

基于时序特征的黄河三角洲土地 覆盖动态及驱动力分析

侯学会¹, 李新华¹, 徐洪彪², 王 猛¹

(1. 农业农村部 华东都市农业重点实验室 山东省农业可持续发展研究所,
山东 济南 250100; 2. 临沂市水文局, 山东 临沂 276001)

摘 要: 综合不同土地利用类型的 Landsat 影像时序特征和面向对象分割方法, 分析 1985–2018 年现代黄河三角洲土地覆盖时空特征, 探讨土地覆盖变化的驱动机制。结果表明: 1985–2018 年间研究区天然湿地面积大幅减少, 共减少 $9.9847 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 其中沼泽和草甸湿地面积减少尤为明显, 而人工湿地面积则逐年增加, 年平均增加率达 54.66%, 主要是盐田养殖场和水稻种植面积的增大; 社会经济因素对研究区土地覆盖的影响程度高于水文因素; 输沙量是影响研究区土地覆盖变化的主要水文因素, 实测径流量的减少进一步导致天然湿地向旱地类型转化; 人口和 GDP 变化对人工湿地面积增加的正相关作用比较显著, 而天然湿地面积的减少则与该两个指标的负相关关系比较明显。

关键词: 土地利用/土地覆盖; 时间序列数据; 面向对象分割; 驱动力; 黄河三角洲

中图分类号: F301.2; P237

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)01-0233-08

Dynamic changes of the wetland land use and land cover in the Yellow River Delta and the driving factors based on time-series satellite data

HOU Xuehui¹, LI Xinhua¹, XU Hongbiao², WANG Meng¹

(1. Key Laboratory of East China Urban Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shandong Institute of Agricultural Sustainable Development, Jinan 250100, China; 2. Linyi Hydrology Bureau, Linyi 276001, China)

Abstract: Based on the time series characteristics of different land use types and object-oriented segmentation methods, the spatial-temporal patterns of land use and land cover (LUCC) in the Yellow River Delta from 1985 to 2018 was analyzed, and the related driving factors of the dynamic changes were discussed. The results show that the area of natural wetlands in the study area has decreased significantly during this period, with a total decrease of $9.9847 \times 10^4 \text{ hm}^2$, especially the marshes and meadow wetlands. However, the area of constructed wetlands has gradually increased, with an average annual increase rate of 54.66%, which is mainly dominated by the growth of the salt farms and rice planting area. As for the driving factors of the changes in LUCC, socio-economic factors weighed more than hydrological factors in the study area. The amount of sediment transport was the major hydrological factor affecting the LUCC changes in the study area and the decrease in measured runoff accelerated the conversion of the natural wetlands to dry lands. It is found that the changes of population and GDP are positively correlated with the increase of constructed wetlands in this area, but negatively correlated with the decrease of natural wetlands.

Key words: land use and land cover (LUCC); time-series satellite data; object-oriented segmentation; driving factor; Yellow River Delta

收稿日期: 2020-08-05; 修回日期: 2020-12-03

基金项目: 山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2016A08); 国家重点研发计划项目(2017YFA06030004)

作者简介: 侯学会(1987-), 女, 山东单县人, 博士, 助理研究员, 研究方向为生态遥感。

通讯作者: 李新华(1979-), 女, 山东曹县人, 博士, 研究员, 研究方向为湿地与农业生态。

1 研究背景

土地利用/土地覆盖变化(land use and land cover change, LUCC)是生态环境变化最直接、最直观反映,是全球生态环境变化研究中一直被关注的热点之一。全球气候变化导致全球水热资源重新配置,对全球土地覆盖格局及区域 LUCC 动态影响较大,且近几十年人类社会活动的非理性超越发展,带来不同区域 LUCC 的空间异质性,加剧了生态环境脆弱化程度,成为影响全球土地覆盖变化的主要驱动力^[1-2]。

黄河三角洲是世界范围内湿地生态系统中极具代表性的河口湿地之一,在全球湿地生态系统研究中占据重要地位^[3],是我国暖温带最完整、最广阔、最年轻的湿地生态系统,也是我国大河三角洲中海陆变迁最活跃的地区之一^[4],且受区域经济发展的影响显著。近年来,建设用地扩张^[5]、耕地增加^[6]、滩涂开垦^[3]、环境污染^[7]等活动导致黄河三角洲 LUCC 发生了明显变化,生态环境不断恶化^[8],引起了国内外学者的广泛关注。并且,随着海量遥感数据的积累及遥感技术的不断发展,使得对黄河三角洲地区湿地动态研究越来越深入,如 Niu 等^[9]、Jiang 等^[10]、Kong 等^[11]和 Hua 等^[12]基于长时间序列资料分析,认为在气候变化和人为驱动的影响下,水文因素仍是黄河三角洲植被生长时空变化的主要驱动因子,而 Cong 等^[13]和 Liu 等^[14]则发现在人为驱动下,近几十年黄河三角洲湿地面积,尤其是天然湿地面积减少比较明显,且土地覆盖破碎化程度逐渐加剧^[15-16]。

