黄河三角洲高效生态经济区土地利用变化及其与生境质量的相关性

贾艳艳[1], 王少杰[2], 刘福胜[2], 于东明[1]

(1. 山东农业大学 林学院, 山东 泰安 271018; 2. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

摘 要: [目的] 对黄河三角洲高效生态经济区(以下简称"黄三角经济区")的生境质量开展研究,揭示人类活动对该区域生态环境的影响,为该区生态保护与发展提供一定参考。[方法] 基于 2000,2010 和 2018 年土地利用数据,采用 InVEST 模型、土地利用程度指数和双变量空间自相关模型等方法,分析黄三角经济区生境质量演变特征及其与土地利用变化的相关性。[结果] ①耕地和湿地为主要用地类型,建设用地和湿地不断增加,以耕地、草地、未利用地向建设用地和湿地转换为主要变化方向; ②黄三角经济区生境质量整体上处于中等以上水平,中等、较高和高生境质量的面积达 82%以上,并且生境质量趋于提升,但呈现较低、中等、较高减少,而高、低生境质量持续增加的"中段缩减,两端增长"发展特征; ③黄三角经济区生境质量呈显著空间异质性,以湿地为主的滨海及黄河沿岸区域生境质量较高,而建设用地和耕地分布区生境质量较低; ④土地利用程度与生境质量呈显著负相关性,且相关性不断增强。[结论] 在黄三角经济区高等级生境质量区应加强连通性保护,在生境退化严重的建成区应加强绿色空间建设以改善生境质量。

关键词: 土地利用程度; 生境质量; InVEST 模型; 双变量空间自相关; 黄河三角洲高效生态经济区

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2020)06-0213-08 **中图分类号**: X37, X826

文献参数: 贾艳艳, 王少杰, 刘福胜, 等. 黄河三角洲高效生态经济区土地利用变化及其与生境质量的相关性[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 213-220. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2020. 06. 031; Jia Yanyan, Wang Shaojie, Liu Fusheng, et al. Land use change and its correlation with habitat quality in high efficiency eco-economic zone of Yellow River delta [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 213-220.

Land Use Change and Its Correlation with Habitat Quality in High Efficiency Eco-economic Zone of Yellow River Delta

Jia Yanyan[1], Wang Shaojie[2], Liu Fusheng[2], Yu Dongming[1]

(1. *Forestry College, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong* 271018, *China*;
2. *College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong* 271018, *China*)

Abstract: [Objective] The habitat quality of the high-efficiency eco-economic zone in Yellow River delta (YRD) was studied in order to reveal the impact of human activities on the ecological environment of the region and provide references for the ecological protection and development of the YRD. [Methods] Based on the land use data of the YRD in 2000, 2010 and 2018, the InVEST model, land use degree index and bivariate space autocorrelation model were used to analyze the spatial-temporal evolution characteristics of habitat quality and its correlation with land use change. [Results] ① Cultivated land and wetland were the main land use types of YRD. Construction land and wetland increased continuously. The main change direction was from cultivated land, grassland and unused land to wetland and construction land. ② The habitat quality of the YRD was above medium level on the whole. Medium, medium-high and high grades areas accounted for more than 82%, and the habitat quality kept improving. However, the habitat quality showed a "mid-course reduction and two-end growth" trend, in which the habitat quality of medium-low, medium and medium-high decreased while the habitat quality of high and low increased continuously. ③ The habitat quality of the YRD

收稿日期: 2020-08-10 **修回日期**: 2020-09-17

资助项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项课题"韧皮纤维作物在土壤可持续修复和工业用生物原料生产中的研究与应用"(2017YFE0195300)

第一作者: 贾艳艳(1986—),女(汉族),河北省邯郸市人,博士,副教授,主要从事风景园林、绿色空间生态系统服务和景观生态研究。Email: jiayanyan1011@163. com。

showed a significant spatial heterogeneity. The habitat quality of coastal and along the Yellow River areas dominated by wetland was higher, while that of construction land and cultivated land distribution area was lower. ④ There was a significant negative correlation between land use degree and habitat quality, and the correlation was increasing. [Conclusion] The connectivity protection should be strengthened for the high-grade habitat in YRD, and green space construction shuold be strengthened for the built-up areas with serious habitat degradation to improve the habitat quality.

Keywords: land use degree; habitat quality; InVEST model; bivariate space autocorrelation; high-efficiency eco-economic zone of the Yellow River delta

