

# 黄河流域下游城市群生境质量 时空演变及其驱动因素

吴艳霞, 刘方南, 陈宝童

(西安理工大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** [目的] 对黄河流域下游城市群生境质量及其影响因素开展研究, 为该地区生态环境保护和高质量发展提供参考。[方法] 基于 2005—2020 年土地利用数据并使用 InVEST 模型分析区域生境质量的演变特征, 通过空间分析探索生境质量的集聚效应, 采用地理探测器探索生境质量的影响因素。[结果] ①2005—2020 年, 黄河流域下游城市群生境质量水平整体较低, 平均生境质量指数为 0.402 2, 呈先下降后上升的趋势。②空间自相关分析显示, 生境质量在空间上高度相关且呈现出两极集聚特征, 生境质量在中原城市群西部、北部及山东半岛城市群中部高一高集聚; 在郑州市、青岛市等在城市群中经济发展突出的城市低—低集聚。③地理探测器探测结果显示, 土地利用是影响黄河流域下游城市群生境质量的主要因子, 不同因子间交互作用强于单个因子对生境质量的影响。[结论] 黄河流域下游城市群生境质量高值区要继续加强对生态环境保护的力度, 生境质量低值区要严格控制土地开发强度, 杜绝建设用地无序扩张, 提高土地的利用效率。

**关键词:** InVEST 模型; 生境质量; 地理探测器; 城市群; 黄河流域下游

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0396-09

中图分类号: X171.1

**文献参数:** 吴艳霞, 刘方南, 陈宝童. 黄河流域下游城市群生境质量时空演变及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 396-404. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230625.001; Wu Yanxia, Liu Fangnan, Chen Baotong. Spatial and temporal evolution and drivers of habitat quality of urban agglomeration in Lower Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 396-404.

## Spatial and Temporal Evolution and Drivers of Habitat Quality of Urban Agglomeration in Lower Yellow River Basin

Wu Yanxia, Liu Fangnan, Chen Baotong

(School of Economics and Management, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** [Objective] The habitat quality of the urban agglomeration in the lower reaches of the Yellow River, and the relevant influencing factors were studied in order to provide a reference for ecological protection and quality development in the region. [Methods] The InVest model was used to analyze the evolution characteristics of regional habitat quality based on land use data from 2005 to 2020. The agglomeration effect of habitat quality was analyzed through spatial analysis. Influencing factors of habitat quality were determined using GeoDetector. [Results] ① From 2005 to 2020, the overall habitat quality of urban agglomeration in the Lower Yellow River basin was low, with an average value index of 0.402 2. During this period, habitat quality initially decreased and then increased. ② Spatial autocorrelation analysis showed that habitat quality was highly correlated, showing a polarized clustering pattern. Habitat quality showed a cluster of high values (H-H) in the western and northern parts of the Central Plains urban agglomeration and the central part of the Shandong Peninsula urban agglomeration, and a cluster of low values (L-L) in cities with more prominent economic development in the urban agglomeration, such as Zhengzhou and Qingdao City. ③ The

收稿日期: 2022-11-01

修回日期: 2022-12-17

资助项目: 国家社会科学基金项目“新发展阶段黄河流域生态安全评价、预警及实现机制研究”(21BJY169)

第一作者: 吴艳霞(1964—), 女(汉族), 江苏省南京市人, 博士, 教授, 研究生导师, 主要从事技术经济及管理、区域经济发展方面的研究。  
Email: 2214861742@qq.com.

通讯作者: 刘方南(1997—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 硕士研究生, 研究方向为技术经济及管理。Email: 707966738@qq.com.

results of the GeoDetector analysis showed that land use was the main factor influencing habitat quality of urban agglomeration in the Lower Yellow River basin, and that the interaction between different factors was stronger than the influence of individual factors on habitat quality. [Conclusion] Regions of urban agglomeration in the Lower Yellow River basin with high habitat quality should continue to protect the ecological environment, while regions with low habitat quality should strictly control land exploitation and the expansion of construction land, and improve land use efficiency.

**Keywords: InVEST model; habitat quality; GeoDetector; urban agglomeration; Lower Yellow River basin**

黄河流域在中国经济社会发展和生态安全方面具有重要的战略地位<sup>[1]</sup>。然而,随着经济高速发展和城市化进程的不断推进,人类频繁的经济活动对黄河流域生态环境造成了破坏,过度城镇化、过度农业规模化等不合理的土地利用方式加速了物种栖息地质量退化和生物多样性水平降低<sup>[2]</sup>,对黄河流域生态系统造成了冲击,严重制约了黄河流域的高质量发展。因此,黄河流域生态保护和高质量发展上升成为国家战略。党的二十大报告中不仅将推动“黄河流域生态保护和高质量发展”作为区域协调发展的重要内容,还再次强调了绿水青山就是金山银山的理念,要站在人与自然和谐共生的高度谋划发展,将生态环境保护放在了更高的战略地位。因此,研究黄河流域生境质量对实现黄河流域高质量发展具有重要现实意义。

生境质量是生态环境为生物提供生存发展条件的能力,是反映某一地域生态环境的重要指标<sup>[3]</sup>。目前,对生境质量的研究主要基于景观格局指标体系和基于模型模拟两种方法<sup>[4]</sup>。常见的评价模型有生境适宜性模型 HIS, IDRIS 软件的生物多样性模块,生态系统服务社会价值评估模型 (SoIVES), InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs) 模型等<sup>[5-7]</sup>。其中, InVEST 模型因数据获取便捷,分析能力精准以及可以将结果可视化等优点,被国内外学者广泛应用于生境质量的评估<sup>[8-9]</sup>。学者对生境质量的研究内容聚焦于以下 3 类:一是研究城市化对城市生境质量的影响,如 Bai Limin 等<sup>[10]</sup>探讨了长春市快速城市化对生境质量的影响,认为快速的城市化造成长春市生境质量退化。Zhu Congmou 等<sup>[11]</sup>研究了城市化对杭州生境质量的影响,发现市区生境质量下降幅度最大。二是研究某一区域生境质量的时空演变特征,如庞惠心等<sup>[12]</sup>研究武汉市城市化进程中生境质量的分布情况,得出生境质量从城市中心点向外逐渐升高的结论。张丹华等<sup>[13]</sup>研究了辽中南城市群生境质量的时空演变特征,发现生境质量略微呈下降趋势且呈现“东高西低”的格局。三是研究生境质量的影响因素,如梁晓瑶等采用地理加权回归分析影响黑龙江省生境质量的影

