



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

1984—2015年黄河三角洲人工湿地的演变及主要驱动因子

任玲玲, 栗云召, 于森, 杨继松, 战超, 周迪

引用本文:

任玲玲, 栗云召, 于森, 等. 1984—2015年黄河三角洲人工湿地的演变及主要驱动因子[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 493–502.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0111>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄河三角洲滨海湿地退化过程的时空变化及预测分析

于森, 栗云召, 屈凡柱, 周迪, 战超, 王雪宏

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 484–492 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0110>

黄河三角洲典型地区春季土壤水盐空间分异特征研究——以垦利县为例

王卓然, 赵庚星, 高明秀, 姜曙千, 常春艳, 贾吉超

农业资源与环境学报. 2015(2): 154–161 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0293>

滨海盐渍区土壤盐分遥感反演及动态监测

张素铭, 赵庚星, 王卓然, 肖杨, 郎坤

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 349–358 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0016>

基于力学平衡模型的耕地多功能演变及其协调性分析——以珠江三角洲为例

余富祥, 胡月明, 刘振杰, 李波, 王璐

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 728–737 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0302>

黄河三角洲地区除草剂对紫花苜蓿产量及杂草群落影响的初探

王国良, 张清平, 吴波, 何峰, 盛亦兵

农业资源与环境学报. 2016, 33(3): 281–288 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0293>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

任玲玲, 栗云召, 于 森, 等. 1984—2015年黄河三角洲人工湿地的演变及主要驱动因子[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 493–502.

REN Ling-ling, LI Yun-zhao, YU Miao, et al. Evolution of artificial wetlands in the Yellow River Delta and related driving factors during 1984—2015[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 493–502.



开放科学 OSID

1984—2015年黄河三角洲人工湿地的演变及主要驱动因子

任玲玲¹, 栗云召^{1,2*}, 于 森¹, 杨继松^{1,2}, 战 超^{1,2}, 周 迪^{1,2}

(1. 鲁东大学资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025; 2. 鲁东大学滨海生态高等研究院, 山东省高等学校滨海湿地生态修复与保育重点实验室(鲁东大学), 山东 烟台 264025)

摘 要:为研究黄河三角洲人工湿地在多驱动因素影响下长时间序列的时空演变和景观格局变化,以1984—2015年7期遥感影像为数据源,采用目视解译方法获取人工湿地的相关数据信息,在GIS、RS、ENVI等技术手段下,对人工湿地的变化率、空间质心、景观指数进行定量分析并定性分析其主要驱动因子。结果表明:31年来,黄河三角洲人工湿地总面积增加85 762.13 hm²,其中坑塘水面、人工沟渠、养殖塘、水田、盐田、水库分别增加14 620.29、1 128.18、22 648.13、30 648.51、11 220.69、5 246.61 hm²,年均变化率分别为55.52%、24.93%、10.25%、22.84%、174.32%、13.09%;质心分析结果显示,坑塘水面、养殖塘整体上呈“先东南后西北”的偏移趋势,水库有先向东南偏移后整体上呈向南部偏移的趋势,盐田有向东部近海偏移的趋势,水田由沿黄河故道到黄河现道大致呈“之”字偏移的趋势,人工沟渠大致呈“Z”形偏移的趋势;在黄河水情、风暴潮、经济、人口、政策以及自然湿地等多因素影响下,研究区人工湿地斑块个数逐年增加,景观破碎程度加大,景观形状由不规则化趋于规则化,且多样性和均匀度先增加后降低。研究表明,31年来黄河三角洲人工湿地在多因素驱动下具有明显的时空变化,研究结果可为黄河三角洲湿地资源的开发、利用、管理和保护及土地资源的合理利用提供理论指导。

关键词:人工湿地;时空演变;质心;驱动力;黄河三角洲

中图分类号:X37;P901 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2020)04-0493-10 doi: 10.13254/j.jare.2019.0111

Evolution of artificial wetlands in the Yellow River Delta and related driving factors during 1984—2015

REN Ling-ling¹, LI Yun-zhao^{1,2*}, YU Miao¹, YANG Ji-song^{1,2}, ZHAN Chao^{1,2}, ZHOU Di^{1,2}

(1. School of Resource and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China; 2. The Institute for Advanced Study of Coastal Ecology, Key Laboratory of Ecological Restoration and Conservation of Coastal Wetlands in Universities of Shandong (Ludong University), Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract: Based on 7 remote sensing images from 1984 to 2015, we obtained information of change rates, centroids, and landscape characteristics of artificial wetlands of the Yellow River Delta (YRD) by visual interpretation of remote sensing images in order to explore spatial and temporal change of artificial wetlands in the YRD during the past 31 years. Then, we studied the change process by quantitative analysis and the driving factors of the artificial wetlands by qualitative analysis. The area of the artificial wetlands in the YRD increased to 85 762.13 hm² during the last 31 years. Areas of soak, artificial channel, culture pond, paddy field, salt field, and reservoir increased to 14 620.29, 1 128.18, 22 648.13, 30 648.51, 11 220.69 hm², and 5 246.61 hm² with annual change rates of 55.52%, 24.93%, 10.25%, 22.84%, 174.32%, and 13.09%. Centroid analysis results showed that the soak and culture pond as a whole presented a trend of shifting from southeast to northwest, the reservoir had a trend of shifting from southeast to south, the salt field had a trend of shifting towards the east near the sea, the paddy field shifted from along the Yellow River old course to the Yellow River present course in a zigzag pattern, and the artificial channel shifted in a Z-shape. Under the influence of multiple factors such as Yellow River water level, storm surge, economy, population, policy, and natural wetlands, the number of artificial wetland patches in the study area increased year by year, the landscape fragmentation increased, the landscape shape tended to be regularized, and the diversity and uniformity first increased and then decreased. The study shows that artificial wetlands in the Yellow River Delta have obvious spatiotemporal changes driven by multiple factors, and the research results can provide theoretical guidance for the development, utilization, management and protection of wetland resources and the reasonable utilization of land resources.