生境质量,又称栖息地质量,是指在一定的时空范围内生态系统提供适宜个体和种群持续生存与繁衍的能力,是一种重要的生态系统服务,稳定的生境质量是维持生态系统生物多样性的重要基础[1-2]。随着城镇化发展,大规模的人类开发建设活动使土地利用方式、强度、格局等发生了深刻变化,导致生境质量退化,进而影响生物多样性[3]。因此,开展生境质量评估对生物多样性保护、生态环境保护具有重要意义。InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型由斯坦福大学、世界自然基金会以及大自然保护协会联合开发[4],全称为生态系统服务和权衡的综合评估模型,涵盖淡水、海洋与陆地三大生态系统,模型中的生境质量模块被国内外学者广泛用于评估生境质量。如,国外学者利用InVEST模型评估了非洲西部地区的生境质量[5]、印度尼西亚 Sumatra 地区的老虎栖息地生境质量[6]、澳大利亚维多利亚州中北部生产景观中的生物多样性等[7]。目前,基于土地利用变化的生境质量评估以及揭示土地利用变化对生境质量影响是研究热点之一。包玉斌等[2]利用 InVEST 模型并结合斑块数、边缘密度等表征生境破碎化的景观指标评估了陕西省黄河湿地自然保护区生境质量以及土地利用变化对生境的影响;王耕等[8]采用 InVEST 模型和表征人类干扰强度的 3 个景观指标,揭示了老铁山自然保护区人类干扰强度与生境质量的时空变化及相关性;王惠等[9]利用 InVEST 模型和地理加权回归模型分析了张家口市耕地、林地、草地、建设用地变化对生境质量的影响;钟莉娜等[1]利用 InVEST 模型分析了土地整治前后用地变化对生境质量时空变化的影响;薛晓玉等[10]利用 InVEST 模型研究了祁连山地区土地利用变化对生境质量的影响。黄河三角洲地区是中国三大河口三角洲之一,土地后备资源优势突出、自然资源丰富,生态区位极其重要,对维持黄河流域生态环境稳定具有重要意义,同时在环渤海地区发展中具有重要战略地位[11-12]。2009 年国务院通过了《黄河三角洲高效生态经济区发展规划》,黄河三角洲高效生态经济区(下文简称"黄三角经济区")的开发建设上升为国家战略,进入快速发展阶段。然而,该区域是中国典型的生态环境脆弱区,不合理的开发极易破坏生态环境[11-12]。因此,开展土地利用变化及其与生境质量相关性研究,对黄三角可持续发展具有一定实践价值。目前,有学者采用 InVEST 模型对黄三角相关地区生境质量开展研究:周方文等[13]评估了黄河三角洲滨海湿地生境质量;Li 等[14]分析了 2000—2015 年东营市滨鸟栖息地生境质量变化;张文静等[15]研究了山东半岛沿海地区土地利用变化对生境质量的影响。然而,总体上针对黄三角经济区生境质量评估的研究较少。基于此,本文以 2000,2010 和 2018 年的土地利用数据为基础,采用 InVEST 模型、土地利用程度指数和双变量空间自相关模型等方法,揭示 21 世纪以来黄三角生境质量的时空演变特征以及土地利用程度与生境质量的关联特征,以期为黄三角土地利用规划和生态环境保护提供一定参考。

1 研究区概况

黄三角经济区(116°55′—120°19′E,36°25′—38°14′N)位于山东省北部地区,渤海湾南岸和莱州湾西岸,是以黄河历史冲积平原和鲁北沿海地区为基础,向周边延伸扩展形成的经济区域,2009 年上升为国家战略[12]。区域范围涉及东营、滨州两市以及潍坊的寿光市、寒亭区、昌邑市,德州的乐陵市、庆云县,淄博的高青县和烟台的莱州市,共 19 个县市区,本研究区面积为 25 473.47 km^2。2018 年,研究区年末总人口 1 041.72万人,地区生产总值 9 850.18 亿元。属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 14.6 ℃,年均降水量约 620 mm,集中于夏季。研究区总体地势低平,南高北低,沿黄河由西南向东北倾斜[16]。研究区内湿地资源优势显著,黄河、马颊河、小清河等近 20 条河流水系纵横境内,是中国暖温带上最完整、最广阔、最年轻的河口湿地生态系统,形成了数量众多的国家级自然保护地,包括黄三角经济区和滨州贝壳堤岛与湿地 2 处国家级自然保护区、黄河口和鹤伴山 2 处国家级森林公园、山东黄河岛和滨州秦皇河等 9 处国家级湿地公园以及滨州市中海水利风景区、东营清

风湖水利风景区等 24 处国家级水利风景区。据湿地中国(http://www.shidi.org/),黄河三角洲自然保护区共有植物 400 余种、野生动物 1 627 种,其中有丹顶鹤(Grus japonensis)、东方白鹳(Ciconia boyciana)等国家一级保护鸟类 12 种和大天鹅(Cygnus cygnus)、灰鹤(Grus grus)等国家二级保护鸟类 51 种。黄三角经济区处在多种生态系统交错带,拥有河海交汇、滨海滩涂景观、油气矿产等资源,独具特色,被誉为中国"最具开发潜力的三角洲",也是特殊的生态功能区和典型的生态敏感区[12,16]。

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源

基础数据为 2000,2010 和 2018 年黄三角经济区地区的土地利用/覆被栅格数据,空间分辨率为 30 m,DEM 数据空间分辨率为 30 m,均来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)。根据《土地利用现状分类(GB/T21010-2017)》和研究目的将研究区用地类型分为耕地(水田、旱地)、林地(有林地、灌木林、疏林地、其他林地)、草地(高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地)、湿地(河渠、湖泊、水库坑塘、滩涂、滩地、沼泽地)、建设用地(城镇用地、农村居民点、工矿交通用地)和未利用地(沙地、盐碱地、裸土地、裸岩石质地、其他用地)6 个一级类型和 23 个二级类型。社会经济和人口数据来源于 2001—2019 年《山东省统计年鉴》《东营市统计年鉴》《滨州市统计年鉴》《潍坊市统计年鉴》《德州市统计年鉴》《淄博市统计年鉴》和《烟台市统计年鉴》以及各区县政府官网。

2.2　研究方法

2.2.1　基于 InVEST 模型的生境质量评估　InVEST模型中的生境质量模块(Habiat Quality Model)将土地覆被与生物多样性威胁因子相结合,是生境质量量化研究的重要工具[8-9]。本研究采用该模块对黄三角经济区地区 21 世纪以来的生境质量进行分析。生境质量计算公式为:

$$Q_{xj}=H_j\left[1-\left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z+k^z}\right)\right] \tag{1}$$

$$D_{xj}=\sum_{r=1}^{R}\sum_{y=1}^{Y_r}(w_r/\sum_{r=1}^{R}w_r)r_y i_{rxy}\beta_x S_{jr} \tag{2}$$

