

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

孔祥伦¹, 李云龙^{1,2}, 韩 美^{1*}, 田立鑫¹, 牛学锐¹, 朱继前¹, 王 敏^{1,2}, 黄淑萍²

(1. 山东师范大学地理与环境学院, 山东 济南 250038; 2. 齐鲁师范学院历史与社会发展学院, 山东 济南 250020)

摘要:以1990年、2004年和2018年的Landsat TM/OLI影像作为数据源,采用面向对象分类方法,提取黄河三角洲天然湿地信息;采用马尔科夫转移矩阵、网格单元法和地理探测器方法,分析黄河三角洲天然湿地的时空分布动态与驱动因素。研究表明,与1990年相比,2018年黄河三角洲天然湿地面积减少了517.0 km²。其中,河流面积减少了20.4 km²,滩涂面积减少了355.1 km²,沼泽化草甸面积减少了296.1 km²,近海海域面积增加了154.6 km²;被开发利用的天然湿地主要分布在研究区西北部、东北部和东部沿海区域,其分布范围比新增加的天然湿地更靠近海岸线;黄河三角洲天然湿地被开发利用的主要驱动因素为自然区位(天然湿地与海岸线的距离和与黄河的距离)、经济水平(国民生产总值)、经济区位(天然湿地与乡镇中心的距离)和自然环境因素(土壤类型)。

关键词:天然湿地;时空分布;地理探测器;驱动因素;黄河三角洲

中图分类号:P94;P966

文献标识码:A

文章编号:1672-5948(2020)05-603-10

随着经济和社会的高速发展,石油开采^[1]、农业开垦和水产养殖等人类活动^[2-4]严重破坏了黄河三角洲天然湿地,带来了水鸟栖息地萎缩^[5]、土壤盐渍化^[6]和环境污染^[7]等一系列问题。因此,监测黄河三角洲天然湿地的动态,探讨导致其变化的驱动因素,对于黄河三角洲天然湿地的保护和可持续发展具有非常重要的意义。

比较1989年、2000年和2009年黄河三角洲天然湿地的面积发现,黄河三角洲天然湿地在不断萎缩,黄河断流、水产养殖、水田和建设用地规模扩大是导致其萎缩的主要原因^[8]。对1986年、1996年和2006年黄河三角洲湿地景观格局的研究表明,天然湿地面积在大幅减少,人工湿地面积在大幅增加,黄河断流、农业开垦、滩涂开发、石油开采和人工建筑增多是其主要驱动因素^[9]。与1976年相比,2015年黄河三角洲地区天然湿地面积减少了1 627 km²,而人工湿地面积增加了2 891 km²,丧失的天然湿地主要转变为旱地、养殖池和盐田,

围海养殖、油田开发、农业开垦等人类活动是其主要驱动因素^[10]。

本研究以黄河三角洲天然湿地作为研究对象,利用1990年、2004年和2018年的Landsat TM/OLI影像数据,采用马尔科夫转移矩阵、网格单元方法和地理探测器方法,在ArcGIS平台上,研究3个时期的黄河三角洲天然湿地时空分布及其变化,揭示导致其变化的驱动因素,以为天然湿地保护和恢复积累数据和提供参考依据。

1 数据和方法

1.1 研究区

黄河三角洲位于黄河入海口处,北临渤海湾,东靠莱州湾。在本研究中,以宁海为顶点、西起套儿河口、南抵支脉河口的近代黄河三角洲(37°20'N~38°11'N, 118°4'E~119°17'E)作为研究区(图1)。

