

## 南京市生境质量时空演变特征与影响因素研究

吴 榛<sup>1</sup>, 徐可依<sup>1</sup>, 钱燕萍<sup>2</sup>, 洪玉杰<sup>3</sup>

(1. 南京工业大学 建筑学院, 江苏 南京 210000; 2. 南京晓庄学院 环境科学学院, 江苏 南京 210000;  
3. 扬州市个园管理处, 江苏 扬州 225000)

**摘 要:**快速城镇化给区域土地利用及生态环境带来巨大变化,在此背景下开展南京市土地利用和生境质量的时空变化规律及其影响因素的研究,对推进南京市国土空间开发保护与高质量发展转型具有重要意义。基于 ArcGIS 软件、Fragstats、InVEST 模型、地理探测器定量分析南京市 2000—2020 年土地利用和生境质量的时空演变特征,探究南京市生境质量变化的主要驱动因子。结果表明,相比 2000 年,2020 年南京市耕地面积和林地面积分别下降了 802.37 km<sup>2</sup> 和 34.37 km<sup>2</sup>,降幅分别为 19.37% 和 4.90%;建设用地净增长 694.23 km<sup>2</sup>,增幅为 65.61%。2000—2020 年研究区内景观整体水平的连接度下降,景观破碎化程度加剧。平均生境质量指数由 0.38 下降到 0.27,2000—2010、2010—2020 年区域生境质量降幅分别为 21.05% 和 10.00%,前一时段降幅远高于后一时段,其中耕地向建设用地转移及耕地自身生境质量降低是南京市生境质量退化的主要原因,两者在各时段内对生境质量降低的贡献比分别占 38.08%、23.18% 与 52.60%、12.97%。年降水量、建设用地指数与夜间灯光为该区域生境质量空间分异的主要驱动因素。研究结果揭示了南京市生境质量的时空变化过程,为以南京市为代表的快速城镇化地区生态可持续发展及土地利用保护提供科学支撑。

**关键词:**南京市;生境质量;土地利用变化;InVEST 模型

**中图分类号:**TU986.52

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2023)05-0213-08

## Characteristics of Spatio-Temporal Evolution and Influencing Factors of Habitat Quality in Nanjing

WU Zhen<sup>1</sup>, XU Ke-yi<sup>1</sup>, QIAN Yan-ping<sup>2</sup>, HONG Yu-jie<sup>3</sup>

(1. College of Architecture, Nanjing Tech University, Nanjing 210000, Jiangsu, China;

2. School of Environmental Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 210000, Jiangsu, China;

3. Geyuan Garden Management Office of Yangzhou, Yangzhou 225000, Jiangsu, China)

**Abstract:** Rapid urbanization has brought great changes to regional land use and ecological environment. Research of temporal and spatial changes in land use and habitat quality are to promote the development and protection of territorial space, as well as the transformation of high-quality development in Nanjing. Spatio-temporal evolution characteristics of land use and habitat quality from 2000 to 2020 were quantitatively analyzed, and the main driving factors of habitat quality in Nanjing were further explored based on ArcGIS, Fragstats, InVEST model and geographical detector. The results showed that the area of cultivated land and forest land in Nanjing decreased by 802.37 and 34.37 km<sup>2</sup> in 2020 compared with 2000, fallen by 19.37% and 4.90% respectively. While the construction land area increased by 694.23 km<sup>2</sup>, and the amplification was 65.61%. The connectivity of the overall landscape in the study area decreased, and the land-

收稿日期:2023-01-03 修回日期:2023-04-13

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20201359);江苏省社会科学基金项目(23SHC002);江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB220001)。

第一作者:吴 榛,博士,讲师。研究方向:风景园林规划与设计。E-mail:wuzhenlandscape@163.com

scape fragmentation increased from 2000 to 2020. The average habitat quality index decreased from 0.38 to 0.27. During the period from 2000 to 2010 and from 2010 to 2020, the decline amplitudes of regional habitat quality were 21.05% and 10.00%, respectively, and the decline in the previous period was far greater than that in the latter period. The transfer of cultivated land to construction land and the habitat quality degradation of cultivated land were the main reasons for the habitat quality degradation in Nanjing. Their contributions to the reduction of habitat quality in each period accounted for 38.08% and 23.18%, 52.60% and 12.97%, respectively. Annual rainfall, construction land index and night light were the main driving factors for the spatial differentiation of habitat quality. The results the spatio-temporal change process of habitat quality in Nanjing, which provide scientific support for the sustainable ecological development and land use protection in the rapidly urbanized areas.