黄河三角洲地区土地覆盖类型复杂多样,部分

LUCC 类型有明显的时间特征。但目前已有的成果中,多使用单一时间获取的影像进行黄河三角洲区域土地覆盖遥感解译^[17-18],因获取影像成像时间存在差异,导致部分土地覆盖类型存在错分和漏分、不同研究成果之间解译结果存在差异,并且仅在像元层面上开展监督分类提取结果也导致精度有限。因此,在前人研究的基础上,本文拟基于不同土地覆盖类型在 Landsat 影像上的时间序列特征,结合面向对象的多尺度分割算法,开展 1985–2018 年黄河三角洲 LUCC 遥感解译;在此基础上,分析各土地利用类型的时间动态趋势;并从水文和社会经济两个方面对研究区域内土地覆盖变化的驱动因素进行探讨,以为黄河三角洲生态保护政策制定提供科学参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

本研究以现代黄河三角洲为研究区,主要位于东营市辖区内,包括河口区东部、垦利区北部和利津县东部,以垦利鱼洼为顶点,北起挑河口,南至宋春荣沟,陆地面积约 3 000 km²,地处山东省蓝黄经济带的核心,研究区地理位置和范围以及 2018 年真彩色影像见图 1。现代黄河三角洲背陆面海,受欧亚大陆和太平洋的共同影响,属暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,年均气温 12.1℃,年均降水量 551.6 mm,其中 70% 分布在夏季,是我国暖温带保存最完整、最广阔和最年轻的滨海湿地。研究区土壤类型主要为隐域性潮土和盐土,植被区域分布主要受土壤、水分、盐分和人类活动的共同影响,呈明显的海陆规律性演替^[19]。

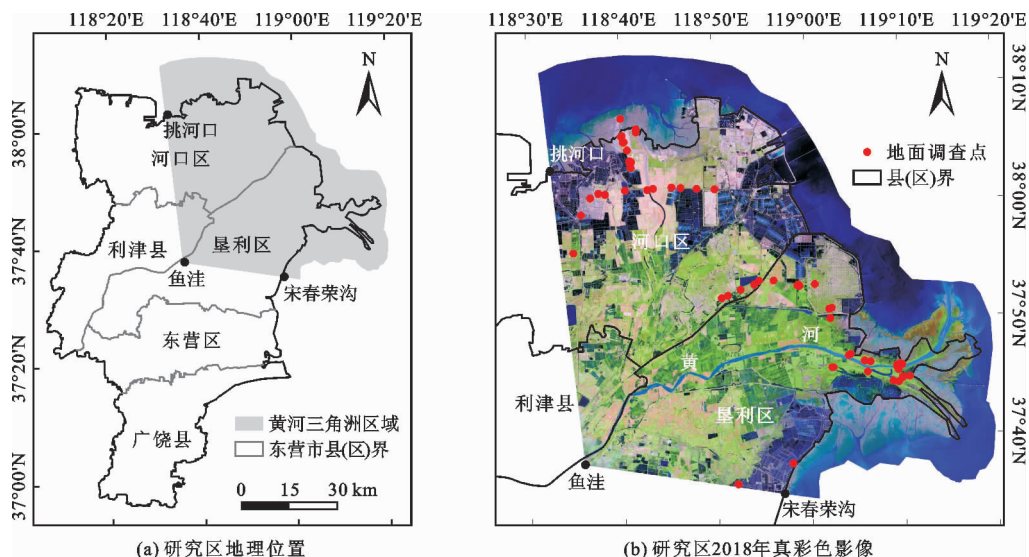


图1 研究区地理位置及 2018 年真彩色影像(卫星:Landsat 8 OLI,成像时间:2018 年 6 月 29 日)

2.2 数据来源与处理

2.2.1 遥感影像及预处理 根据研究区概况,挑选 1985–2018 年覆盖研究区的无云或者少云遥感影像,包括 Landsat5 TM、7 ETM 以及 8 OLI 共 8 个时期的 25 景影像,空间分辨率均为 30 m。为减少遥感数据成像时间不同对解译结果精度的影响,并考虑研究区

不同植被类型的生长季特征,本文尽量选用 4–10 月的时间序列影像进行土地覆盖解译,选用的遥感影像信息见表 1。基于 ENVI 软件对原始遥感影像进行波段合成、辐射定标,并对不同时期影像进行几何校正,控制误差在 0.5 个像元之内,然后以研究区矢量边界进行裁剪,得到研究区的遥感影像。