该区气候属暖温带半湿润季风气候,年平均气温为12.9℃,年降水量约为585 mm。该区海拔低于15 m,地势低平,土壤主要为滨海盐土、潮土

收稿日期:2020-06-07; 修订日期:2020-09-23

基金项目:山东省社科规划重大项目(20AWTJ07)和国家自然科学基金项目(41371517)资助。

作者简介:孔祥伦(1996-),男,山东省曲阜人,硕士研究生,从事环境科学研究。E-mail: 13573125257@163.com

*通讯作者:韩美,教授。E-mail: hanmei568568@126.com

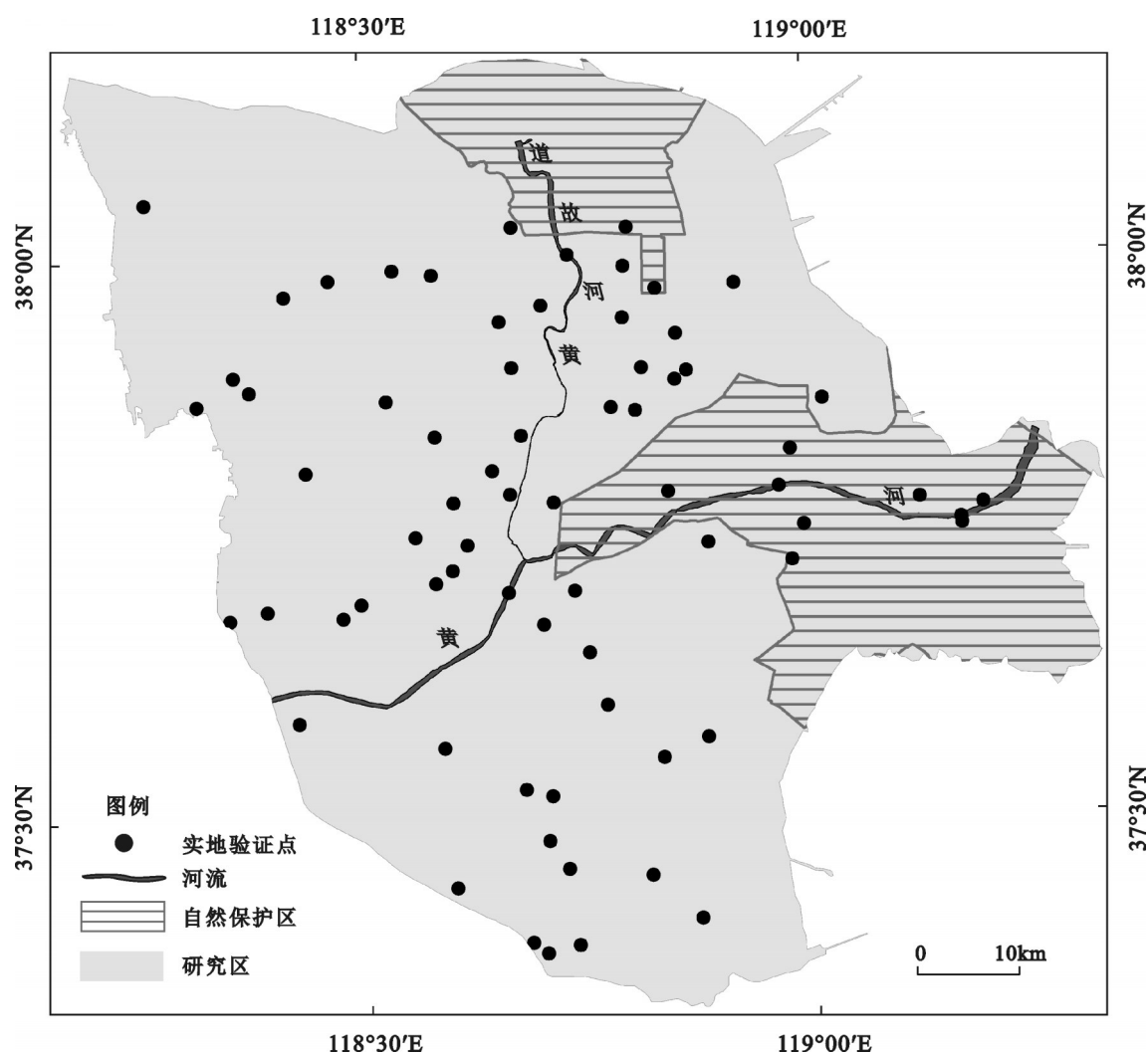


图1 研究区示意图

Fig.1 Sketch map of the study area

和褐土^[11];人工植物以农作物为主,天然植物以盐生植物为主。该区的黄河三角洲国家级自然保护区是中国最大的河口三角洲自然保护区,是东北亚乃至全球重要的水禽繁殖和栖息地^[9]。

1.2 数据

1.2.1 数据源及其预处理

选取1990年9月20日Landsat 5 TM、2004年9月10日Landsat 5 TM和2018年8月19日的Landsat 8 OLI影像作为土地利用分类数据源。这些影像数据下载自美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)官方网站(<http://glovis.usgs.gov/>),3期影像的轨道号为124/34,分辨率都为30 m,云量都小于10%。

利用ENVI平台,对遥感影像进行几何精校正、影像配准、大气校正、辐射校正和影像裁剪等

预处理,校正误差控制在1个像元。

参照2017年11月颁布的《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)国家标准,结合研究区实际情况,将黄河三角洲土地利用类型划分为耕地、林地、建设用地、未利用地、人工湿地(水库、坑塘、盐田和养殖池)和天然湿地(河流、滩涂、沼泽化草甸和近海海域)。采用面向对象分类与目视解译相结合的方法,对遥感影像进行解译,提取出3个时期研究区土地利用信息。利用eCognition软件,对影像进行多尺度分割,针对Landsat TM影像与OLI影像质量存在差异的特点,为了保证解译结果的准确性,设置2018年影像的分割尺度为120,设置1990年和2004年影像的分割尺度为20。根据不同地物在影像上显示出的色调、纹理和形状等特征,建立解译标志^[10,12]。采用决策树方法,得到3个

时期研究区土地利用分类数据;采用目视解译法,对解译结果进行修正,最终得到3个时期研究区土地利用分类图。利用实地数据和从Google Earth获取的验证点数据,对分类结果进行精度验证,得到的3个时期研究区土地利用分类解译精度分别为88.7%、90.2%和92.3%,能够满足本研究需要。

1.2.2 驱动因素研究利用的数据

天然湿地发生变化是自然因素和人为因素综合作用的结果。结合研究区的实际情况和以往的相关研究^[13-16],从自然环境、自然区位、经济水平、人口规模和经济区位角度,构建驱动因素指标体系(表1)。

因为各种类型土壤的水、盐含量不同,所以其天然湿地的分布也存在差异。土壤类型数据下载自联合国粮农组织土壤门户网站(<http://www.fao.org/soils-portal/en/>)。海拔和坡度是影响天然湿地分布的重要指标,黄河三角洲的DEM数据下载自地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),利用ArcGIS空间分析模块,可以从DEM数据中提取出海拔和坡度数据。

黄河和渤海是研究区天然湿地的主要水源。天然湿地与黄河及其与海岸线之间的距离关系到其水源补给是否充足的问题,其与乡镇中心之间的距离则关系到天然湿地的开发成本和效率。利用ArcGIS软件的欧式距离工具,获取距离指标数据。

