

地理科学
Scientia Geographica Sinica
ISSN 1000-0690, CN 22-1124/P

《地理科学》网络首发论文

题目：黄河三角洲“三生”用地转型的生态环境效应及其空间分异机制
作者：韩美, 孔祥伦, 李云龙, 魏帆, 孔凡彪, 黄淑萍
收稿日期：2020-10-24
网络首发日期：2021-07-08
引用格式：韩美, 孔祥伦, 李云龙, 魏帆, 孔凡彪, 黄淑萍. 黄河三角洲“三生”用地转型的生态环境效应及其空间分异机制[J/OL]. 地理科学.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1124.P20210707.1723.012.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

黄河三角洲“三生”用地转型的生态环境效应及其空间分异机制

韩美¹, 孔祥伦¹, 李云龙^{1,2}, 魏帆¹, 孔凡彪¹, 黄淑萍²

(1. 山东师范大学地理与环境学院, 山东 济南 250014; 2. 齐鲁师范学院历史与社会发展学院, 山东 济南 250200)

摘要:“三生”用地转型的生态环境效应及其空间分异特征是指导区域国土空间开发与生态环境保护的重要依据。基于 1998 年、2008 年和 2018 年 3 期土地利用遥感译数数据, 构建黄河三角洲“三生”用地分类体系, 通过土地利用转型图谱、生态环境质量指数、重心转移和地理探测器等方法定量分析研究区“三生”用地转型特征、生态环境效应及其空间分异性的主要影响因子。结果表明: ① 1998—2018 年黄河三角洲“三生”用地转型表现为生产用地占比大幅增加(+13.50%), 生态用地占比大幅减少(-17.19%), 生活用地占比小幅增长(+3.69%)。1998—2008 年, “三生”用地转型以生态用地向生产用地转型为主。2008—2018 年, 无绝对优势转型类型, 转型过程复杂化。② 1998—2018 年, 黄河三角洲生态环境质量整体向好, 指数由 0.390 升至 0.395, 高质量区与高质量区占主体地位。研究区中部及黄河入海口区域生态环境质量不断提升, 东南及东北沿海地区生态环境质量有所降低。③ 植被覆盖度、微地貌类型、土壤类型是研究区生态环境质量空间分异的主导因子。区位因子与社会经济因子对生态环境质量空间分异的贡献率随生态环境质量的提升而降低, 生态保护因子对生态环境质量空间分异的贡献率呈上升趋势。

关键词: 黄河三角洲; 土地利用主导功能; 土地利用转型; 生态环境质量; 空间分异性

中图分类号: F301.2; X24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2021)X-1009-10

生态环境质量指一定时空范围内生态系统承载物种生存的能力^[1], 是反应区域生态系统功能、生物多样性和人类活动的重要指标, 其时空分异对外界干扰有极强的敏感性^[2]。土地利用变化是影响生态环境质量的重要因素, 随着中国工业化与城镇化发展战略转型的深入^[3], 土地利用空间经历了深刻的变化与重构^[4]。准确掌握土地利用转型对生态环境质量演化与空间分异的影响机制, 是生态环境保护的关键问题, 也是国土空间治理与优化的基础。

土地利用转型是指区域土地利用形态在时序上受经济和社会发展转型影响而产生的变化。1995 年, 英国地理学家 Grainger 首次将此概念引

入地理学领域^[5], 之后, 国外许多学者以森林转型为主线对土地利用转型进行大量探索^[6-9], 相继完善了其理论体系。自 21 世纪初龙花楼将土地利用转型方向引入中国以来, 众多学者结合中国社会发展路径在土地利用转型理论^[10]、土地利用形态的显性与隐形转型^[11]、土地利用转型机制与效应^[12]等方面相继开展研究。近年来, 土地利用转型被认为是“土地-社会经济-生态环境”耦合的演化过程^[13], 刘超等^[14]从人本角度界定了土地利用“生产-生活-生态”三大功能的内涵与关系, 将土地利用多功能理论应用于土地利用转型研究。基于土地利用主导功能的“三生”用地转型研究从功能性与系统论的角度将土地利用转型与区域发展

收稿日期: 2020-10-24; **修订日期:** 2020-12-08

基金项目: 山东省社科规划重大委托项目(20AWTJ07)、国家自然科学基金项目(41371517)、山东省社科规划重点项目(18BJJ05)资助。[Foundation: Major Project of Social Science Planning in Shandong (20AWTJ07), National Natural Science Foundation of China (41371517), Key Project of Social Science Planning in Shandong (18BJJ05).]

作者简介: 韩美(1963-), 女, 山东寿光人, 教授, 博导, 主要从事环境变化与可持续发展研究。E-mail:

hanmei568568@126.com **通讯作者:** 孔祥伦。E-mail: 13573125257@163.com

转型相衔接,成为土地利用转型研究的新视角。现阶段“三生”用地转型研究内容主要集中在“三生”用地识别与分类^[15]、评价与优化^[16]、冲突与重构^[17]等方面。“三生”用地转型的生态环境效应研究尚处初探阶段,研究单元以行政区^[18,19]为主,对自然地理单元研究较少,尤其是土地进退频繁的河口三角洲地区;以专家赋值为基础的生态环境质量指数法在“三生”用地转型的生态环境效应研究中得到广泛应用,但不同地类的生态环境质量赋值标准不一,有待改进;已有研究多从时间序列上分析“三生”用地转型对生态环境质量指数的影响,对生态环境质量空间分异研究不足,影响因素指标的选取缺乏综合性和系统性。

黄河三角洲具有丰富的土地后备资源,自20世纪50、60年代大规模农垦和油气开采以来,形成了以生产用地为主导的土地利用结构^[20]。近20a,研究区生产、生活用地面积持续增加,生态用地面积不断减少,区域生态环境受到巨大影响。2019年9月,黄河流域生态保护与高质量发展上升为国家重大战略,黄河三角洲进入了“大保护、大治理和高质量发展”的新时期。基于此,本文以土地剧烈变化的黄河三角洲为案例区,借助遥感手段定量分析1998—2018年研究区“三生”用地转型特征,在改进生态环境质量赋值标准的基础上分析生态环境质量变化趋势,从区位条件、自然环境、