收稿日期: 2019-03-04 录用日期: 2019-05-05

作者简介: 任玲玲(1996—), 女, 山东淄博人, 从事湿地景观生态学研究。E-mail: renlling001@163.com

*通信作者: 栗云召 E-mail: yzli@yic.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505902); 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室开放基金项目(2016KFJJ03)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2017YFC0505902); Open Foundation of Shandong Provincial Key Laboratory of Ecology and Environment of the Yellow River Delta(2016KFJJ03)

22.84%, 174.32%, and 13.09%, respectively. From the centroid analysis results we found that areas of soak, and culture pond had a trend of “Southeast then Northwest” and salt fields had a trend of moving to the eastern offshore. Besides, the reservoir had a trend of moving to southeast first, then shifting to the south as a whole and artificial channels were arranged in a “Z-shape” along the Yellow River. Under the various factors, the patches of artificial wetlands increased while the area-weighted mean shape index, patch size standard deviation, Shannon's diversity index, and Shannon's evenness index increased first and then decreased. Our results indicated that artificial wetlands in the YRD during the past 31 years have changed considerably, as indicated by various factors, and the results could provide theoretical directions for the development, use, management, and protection of wetland resources.

Keywords: artificial wetlands; spatial-temporal change; centroid; driving factors; Yellow River Delta

黄河三角洲是我国的三大河口三角洲之一,每年由黄河携带大量泥沙入海,年均造陆 32.4 km²,形成大片的新生滨海湿地^[1]。其湿地生态系统以独有的原生性、脆弱性、稀有性、河海交互性、海陆过渡性等特征^[2-4]被“拉姆萨尔国际湿地公约”缔约国认定注册为国际重要湿地。在黄河水沙变化^[5-7]、流路改变^[8]、海平面上升、风暴潮和人口增加、经济发展等因素的影响下^[3,9-10],黄河三角洲湿地变化剧烈,这种变化尤其表现在人工湿地和自然湿地的此消彼长中。目前国内学者对黄河三角洲湿地的研究主要集中于湿地资源的开发与利用^[11-12]、“3S”技术下湿地景观格局变化及生态评价^[13-14]、湿地对环境变化的响应^[15-16]等方面。据统计年鉴记载,2015年东营市河口区水产品养殖面积达 3.7 万 hm²,总产量达 14.75 万 t,渔业总产值达 11.56 亿元;垦利县完成水产养殖面积 4.1 万 hm²,实现水产品总产量 16.04 万 t,渔业经济总产值达 48.52 亿元。养殖类人工湿地为区域带来巨大经济效益的同时其面积不断扩张、分布区域逐渐扩散,这对区域土地覆被变化及生态环境演变产生显著影响。同时,近 30 年来,黄河三角洲地区的其他人工湿地,如水库、沟渠、水田、盐田等分布及面积也发生明显变化,人工湿地的变化响应已成为当前研究领域的重要课题。现阶段国内学者关于黄河三角洲人工湿地的研究主要集中在人工湿地的信息提取,面积、景观格局变化,以及驱动力分析^[17-19]等方面,但多因素影响的长时间序列下的人工湿地时空变化的相关研究相对较少,且在驱动因素探讨中多忽略了自然湿地与人工湿地相互关系^[20-22],基于此,本文拟通过遥感与地理信息技术,结合景观生态学理论方法对黄河三角洲人工湿地的时空分布规律及变化特征进行长时间序列下的定量分析,并初步对驱动因子进行多方面的定性探讨,进而为黄河三角洲滨海湿地的开发、利用、保护、管理及研究区的土地资源利用提供决策依据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

由黄河携带的大量泥沙经多年冲淤而成的黄河三角洲(118°33'~119°21' E, 37°35'~38°12' N)东临渤海,南靠莱州湾。研究区域为 1934 年以来冲积形成的现代三角洲洲体,其西部以垦利县渔洼村为顶点,即北起挑河口,南至宋春荣沟口,东到海岸之间的扇形区域,如图 1 所示。在行政区划上,该区域全部属于东营市,包括东营市垦利县和河口区的大部分以及利津县的小部分。区域属暖温带大陆性半湿润季风气候,主要湿地类型有河流、湖泊、盐沼、草本沼泽、水田、池塘、盐田、养殖池、灌丛等,2016 年黄河三角洲湿地总面积已达 272 391 hm²^[22]。

1.2 数据获取与处理

本文所采用的数据是黄河三角洲 1984—2015 年中的 7 期遥感影像,根据云量少、不遮蔽研究区、植物量较高、避开伏秋大汛期的原则进行遥感影像的选取,最终确定为便于目视解译的 5—7 月影像作为研究影像,详见表 1。影像数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。

首先在 ENVI 中以 1:50 000 矢量化地形图为基础图像对研究影像进行几何校正,误差控制在 1 个像元

表 1 遥感影像信息

Table 1 Information of remote sensing images

日期 Data	传感器 Sensor	行列号 Path/Row	分辨率 Resolution/m
1984-06-07	MSS	121/034	70
1989-02-13	TM	121/034	30
1996-07-02	TM	121/034	30
2000-05-02	ETM+	121/034	30
2005-05-24	TM	121/034	30
2009-06-04	TM	121/034	30
2015-05-04	OLI	121/034	30



图1 研究区位置

Figure 1 Location of the study area

内,像元的重采样方法为最邻近内插法。由于缺少1984年的Landsat TM影像,故选择空间分辨率为70 m的质量良好的Landsat MSS影像作为研究影像,并用1996年的Landsat TM影像作为基准影像进行几何校正,误差控制在1个像元内,其次进行波段合成、影像融合、影像裁剪等处理。以可操作性、实用性、全面性为原则,参考“拉姆萨尔”国际湿地公约分类系统,基于野外实地调查数据、Google Earth影像数据,根据地表景物的色彩、形状、大小、纹理将研究区的人工湿地分为七类,详见表2,在ArcGIS中对遥感影像数据进行目视解译,通过区域1:50 000地形图信息、Google Earth不同时期高分辨率影像与目视解译结果比对,模糊位置进行野外实地验证,利用误差矩阵公式进行精度计算,经检验解译结果的总体精度在85.5%以上。最后,在ArcGIS中进行拓扑关系检查、属性信息校对等处理,量化各类型人工湿地面积,对人工湿地的主要景观指数进行计算。