响因素及影响机制<sup>[14]</sup>。陈实等<sup>[15]</sup>采用地理探测器研究了长三角中心区生境质量的影响因素,认为自然环境决定了生境质量的空间格局。综上所述,对生境质量时空演变特征及其驱动因素的相关研究已经比较完善。然而,以往研究多集中在对省域、市域等尺度对生境质量进行研究,且对黄河流域生境质量的研究也集中在黄河流域某一流域段的生境质量研究<sup>[16-17]</sup>及黄河流域沿线地区的生境质量研究<sup>[18-19]</sup>,对黄河流域城市群的生境质量关注度不高,特别是城市化水平相对较高而生态环境较为脆弱的下游城市群。

近年来,黄河流域下游城市群经济发展迅猛,不断增长的人口和城市化率对脆弱的生态环境造成了冲击,生物多样性遭到了破坏,给生境质量带来了巨大压力。因此,分析黄河流域下游城市群生境质量的时空演变特征,探究其驱动因素是一个亟需解决的问题。为此,本文以黄河流域下游城市群为研究对象,基于 InVEST 模型分析 2005—2020 年生境质量时空演变特征,采用 Moran's *I* 指数和聚类图对生境质量的空间相关性和集聚特征进行分析,利用地理探测器研究生境质量的驱动因子,以期为黄河流域下游城市群生态环境保护和高质量发展提供参考。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

黄河流域城市群是构建高质量发展国土空间布局的重要载体,其中中原城市群和山东半岛城市群位于黄河流域下游,在地理上紧密相连,分别承担了东部沿海龙头角色和中部地区的重要战略支撑,对构建黄河流域高质量发展体系起到重要作用。下游城市群共包含 29 个地级市<sup>[20]</sup>(2019 年山东省莱芜市并入山东省济南市),常住人口占黄河流域总人口的 47%,承担了黄河流域 GDP 的 56%<sup>[21]</sup>。下游城市群属于温带季风型气候,气候较为适宜,拥有较好的居住环境,地势整体呈东部高西部低的分布特征。目前随着城市化进程的不断加速,脆弱的生态环境和高强度的资源环境承载使黄河流域下游城市群处于巨大的压力之下。要推动城市群高质量发展,离不开健康

的生态环境,应重视对生态格局的规划。

## 1.2 数据来源

研究所采用的 2005,2010,2015 和 2020 年 4 期土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>),分辨率为 30 m。DEM 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)的 ASTER GDEM 30 m 分辨率数字高程数据。经济因素数据来源于各市的统计年鉴,气候数据来源于中国气象局 (<http://data.cma.cn/>)及相关统计年鉴。NDVI(归一化植被指数)来源于美国 NASA 的 MODIS13Q1NDVI 产品。地形数据利用 ArcGIS 软件对 DEM 进行提取。因 2019 年莱芜市并入济南市,为便于时空分析,统一采用 2018 年行政区划划分。通过 ArcGIS 将土地利用数据进行重分类为水田、旱地、有林地、灌木林、疏林地、其他林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、河渠、湖泊、水库坑塘、滩涂、滩地、城镇用地、农村居民点、其他建设用地、沙地、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石质地、其他未利用地、海洋 24 种类型。

## 1.3 研究方法

1.3.1 生境质量 本文利用 InVEST 模型中的生境

质量模块对 2005,2010,2015 和 2020 年黄河流域下游城市群的生境质量进行计算。该模块通过建立各种土地利用与威胁源间的联系计算生境质量。生境质量的计算公式为:

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

式中: $Q_{xj}$ 为土地类型  $j$  中栅格  $x$  的生境质量指数,值为  $[0,1]$ ;  $H_j$  为土地类型  $j$  中的生境适宜指数;  $D_{xj}^z$  为土地类型  $j$  中栅格  $x$  的干扰水平;  $z$  为归一化常量,通常设置为 2.5;  $k$  为半饱和常数,不影响生境质量栅格的原有次序,取默认值 0.5。

模块中所需参数参考 InVEST 模型用户指南及相关文献<sup>[22-23]</sup>,结合研究区的实际情况进行设置,具体设置参数如表 1—2 所示。

表 1 威胁源权重和最大影响距离

Table 1 Weight and maximum influence distance of threat source

| 威胁因子   | 最大影响距离/km | 权重   | 衰退类型 |
|--------|-----------|------|------|
| 水田     | 4         | 0.60 | 线性   |
| 旱地     | 4         | 0.60 | 线性   |
| 农村居民点  | 5         | 0.70 | 指数   |
| 其他建设用地 | 9         | 0.90 | 指数   |
| 城镇用地   | 10        | 1.00 | 指数   |