国民生产总值的变化率、城市化率的变化率、第一产业比重的变化率和第二产业比重的变化率是反映研究区社会和经济发展的指标,通过调整土地利用方式,可以使社会和经济水平

和产业结构发生变化,这必然会对天然湿地造成影响。人口数量变化率能反映人口规模的变化,体现了对土地需求增加的压力。以上社会和经济

指标数据获取自《东营市年鉴》、《河口年鉴》、《天津年鉴》、《垦利年鉴》和《东营区年鉴》。

1.3 方法

本研究采用了马尔科夫转移矩阵、网格单元分析法和地理探测器方法,开展研究。

网格单元分析方法。利用ArcGIS10.6软件,在研究区范围内,创建矢量网格,将天然湿地分布图与网格单元相连接,统计各个时期每个网格中的天然湿地面积,通过各时期数据对比,计算出天然湿地丧失率。参照文献[17]和[18],设置50 m×50 m、200 m×200 m、350 m×350 m、500 m×500 m、750 m×750 m和900 m×900 m共6个尺度的矢量网格,在各尺度网格内,针对研究内容进行后续运算。综合研究区面积、计算机运行效率和研究内容精确度等因素,最终确定的网格单元规格为500 m×500 m,将研究区划分为23 324个网格。

地理探测器方法。地理探测器是一组探测地物空间分异性及其驱动力的统计学方法,其理论核心是通过空间异质性来探测因变量与自变量之间空间分布格局的一致性,据此度量自变量对因变量的解释度^[19]。地理探测器包括因子探测器、交互作用探测器、风险区探测器和生态探测器。本研究利用因子探测器和交互作用探测器,对导致黄河三角洲天然湿地丧失的各驱动因素进行定量分析。因子探测器和交互作用探测器的原理详见文献[20]。

本研究采用地理探测器方法,以湿地丧失率作为天然湿地丧失驱动因素分析的因变量,分析所选指标对天然湿地丧失的作用,因此,在设置因变量时,只选择天然湿地丧失率为负值,即仅对天然湿地丧失现象的区域进行分析。地理探测器

表1 驱动因素指标体系
Table 1 Indicator system of driving factors

驱动因素	指标	驱动因素	指标	驱动因素	指标
自然环境	土壤类型(x_1)	自然区位	天然湿地与海岸线的距离(x_5)	经济水平	第二产业比重的变化率(x_9)
	海拔(x_2)		国民生产总值变化率(x_6)	人口规模	人口数量变化率(x_{10})
	坡度(x_3)	经济水平	城市化率的变化率(x_7)	保护区政策(x_{11})	
自然区位	天然湿地与黄河的距离(x_4)		第一产业比重的变化率(x_8)	经济区位	天然湿地与乡镇中心的距离(x_{12})

模型要求输入变量为类别变量,因此,需要对连续型数据进行离散化处理。参考数据离散化方法和文献[16]和文献[21],将土壤类型变量按类型分为5级,坡度按照小于 5° 、 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 、 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 、 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 、 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 、大于 25° 分为6级,保护区政策按照保护区功能区分4级,其它变量都采用自然间断法分为7级。在ArcGIS平台,对所有指标进行空间化处理,分辨率统一为500 m;根据网格中心点,提取因变量与自变量数据。利用Geodetector软件,进行数据计算。

2 结果与分析

2.1 3个时期的湿地面积及其变化

黄河三角洲的湿地总面积由1990年的 $2\,242.7\text{ km}^2$ 增加至2018年的 $2\,784.6\text{ km}^2$ 。其中,人工湿地面积由1990年的 217.1 km^2 增加至2018

年的 $1\,276.0\text{ km}^2$,共增加 $1\,058.9\text{ km}^2$;天然湿地面积由1990年的 $2\,025.6\text{ km}^2$ 减少至2018年的 $1\,508.6\text{ km}^2$,共减少了 517.0 km^2 。

在天然湿地中,与1990年相比,2018年,河流面积减少了 20.4 km^2 ,滩涂面积减少了 355.1 km^2 ,沼泽化草甸面积减少了 296.1 km^2 ,近海海域面积增加了 154.6 km^2 (图2和表2)。

与1990年相比,2004年,研究区的天然湿地面积增加了 61.4 km^2 (表3)。天然湿地转变为其它土地利用类型的面积合计为 382.6 km^2 ,其中有 210.4 km^2 和 127.3 km^2 的天然湿地分别转变为人工湿地和耕地;有 444.0 km^2 的其它土地利用类型面积转变为天然湿地,其中包括未利用地面积 272.3 km^2 和耕地面积 137.4 km^2 。可见,人工湿地扩张是天然湿地丧失的主要原因。