1.3 湿地资源动态检测分析方法

1.3.1 人工湿地类型的时间变化

湿地类型的时间变化用变化率*K*来表示,某一地类变化率的表达式如下:

$$K=\frac{U_b-U_a}{U_a}\times\frac{1}{T}\times100\% \tag{1}$$

式中:*K*为研究时段内某一地类的年均变化率;*U_a*、*U_b*分别为研究时段开始年和研究时段结束年某人工湿地面积;*T*为研究时段的长度。

1.3.2 人工湿地类型的空间变化

土地资源的空间变化用地类的分布质心来表示^[23],同理,人工湿地的空间演变特征可以用各亚类湿地的分布质心进行分析。以坑塘水面为例进行计算演示,第*t*年坑塘水面斑块分布质心的计算步骤为:第一,在ArcGIS中分别求出研究区各年份坑塘水面各斑块的质心坐标(经纬度);第二,将各个坑塘水面斑块的质心经度、纬度分别乘以各自的斑块面积;第三,将该期*n*个坑塘水面斑块的各自乘积进行累加;第四,将乘积累加后的结果除以本期全区域内的坑塘水面的总面积。因此第*t*年坑塘水面的分布质心经纬度计算方法为:

$$X_t=\sum_{i=1}^n(S_{ii}\times X_i)\div\sum_{i=1}^nS_{ii} \tag{2}$$

$$Y_t=\sum_{i=1}^n(S_{ii}\times Y_i)\div\sum_{i=1}^nS_{ii} \tag{3}$$

式中:*X_t*、*Y_t*分别表示第*t*年坑塘水面分布质心的经

表2 人工湿地解译标志

Table 2 Interpretation symbol of the artificial wetlands

景观类型 Landscape pattern	解译标志 Interpretation symbol	含义及影像特征 Meaning and features
坑塘水面		库容小于15万 m ³ 的坑塘水位岸线所围成的水面,水深较水库浅,养殖塘建设前期的坑塘也归为此类,在影像中呈蓝色或浅蓝色
人工沟渠		几何特征明显,局部明显平直,封闭边界清晰,在影像中呈蓝色
水库		几何形状规则,人工痕迹明显,分布零散,色调均匀,影像中呈黑色或深蓝色
水田		几何特征较明显,呈小格子状,注满水时颜色偏蓝或黑,分布于内陆近水源地,连片分布
盐田		规则矩形方格子,充满卤水呈深蓝色,结晶时呈偏白色,未充卤水呈浅灰色,纹理结构清晰,比养殖塘形状规则,多沿海分布
养殖塘		规则细长条状,影像中呈蓝色,沿海分布
其他		即为港口,东营港

度、纬度坐标; S_{it} 表示第 t 年第 i 个坑塘水面斑块的面积; X_i 、 Y_i 分别表示第 i 个坑塘水面斑块的经度、纬度坐标; n 为该期影像中坑塘水面的斑块总数。

1.3.3 人工湿地景观格局分析

使用景观格局指数对研究区人工湿地景观演变过程进行分析,考虑到研究对象是受人为主观因素影响为主导而建造的人工湿地,为了能有效而准确反映人工湿地在多因素尤其是人为因素影响下的景观变化信息,本研究选取了5个指数进行分析,分别为:能反映某一斑块总数变化进而反映斑块破碎度的斑块数量(NP);能反映斑块在外界因素影响下形状变化复杂程度的面积加权平均形状指数(AWMSI);能反映斑块规模与平均规模之间差距进而反映在多因素影响下各类人工湿地面积变化情况的面积标准差

(PSSD);能反映不同景观要素在景观中所占面积的比例和类型的变化程度以及斑块要素的齐全程度的多样性指数(SHDI);能表现各景观类型均匀分配程度的均匀度指数(SHEI)。各指数的计算方法参考《景观生态学》^[24]。

2 结果与分析

2.1 时间尺度上人工湿地变化

2.1.1 人工湿地总面积变化

研究区内人工湿地总面积变化情况见表3。由表3可知,1984—2015年黄河三角洲人工湿地总面积整体呈增加趋势,31年间人工湿地总面积增加了85 762.13 hm²,增加了86.16倍。其中1984—1989年,面积增加了13 331.00 hm²,增加了13.39倍;1989—1996年,面积增加了5 771.64 hm²,年均变化率为5.76%;1996—2000年,人工湿地面积减少了585.77 hm²,年均变化率为-0.73%;2002年实施湿地恢复工程生态环境得以改善,2000—2009年,人工湿地面积增加33 899.39 hm²;2009—2015年,随着人工湿地对当地经济效益贡献率的逐步增加,人工湿地总面积增加了33 345.87 hm²,年均变化率为10.41%。

2.1.2 各亚类人工湿地面积变化

黄河三角洲各类人工湿地面积变化见表4。1984年研究区内土壤含碱量高、土质疏松、水利设施落后,由表4可知当时只有坑塘水面和人工沟渠这两类人工湿地,此后随着石油工业发展与城市化进程的加快,31年间研究区内坑塘水面、人工沟渠年均变化率分别为55.52%、24.93%,面积分别增加了14 620.29、1 128.18 hm²;由于水源限制,2005—2009年坑塘水面增加了10 687.38 hm²,增加了1.33倍,人工沟渠减少了553.36 hm²,减少27.3%,2009—2015年坑塘水面区域多建设成养殖塘,面积减少3 273.26 hm²,减少了17.5%,人工沟渠减少13.5%。1984年研究区内还没有养殖塘、水田、盐田、水库这几种人工湿地类型,到1989年5年间分别增加至6 179.38、4 416.80、242.23、1 191.62 hm²;1989—2015年,26年间研究区内养殖塘、水田、盐田、水库年均变化率分别为10.25%、22.84%、174.32%、13.09%,面积整体呈增加

