

1991~2016年黄河三角洲湿地变化的遥感监测

刘海红^{1,2}, 刘胤序^{1,2}, 张春华³, 杨雪梅¹, 胡健⁴, 李军^{2,*}

(1.天津师范大学 地理与环境科学学院 天津 300387; 2.天津师范大学 天津市水资源与水环境重点实验室 天津 300387;
3.鲁东大学 资源与环境工程学院 山东 烟台 264000;
4.中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室 贵阳 550081)

摘要:以1991、2000、2010和2016年的Landsat TM/OLI影像数据为基础,采用面向对象和目视解译的分类方法,提取了黄河三角洲湿地信息。同时,利用空间分析、动态度模型、非等间距序列灰色模型等分析方法,分析了湿地的时空变化特征,并结合相关文献资料讨论了湿地变化的驱动因素。结果表明,1991~2016年间,黄河三角洲湿地总面积逐渐减少,约91.39 km²。其中,以2000~2010年期间面积变化最为剧烈,自然湿地面积以30.21 km²/a的速度减少,而人工湿地以32.77 km²/a的速度增加。在各类型湿地中,草甸湿地面积减少最多,为312.83 km²;而人工湿地面积大幅增长,且以养殖池和盐田的增加最为迅速,增加了544.63 km²。从空间分布上来看,研究区人工湿地面积有逐渐向滨海区扩张的趋势。湿地养殖、农业开垦、工程修建等人类活动是导致黄河三角洲自然湿地减少的主要因素。

关键词:湿地;黄河三角洲;遥感监测;面向对象分类

中图分类号: P931.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2018)06-0590-09 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2018.46.128

湿地作为水、陆生态系统的过渡部分,兼具丰富的陆生和水生资源,与森林、海洋并称全球三大生态系统^[1]。湿地蕴含经济、文化、科研与娱乐价值,在抵抗洪水、调节径流、促淤造陆等方面具有不可替代的作用。黄河三角洲是《湿地公约》要求注册的重要湿地之一,也是我国北方面积最宽广最年轻的湿地生态系统^[2]。但是,湿地的地形水文情况复杂实地考察难度大,而遥感技术从宏观视角对湿地信息进行获取和实时动态监测,既节省时间又不受天气季节的影响,且适合长时期的研究。

国外湿地遥感研究主要集中在湿地演化、退化与修复以及评价等方面^[3]。例如,Sader等^[4]基于Landsat TM影像来分析评价美国缅因州森林湿地;Russell等^[5]利用空间分析选择最适合南加利福尼亚州湿地修复的区域研究。国内湿地遥感研究主要集中于湿地分类和面积的调查、生物量的估测^[6]及景观格局的转变等。黄河三角洲是我国重要的湿地分布区,受人类活动和自然因素影响,湿地退

化、污染等问题日益突出。

目前,黄河三角洲湿地研究主要表现在景观格局变化、演变驱动力和生态修复等方面,缺乏系统的湿地变化过程、预测和驱动力因素。本文将利用遥感和地理信息系统(GIS)技术,研究黄河三角洲湿地的面积、空间分布变化、变化趋势,分析总结湿地变化的驱动因素,以期对黄河三角洲的湿地保护和生态恢复提供帮助。

1 研究区概况

黄河三角洲(117°31'~119°18'E,36°55'~38°16'N)北临渤海湾,东靠莱州湾。本文所研究的黄河三角洲是西部以垦利县渔洼为顶点,包括北到挑河口,南到小岛河口,东到海岸之间的扇形区域^[7](图1)。该区域大部分属于东营市,国家级黄河三角洲自然保护区位于其中,且湿地类型丰富,景观呈现多样化特点。区内的湿地分为天然湿地(草甸湿地、河流湿地、滩涂湿地、盐沼湿地)和人工湿地

收稿日期: 2018-03-06; 改回日期: 2018-04-15

基金项目: 国家重大科技专项(2012ZX07503003001); 国家自然科学基金项目(41172315); 天津市水资源与水环境重点实验室开放基金项目。

第一作者简介: 刘海红(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为环境科学。E-mail: LhhW1213@163.com.

* 通讯作者: 李军(1971-),男,博士,副研究员,研究方向为环境地球化学。E-mail: lijun5931@163.com.

(沟渠湿地、水田、蓄水区、养殖池、盐田) 两大类,天然湿地所占比重较大。

2.2 湿地分类方案

湿地分类是湿地信息提取的前提,由于世界湿



图 1 黄河三角洲地理位置示意图

Fig.1 Location of the Yellow River Delta

2 数据与方法

2.1 数据源及处理

采用美国陆地卫星获取的 Landsat5 TM 和 Landsat8 LOI 影像,分别为 1991、2000、2010 和 2016 年。数据源自美国地质调查局(USGS)网站。为了便于湿地信息提取,下载时选择云量少于 10%^[8]且不遮蔽研究区的影像清晰数据,时间一般在 5~9 月份(表 1)。为了辅助湿地分类,还搜集了大量有关黄河三角洲湿地的地形图、植被图等。在 ENVI 遥感软件中分别对三期影像数据进行必要的预处理、波段合成、裁剪等。

表 1 研究区卫星遥感数据

Table 1 Satellite remote sensing data of the study area

卫星	数据类型	轨道号	时相	分辨率/m
Landsat 5	TM	121/34	1991. 09. 23	30×30
Landsat 5	TM	121/34	2000. 06. 11	30×30
Landsat 5	TM	121/34	2010. 09. 11	30×30
Landsat 8	OLI	121/34	2016. 12. 16	30×30