与2004年相比,2018年,黄河三角洲天然湿

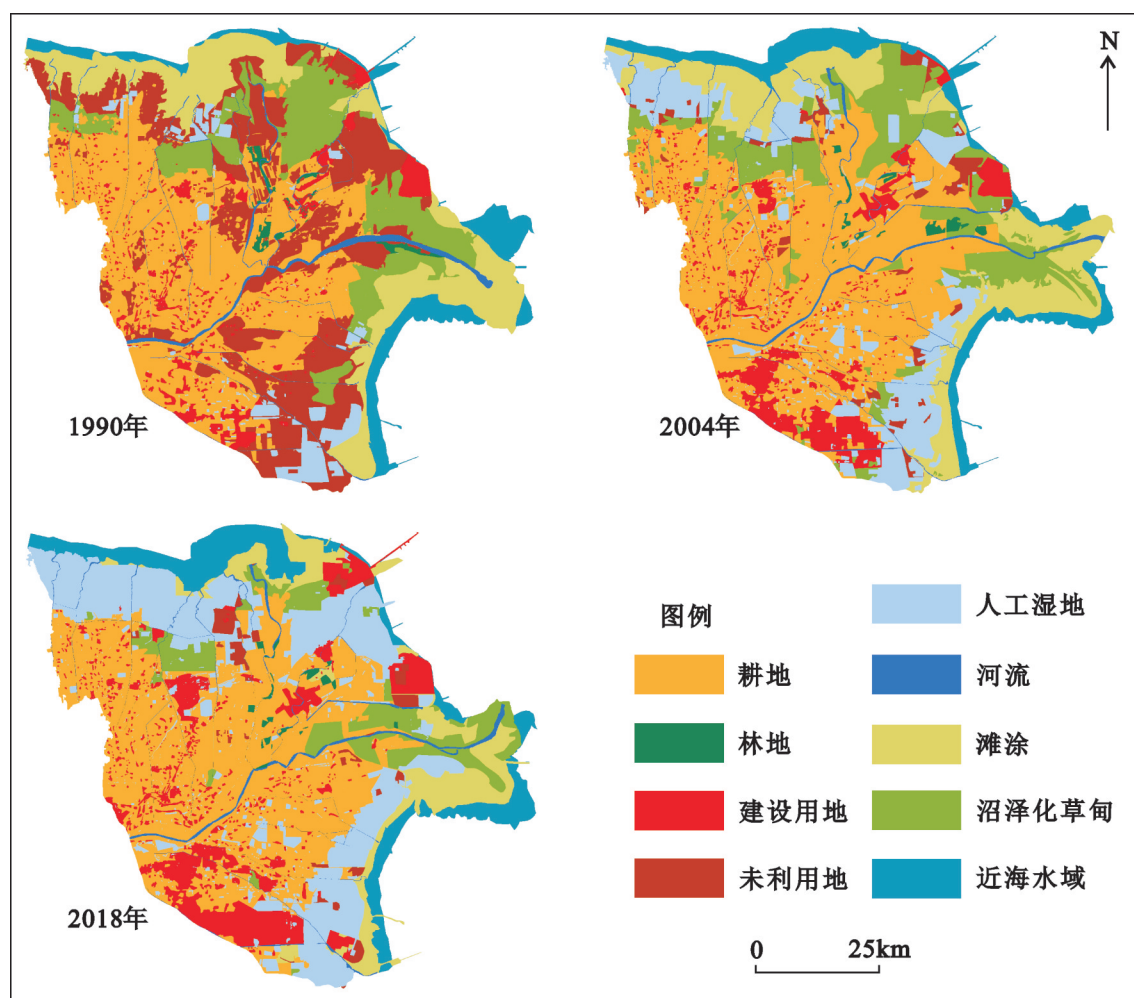


图2 3个时期研究区土地利用分布图

Fig.2 Map of land use in the study area in 1990, 2004 and 2018

地面积共减少了 578.4 km²。天然湿地转变为其它土地利用类型的面积为 744.4 km²,其转变为人工湿地和耕地的面积分别为 461.1 km²和 165.2 km²(表 4);其它土地利用类型转变为天然湿地的面积为 166.0 km²,退耕还湿的面积为 101.9 km²。

2.2 天然湿地的变化格局

3 个时期黄河三角洲的天然湿地总体上在丧失。新增加的天然湿地较少,主要分布在研究区

的东部、东北部和西北部(图 3)。

研究区东北部 74.3 km²的未利用地转变为滩涂。新增加的沼泽化草甸主要分布在黄河三角洲自然保护区和草桥沟、挑河、生态河的连接处,其中转变自未利用地的 72.9 km²沼泽化草甸主要在黄河三角洲自然保护区内沿黄河和黄河故道分布,退耕还湿的 60.4 km²沼泽化草甸主要分布在研究区西北部草桥沟、挑河、生态河的连接处,其在黄河三

表2 1990年与2018年之间黄河三角洲天然湿地的转入、转出和净变化面积
Table 2 Areas of inflow and outflow and net area changes of natural wetlands in the Yellow River Delta in 2018 compared with those in 1990

天然湿地类型	由其它土地利用类型转变为天然湿地的面积(km ²)	由天然湿地转变为其它土地利用类型的面积(km ²)	天然湿地面积的变化(km ²)
河流	42.7	63.1	-20.4
滩涂	245.4	600.5	-355.1
沼泽化草甸	225.9	522.0	-296.1
近海海域	284.5	129.9	154.6
合计	798.5	1 315.5	-517.0

表3 1990年与2004年黄河三角洲各种土地利用类型间的面积转移矩阵
Table 3 The transfer matrix between areas of various land use types in the Yellow River Delta in 1990 and those in 2004

	土地利用类型面积(km ²)						合计(km ²)
	耕地	林地	建设用地	未利用地	天然湿地	人工湿地	
耕地	1 467.0	7.0	133.9	21.4	137.4	70.6	1 837.3
林地	29.5	10.3	2.9	—	3.1	0.2	46.0
建设用地	18.6	—	248.9	2.2	19.8	0.9	290.4
未利用地	552.1	10.3	72.7	75.7	272.3	284.8	1 267.9
天然湿地	127.3	7.7	5.0	32.2	1 643.0	210.4	2 025.6
人工湿地	12.2	—	6.6	1.7	11.4	185.2	217.1
合计(km ²)	2 206.7	35.3	470.0	133.2	2 087.0	752.1	5 684.3