表 2 不同土地类型对威胁因子的敏感度

Table 2 Sensitivity of different land types to threat factors

| 土地利用类型 | 生境适宜度 | 敏感度  |      |      |        |       |
|--------|-------|------|------|------|--------|-------|
|        |       | 水田   | 旱地   | 城镇用地 | 其他建设用地 | 农村居民点 |
| 水田     | 0.50  | 0.25 | 0.30 | 0.50 | 0.50   | 0.40  |
| 旱地     | 0.40  | 0.30 | 0.25 | 0.50 | 0.50   | 0.40  |
| 有林地    | 0.90  | 0.70 | 0.70 | 0.80 | 0.80   | 0.80  |
| 灌木林    | 0.85  | 0.70 | 0.70 | 0.75 | 0.75   | 0.75  |
| 疏林地    | 0.80  | 0.70 | 0.70 | 0.75 | 0.75   | 0.75  |
| 其他林地   | 0.80  | 0.70 | 0.70 | 0.70 | 0.70   | 0.70  |
| 高覆盖度草地 | 0.70  | 0.60 | 0.70 | 0.50 | 0.35   | 0.50  |
| 中覆盖度草地 | 0.60  | 0.60 | 0.70 | 0.60 | 0.35   | 0.45  |
| 低覆盖度草地 | 0.50  | 0.35 | 0.35 | 0.50 | 0.35   | 0.40  |
| 河渠     | 0.30  | 0.20 | 0.20 | 0.30 | 0.30   | 0.30  |
| 湖泊     | 0.80  | 0.65 | 0.65 | 0.80 | 0.80   | 0.75  |
| 水库坑塘   | 0.80  | 0.50 | 0.50 | 0.80 | 0.85   | 0.75  |
| 滩涂     | 0.60  | 0.65 | 0.65 | 0.70 | 0.75   | 0.65  |
| 滩地     | 0.70  | 0.75 | 0.70 | 0.70 | 0.75   | 0.65  |
| 城镇用地   | 0     | 0    | 0    | 0    | 0      | 0     |
| 农村居民点  | 0     | 0    | 0    | 0    | 0      | 0     |
| 其他建设用地 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0      | 0     |
| 沙地     | 0     | 0    | 0    | 0    | 0      | 0     |
| 盐碱地    | 0     | 0    | 0    | 0    | 0      | 0     |
| 沼泽地    | 0.90  | 0.60 | 0.60 | 0.75 | 0.70   | 0.65  |
| 裸土地    | 0     | 0    | 0    | 0    | 0      | 0     |
| 裸岩石质地  | 0     | 0    | 0    | 0    | 0      | 0     |
| 其他未利用地 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0      | 0     |
| 海洋     | 0.80  | 0.50 | 0.50 | 0.80 | 0.75   | 0.65  |

1.3.2 空间自相关分析 Moran's  $I$  指数可以揭示相邻地域间的某种地理现象在空间上的分布特征及集聚程度<sup>[24]</sup>。利用 ArcGIS 将研究区域划分为  $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$  的格网后,采用 GeoDa 软件分析黄河流域下游城市群生境质量的空间关联性,并通过 Lisa 聚类图分析衡量生境质量在空间上的分布情况,探究生境质量在空间上是否存在集聚现象。具体计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij})}$$

式中: $I$  为 Moran's 指数; $n$  为研究区的空间网格单元数量; $x_i, x_j$  分别为空间单元  $i$  和  $j$  的观测值; $\bar{x}$  为空间单元的平均值; $w_{ij}$  为空间单元  $i$  和  $j$  的权重矩阵。Moran's  $I$  指数取值范围为  $[-1, 1]$ ,若  $I$  取值范围为  $[-1, 0]$ ,表明具有空间负相关;若  $I$  取值范围为  $[0, 1]$ ,表明具有空间正相关。

1.3.3 地理探测器 地理探测器是王劲峰等<sup>[25]</sup>提出一种探测变量时空分异性及解释其背后驱动因素的一种统计方法,能够度量不同因素对生境质量的影响程度。计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}$$

式中: $q$  为某一个影响因子对生境质量时空变化的影响力; $L$  为影响因子的样本数; $N_h, N$  分别是层  $h$  和全区样本数量; $\sigma_h^2, \sigma^2$  为区  $h$  和全区方差。 $q$  的取值范围为  $[0, 1]$ , $q$  值越大,则影响因子对生境质量的解释力越强。

交互探测器可以探测不同因子间的交互作用关系,评估不同因子的组合对生境质量空间分布的影响力是否存在变化,分类结果详见表 3。生态系统的生境质量是由多种因素相互作用形成的结果<sup>[15]</sup>。在自然因素方面考虑地形、气候等影响,植被的分布与地形存在密切关联,不同地形处的植被分布存在较大差异,对生境质量产生影响,因此在地形因素方面选择坡度、坡向及高程作为影响因子<sup>[26]</sup>。土地类型对生境质量空间分布产生影响,因此选择土地利用数据作为影响因子。气候因素作用于土地覆盖影响生境质量,因此选择降水、温度、湿度作为影响因子;植被在一定程度上能反映生境质量,通过植被归一化指数(NDVI)反映植被的生长情况。在经济因素方面,人口密度和国内生产总值是反映人类活动的强度的重要指标,人类活动也会对生境质量产生影响。将生境质量作为因变量、各驱动因子离散化作为自变量,具体运算过程在 GeoDetector\_2018 模型中实现。

表 3 双因素交互作用类型

Table 3 Types of two-factor interaction

| 交互作用类型  | 判断依据     |
|---|----------|
| $q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$                        | 非线性减弱    |
| $\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$ | 单因子非线性减弱 |
| $\max[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < q(X_1) + q(X_2)$      | 双因子增强    |
| $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$                             | 独立       |
| $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$                             | 非线性增强    |

## 2 结果与分析

### 2.1 黄河流域下游城市群生境质量时空变化特征

通过 InVEST 模型的生境质量模块计算出黄河流域下游城市群 2005, 2010, 2015 和 2020 年的生境质量分别为 0.411 2, 0.400 6, 0.397 5 和 0.399 4, 平均生境质量为 0.402 2, 整体处于较低水平。利用 ArcGIS 等间距法将生境质量分为低(0, 0.2)、较低(0.2, 0.4)、中等(0.4, 0.6)、较高(0.6, 0.8)、高(0.8, 1)5 个等级(如图 1 所示)。研究区生境质量分布与土地利用情况基本吻合。生境质量高值区主要集中在洛阳市南部的生态四县及晋城市四周, 这些地区有较多的林地。此外, 研究区的水域区域也是生境质量高值