地类型以及研究目的差异,不同学者有着不同的分类方案。参考国际《湿地公约》^[9]和我国的《全国湿地资源调查与检测技术规程》^[10]以及前人对湿地研究的分类方案之后^[11-14]将研究区分为自然湿地和人工湿地两大类。具体分类方案如下(表 2)。

表 2 黄河三角洲湿地划分方案

Table 2 Classification of wetland in the Yellow River Delta

一级湿地类型	二级湿地类型	界定标准
自然湿地	滩涂湿地	潮间带泥滩、沙滩、海岸
	河流湿地	河流、时令性河流
	草甸湿地	芦苇、灌草丛(怪柳)、赤碱蓬等草甸
	盐沼湿地	无植被覆盖滩涂、盐碱地
人工湿地	蓄水区	水库、坑塘等低洼含水地
	水田	水稻田
	养殖池	鱼、虾、蟹等养殖池
	盐田	晒盐场、采盐场
	沟渠湿地	人工挖掘产生,用于农业灌溉、排水等

2.3 面向对象的湿地信息提取及处理

对于海岸线的提取,本文根据平均高潮线结合

光谱分类和
界^[15-17]。提

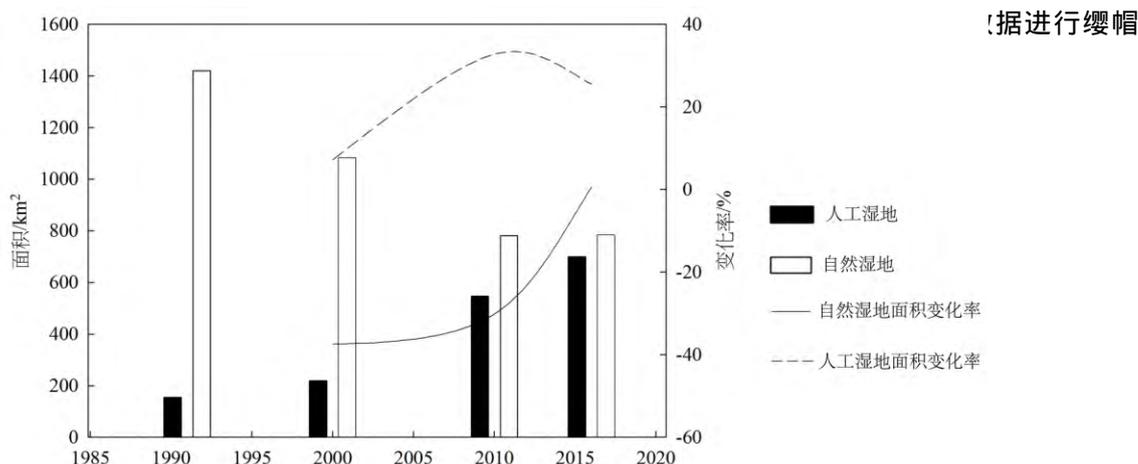


图2 不同年份自然湿地与人工湿地的面积

Fig.2 The areas of natural and artificial wetlands in different years

变换,得到亮度、绿度和湿度分量,最后将三种分量组合,并对组合后的图像实施边缘增强(主要利用中值滤波)。然后对比 Google earth 卫星图像和参考资料,采取目视解译的方法提取岸线。

参考各种湿地信息提取方法^[18-19],采用面向对象和目视解译相结合的分类方法。利用 ENVI FX 软件建立掩膜、分割对象、选择样本;经过多次试验选择 K 邻近法且参数设置为 5。利用 ArcGIS 以分类结果的矢量数据为基础构建研究区湿地数据库,得到湿地的空间变化图。

在分类完成后对分类结果进行验证,1991 和 2000 年各地物分类精度在 80% 以上,满足本研究的需要;2010 和 2016 年不满足要求,需要进行分类后处理。借助 ENVI 软件和目视解译及参照 Google earth 卫星图像、地形图等,对于小类别、漏分及错分的像元进行聚类、合并、过滤处理,手动修改。

2.4 湿地变化分析方法

根据土地利用转移矩阵分析不同湿地类型之间的转化,利用 ArcGIS 空间叠加分析方法描述湿地变化的空间关系。借助非等间距灰色预测模型预测研究区湿地今后的发展状况^[20],并利用土地利用中的单一动态来说明不同湿地的变化模式^[21]:

$$K = \frac{(U_b - U_a) \times 100\%}{U_a \times T} \quad (1)$$

式中 U_a 、 U_b 为研究区某时间段内初期及末期某种土地利用类型的面积; T 为研究时段的长度,当 T 的单位为年时 K 值就是该研究区某种土地利用类型的年变化率。