式中:Q_{xj} 为用地类型图 j 中栅格 x 的生境质量;H_j 为地类 j 的生境适宜度;k 为半饱和常数,一般设置为生境退化程度最大值的 1/2[1];z 为模型默认参数,一般设置为 2.5[17-18];D_{xj} 为生境退化程度;R 为胁迫因子个数;w_r 为胁迫因子 r 的权重;Y_r 为胁迫因子层在用地类型图中的栅格个数;r_y 为用地类型图中每个栅格上胁迫因子的个数;S_{jr} 为 j 类型土地覆被对胁迫因子 r 的敏感性;i_{rxy} 为栅格 y 中的威胁因子 r 对栅格 x 的影响;β_x 设置为 1[1]。参考模型推荐值和相关研究[9,14-15],威胁源及生境类型对各威胁源的敏感度详见表 1—2。

表 1　威胁源的最大影响距离、权重及其衰退类型

威胁源	最大影响距离	权重	空间衰退类型
耕 地	3	0.6	线性
城镇用地	10	1	指数
农村居民点	5	0.7	指数
工矿交通用地	6	0.9	指数
盐碱地	1	0.1	线性

表 2　不同土地利用类型的生境适宜度及对威胁源的敏感度

土地利用类型	生境适宜度	威胁源				
		耕地	城镇用地	农村居民点	工矿交通用地	盐碱地
水 田	0.4	0.30	0.50	0.40	0.50	0.1
旱 地	0.4	0.30	0.50	0.40	0.50	0.2
有林地	1	0.80	0.90	0.80	0.80	0.2
灌木林	0.8	0.40	0.80	0.70	0.70	0.1
疏林地	0.6	0.85	0.90	0.80	0.80	0.1
其他林地	0.4	0.90	0.90	0.80	0.80	0.1
高覆盖度草地	0.7	0.40	0.60	0.50	0.60	0.2
中覆盖度草地	0.5	0.45	0.65	0.55	0.65	0.2
低覆盖度草地	0.3	0.50	0.70	0.60	0.70	0.2
河 渠	0.9	0.65	0.85	0.75	0.80	0.1
湖 泊	1	0.70	0.90	0.80	0.70	0.1
水库坑塘	0.8	0.70	0.90	0.80	0.70	0.1
滩 涂	0.6	0.75	0.95	0.85	0.70	0.1
滩 地	0.6	0.75	0.95	0.85	0.70	0.1
沼泽地	0.9	0.70	0.80	0.75	0.60	0.2
城镇用地	0	0	0	0	0	0
农村居民点	0	0	0	0	0	0
工矿交通用地	0	0	0	0	0	0
沙 地	0	0	0	0	0	0
盐碱地	0.2	0.10	0.30	0.20	0.30	0
裸土地	0	0	0	0	0	0
裸岩石质地	0	0	0	0	0	0
其他用地	0	0	0	0	0	0

2.2.2　土地利用程度指数　土地利用程度在一定程度上体现了人类活动的干扰强度。随着社会经济发展和城镇化建设,人类活动的干扰逐渐改变了土地的原始自然属性,不同的土地利用类型代表不同的人类活动或土地利用程度特征[19-20]。土地利用程度指数的计算公式为:

$$L=\sum_{i=1}^{n}\frac{A_iP_i}{A}\times 100 \quad (3)$$

式中：L 为研究区土地利用程度指数；n 为用地类型数量；A_i 为第 i 类用地类型的面积(km^2)；A 为研究区总面积(km^2)；P_i 为不同类型的土地利用程度参数，表示不同土地利用类型人类改造、管理等活动的强度和属性特征，其取值(表 3)根据参考文献[19-20]。

为了在更小尺度上揭示土地利用程度对生境质量的影响，根据研究区乡镇单元的大小以及计算工作量，在 ArcGIS 中利用网格法对研究区进行 6 km×6 km 的幅度采样，共形成 827 个网格，计算每个网格的单位面积土地利用程度指数。

表 3 不同土地利用类型的土地利用程度参数值(P_i)

耕地	林地	草地	湿地	建设用地	未利用地
0.55	0.11	0.22	0.12	0.94	0.06

2.2.3 双变量空间自相关模型 空间自相关模型能够反映某种因素在空间位置的相关程度，分为全局和局部空间自相关，多采用 Moran's I 和 Local Moran's I 指数描述，双变量空间自相关能够揭示不同要素空间分布的相关性[21-22]。本文依托该模型，利用 GeoDa 软件，采用 Moran 散点图和空间联系的局部指标(LISA)进行空间自相关分析，依据空间分布关系将集聚类型划分为高高聚集(H-H)、高低聚集(H-L)、低高聚集(L-H)和低低聚集(L-L)，探究土地利用程度和生境质量的空间相关特征。具体计算公式详见参考文献[23-24]。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

黄三角经济区各土地利用类型面积及占比表明(表 4)，2000—2018 年，耕地始终为优势用地类型，3 个时期占比均在 61%以上；其次是湿地。近 18 a 来研究区各地类变化多样，耕地先增后减，整体增加 168.07 km^2；林地先减后增，整体减少 65.06 km^2；草地减少1 506.39 km^2；湿地占比由 13.51%增至 18.77%，增加 1 338.70 km^2，增幅为 38.89%；建设用地增加 1 421.87 km^2，增幅达 52.19%；未利用地先减后增，整体减少 1 357.19 km^2，减幅达 93.04%，变化率最大。