**Key words:** Nanjing; habitat quality; land use change; InVEST model

生态系统能够提供给生物个体与种群持续发展和生存条件的能力,被称为生境质量<sup>[1-3]</sup>。在高速城镇化发展过程中,随着人类建设用地的扩张,人类活动对区域自然环境的影响逐渐增大,生境质量也出现不同程度的退化。因此,在区域时空演变过程中,识别和预测区域环境生境质量空间分异是识别生境脆弱区、进行区域生态空间保护与修复的前提和基础<sup>[4]</sup>。

目前,生境质量分析主要包括生境指标建模和区域景观格局评估模型两大类,其中生境指标建模分析主要应用于小尺度生境空间,通过实地调查抽样的方法对相关生境质量数据进行收集,从而对生境空间的生境质量做出精确分析,如水质生境<sup>[5]</sup>、植被演替等<sup>[6]</sup>。区域景观格局评估模型的生境质量分析面向区域尺度的研究场地,即在遥感数据基础上使用模型进行运算<sup>[7]</sup>。在城市建设与生境质量关系的研究中,土地利用变化是城市发展过程中最直观的表现,土地利用方式和强度变化直接体现了城市建设过程在空间与时间的变化规律与分异特征,研究中常用 InVEST 模型中 Habitat Quality 模块根据生境威胁源的分布和不同土地利用类型对生境威胁源的敏感程度,分析空间生境质量<sup>[8]</sup>。在城市时空演变过程中,开展高强度城市建设过程中的生境质量评价有助于揭示城市生境质量变化趋势,识别城市生境脆弱区和空间分异状况,可为城市生态安全、国土空间规划提供决策依据。

南京市作为长三角城市群中快速城镇化的典型城市,不可避免地经历着城市快速扩张所导致的土地利用类型和生境质量的动态变化,如各类用地向建设用地转移、草地及林地的生境质量降低、生物多样性较少、区域生态系统服务能力下降等问题。因此,作为长三角城市群绿色高质量一体化发展的重要组成部分,应积极探索协同推进生态优先和绿色发展的新道路。然而,目前针对南京市生境质量时

空演变特征的研究较少,特别是对其时空动态演变中生境质量影响因素研究还有待进一步深入。

鉴于此,本研究选取我国快速城镇化地区的典型城市南京市为对象,在分析南京市土地利用变化的基础上,基于 ArcGIS、Fragstats、InVEST 模型分析、评估南京市 2000—2020 年的生境质量变化及演变特征,并利用地理探测器分析影响南京市生境质量变化的主要因子,旨在为南京市生境质量保护和国土空间规划提供数据支撑与科学依据,为快速城镇化地区生态可持续性发展提供参考。

## 1 研究区概况

南京市为江苏省省会(118°22′—119°14′E, 31°14′—32°37′N),是国家生态园林城市,属于亚热带季风气候,地貌属丘陵地区,以低山缓岗为主,平均气温为 16.7℃,雨量充沛,年降水量 1 200 mm,四季分明。2020 年南京市城镇化水平提升至 86.8%,城镇人口达 809 万,全市实现地区生产总值 14 818 亿元,全年人均 GDP 约 15.93 万元。南京市水域面积占总面积的 11%以上,全市林木覆盖率、自然湿地保护率分别为 31.61%、68.6%。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

选择 2000、2010 年及 2020 年 3 期数据,主要包括土地利用类型、DEM(digital elevation model)、坡度、年降水量、NDVI(normalized difference vegetation index)、建设用地指数、人口密度数据、GDP(gross domestic product)公里格网数据、夜间灯光数据。土地利用类型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/>),主要包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和其他用地 6 类;DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);年降水量来源于《中国 1980 年

以来逐年年降水量空间插值数据集》<sup>[9]</sup>;NDVI 来源于《2000—2020 年中国 30 米年最大 NDVI 数据集》<sup>[10]</sup>;GDP 公里格网数据来源于《中国 GDP 空间分布公里网格数据集》<sup>[11]</sup>;人口密度来源于 World Pop 网站的人口密度数据(<https://hub.worldpop.org/>);夜间灯光数据来源于《中国长时间序列夜间灯光数据集(2000—2020)》<sup>[12]</sup>;建设用地指数为每个格网内建设用地面积占所在单个格网面积的比例<sup>[13]</sup>。

比例<sup>[13]</sup>。

### 2.2 景观格局分析方法

景观格局指数可以定量反映景观空间结构、空间组成及景观配置特征。本研究运用 Fragstats4.2 景观格局分析软件在景观整体层次上计算南京市土地利用的景观格局指数,选取最大斑块指数(LPI)、分离度指数(SPLIT)、香农多样性指数(SHDI)、景观蔓延度指数(CONTAG)4 个指标<sup>[14-15]</sup>(表 1)。

表 1 景观格局指数指标选取及研究意义

指标	英文名及指标缩写	指标描述
最大斑块指数	largest patch index(LPI)	最大斑块占整个景观面积比例
分离度指数	splitting index(SPLIT)	某一景观类型中不同斑块个体分布的分离程度
香农多样性指数	shannon's diversity index(SHDI)	反映斑块在空间上的分布与组合规律,表征景观异质性
景观蔓延度指数	contagion index (CONTAG)	表征不同斑块类型的团聚程度或延展趋势

### 2.3 生境质量评估方法

InVEST 模型是评估区域生态系统服务和支撑生态系统决策的综合模型系统<sup>[16-18]</sup>。其中 Habitat Quality 模块主要用于计算区域生境质量,通过 Habitat Quality 模块计算生成的生境质量分布图可以从地理空间分布上反映栖息地生境质量信息<sup>[19-21]</sup>。