3 结果与分析

3.1 湿地时空变化特征

3.1.1 湿地时间变化特征

1991~2016 年期间,黄河三角洲湿地不仅空间分布结构发生了变化,面积也在变化(图 2)。从整体上来看,自然湿地面积呈现减少的趋势,人工湿地则不断扩大。1991 年研究区自然湿地面积为 1419.50 km²,然而 2016 年其面积仅为 783.48 km²。1991 年人工湿地面积是 154.47 km²,到 2016 年增至 699.10 km²。25 年间自然湿地的面积年均变化率为 35.44 km²/a,人工湿地的变化率为 21.79 km²/a。从时间层面上来看,湿地在 1991~2016 年间的面积变化呈先减后增的趋势,且自然湿地和人工湿地的面积逐渐趋于相等。1991~2000 年自然湿地面积减少了 337.01 km²,平均每年减少 37.45 km²;2000~2010 年自然湿地面积减少了 302.12 km²,平均每年减少 30.21 km²;2010~2016 年自然湿地面积增加了 3.11 km²。人工湿地面积在 1991~2000 年增加了 64.12 km²,年均增加 7.12 km²,在 2000~2010 年间增加了 327.67 km²,年均增加 32.77 km²;2010~2016 年间增加了 152.84 km²,年均增加 25.47 km²。

3.1.2 湿地空间分布特征

从各期湿地分类图(图 3)可知,黄河三角洲面积扩大,黄河入海口位置前进,湿地面积减少且分布格局零碎。1991~2000 年湿地分布格局基本保持稳定,除了草甸湿地分布区域大幅减少,其他湿地分布没有明显变化。2000~2016 年湿地整体的分布

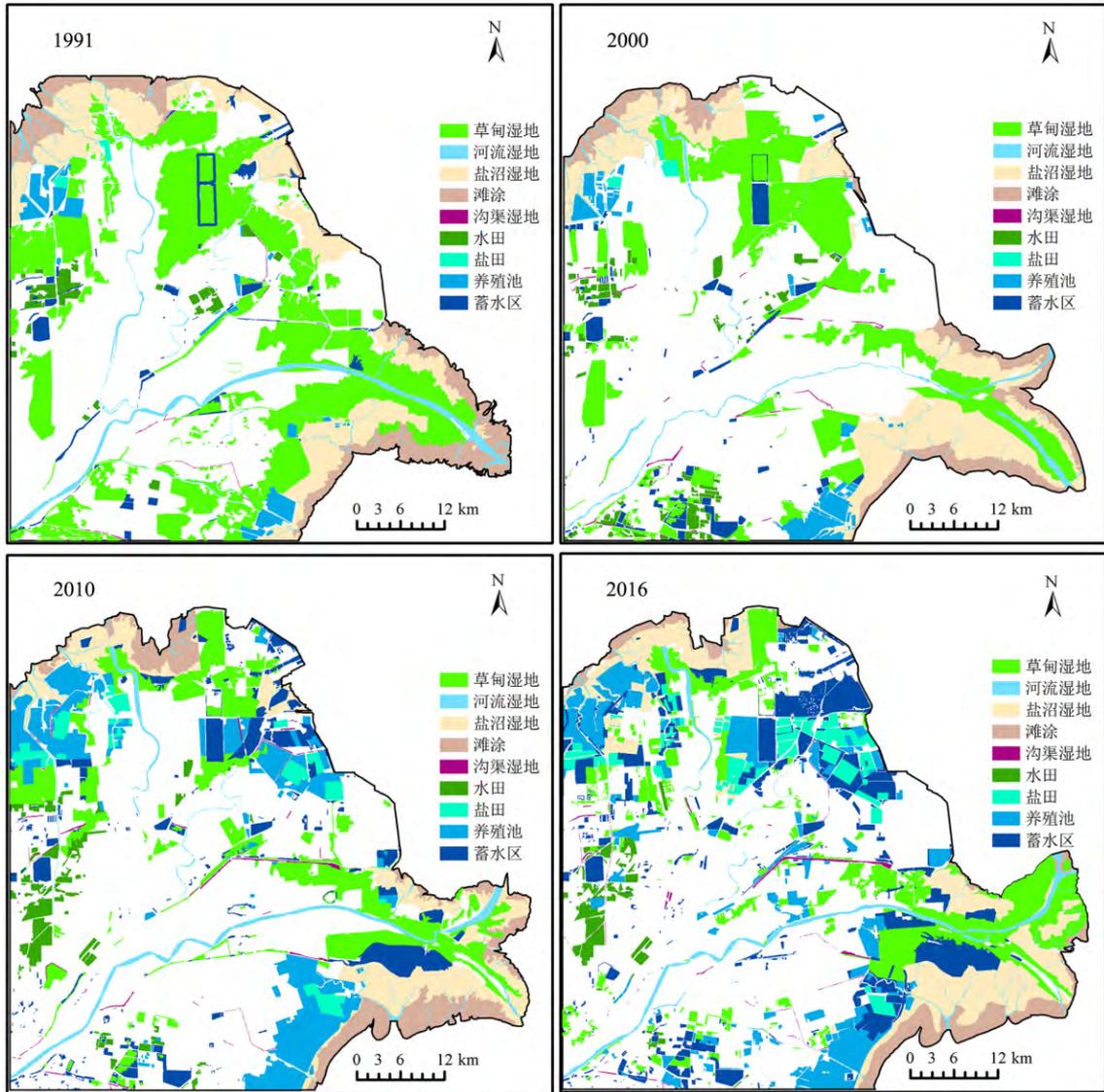


图 3 不同年份黄河三角洲湿地分类图

Fig.3 Wetlands classification map of the Yellow River Delta in different years

特征由大面积片状转变成小面积斑块状,且主要分布在西北部古河道和黄河入海沙洲的西南部。2016年湿地的分布是趋向于零散破碎,人工湿地的存在打破了自然湿地大面积分布的形态^[2]。

