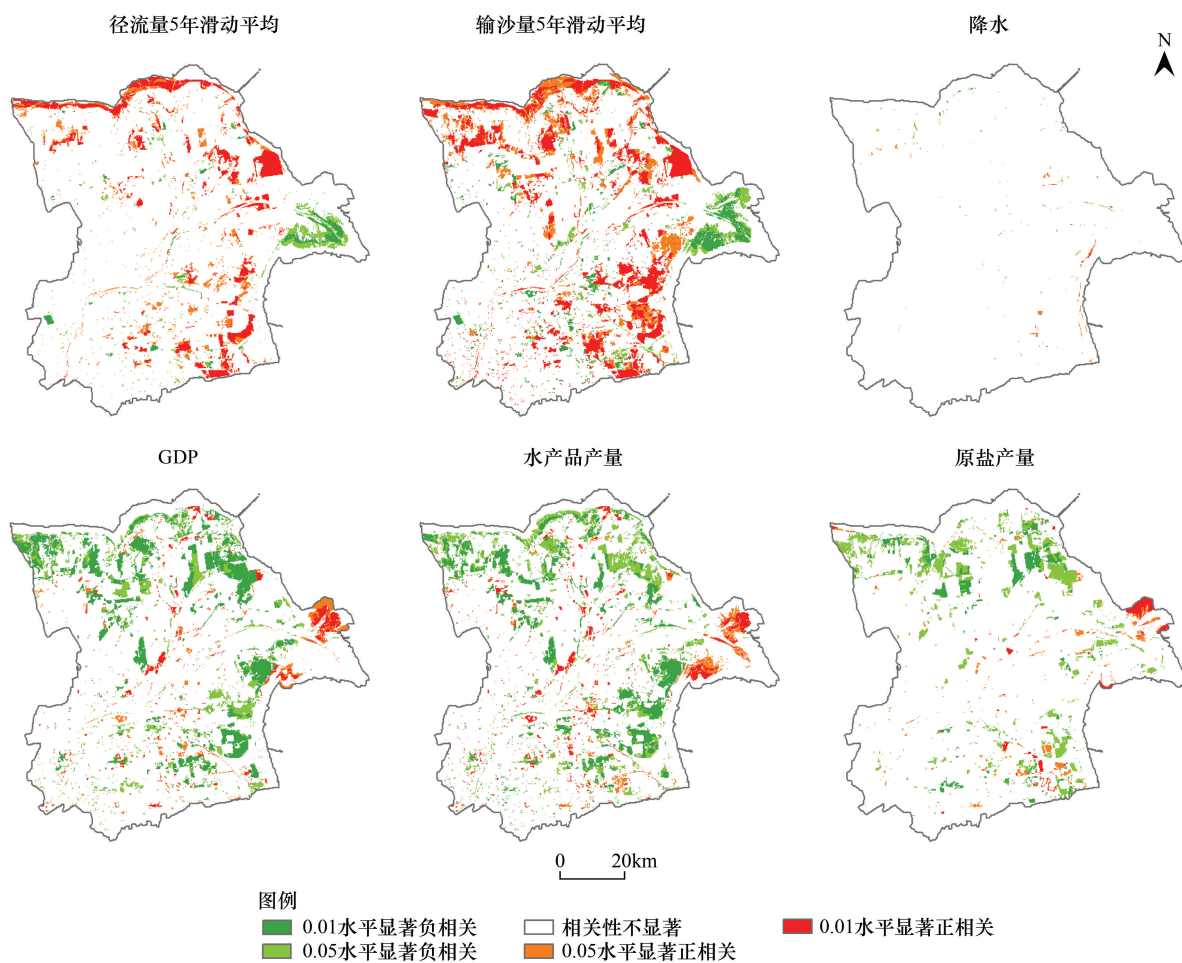


图3 黄河三角洲表面人工化和湿地状态指数 (SWCSI) 同各因子相关性

Fig. 3 Relationships between SWCSI with the landscape evolution driving forces in the Yellow River delta

研究区景观演变同区域降水的相关性并不显著(图3-c),原因在于,一方面,研究区经纬度跨度较小,且区域内无较大起伏地形,区域降水可认为是均匀的,不存在降水的严重差异分布;另一方面,研究区湿地供水更多地依赖于河流和潮沟,而对区域降水的依赖相对较弱。因此,研究区景观演变同降水的相关性总体上不高。