表 1 研究区土地覆盖解译选用的 25 景遥感影像信息

时期	传感器	影像时间
1985	landsat5 TM	1985-05-01、1985-08-05
1990	landsat5 TM	1990-06-16、1990-09-20
1995	landsat5 TM	1995-03-26、1995-05-29、1995-09-18
2000	landsat5 TM	2000-04-08、2000-06-11、2000-08-14
2005	landsat5 TM	2005-05-24、2005-07-11
2010	landsat5 TM、landsat7 ETM	2010-06-07、2010-06-15、2010-08-18、2010-09-11
2015	landsat8 OLI	2015-05-04、2015-06-05、2015-08-08、2015-10-11
2018	landsat8 OLI	2018-04-26、2018-05-28、2018-06-29、2018-07-21、2018-08-16

2.2.2 水文资料 本研究中使用的水文资料主要来自水利部黄河水利委员会发布的黄河水资源公报中利津站 1976–2018 年共 43 a 的实测径流量和输沙量数据。

2.2.3 社会经济数据 社会经济发展是黄河三角洲土地覆盖变化的又一主要驱动力,本文选取 GDP 和人口数据两个经济指标作为研究区土地覆盖变化的主要人为驱动因素^[20]。因研究区主要覆盖河口区和垦利区,因此,本研究中依据山东省统计年鉴、东营市统计年鉴、东营市国民经济和社会发展统计公报的 1990–2018 年的河口和垦利统计年鉴中的两区总 GDP 和总人口数据进行分析。

2.2.4 土地覆盖数据解译与分析 研究区土地覆盖解译主要基于 eCognition 和 ArcGIS 软件。利用预处理后的多时相 Landsat 数据,根据历史资料及地面调查数据,分析不同土地利用类型在 Landsat 影像上的时序特征,并结合图像分割、监督分类等方法对 8 个时期遥感影像进行土地覆盖专题解译。根据 2018 年实测的 104 个地面调查数据对解译精度进行评价,并基于 ArcGIS 软件对不同时期的土地利用图层进行叠加分析,计算不同土地覆盖类型之间的马尔柯夫转移矩阵,对研究区 1985–2018 年 LUCC 的时间维特征进行分析;利用图层的属性表,计算出土地利用类型转移概率。

根据研究区土地利用特征,参考前人研究成果^[21–23],本文将黄河三角洲土地覆盖类型分为滨

海湿地、河流湿地、沼泽湿地、草甸湿地、河滩地、水库坑塘、盐田养殖场、沟渠湿地、水田、旱地农田、建设用地、盐碱撂荒地等 12 种类型,其中,滨海湿地、河流湿地、沼泽湿地、草甸湿地和河滩地属于天然湿地,而水库坑塘、盐田养殖塘、沟渠湿地和水田归为人工湿地。基于 2018 年 11 月 3 日获取的 104 个地面调查数据进行解译精度评价,结果表明,各类地物的解译精度均在 90% 以上,总体 Kappa 系数为 0.85,且得到的其它时期的解译结果与历史资料具有较好的一致性,分类结果满足研究需要。

3 结果与分析

3.1 土地覆盖类型面积及其变化

1985–2018 年研究区不同土地覆盖类型的分布状况和面积见图 2 和表 2。根据图 2 和表 2,除滨海湿地外,研究区主要土地覆盖类型为沼泽湿地、草甸湿地、旱地农田及盐碱撂荒地;与 1985 年相比,2018 年研究区滨海湿地、沼泽湿地、草甸湿地的面积明显减少,而盐田养殖塘面积增加比较显著,由 1985 年的 $0.015\ 4 \times 10^4\ \text{hm}^2$ 增加到 2018 年的 $4.655\ 3 \times 10^4\ \text{hm}^2$,且空间分布向海、向内不断扩张(图 2)。另外,在整个研究时间段内,水库坑塘、水田等人工湿地虽然在数量上增加不多,但增加幅度比较大,1985–2018 年水库坑塘和水田分别由 $0.110\ 2 \times 10^4$ 、 $0.272\ 7 \times 10^4\ \text{hm}^2$ 增加到 $1.143\ 5 \times 10^4$ 、 $2.525\ 6 \times 10^4\ \text{hm}^2$,分别增加 937.66%、826.15%。