社会经济和生态保护4个维度综合选取14项因子,解析生态环境质量空间分异的形成机制,以期为黄河三角洲国土空间优化、生态环境保护、经济高质量发展提供理论支撑。

1 研究区域、数据来源及研究方法

1.1 研究区域

黄河三角洲地处山东省北部、渤海莱州湾西岸。本文研究范围以宁海为顶点,西起套儿河口,南抵支脉河口,行政区域主要包括东营市的东营区、河口区、垦利区和利津县,总面积约为6445.00 km²(图1)。该区土地、生物、油气等资源丰富,开发强度大。区内分布有自然保护区、湿地公园等各类自然保护地19个,生态环境敏感,具有极高的生态保护价值。

1.2 数据来源与处理

本文使用的主要数据包括遥感影像、植被净初级生产力(NPP)、DEM、土壤类型、微地貌、MODIS、基础地理信息和社会经济数据,辅助数据包括黄河三角洲1:10万地形图、Google Earth高分辨率影像和野外考察数据等。遥感影像数据来自美国地质调查局网站(<https://glovis.usgs.gov>),选取1998年、2008年和2018年3期覆盖研究区的各1景Landsat TM/OLI影像作为土地利用分类数据源,时相为7~10月,空间分辨率为30 m,云

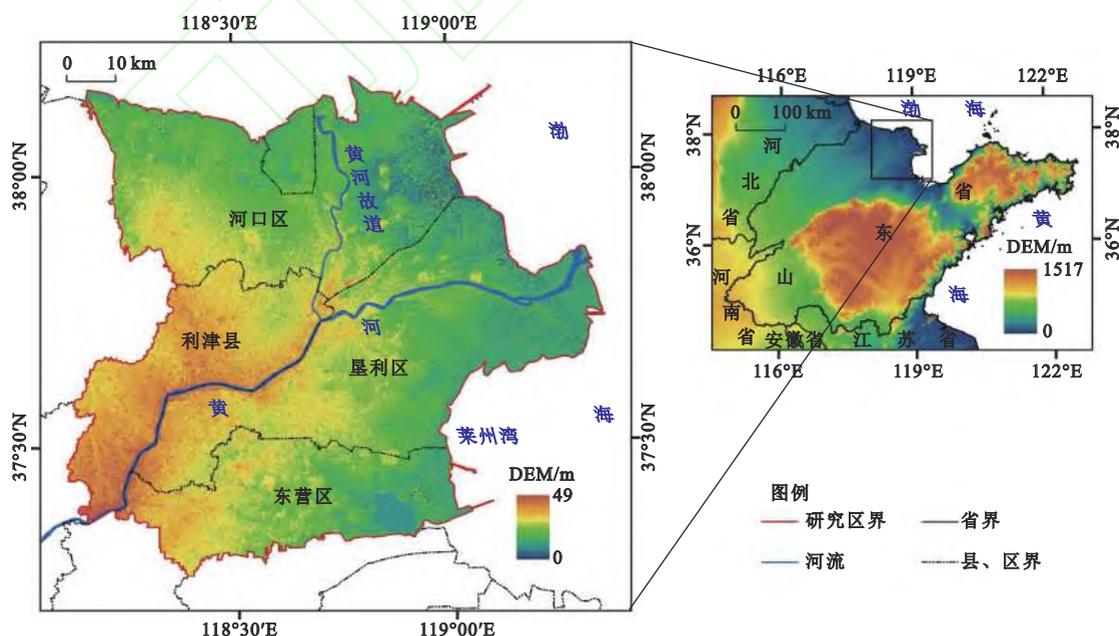


图1 2018年黄河三角洲位置与范围

Fig.1 Location and scope of the Yellow River Delta in 2018

量均小于 0.2; NPP 数据来自全球变化科学研究数据出版系统(<http://www.geodoi.ac.cn>); DEM 数据来自地理空间云平台(<http://www.gscloud.cn>); 土壤数据来自联合国粮农组织土壤门户网站(<http://www.fao.org/soils-portal>); MODIS 数据来自美国国家航空航天局(<https://modis.gsfc.nasa.gov>); 基础地理信息数据来自国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn>); 社会经济数据来自 1998—2018 年《东营统计年鉴》^[21]。

遥感影像预处理包括辐射校正、几何校正、大气校正、裁剪等过程。根据土地利用现状分类(GB/T 21010-2017)和第三次全国国土调查分类体系将研究区分为 6 个一级地类(耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地)和 20 个二级地类。采用瞬时水边线法和潮位校正模型提取海岸线^[22], 确定 3 个时期研究区边界, 然后根据不同地类的色调、纹理、形状等确定解译标志^[23]。结合面向对象法与目视解译获取两级地类, 经野外考察和高分辨率影像验证, 解译精度在 91% 以上。

参照已有划分标准^[18,20]结合研究区实际情况, 基于“三生”用地主导功能视角, 通过归并土地利用分类体系中的二级地类, 构建“三生”用地分类体系(表 1)。为建立“三生”用地转型和生态环境质量的数量关系, 本文借鉴李晓文^[24]等的研究成果, 制定符合本地特点的生态环境质量背景值。为使各地类生态环境质量赋值符合本地情况, 研究采用植被净初级生产力(NPP)对赋值进行调整,

NPP 越高, 生态环境质量赋值越大。据陈鹏飞生产的 NPP 数据^[25]计算, 主要地类的 NPP 排序为: 有林地>灌木林地>水田>沼泽草地>旱地>其他林地>其他草地>盐田养殖池。有林地 NPP 最大, 对其赋值为 0.950, 以有林地为基准, 对各地类赋值进行调整。利用面积加权法求得各“三生”用地类型的生态环境质量指数 EV(表 1)。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用图谱分析