2)SWCSI 同社会经济因子的相关性。研究区 SWCSI 同社会经济因子显著负相关的区域明显多于显著正相关的区域,即随着社会经济因子的增长,研究区大部分区域朝着人工化方向演变。同水产品产量和原盐产量显著负相关的区域往往发生从自然湿地向虾蟹田、盐田等人工湿地的演变(图3-e,f,附图1);而同 GDP 显著负相关的区域更为广泛(图3-d),不仅涵盖上述区域,也同时涵盖其他由自然湿地向人工湿地或非湿地演变的区域,且整体显著性更高。黄河入海口处部分区域景观演变同社会经济因子呈显著正相关,即随着社会经济因子增长,区域景观向湿地化方向演变,但是,这之间似乎并不存在直接的因果联系。

上述情况表明,自然因素和人类社会经济活动对黄河三角洲景观演变的影响存在明显的空间异质性。相比之下,黄河水沙的影响主要集中在入海口地区,而人类活动的影响范围更广泛。这种影响的空间异质性主要是由于驱动力因素本身的空间异质性造成的。湿地的发展主要归因于自然因素,以黄河水沙作用最为关键;湿地的人工化或退化过程较为复杂,以人类社会经济活动的强制改造为主导,但是否伴随黄河水沙变化的潜在影响,对特定区域而言应是确定的,但仍然很难从像元尺度进行量化。

5 结论与讨论

5.1 结论

1) 过去 40 年,黄河三角洲自然湿地面积不断萎缩,人工湿地增加,湿地总面积减小,黄河三角洲整体上呈现出人工化或湿地退化趋势。40 年间,湿地总面积共计缩小了 7.99%,年均减少 6.13 km²。自然湿地面积缩小了 42.67%,年均减少 30.58 km²。与之相反,人工湿地面积年增加 24.47 km²,增幅达 490.52%。与此同时,黄河三角洲湿地景观在过去 40 年的演变也存在明显的空间异质性:滨海地区以人工化和湿地退化趋势为主,黄河入海口地区以湿地化趋势为主,中西部和西南部传统农耕地基本无变化。

2) 黄河三角洲湿地景观的人工化或湿地退化趋势是过去 40 年来黄河水沙减少、人类活动加剧共同作用的结果。区域尺度上看,GDP 增长和水产养殖业发展等人类社会经济活动对黄河三角洲湿地景观演变起主导作用。黄河径流量和输沙量的作用明显弱于社会经济因素。像元尺度上看,驱动因素的空间异质性是导致黄河三角洲湿地景观演变存在空间异质性的原因。湿地的发展主要归因于自然因素,以黄河水沙作用最为关键;湿地的人工化或退化过程以人类社会经济活动的强制改造为主导,但是否伴随黄河水沙变化的潜在影响,对特定区域而言应是确定的,但仍然很难从像元尺度进行量化。