由图 4 可知,草甸湿地、滩涂、盐沼湿地的面积转出大于转入,呈缩减趋势。草甸湿地主要分布在黄河三角洲自然保护区和古河道内,大部分草甸湿地转化成其他类型土地。盐沼湿地主要集中于自然岸线和沙嘴附近,泥沙淤积使洲体抬高海水后退,原来的滩涂成为盐沼湿地。滩涂面积减少主要分布在沙嘴岸线边缘,近年来黄河入海泥沙量减少导致滩涂面积减少^[22]。河流湿地分布格局基本未变,主要是黄河及其支流和部分季节性河流,河流

湿地增减变化的现象,主要由黄河入海改道造成。

人工湿地遍布整个研究区,各湿地类型均表现出增加的趋势,其中以蓄水区 and 养殖池分布最为广泛。养殖池主要分布在黄河三角洲西北部和南部沿海。蓄水区主要分布在水库和养殖区周边。沟渠湿地主要是农灌和养殖池盐田的排水设施,主要分布在耕地和养殖池盐田附近。水田主要分布在孤河水库北部,2016年变为孤河水库南部。其中,盐田和养殖池的分布具有一致性,即二者相伴出现且面积增速较快,平均年增长率为 3.67%。

总之,1991~2016年自然湿地分布区域逐渐缩小且呈现出零散状态,主要在滨海和部分三角洲内部区域;人工湿地分布范围广,面积大且增长迅速。

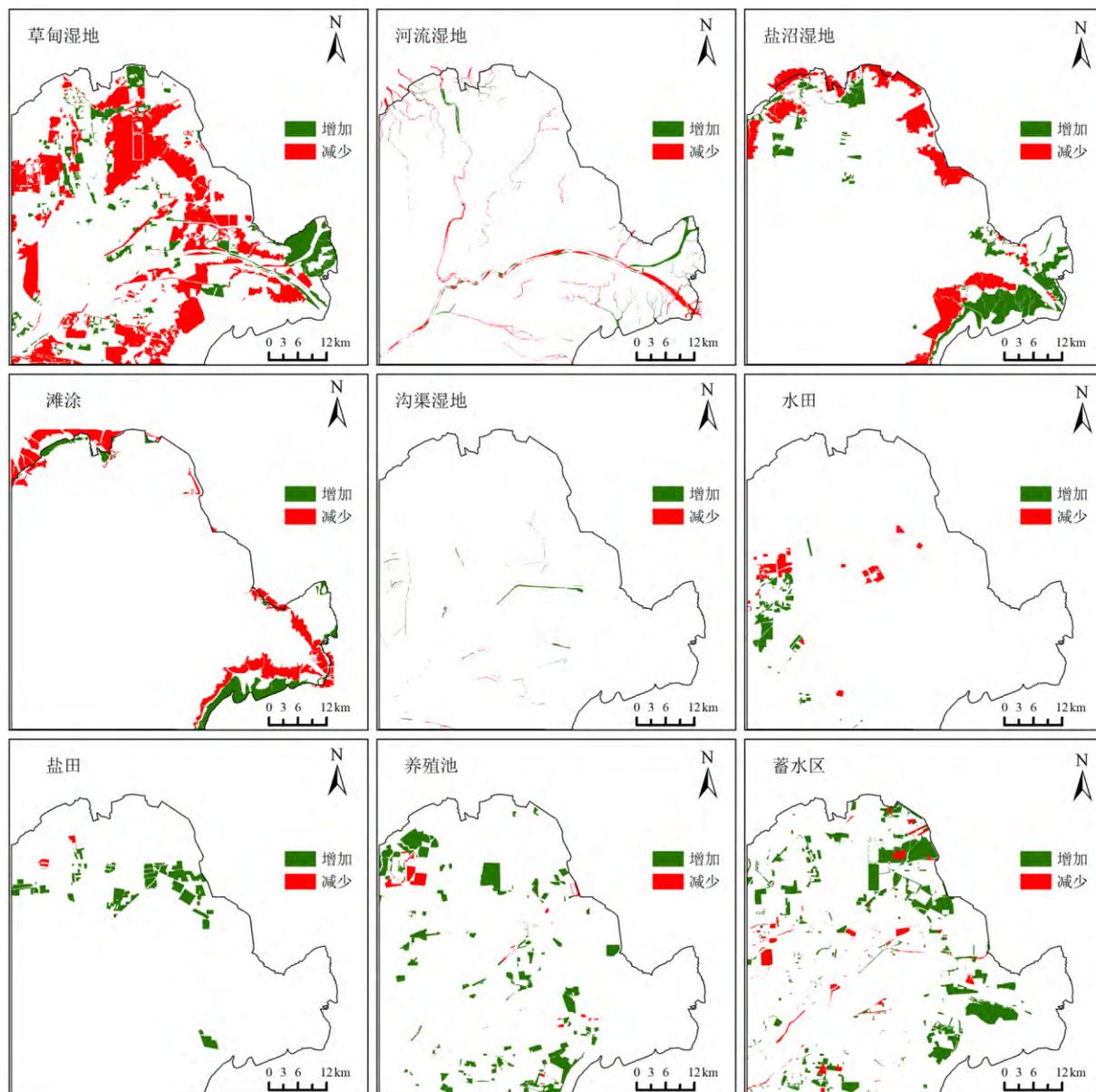


图4 1991~2016年黄河三角洲各湿地类型的变化

Fig.4 Changes of wetland types in the Yellow River Delta from 1991 to 2016

表3 1991~2016年黄河三角洲湿地面积转移矩阵

Table 3 The transfer matrix of land uses of the Yellow River Delta from 1991 to 2016