表4 2004年与2018年黄河三角洲各种土地利用类型间的面积转移矩阵
Table 4 The transfer matrix between areas of various land use types in the Yellow River Delta in 2004 and those in 2018

	土地利用类型面积(km ²)						合计(km ²)
	耕地	林地	建设用地	未利用地	天然湿地	人工湿地	
耕地	1 881.8	12.8	109.3	20.1	101.9	80.8	2 206.7
林地	5.5	11.2	—	—	18.4	0.2	35.3
建设用地	23.7	—	418.3	4.5	17.1	6.4	470.0
未利用地	33.8	—	10.5	5.7	19.2	64.0	133.2
天然湿地	165.2	2.2	62.8	53.1	1 342.6	461.1	2 087.0
人工湿地	28.6	—	24.9	25.7	9.4	663.5	752.1
合计(km ²)	2 138.6	26.2	625.8	109.1	1 508.6	1 276.0	5 684.3

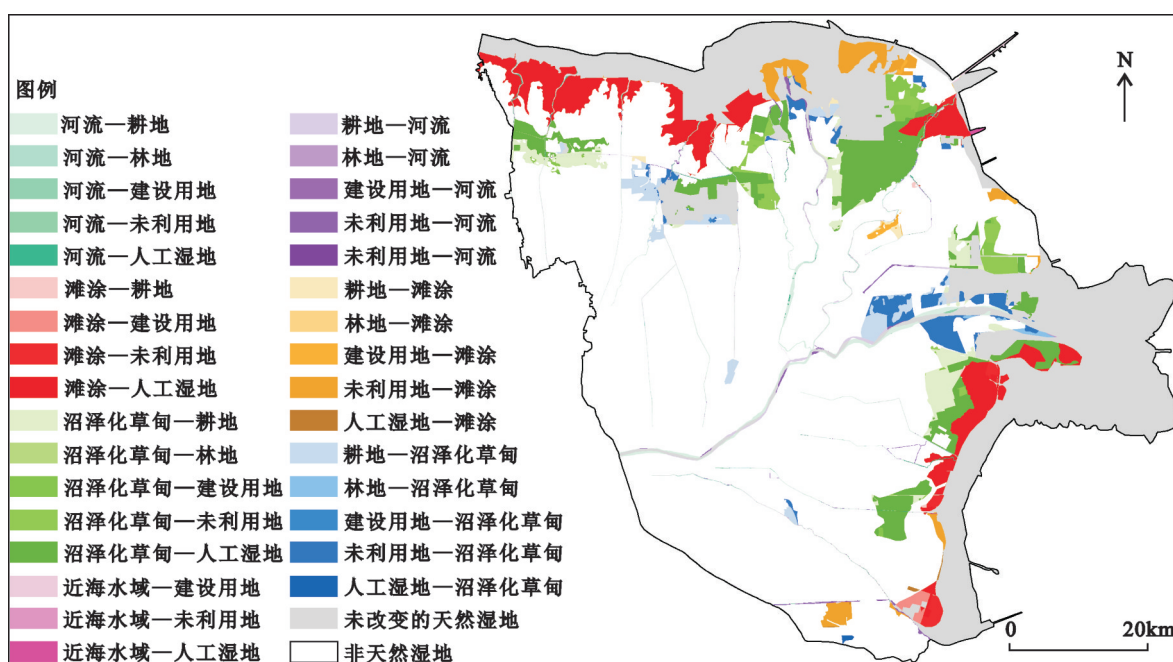


图3 1990年与2018年黄河三角洲发生转变的各种土地利用类型分布图

Fig.3 Map of transfer between various land use types in the Yellow River Delta in 1990 and those in 2018

角洲保护区内以及主要河流两侧也有零星分布。

研究区北部和东部沿海地区的大部分天然湿地丧失。有 232.8 km²滩涂转变为人工湿地,其多集中连片分布在研究区西北部、东北部和东部沿海地区。有 265.2 km²、92.2 km²和 44.4 km²沼泽化草甸分别转变为人工湿地、耕地和未利用地;转变为人工湿地的沼泽化草甸多与原有的人工湿地相邻,分布在研究区北部和东部地区;转变为耕地的沼泽化草甸主要分布在研究区西北部马新河两侧、黄河故道东侧和黄河三角洲国家级自然保护区南区的南侧;转变为未利用地的沼泽化草甸主要分布在研究区北部和东北部。整体来看,最靠近海岸线的天然湿地因转变为人工湿地而丧失,依次远离海岸线的天然湿地转变为未利用地和耕地。

2.3 天然湿地变化的驱动因素

2.3.1 因子探测器方法的结果

图4显示,天然湿地与乡镇中心的距离、天然湿地与海岸线的距离、土壤类型、国民生产总值变化率、天然湿地与黄河的距离、城市化率的变化率、人口数量变化率、第一产业比重的变化率、第二产业比重的变化率、海拔、保护区政策因素和坡度 12 个指标对研究区天然湿地变化的解释程度值

分别为 0.402、0.393、0.361、0.301、0.297、0.296、0.290、0.266、0.265、0.254、0.234 和 0.216,依次减小。天然湿地与乡镇中心的距离、天然湿地与海岸线的距离和土壤类型是天然湿地被开发利用的主导驱动指标。