区; 中等生境质量主要分布在开封市西南部及研究区的水域附近; 生境质量低值区分布与建设用地分布基本一致, 集中分布在各个城市的经济发达区域。

从空间分布来看, 15 a 来黄河流域下游城市群生境质量大部分变化甚小, 只有部分区域生境质量发生明显变化。生境质量升高的区域集中在滨州市、东营市和潍坊市的水域区域及开封市的西南部。滨州市、东营市和潍坊市分布有较多的水库、坑塘、滩涂等湿地, 得益于山东省实施的《山东省湿地保护方法》以及各市实施的市级湿地管理保护方法, 在一定程度上修复了生态环境, 提升了生境质量; 开封市开展退耕还林工程, 林草地面积的增加有效推动了生境质量的提升; 生境质量降低的区域主要集中在城市群中各个城



市经济发展的核心区域,呈点式扩散分布,这是因为经济发展核心区域的人类活动十分频繁,在经济快速发展的过程中不可避免地对生态环境造成了破坏,导致生境质量恶化。从时间分布来看,由研究区生境质量等级比例(表 4)可知,生境质量低的区域面积在增大,但增长速率呈下降态势;生境质量较低的区域面

积在减少,下降了 2.16%;生境质量处于中等水平的区域面积基本不变;生境质量水平较高的区域面积波动上升;生境质量水平高的区域面积在前 10 a 基本不变,在后 5 a 有所下降。将不同年份的生境质量进行对比,将生境质量变化划分为: $<-0.5$ ;  $-0.5\sim 0$ ;  $0\sim 0.5$ ;  $>0.5$  这 5 种情况<sup>[27]</sup>(如图 2 所示)。

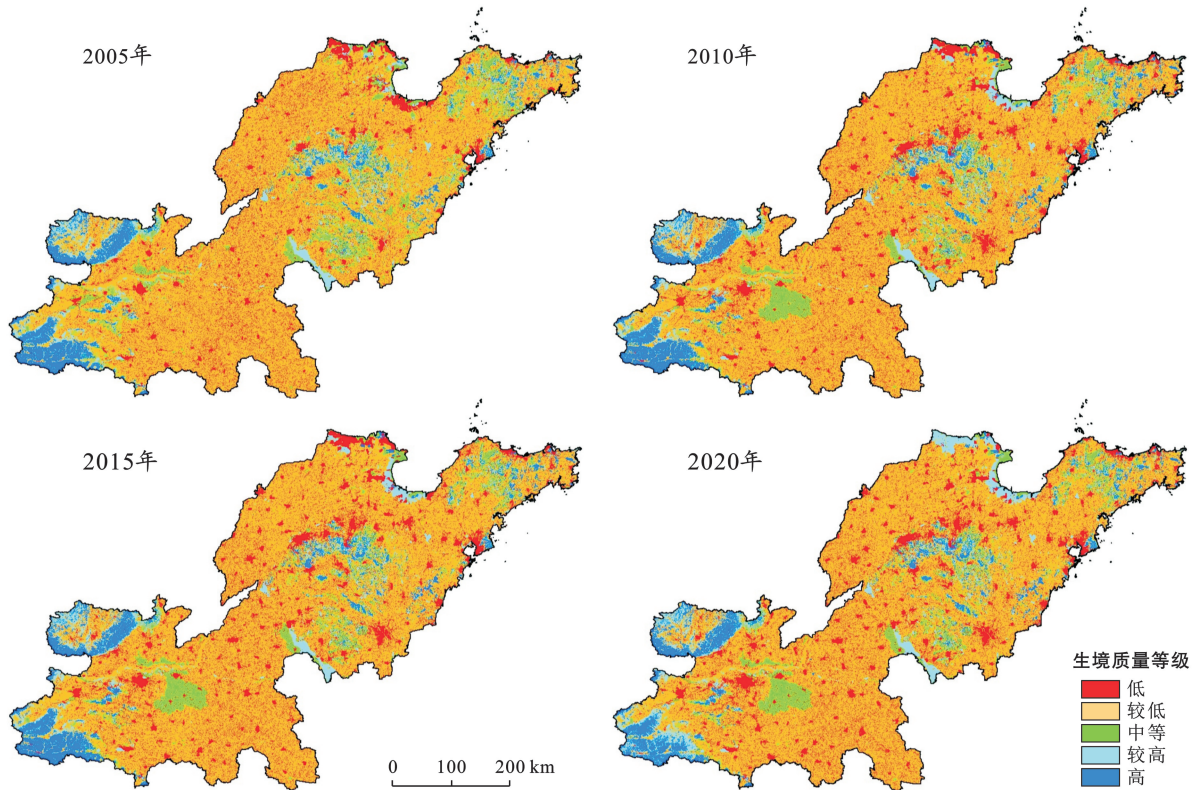


图 1 不同年份黄河流域下游城市群生境质量等级空间分布

Fig.1 Spatial distribution of habitat quality classes in Lower Yellow River basin urban agglomeration

表 4 黄河流域下游城市群 2005—2020 年各生境质量等级比例

Table 4 Percentage of each habitat quality class in Lower Yellow River basin urban agglomeration from 2005 to 2020

| 生境质量等级 | 比例/%   |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|
|        | 2005 年 | 2010 年 | 2015 年 | 2020 年 |
| 低      | 14.35  | 16.22  | 17.02  | 17.03  |
| 较低     | 65.41  | 64.68  | 63.86  | 63.25  |
| 中等     | 5.87   | 5.23   | 5.18   | 5.10   |
| 较高     | 6.77   | 6.30   | 6.37   | 7.68   |
| 高      | 7.60   | 7.57   | 7.57   | 6.94   |