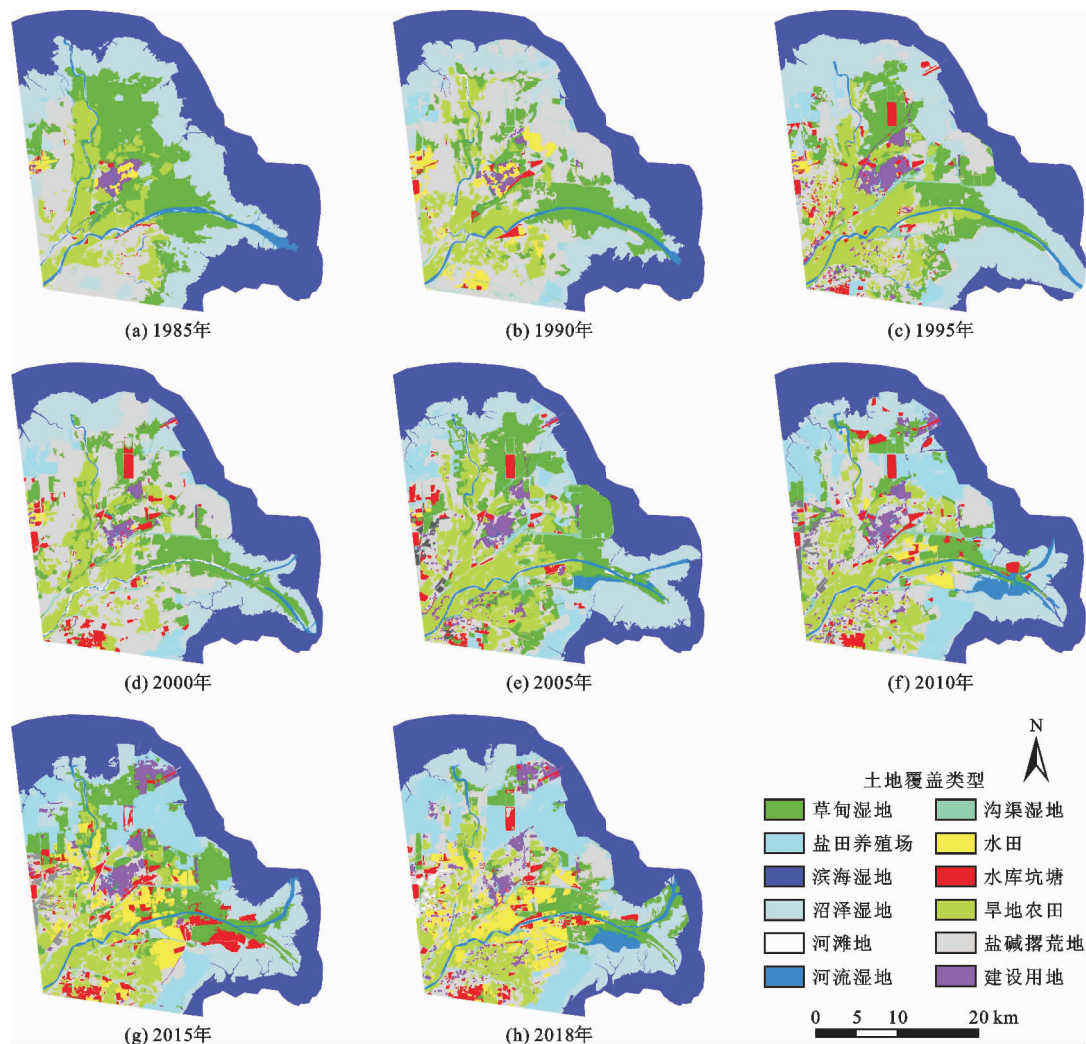


图2 1985 - 2018 年研究区不同土地覆盖类型分布状况

表2 1985 - 2018 年年研究区各土地覆盖类型面积 10^4 hm^2

年份	天然湿地					人工湿地				旱地 农田	建设 用地	盐碱 撂荒地
	滨海	河流	沼泽	草甸	河滩地	水库坑塘	盐田	沟渠	水田			
1985	11.0592	0.8308	8.1341	6.2241	0.0240	0.1102	0.0154	0.0499	0.2727	3.5930	0.3227	4.5372
1990	9.6717	0.5559	4.3098	4.2310	0.0476	0.3234	0.6487	0.2441	1.0878	3.3623	0.2702	10.4208
1995	7.3559	0.6087	9.0006	4.7931	0.0807	0.8730	0.8481	0.4193	0.1299	4.7839	0.8949	5.3852
2000	9.1053	0.3170	5.0302	4.3305	0.1906	0.9826	0.9002	0.2859	0.1016	3.3384	0.8786	9.7124
2005	8.8965	0.7207	6.1287	5.7823	0.0928	0.8726	1.6498	0.4081	0.0355	5.3958	0.8062	4.3845
2010	9.3654	1.0389	4.4869	2.5193	0.0554	1.1023	3.8804	0.5809	0.3958	4.7645	1.0618	5.9216
2015	9.0254	0.5224	4.5424	4.7598	0.0036	1.7928	4.0757	0.3138	1.8838	4.0231	1.0029	3.2275
2018	8.4643	0.9069	4.0397	2.8545	0.0220	1.1435	4.6553	0.4527	2.5256	3.4279	0.9622	5.7186

1985 - 2018 年研究区天然湿地和人工湿地面积变化见图 3。由图 3 可看出,自 1985 年以来,现代黄河三角洲湿地面积变化比较显著,天然湿地面积虽有波动,但总体呈减少趋势,1985 - 2018 年期间,天然湿地共减少 $9.9847 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 平均每年的