5.2 讨论

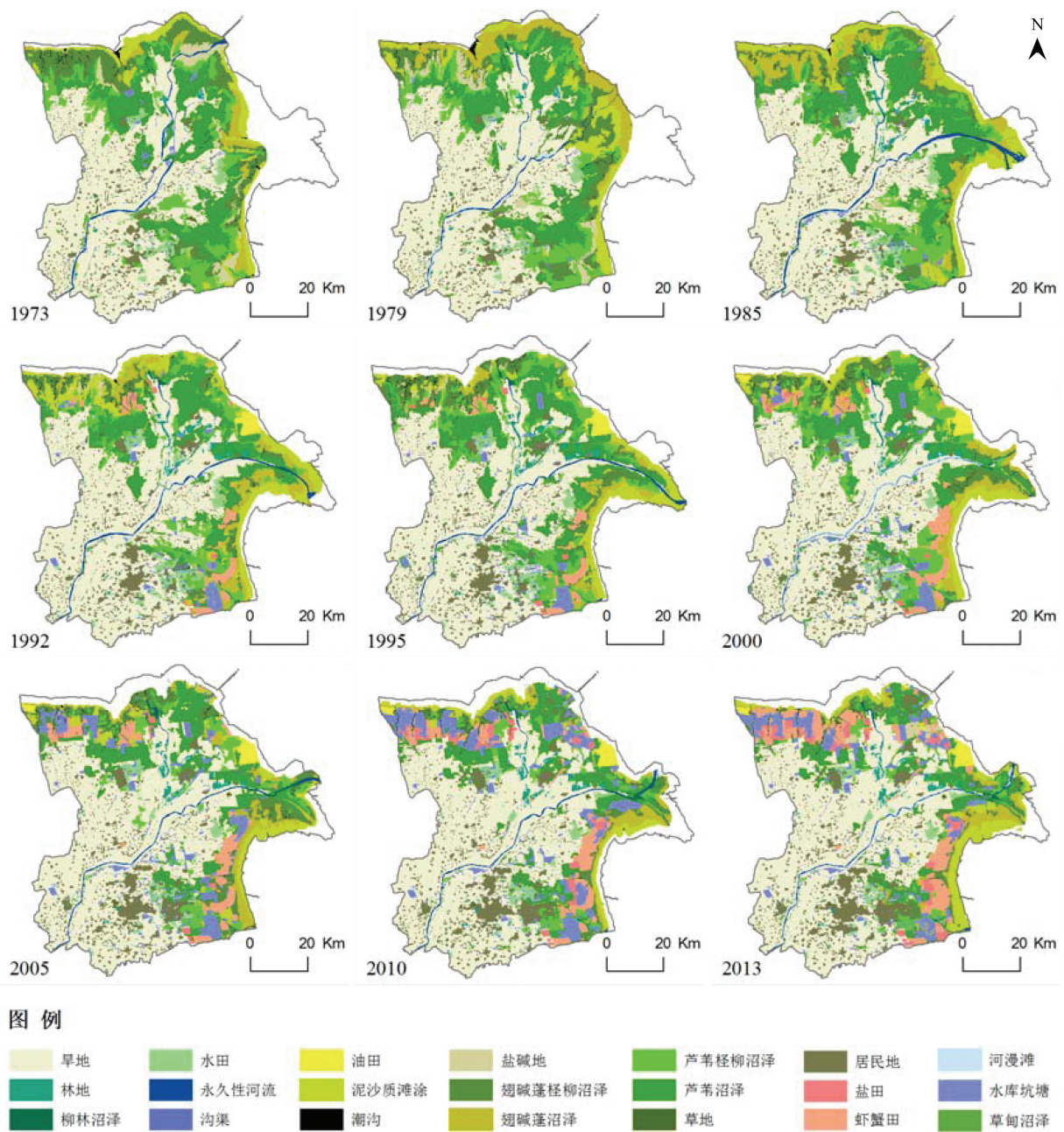
对黄河三角洲湿地破坏性的开发利用无疑能够带来巨大的经济效益和社会效益,但与此同时也应对其带来的巨大生态损失有所考量,尤其是需要认识到社会经济来源具有广泛性,而湿地生态系统则具有特定的环境依赖性和区域局限性,因此,要特别注意加强对当地湿地生态系统的保护,严格限制人类活动的范围和程度。同时,也需认识到黄河三角洲又具有一定特殊性,即造陆运动持续进行,大片新陆地不断产生,任其长期撂荒也是一种资源的浪费,并不符合社会经济发展的需要,因此,适当地开发也是无可厚非的。权衡之下,最好是能够“量入为出”,即在保证一定面积的湿地生态保护区的前提下,视造陆情况合理规划开发进度和区域,在动态变化中求得平衡,最终实现区域社会经济发展与生态环境保护双赢。

文章在充分考虑研究区景观演变规律的基础上,通过主客观相结合的方法对研究区景观进行排序赋值,构建了表面湿地/人工状态指数(SWCSI)。利用该指数对研究区景观演变趋势和驱动力进行的研究表明,该指数对研究区景观的湿地化和人工化特点及其演变规律具有很好的指示作用,这对相关地区和相关领域的研究具有一定的借鉴意义。与此同时,该指数的构建也存在主观性较强,排序只能反映各景观类型生态服务功能的相对大小,而难以具体反映不用景观类型生态服务功能的定量差异等问题,未来可尝试使用景观生态服务功能大小来赋值,并在其基础上开展湿地景观演变及驱动力研究。