在 2005—2010 年,研究区大部分区域生境质量有所下降,只有中原城市群中部和潍坊市北部生境质量水平得到提升;在 2010—2015 年,随着城市化进程的全面加速和社会经济快速发展,黄河流域下游城市群的生态环境开始恶化,人类活动对生境质量造成了

破坏,几乎整个研究区生境质量都有所降低,仅有研究区西部林地区域由于人类活动较难干涉,维持原有的生态环境,生境质量水平提高;在 2015—2020 年,国家对生态保护愈重视,印发《全国城市生态保护与建设规划(2015—2020 年)》,要求切实加强城市生态保护及推进城市生态修复,经济发展逐渐开始坚持绿色生态导向,黄河流域下游城市群生态环境得到修复,山东半岛城市群生态环境好于中原城市群,生境质量升高的区域集中在山东半岛城市群北部、东部,在中原城市群内零散分布。总体而言,在 2005—2020 年,黄河流域下游城市群大部分区域生境质量水平有所下降,但下降幅度不大。山东半岛城市群北部水域区域及中原城市群中部区域生境质量水平上升,特别是水域区域生境质量水平上升幅度较大。表明黄河流域下游水沙调节、滩区治理和生物多样性维护等措施已经初见成效,生境质量水平开始向好发展。

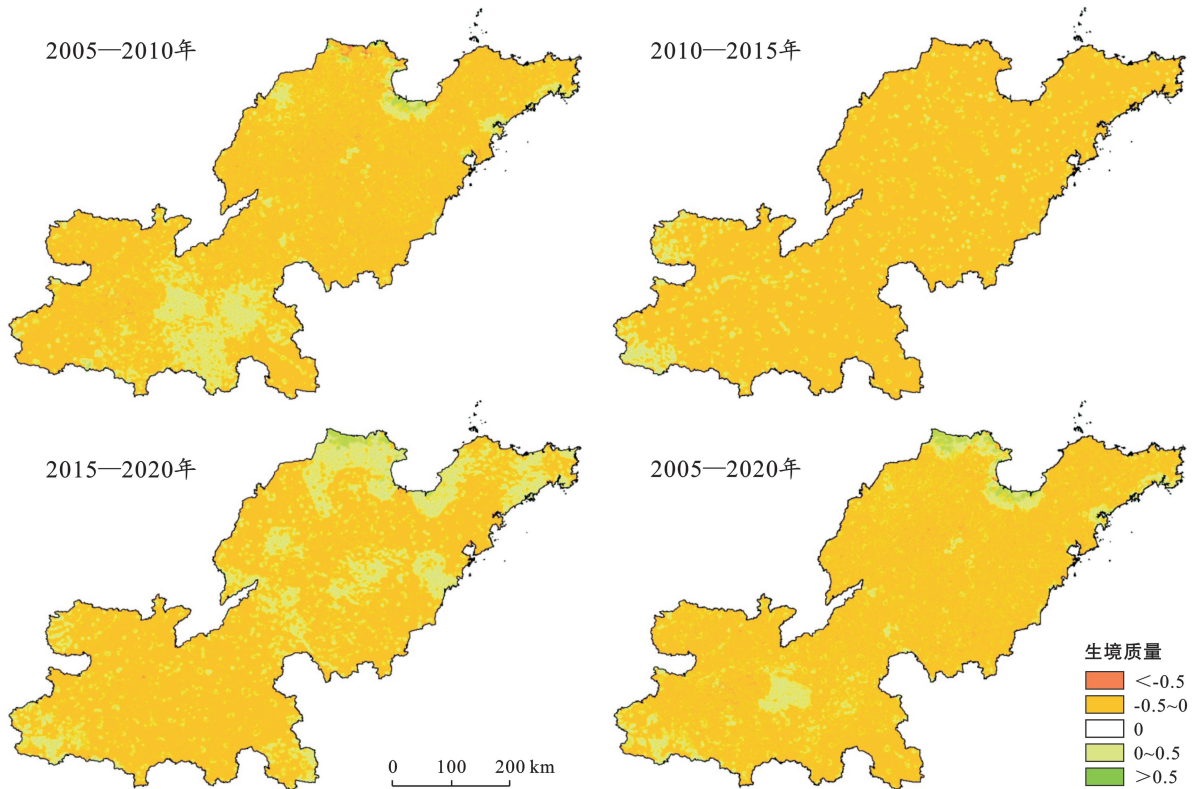


图 2 黄河流域下游城市群 2005—2020 年生境质量变化

Fig.2 Changes in habitat quality in Lower Yellow River basin urban agglomeration between 2005—2020

### 2.2 空间自相关分析

GeoDa 全局空间自相关分析结果显示,4 期数据的 Moran's  $I$  的值分别为 0.797, 0.784, 0.783 和 0.787, 均通过 1% 水平下的显著性检验, 表明黄河流域下游城市群生境质量存在空间自相关, 在空间上呈现出生境质量高值集聚及低值集聚特征(如图 3 所示)。2005—2020 年生境质量空间高值集聚变化不大, 低值集聚明显减少。生境质量高值区域集中在中原城市群西部、北部及山东半岛城市群中部, 并零星

分散于山东半岛城市群北部。生境质量低值区域集中在郑州市、青岛市等在城市群中经济发展较好的城市, 零散分布于城市群其他城市中。值得注意的是, 在 2020 年山东半岛城市群北部生境质量从低值集聚转化为高值集聚, 说明山东省实施的生态保护办法已经有所成效。2005—2020 年, 通过显著性检验的高质集聚区所占比例从 17.44% 变为 17.28%, 低值集聚区所占比例从 19.30% 降为 16.55%, 说明黄河流域下游城市群生境质量得到了改善。