减少率为 1.12%,其中沼泽湿地和草甸湿地的变化尤为明显;而人工湿地面积则逐渐增大,由 1985 年的 $0.4482 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加到 2018 年的 $8.7771 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 年平均增加率达到 54.66%,主要是盐田养殖场和水田面积的增加。

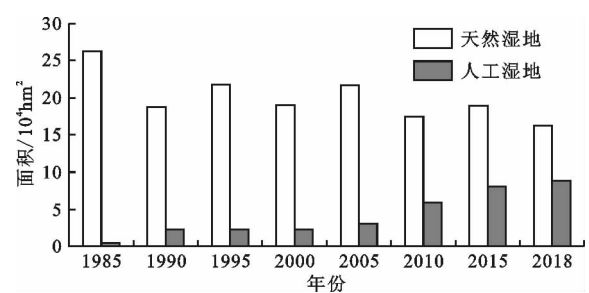


图3 1985-2018年研究区天然湿地和人工湿地面积变化

计算了1985-2018年研究区各土地覆盖类型

动态度,其结果见表3。由表3可见。1985-2018年期间,天然湿地变化速度最快的时段是1985-1990年,动态度为-28.38%,且除河滩地外,其他类型的天然湿地表现出明显的萎缩,然而人工湿地在1985-1990年表现为急速增加,增加幅度为414.07%,尤其是盐田养殖场,增加幅度达到4122.73%。另外,研究区人工湿地在2005-2010年间也表现出快速增长的态势,主要来自于水稻的大面积种植(水田动态度达1014.90%)。

表3 1985-2018年研究区各土地覆盖类型动态度 %

土地覆盖 类型	年 份						
	1985-1990	1990-1995	1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2015	2015-2018
滨海湿地	-12.55	-23.94	23.78	-2.29	5.27	-3.63	-6.22
河流湿地	-33.10	9.50	-47.92	127.32	44.16	-49.72	73.60
沼泽湿地	-47.02	108.84	-44.11	21.84	-26.79	1.24	-11.07
草甸湿地	-32.02	13.29	-9.65	33.52	-56.43	88.94	-40.03
河滩地	98.56	69.33	136.34	-51.32	-40.26	-93.51	510.67
天然湿地	-28.38	16.07	-13.12	13.95	-19.22	7.95	-13.61
水库坑塘	193.31	169.95	12.56	-11.20	26.33	62.63	-36.22
盐田养殖场	4122.73	30.73	6.14	83.28	135.21	5.03	14.22
沟渠湿地	389.08	71.78	-31.82	42.75	42.35	-45.98	44.24
水田	298.94	-88.06	-21.81	-65.05	1014.90	375.95	34.07
人工湿地	414.07	-1.46	0.00	30.65	100.93	35.35	8.81
旱地农田	-6.42	42.28	-30.22	61.63	-11.70	-15.56	-14.80
建设用地	-16.25	231.19	-1.82	-8.24	31.71	-5.55	-4.05
盐碱撂荒地	129.68	-48.32	80.35	-54.86	35.06	-45.50	77.18

3.2 土地覆盖类型动态转移

仅以1985年与2018年两期数据为例分析不同土地覆盖类型间的动态转移特点,其转移概率矩阵如表4所示。

表4显示,2018年与1985年相比所减少的天然湿地主要转变成为旱地农田、盐田养殖场、撂荒地和 水田等,例如,消失的草甸湿地、沟渠湿地和河滩地主要转为盐碱撂荒地,而河流湿地也有14%的面积转化为沼泽湿地。

计算结果表明,与1985年相比,2018年有19.69%的草甸湿地、25.26%的沟渠湿地和34.45%的沼泽湿地等转变为盐田养殖池;有23.8%的草甸湿地、34.3%的沟渠湿地、44.82%的河滩地、52.82%的水田和22.74%的旱地农田转化为盐碱撂荒地;而消失的河流湿地主要转变为草甸湿地(22.23%);也有绝大部分的河滩地(47.20%)和盐碱撂荒地(30.14%)被开垦成旱地农田。

3.3 驱动因素分析

3.3.1 水文因素 黄河来水和泥沙淤积是导致研究区土地覆盖变化的主要自然因素。本文以利津水文站1976-2018年的径流量和输沙量资料进行分析,结果如图4所示。由图4可看出,自1976年以来,利津站径流量和输沙量变化趋势比较一致,均呈整体下降态势,年均减少量分别为 $4.01 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.21 \times 10^8 \text{ t}$,减少程度比较显著,但不同时间段的变化趋势存在差异。受2003年黄河秋汛影响,2003年利津站径流量和输沙量均有明显的增加,因此以2003年为节点进行分析。1976-2002年利津站径流量下降趋势比较明显,年均减少量为 $12.53 \times 10^8 \text{ m}^3$;2004-2017年径流量的年减少率变缓,但仍大于1976-2018年的年减少率,为 $5.98 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。与径流量的变化趋势比较一致,1976-2002年利津站输沙量年减少率高达 $0.32 \times 10^8 \text{ t}$,而2003-2017年输沙量的年减少率有所减缓,为 $0.18 \times 10^8 \text{ t}$ 。