参考文献(References):

- [1] 陈建,王世岩,毛战坡. 1976—2008 年黄河三角洲湿地变化的遥感监测. 地理科学进展, 2011, 30(5): 585-592.
- [2] 张晓龙,李培英. 现代黄河三角洲的海岸侵蚀及其环境影响. 海洋环境科学, 2008, 27(5): 475-479.
- [3] 孙志高,牟晓杰,陈小兵,王玲玲,宋红丽,姜欢欢. 黄河三角洲湿地保护与恢复的现状、问题与建议. 湿地科学, 2011, 9(2): 107-115.
- [4] Marco Ottinger, Claudia Kuenzer, Liu G H, Wang S Q, Stefan Dech. Monitoring land cover dynamics in the Yellow River Delta from 1995 to 2010 based on Landsat 5 TM. Applied Geography, 2013, 44: 53-68.
- [5] 王永丽,于家宝,董洪芳,栗云召,周迪,付玉芹,韩广轩,毛培利. 黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析. 地理科学, 2012, 32(6): 717-724.
- [6] Wang S Y, Ding C B, Liu J S. Landscape evolution in the Yellow River Basin using satellite remote sensing and GIS during the past decade. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(21): 5573-5591.
- [7] Liu G L, Zhang L C, Zhang Q, Zipporah Musyimi, Jiang Q H. Spatio-Temporal Dynamics of Wetland Landscape Patterns Based on Remote Sensing in Yellow River Delta, China. Wetlands, 2014, 34(4): 787-801.
- [8] 赵锐锋,姜明辉,赵海莉,樊洁平. 黑河中游湿地景观破碎化过程及其驱动力分析. 生态学报, 2013, 33(14): 4436-4449.
- [9] Fan H, Huang H J, Thomas Zeng. Impacts of anthropogenic activity on the recent evolution of the Huanghe (Yellow) River Delta. Journal of

- Coastal Research, 2006, 22(4): 919-929.
- [10] Yu J, Fu Y, Li Y, Han G, Wang Y, Zhou D, Sun W, Gao Y, Meixner F X. Effects of water discharge and sediment load on evolution of modern Yellow River Delta, China, over the period from 1976 to 2009. *Biogeosciences*, 2011, 8(9): 2427-2435.
- [11] 黄昌硕, 陈敏建, 丰华丽. 来水量变化对黄河三角洲湿地生态类型的影响. *人民黄河*, 2012, 34(11): 60-62.
- [12] 姚长新, 袁红明, 孟祥君, 李绍全. 黄河三角洲滨海湿地损失和退化的自然因素. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(1): 43-50.
- [13] 邓伟, 白军红, 胡金明, 李爱农. 黄淮海湿地系统分类体系构建. *地球科学进展*, 2010, 25(10): 1023-1030.
- [14] 肖笃宁, 胡远满, 李秀珍. 环渤海三角洲湿地的景观生态学研究. 北京: 科学出版社, 2001.
- [15] 栗云召, 于君宝, 韩广轩, 王雪宏, 王永丽, 管博. 黄河三角洲自然湿地动态演变及其驱动因子. *生态学杂志*, 2011, 30(7): 1535-1541.
- [16] 邓伟, 白军红. 典型湿地系统格局演变与水生态过程——以黄淮海地区为例. 北京: 科学出版社, 2012: 43-44.
- [17] 陈述彭. 地学信息图谱探索研究. 北京: 商务印书馆, 2001.
- [18] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-195.
- [19] 张洪刚, 洪剑明. 人工湿地中植物的作用. *湿地科学*, 2006, 4(2): 146-54.
- [20] 孙晓宇, 苏奋振, 吕婷婷, 仇天宇, 吴迪, 付敏. 黄河三角洲湿地资源时空变化分析. *资源科学*, 2011, 33(12): 2277-2284.
- [21] 李胜男, 王根绪, 邓伟, 胡远满. 水沙变化对黄河三角洲湿地景观格局演变的影响. *水科学进展*, 2009, 20(3): 325-331.



附图 1 1973—2013 年黄河三角洲湿地景观

Accompany Fig. 1 Wetland landscape of the Yellow River Delta during 1973—2013