表 4 黄三角经济区各土地利用类型面积及占比

土地利用类型	2000 年		2010 年		2018 年	
	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%
耕 地	15 739.84	61.79	16 374.38	64.28	15 907.91	62.45
林 地	259.51	1.02	189.16	0.74	194.44	0.76
草 地	1 848.63	7.26	351.49	1.38	342.24	1.34
湿 地	3 442.34	13.51	4 675.65	18.36	4 781.05	18.77
建设用地	2 724.42	10.69	3 788.41	14.87	4 146.29	16.28
未利用地	1 458.73	5.73	94.38	0.37	101.54	0.40

为充分了解各用地类型的结构变化，构建土地利用转移矩阵(表 5)，分析可知，2000—2010 年，耕地主要流向建设用地和湿地，由于城镇化建设有 1 370.40 km^2 的耕地转为建设用地，占耕地转出量的 82.30%，主要分布在东营区、邹平市、滨城区、广饶县、博兴县、寿光市；有 256.85 km^2 耕地转为湿地。林地减少 70.34 km^2，主要流向耕地和建设用地。草地主要流向耕地(697.54 km^2)、湿地(676.90 km^2)和建设用地(151.68 km^2)。有 250.96 km^2 的湿地转为耕地，集中在河口区；有 153.71 km^2 的湿地转为建设用地，集中在寒亭区西北部，原因在于寒亭经济技术开发区自 2000 年被确定为山东省“8321”工程中的 8 个省级重点开发区之一后进入大规模建设阶段。有 668.17 km^2，150.00 km^2 的建设用地分别转为耕地和湿地，均集中分布在东营市河口区，这与工矿废弃地复垦、村庄归并及湿地保护措施紧密相关。未利用地主要流向耕地、湿地和建设用地，42.13%的未利用地转为耕地，主要分布在沾化区、垦利区、河口区、无棣县的中部区域；39.50%的未利用地转为湿地，主要集中在河口区、沾化区、无棣县北部的滨海区域；13.67%的未利用地转为建设用地，集中分布在河口区东北部滨海区域(因为该区域在 2006 年被批准设立东营港经济开发区，其用地均为荒碱地)和东营区，2000—2010 年东营区主城区及经济技术开发区急剧扩张，大量未利用地被占用，这与《东营市土地利用总体规划(1996—2010 年)》中土地利用的基本方针相一致。

相较上一时段，2010—2018 年各用地类型的转出量均显著减少。246.01 和 221.15 km^2 的耕地分别流向湿地、建设用地，其中耕地转为湿地集中在河

口区中部和昌邑市西北部,零散分布在垦利区、无棣县、博兴县和邹平市。林地和草地转移不明显。湿地主要流向建设用地,达 212.13 km^2,占建设用地增加量的 47.67%,主要分布在河口区、东营区、寿光市、寒亭区、昌邑市和莱州市,表明建设用地对湿地生态空间的侵占依然严峻。同时,有 83.40 km^2 的建设用地转为湿地,集中在河口区东北部区域,这与黄河三角洲自然保护区的管理紧密相关。

表 5　黄三角经济区土地利用转移矩阵　　km^2

年 份	土地利用类型	耕地	林地	草地	湿地	建设用地	未利用地	转出面积
2000—2010	耕 地	14 074.75	7.45	22.85	256.85	1 370.40	7.54	1 665.09
	林地	68.46	169.02	1.98	4.76	14.43	0.85	90.48
	草 地	697.54	11.06	278.95	676.90	151.68	32.50	1 569.68
	湿 地	250.96	0.55	20.79	3 010.91	153.71	5.43	431.44
	建设用地	668.17	0.73	5.41	150.00	1 898.76	1.35	825.65
	未利用地	614.50	0.35	21.51	576.23	199.44	46.71	1 412.02
2010—2018	耕 地	15 881.91	13.50	10.64	246.01	221.15	1.18	492.47
	林 地	0.01	180.77	0.01	8.10	0.27	0	8.39
	草 地	0.56	0.03	325.05	18.50	7.35	0	26.44
	湿 地	22.00	0.09	2.38	4 413.53	212.13	25.52	262.11
	建设用地	3.42	0.06	0.26	83.40	3 701.27	0	87.14
	未利用地	0.01	0	3.90	11.51	4.11	74.85	19.53

3.2　生境质量时空变化分析

生境质量指数是 0～1 的连续变量,越接近 1,生境质量越好,表明生物多样性维持越好[9-10]。参考已有成果[25],结合研究区实际情况,将生境质量划分为低[0,0.1]、较低(0.1,0.3]、中等(0.3,0.5]、较高(0.5,0.7]和高(0.7,1]5 个等级,各等级生境质量的面积及占比详见表 6,其空间分布如附图 11 所示。

表 6　黄三角经济区不同等级生境质量面积、占比及生境质量平均值

生境质量等级	2000 年		2010 年		2018 年	
	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%
低 等	3 115.32	12.23	3 869.93	15.19	4 158.51	16.32
较低等	1 444.79	5.67	161.37	0.63	176.78	0.69
中 等	16 473.25	64.67	16 524.20	64.87	16 052.40	63.02
较高等	1 562.54	6.13	829.68	3.26	615.42	2.42
高 等	2 877.58	11.30	4 088.29	16.05	4 470.35	17.55
生境质量指数平均值	0.403 5		0.409 6		0.410 4	