表4 1985-2018年黄河三角洲土地覆盖类型转移概率矩阵

%

土地覆盖类型	滨海湿地	草甸湿地	沟渠湿地	旱地农田	河流湿地	河滩地	建设用地	水田	水库坑塘	盐碱撂荒地	盐田养殖场	沼泽湿地
滨海湿地		3.36	0.12	0.00	1.34	0.00	0.22	0.00	0.01	1.38	2.04	17.76
草甸湿地	0.00		2.38	6.71	0.62	0.02	3.12	12.37	5.71	23.80	19.69	4.30
沟渠湿地	0.00	0.86		6.95	0.00	0.00	1.47	2.37	11.56	34.30	25.26	0.00
旱地农田	0.00	3.65	1.43		1.09	0.12	2.22	23.87	2.24	22.74	3.57	0.00
河流湿地	1.33	22.23	2.21	10.13		1.66	0.26	3.52	3.12	9.81	1.22	14.75
河滩地	0.00	0.14	0.75	47.20	5.52		0.00	1.57	0.00	44.82	0.00	0.00
建设用地	0.00	3.13	0.51	0.15	0.99	0.00		4.17	0.22	0.42	0.00	0.00
水田	0.00	5.65	3.61	10.50	0.03	0.00	16.14		8.50	52.82	0.00	0.00
水库坑塘	0.00	9.84	11.10	16.49	1.11	0.00	1.72	12.16		16.80	0.00	0.08
盐碱撂荒地	0.02	0.96	2.11	30.14	0.47	0.03	4.74	12.86	5.92		5.21	0.31
盐田养殖场	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.30	0.00	0.00	0.00		0.00
沼泽湿地	3.57	9.39	1.15	1.14	5.01	0.01	3.30	3.07	4.28	14.08	34.45	

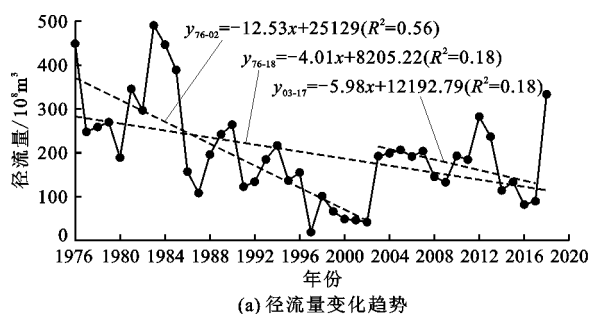
进一步分析研究区各土地覆盖类型与主要水文因素的相关关系,计算出其相关系数见表5。根据表5,除天然湿地与径流量呈正相关关系外,人工湿地、旱地农田、建设用地及盐碱撂荒地均呈负相关关系;与径流量相比,输沙量对黄河三角洲土地覆盖的影响比较显著,输沙量的减少与天然湿地面积的变化呈显著正相关关系,而与建设用地面积变化的负相关关系比较显著。

表5 研究区土地覆盖类型与主要水文因素的相关系数

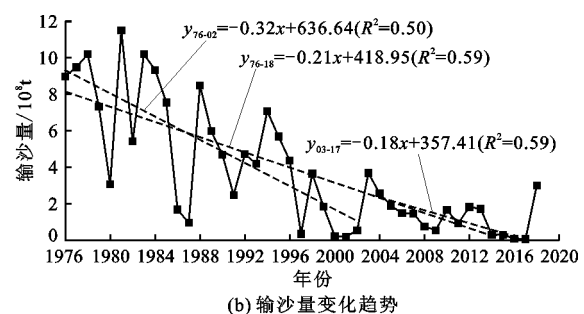
水文因素	天然湿地	人工湿地	旱地农田	建设用地	盐碱撂荒地
径流量	0.306	-0.031	-0.242	-0.555	-0.197
输沙量	0.673*	-0.557	-0.116	-0.693*	-0.042

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关 ($p < 0.05$)。

3.3.2 社会经济因素 图5显示了研究区内的垦利区和河口区1990-2018年的GDP总量和总人口随时间变化趋势。



(a) 径流量变化趋势



(b) 输沙量变化趋势

图4 1976-2018年利津水文站径流量和输沙量随时间变化趋势

由图5中可以看出,1990-2018年间,研究区内人口一直呈逐渐增加的态势,年增加量为 0.47×10^4 人,增加趋势不明显。而GDP的变化比较显著,且有明显的分阶段时间特征,1990-2000年间,研究区GDP增速比较缓慢,年增加量仅为 2.14×10^8 元,2001-2005年,研究区GDP开始呈现较大幅度的增加,年增长量上升到 15.7×10^8 元,从2006年起,研究区域内的GDP进入高速增长阶段,年增加量高达 62.25×10^8 元。