运用 InVEST 3.9 软件中 Habitat Quality 模块对南京市 2000—2020 年的生境质量进行分析。生境质量计算公式如下<sup>[22]</sup>。

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

$$D_{xj}=\sum_{r=1}^R\sum_{y=1}^{Y_r}\left(\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^R\omega_r}\right)r_yi_{rxy}\beta_xS_{jr}\tag{2}$$

式中: $Q_{xj}$  为生境质量指数; $H_j$  为土地利用类型  $j$  的适宜性; $k$  为半饱和常数; $z$  为归一化常量; $D_{xj}$  为土地利用类型  $j$  中栅格  $x$  的总威胁水平; $r$  为生境威胁因子; $y$  指威胁图上的所有栅格; $Y_r$  指威胁图上的一组栅格; $\omega_r$  为  $r$  的权重; $r_y$  为栅格  $y$  的威胁强度; $\beta_x$  为栅格  $x$  的可达性水平; $S_{jr}$  为土地利用类型  $j$  对威胁因子  $r$  的敏感度; $i_{rxy}$  为  $r_y$  对  $x$  栅格的威胁水平;其公式如下<sup>[23]</sup>。

$$i_{rxy}=1-\left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}}\right)\text{(线性衰退)}\tag{3}$$

$$i_{rxy}=\exp\left(-\left(\frac{2.99}{d_{rmax}}\right)\right)\text{(指数衰退)}\tag{4}$$

式中: $i_{rxy}$  为栅格  $y$  中的威胁因子; $d_{xy}$  为栅格  $x$  与  $y$  之间的线性距离; $d_{rmax}$  是威胁因子  $r$  的最大作用距离。

根据国内外相关文献确定每种土地类型的生境适宜性和各生境对每种威胁源的敏感性(表 2、表 3)<sup>[23-24]</sup>。运行模型后得到 2000、2010 年及 2020 年

的南京市生境质量分布图。为进一步分析南京市生境质量的变化趋势,在 ArcGIS 中运用自然断点法将 2000 年生境质量分为高、中、低 3 类,并依 2000 年生境质量分类标准对 2010 年及 2020 年南京市生境质量进行分类。

表 2 生境威胁源及相关参数

威胁源	最大胁迫距离/km	权重	空间衰减类型
水田	1	0.2	线性
旱地	1	0.2	线性
城市建设用地	10	1.0	指数
农村建设用地	6	0.7	指数
其他建设用地	5	0.5	指数

表 3 不同土地利用类型的生境适宜性及对威胁因子的敏感性

Table 3 Habitat suitability of different land use types and sensitivity to different threat sources						
土地利用类型	生境适宜性	水田	旱地	城市建设用地	乡村建设用地	其他用地
耕地	0.5	0.2	0.3	0.8	0.7	0.6
林地	1.0	0.4	0.5	0.9	0.8	0.7
草地	0.8	0.2	0.4	0.8	0.7	0.6
水域	0.9	0.1	0.2	0.7	0.6	0.5
建设用地	0	0	0	0	0	0
其他用地	0.1	0	0	0.3	0.2	0

为了更好地分析南京市生境质量时空变化,探究不同土地利用类型对生境质量变化的生态贡献率<sup>[24]</sup>,依据生态贡献率公式进行进一步分析。

$$C_{it}=\frac{H_{QC_{it}}L_{A_{it}}/T_A}{\sum_{i=1}^nH_{QC_{it}}L_{A_{it}}/T_A}\times100\%\tag{5}$$

式中: $C_{it}$  为  $t$  时间段内  $i$  种土地利用变化类型生境

贡献率; $H_{QC_{it}}$  为  $t$  时间段内  $i$  种土地利用变化类型区域内生境质量变化平均值; $L_{A_{it}}$  为  $t$  时间段内  $i$  种变化类型面积; $T_A$  为区域总面积; $n$  为土地利用变化类型数量。

## 2.4 地理探测器方法

地理探测器是探测因变量与自变量间空间分布格局的新兴统计方法<sup>[25-26]</sup>,旨在探测空间分异性,揭示驱动因子影响程度。本研究采用地理探测器中因子探测,以生境质量值为因变量,以自然因子(高程、坡度、年降水量、NDVI)及社会因子(建设用地指数、人口密度、GDP 公里格网数据、夜间灯光)为自变量。研究过程中通过自然断点法将自变量分为 9 类,利用 ArcGIS 建立 1 km 的渔网,以网格中心点为采样点,对自变量和因变量进行数据统计,并通过地理探测器分析识别南京市生境质量的影响驱动因子。

## 3 结果与分析

### 3.1 生态环境特征变化

3.1.1 土地利用时空变化 南京市域范围内土地总面积约 6 586.61 km<sup>2</sup>。2000 年南京市建设用地面积为 1 058.08 km<sup>2</sup>,2010 年增长到 1 552.86 km<sup>2</sup>,到 2020 年增长到 1 752.31 km<sup>2</sup>,2010—2020 年的增长幅度为 12.84%。南京市城市平均生境质量指数在