表3 1984—2015年人工湿地总面积变化(hm²)Table 3 Changes of the whole artificial wetlands area during 1984—2015(hm²)

1984	1989	1996	2000	2005	2009	2015
995.41	14 326.41	20 098.05	19 512.28	29 209.19	53 411.67	86 757.54

表4 1984—2015年各亚类人工湿地面积(hm²)

Table 4 The area of each artificial wetland during 1984—2015(hm²)

年份 Year	养殖塘 Culture pond	水田 Paddy field	盐田 Salt field	水库 Reservoir	坑塘水面 Area of soak	人工沟渠 Artificial channel
1984	0	0	0	0	849.42	145.99
1989	6 179.38	4 416.80	242.23	1 191.62	1 389.23	774.20
1996	6 341.41	5 855.07	1 451.29	3 857.41	1 506.33	875.34
2000	4 345.69	4 343.12	607.03	5 793.36	2 577.36	1 637.97
2005	6 541.52	5 977.12	1 158.33	5 220.85	8 055.59	2 027.18
2009	9 865.56	12 212.69	5 099.71	5 767.14	18 742.97	1 473.82
2015	22 648.13	30 648.51	11 220.69	5 246.61	15 469.71	1 274.17

的趋势;其中1996—2000年这一期间黄河断流严重,尤其是1996—1998年断流呈现时间早、次数多、时间长态势,据东营市统计年鉴记载,1996—1998年黄河断流次数分别为8、13、16次,累计断流天数分别为128、226、141 d。黄河断流引起当地水资源严重短缺,限制了当地依赖水而发展的相关产业,研究区养殖塘、水田、盐田分别减少1 995.71、1 511.96、844.26 hm²,为了缓解需水压力,可以提供灌溉、储水功能的水库在当地大量修建,目视解译数据显示这一时期水库面积增加了1 935.95 hm²。2000—2005年,随着黄河断流态势得到控制以及政府推出的湿地恢复工程等相关政策,水资源问题得到缓解,湿地面积相应增加,养殖塘、水田、盐田分别增加2 195.83、1 634.00、551.30 hm²,同时,一些水库也被弃用,数据显示这一时期水库面积减少了572.51 hm²。2009—2015年研究区内养殖塘、水田、盐田达到整个研究时期面积最大值,水库面积减少9.03%。

2.2 空间尺度上人工湿地变化

2.2.1 各亚类人工湿地空间分布变化

由图2可知,1984年,研究区人工湿地类型为坑塘水面和人工沟渠,人工湿地面积少,零星分布于现今孤河水库东北方向附近。1984—1989年5年间,人工湿地类型由1984年的两类增加到六类,类型渐全,面积渐多。1989年养殖塘、盐田主要分布于研究区北部挑河口和东南部的宋春荣沟附近,水田主要在仙河、孤东水库附近。1996—2000年,由于水资源限制,人工湿地主要分布区都有减少,孤河水库和小岛河附近水田减少明显。2000—2009年,坑塘水面大面积分布于挑河口、神仙沟、甜水沟附近,水田面积除在仙河区域附近明显增加外,孤岛水库、甜水沟以北的黄河沿岸也有明显增加。2009—2015年,养殖塘主要分布于挑河口、宋春荣沟以北甜水沟以南的沿海,盐田主要分布于孤北水库附近、神仙沟以南的沿

海地区,水田主要分布于孤河水库、甜水沟以北的黄河沿岸。

2.2.2 各亚类人工湿地质心变化

由图3可知,1984年研究区没有水田,其后各研究年水田的空间分布质心沿黄河河道呈“之”字型偏移,1989—1996年,向南偏移7',2000—2005年向西偏移3',2005—2009年向东偏移4',2009—2015年向东偏移6',由质心分析结果可以看出,1989—2000年,水田质心大致沿黄河故道边缘变化,黄河断流态势的加重以及降水量不足等导致黄河故道的水量渐少,2000—2015年水田质心大致由沿黄河故道转向沿黄河现道边缘变化;各研究年人工沟渠的空间分布质心大致呈“Z”型偏移,其中1984—1989年较其他年份偏移明显,向东偏移8',向南偏移4',1989—1996年向西偏移3',1996—2009年质心变化不大,2009—2015年,向东部沿海地区偏移5';1984年研究区还没有出现水库,1989—1996年呈向东南偏移的趋势,1996—2005年呈先向南部偏移后向北部偏移的趋势,2005—2015年也呈先南后北的偏移趋势;水库的空间分布质心整体上有先向东南偏移后整体上呈向南部偏移的趋势。2015年水库质心向南部偏移4',向东部偏移4',原因可能是水田的质心沿河道变化整体向东南方向偏移,而为了供水会在水田附近修建大面积的水库,因而水库质心呈现向东南方向偏移趋势,研究区南部大面积水库的修建可以说明这一点;各研究年养殖塘的分布质心先向东南再向北部方向偏移;1984—2015年坑塘水面质心向北偏移5',向东偏移13',整体先向东南再向北部近海方向偏移,与养殖塘的质心偏移方向相近,这主要是因为当地养殖业的盛行,大面积养殖塘在沿海地区修建,而养殖塘的前期就是影像拍摄到的坑塘水面,目视解译结果也显示2009年坑塘水面于水库、近海地区大面积分布;各研究时段盐田的分布质心由刁口海岸向东部近海