分析研究区各土地覆盖类型与主要经济因素GDP及人口的相关关系,计算出其相关系数见表6。从总体上看,GDP与人口随时间变化趋势与人工湿地、建设用地的变化趋势比较一致,呈正相关关系,且人工湿地面积的增加与GDP、人口这两个社会经济主要因子的增长呈极显著正相关关系;而天然湿地、旱地农田及盐碱撂荒地随GDP和人口的增加而减少,且天然湿地受社会经济因素的影响较为明显,呈显著负相关关系。

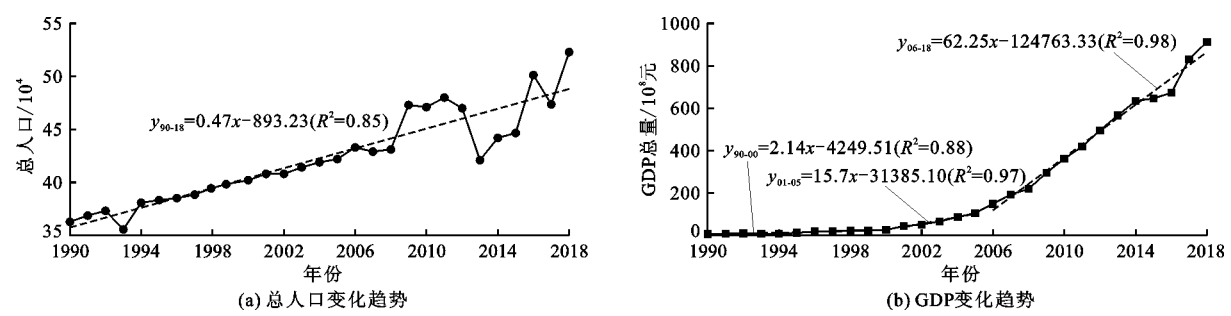


图 5 1990 – 2018 年研究区 GDP 总量和总人口随时间变化趋势

表 6 研究区土地覆盖类型与主要经济因素的相关系数

经济因素	天然湿地	人工湿地	旱地农田	建设用地	盐碱撂荒地
GDP	-0.701 *	0.983 **	-0.234	0.510	-0.509
人口	-0.686 *	0.884 **	-0.029	0.665	-0.492

注: * * 表示在 0.01 水平上显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关。

4 结 论

基于不同土地覆盖类型在 Landsat 影像上的时间序列特征,结合面向对象分割算法,提取了1985 – 2018 年 8 个时期的现代黄河三角洲 LUCC 数据,在此基础上,对该时段现代黄河三角洲 LUCC 的时间动态进行分析,并对研究区土地利用(土地覆盖)变化的水文因素和社会经济因素进行探讨。

(1)通过分析发现,1985 – 2018 年现代黄河三角洲土地利用(土地覆盖)变化比较显著,总体表现为天然湿地逐渐减少,而人工湿地面积在波动中逐渐增加,两者变化的主要原因是天然湿地中的沼泽湿地和草甸湿地被开发为盐田养殖场及水田,且空间分布上向海、向内不断扩张。

(2)探究现代黄河三角洲土地利用(土地覆盖)变化的主要水文因素发现,输沙量是影响现代黄河三角洲土地利用(土地覆盖)变化的主要因素。1976 年以来,虽然在不同时间段内研究区输沙量变化率存在差异,但总体呈减少趋势。输沙量的减少一方面使得研究区新生天然湿地增速降低,另一方面也使得研究区成陆面积相对稳定,促进了建设用地的增加,而且,径流量的减少导致河道内及沿河两岸的泥沙沉积,使得黄河随着水床位置不断提高,造成研究区地下水位降低,土壤含水量降低,自然湿地逐渐向旱地演化。

(3)从社会经济因素方面看,研究时间段内,研究区人口和 GDP 均有比较明显的增加,尤其是 GDP 在 2005 年之后有较明显的增幅,增长率高达 62. 25

× 10⁸ 元/a。经济指标的增加对研究区土地利用(土地覆盖)变化影响比较显著,其中,人工湿地面积的增加与人口和 GDP 增长的正相关关系比较显著,而天然湿地面积的减少则与两类指标的负相关关系比较显著。

参考文献:

[1] JIANG Chao, PAN Shunqi, CHEN Shenliang. Recent morphological changes of the Yellow River (Huanghe) submerged delta: Causes and environmental implications[J]. Geomorphology, 2017,293:93 – 107.

[2] FOLEY J A, DEFRIES R, ASNER G P, et al. Global consequences of land use[J]. Science, 2005,309(5734):570 – 574.

[3] 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.

[4] 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(4):1 – 8.

[5] 陈浩. 黄河三角洲核心区域城市化与生态环境耦合与代谢研究[D]. 济南:山东大学, 2019.

[6] 李云龙,韩美,孔祥伦,等. 近 30 年来黄河三角洲耕地轨迹转化及驱动力研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019,29(9):136 – 143.