3.2.1　生境质量时间上变化　各等级生境质量面积占比(表 6)和转移矩阵(表 7)表明,黄三角经济区生境质量总体上处于中等以上水平,处于中等、较高和高生境的面积达 82%以上,这与研究区耕地面积广阔和河流、湖泊、滩涂等湿地自然生境面积较大紧密相关。2000—2018 年,低生境不断增加,增加 1 043.19 km^2,增幅为 33.49%,其中前 10 a 主要由中等转化而来,占低生境增加量的 74.68%,原因是城镇化扩张大量建设用地侵占耕地;后 8 a 主要由中等、高生境转化而来,分别占低生境增加量的 49.94%和 45.14%,结合上文,这一时段建设用地扩张主要是侵占耕地和湿地,使得生境适宜度较高的用地类型面积减少。较低生境呈波动减少趋势,在前 10 a 急剧减少,减少 1 283.42 km^2,减幅为 88.83%,主要流向中等和高生境。中等生境先增后减,整体减少 420.84 km^2,主要转为低和高生境;前 10 a 有 1 433.72 和 480.72 km^2 的中等生境分别转为低、高生境;后 8 a 有 223.05 和 260.01 km^2 的中等生境分别转为低、高生境。较高生境不断减少,由 2000 年的 6.13%减至 2018 年的 2.42%,其中前 10 a 主要转为高、中生境,这一时期草地主要转为湿地和耕地;后 8 a 主要转为高生境,占转出量的 92.24%。高生境持续增加,占比由 11.30%增为 17.55%(其中前 10 a 增加显著,增幅达 42.07%),结合上文,这一时期生境适宜度最高的湿地持续增加,使生境质量得到改善。2000,2010 和 2018 年黄三角经济区生境质量指数平均值分别为

0.403 5,0.409 6 和 0.410 4(表 6),进一步表明研究区生境质量整体呈提升态势。

但研究区各等级生境质量变化呈现“增—减—减—增”的特征,即生境质量变化表现为较低、中等、较高减少而高、低生境持续增加的“中段缩减、两端增长”发展特征。

表 7 黄三角经济区生境质量转移矩阵 km²

年 份	生境质量等级	低等	较低等	中等	较高等	高等	转出面积
2000—2010	低 等	1 950.24	7.72	705.64	75.55	376.18	1 165.08
	较低等	221.09	105.46	766.57	104.44	247.22	1 339.32
	中 等	1 433.72	24.67	14 473.20	60.93	480.72	2 000.04
	较高等	112.99	19.69	300.64	536.95	592.26	1 025.58
	高 等	151.89	3.82	278.14	51.81	2 391.91	485.67
2010—2018	低 等	3 711.88	1.33	3.44	34.09	119.19	158.05
	较低等	2.88	146.15	0.01	3.91	8.41	15.21
	中 等	223.05	7.64	16 026.85	6.65	260.01	497.35
	较高等	19.08	3.18	0.73	533.14	273.55	296.54
	高 等	201.62	18.47	21.36	37.64	3 809.20	279.09

3.2.2 生境质量空间上变化 2000—2018 年,黄三角经济区生境质量空间分布与土地利用状况基本吻合。空间分布上表现出显著的异质性,呈现以湿地为主的滨海和黄河沿岸带状区域生境质量高、耕地和建设用地分布区生境质量普遍低的总体特征(附图 11)。低生境质量主要集中在各区县的建成区和工矿企业分布区(如垦利区的孤东油田区域生境质量为低等级),其中东营区低生境面积最大,原因在于东营区是东营市的中心区,经济相对发达、人口众多、产业密集,人类活动对生境干扰强度大;前 10 a 各区县的低生境面积显著增加,以东营区、滨城区、广饶县和寿光市尤为突出,结合前文可知前 10 a 上述各区域的建设用地扩张极为显著,社会经济发展对生境质量影响较大,因此,必须采取有效措施减少开发建设对生态环境的破坏。较低生境质量在 2000 年主要集中在河口区北部和沾化区中南部,之后显著减少。较高和高生境质量分布在无棣县、沾化区、河口区、垦利区、东营区、寿光市、寒亭区和昌邑市的滨海区域以及黄河沿岸,原因是该区域河海交汇,河湖、滩涂、沼泽等湿地多样,生物多样性丰富、自然资源多样,生态环境较好。为更直观地反映黄三角经济区生境质量时空变化特征,借助 ArcGIS 中的栅格计算器功能获得 2000—2018 年的变化结果,并采用自然断点法将生境质量变化程度划分为显著下降、中度下降、基本不变、中度提升和显著提升 5 个等级(附图 11)。由附图 11 可知,2000—2018 年黄三角经济区生境质量变化程度呈明显的地域差异性,河口区、沾化区和无棣县的生境质量显著提升,垦利区、寿光市、寒亭区和昌邑市的滨海区域生境质量为中度提升,主要得益于国家和地方政府加大对黄河三角洲国家自然保护区的保护管理力度、湿地生态恢复措施、刁口河流路生态补水工程等使湿地面积大量增加,以及自然保护地的建设,如黄河岛国家湿地公园、寿光滨海国家湿地公园、昌邑滨海国家湿地公园等;但在生境质量提升的区域也存在局部区域生境下降现象,这种变化主要是人类活动的影响,如河口区、垦利区、东营区、寿光区和寒亭区,因此,必须加强高等级生境质量的连通性保护,防止生境破碎化。东营区、滨城区、邹平市、博兴县、广饶县、寿光市、寒亭区的建成区生境退化严重,其中东营市、滨州市 2018 年的 GDP 分别是 2000 年的 8.93和 9.78 倍,2000—2018 年东营市和滨州市常住人口增长率分别为21.14%和10.06%,经济发展、人口增加、城镇扩张使土地利用程度增强,人地矛盾更为激烈,加大了生境威胁度。