2000 年为 0.38,2010 年下降到 0.30,2020 年下降到 0.27,整体生境质量退化明显(图 1)。

2000、2010 年及 2020 年土地利用以耕地、建设用地为主要类型。2000—2020 年,土地利用类型变化的总面积为 838.85 km<sup>2</sup>,占南京市总面积的 12.74%,这一时段内南京市土地利用类型中建设用地面积逐年增加,净增长 694.23 km<sup>2</sup>,增幅为 65.61%,而林地、耕地面积逐年下降,其中林地面积净缩减 34.37 km<sup>2</sup>,降幅为 4.90%,耕地面积净缩减 802.37 km<sup>2</sup>,降幅为 19.37%(表 4)。

3.1.2 景观格局动态变化 表 5 为 2000、2010 年和 2020 年南京市在整体景观水平上的景观格局指标。最大斑块指数(LPI)在 2000 年为 27.43%,2010 年为 21.27%,2020 年为 19.66%,表明南京市整体景观中最大斑块面积逐渐变小;景观蔓延度指数(CONTAG)用来表征斑块间的连接性特点,研究区内 CONTAG 在 2000 年为 63.53%,2010 年为 59.83%,2020 年为 59.37%,呈减少趋势,说明研究区内斑块间的连接度下降;分离度指数(SPLIT)为聚散指数的评价指标,研究区内 SPLIT 值在 2000 年为 9.04%,2010 年为 13.94%,2020 年为 15.51%,呈增长趋势,表明研究区景观具有多种要素的密集格局,景观的破碎化愈发增加;香农多样性

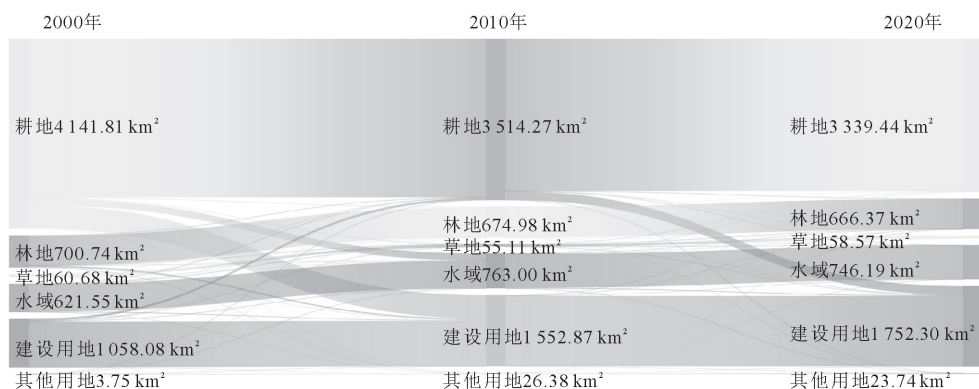


图 1 南京市 2000—2020 年土地利用变化流向

Fig. 1 The flow chart of land use change in Nanjing from 2000 to 2020

表 4 2000—2020 年南京市土地利用转移矩阵

Table 4 Land use transfer matrix of Nanjing from 2000 to 2020

		2020 年						总计
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	其他用地	
2000 年	耕地	3 287.04	16.98	1.42	147.58	681.74	7.06	4 141.81
	林地	4.60	642.04	0.04	1.32	42.36	10.38	700.74
	草地	0.10	0.73	52.69	1.19	5.95	0.02	60.68
	水域	5.81	0.42	4.35	589.10	21.84	0.02	621.55
	建设用地	41.86	5.47	0.07	7.01	1 000.03	3.64	1 058.08
	其他用地	0.03	0.73	0.00	0.00	0.39	2.61	3.75
	总计	3 339.44	666.37	58.57	746.19	1 752.30	23.74	6 586.60



表 5  2000—2020 年南京市景观格局指数统计

Table 5  Statistics of Nanjing landscape pattern index from 2000 to 2020

年份	LPI(%)	CONTAG(%)	SPLIT(%)	SHDI
2000 年	27.43	63.53	9.04	1.09
2010 年	21.27	59.83	13.94	1.22
2020 年	19.66	59.37	15.51	1.24

指数值(SHDI)在 2000 年为 1.09,2010 年为 1.22,2020 年为 1.24,不同年份香农多样性指数增大同样表明了南京市景观系统中景观向均衡化分布趋势发展,土地破碎化程度也越高。

3.2  生境质量动态变化

2000、2010 年和 2020 年的南京市生境质量指数分别为 0.38、0.30 和 0.27。2000—2010 年生境质量指数降幅为 21.05%,2010—2020 年降幅为 10.00%,前一时段降幅远超后一时段。2000—2020 年南京市高质量生境面积占比减少 4.37%,中质量生境面积减少 19.36%,低质量生境面积从 17.74% 增加到 41.47%。其中在 2000—2010 年,低质量生境面积增加 18.10%,相比于 2010—2020 年增加 5.63%而言,2000—2010 年时段生境退化更为明显

