

中部快速城镇化地区生境质量时空演变及影响因素研究

汪勇政^{1, 2}, 梁 哲¹, 余浩然³

(1. 安徽建筑大学 建筑与规划学院, 安徽 合肥 230022;

2. 安徽省城镇化发展研究中心, 安徽 合肥 230022;

3. 南京林业大学 风景园林学院, 江苏 南京 210037)

摘 要: 探究中部快速城镇化地区的生境质量时空变化以及影响因素对构建区域生态稳定、揭示人类活动对该地区生态环境的影响程度有重要意义。本文以典型中部快速城镇化地区为研究区, 基于 InVEST 模型和空间计量模型综合评价 2000–2020 年期间生境质量的时空演变与变化原因, 结果如下: (1) 合肥都市圈生境质量出现明显的空间分异现象, 生境质量较好的用地构成林地、草地、水域; 较差区域用地中城乡建设用地扩展最为明显, 耕地次之; 20 年间生境质量呈现“慢—快—慢”的下降趋势, 2010–2020 年期间恶化速度趋缓; (2) 在空间布局特征上, 山区生境质量高于丘陵、平原地区; (3) 从景观格局指数与城镇化两个角度选取影响因子, 发现近 20 年来城镇化指标对合肥都市圈生境质量的均为负向效应, 景观格局指数对其呈现正相关。合肥都市圈整体生境质量的变化剧烈程度与其周边城镇化速率有关, 具有一定的空间聚集性, 平原地区变化程度相较于山区更加剧烈, 呈现一定的梯度效应。本研究可为区域生态保护规划和类似区域研究提供科学参考。

关键词: InVEST 模型; 生境质量; 快速城镇化地区; OLS 模型; SEM 模型

中图分类号: F323.22

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382 (2022) 04-053-08

Study on the Temporal and Spatial Evolution and Influencing Factors of Habitat Quality in the Rapidly Urbanizing Area in Central China

WANG Yongzheng^{1, 2}, LIANG Zhe¹, YU Haoran²

(1. School of Architecture and Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, China;

2. Research Center of Urbanization Development in Anhui Province, Hefei 230022, China;

3. School of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Exploring the temporal and spatial changes and influencing factors of habitat quality in the rapidly urbanizing areas in central China is of significance for studying the regional ecological stability and the impact of human activities on the regional ecological environment. Based on the InVEST model and the spatial econometric model, the temporal and spatial evolution and influencing factors of habitat quality during 2000–2020 in Hefei, a typical rapidly urbanizing area, are studied. It is found that, (1) habitat quality in the Hefei metropolitan area showed obvious spatial differentiation, and the land with better habitat quality consisted of woodland, grassland, and water; among the land in poorer areas, urban land expands most significantly, followed by arable land. The habitat quality shows a “slow-fast-slow” declining trend over the 20-year period, with a slowdown in the rate of deterioration between 2010

收稿日期: 2021-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51778002); 安徽省高校省级人文社会科学研究项目重点项目 (SK2020A0257)

作者简介: 汪勇政 (1979-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 区域生态规划、土地资源与 GIS。

and 2020; (2) in terms of spatial distribution characteristics, the habitat quality of mountainous areas is higher than that in hilly and plain areas; (3) in terms of the landscape pattern and urbanization indexes, the later had a negative influence on the habitat quality of Hefei metropolitan area in the past 20 years, while the former was positive. The drastic degree of habitat quality change in the Hefei metropolitan area is related to the rate of urbanization, with a certain spatial aggregation; the degree of change in the plain area is more drastic than that in the mountainous area, showing a certain gradient effect. This study aims to provide reference for regional ecological protection planning and similar regional studies.

Keywords: InVEST model; habitat quality; rapid urbanization area; OLS model; SEM model

生境质量是指生态系统为生物个体或种群提供适宜并可持的资源生存和繁衍条件的能力,能在一定程度上反映区域生物多样性状况^[1]和生态系统的健康状况^[2]。过去由于人类大量的建设行为和生态保护意识的缺乏导致了生境的破碎、消失和质量退化,对生物多样性水平和人类赖以生存的福祉造成了不可估量的损伤^[3]。土地利用变化已经成为生境质量最主要的威胁因子^[2]。因此,基于土地利用变化,分析区域生境质量的时空分布特征及影响因素,对稳定区域生态系统和可持续利用土地资源具有重要意义。目前国内外对生境质量的研究基于不同尺度^[4-6]、评价指标体系的构建^[7-9]、未来情景的生境质量模拟预测^[10-12]、土地利用与生境质量的演化关系^[6,13-14]等研究方面进行大量的基础研究和应用研究。总的来说,学者们在生境质量的研究上取得丰硕成果,对各个研究方面都进行了较为深入地探索。但是现有研究过多关注固有行政区域内整体的生境质量变化,忽略了生境质量的蔓延效应及互馈机制,应尝试打破行政区划的限制,借助地理格网的尺度效应与空间特性,反映出更加细微的区域生境质量变化规律,从而更好地针对生态环境问题提出区域协同的保护策略。