3.3 土地利用程度与生境质量相关性分析

为进一步探明土地利用程度对生境质量的影响程度,引入双变量空间自相关模型。借助 ArcGIS 的空间分析工具提取对应网格的平均生境质量指数,采用双变量空间自相关模型分析土地利用程度(单位面积土地利用程度指数)和生境质量的空间关联特征。结果表明(图 1),散点主要分布在第二象限(H-L)和第四象限(L-H),2000,2010 和 2018 年的全局 Moran's *I*指数分别为−0.582 5,−0.731 8 和−0.751 1,说明土地利用程度与生境质量在空间上呈显著的负相关性,且相关性不断增强,即土地利用程度越大,生境质量越低,反之,生境质量越高。LISA 聚类分析表明,研究区土地利用程度与生境质量的集聚形态以低程度—高生境相关和高程度—低生境相关为主,低程度—高生境区主要分布在滨海区域,高程度—低生境区主要分布在各区县的建成区。2000—2018 年,低

程度—高生境集聚分布面积持续增加,占比由14.42%增至17.24%,变化明显区域主要为沾化区和河口区的北部滨海区域,主要原因在于山东省着力推进引供水体系建设和黄河入海流路治理,于2009年启动了刁口河生态补水工程,之后又实施了汛前调水调沙,对黄河三角洲湿地有计划地生态补水和多项湿地生态修复措施,并加大管理力度[26],使退化湿地生境得到了修复,水生植物种类及鸟类数量显著增加,生态效果显著;高程度—低生境集聚分布面积占比由7.35%增至11.02%,变化明显区域主要为东营区、滨城区、博兴县、广饶县、寿光市和邹平市的建成区,主要原因是城镇空间扩张力度大,耕地和湿地转化为建设用地,使得生境威胁源地的面积显著增加,从而导致低等级生境质量面积明显增加。

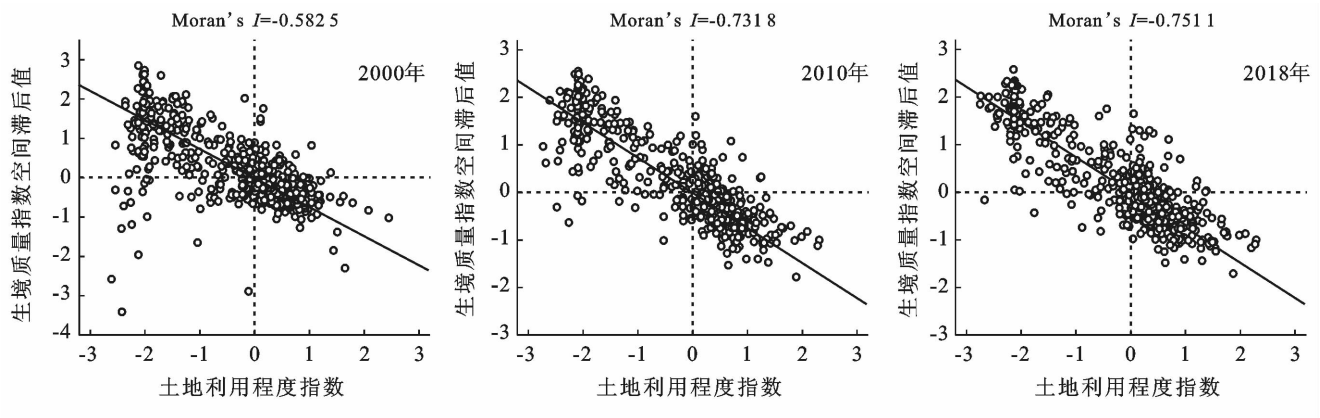


图 1　黄三角经济区生境质量与土地利用程度的 Moran 散点图

4　讨论与结论

4.1　结 论

(1) 黄三角经济区主要用地类型是耕地和湿地。耕地先增加后减少;林地和草地整体呈减少趋势;湿地和建设用地持续增加,增幅分别为38.89%和52.19%;未利用地减少显著,减幅为93.04%。各用地类型间的转换以耕地、草地和未利用地向建设用地及湿地转换为主;相较前10 a,后8 a各用地类型转出量显著减少。

(2) 研究区生境质量总体上处于中等以上水平,中等、较高和高的占比之和达82%以上;生境质量整体趋于提升,但呈现较低、中等、较高减少而高、低生境持续增加的"中段缩减、两端增长"发展特征。

(3) 研究区生境质量具有显著空间异质性,高等级生境质量集中在以湿地景观为主的滨海区域及黄河沿岸,呈带状分布;低等级生境质量集中在建设用地和耕地分布区。

(4) 黄三角经济区土地利用程度与生境质量在空间上呈显著负相关性,且相关性不断增强;LISA聚集类型以低程度—高生境相关和高程度—低生境相关为主,且该两类集聚分布呈增加趋势。

4.2　讨 论

土地利用变化是引起生境质量变化与生境破碎的重要因素[27],黄三角经济区各时期生境质量处于中等的面积占比最高,均在63%以上,这是由于各年份耕地面积占比高于61%,耕地作为一种生境威胁因子,其生境适宜度强于建设用地、盐碱地,而低于湿地、林地、草地,又因耕地多分布于研究区中部平原区域,故中等生境多分布于研究区中部。2000—2018年,黄三角经济区生境质量变化表现为"中段缩减、两端增长"的发展特征;高生境质量集中在滨海和黄河沿岸的湿地生态系统区域,且面积不断增加,与湿地景观面积变化趋势相一致,这主要得益于自然保护地的建设与管理和一系列湿地保护工作,2002年起黄河三角洲国家自然保护区通过修筑围坝、引灌黄河水、增加湿地淡水存量等措施实施恢复湿地工程,并且自2009年黄三角经济区发展上升为国家战略以来,国家和地方政府针对黄三角经济区湿地和生物多样性保护也采取了一系列生态保护政策和恢复措施,如《全国湿地保护工程实施规划(2011—2015年)》《山东省湿地保护办法》《山东黄河三角洲国家级自然保护区详细规划(2014—2020年)》和刁口河流路生态调水工程等均对湿地保护起到积极作用;低生境质量集中在建成区,根据土地利用分析结果可知,2000年以来黄三角经济区各区县建设用地大量增加,其中以东营市中心区——东营区建成区扩张尤为显著,而其生境质量退化也极为明显,表明建设用地的增加是研究区生境质量最大的威胁。