km²

项目	草甸湿地	河流湿地	盐沼湿地	滩涂	沟渠湿地	水田	蓄水区	盐田	养殖池
草甸湿地	140.66	5.70	60.52	0.40	3.87	20.55	115.34	55.11	77.80
河流湿地	9.28	31.08	5.68	2.12	0.78	0	3.68	0.06	1.04
盐沼湿地	19.26	2.76	85.91	16.12	0.02	0	86.13	15.53	0
滩涂	15.46	4.11	65.83	26.41	0	0	3.43	0.01	3.51
沟渠湿地	0	0	0	0	0.78	0	0.15	0	0.28
水田	1.32	0	0	0	0.05	1.28	2.10	0	3.10
蓄水区	1.41	0.18	0.67	0.22	0	0.13	28.88	0	2.51
盐田	0.04	0	1.03	0	0	0	3.44	1.55	0
养殖池	2.70	0	7.74	0	0.07	0	2.32	2.65	43.21

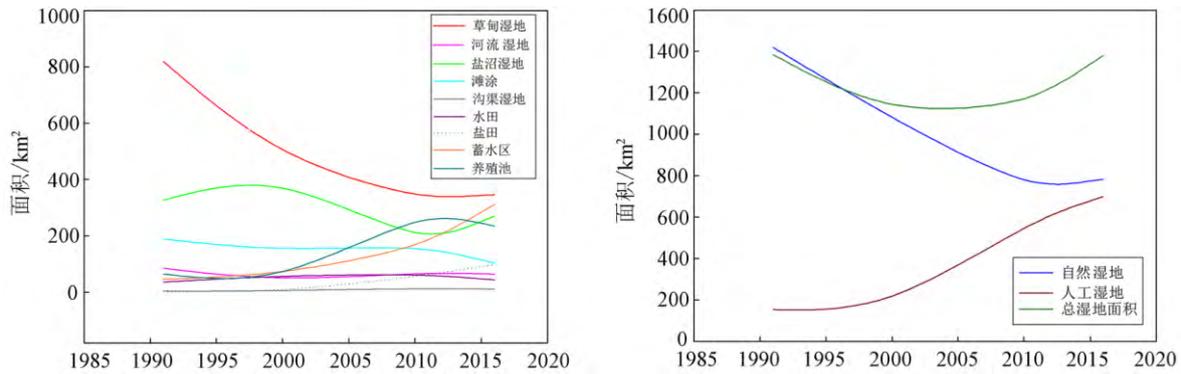


图 5 1991~2016 年黄河三角洲湿地面积变化趋势

Fig.5 Trend of wetland area in the Yellow River Delta from 1991 to 2016

3.2 湿地类型转移

依据湿地类型转移面积矩阵(表 3)和各湿地类型动态度(表 4)得出湿地转化过程。自然湿地的面积在 1991~2016 年间减少 636.39 km²,动态度是 -1.79%。河流湿地的面积减少 20.70 km²,动态度为 -0.97%,表明河流湿地在这段时间变化不显著;其中有 10.09%转化为草甸湿地,其次是盐沼湿地和蓄水区。草甸湿地的面积减少 473.36 km²,转出其面积的 57.80%;草甸湿地主要变化成为耕地和盐沼湿地,其次是养殖池。草甸湿地是自然湿地中变化最明显的类型且以转出为主,动态度为 -2.31%。滩涂的面积增加 85.44 km²,主要转变类型是盐沼和草甸,盐沼湿地的转化高于河流湿地。盐沼湿地的面积减少了 56.63 km²,主要转化为蓄水区。

表 4 1991~2016 年黄河三角洲各湿地类型动态度

Table 4 Dynamic degree of wetland types in the Yellow River Delta from 1991 to 2016 %

湿地类型	1991~2000	2000~2010	2010~2016	1991~2016
草甸湿地	-4.24	-3.12	-0.13	-2.31
河流湿地	-4.45	2.76	-0.19	-0.97
盐沼湿地	1.45	-4.26	4.58	-0.69
滩涂	-1.94	-0.06	-5.57	-1.81
自然湿地	-2.64	-2.79	0.06	-1.79
沟渠湿地	13.72	9.56	-0.83	12.62
水田	6.30	0.83	-4.60	0.92
蓄水区	6.64	12.91	14.02	22.96
养殖池	1.52	23.89	12.12	68.55
盐田	8.26	50.25	-0.86	10.62
人工湿地	4.61	14.99	4.66	14.10

人工湿地的面积增加了 544.63 km²,动态度是 14.10%,湿地面积变化明显。盐田的面积增加 92.03 km²,主要转入类型是草甸湿地和盐沼湿地。蓄水区的面积增加 264.73 km²,转入率较高的是草

甸湿地和盐沼湿地。养殖池的面积增加 170.93 km²,主要转入类型是草甸湿地,动态度是 68.55%。水田是草甸湿地和蓄水区养殖池转化而来。

综上,在 1991~2016 年期间,研究区内总的湿地面积在减小,其中自然湿地面积减少 636.39 km²。人工湿地类型呈增长状态,其中盐田和养殖池增长速度最快。

3.3 湿地演变

3.3.1 湿地面积变化

根据 1991~2016 年各湿地的面积数据,得到图 5 湿地面积变化曲线。25 年间湿地的总面积呈现先减少后增加的趋势,原因是湿地保护和生态恢复等措施使得湿地面积有所增加^[2]。具体来说,1991~2000 年呈线性减少,2000~2010 年保持稳定,2010~2016 年表现出持续增长的趋势。