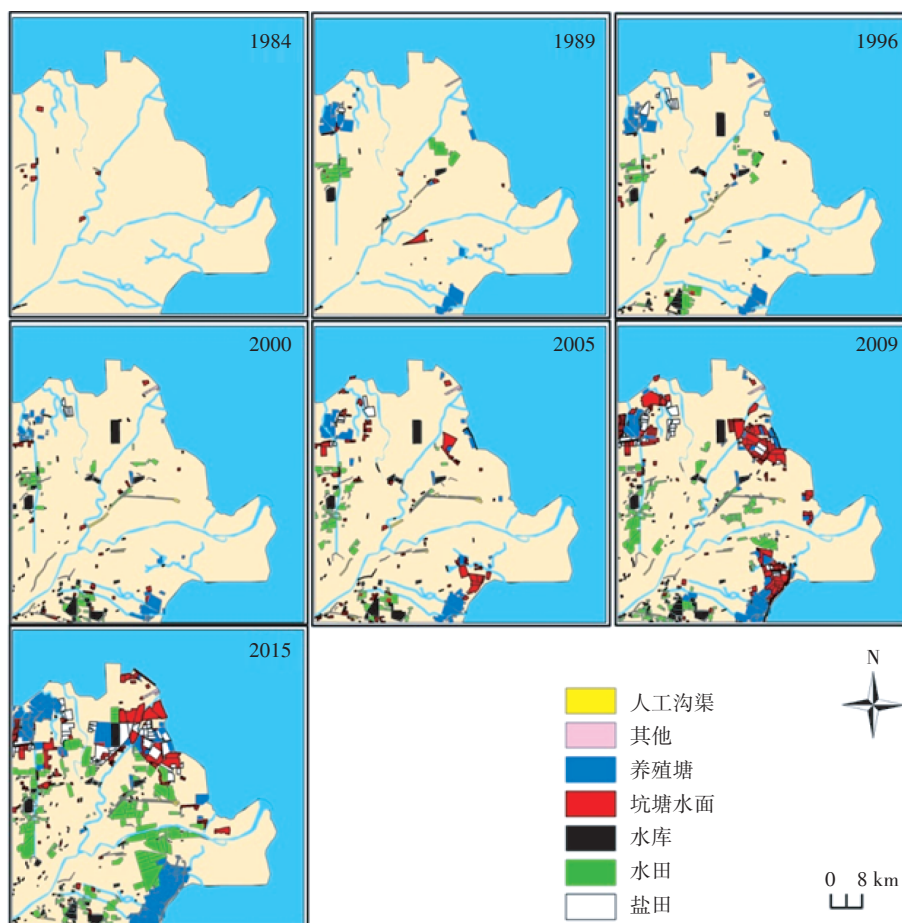


图2 1984—2015年研究区人工湿地分布

Figure 2 Distribution of artificial wetlands of study area during 1984—2015

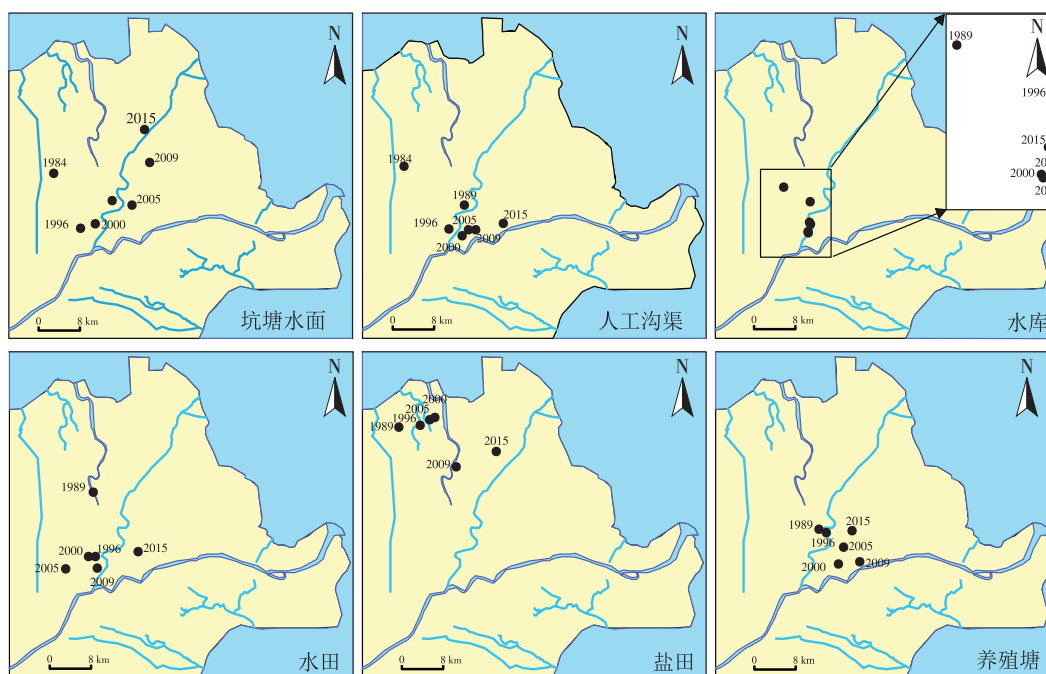


图3 1984—2015年各类型人工湿地质心变化

Figure 3 The centroid change of artificial wetlands during 1984—2015

5号桩、神仙沟、港口方向偏移。

2.3 基于景观水平的人工湿地演变

在 ArcGIS 支持下,对各期影像进行基于景观水平的景观格局指数计算,结果见表 5。由表 5 可知, NP 值 1984—2015 年一直呈增加的趋势,表明研究区人工化程度加大,景观破碎化度增加。AWMSI 值越大,表明景观要素越不规则,1984—2005 年研究区 AWMSI 增大,2005—2015 年研究区 AWMSI 有所减小,说明前期在人为主导因素影响下,大量人工湿地在当地修建,景观要素形状不规则化程度加大,随着经济社会等因素发展,当地产业者为节省成本,连片集中修建大量的养殖塘和盐田,因此后期景观要素形状渐规则化。PSSD 值越大,斑块规模与平均规模差距越大,1984 年,研究区景观类型较少,面积较小,因此 PSSD 也较小,1984—1989 年,这一时段研究区斑块个数增加,人工湿地类型增加,景观面积增加,面积标准差也变化明显,此后各年没有明显变化。1984—2005 年研究区景观多样性指数和均匀度指数逐年增加,表明研究区内人工湿地景观的复杂性和异质性在逐年提高,尤其是 1984—1989 年这一时段,多样性指数由 0.397 5 增加到 1.426 5,增幅较大,主要是因为这一时段人工湿地种类增加;均匀度指数增加,表明景观类别逐渐均匀分布于区内。因此,这一时期研究区景观优势度下降。2005—2015 年景观多样性指数和均匀度指数均有所下降,表明研究区景观要素所占比例差异有所加大。