[7] 陈凯,肖能文,王备新,等. 黄河三角洲石油生产对东营湿地底栖动物群落结构和水质生物评价的影响[J]. 生态学报,2012,32(6):1970 – 1978.

[8] 侯学会,李新华,隋学艳,等. 近 30 年黄河三角洲生态环境遥感评价[J]. 山东农业科学, 2018,50(2):7 – 12.

[9] NIU Beibei, ZHANG Zixuan, YU Xinyang, et al. Regime shift of the hydroclimate – vegetation system in the Yellow River Delta of China from 1982 through 2015[J]. Environmental Research Letters, 2020,15(2):024017.

[10] JIANG Dejuan, FU Xinfeng, WANG Kun. Vegetation dynamics and their response to fresh water inflow and climate variables in the Yellow River Delta, China[J]. Quaternary International, 2013,304:75 – 84.

- [11] KONG Dongxian, MIAO Chiyuan, BORTHWICK A G L, et al. Evolution of the Yellow River Delta and its relationship with runoff and sediment load from 1983 to 2011[J]. Journal of Hydrology, 2015, 520: 157–167.
- [12] HUA Yanyan, CUI Baoshan, HE Wenjie, et al. Identifying potential restoration areas of freshwater wetlands in a river delta[J]. Ecological Indicators, 2016, 71: 438–448.
- [13] CONG Pifu, CHEN Kexin, QU Limei, 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.
- [14] LIU Qingsheng, SONG Hongwei, LIU Gaochuan, et al. Evaluating the potential of multi-seasonal CBERS-04 imagery for mapping the quasi-circular vegetation patches in the Yellow River Delta using random forest[J]. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1216.
- [15] 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.
- [16] 王红, 宫鹏, 刘高焕. 黄河三角洲土地利用/土地覆盖变化研究现状与展望[J]. 自然资源学报, 2004, 19(1): 110–118.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 周文佐. 近10a黄河三角洲LUCC及其驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 341–345.
- [20] 张成扬, 赵智杰. 近10年黄河三角洲土地利用/覆盖时空变化特征与驱动因素定量分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(1): 151–158.
- [21] 陈文娇, 翁永玲, 路云阁. 基于多级决策树分类的土地利用与覆盖信息提取[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(9): 63–68+73.
- [22] 李静. 基于遥感和GIS的黄河三角洲土地利用/覆被变化及其驱动力研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2004.
- [23] 汪小钦, 王钦敏, 刘高焕, 等. 黄河三角洲土地利用/覆盖格局与演化分析[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 158–161.

(上接第232页)

- [7] YU Xingyang, HE Xingyuan, ZHENG Haifeng, et al. Spatial and temporal analysis of drought risk during the crop-growing season over northeast China[J]. Natural Hazards, 2014, 71: 275–289.
- [8] 林慧, 王景才, 黄金柏, 等. 基于SPI和SPEI的淮河中上游流域气象干旱时空分布特征对比研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 59–67.
- [9] 韩志慧, 刘小刚, 郝琨, 等. 基于SPI指数的内蒙古地区干旱演变特征及趋势预测[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(5): 430–439.
- [10] 张煦庭, 潘学标, 徐琳, 等. 基于降水蒸发指数的1960–2015年内蒙古干旱时空特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 190–199.
- [11] 周扬, 李宁, 吉中会, 等. 基于SPI指数的1981–2010年内蒙古地区干旱时空分布特征[J]. 自然资源学报, 2013, 28(10): 1694–1706.
- [12] 李玮, 段利民, 刘廷玺, 等. 1961–2015年内蒙古高原内陆河东部流域极端降水时空变化特征分析[J]. 资源科学, 2017, 39(11): 2153–2165.
- [13] 张强, 高歌. 我国近50年旱涝灾害时空变化及监测预警服务[J]. 科技导报, 2004(7): 21–24.
- [14] 任余龙, 石彦军, 王劲松, 等. 1961–2009年西北地区基于SPI指数的干旱时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 938–948.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级: GB/T 20481–2017[S]. 北京: 中国质检出版社, 2017.
- [16] 熊光洁, 张博凯, 李崇银, 等. 基于SPEI的中国西南地区1961–2012年干旱变化特征分析[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(3): 192–198.
- [17] CHEN Jun, WANG Yuhui. Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956–2009[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 6925–6935.
- [18] 程龙, 刘海文, 周天军, 等. 近30余年来盛夏东亚东南季风和西南季风频率的年代际变化及其与青藏高原积雪的关系[J]. 大气科学, 2013, 37(6): 1326–1336.
- [19] 马梅, 张圣微, 魏宝成. 锡林郭勒草原近30年草地退化的变化特征及其驱动因素分析[J]. 中国草地学报, 2017, 39(4): 86–93.
- [20] 李晓丽, 张成君, 杨奇丽, 等. 定西鲁家沟全新世以来的气候变迁及人地关系演化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 88–93.