土地利用图谱可以定量表达土地利用变化时空过程与差异^[26]。本文根据遥感影像特征设置图谱分析单元为 30 m×30 m, 时序为 1998—2008 年、2008—2018 年。原理及公式见文献 [26]。

1.3.2 生态单元环境质量指数

研究尺度差异对结果产生巨大影响, 为选取合适尺度, 借鉴前人经验^[27], 经反复试验后确定以 440 m×440 m 的正方形网格对研究区进行等距离采样, 得到约 3.2 万个网格单元。综合考虑各生态网格单元内“三生”用地面积比例及生态环境质量指数背景值, 定量表示研究区各生态网格单元的生态环境质量状况, 公式见文献 [19]。使用克里金法对研究区生态环境质量指数进行空间插值, 并将其分为 5 级: 低质量区($EV \leq 0.15$)、较低质量区($0.15 < EV \leq 0.25$)、中质量区($0.25 < EV \leq 0.35$)、较高质量区($0.35 < EV \leq 0.45$)、高质量区($EV > 0.45$)。

1.3.3 重心转移分析模型

地理学中的重心模型是一种分析地理现象空

表 1 黄河三角洲“三生”用地主导功能分类及其生态环境质量指数背景值

Table 1 Classification of ecological-productive-living function based on dominant function and its eco-environmental quality index in the Yellow River Delta

“三生”用地分类体系				土地利用分类系统二级分类的生态环境质量指数
一级地类	二级地类(代码)	编码	生态环境质量指数	
生产用地	农业生产用地(AP)	1	0.454	水田(0.500)、旱地(0.450)
	工矿生产用地(IP)	2	0.150	采矿用地(0.150)、港口码头用地(0.150)、 水工建设用地(0.150)、工业用地(0.150)
	水域生产用地(WP)	3	0.300	盐田养殖池(0.300)
生态用地	林地生态用地(FE)	4	0.567	有林地(0.950)、灌木林地(0.650)、其他林地(0.400)
	草地生态用地(GE)	5	0.438	沼泽草地(0.450)、其他草地(0.400)
	水域生态用地(WE)	6	0.502	水库水面(0.550)、坑塘水面(0.550)、河流水面(0.600)、滩涂(0.450)
	其他生态用地(OE)	7	0.050	盐碱地(0.050)、裸地(0.050)
生活用地	城镇生活用地(UL)	8	0.200	城镇用地(0.200)
	农村生活用地(RL)	9	0.200	农村居民点用地(0.200)

间分布及变化过程的方法^[4],其轨迹可以反映生态环境质量空间分布的动态变化。公式详见文献 [4]。

1.3.4 地理探测器

地理探测器是由王劲峰团队提出的一种揭示空间分异性及其背后驱动力的统计学方法^[28]。本文使用该模型中的因子探测器探测不同因子在多大程度上解释了生态环境质量空间分异性。

2 结果分析

2.1 黄河三角洲“三生”用地转型分析

研究区“三生”用地结构以生产用地为主,生态用地次之,生活用地最少。1998—2018年生产用地大幅增加,增长幅度为13.50%;生态用地大幅减少,减少幅度为17.19%;生活用地略有增加,增幅为3.69%。生产用地由内陆向沿海地区扩展;生态用地由北部和东部沿海缩减至黄河入海口及黄河故道入海口区域;生活用地主要分布在研究区中部、西部和南部的内陆地区(图2)。

1998—2008年研究区“三生”用地转型图谱共有65种图谱单元“三生”用地类型发生转型,以生态用地向生产用地的转型为主(表2)。农业生产用地主要由草地、其他生态用地转型而来,转入

面积分别为244.00 km²、205.95 km²,累计转入比率为23.84%,主要分布在河流两侧,草地过度垦殖及未利用地大规模开垦是这种转型现象产生的重要原因。研究区土地后备资源丰富,种植业规模的扩大致使草地垦殖现象产生,盐碱地改良技术的发展成熟与“黄河三角洲”开发总体战略的提出推动了其他生态用地向农业生产用地的转型。受水产产业扩张影响,大量草地生态用地和其他生态用地转为水域生产用地。

2008—2018年研究区共有62种图谱单元发生变化,总面积为1325.58 km²,较上一阶段减少561.81 km²。水域生产用地占用其他生态用地最显著,转型面积及比率均有下降,集中分布在西北沿海地区。草地生态用地向水域生态用地转型面积增加,主要分布在黄河入海口南侧及东南沿海地区,1996年和2011年2次人工将黄河入海河道由东南方向改至东北方向,导致入海口南侧及研究区东南部土地盐碱度提高,草地多退化为滩涂。农业生产用地主要由草地生态用地和其他生态用地转型而来,转型面积分别为83.55 km²和48.52 km²,较上一阶段减少。农业生产用地向林地生态用地的转型成为排序第三的类型。生活用地对生产用