2.4 驱动力分析

2.4.1 黄河

黄河是研究区入境水资源的主要来源,其水情变化是黄河三角洲人工湿地演变的重要影响因素^[25]。

黄河流路是影响人工湿地演变的重要因素,由图 3 质心分析结果可知,对水资源需求十分敏感的水田,其质心有沿黄河故道先逐渐向南再向东部黄河现道偏移的趋势,主要用于农业灌溉与洪涝排水的人工沟渠也有类似的偏移趋势;此外黄河冲击形成的滩涂为人工湿地的建造提供了先决条件,1976 年,黄河于西口河人工改道,由刁口河流路改道清水沟。此后河道稳定 20 余年。至 1996 年,在清水沟河道清八汉处人工改道,使河流由东南折向东北入海。此后,主河道无大变化^[8],刁口海岸日渐蚀退,黄河口附近淤积滩涂面积增大,许多滩涂资源和湿地资源被开发利用为工农业用地,其中相当一部分是养殖塘、水田等人工湿地,由图 2 可以看出,2015 年黄河口附近水田较前几年有明显增加,质心分析结果也显示养殖塘和水田呈明显向东部近海黄河口方向偏移的趋势;黄河径流量是影响人工湿地的另一重要因素,1996—2000 年处于黄河 22 年为周期的枯水期^[14],水资源的缺乏会严重影响研究区人工湿地面积的增减,目视解译结果也表明人工湿地的面积 1996—2000 年这一时段面积减少了 585.77 hm²,年均变化率为-0.73%,其中养殖塘和水田分别减少 1 995.71、1 511.96 hm²。

2.4.2 风暴潮

黄河三角洲地区滩涂广阔,坡度平缓,附近海域水深较浅,是受寒潮天气影响较多的地区,易发生风暴潮灾害^[26]。据黄河志等相关资料统计^[27],1992 年 9216 号潮灾淹没河口区耕地 730 hm²,草场 1 333.3 hm²,盐田受灾 479.3 hm²;1997 年 9711 号潮灾冲毁河口区防潮大堤 44 km,冲毁包括研究区在内的水产养殖场 8 666.7 hm²,盐田 7 866.7 hm²,毁坏海船 50 只;2003 年风暴潮造成包括研究区在内的养殖水面用地受损面积为 32 149 hm²。目视解译结果显示,1984—1989 年研究区人工湿地面积年均变化率为 267.85%,而 1989—1996 年面积年均变化率仅为 5.76%,9216 号潮灾是造成该研究时段人工湿地面积变化率小的重要因素;1996—2000 年研究区人工湿地面积减少了 585.77 hm²,年均变化率为-0.73%,除 1997 年黄河断流严重的原因外,该时段人工湿地面积减少与 9711 号潮灾也有着不可分割的关系。同时,由风暴潮带来的短时间地表盐碱化突增,也会对研究区的水田造成影响。

2.4.3 人口、经济、政策

随着滨海地区经济的发展和开发程度的提升,农田垦殖面积也随之扩张。由于水稻、藕的经济价值高

表 5 1984—2015 年人工湿地的景观指数值
Table 5 Landscape index values of artificial wetlands during 1984—2015

年份 Year	斑块个数 NP	面积加权平均形状指数 AWMSI	面积标准差 PSSD	多样性指数 SHDI	均匀度指数 SHEI
1984	16	1.373 1	0.713 5	0.397 5	0.573 5
1989	96	1.472 5	3.272 2	1.426 5	0.733 1
1996	220	1.379 3	2.245 5	1.608 8	0.826 8
2000	253	1.479 6	2.091 4	1.662 0	0.854 1
2005	271	1.517 3	2.670 1	1.674 1	0.860 3
2009	594	1.422 9	2.074 5	1.605 5	0.825 1
2015	762	1.407 0	2.749 5	1.538 8	0.790 8

于棉花、小麦、玉米等,加之区域土地的禀赋条件,水田面积扩张明显,2005—2015年水田面积增长率达41.28%。水田面积的增加相应地带动了人工沟渠、水库及坑塘等可以提供水利功能的人工湿地面积的增加。同时,区域广阔的滩涂资源是发展近海养殖业的优良条件,在政策及经济的驱使下,研究区的养殖业面积不断扩大,养殖产量不断增多,产值增加。据统计年鉴记载,到2015年,研究区内垦利县的养殖业经济总产值达到48.52亿元,河口区达到11.56亿元,这与养殖业的扩张密切相关。此外,由于区域降水较少且集中,蒸发量高,产盐条件优良,盐业成为东营经济的支柱产业,发展迅速。1984年研究区内还没有出现盐田,到2015年,盐田面积已经达到11 220.69 hm²。

2.4.4 自然湿地

许多研究表明人为因素导致的自然湿地面积减少大于自然因素的作用^[10,28-30],而影响自然湿地演化的多种人为因素中,人工湿地的建设是一项重要驱动因子。陈建等^[19]研究显示1976—2008年黄河三角洲自然湿地面积减少44.5%,陈琳等^[28]研究显示1976—2015年自然湿地面积平均每年减少3.39%,且与1976年相比,2015年减少的自然湿地主要转化为旱地、养殖塘和盐田,而30年来人工湿地整体呈增加趋势,自然湿地的开垦退化为人工湿地的演变提供了先决条件,从而推动了人工湿地的发展。