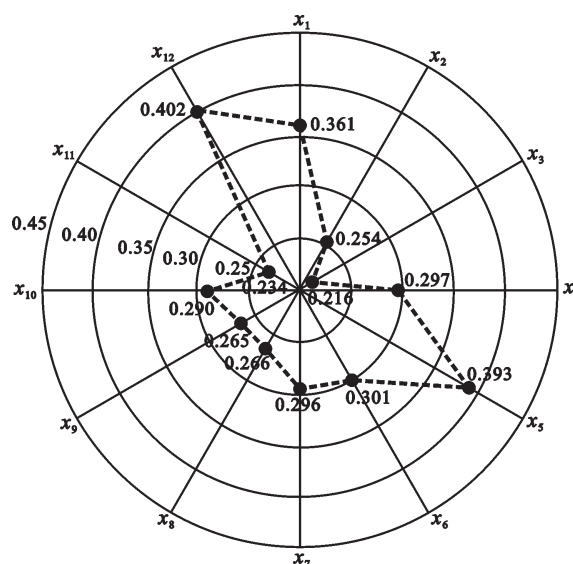


图4 12个指标对研究区天然湿地被开发利用的解释程度值

Fig.4 The interpretation values of 12 indicators for the development and utilization of natural wetlands in the study area

天然湿地与乡镇中心的距离是研究区天然湿地被开发利用的主要驱动指标,即经济区位因素是天然湿地被开发利用的主要驱动因素。研究区北部分布着规模较大的乡镇,如孤岛镇和仙河镇,近30多年来,城镇化进程不断加快,城镇人口数量不断增大,其对粮食和水产品的需求量增大,导致该区域大量沼泽化草甸被开垦为耕地;研究区北部和东部曾经滩涂广布,其与乡镇距离越近,水产品养殖的人力和交通成本越低,滩涂被围垦为养殖池和盐田的面积越大。研究表明,2018年,研究区被盐田和养殖池所占用的天然湿地面积比1990年增加了约35倍^[16],以盐田和养殖池为主的经济型人工湿地大规模扩张。

天然湿地与海岸线的距离也是研究区天然湿地被开发利用的主要驱动指标,即自然区位因素是天然湿地变化的主要驱动因素。天然湿地被开发利用的区域主要集中在与海岸线距离小于5 km的区域,即与海岸线距离越近的滩涂和沼泽化草甸越有可能被转变为盐田和养殖池。盐田的建设主要是在滨海滩涂区域筑坝,并引入海水灌溉^[22];养殖池的建设主要通过围垦滩涂来实现^[23]。由于黄河三角洲常年被海水入侵,土地盐渍化程度较高,随着与海岸线距离的增加,土壤和地下水的含盐量逐渐减少,土地的可开垦性也随之提高,距离海岸线越远的沼泽化草甸越适宜被开垦为耕地,

而距离海岸线较近的沼泽化草甸则被开发而未利用,变成未利用地。此外,研究区天然湿地主要分布在滨海潮土区,因此,作为研究区天然湿地分布的基底条件,土壤类型成为天然湿地被开发利用的重要自然环境驱动因素。

2.3.2 交互探测器方法的结果

由表5可知,指标变量间的交互作用主要以双变量增强和非线性增强为主,不存在其它类型的交互作用,这说明任意两个变量交互作用都增强了其对天然湿地变化的作用,天然湿地被开发利用是多种因素共同作用的结果,单一因素或单一性质的因素不能控制天然湿地的变化。

对3个时期研究区天然湿地被开发利用的解释程度值大于0.5的交互作用指标分别为天然湿地与黄河的距离和天然湿地与乡镇中心的距离、国民生产总值变化率和天然湿地与乡镇中心的距离、第一产业比重的变化率和天然湿地与乡镇中心的距离、人口数量变化率和天然湿地与乡镇中心的距离、天然湿地与黄河的距离和保护区政策、第二产业比重的变化率和天然湿地与乡镇中心的距离、城市化率的变化率和天然湿地与乡镇中心的距离、天然湿地与海岸线的距离和天然湿地与乡镇中心的距离、土壤类型和天然湿地与乡镇中心的距离、天然湿地与黄河的距离和天然湿地与海岸线的距离、国民生产总值变化率和天然湿地

表5 12个指标的交互探测结果

Table 5 The results of interaction detector of 12 indicators

	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈	x ₉	x ₁₀	x ₁₁	x ₁₂
x ₁	0.361											
x ₂	0.385*	0.254										
x ₃	0.375*	0.286	0.216									
x ₄	0.485	0.394	0.336	0.297								
x ₅	0.493*	0.424*	0.410	0.511	0.393							
x ₆	0.451*	0.378	0.329	0.475	0.507	0.301						
x ₇	0.450*	0.369	0.325	0.478	0.501	0.306*	0.296					
x ₈	0.419*	0.340	0.295	0.371	0.462	0.304*	0.306*	0.266				
x ₉	0.413*	0.343	0.294	0.373	0.470	0.306*	0.304*	0.274	0.265			
x ₁₀	0.446*	0.373	0.369	0.458	0.497	0.306*	0.305*	0.304*	0.306*	0.290		
x ₁₁	0.417	0.552	0.310	0.552	0.454	0.480	0.457	0.457	0.459	0.494	0.234	
x ₁₂	0.516*	0.454*	0.413*	0.575	0.526*	0.573	0.539	0.562	0.551	0.556	0.494	0.402