研究区各等级生境质量在2010—2018年的转出量均显著少于2000—2010年的转出量,这种变化特征与土地利用类型的转出规律相一致。此外,本研究

采用网格法揭示了单位面积土地利用程度指数与生境质量在空间上呈显著负相关性，并且相关性不断增强，进一步表明土地利用强度是影响生境质量的重要因素，整体上土地利用强度越大生境质量相对越差，原因是土地利用强度加大会使威胁源地的面积扩张，导致周边区域生境退化。因此，针对高等级生境质量区要保护林草、湿地等生态源地，加强监管，严守生态保护红线，防止建设用地侵占生态空间；针对低等级生境质量区要强化城镇集约化发展，防止建设用地无序蔓延扩张，同时必须加强城市公园、湿地公园、街头绿地、城市绿道等城镇绿色空间的建设以改善生境质量。

在黄河流域大保护背景下，开展黄三角经济区土地利用变化对生境质量影响研究对生物多样性和生态环境保护起到一定支撑作用。黄三角经济区在开发建设过程中，必须坚持“山水林田湖草生命共同体理念”，应依托境内的优势景观资源——湿地，加强湿地生态系统连通性保护，防止生境破碎化。InVEST模型在空间表达、生物量评估等方面具有优势[4-10]，是目前进行生境质量评估应用较广泛的模型，但模型中关于威胁源最大影响距离、生境敏感度等参数的设置以及生境质量等级划分没有统一标准，不利于同一时期不同地区间生境质量的比较。因此，在未来需关注关键参数的确定及其对结果的影响。此外，今后还需进一些揭示不同土地利用类型与生境质量的相关性及其对生境质量影响的空间分布特征。

[参 考 文 献]

[1] 钟莉娜，王军. 基于InVEST模型评估土地整治对生境质量的影响[J]. 农业工程学报，2017，33(1)：250-255.

[2] 包玉斌，刘康，李婷，等. 基于InVEST模型的土地利用变化对生境的影响：以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J]. 干旱区研究，2015，32(3)：622-629.

[3] Newbold T，Hudson L N，Hill S L L，et al. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity [J]. Nature，2015，520(7545)：45-50.

[4] 唐尧，祝炜平，张慧，等. InVEST模型原理及其应用研究进展[J]. 生态科学，2015，34(3)：204-208.

[5] Leh M D K，Matlock M D，Cummings E C，et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa [J]. Agriculture，Ecosystems & Environment，2013，165：6-18.

[6] Bhagabati N K，Ricketts T，Sulistyawan T B S，et al. Ecosystem services reinforce Sumatran tiger conservation in land use plans [J]. Biological Conservation，2014，169：147-156.

[7] Baral H，Keenan R J，Sharma S K，et al. Spatial assessment and mapping of biodiversity and conservation priorities in a heavily modified and fragmented production landscape in North-central Victoria，Australia [J]. Ecological Indicators，2014，36：552-562.

[8] 王耕，常畅，韩冬雪，等. 老铁山自然保护区景观格局与生境质量时空变化[J]. 生态学报，2020，40(6)：1910-1922.

[9] 王惠，许月卿，刘超，等. 基于地理加权回归的生境质量对土地利用变化的响应：以河北省张家口市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版)，2019，55(3)：509-518.

[10] 薛晓玉，王晓云，段含明，等. 基于土地利用变化的祁连山地区生境质量时空演变分析[J]. 水土保持通报，2020，40(2)：278-284.

[11] 张淑敏，张宝雷. 国家战略背景下黄河三角洲地区国土开发适宜性格局[J]. 资源科学，2016，38(5)：837-846.

[12] 翟俊，金点点，陈妍，等. 黄河三角洲高效生态经济区生态变化、问题与对策[J]. 资源科学，2020，42(3)：517-526.

[13] 周方文，马田田，李晓文，等. 黄河三角洲滨海湿地生态系统服务模拟及评估[J]. 湿地科学，2015，13(6)：667-674.

[14] Li Xiaowei，Hou Xiyong，Song Yang，et al. Assessing changes of habitat quality for shorebirds in stopover sites：A case study in Yellow River delta，China [J]. Wetlands，2019，39(1)：67-77.

[15] 张文静，孙小银，单瑞峰. 基于InVEST模型研究山东半岛沿海地区土地利用变化及其对生境质量的影响[J]. 环境生态学报，2019，1(5)：15-23.

[16] 张帅，董会忠，曾文霞. 土地生态系统脆弱性时空演化特征及影响因素：以黄河三角洲高效生态经济区为例[J]. 中国环境科学，2019，39(4)：1696-1704.

[17] Richard S，Rebecca C K，Spencer W，et al. InVEST 3.3.0 User's Guide [M/OL]. 2015. http：//data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-users-guide/html/.

[18] 陈妍，乔飞，江磊. 基于InVEST模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究：以北京为例[J]. 北京大学学报(自然科学版)，2016，52(3)：553-562.

[19] 胡和兵，刘红玉，郝敬锋，等. 城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应[J]. 生态学报，2013，33(8)：2565-2576.

[20] Sun Xiaoyin，Jiang Zhai，Liu Fei，et al. Monitoring spatio-temporal dynamics of habitat quality in Nansihu Lake basin，eastern China，from 1980 to 2015 [J]. Ecological Indicators，2019，102：716-723.

[21] Anselin L. Local indicators of spatial association：LISA [J]. Geographical Analysis，1995，27(2)：93-115.