(表 6)。

研究期内南京市生境质量有退化也有提升,但总体看来,南京市城市扩张过程中建设用地的扩张造成整体生境质量向退化方向发展(图 2)。因此,对 2000—2020 年各时间阶段内南京市生境质量退化的主要土地利用变化类型及贡献率进行了分析统计(图 3)。表明在 2000—2010 年与 2010—2020 年 2 个时期,耕地向建设用地转移及耕地自身生境质量降低是南京市生境质量退化的主要原因,两者对生境质量降低的贡献比分别占 38.08%、23.18%与 52.60%、12.97%(表 7)。除上述 2 类原因外,林地与水域生境下降及林地与水域向建设用地转移为生境质量变化的次要原因。

表 6  2000—2020 年南京市生境质量指数统计

Table 6  Statistics of Nanjing habitat quality index from 2000 to 2020

生境质量指数	2000 年	2010 年	2020 年
低生境质量面积占比(%)	17.74	35.84	41.47
中生境质量面积占比(%)	66.14	51.18	46.78
高生境质量面积占比(%)	16.12	12.97	11.75
南京市平均生境指数	0.38	0.30	0.27

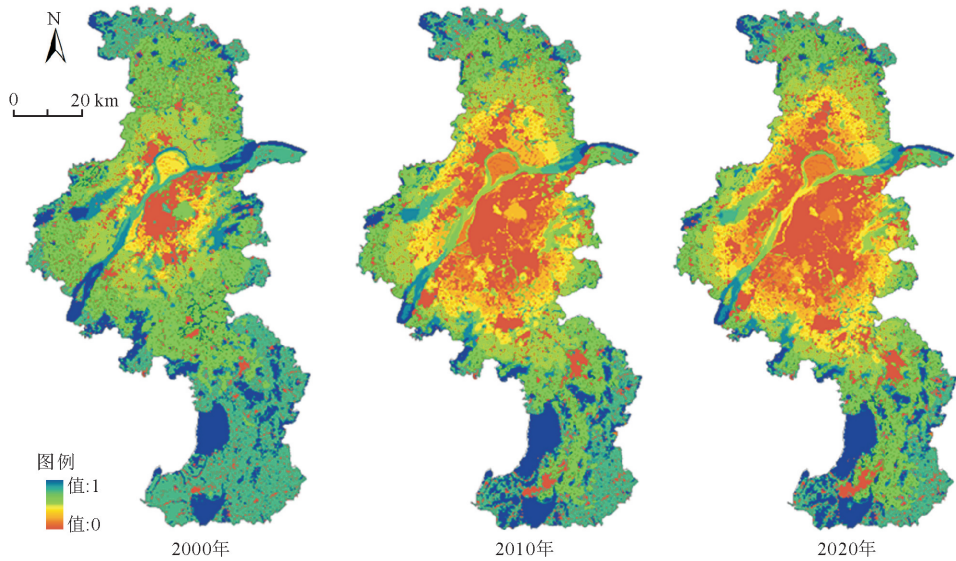


图 2  南京市 2000—2020 年生境质量空间分布

Fig. 2  Spatial distribution of habitat quality in Nanjing from 2000 to 2020

通过地理探测器因子分析得出 2000 年南京市的年降水量、GDP 和建设用地指数对生境质量的影响程度最高,2010 年各影响因子中年降水量、GDP 和夜间灯光对生境质量的解释程度相对较高,2020 年影响数值最大的因子为年降水量、夜间灯光和建设用地指数(图 4)。

研究结果表明,自变量中自然因子与社会因子对南京市生境质量空间分异的影响效能不同。自然因子中年降水量在 2000、2010 年及 2020 年生境质

量分布中解释力最高,对生境质量分布的基本格局起重要作用,高程、坡度、NDVI 的解释力较低。社会因子中建设用地指数与夜间灯光的解释力相对较高,说明建设用地指数与夜间灯光对生境质量分布分异影响作用明显。