注:数据右上角的*表示交互作用为双因子增强,其它交互作用则为非线性增强。

与海岸线的距离、城市化率的变化率和天然湿地与海岸线的距离,其对天然湿地被开发利用的解释程度值分别为0.575、0.573、0.562、0.556、0.552、0.551、0.539、0.526、0.516、0.511、0.507和0.501,依次减小。可见,天然湿地与乡镇中心的距离和与海岸线的距离是研究区天然湿地被开发利用的主导驱动指标。天然湿地与黄河的距离和天然湿地与乡镇中心的距离的交互作用最大,其次为国民生产总值和天然湿地与乡镇中心的距离,黄河是研究区最重要的淡水补给来源,与黄河的距离较近的天然湿地,其淡水补给相对充足,易被开发为耕地等农业用地。国民生产总值是体现社会经济发展最直接的指标,经济的发展使得人类活动强度不断增加,其对天然湿地的影响程度不断加大,因此,天然湿地与黄河的距离和国民生产总值可以被视为造成研究区天然湿地被开发利用的重要辅助指标,其和天然湿地与乡镇中心的距离一起作用,导致天然湿地被开发利用。

3 讨论

研究表明,气候变化、经济发展水平和科技水平等因素是鸭绿江口天然湿地退化的主要驱动因素^[24];人均GDP、水产产值和非农人口比例等社会经济因素是天津滨海天然湿地退化的主导因素^[25];河流泥沙量、海平面上升和围填海等因素是导致长江三角洲天然湿地减少的主要原因^[26];滩涂开发和围填海活动是造成珠江三角洲天然滨海湿地消失的直接因素^[27]。由此可见,经济发展水平、围填海活动等社会经济建设活动是中国主要滨海天然湿地减少的主导因素。与其它滨海地区相比,黄河三角洲形成至今仅经过百余年,黄河三角洲系统具有显著的新生性,其发育过程仍受到黄河、海洋和土壤等自然因素的强烈影响。本研究结果显示,天然湿地与乡镇中心的距离、天然湿地与海岸线的距离是黄河三角洲天然湿地被开发利用的主导驱动指标,土壤类型是天然湿地被开发利用的重要驱动指标,天然湿地与黄河的距离和国民生产总值是其重要辅助指标。其中,天然湿地与乡镇中心的距离、天然湿地与海岸线的距离和天然湿地与黄河的距离都属区位因素,土壤类型属自然环境因素,这些因素是导致黄河三角洲天然

湿地被开发利用的基础性因素;国民生产总值属经济水平因素,研究区的经济开发历史短、水平低,20世纪60年代至80年代,胜利油田的发现与中心城市东营市的建立,使得黄河三角洲迎来社会经济发展的高峰期,但是,其发展历史比上述其它地区短,该区域处于城镇化与经济攀升期,社会经济因素对研究区天然湿地被开发利用的影响程度相对较小。

特殊的区位条件和自然环境导致研究区天然湿地的系统稳定性较差,易受干扰而发生退化现象,可以预见,随着研究区社会经济水平的继续提升,如果不进行人为的干预,天然湿地的退化现象仍将持续。未来应该遵循“在保护中开发,在开发中保护”的思想,加强对黄河三角洲湿地保护政策的制定、完善和实施;针对黄河三角洲湿地被开发利用的主导驱动因素,未来研究区的湿地保护工作需要防止城镇化进程对天然湿地的过度占用,在城镇建设规划中,为城镇扩张预留一定空间,严守湿地保护红线,同时保障湿地保护与恢复有充足的水资源支撑;黄河三角洲湿地保护目前存在多部门交叉管理和职责不清等问题,因此,需要建立自上而下的管理体制,目前国内外高度关注的国家湿地公园体制也许能解决这些问题,而如何进行国家湿地公园建设和如何发挥其湿地保护的作用是未来需要关注的问题。

本研究应用的地理探测器方法存在一定缺陷,即构建的驱动因素指标体系还不够完善,未包括对该区天然湿地演化能够产生重要影响的黄河水沙含量等因素;数据分级方法和连续性因子的离散化处理具有一定主观性,必然会对研究结果的精度产生影响;对因子交互作用的机制尚存在异议。未来可以改进地理探测器方法,开展进一步的深入研究。

4 结论

与1990年相比,2018年黄河三角洲天然湿地面积减少了517.0 km²。其中,河流面积减少了20.4 km²,滩涂面积减少了355.1 km²,沼泽化草甸面积减少了296.1 km²,近海海域面积增加了154.6 km²。

与1990年相比,2018年,在研究区西北部、东

北部和东部沿海区域,与海岸线的距离较近的大部分天然湿地被开发为人工湿地,与海岸线的距离较远的大部分天然湿地被开发为耕地和未利用地。新增加的天然湿地面积较小,主要分布在研究区东部、东北部和西北部,与被开发利用的天然湿地相比,其分布范围更靠近内陆地区。

天然湿地与乡镇中心的距离、天然湿地与海岸线的距离是其被开发利用的主导驱动指标,土壤类型是天然湿地被开发利用的重要驱动指标,天然湿地与黄河的距离和国民生产总值是天然湿地被开发利用的重要辅助指标。黄河三角洲天然湿地被开发利用的主要驱动因素为自然区位、经济水平、经济区位和自然环境因素。