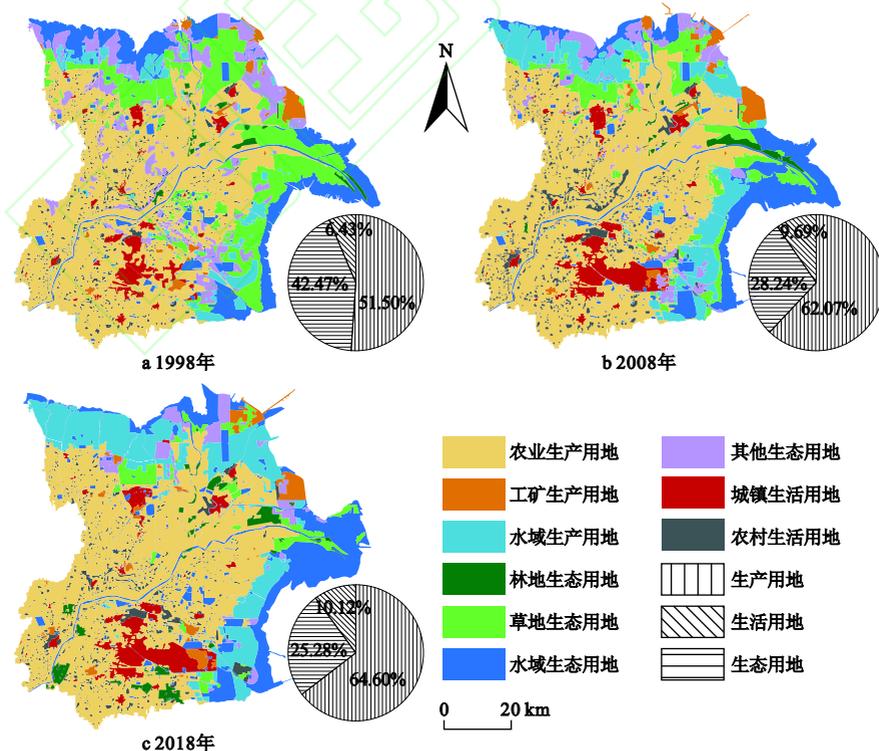


图2 1998—2018年黄河三角洲“三生”用地分布

Fig.2 Distribution of ecological-living-productive land in the Yellow River Delta during 1998-2018

表 2 1998—2018 年黄河三角洲各时序主要“三生”用地转型图谱排序

Table 2 Transition Tupu order of ecological-productive-living land of each sequential in the Yellow River Delta during 1998-2018

1998—2008年				2008—2018年			
编码	三生用地转型类型	转型面积/km ²	变化比率/%	编码	三生用地转型类型	转型面积/km ²	变化比率/%
51	GE-AP	244.00	12.93	73	OE-WP	120.16	9.06
53	GE-WP	210.98	11.18	56	GE-WE	105.91	7.99
71	OE-AP	205.95	10.91	14	AP-FE	95.91	7.24
73	OE-WP	186.76	9.90	53	GE-WP	93.55	7.06
63	WE-WP	134.97	7.15	51	GE-AP	83.55	6.30
18	AP-UL	124.92	6.62	57	GE-OE	79.17	5.97
56	GE-WE	101.66	5.39	13	AP-WP	57.85	4.36
67	WE-OE	60.79	3.22	63	WE-WP	51.34	3.87
75	OE-GE	60.69	3.22	71	OE-AP	48.52	3.66
19	AP-RL	55.38	2.93	76	OE-WE	42.18	3.18
57	GE-OE	53.76	2.85	36	WP-WE	39.73	3.00
54	GE-FE	44.09	2.34	16	AP-WE	38.68	2.92
15	AP-GE	37.07	1.96	31	WP-AP	36.46	2.75
17	AP-OE	29.41	1.56	37	WP-OE	30.07	2.27
16	AP-WE	25.49	1.35	61	WE-AP	28.26	2.13
	合计	1 578.91	83.50		合计	951.34	71.77

注: 地类代码见表1。

地的转型类型未进入转型图谱排序的前 15 位, 研究区城镇及农村的扩张速度放缓。

2.2 黄河三角洲“三生”用地转型的生态环境效应

黄河三角洲 1998—2018 年总体生态环境质量指数分别为 0.390、0.391 和 0.395, 生态环境质量有所改善。生态环境质量分级差异明显(图 3): 较高质量区面积先减少后略有增加, 高质量区面积先增加后略有减少, 两者占研究区总面积比例超过 70%, 构成生态环境质量的主体; 中质量区面积先减少后增加, 由 1998 年的 729.62 km² 增加至 2018 年的 1 245.40 km², 较低质量区面积先增加后减少, 两者面积波动较为剧烈; 低质量区面积在各时期均最小且呈持续减小趋势(表 3)。

1998—2018 年研究区生态环境质量空间分异明显, 各等级质量区重心转移距离均减少(图 4)。低质量区重心距海岸线距离最近, 向海洋一侧共迁移了 9.18 km; 较低质量区重心最靠近内陆且持续向东南方向迁移, 表明研究区东南部生态环境质量变差; 中质量区重心持续向东北迁移, 年均迁移距离为 0.55 km, 变化最显著; 较高质量区重心向西南方向迁移, 研究区中部地区生态环境质

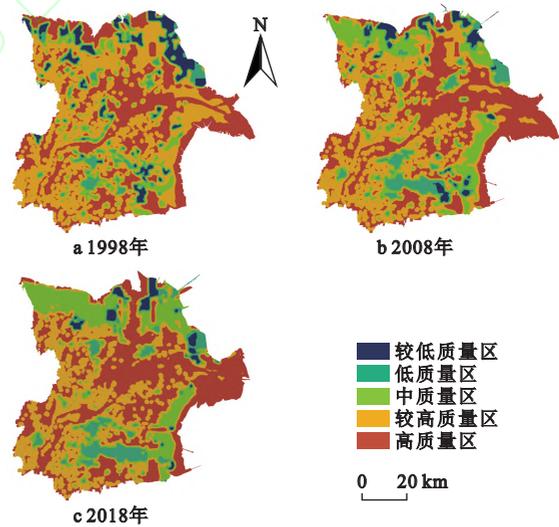


图 3 1998—2018 年黄河三角洲生态环境质量指数空间分布

Fig.3 Distribution of eco-environmental quality in the Yellow River Delta during 1998-2018

量向好发展; 高质量区重心向东北方向迁移且逐渐靠近黄河三角洲自然保护区南区, 年均仅迁移 0.12 km, 黄河入海口区域生态环境质量逐渐改善。

表 3 1998—2018 年黄河三角洲生态环境质量分区面积及比例

Table 3 Distribution of eco-environmental quality grades of the Yellow River Delta during 1998-2018

质量分区	1998年		2008年		2018年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
低质量区	365.22	5.61	191.78	2.91	133.90	2.03
较低质量区	416.22	6.39	1 075.85	16.33	463.23	7.02
中质量区	729.62	11.20	489.20	7.43	1 245.40	18.87
较高质量区	2 925.56	44.92	2 233.54	33.90	2 285.96	34.64
高质量区	2 076.35	31.88	2 597.35	39.43	2 471.35	37.44