4  结论与讨论

4.1  结论

2000—2020 年南京市土地利用转型明显。第

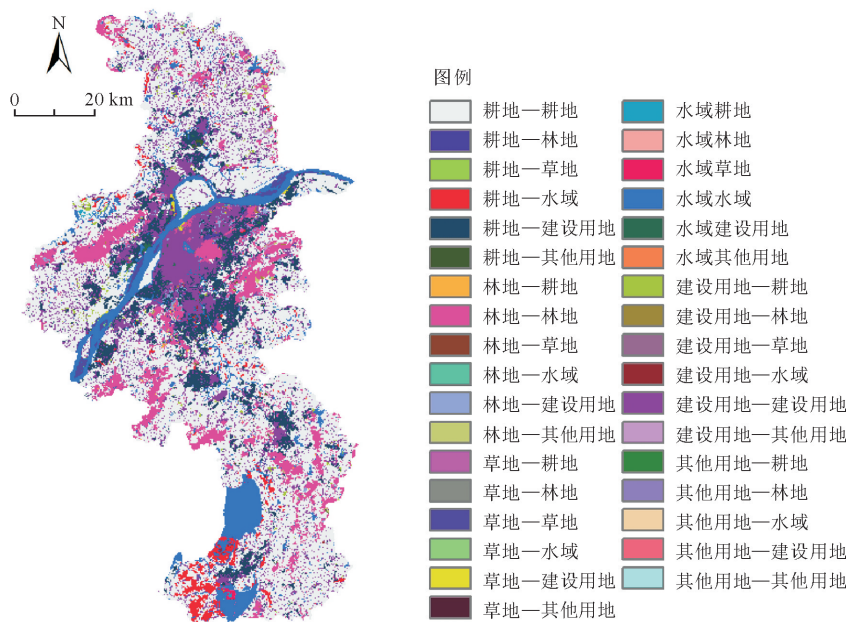


图3 南京市 2000—2020 年土地利用转移变化

Fig.3 Land use transfer change map of Nanjing from 2000 to 2020

表 7 影响南京市生境质量的主要土地利用变化类型及贡献率

Table 7 Major types and contribution rates of land use change affecting the habitat quality in Nanjing

2000—2010 年		2010—2020 年		2000—2020 年	
贡献率(%)	变化类型	贡献率(%)	变化类型	贡献率(%)	变化类型
38.08	耕地-建设用地	52.60	耕地-建设用地	37.56	耕地-建设用地
23.18	耕地-耕地	12.97	耕地-耕地	23.55	耕地-耕地
18.19	林地-林地	10.31	水域-建设用地	18.22	林地-林地
8.43	水域-水域	6.94	林地-林地	8.94	水域-水域
4.09	林地-建设用地	6.71	林地-建设用地	4.00	林地-建设用地
2.00	水域-建设用地	4.37	水域-水域	2.30	水域-建设用地
1.84	林地-其他用地	3.43	水域-耕地	1.51	草地-草地
1.14	草地-草地	1.16	草地-草地	1.28	林地-其他用地
0.78	建设用地-建设用地	1.12	建设用地-建设用地	0.75	建设用地-建设用地
0.66	草地-建设用地	0.25	草地-建设用地	0.55	草地-建设用地

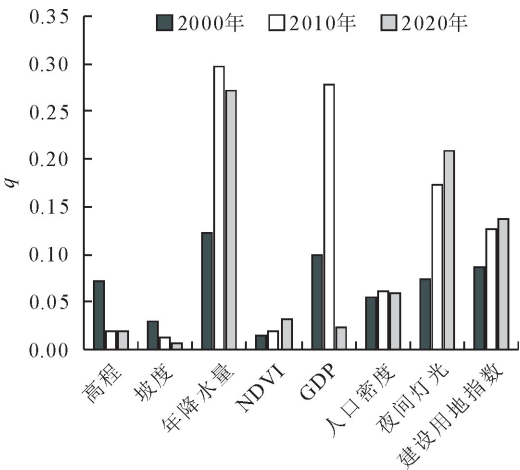


图 4 地理探测器指标  $q$

Fig.4 Index of  $q$  statistic of Geodetector

一阶段(2000—2010 年)建设用地大面积增加,增幅为 46.76%,第二阶段(2010—2020 年),建设用地增幅为 12.84%,其中土地利用变化主要以耕地向建设用地的转化为主,占总面积的 10.35%。

南京市整体景观格局指数中 LPI、CONTAG 值逐渐下降,SPLIT、SHDI 值逐渐上升,表明南京市整体景观格局呈破碎化发展趋势,斑块间的连接度逐渐降低。

南京市生境质量呈逐渐减弱的趋势。2000—2020 年间高质量生境面积减少 4.37%,2000—2010、2010—2020 年区域生境质量降幅分别为 21.05%和 10.00%,相对而言,生境质量退化速度逐渐放缓。其中受建设用地扩张影响的耕地生境质量降低以及耕地向建设用地的转化是区域生境质量

降低的2个主要原因,两者在各时段内对生境质量降低的贡献比分别占38.08%、23.18%与52.60%、12.97%。

2000、2010、2020年的年降水量因子的地理探测器指标 $q$ 为0.12、0.30和0.27,数值相对较高,说明自然因子中降水量因子对南京市生境质量空间分异的影响驱动力最强,该因子对生境质量基本格局形成有重要影响。社会因子中建设用地指数与夜间灯光的地理探测器指标 $q$ 相对较高,说明建设用地指数与夜间灯光对南京市生境质量分布分异作用明显。