参考文献

- [1]韩潇源.黄河三角洲石油开发的环境影响定量评价研究[D].青岛:中国海洋大学,2009.
- [2]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.
- [3]ZHANG X Q, FU X S, ZHANG L N. Ecological vulnerability assessment of estuarine wetland of the Yellow River Delta[J]. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 2016, **19**(4): 771-784.
- [4]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.
- [5]袁秀,孙燕燕,王计平,等.基于水鸟栖息地恢复的黄河三角洲水资源综合利用策略[J].资源科学,2020, **42**(1): 104-114.
- [6]GUO B, YANG F, FAN Y W, *et al.* Dynamic monitoring of soil salinization in Yellow River Delta utilizing MSAVI- SI feature space models with Landsat images[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, **78**(10): 308.
- [7]HAN M, NIU X R, TANG M, *et al.* Distribution of microplastics in surface water of the lower Yellow River near estuary[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, **707**: 135601.
- [8]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].生态学报,2011, **30**(7): 1535-1541.
- [9]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.
- [10]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.
- [11]刘淑瑶,谢逸民.近代黄河三角洲农业资源及开发利用[M].济南:山东省地图出版社,1995.
- [12]孔祥伦,李云龙,韩美,等.1986-2016年黄河三角洲土地利用/覆被变化及景观格局分析[J].西南林业大学学报(自然科学),2020, **40**(4): 122-131.
- [13]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**(s1): 214-223.
- [14]刘吉平,马长迪,刘雁,等.基于地理探测器的沼泽湿地变化驱动因子定量分析[J].东北师范大学学报(自然科学版),2017, **49**(2): 127-135.
- [15]吕金霞,蒋卫国,王文杰,等.近30年来京津冀地区湿地景观变化及其驱动因素[J].生态学报,2018, **38**(12): 4492-4503.
- [16]李云龙,孔祥伦,韩美,等.1986-2016年黄河三角洲地表水体变化及其驱动力分析[J].农业工程学报,2019, **35**(16): 105-113.
- [17]周连义,江南,窦鸿身.城市化地区湿地变化分析——以南京市为例[J].资源科学,2010, **32**(4): 712-717.
- [18]鄂子骥,阿里木江·卡斯木,买买提江·买提尼亚孜,等.基于网格单元的西北干旱区城市土地覆被/土地利用时空变化研究——以新疆喀什市为例[J].干旱区地理,2018, **41**(3): 625-633.
- [19]王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017, **72**(1): 116-134.
- [20]WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, *et al.* Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, **24**(1): 107-127.
- [21]刘春艳,张科,刘吉平.1976-2013年三江平原景观生态风险变化及驱动力[J].生态学报,2018, **38**(11): 3729-3740.
- [22]DUAN Y Q, LI X, ZHANG L P, *et al.* Detecting spatiotemporal changes of large-scale aquaculture ponds regions over 1988-2018 in Jiangsu Province, China using Google Earth Engine[J]. *Ocean Coast Manage*, 2020, **188**: 105144.
- [23]姚云长,任春颖,王宗明,等.1985年和2010年中国沿海盐田和养殖池遥感监测[J].湿地科学,2016, **14**(6): 874-882.
- [24]何桐,谢健,徐映雪,等.鸭绿江口滨海湿地景观格局动态演变分析[J].中山大学学报(自然科学版),2009, **48**(2): 113-118.
- [25]肖庆聪,魏源送,王亚伟,等.天津滨海新区湿地退化驱动因素分析[J].环境科学学报,2012, **32**(2): 480-488.
- [26]马学焱,杜嘉,梁雨华,等.20世纪60年代以来6个时期长江三角洲滨海湿地变化及其驱动因素研究[J].湿地科学,2018, **16**(3): 303-312.
- [27]周昊昊,杜嘉,南颖,等.1980年以来5个时期珠江三角洲滨海湿地景观格局及其变化特征[J].湿地科学,2019, **17**(5): 559-566.

Distribution of Natural Wetlands in the Yellow River Delta for Three Periods since 1990 and Driving Factors of Their Changes

KONG Xianglun¹, LI Yunlong^{1,2}, HAN Mei¹, TIAN Lixin¹, NIU Xuerui¹, ZHU Jiqian¹,
WANG Min^{1,2}, HUANG Shuping²

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250038, Shandong, P.R.China;

2. School of History and Social Development, Qilu Normal University, Jinan 250200, Shandong, P.R.China)

Abstract: Data of Landsat TM/OLI images of the Yellow River Delta in 1990, 2004 and 2018 were obtained and the information of natural wetlands were extracted by the object-oriented classification method. The spatio-temporal dynamics of natural wetlands and driving factors of natural wetlands' changes were analyzed by methods of Markov transfer matrix, grid cells and geodetector. The results showed that area of natural wetlands in the Yellow River Delta decreased by 517.0 km² in 2018 than that in 1990. Among which, the areas of rivers, tidal flats and marshy meadows reduced 20.4 km², 355.1 km² and 296.1 km², respectively. The area of coastal waters was increased 154.6 km². The developed and utilized natural wetlands were mainly distributed in the northwest of the study area, northeast and eastern of coastal areas. Its distribution area was closer to the coastline than the new natural wetlands. The main driving factors for the development and utilization of natural wetlands in the Yellow River Delta were natural location (the distance from the natural wetlands to coastline and the distance from the natural wetlands to Yellow River), economic level (gross national product), economic location (the distance from the natural wetlands to center of town) and natural environmental factors (soil type).

Keywords: natural wetlands; spatio-temporal distribution; geodetector; driving factors; the Yellow River Delta