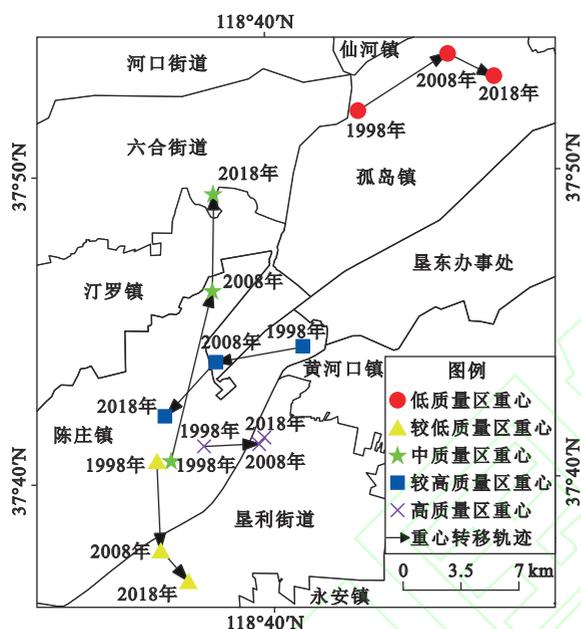


图 4 1998—2018 年黄河三角洲各等级生态环境质量重心转移轨迹

Fig.4 The moving trajectory of gravity center of eco-environmental quality in the YRD during 1998-2018

2.3 黄河三角洲生态环境质量空间分异性成因探测

2.3.1 影响因子指标体系构建

生态环境质量空间分异受土地利用变化这一直接因素和自然环境、经济增长等间接因素的综合影响^[4]。为探究黄河三角洲生态环境质量空间分异机制,本文从区位条件、自然环境、社会经济和生态保护 4 方面构建生态环境质量空间分异影响因子指标体系。区位条件包括距主要河流距离(X1)、距海岸线距离(X2)、距城镇距离(X3)、道路密度(X4)、河渠密度(X5),自然环境包括土壤类型(X6)、微地貌类型(X7)、植被覆盖度(X8)、地形起伏度(X9)、海拔高度(X10),社会经济包括人口密度(X11)、地均 GDP(X12)、工农业产值(X13),生

态保护包括自然保护区(X14)。驱动因子数据在 ArcGIS 中进行空间化处理,重采样为 30 m×30 m 的栅格数据,使用地理探测器进行驱动因素分析。

2.3.2 影响因子探测结果

除地形起伏度和海拔高度外,所有因子均通过 0.05 水平显著性检验,基于模型结果对除地形起伏度和海拔高度外的各因子进行分析。在因子探测器中, q 值用来衡量自变量对因变量空间分异性的影响程度。因子探测器结果显示,各时期影响黄河三角洲生态环境质量空间分异的因子影响力发生显著变化(图 5)。1998 年,对研究区生态环境质量空间分异影响较大的因子($q>0.100$)是植被覆盖度(X8)、微地貌类型(X7)和土壤类型(X6), q 值分别为 0.184、0.172、0.102;2008 年对生态环境质量空间分异影响较大的因子($q>0.100$)是植被覆盖度(X8, 0.248)、河渠密度(X5, 0.183)、微地貌类型(X7, 0.177)、土壤类型(X6, 0.147)和距海岸线距离(X2, 0.102);2018 年对生态环境质量空间分异影响较大的因子($q>0.100$)是植被覆盖度(X8)、土壤

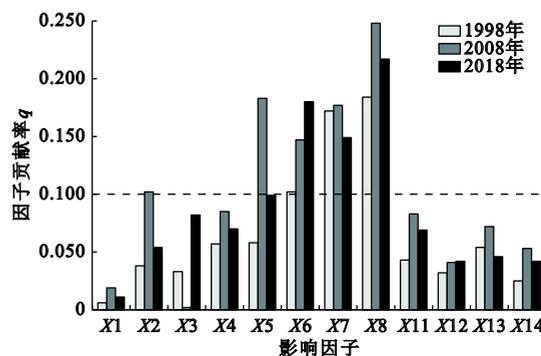


图 5 1998—2018 年黄河三角洲生态环境质量空间分异驱动因子贡献率 q

Fig.5 Contribution rates of driving factors for spatial differentiation of eco-environmental quality in the Yellow River Delta during 1998-2018

类型(X6)和微地貌类型(X7), q 值分别为 0.217、0.180 和 0.149。各时期植被覆盖度(X8)、微地貌类型(X7)和土壤类型(X6)的 q 值均位于前列, 上述 3 个因子均为反映了研究区自然本底条件的自然环境因子, 是影响黄河三角洲生态环境质量空间分异的主导因子。其次是河渠密度(X5), q 值从 1998 年的 0.058 提高至 2018 年的 0.099, 并于 2008 年成为排名第二的重要影响因子(0.183)。