## 4.2 讨论

南京市生境质量均值在2000—2020年总体呈下降趋势,2000—2010年与2010—2020年时段生境质量降幅分别为21.05%和10.00%,前一时段降幅远超后一时段,土地利用类型变化的总面积各时期分别为1317.74 km<sup>2</sup>和405.79 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的20.01%和6.16%,因此可知,2000—2010年时段是南京市生境质量下降最明显和土地利用变化最显著的时期。这一时期受人类高强度的经济开发影响,近郊区耕地自身生境质量下降与建设用地大面积扩张导致耕地向建设用地转变是区域生境质量降低的2个主要原因,两者在各时段内对生境质量降低的贡献比分别占38.08%、23.18%与52.60%、12.97%。2000—2020年自然因子中年降水量 $q$ 值最高,建设用地指数与夜间灯光强度 $q$ 值次之,说明该时段内年降水量对生境质量空间分异的影响驱动力最强,同时,一定程度上说明降水量、建设用地指数与夜间灯光奠定了生境质量空间分异的基础,对南京市生境质量分布分异影响作用明显。

由于近20 a南京城市大幅扩张,周边林地、耕地等被不断侵占,生境质量发生不可逆的损坏,区域内高等级生境斑块的面积逐渐下降,影响到区域范围内各栖息地斑块内的生物繁衍与生态系统服务供给。受社会经济发展情况制约,大面积生态重建已不符合当下发展现实,需通过产业升级改变经济结构,减少产业发展对建设用地的利用需求,高效集约利用土地,减少建设用地扩张对生境质量的干扰。同时,在国土空间保护与开发过程中,应进一步加强城镇开发边界及生态保护红线的管控,对生境质量退化的栖息地斑块进行生态修复,对退化严重的区域优先进行生态重建,推动低生境区域向高生境区域用地类型的转化。并且可进一步通过加强城市绿地生态廊道与网络建设,促进生物多样性保护,提升生境格局的完整性和连通性<sup>[27]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 周晓艳,何依依,黄欣,等.三峡库区生境质量的地形梯度效应及对土地利用变化的响应[J].农业工程学报,2021,37(11):259-267.  
ZHOU X Y, HE Y Y, HUANG X, *et al.* Topographic gradient effects of habitat quality and its response to land use change in Hubei section of the Three Gorges reservoir[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(11):259-267. (in Chinese)
- [2] 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——北京为例[J].北京大学学报:自然科学版,2016,52(3):553-562.  
CHEN Y, QIAO F, JIANG L. Effects of land use pattern change on regional scale habitat quality based on InVEST model: a case study in Beijing[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016, 52(3):553-562. (in Chinese)
- [3] 郝月,张娜,杜亚娟,等.基于生境质量的唐县生态安全格局构建[J].应用生态学报,2019,30(3):1015-1024.  
HAO Y, ZHANG N, DU Y J, *et al.* Construction of ecological security pattern based on habitat quality in Tang County, Hebei, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3):1015-1024. (in Chinese)
- [4] 刘园,周勇,杜越天.基于InVEST模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应[J].长江流域资源与环境,2019,28(10):2429-2440.  
LIU Y, ZHOU Y, DU Y T. Study on the spatio-temporal patterns of habitat quality and its terrain gradient effects of the middle of the Yangtze River economic belt based on InVEST model[J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2019, 28(10):2429-2440. (in Chinese)
- [5] 陈怀艳,刘茂松,袁芳,等.太湖贡湖湾滨岸带微生境特征与主要水质指标的关系分析[J].湿地科学,2016,14(4):580-585.  
CHEN H Y, LIU M S, YUAN F, *et al.* Analysis of relationship between microhabitat characteristics and major water quality indicators in littoral zone of Gonghu bay, Tai Lake[J]. Wetland Science, 2016, 14(4):580-585. (in Chinese)
- [6] 俞国松,王世杰,容丽.茂兰喀斯特森林演替阶段不同小生境的小气候特征[J].地球与环境,2011,39(4):469-477.  
YU G S, WANG S J, RONG L. Microclimate characteristics of different microhabitats insuccessional stages of Maolan Karst forest[J]. Earth and Environment, 2011, 39(4):469-477. (in Chinese)
- [7] 戴云哲,李江风,杨建新.长沙都市区生境质量对城市扩张的时空响应[J].地理科学进展,2018,37(10):1340-1351.  
DAI Y Z, LI J F, YANG J X. The spatiotemporal responses of habitat quality to urban sprawl in the Changsha metropolitan area[J]. Progress in Geography, 2018, 37(10):1340-1351. (in Chinese)
- [8] 黄康,戴文远,黄万里,等.基于CA-Markov和InVEST模型的土地利用变化对生境影响评价:以福建省福州新区为例[J].水土保持通报,2019,39(6):155-162.  
HUANG K, DAI W Y, HUANG W L, *et al.* Impacts of land use change evaluation on habitat quality based on CA-Markov and InVEST models: taking Fuzhou new district of Fujian