合肥都市圈是中部地区典型的快速城镇化地区,高速发展的过程中大量自然土地直接转变为建设用地,大量乡村人口向城市流动,极大地改变了都市圈内的土地利用方式和景观格局,加剧了环境污染和自然资源消耗,带来了土地退化、水土流失、空气质量和水质恶化、生境破碎化等环境问题,严重削弱了区域自然生态系统的生态系统服务能力。如何更好地识别区域发展中恶化的生态区域位置及变化幅度,是今后更好支持区域发展的关键

因素。因此,本研究选取合肥都市圈为研究区域,基于五期土地利用数据,利用 InVEST 模型和地理格网分析法分析不同时空背景下快速城镇化地区生境质量变化时空特点,采用 SEM 模型定量评估景观格局和城镇化要素对生境影响程度,以期合肥都市圈地区生态保护及土地可持续利用提供有益参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

合肥都市圈位于长江中下游沿江长三角西端,安徽省中部,地域范围包括七个地级市和一个县级市(如图 1)。北部与淮北平原相接,南与皖南地区相依,东以江苏交接,西与河南、湖北相邻。合肥都市圈地势总体为西高东低,横跨长江流域和淮河流域,西有大别山山区,东北有滁河流域。经济总量约占全省生产总值的 60%,是长三角城市群重要的增长极,也是中部地区最具活力的快速城镇化地区之一。2000 年以来,随着城镇用地的快速扩展,区域生态环境下降、生境破碎化现象严重。

1.2 数据来源及处理

本研究所用数据包括:2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年土地利用数据(精度 30 m×30 m),五期人口空间分布公里网格数据(精度 100 m×100 m),来源于中国科学院资源环境科学数据中心;2000 年、2005 年、2010 年采用校正后的 DMSP/OLS 夜间灯光数据(精度 1 km×1 km),来源于美国国家地球物理数据中心网站;2015 年、2020 年采用 NPP-VIIRS 夜间灯光数据(精度 500 m×500 m),来源于地球观测组网站。对所有数据进行预处理,统一所有数据坐标系 WGS-1984-UTM-Zone-50N 和精度为 30 m。

1.3 研究思路与方法

1.3.1 InVEST 模型 Habitat Quality 模块

InVEST 模型是用于生态系统服务功能评估模型,其中生境质量评价模块是基于土地覆被与生境威胁源联系,通过对胁迫半径、空间权重、空间衰减类型等方面综合考量计算威胁源的威胁强度,结合其他地类生境适应情况、对威胁源的敏感度得到该地区的生境质量,具体公式如下:

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

式中, Q_{xj} 为景观类型 j 中 x 栅格的生境质量指数; H_j 值为 $[0, 1]$, 代表景观类型的生境适宜性分值 k 为半饱和常数, 根据研究区数据精度设定 z 为尺度常数, 一般取 2.5。本研究基于 InVEST 模型手册及相关研究^[15]、地域实际情况设置模块参数。并将生境质量等距分为优、良、中、较差、差五个等级。

1.3.2 空间网络的确定

本文以格网为评价单元,参考国家格网 GIS 相关标准,格网宜采用平均斑块面积的 2~5 倍,在此基础上参考前人相关研究^[16]并考虑研究区实际情况、工作量及空间粒度问题,最终选取 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 的正方形格网对研究区进行划分,选取景观总面积占评价单元面积比例大于 1/3 的格网,共 4 236 个。

1.3.3 空间自相关及热点分析

为进一步探索合肥都市圈生境质量的空间格局演变特征,网格尺度提取研究区五个节点生境质量的平均值,通过全局空间自相关和热点分析进行空间特征分析。空间自相关分析作为探寻要素属性在空间位置关联程度的方法被学者广泛使用,通过计算全局自相关 Moran's I 指数探求不同年份生境质量指数整体的聚集程度。Getis-Ord G_i^* 指数能够计算得出研究区内具有显著统计学意义的生境质量高值聚集热点和低值聚集冷点,具体公式及操作方法参考相关文献^[17]。