自然湿地和人工湿地的变化趋势相反,自然湿地减少的同时人工湿地在逐渐增加。草甸湿地减少最多,且在 2010~2016 年间平稳中仍有下降趋势。滩涂湿地在 2000~2016 年的减少速度大于 1991~2000 年,目前仍有下降的趋势。盐沼湿地先增加后迅速减少继而迅速增长。人工湿地以养殖池和蓄水区面积为主,这两种类型在 2000~2010 年以年均 17.49 km²和 9.51 km²的速度增长,在 2010~2016 年增长趋于缓和。

3.3.2 湿地面积预测

湿地面积预测一直是湿地变化研究的重要内容,预测方法有 CA-Markov 模型^[23]、灰色模型^[24]、BP 神经网络^[25]等。BP 神经网络模型需要长时间的资料,不适用于本次研究。马尔科夫预测模型的前提条件是在各个时期或者状态,变量面临的下一个期间或者状态的转移概率一样,不随时间变化。一旦转移概率有所变化,马尔科夫模型必

须改变转移概率矩阵的参数,否则预测结果偏差大。灰色预测 GM(1,1) 模型对数据的随机性、波动性拟合性低,仅能对未来总体趋势进行预测^[26]。充分考虑本研究数据的有限性以及模型和方法的可操作性,选择李弈秋和冯仲科^[20]的非等间距序列的灰色模型对湿地面积进行预测,预测结果见表5。

表5 1991~2016年自然湿地面积预测值真实值比较

Table 5 Comparison of the true and the predicted areas of natural wetlands from 1991 to 2016 km²

自然湿地	1991年	2000年	2010年	2016年
实际值	1 419.76	1 082.49	780.37	783.37
预测值	1 419.76	1 044.69	2 169.49	2 949.86

1991和2000年的湿地预测值和实际值相差不大,而2010和2016年的预测值与实际值相差甚远。原因可能是:1)数据不准确,对比前人关于黄河三角洲湿地的研究,数据相似,无较大误差;2)模型使用不正确,1991和2000年的湿地面积预测值和真实值接近,判定模型问题不大;3)其他因素,2010和2016年的数据受人为主观因素干扰严重或者说湿地变化的驱动力不是自然因素而是人为因素;4)模型,由于黄河三角洲受人为主观因素干扰大,应选择多因子预测模型,此外还应该增加数据量。

3.4 湿地变化的驱动力分析

Achim Steiner (2012) 在印度海德拉巴举行的联合国会议上评论说“在过去的100年里,全世界大约50%的湿地已遭到破坏。”自然因素和人为因素是湿地变化的主要驱动因素,其中人为因素起主导作用。分析黄河三角洲湿地变化的驱动因素可以为湿地发展规划提供理论依据。本文主要分析断流、水沙、侵蚀等自然因素;人口数量、社会政策、经济发展等人为因素。

3.4.1 自然因素

水、沙是三角洲湿地形成的物质基础,黄河径流量和输沙量是推动自然湿地增加、人工湿地减少^[7]和维持湿地生态系统稳定性的重要因素。李希宁等^[27]研究黄河三角洲面积变化与海水沙量的关系,得出维持三角洲面积动态平衡的最低输沙量为2.45亿t/a。表6中1990~2009年的黄河径流量和输沙量数据源自文献^[28]。根据李希宁得出的结论,黄河三角洲在1990~2009间有5年的数据小于最低输沙量。1996年河口出汉后入海沙量大量减少以及河口附近剧烈蚀退^[28],从而导致在湿地面

积变化结果分析时出现2010年的面积少于2000年。

表6 1990~2009年黄河利津水文站年径流量和输沙量统计^[28]

Table 6 Annual runoff and sediment discharges at the Lijin hydrological station in the Yellow River from 1990 to 2009^[28]

项目	1990	1991	1995	1999	2000	2001	2005	2009
径流量/亿 m ³	264.40	127.10	136.30	68.36	48.59	46.53	206.80	132.90
输沙量/亿 t	4.68	2.71	5.70	1.93	0.22	0.20	1.91	0.56

黄河断流从根本上影响着三角洲的水动力和水环境,促使三角洲湿地分布格局发生变化^[29]。杨伟等人^[30]研究发现1972~1999年只有22年出现断流,2000年至今从未出现断流。黄河水量的减小则携带的泥沙量减少,加之三角洲海岸的持续冲蚀,必然会导致三角洲滨海湿地面积减少。河口区西北部、刁口以西的扇形缺口^[31],淡水已被咸化;海水通过涨落潮深入陆地内部,几乎成为区域湿地的重要水源。草甸湿地中的淡水植被被耐盐植被取代,随着盐分的积累,草甸湿地逐步退化为盐沼湿地。

黄河三角洲海岸主要是粉砂壤淤泥^[32],在沉积结构和地貌动态上很不稳定。海岸侵蚀岸线后退,滩面下蚀,增强了潮水的影响;再加上其特殊的地理位置发生风暴潮的概率极高,使得海岸湿地极易被侵蚀。海堤、油田、港口的兴建和发展使一些海岸滩暂时稳定^[33],而缺乏加固措施的自然岸线,侵蚀速度加快。据资料记载,解放后的东营市平均每年发生1.5次风暴潮^[27]。风暴潮带来海水入侵,淹没滨海低地,盐碱地增加,致使自然湿地面积与分布格局改变。