[22] Wartenberg D. Multivariate spatial correlation：A method for exploratory geographical analysis [J]. Geographical Analysis，1985，17(4)：263-283.

(下转第227页)

用转型的喀斯特山区"三生"空间分布研究[J]. 水土保持通报,2020,40(3):297-304,325.

[4] 李欣,殷如梦,方斌,等. 基于"三生"功能的江苏省国土空间特征及分区调控[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(8):1833-1846.

[5] 韦晨,侯国林. 基于"三生空间"功能评价的中原城市群国土空间特征及优化研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2020,43(03):18-26.

[6] 于婧,陈艳红,唐业喜,等. 基于国土空间适宜性的长江经济带"三生空间"格局优化研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2020,54(4):632-639.

[7] 程婷,赵荣,梁勇. 国土"三生空间"分类及其功能评价[J]. 遥感信息,2018,33(2):114-121.

[8] 吴艳娟,杨艳昭,杨玲,等. 基于"三生空间"的城市国土空间开发建设适宜性评价:以宁波市为例[J]. 资源科学,2016,38(11):2072-2081.

[9] 张小桐,王红,周大迈,等. 小型现代农业园区的功能分区研究[J]. 中国科技论文,2016,11(3):324-328.

[10] Bagdanavičiūtė I, Valiūnas J. GIS-based land suitability analysis integrating multi-criteria evaluation for the allocation of potential pollution sources [J]. Environmental Earth Sciences, 2013,68(6):1797-1812.

[11] 纪学朋,黄贤金,陈逸,等. 基于陆海统筹视角的国土空间开发建设适宜性评价:以辽宁省为例[J]. 自然资源学报,2019,34(3):451-463.

[12] 陶岸君,王兴平. 面向协同规划的县域空间功能分区实践研究:以安徽省郎溪县为例[J]. 城市规划,2016,40(11):101-112.

[13] Emadi M, Baghernejad M, Pakparvar M, et al. An approach for land suitability evaluation using geostatistics, remote sensing, and geographic information system in arid and semiarid ecosystems [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010,164(1-4):501-511.

[14] 王明杰,余斌,何永娇,等. 空间规划视阈下的洱海流域土地利用多功能适宜性研究[J]. 中国农业资源与区划,2020,41(3):220-229.

[15] 唐常春,孙威. 长江流域国土空间开发适宜性综合评价[J]. 地理学报,2012,67(12):1587-1598.

[16] 万将军,邓伟,张少尧,等. 喀斯特山区国土空间类型划分及其变化特征研究[J]. 生态经济,2018,34(10):184-190.

[17] 邓伟,张少尧,张昊,等. 人文自然耦合视角下过渡性地理空间概念、内涵与属性和研究框架[J]. 地理研究,2020,39(4):761-771.

[18] 吕晓君,杜蕴慧,宋鹭,等. 基于"陆海统筹"理念的海岸带环境管理思考[J]. 环境保护,2015,43(22):59-61.

[19] 江曼琦,刘勇. "三生"空间内涵与空间范围的辨析[J]. 城市发展研究,2020,27(4):43-48,61.

[20] 喻忠磊,张文新,梁进社,等. 国土空间开发建设适宜性评价研究进展[J]. 地理科学进展,2015,34(9):1107-1122.

[21] 曾毅,项广鑫,蒋星祥,等. 基于国土空间自然适宜性的3类空间划分方法:以湖南省为例[J]. 地质通报,2020,39(1):138-145.

[22] 喻忠磊,张文新,梁进社,等. 国土空间开发建设适宜性评价研究进展[J]. 地理科学进展,2015,34(9):1107-1122.

[23] 邱炳文,池天河,王钦敏,等. GIS 在土地适宜性评价中的应用与展望[J]. 地理与地理信息科学,2004,20(5):20-23.

[24] 胡恒,徐伟,岳奇,等. 基于"三生"空间的海岸带分区模式探索:以河北省唐山市为例[J]. 地域研究与开发,2017,36(6):29-33.

[25] 丁玉平,孟雪,徐伟,等. 海洋功能区划符合性分析方法及判定矩阵研究[J]. 海洋环境科学,2019,38(2):310-316.

[26] 卫宝泉,索安宁,杨正先,等. 基于海洋功能区划的江苏省海岸线开发承载能力评价[J]. 海洋环境科学,2018,37(4):514-520.

[27] 黄金川,林浩曦,漆潇潇. 面向国土空间优化的"三生"空间研究进展[J]. 地理科学进展,2017,36(3):378-391.

[28] 秦方. 河南新郑市"三生"用地转型及其生态服务价值响应[J]. 人民长江,2020,51(2):58-63.

[29] 宋彦蓉, 张宝元. 基于地区现代化评价的客观赋权法比较[J]. 统计与决策, 2015 (11): 82-86.

(上接第 220 页)

[23] 李俊翰,高明秀. 滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性[J]. 生态学报,2019,39(21):7815-7828.

[24] Jia Yanyan, Tang Xiaolan, Liu Wei. Spatial-temporal evolution and correlation analysis of ecosystem service value and landscape ecological risk in Wuhu City [J]. Sustainability, 2020,12(7):2803.

[25] 王燕,高吉喜,金宇,等. 基于 2005—2015 年土地利用变化和 InVEST 模型的内蒙古巴林右旗农牧交错带生境质量研究[J]. 生态与农村环境学报,2020,36(5):654-662.

[26] 刘航东. 刁口河生态调水对黄河口故道湿地的影响分析[C]. 湖北 恩施:2019(第七届)中国水生态大会,2019.

[27] 张学儒,周杰,李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J]. 地理学报,2020,75(1):160-178.