1.3.4 空间计量分析模型

由于生境质量及其影响因素在空间上具有自相关性^[18],传统的回归模型(OLS)拟合时会打破残差项相互独立的基本假设,无法真实反映生境质量与影响因素之间的关系。空间计量分析模型充分考虑了因子在空间中的复杂交互作用及空间依存效应,会更好地揭示因素之间的相互关系。本文采用空间计量分析模型,定量评估景观格局和城镇化要素对生境影响程度。变量在空间上不同的相互作用呈现出不同的空间效应,对其定量评估的模型主要为两种:空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)。据 Anselin 提出的验证标准表明,施瓦茨准则(SC)、赤池信息准则(AIC)和参数 σ^2 越小,对数似然值(LogL)和判定系数 R^2 越大,拟合程度越好,限于篇幅,具体公式介绍参考相关文献^[19]。

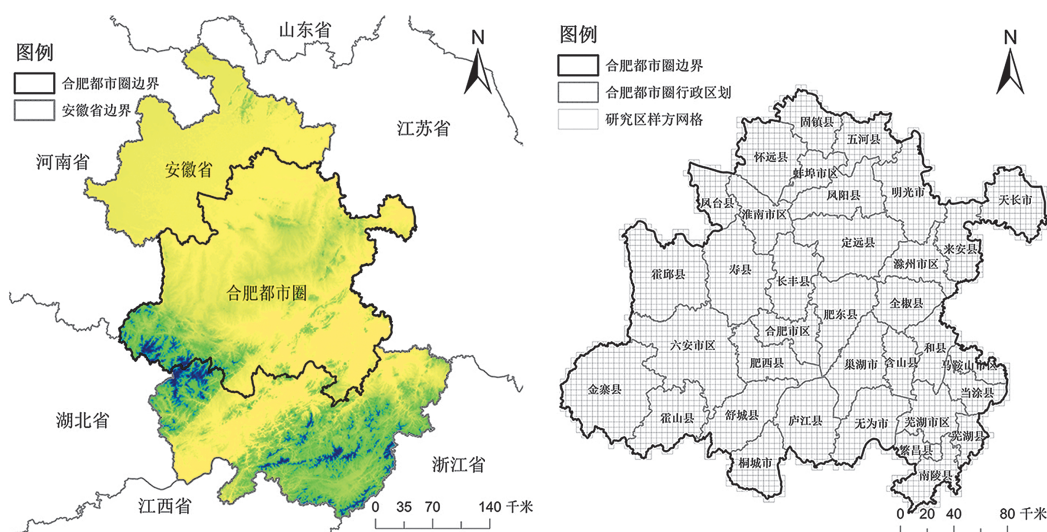


图1 合肥都市圈位置及空间采样网格

1.3.5 城镇化与景观格局指标选取

城镇化概念的内涵主要从人口、经济、社会、土地四个方面展开^[20],最终选取人口密度、夜间灯光数据、土地城镇化率三个主要指标。景观格局的变化可以反映人类活动对生态环境的空间影响,对生境格局和功能有显著影响。本文基于景观格局指数之间的低相关性并结合合肥都市圈快速城镇化地区特征^[21],选取四项指标分析,具体如表 3 所示。

2 结果分析

2.1 合肥都市圈生境质量变化时间特征

图 2 所示,2000–2020 年期间,合肥都市圈的生境质量为中等水平,生境质量平均指数在 0.47 以上,其中等级为优、中、较差的栅格数占比逐年降低,其中较差栅格的降低速率呈现由快变慢的趋势。等级为良、差的栅格数占比逐年增加,等级为差的栅格增长速率经历的了由快向慢的趋势。合肥都市圈的生境质量指数平均水平不高且处于逐年下降的趋势,下降趋势呈现“慢—快—慢”。

2.2 合肥都市圈生境质量等级空间分布特征

图 3 可知,合肥都市圈内大别山地区、巢湖流域、淮河流域、滁州市西部丘陵区、马鞍山市西部山区、芜湖市沿江流域和西南部山地,生境质量较好,等级为优和良。用地类型主要以水域、林地和草地为主,地势复杂受人类活动影响较小,相对其他区域生境质量较为良好,20 年来变化不显著。中部、西部、北部和东南部以平原为主,适宜城市建设和农业种植,以城镇建设用地、耕地和农村居民点用地为主。前期城市扩张过程中,大量林地、草地被侵占,导致这一区域生境质量的水平普遍较低,生境等级为差的斑块的空间格局呈现出以城镇区域为核心的辐射状分布特点,2000–2005 年期间等级为差的斑块呈现出小程度的扩散;2005–2020 年期间斑块扩散范围明显变大,其中合肥市区扩散范围最为显著,逐渐向巢湖方向扩散。