3.4.2 人为因素

有研究发现加速的城市化进程已经对邻近地区的湿地带来了巨大的压力^[34],例如人口膨胀、不透水面扩展、垃圾倾倒等,对湿地的可持续性构成了严重威胁^[35]。人口的增长对粮食和建筑用地的需求增加,迫使湿地转化为耕地和建设用地。根据东营市政府公开数据和全国第五、第六次^[36]人口普查数据,2000、2010、2016年全市人口数量分别是179.32万、209.91万、213.21万。2000~2010年全市人口增加30.59万,2010至2016年人口增加3.3万,增长速度减慢。居民区、工矿区、道路等人为设施1991~2013年面积几乎扩张了50%,人为设施的主要占地类型为耕地和草甸湿地。人口的快速增

长以及社会经济的发展加之湿地的不合理利用,导致了湿地生态系统的破坏。1980年普查,黄河三角洲原有草场 1 850 km²,而近些年来,的毁草种粮,年均减少草甸面积约 44 km²[37]。

社会经济因素使得该地区的养殖捕捞和制盐业快速发展,滩涂作为我国的后备储蓄资源,被大量的开发成为盐田和养殖池。Jackson 等[38]的研究表明过度捕捞是破坏滨海生态系统的首要因素,且在一定程度上刺激了养殖业的发展。1991~2016年养殖池的面积增加 170.93 km²,盐田的面积增加 92.03 km²。滩涂面积的开发围垦造成滨海湿地退化以及湿地内部转化的停滞,最后该地区盐碱地大面积出现。

1984年黄河三角洲东北部完全被裸滩和滩涂湿地覆盖;1992~2006年修建东营港,滩涂外围修建防潮大坝,滩涂面积萎缩;从1964年建设胜利油田,到2004年占地面积达 468 km²[29]。东营港、胜利油田及孤东油田等的出现改变了原来的土地利用方式,并进而破坏了滨海湿地的生态环境。

1991年国家批准建立黄河三角洲湿地自然保护区,使得黄河入海口附近的自然湿地得以保存。其后,随着人们环保意识的提高,对已退化或消失的湿地进行修复。国务院于2009年和2011年分别通过了《黄河三角洲高效生态经济区发展规划》和

《山东半岛蓝色经济区发展规划》,拟将黄河三角洲建成绿色的生态经济区,既能有效促进经济发展又能最大程度保护湿地生态环境。

总之,人为因素是驱动黄河三角洲湿地变化的首要因素,其中尤以工程建设、滩涂开发和政策制定、行政规划等最为显著。另外,自然驱动力中的水沙变化、海岸侵蚀等对湿地也有一定影响,自然和人为因素综合作用致使黄河三角洲湿地在生态特征、结构和功能等各方面出现退化。

4 结论

通过对1991~2016年黄河三角洲湿地遥感影像的信息提取分析以及对湿地变化驱动因素的讨论,得到如下结论:

1) 研究区湿地类型多样且分布不均匀,近25年来黄河三角洲湿地整体呈缩减趋势,其中自然湿地面积减少最多,约为 636.39 km²,而人工湿地呈增加趋势,增加量约为 544.63 km²。

2) 黄河三角洲不同空间区域湿地面积数量和变化程度不同,沿海地区湿地变化比内陆变化快,而在湿地动态变化过程中,湿地与非湿地间的转换远远大于湿地地类间的相互转换。

3) 在湿地变化的驱动因素中,人为因素占主导作用。此外,滩涂开发和工程修建是自然湿地破坏的最直接因素。

参 考 文 献

- [1] Mitch W J, Gossilink J G. The value of wetlands: Importance of scale and landscape setting [J]. *Ecological Economics*, 2000, 35(1): 25-33.
- [2] 陈建, 王世岩, 毛战坡, 等. 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.
- [3] 徐庆红. 福建省滨海湿地遥感变化检测[D]. 福建: 福建大学, 2014.
- [4] Sader S A. Accuracy of Landsat-TM and GIS rule-based methods for forest wetland classification in Maine [J]. *Remote Sensing Environment*, 1995, 53(3): 133-144.
- [5] Russell G D, Hawkins C P, O'Neil M P. The role of GIS in selecting sites for riparian restoration based on hydrology and land use [J]. *Restoration Ecology*, 1997, 5(4S): 56-68.
- [6] 张树文, 颜凤琴, 于灵雪, 等. 湿地遥感研究进展[J]. *地理科学*, 2013, 33(11): 1406-1412.
- [7] 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.
- [8] 洪佳, 卢晓宁, 王玲玲, 等. 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.
- [9] 国家林业局《湿地公约》履行办公室. 湿地公约履约指南[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [10] 国家林业局湿地保护管理中心. 全国湿地资源调查与检测技术规程(试行)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008.
- [11] 陈建伟, 黄桂林. 中国湿地分类系统及其划分指标的探讨[J]. *林业资源管理*, 1995, 5(5): 65-71.
- [12] 牟晓杰, 刘兴士, 阎百兴, 等. 中国滨海湿地分类系统[J]. *湿地科学*, 2015, 13(1): 19-25.
- [13] Cowardin L M, Carter V, Golet F C, et al. Classification of Wetlands and Deep Water Habitats of the United States [M]. Washington, DC: Fish and Wild life Service Publication, 1979.
- [14] Glooschenko W A. Wetlands of Canada and Greenland [C]. Whigham D F. *Wetland of World: Inventory, Ecology and Management*. USA: Kluwer Academic Publishers, 1993: 415-514.
- [15] 栗云召, 于君宝, 韩广轩, 等. 基于遥感的黄河三角洲海岸线变化研究[J]. *海洋科学*, 2012, 36(4): 99-106.
- [16] Ryu J H, Won J S, Kyung K D, et al. Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat a case study in Gomsobaby, Korea [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(3): 442-456.