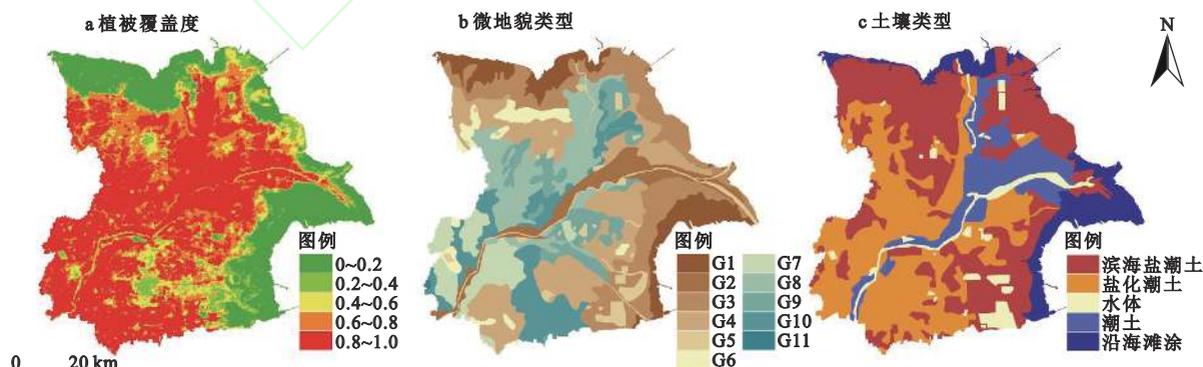
在区位条件因子中, 距主要河流距离(X1)、距海岸线距离(X2)和河渠密度(X5)的 q 值均呈先增后减趋势, 距城镇距离(X3)因子的 q 值先减后增。研究时段内所有区位条件因子影响力均有提高, 说明区位条件对生态环境质量空间分异的影响程度不断加深。社会经济因子中, 人口密度(X11)和地均 GDP(X12)的 q 值分别从 1998 年的 0.043、0.032 提高至 2018 年的 0.069、0.042, 可见这 2 个社会经济因子对研究区生态环境质量空间分异的影响力不断增强; 工农业产值(X13)的 q 值先升后降, 其对生态环境质量空间分异的影响力减弱。自然保护地因子(X14)的 q 值从 1998 年的 0.025 提升至 2018 年的 0.042, 2008 年 q 值最高(0.053)。基于因子探测器结果, 可以发现自然环境是研究区生态环境质量空间分异的主导因素, 区位条件、社会经济和生态保护也对其产生重要影响。

2.3.3 生态环境质量空间分异机制

1) 自然条件是影响黄河三角洲生态环境质量空间分异的基础性因子。植被覆盖度、微地貌类型和土壤类型为研究区生态环境质量空间分异的主导因子。植被覆盖度是衡量地表植被状况即驱动

研究区生态环境质量空间分异性形成的重要因子。由图 6a 可知, 2008 年研究区沿海地区与几个区县城区的植被覆盖度普遍在 0.6 以下, 这些地区的生态环境质量基本处于中、低和较低质量水平, 生态环境质量高质量区和高质量区空间分布范围与植被覆盖度在 0.6 以上的空间高度吻合。黄河三角洲地貌受黄河改道和冲淤作用, 形成岗、坡、洼相间的形态, 地下水和盐分运移复杂。从图 6b 可看出, 生态环境质量高质量区的分布范围与坡地、现代黄河漫滩高地和黄河主流带高地等微地貌类型较吻合, 这几种微地貌类型海拔相对其他区域较高, 处于盐分运移链的前端, 盐分累积较少, 有林地、沼泽草地等生态环境质量高的地类多分布于此。受海陆交互作用影响, 研究区土壤盐渍化程度较高。由图 6c 可知, 研究区生态环境高质量区与潮土在空间上有极好的相关关系, 高质量区与盐化潮土空间分布较为重合, 中、较低和低质量区的空间分布范围主要集中在滨海盐潮土区域, 土壤类型从内陆向海洋及从黄河向两侧变化的格局与生态环境质量从高到底的分布格局大体一致。因此, 针对生态环境质量较差的区域, 可以根据其自然环境特点, 提高植被覆盖度, 对土地进行整治和改良, 降低土壤含盐量, 使其满足如盐碱地等生态环境质量较低的土地利用类型向林、草地等高质量生态环境质量的土地利用类型转型的基础条件。

2) 区位条件对土地利用转型有重要作用, 进而影响生态环境质量的空间分异。河渠密度是反映研究区水资源分布与配给的重要指标, 从时间上看, 2008 年河渠密度对生态环境质量空间分异



G1: 潮间带; G2: 现代黄河漫滩高地; G3: 滨海低地; G4: 低平地; G5: 水体; G6: 洼地; G7: 决口扇高地; G8: 黄河主流带高地; G9: 河间洼地; G10: 坡地; G11: 山前微倾斜平原

图 6 2008 年黄河三角洲生态环境质量空间分异主导因子空间分布

Fig.6 Spatial distribution of driving factors for spatial heterogeneity of eco-environmental quality in the Yellow River Delta in 2008

的影响力达到峰值,研究区的河渠已成体系,此后河渠密度的增加幅度和对生态环境质量空间分异的影响力都有所降低;空间上,河渠密度从内陆向海洋以及从黄河向两侧递减,与生态环境质量从高到底的空间格局具有显著正相关关系。

此外,其他区位因子对生态环境质量空间分异的影响力均呈提高趋势。距海岸线距离反映了咸水的可达性和土壤盐分的丰度关系,距城镇距离反映了土地利用转型和生态环境质量受城镇辐射作用的强弱,生态环境质量较低和低值区出现的空间概率随距海岸线距离、距城镇距离的增大而减小。道路密度高值区人类影响范围更广,土地利用类型向生产用地转型更频繁,区域生态环境质量总体偏差。针对区位条件对生态环境质量空间分异的影响,应进一步整合地区资源,合理分配淡水资源,促进生态环境质量改善。

3) 社会经济因子对生态环境质量空间分异的影响力稳定于较低水平。人口密度高值区的人类活动强度较大,人类的生产生活行为造成土地利用形态由自然状态向非自然状态转型,生产用地和生活用地扩张使人口密度高值区的生态环境质量处于较低水平。地均 GDP 是研究区经济发展水平的直接体现,经济发展水平高值区生态环境质量相对较差。工农业产值在一定程度上体现区域产业结构特征,其空间格局与地均 GDP 相似,对生态环境质量空间分异有一定影响,随着产业结构转型和优化,工农业在产业结构中占比逐渐减小,对生态环境质量的影响力也渐趋减小。

4) 自然保护地空间范围与生态环境质量高值区有较高的吻合度,自然保护地的建设对提高局部生态环境质量有重要作用。自然保护地的建设限制了区内工农业生产和人类活动,其内土地利用类型以生态用地为主,使自然保护地范围成为生态环境质量高值集聚区。未来,对自然保护地进行优化整合,完善自然保护地管理机制,有利于更好发挥其对局部生态环境质量的保障作用。