2.3 合肥都市圈生境质量空间集聚特征分析

2.3.1 总体集聚特征

五期节点数据的 Moran' s I 指数分别为 0.844 2、0.839 1、0.839 0、0.834 2、0.837 0,Z 值均远

表 3 解释变量信息表

指标	变量	符号	解释变量
城镇化	人口密度	POP	每平方公里的人口数量,反映人口聚集程度
	夜间灯光数据	NTL	反映社会经济情况
	土地城镇化率	LUR	城市建设用地占城乡用地的比重,反映土地流转速度
景观格局	斑块密度	PD	反映区域景观破碎化程度,数值越大斑块分散程度越大
	散步与并列指数	IJI	反映各斑块的散步情况
	香农多样性指数	SHDI	反映斑块类型间的丰富程度
	聚合度指数	AI	反映斑块间的连通性

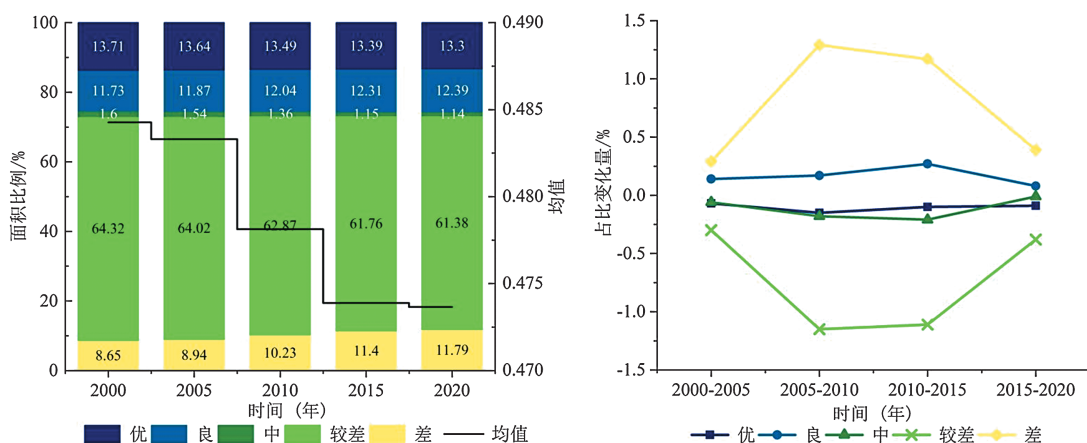


图 2 2000–2020 年生境质量等级占比变化及等级占比变化量

大于 2.58, P 值均通过了 1% 显著性检验,说明合肥都市圈内生境质量值空间分布存在显著的空间关联性。

五期数据的 Moran' s I 指数皆大于 0.8, 呈显著的聚集分布,即生境质量高值在空间上聚集,低值趋于相邻。2000–2015 年 Moran' s I 指数逐年下降,2015 年后出现回升,表明自 2000 年以来,合肥都市圈生境质量的集聚效应持续轻微减弱,生境斑块出现微弱破碎化现象;2015 年后生境斑块趋于整合。

2.3.2 局部集聚特征

通过热点分析探索生境质量高值和低值集聚区在合肥都市圈 35 个县市的分布情况,如图 4 所示。2000 年合肥都市圈生境质量集聚特征为中部、西部、北部冷点成片分布,东南部热点成片,东部、南部热点分散。2000–2005 年各县冷点数出现微弱减少,合肥市区和六安市区冷点集聚程度变大;2005–2010 年期间合肥都市圈中部、北部、西部各县的较多冷点变为不显著,各地级市市区的冷点聚集范围出现不同程度地扩散以及集聚程度加强,合