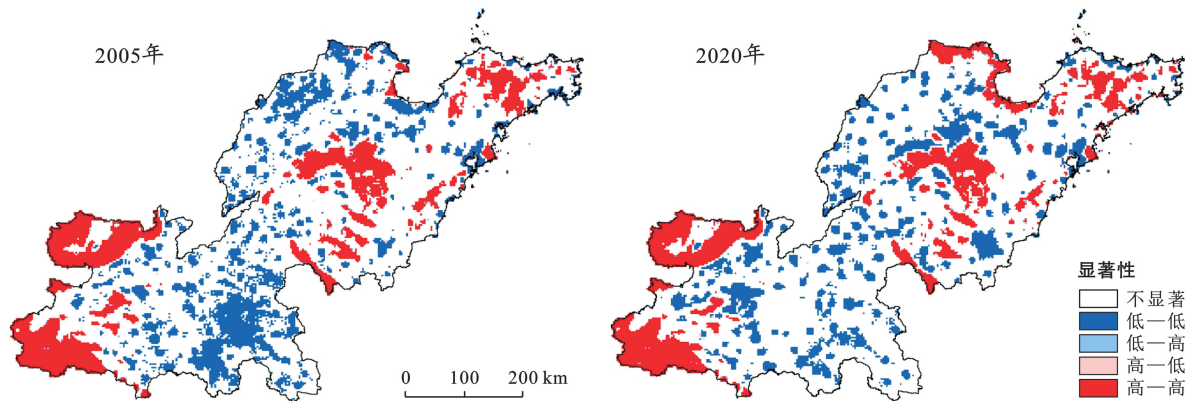


图 3 黄河流域下游城市群 2005—2020 年生境质量空间 LISA 聚类图

Fig.3 Spatial LISA clustering map of habitat quality in Lower Yellow River basin urban agglomeration between 2005 to 2020

### 2.3 黄河流域下游城市群生境质量变化驱动因素分析

黄河流域下游城市群生境质量影响因子对生境

质量的影响力存在一定差异, 且不同年份影响因子的  $p$  值均通过了 1% 水平下的显著性检验, 探测结果如

表 5 所示。由表 5 可知,土地利用的影响力远高于其他因子,是影响生境质量空间分异的主导因素,这是因为生境质量和土地利用分布具有较大的一致性,高生境质量主要分布在研究区的林地、水域等具有高生态价值的区域周围,低生境质量主要分布在城市群中各个城市的建设用地区域。其次是坡度、高程,表明自然因素也影响着生境质量的空间分布。高程和坡度在一定程度上决定了人类活动的可达性<sup>[28]</sup>,高程较高的地区及陡坡区域不利于人类开展经济活动,此类区域生境质量相对较高;而平原区域是人类经济活动的主要区域,分布有大量城市区域,人类活动会不

断造成干扰,此类区域生境质量相对较低。NDVI 的影响力在逐步提高,表明随着退耕还林等生态保护措施的不断推进,植被覆盖率有明显提升,对生境质量的提升起到重要作用。气候因素和经济因素对生境质量的影响力较低。这是因为生境质量受多方面因素影响,国内生产总值和人口密度反映出区域的经济发展情况,但经济发展与生态保护并不是对立关系,经济发展的效益也能反哺对生态环境造成的危害。此外,黄河流域下游城市群气候适宜,水资源相对丰富,因此经济因素和气候因素对生境质量影响力不大。

表 5 黄河流域下游城市群驱动因子探测结果

Table 5 Detection result of drive factors in Lower Yellow River Basin urban agglomeration

| 年份   | 影响力( $q$ ) |       |       |       |       |       |       |       |        |       |
|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|      | 土地利用       | 坡向    | 坡度    | 高程    | 湿度    | 人口密度  | 气温    | 降水    | 国内生产总值 | NDVI  |
| 2005 | 0.910      | 0.003 | 0.283 | 0.262 | 0.073 | 0.064 | 0.049 | 0.048 | 0.077  | 0.050 |
| 2010 | 0.936      | 0.002 | 0.266 | 0.237 | 0.025 | 0.061 | 0.010 | 0.036 | 0.047  | 0.082 |
| 2015 | 0.908      | 0.002 | 0.267 | 0.236 | 0.017 | 0.036 | 0.042 | 0.010 | 0.035  | 0.093 |
| 2020 | 0.893      | 0.002 | 0.351 | 0.310 | 0.051 | 0.099 | 0.025 | 0.081 | 0.084  | 0.094 |

不同因子间的交互作用对黄河流域下游城市群生境质量的影响如图 4 所示。由图 4 可知,4 个年份不同因子间的交互作用均相互增强,具体表现为双因子增强型和非线性增强型。总体来看,土地利用与其他因子间交互作用相对较大,坡向与其他因子间交互作用相对较小。从时间维度上看,经济因素(国内生产总值、人口密度)和地形因素(坡度、坡向、高程)与其他因子的交互作用波动上升,气候因素(降水、气温、湿度)与其他因子的交互作用变化不大。由此可见,经济因素、地形因素及土地利用的交互作用增强了对生境质量变化的解释程度,主要是因为土地利用是生境质量的决定性因素,同时土地利用类型也受到地形因素的影响。此外,土地利用很大程度上受到经济因素的影响,经济的发展伴随着建设用地等的不断扩张,对林地、水域等高生态价值生境的生境造成了破坏,导致威胁源数量的不断增加,通过影响了土地利用的空间分布对生境质量造成影响,使因子间交互作用比单因子更加显著。气候因素的交互作用基本不变表明其对生境质量的空间分异的影响不明显,但降水、湿度等各种气候因素也会通过作用于生态环境,进而通过土地利用对生境质量高低造成影响。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