3 结论与讨论

本文构建黄河三角洲“三生”用地分类体系,利用图谱信息分析“三生”用地转型特征,利用生态环境质量指数研究区域生态环境质量的时空分异,借助地理探测器模型进行影响因子分析,结论如下:

1) 1998—2018 年,黄河三角洲生产用地面积

不断增加,并向海洋一侧扩张;生态用地面积快速减少,分布范围缩减至黄河现行河道入海口与故道入海口附近;生活用地面积小幅增加。1998—2008 年,“三生”用地转型图谱以生态用地向生产用地转型为主,2008—2018 年,“三生”用地转型过程更加复杂,无绝对优势的转型类型。

2) 1998 年、2008 年、2018 年生态环境质量分别为 0.390、0.391 和 0.395,较高质量区与高质量区面积之和占比超过 70%,构成研究区生态环境质量的主体。研究区中部及黄河入海口区域生态环境质量不断提升;中质量区面积先减后增,其重心持续向东北迁移;较低质量区面积先增后减,低质量区面积持续减少,两者重心均向沿海方向迁移,东南及东北沿海地区生态环境质量降低。

3) 植被覆盖度、微地貌类型和土壤类型是研究区生态环境质量变化的基础因子和主导因子,自然条件的改善是生态环境质量提升的关键。区位因子对研究区生态环境质量起限制作用,因子贡献率的变化与生态环境质量变化方向相反。随着社会经济发展水平的提高,其对生态环境质量的影响在减弱。生态保护因子的影响力不断上升。

生态环境质量指数法可通过追踪“三生”用地转型定量反映生态环境质量的时空演变,前人对生态环境质量的赋值多用专家打分法,主观性较强。本文引用不同用地类型的 NPP 进行校正,减少了主观性,结果更加贴近实际。目前对生态环境质量指数赋值的校正方法不统一,值得进一步探讨。

本文使用地理探测器探测影响黄河三角洲生态环境质量空间分异的因素,受数据可获取性与模型局限性的影响,未将水资源配给量、黄河径流量等对土地转型与生态环境质量有重要影响的因素纳入指标体系,在未来研究中,还需进一步完善。

参考文献(References):

- [1] 吴宜进,赵行双,奚悦,等. 基于MODIS的2006—2016年西藏生态质量综合评价及其时空变化[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1438-1449. [Wu Yijin, Zhao Xingshuang, Xi Yue et al. Comprehensive evaluation and spatial-temporal changes of eco-environmental quality based on MODIS in Tibet during 2006-2016. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1438-1449.]
- [2] 刘春芳,王川,刘立程,等. 三大自然区过渡带生境质量时空差异及形成机制——以榆中县为例[J]. 地理研究, 2018, 37(2): 419-432. [Liu Chunfang, Wang Chuan, Liu Licheng et al. Spatio-temporal variation on habitat quality and its mechanism

- within the transitional area of the Three Natural Zones: A case study in Yuzhong county. *Geographical Research*, 2018, 37(2): 419-432.]
- [3] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010—2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. *地理学报*, 2018, 73(5): 789-802. [Liu Jiyuan, Ning Jia, Kuang Wenhui et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 789-802.]
- [4] 陈万旭, 李江风, 曾杰, 等. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J]. *地理研究*, 2019, 38(9): 2173-2187. [Chen Wanxu, Li Jiangfeng, Zeng Jie et al. Spatial heterogeneity and formation mechanism of eco-environmental effect of land use change in China. *Geographical Research*, 2019, 38(9): 2173-2187.]
- [5] Grainger A. National land use morphology[J]. *Geography*, 1995, 80(3): 235-245.
- [6] DeFries R S, Foley J A, Asner G P et al. Land-use choices: Balancing human needs and ecosystem function[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, 2(5): 249-257.
- [7] Lambin E F, Meyfroidt P. Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change[J]. *Land Use Policy*, 2010, 27: 108-118.
- [8] Foley J A. Global consequences of land use[J]. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [9] Meyfroidt P, Roy Chowdhury R, de Bremond A et al. Middle-range theories of land system change[J]. *Global Environmental Change*, 2018, 53: 52-67.
- [10] 宋小青. 论土地利用转型的研究框架[J]. *地理学报*, 2017, 72(3): 471-487. [Song Xiaoqing. Discussion on land use transition research framework. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(3): 471-487.]
- [11] Long H L, Qu Y. Land use transitions and land management: A mutual feedback perspective[J]. *Land Use Policy*, 2018, 74: 111-120.
- [12] 龙花楼, 曲艺, 屠爽爽, 等. 城镇化背景下中国农区土地利用转型及其环境效应研究: 进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(5): 455-463. [Long Hualou, Qu Yi, Tu Shuangshuang et al. Land use transitions under urbanization and their environmental effects in the farming areas of China: Research progress and prospect. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(5): 455-463.]
- [13] 胡守庚, 童陆亿, 龙花楼. 论土地利用转型潜力及其评价的理论框架[J]. *地理研究*, 2019, 38(6): 1367-1377. [Hu Shougeng, Tong Luyi, Long Hualou. Land use transition potential and its assessment framework. *Geographical Research*, 2019, 38(6): 1367-1377.]
- [14] 刘超, 许月卿, 孙丕玲, 等. 土地利用多功能性研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2016, 35(9): 1087-1099. [Liu Chao, Xu Yueqing, Sun Piling et al. Progress and prospects of multi-functionality of land use research. *Progress in Geography*, 2016, 35(9): 1087-1099.]
- [15] 刘继来, 刘彦随, 李裕瑞, 等. 中国“三生空间”分类评价与时空格局分析[J]. *地理学报*, 2017, 72(7): 1290-1304. [Liu Jilai, Liu Yansui, Li Yurui et al. Classification evaluation and spatial-temporal analysis of “production-living-ecological” spaces in China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1290-1304.]
- [16] 魏小芳, 赵宇鸾, 李秀彬, 等. 基于“三生功能”的长江上游城市群国土空间特征及其优化[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(5): 1070-1079. [Wei Xiaofang, Zhao Yuluan, Li Xiubin et al. Characteristics and optimization of geographical space in urban agglomeration in the upper reaches of the Yangtze River based on the function of “Production-Living-Ecological”. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(5): 1070-1079.]
- [17] 胡玉玺, 吴晓磊, 马世昌, 等. 湿地“三生”空间耦合的系统动力学模型实证分析——以西溪国家湿地公园为例[J]. *经济地理*, 2018, 38(7): 173-180. [Hu Yuxi, Wu Xiaolei, Ma Shichang et al. The system dynamics model for the interactive coupling between Wetland ecology, production and living—A case study on Xixi National Wetland Park. *Economic Geography*, 2018, 38(7): 173-180.]
- [18] 吕立刚, 周路生, 周冰冰, 等. 区域发展过程中土地利用转型及其生态环境响应研究[J]. *地理科学*, 2013, 33(12): 1442-1449. [Lyu Ligang, Zhou Lusheng, Zhou Bingbing et al. Land use transformation and its eco-environmental response in process of the regional development: A case study of Jiangsu Province. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(12): 1442-1449.]
- [19] 杨清可, 段学军, 王磊, 等. 基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应——以长江三角洲核心区为例[J]. *地理科学*, 2018, 38(1): 97-106. [Yang Qingke, Duan Xuejun, Wang Lei et al. Land use transformation based on ecological-production-living spaces and associated eco-environment effects: A case study in the Yangtze River Delta. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(1): 97-106.]
- [20] 许学工, 梁泽, 周鑫, 等. 黄河三角洲陆海统筹可持续发展探讨[J]. *资源科学*, 2020, 42(3): 424-432. [Xu Xuegong, Liang Ze, Zhou Xin et al. Land and sea coordination for sustainable development in the Yellow River Delta. *Resources Science*, 2020, 42(3): 424-432.]
- [21] 东营市统计局. 东营统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1998-2018. [Dongying Statistical Bureau. *Dongying statistical yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 1998-2018.]
- [22] 魏帆, 韩广轩, 韩美, 等. 1980—2017年环渤海海岸线和围填海时空演变及其影响机制[J]. *地理科学*, 2019, 39(6): 997-1007. [Wei Fan, Han Guangxuan, Han Mei et al. Temporal-spatial dynamic evolution and mechanism of shoreline and the sea reclamation in the Bohai Rim during 1980-2017. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(6): 997-1007.]
- [23] 韩美. 基于多期遥感影像的黄河三角洲湿地动态与湿地补偿标准研究[D]. 济南: 山东大学, 2012. [Han Mei. *Wetland dynamic and ecological compensation standard of the Yellow River Delta based on remote sensing images*. Jinan: Shandong