3 讨论

本研究结果显示,在多因素影响下31年间研究区人工湿地面积增加明显,与陈琳等^[28]、栗云召^[31]研究结果相似。研究还表明在人工湿地面积总体增加的大背景下,1996—2000年这一时段研究区人工湿地面积呈现负增长,充分体现出水资源对当地人工湿地以及生产生活的重要影响。近年来实施人工生态补水退耕还湿、调水调沙等湿地恢复工程,实现了黄河断流次数减少甚至无断流,相应地,2000—2015年研究区人工湿地面积不断扩张,有关部门应继续提高生态意识以降低各种不稳定性因素对生产生活的影响。

本研究结果中各类人工湿地质心31年间发生不同程度的偏移且总体呈“先东南后西北”的偏移趋势,与卢晓宁等^[22]的质心研究结果一致,表明研究区人工湿地在自然和人为因素等不同干扰类型和干扰程度下产生空间变化。现阶段学者对黄河三角洲人工湿地与诸影响因素的分析多是定性分析为主、定

量分析不足,这也为后续研究指明了方向。

本研究结果显示31年间研究区人工湿地景观破碎度增加,与刘德彬等^[30]的研究结果一致,与王永丽等^[32]的研究结果不同,这可能是由研究时段不同、人工湿地分类系统不一致等造成的,这也对更完善的标准化、实用性的湿地分类系统提出了进一步要求。同时本研究结果还显示在自然因素为先决条件、人为因素为主导下,景观形状趋于规则化,多样性和均匀度先增加后降低,与宗秀影等^[1]和赵越^[33]研究结果相似,这可能与当地产业者为获得人工湿地的经济效益并节省成本,将大面积人工湿地连片集中修建的生产方式有关。

4 结论

(1)1984—2015年31年间黄河三角洲人工湿地总面积增加了85 762.13 hm²,增加86.16倍,各亚类人工湿地面积都有不同程度的增加,其中1996—2000年,由于水资源等因素的限制,该时段内人工湿地的面积减少了585.77 hm²,年均变化率为-0.73%。

(2)黄河三角洲人工湿地演变的主要驱动因素有黄河水情,风暴潮,区域的人口、经济、政策,以及自然湿地的开发利用,在多因素影响下坑塘水面、养殖塘整体上呈“先东南后西北”的偏移趋势,水库有先向东南偏移后整体上呈向南部偏移的趋势,盐田有向东部近海偏移的趋势,水田由早年的沿黄河故道转向现今沿黄河现道呈“之”字偏移的趋势,人工沟渠大致呈“Z”形偏移的趋势。

(3)1984—2015年,黄河三角洲人工湿地斑块个数不断增加,景观破碎化程度加大,景观形状由不规则化趋于规则化,多样性和均匀度先增加后降低。

参考文献:

- [1] 宗秀影,刘高焕,乔玉良,等.黄河三角洲湿地景观格局动态变化分析[J].地球信息科学学报,2009,11(1):91-97.
ZONG Xiu-ying, LIU Gao-huan, QIAO Yu-liang, et al. Study on dynamic changes of wet landscape patten in Yellow River Delta[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2009, 11(1):91-97.
- [2] 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.
SUN Zhi-gao, MOU Xiao-jie, CHEN Xiao-bing, et al. Actualities, problems and suggestions of wetland protection and restortation in the Yellow River Delta[J]. *Wetland Sciennce*, 2011, 9(2):107-115.
- [3] 刘丽云.黄河三角洲湿地演化及其驱动力研究[D].济南:山东师范大学,2007.
LIU Li-yun. The study on the wetlands evolution and its driving force