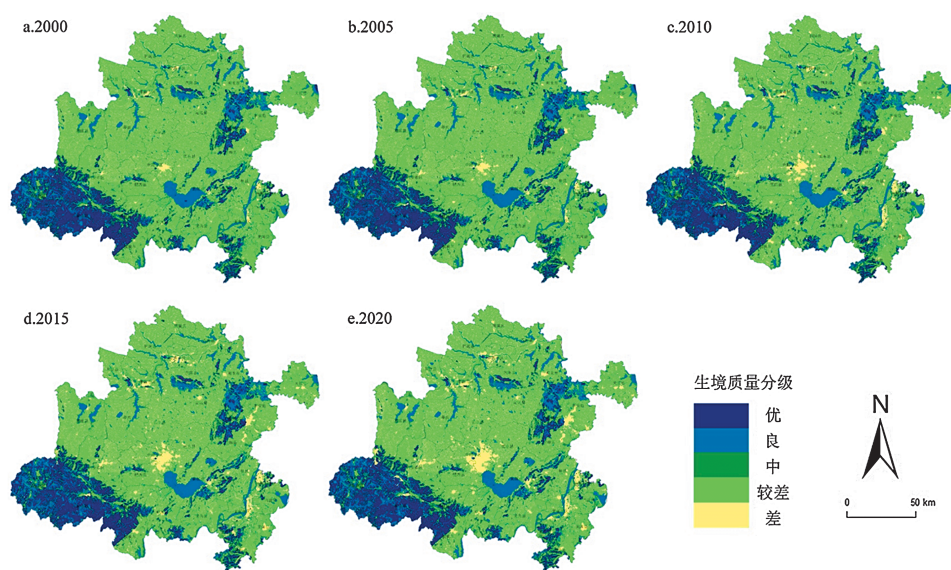


图3 2000–2020 年合肥都市圈生境质量空间分布

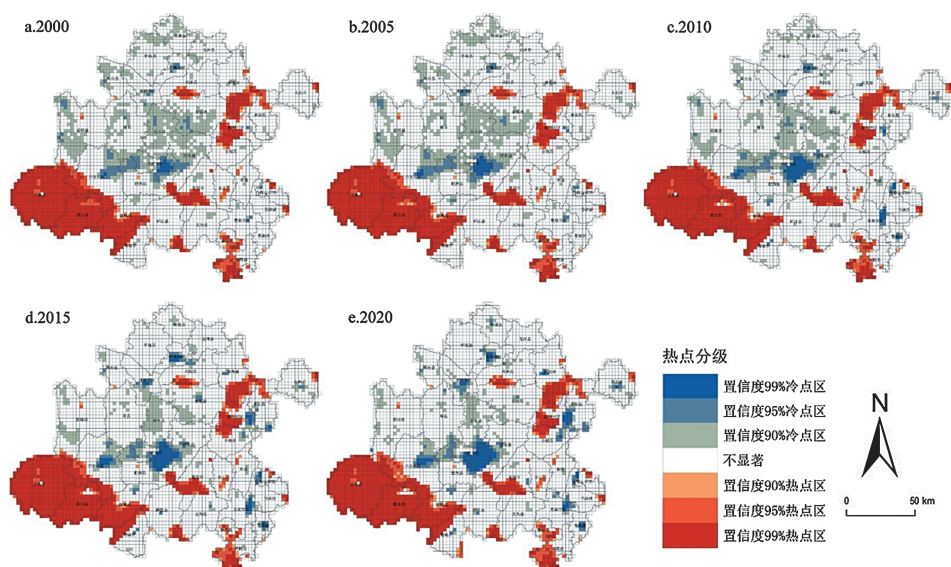


图4 2000–2020 年生境质量热点分析

肥市区、芜湖市区和马鞍山市区较为显著。

2010–2015 年期间都市圈中部、北部各县的大量冷点继续变为不显著,冷点分布呈现破碎化。各地级市市区冷点范围和集聚程度继续加强,蚌埠市、滁州市、马鞍山市、芜湖市市区表现最为显著。至 2015 年,合肥都市圈生境质量的冷点分布呈现以地级市市区为核心的多极点分布格局,该时期热点的范围减少,主要表现为霍山县的部分由热点区域变为不显著区域。

2015–2020 年期间中部和西部大量冷点区域不再显著,各地级市冷点集聚程度进一步加剧且范围持续扩大,霍山县与六安市区南部热点集聚程度下降且不显著范围增加,繁昌县中部和桐城市南部地区出现了热点范围增加的趋势。

2.4 合肥都市圈生境质量时空演变影响因素

2.4.1 空间计量模型的选取

Moran's I 指数显示合肥都市圈生境质量存在空间自相关,导致传统的回归模型(OLS)拟合程度较低,已不能准确描述都市圈内部生境质量的影响因素。本文将空间要素考虑其中,借助空间计量模型探讨城镇化和景观格局对生境质量的影响。