- Province as an example [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(6): 155-162. (in Chinese)
- [9] 沈艳, 冯明农, 张洪政, 等. 我国逐日降水量格点化方法[J]. *应用气象学报*, 2010, 21(3): 279-286.  
SHEN Y, FENG M N, ZHANG H Z, *et al.* Interpolation methods of China daily precipitation data [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2010, 21(3): 279-286. (in Chinese)
- [10] YANG J L, DONG J W, XIAO X M, *et al.* Divergent shifts in peak photosynthesis timing of temperate and alpine grasslands in China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111395.
- [11] ZHAO N, LIU Y, CAO G, *et al.* Forecasting China's GDP at the pixel level using nighttime lights time series and population images [J]. *Mapping Sciences & Remote Sensing*, 2017, 54(3): 407-425.
- [12] ZHONG X Y, YAN Q W, LI G. Long time series nighttime light dataset of China (2000—2020) [DB/OL]. *Digital Journal of Global Change Data Repository*, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.06.01.V1>
- [13] WU L, SUN C, FAN F. Estimating the characteristic spatio-temporal variation in habitat quality using the InVEST model—a case study from Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 1008.
- [14] 王圳峰, 王欣珂, 谢香群, 等. 基于 GWR 模型的福建省绿色空间景观格局演变影响因素及其空间差异 [J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(5): 242-250.  
WANG Z F, WANG X K, XIE X Q, *et al.* Evolution of landscape pattern of green space in Fujian Province: influencing factors and spatial differences based on GWR model [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(5): 242-250. (in Chinese)
- [15] 杨璐璐. 仰天岗国家森林公园康复性景观综合评价研究 [J]. *森林工程*, 2023, 39(2): 63-71, 81.
- [16] 丁金华, 孙琦, 钱晶. 基于 MSPA-InVEST 模型的水网乡村绿色基础设施网络构建研究——以吴江东北片区为例 [J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(6): 183-191.  
DING J H, SUN Q, QIAN J. Research on the construction of green infrastructure network in the water net countryside based on MSPA-InVEST model: a case study of the northeast area of Wujiang [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(6): 183-191. (in Chinese)
- [17] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及预测——以广东省为例 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(10): 4827-4839.  
LIN T, YANG M Z, WU D F, *et al.* Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model: a case study in Guangdong [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(10): 4827-4839. (in Chinese)
- [18] 毛靓, 贾京默. 黑龙江县域农林用地景观格局变化特征 [J]. *森林工程*, 2022, 38(2): 44-53.
- [19] 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  
HUANG M Y, YUE W Z, FENG S R, *et al.* Spatial-temporal evolution of habitat quality and analysis of landscape patterns in Dabie Mountain area of west Anhui Province based on InVEST model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(9): 2895-2906. (in Chinese)
- [20] 张吕成, 张一帆, 董灵波. 基于 Landsat TM 数据的大兴安岭森林景观空间格局及其关联性 [J]. *森林工程*, 2021, 37(6): 1-9.
- [21] 路亚方, 李红波. 2000—2020 年基于土地利用变化的生境质量时空动态演变——以武汉城市圈为例 [J]. *水土保持研究*, 2022, 29(6): 391-398.  
LU Y F, LI H B. Temporal and spatial dynamic evolution of habitat quality based on land use change from 2000 to 2020: taking Wuhan metropolitan region as an example [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(6): 391-398. (in Chinese)
- [22] 邱天琦, 王向荣. 基于 InVEST 模型的长株潭城市群生境质量时空演变分析研究 [J]. *林业资源管理*, 2022(5): 99-106.  
QIU T Q, WANG X R. Research on the temporal and spatial evolution of habitat quality in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration based on InVEST model [J]. *Forest Resources Management*, 2022(5): 99-106. (in Chinese)
- [23] 李潇, 杨加猛, 陈禹衡, 等. 基于土地利用变化的江苏盐城湿地自然保护区生境质量评估 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2022, 46(5): 169-176.  
LI X, YANG J M, CHEN Y H, *et al.* Evaluations of habitat quality of Jiangsu Yancheng wetland national nature rare bird reserve based on land use changes [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2022, 46(5): 169-176. (in Chinese)
- [24] 滕雅丽, 谢苗苗, 王回曲, 等. 资源型城市土地利用转型及其对生境质量的影响——以乌海市为例 [J]. *生态学报*, 2022, 42(19): 7941-7951.  
TENG Y L, XIE M M, WANG H Q, *et al.* land use transition in resource-based cities and its impact on habitat quality: a case of Wuhai City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(19): 7941-7951. (in Chinese)
- [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.  
WANG J F, XU C D. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese)
- [26] 孙黄平, 黄震方, 徐冬冬, 等. 泛长三角城市群城镇化与生态环境耦合的空间特征与驱动机制 [J]. *经济地理*, 2017, 37(2): 163-186.  
SUN H P, HUANG Z F, XU D D, *et al.* The spatial characteristics and drive mechanism of coupling relationship between urbanization and eco-environment in the Pan Yangtze River delta [J]. *Economic Geography*, 2017, 37(2): 163-186. (in Chinese)
- [27] 吴榛, 张凯云, 王浩. 城市扩张情景模拟下绿地生态网络构建与优化研究——以南京市部分区域为例 [J]. *中国园林*, 2022, 38(4): 56-61.  
WU Z, ZHANG K Y, WANG H. Construction and optimization of green space ecological network under urban expansion scenario simulation: a case study in some areas of Nanjing [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2022, 38(4): 56-61. (in Chinese)