- in the Yellow River Delta[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2007.
- [4] 韩 美, 张晓惠, 刘丽云. 黄河三角洲湿地研究进展[J]. 生态环境, 2006, 15(4): 872-875.
- HAN Mei, ZHANG Xiao-hui, LIU Li-yun. Research progress on wetland of the Yellow River Delta[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(4): 872-875.
- [5] 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(3): 325-330.
- LI Sheng-nan, WANG Gen-xu, DENG Wei, et al. Effects of runoff and sediment variation on landscape pattern in the Yellow River Delta of China[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(3): 325-330.
- [6] 王富强, 王利娇, 彭 勃, 等. 水沙变异对黄河三角洲湿地面积演变的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(2): 1-5.
- WANG Fu-qiang, WANG Li-jiao, PENG Bo, et al. Effect of flow and sediment variation on the Yellow River Delta wetland area evolution[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(2): 1-5.
- [7] 张长英, 张治昊, 刘宝玉, 等. 水沙变异对黄河三角洲湿地生态环境的影响分析[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(1): 58-59.
- ZHANG Chang-ying, ZHANG Zhi-hao, LIU Bao-yu, et al. Effect of flow and sediment variation on the Yellow River Delta ecological environment[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2010, 16(1): 58-59.
- [8] 刘玉斌. 黄河改道对三角洲湿地演变的影响研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- LIU Yu-bin. Diversion of the Yellow River and its influence on delta wetland evolution research[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2017.
- [9] 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[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 924-935.
- HONG Jia, LU Xiao-ning, WANG Ling-ling. Quantitative analysis of the factors driving evolution in the Yellow River Delta wetland in the past 40 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4): 924-935.
- [10] 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.
- LI Yun-zhao, YU Jun-bao, HAN Guang-xuan, et al. Dynamic evolution of natural wetlands in Yellow River Delta and related driving factors[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(7): 1535-1541.
- [11] 孙晓宇, 苏奋振, 吕婷婷, 等. 黄河三角洲湿地资源时空变化分析[J]. 资源科学, 2011, 33(12): 2227-2284.
- SUN Xiao-yu, SU Fen-zhen, LÜ Ting-ting, et al. Analysis of temporal-spatial changes in wetlands over the Yellow River estuary[J]. *Resources Science*, 2011, 33(12): 2227-2284.
- [12] 李慧婷, 韩 美, 路 广, 等. 黄河三角洲湿地开发与保护工程建设的生态环境影响分析[J]. 山东化工, 2017, 46(8): 166-168, 171.
- LI Hui-ting, HAN Mei, LU Guang, et al. Ecological environment impact analysis of wetland development and protection project construction in the Yellow River Delta[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2017, 46(8): 166-168, 171.
- [13] 许健民. 黄河三角洲(东营市)湿地评价与可持续利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2001.
- XU Jian-min. Study on evolution and sustainable utilization of the wetlands in Yellow River Delta (Dongying) [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2001.
- [14] 卢晓宁, 张静怡, 洪 佳, 等. 基于遥感影像的黄河三角洲湿地景观演变及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 214-223.
- LU Xiao-ning, ZHANG Jing-yi, HONG Jia, et al. Analysis of wetland landscape evaluation and its driving factors in Yellow River Delta based on remote sensing image[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(1): 214-223.
- [15] 金 奇. 鄱阳湖典型湿地土壤微生物群落特征及对环境变化的响应研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2017.
- JIN Qi. Characteristics of soil microbial community in the Poyang Lake wetland and its response to environmental change[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2017.
- [16] 许运凯. 河口湿地植被对温室气体排放的影响及其全球变化响应初探[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- XU Yun-kai. Effect of vegetation on greenhouse gases emission in estuarine wetland and its response to global change[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [17] 邱章喜. 黄河三角洲人工湿地信息提取及其变化监测方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- QIU Zhang-xi. Research on information extraction and change detection methods of artificial wetlands in the Yellow River Delta[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2016.
- [18] 荣子荣, 王其翔, 马安青. 黄河三角洲湿地景观格局变化特征研究[J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(3): 81-85.
- RONG Zi-rong, WANG Qi-xiang, MA An-qing. Research on the characteristic of landscape-patterns in wetland of Yellow River Delta using RS and GIS[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2013, 43(3): 81-85.
- [19] 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[J]. 地理科学进展, 2011, 30(5): 585-592.
- CHEN Jian, WANG Shi-yan, MAO Zhan-po. Monitoring wetland changes in Yellow River Delta by remote sensing during 1976—2008[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(5): 585-592.
- [20] 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.
- [21] Tian J, Wang M, Dou H. Studies of influence of the Yellow River cut-off on ecological environment and its countermeasures[J]. *Journal of Ecology*, 1997, 16(3): 39-44.
- [22] 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.
- LU Xiao-ning, HUANG Yue, HONG Jia, et al. Spatial and temporal variations in wetland patterns in the Yellow River Delta based on Landsat images[J]. *China Environment Science*, 2018, 38(11): 4314-4324.
- [23] 丁圣彦, 梁国付. 近20年来河南沿黄湿地景观格局演化[J]. 地理学报, 2004, 59(5): 653-661.
- DING Sheng-yan, LIANG Guo-fu. Landscape pattern change of re-

- gional wetland along the Yellow River in Henan Province in the last two decades[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5):653-661.
- [24] 肖笃宁. 景观生态学[M]. 北京:科学出版社, 2010.
XIAO Du-ning. Landscape ecology[M]. Beijing:Science Press, 2010.
- [25] Zhou R, Li Y Z, Wu J J, et al. Need to link river management with estuarine wetland conservation: A case study in the Yellow River Delta, China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 146:43-49.
- [26] 宋红霞, 刘红珍, 汪习文, 等. 黄河河口三角洲风暴潮灾害特点及其预防对策[J]. 海岸工程, 2000, 19(4):70-74.
SONG Hong-xia, LIU Hong-zhen, WANG Xi-wen, et al. Yellow River estuary storm surge disaster characteristics and its preventive measures[J]. *Costal Engineering*, 2000, 19(4):70-74.
- [27] 胡亚斌, 马毅, 孙伟富, 等. 基于遥感的海岸带风暴潮灾害受损监测分析[C]//中国海洋学会2015年学术论文集. 北京:中国海洋学会, 2015.
HU Ya-bin, MA Yi, SUN Wei-fu, et al. Damage monitoring analysis of coastal storm surge disaster based on remote sensing[C]//China Oceanographic Society symposium of academic papers in 2015. Beijing:China Oceanographic Society, 2015.
- [28] 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.
CHEN Lin, REN Chun-ying, WANG Can, et al. Dynamic of coastal wetlands of the Yellow River Delta for 6 periods[J]. *Wetland Science*, 2017, 15(2):179-186.
- [29] 丁彤彤, 周廷刚, 朱晓波, 等. 基于卫星遥感影像的黄河三角洲湿地景观格局动态变化研究——以东营市为例[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(4):52-57.
DING Tong-tong, ZHOU Ting-gang, ZHU Xiao-bo, et al. On dynamic changes of wetland in Yellow River Delta with remote sensing image: A case study of Dongying City[J]. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2016, 41(4):52-57.
- [30] 刘德彬, 李逸凡, 王振猛, 等. 1983—2014年来黄河三角洲景观类型与景观格局动态变化及驱动因素[J]. 山东林业科技, 2017, 47(4):1-8.
LIU De-bin, LI Yi-fan, WANG Zhen-meng, et al. Dynamic and driving factors of landscape types and landscape pattern in Yellow River Delta from 1983 to 2014[J]. *Shandong Forestry Science and Technology*, 2017, 47(4):1-8.
- [31] 栗云召. 黄河三角洲滨海湿地的演变过程与驱动机制[D]. 北京:中国科学院大学, 2014.
LI Yun-zhao. Evolution process and its driving mechanism of coastal wetlands in the Yellow River Delta[D]. Beijing:The University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [32] 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.
WANG Yong-li, YU Jun-bao, DONG Hong-fang, et al. Spatial evolution of landscape pattern of coastal wetlands in Yellow River Delta[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(6):717-724.
- [33] 赵越. 近20年黄河三角洲湿地景观格局分析[D]. 北京:中国地质大学, 2012.
ZHAO Yue. The analysis of the Yellow River Delta wetland landscape during the past 20 years[D]. Beijing:China University of Geoscience, 2012.