在空间计量经济学研究中,首先利用 OLS 模

型回归之后,进行拉格朗日检验,结果表明所有参数值均通过了 1% 的显著性检验。因此,本文通过比较 SLM 和 SEM 模型的相关参数进行模型选取。如表 4,结果显示 SEM 模型拟合优度更好,最终本文选取该模型对影响因素进行解读。

2.4.2 模型结果解读

由表 6 可知,POP、NTL、LUR、SHDI、AI 指数对合肥都市圈生境质量有显著的影响作用,均通过了 1% 显著性检验。POP、NTL、LUR 对于生境质量呈负相关,SHDI 与 AI 对于生境质量呈正相关。

城镇化水平指标均对合肥都市圈生境质量产生负向影响,POP 和 NTL 是主导负向影响因素。POP 对生境质量的负向影响在 2000–2005 年期间增强后逐渐变弱;NTL 在 2000–2005 年期间经历小幅的下降后持续变强,2010 年后成为主导负向因素。景观格局指标均对合肥都市圈生境质量产生正向影响,SHDI、AI 是主导正向影响因素。SHDI 的影响效应持续下降,2010 年后 AI 成为主导正向影响因素。

2000–2005 年期间,POP 和 LUR 负向影响加剧和 SHDI、AI 正向影响减弱成为该阶段生境质量变差的主要原因,由于影响因素的回归系数变化速率

表 4 空间误差模型与空间滞后模型拟合优度对比

	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	SEM	SLM	SEM	SLM	SEM	SLM	SEM	SLM	SEM	SLM
R ²	0.868 9	0.863 5	0.868 2	0.8623	0.867 1	0.857 2	0.8645	0.851 6	0.861 3	0.851 1
LogL	4 844.7	4 819.2	4 899.1	4865.1	4 800.7	4 708.5	4697.6	4 567.9	4 653.2	4 509.4
AIC	-9 673.5	-9 620.4	-9 782.1	-9712.3	-9 585.5	-939 8.9	-9379.2	-9 117.8	-9 290.4	-9 000.9
SC	-9 622.7	-9 563.2	-9 731.3	-9655.1	-9 534.6	-934 1.7	-9328.3	-9 060.6	-9 239.6	-8 943.7
σ^2	0.004 8	0.005 0	0.004 7	0.0049	0.004 9	0.005 3	0.0051	0.005 6	0.005 3	0.005 8

表 5 空间误差模型回归估计

变量	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	系数	标准差	系数	标准差	系数	标准差	系数	标准差	系数	标准差
CONSTANT	0.355 8**	0.026 0	0.381 8**	0.025 3	0.376 4**	0.025 3	0.357 6**	0.025 1	0.376 9**	0.025 4
POP	-0.421 7**	0.049 4	-0.424 5**	0.049 7	-0.345 1**	0.050 4	-0.2997**	0.053 3	-0.222 7**	0.054 6
NTL	-0.310 1**	0.035 7	-0.299 0**	0.031 6	-0.446 3**	0.031 4	-0.505 2**	0.028 3	-0.584 8**	0.030 9
LUR	-0.045 3**	0.010 4	-0.060 8**	0.009 9	-0.056 8**	0.010 0	-0.048 7**	0.009 4	-0.058 2**	0.008 9
PD	-0.037 9	0.024 1	-0.033 9	0.023 3	0.017 9	0.029 9	0.061 0*	0.030 0	0.042 4	0.034 5
IJI	0.009 5	0.006 4	0.010 1	0.006 3	0.021 4**	0.006 4	0.024 2**	0.006 5	0.026 2**	0.006 6
SHDI	0.147 9**	0.013 0	0.136 1**	0.012 7	0.116 6**	0.012 9	0.113 4**	0.012 9	0.109 7**	0.013 2
AI	0.130 6**	0.017 6	0.113 9**	0.017 2	0.118 0**	0.017 3	0.137 2**	0.017 7	0.113 3**	0.018 3
λ	0.946 0**	0.005 6	0.945 3**	0.005 6	0.943 9**	0.005 7	0.940 7**	0.005 9	0.939 8**	0.006 0

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

缓慢呈现出生境质量缓慢变差的现象。2005–2010年期间,NTL的负向影响快速增强推动了该阶段生境质量变差速度激增,而NTL负向影响加剧减缓与POP的负向效应减弱成为2010–2020年期间生境质量恶化缓和的主要原因。