在整个研究期内,黄河流域下游城市群生境质量

总体呈现先降低后上升的趋势,但上升的幅度不大。一方面,黄河流域下游城市群在经济快速发展的过程中对生态环境造成了破坏,林地、草地面积的减少使生态系统面临巨大压力。另一方面,随着下游城市群城市化进程的加速,人口密度的增加与建设用地的扩张对生态环境的健康造成了冲击。这些都导致黄河流域下游城市群生境质量的下降。针对本文研究结果,提出以下政策建议:①针对黄河流域下游城市群生境质量高值区,要继续加强对生态环境的保护,必要时将生境质量高值区域划入生态保护红线,通过法治手段保护其生态安全;针对生境质量低值区,对土地利用开发强度要严格要求,杜绝建设用地无序扩张的现象出现,实施低效用地再开发,提升土地的利用效率,同时优化经济布局,推动绿色发展,加强经济建设与生态保护间的联系,改善生境质量。②完善黄河流域下游城市群跨区域生态补偿机制,扩大城市间横向生态补偿范围,建立城市间绿色利益分享机制。通过增加城市绿地、修建湿地公园等手段,改善城市生态环境,促进城市生境质量提升,促进下游城市群生境质量低值集聚向高值聚集转变。

本研究通过 InVEST 模型对黄河流域下游城市群的生境质量进行了评估,并分析其时空演变特征,利用地理探测器对生境质量的影响因素进行探测。丰富了对黄河流域生境质量的研究尺度,同时研究结果可以为黄河流域生态保护和高质量发展提供参考。但由于 InVEST 模型的局限性,威胁源及生境敏感度



参数的设定存在一定的主观性,因此模型还有优化提升的空间。此外,使用地理探测器对生境质量影响因子进行探测时虽然考虑了多种因素,但仍有一些影响

因素尚未考虑,如夜间灯光数据、路网数据等等。在未来的研究中可以制定一套综合性评判指标,使地理探测器的结果更加科学可靠。

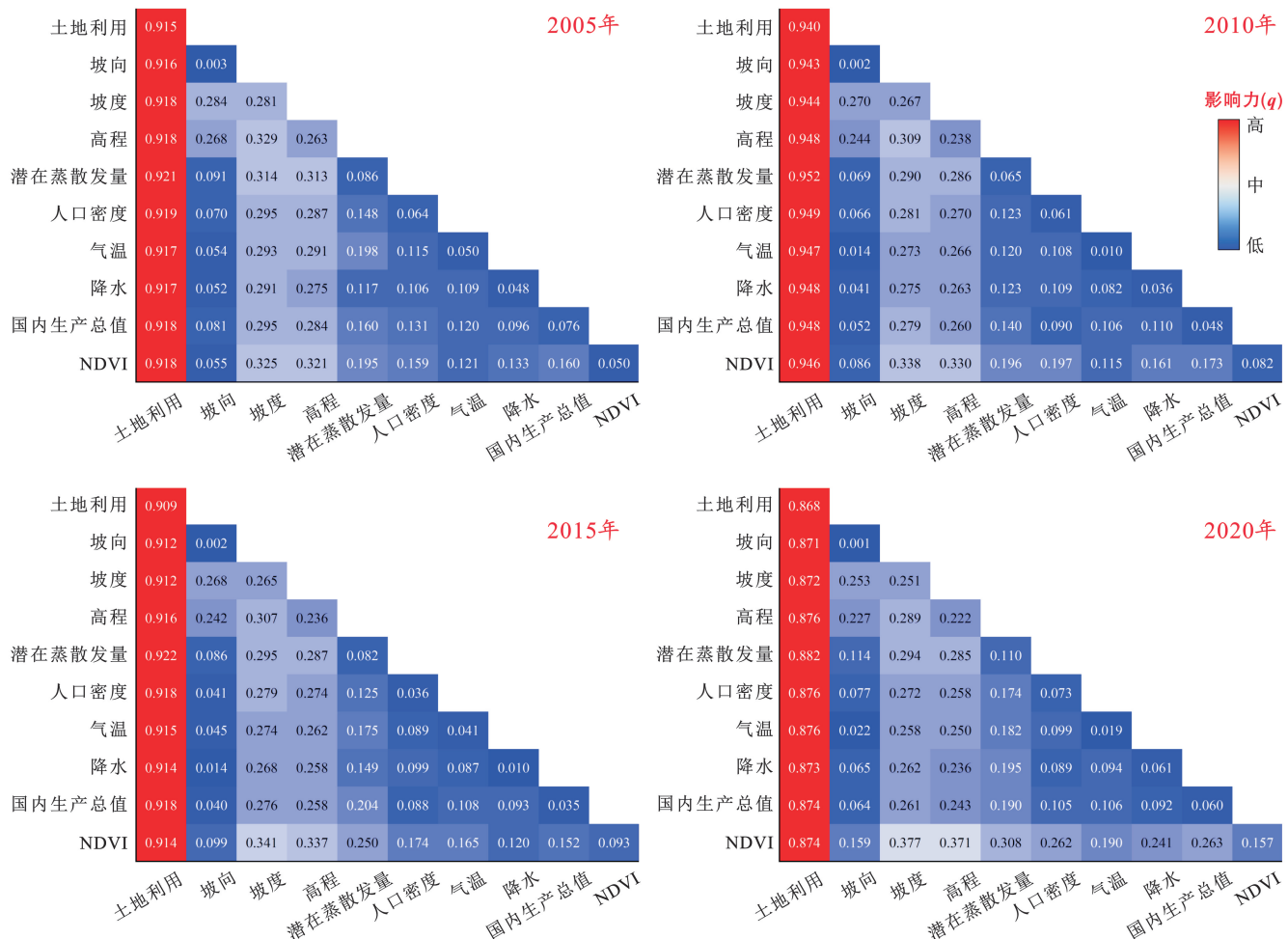


图 4 黄河流域下游城市群 2005—2020 年生境质量交互探测结果

Fig.4 Habitat quality cross-detection results for Lower Yellow River basin urban agglomeration in 2005—2020