- University, 2012.]
- [24] 李晓文, 方创琳, 黄金川, 等. 西北干旱区城市土地利用变化及其区域生态环境效应——以甘肃河西地区为例[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(3): 280-290. [Li Xiaowen, Fang Chuanglin, Huang Jinchuan et al. The urban land use transformations and associated effects on eco-environment in northwest China arid region: A case study in Hexi Region, Gansu Province. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(3): 280-290.]
- [25] 陈鹏飞. 北纬18°以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力1公里栅格数据集(1985-2015)[J]. *全球变化数据学报*, 2019, 3(1): 34-41. [Chen Pengfei. Monthly NPP dataset covering China's terrestrial ecosystems at north of 18° N(1985-2015). *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2019, 3(1): 34-41.]
- [26] Chen W X, Zhao H B, Li J F et al. Land use transitions and the associated impacts on ecosystem services in the Middle Reaches of the Yangtze River Economic Belt in China based of the geo-informatic Tupu method[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 701: 134690.
- [27] Oliver M A, Webster R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging[J]. *Catena*, 2014, 113(2): 56-69.
- [28] 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.

Eco-environmental Effects and Its Spatial Heterogeneity of 'Ecological-productive-living' Land Use Transformation in the Yellow River Delta

Han Mei¹, Kong Xianglun¹, Li Yunlong^{1,2}, Wei Fan¹, Kong Fanbiao¹, Huang Shuping²

(1. *College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, Shandong, China;*
2. *School of History and Social Development, Qilu Normal University, Jinan 250200, Shandong, China*)

Abstract: The eco-environmental effects and spatial heterogeneity characteristics of land use transformation of 'ecological-productive-living' is an important basis for guiding regional territorial spatial development and eco-environmental protection. This study used remote sensing land use data for 1998, 2008 and 2018 to construct a land classification system of 'ecological-productive-living' in the Yellow River Delta (YRD), China. The characteristics of land use transformation of 'ecological-productive-living', the eco-environmental effects and the main influencing factors were quantitatively analyzed by the transition Tupu, eco-environmental quality index, the gravity center migration model and the Geodetector statistical method. The results show that: 1) Land use transformation in the YRD was mainly manifested as a substantial increase in the proportion of productive land (+13.50%), a decrease in the proportion of ecological land (-17.19%) and small increase in the proportion of living land (+3.69%). From 1998 to 2008, main types of transformation are the conversion from ecological land to productive land. From 2008 to 2018, there is no absolute advantage types of land use transformation, and the transformation process is complicated. 2) The eco-environmental quality index for the YRD increased from 0.390 in 1998 to 0.395 in 2018, with the spatial distribution of the index mainly showing areas of higher quality. The eco-environmental qualities of the central part and the estuary of the YRD showed continuous increases, whereas those of the southeast and northeast coastal areas decreased. 3) The main factors affecting the pattern of eco-environmental quality in the YRD was shown to be vegetation coverage, micro-geomorphic types and soil types, with the contribution rates of location factors and socio-economic factors becoming weaker with an improvement in eco-environmental quality. The results of this study showed a rising contribution rates of ecological protection efforts to the pattern of eco-environmental quality in the YRD.

Key words: the Yellow River Delta; land-use leading function; land use transformation; eco-environmental quality; spatial heterogeneity