根据环境库兹涅茨曲线理论和学者相关研究^[22],城镇化与环境污染呈现倒“U”型关系。在城镇化发展初期,社会经济发展主要依靠工业化,导致土地利用方式粗放、景观斑块破碎,加剧了环境污染程度。环境恶化程度随城镇化的增长而加剧,当城镇社会经济发展和人口集聚达到一定水平、到达某个临界点后,人口集聚的结果将会产生规模效益;同时重视产业的转型,重视科技产业的培育带来环境技术的创新和绿色溢出效应。此后随着人口和城镇社会经济水平的进一步增加,对于土地利用方式和景观格局更加合理环境污染的程度逐渐减缓,最终环境质量逐渐得到改善。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文利用InVEST模型和空间计量分析模型对2000–2020年合肥都市圈生境质量的时空演变及影响因素进行探究。结果表明:

(1)20年来,合肥都市圈生境质量持续下降,呈现出“慢—快—慢”的趋势,整体空间分布具有较强的异质性。生境质量等级以较差和差为主,主要分布在中部、西部、北部和东南部大部分地区,变化呈现出以城镇为核心辐射扩散的特点。

(2)合肥都市圈范围内生境质量具有显著的空间集聚性。基于热点分析,生境质量冷点主要分布在以合肥为核心的都市圈中部以及西北边缘部分,热点分布在大别山区及都市圈东部南部地区。变化趋势呈现热点逐渐破碎化,高集聚冷点以各市区为核心扩散,中部和西北部各县冷点显著减少的特点。

(3)近20年,城镇化对合肥都市圈生境质量的均为负向效应。POP、NTL是主要负向影响因素,POP的影响经短暂的增强后逐年减弱,NTL的影响逐年增强。景观格局指数均为正向效应,SHDI、AI是主要正向影响因素,影响效应逐年减弱。2000–2005年期间POP和LUR的负向作用加强,AI的正

向作用减弱导致了此阶段生境质量变差。2005年后NTL的负向效应成为生境质量变差的主要原因。

3.2 讨论

尽管该研究具有一定实践指导价值,但也存在一定局限。生境质量受多重自然因素和人为因素的影响,比如可能受到区域外人类活动空间溢出效应的影响,使生境质量出现复杂变化。其次,空间尺度效应是地理学和景观生态学研究的关键问题之一,本研究在考虑到土地利用数据的分辨率不变的基础之上计算相关指标。对不同粒度和不同研究尺度下的生境质量和景观格局的差异,还需今后深入探讨。

参考文献:

- [1] Terrado M, Sabater S, Chaplin-Kramer B, et al. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 540: 63–70.
- [2] 荣月静, 张慧, 王岩松. 基于Logistic-CA-Markov与InVEST模型对南京市土地利用与生物多样性功能模拟评价[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 82–89.
- [3] 谢余初, 巩杰, 张素欣, 等. 基于遥感和InVEST模型的白龙江流域景观生物多样性时空格局研究[J]. *地理科学*, 2018, 38(6): 979–986.
- [4] 吴楠, 陈红枫, 冯朝阳, 等. 基于土地覆被变化的安徽省生境质量时空演变特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(5): 1119–1127.
- [5] Peng C, Min M, Wei Z, et al. Spatial differentiation pattern of habitat quality and mechanism of factors influencing in resource-based cities: a case study of Tangshan City, China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12(5): 636–649.
- [6] 刘春芳, 王川. 基于土地利用变化的黄土丘陵区生境质量时空演变特征: 以榆中县为例[J]. *生态学报*, 2018, 38(20): 7300–7311.
- [7] Purcell A H, Friedrich C, Resh V H. An assessment of a small urban stream restoration project in northern California[J]. *Restoration Ecology*, 2002, 10(4): 685–694.
- [8] 王建华, 田景汉, 吕宪国. 挠力河流域河流生境质量评价[J]. *生态学报*, 2010, 30(2): 481–486.
- [9] 郑丙辉, 张远, 李英博. 辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 928–936.
- [10] 和娟, 师学义, 付扬军, 等. 汾河源头区域土地利用及生境质量时空演变的多情景模拟[J]. *水土保持研究*,