### 3.2 结论

(1) 黄河流域下游城市群 4 个时期的生境质量分别为 0.411 2, 0.400 6, 0.397 5 和 0.399 4, 且生境质量分布和土地利用类型高度吻合。高等级生境质量分布于林地、水域等具有高生态价值的区域附近, 低等级生境质量分布于各个城市中耕地及建设用地的聚集区。总的来看, 生境质量整体开始向好转变, 其中山东半岛城市群沿海区域及开封市西南部的生境质量有明显提高。

(2) 空间自相关分析结果表明, 4 个时期黄河流域下游城市群生境质量 Moran's *I* 分别为 0.797, 0.784, 0.783 和 0.787, 在空间上表现出高度正相关性, 且呈现出两极空间集聚的特征, 即高等级生境质量与低等级生境质量出现了集聚态势, 高等级集中在中原城市群西部、北部及山东半岛城市群中部, 低等

级集中在城市群中经济发展较好的城市。

(3) 地理探测器探测结果表明, 土地利用对生境质量的影响力均高于其他因子, 是生境质量的决定性因素, 其次是地形因素, 经济因素和气候因素的影响力较低。各驱动因子对生境质量的影响力存在明显差异, 且各因子间的交互作用强于单个因子对生境质量的影响。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 薛明月. 黄河流域经济发展与生态环境耦合协调的时空格局研究[J]. 世界地理研究, 2022, 31(6): 1261-1272.  
 [2] 雷金睿, 陈毅青, 陈宗铸, 等. 基于 InVEST 模型的海南岛三大流域生境质量时空演变[J]. 应用生态学报, 2022, 33(9): 2511-2520.  
 [3] 刘汉仪, 林媚珍, 周汝波, 等. 基于 InVEST 模型的粤港澳大湾区生境质量时空演变分析[J]. 生态科学, 2021, 40



- (3):82-91.
- [4] 赵庆建,吴晓珍.基于 InVEST 模型的岷江流域土地利用变化对生境质量的影响研究[J].生态科学,2022,41(6):1-10.
- [5] 孙汇颖,宫巧巧,刘庆果,等.基于土地利用变化的山东省生境质量时空演变特征[J].土壤通报,2022,53(5):1019-1028.
- [6] 杨志鹏,许嘉巍,冯兴华,等.基于 InVEST 模型的东北地区土地利用变化对生境的影响研究[J].生态科学,2018,37(6):139-147.
- [7] 刘娇,郎学东,苏建荣,等.基于 InVEST 模型的金沙江流域干热河谷区水源涵养功能评估[J].生态学报,2021,41(20):8099-8111.
- [8] Zhao Yonghua, Qu Zhi, Zhang Yang, et al. Effects of human activity intensity on habitat quality based on nighttime light remote sensing: a case study of Northern Shaanxi, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,851:158037.
- [9] 王森.延安市土地利用变化及其水土保持功能效应研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2018.
- [10] Bai Limin, Xiu Chunliang, Feng Xinghua, et al. Influence of urbanization on regional habitat quality: a case study of Changchun City [J]. *Habitat International*, 2019,93:102042.
- [11] Zhu Congmou, Zhang Xiaoling, Zhou Mengmeng, et al. Impacts of urbanization and landscape pattern on habitat quality using OLS and GWR models in Hangzhou, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020,117:106654.
- [12] 庞惠心,安睿,刘艳芳.武汉市城市化进程中生境质量对景观格局的样带响应[J].生态科学,2022,41(3):33-43.
- [13] 张丹华,王洋,么宁.辽中南城市群城市化及生态效应[J].应用生态学报,2022,33(9):2521-2529.
- [14] 梁晓瑶,袁丽华,宁立新,等.基于 InVEST 模型的黑龙江省生境质量空间格局及其影响因素[J].北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(6):864-872.
- [15] 陈实,金云翔,黄银兰.长三角中心区生境质量时空变化及其影响机制[J].生态学杂志,2023,42(5):1175-1185.
- [16] 潘耀,尹云鹤,侯文娟,等.基于土地利用及植被覆盖变化的黄河源区生境质量时空变化特征[J].生态学报,2022,42(19):7978-7988.
- [17] 冯琰玮,甄江红.黄河流域内蒙古段生态安全格局优化研究[J].中国农业资源与区划,2022,43(10):129-138.
- [18] 赵诚诚,潘竟虎.基于供需视角的黄河流域甘肃段生态安全格局识别与优化[J].生态学报,2022,42(17):6973-6984.
- [19] 任娟,赵雪雁,徐省超,等.黄河中游地区生态系统服务的时空演变及权衡与协同关系研究[J].地球环境学报,2022,13(4):477-490.
- [20] 秦华,任保平.黄河流域城市群高质量发展的目标及其实现路径[J].经济与管理评论,2021,37(6):26-37.
- [21] 张诗嘉,杜书云,刘晓英,等.黄河下游城市群土地利用生态效率时空差异及影响因素研究[J].资源开发与市场,2022,38(3):280-289.
- [22] 郑贱成,谢炳庚,游细斌.基于土地利用变化的广东省生境质量时空演变特征[J].生态学报,2022,42(17):6997-7010.
- [23] 邓楚雄,郭方圆,黄栋良,等.基于 INVEST 模型的洞庭湖区土地利用景观格局对生境质量的影响研究[J].生态科学,2021,40(2):99-109.
- [24] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA [J]. *Geographical Analysis*, 1995,27(2):93-115.
- [25] 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.
- [26] 靳海霞,田惠文,张欣欣,等.山西沿黄 19 县生境质量时空演变特征及驱动机制[J].人民黄河,2022,44(10):89-94,100.
- [27] 陈慧敏,赵宇,付晓,吴钢.西辽河上游生境质量时空演变特征与影响机制[J].生态学报,2023,43(3):948-961.
- [28] 杨洁,谢保鹏,张德罡.黄河流域生境质量时空演变及其影响因素[J].中国沙漠,2021,41(4):12-22.