- [17] 张旭凯,张霞,杨邦会,等. 结合海岸类型和潮位校正的海岸线遥感提取[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(4): 91-97.
- [18] Chris W, Alisa G. Improved wetland remote sensing in yellowstone national park using classification trees to combine TM imagine and ancillary environmental data [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 107(4): 582-605.
- [19] 那晓东,张树清,孔博,等. 基于决策树方法的淡水沼泽湿地信息提取—以三江平原东北部为例[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(4): 365-372.
- [20] 李弈秋,冯仲科. 山东省森林资源动态变化的非等间距灰色预测[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(1): 7-12.
- [21] 周俊霞,刘淑英,王平,等. 武威市凉州区土地利用动态度的时间分异分析[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(2): 218-220.
- [22] 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.
- [23] Luo G P, Amuti T, Zhu L, et al. Dynamics of landscape patterns in an inland river delta of Central Asia based on a cellular automata-Markov model [J]. Regional Environmental Change, 2015, 15(2): 277-289.
- [24] 段浩,潘世兵,李琳. 基于灰色模型的敦煌西湖保护区湿地演化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1): 198-202.
- [25] 赵亮,刘吉平,徐艳艳,等. 基于BP神经网络模型的三江平原湿地面积预测研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(10): 53-56.
- [26] 曾雨晴,潘洪义,周介铭,等. 基于灰色马尔科夫模型的四川省耕地面积及耕地压力指数的分析与预测[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(9): 447-451.
- [27] 李希宁,刘曙光,李先从,等. 黄河三角洲冲淤平衡来沙临界值分析[J]. 人民黄河, 2001, 23(3): 20-22.
- [28] 姚长新,袁红明,孟祥君,等. 黄河三角洲滨海湿地损失和退化的自然因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(1): 43-50.
- [29] 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.
- [30] 杨伟,陈沈良. 黄河三角洲河口区滨海湿地面积动态变化与影响因素分析[R]. 海洋科学, 2011, 35(7): 61-66.
- [31] 安永会,张福存,姚秀菊,等. 黄河三角洲水土盐形成演化与分布特征[J]. 地球与环境, 2006, 34(3): 65-70.
- [32] 朱志伟,高茂生,朱远峰,等. 海岸带基本类型与分布的定量分析[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 315-321.
- [33] 黄海军,樊辉. 1976年黄河改道以来三角洲近岸区变化遥感监测[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(4): 306-314.
- [34] Li Y, Zhu X, Sun X, et al. Landscape effects of environmental impact on Bay-area wetlands under rapid urban expansion and development policy: A case study of Lianyungang, China [J]. Landscape Urban Planning, 2010, 94(3): 218-227.
- [35] Li Y F, Shi Y L, Qureshi S, et al. Applying the concept of spatial resilience to socio-ecological systems in the urban wetland interface [J]. Ecological Indicators, 2014, 42(7): 135-146.
- [36] 中华人民共和国国家统计局. [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/pcsj/>.
- [37] 王学金,鄧兴桥,万鹏,等. 黄河三角洲湿地利用与影响因素分析[J]. 人民黄河, 2004, 26(10): 10-11.
- [38] Jacson B C, Kirby M C, Berger W H, et al. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems [J]. Science, 2001, 293(5530): 629-638.

Remote Sensing Monitoring of Wetland Changes in the Yellow River Delta During 1991-2016

LIU Haihong^{1,2}, LIU Yinxu^{1,2}, ZHANG Chunhua³, YANG Xuemei¹, HU Jian⁴, LI Jun²

(1. College of Geography and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Water Resources and Environment, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China;

3. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264000, China; 4. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;)

Abstract: Based on the Landsat TM/OLI image data of 1991, 2000, 2010 and 2016, the classification method of object-oriented and visual interpretation was used to extract the wetland information of the Yellow River Delta. In addition, spatial analysis, dynamics model, non-equidistance grey model sequences and other methods were applied to analyze the temporal and spatial variation of wetlands. On the basis of related literatures, this study discussed the driving factors of wetland change. The results show that from 1991 to 2016, the total area of wetlands in the Yellow River Delta decreased gradually, with a decrease of approximately 91.39 km². Additionally, the area change during the period from 2000 to 2010 was most intense among the whole period. The area of natural wetlands decreased by 30.21 km²/a, while that of artificial wetlands increased by 32.77 km²/a. Among all wetland types, the area of meadow wetlands decreased, most severely, 312.83 km², while the area of artificial wetlands increased significantly, mainly as aquaculture ponds and salt fields, with a total newly increased area of 544.63 km². From the spatial distribution perspective, the area of artificial wetland in the study area has gradually expanded to the coastal area. Human activities such as wetland farming, agricultural reclamation, and engineering construction are the main factors leading to the reduction of natural wetlands in the Yellow River Delta.

Key words: wetland; Yellow River Delta; remote sensing monitoring; object-oriented classification