- 2020, 27 (5): 250–258.
- [11] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 等. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测 [J]. 应用生态学报, 2018, 29 (12): 4106–4118.
- [12] Gomes E, Inácio M, Bogdžević K, et al. Future scenarios impact on land use change and habitat quality in Lithuania [J]. Environmental Research, 2021, 197: 111101.
- [13] Chen M J, Bai Z K, Wang Q R, et al. Habitat quality effect and driving mechanism of land use transitions: a case study of Henan water source area of the middle route of the south-to-north water transfer project [J]. Land, 2021, 10 (8): 796.
- [14] Yang Y Y. Evolution of habitat quality and association with land-use changes in mountainous areas: a case study of the Taihang Mountains in Hebei Province, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 129: 107967.
- [15] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析 [J]. 生态学报, 2020, 40 (9): 2895–2906.
- [16] Rangel-Buitrago N, Neal W J, de Jonge V N. Risk assessment as tool for coastal erosion management [J]. Ocean & Coastal Management, 2020, 186: 105099.
- [17] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics [J]. Geographical Analysis, 2010, 24 (3): 189–206.
- [18] Li C, Li F B, Wu Z F, et al. Exploring spatially varying and scale-dependent relationships between soil contamination and landscape patterns using geographically weighted regression [J]. Applied Geography, 2017, 82: 101–114.
- [19] Anselin L. Spatial Econometrics: Methods and Models [M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [20] 陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析 [J]. 地理学报, 2009, 64 (4): 387–398.
- [21] Zhu C M, Zhang X L, Zhou M M, 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.
- [22] 杨肃昌, 孔晴, 徐立君. 产业和人口集聚对环境污染的影响: 基于省级层面的实证 [J]. 统计与决策, 2020, 36 (14): 55–60.

(上接第 47 页)

(2) 由于开挖过程中双线隧道间的互相作用, 导致埋深在 2D 以内时, 隧道间的土体会受到挤压而向上移动, 使得沉降曲线随着开挖的进行逐渐变为“双谷”形式, 但沉降峰值始终出现在左线隧道中心线附近。

(3) 当埋深增加至 2D 到 3.5D 之间时, 左线贯通的曲线峰值出现在左线隧道中心线处, 全线贯通的曲线峰值出现在双线隧道中心线处并且埋深与影响范围成正比, 与影响程度成反比。本文仅研究了埋深在 1.5D~3.5D 的情况, 建议增加隧道埋深的范围, 并研究施工时的其他参数对路基沉降有何种影响。

参考文献:

- [1] 严鹏飞, 殷建光, 葛新辉, 等. 不同埋深隧道开挖对地表沉降影响的三维有限元分析 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2021, 46 (1): 60–66.
- [2] 胡幼常, 陈晓鸣, 毛爱民, 等. 考虑地震荷载的加筋粗粒土坡安全系数简化计算方法 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2017, 41 (6): 943–948.
- [3] 甘晓露, 俞建霖, 龚晓南, 等. 新建双线隧道下穿对既有盾构隧道影响研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39 (S2): 3586–3594.
- [4] 王忠凯, 徐光黎. 基于三轴试验和联合强度理论预测盾构施工引起的地表变形 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38 (9): 1928–1936.
- [5] 杜明芳, 朱东东, 易领兵, 等. 大粒径卵石地层中盾构下穿既有铁路的影响分析 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2020, 43 (5): 660–666, 720.
- [6] 宋卫东, 陈瑞宏, 杜建华, 等. 北京地铁 10 号线国贸—双井区间土压平衡盾构施工数值模拟研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (S2): 3401–3407.
- [7] 赵丽雅, 许宏发, 晋学辉, 等. 盾构隧道下穿铁路群的路基加固及沉降分析 [J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15 (4): 85–90.
- [8] 高攀, 李文杰. 隧道相似模型中试验边界尺寸选取的探讨 [J]. 低温建筑技术, 2019, 41 (1): 81–85.
- [9] 高玄涛. 后建车站基坑开挖及区间近距离下穿既有车站安全技术措施研究 [J]. 贵州大学学报 (自然科学版), 2019, 36 (4): 101–110.
- [10] 朱荣军, 席培胜, 王枫, 等. 盾构施工对地表沉降的数值模拟分析 [J]. 佳木斯大学学报 (自然科学版), 2018, 36 (3): 346–349.
- [11] 张印涛, 陶连金, 边金. 盾构隧道开挖引起地表沉降数值模拟与实测分析 [J]. 北京工业大学学报, 2006, 32 (4): 332–337.
- [12] 马少坤, 邵羽, 刘莹, 等. 不同埋深盾构双隧道及开挖顺序对临近管线的影响研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38 (9): 2487–2495.