doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2025.04.002

区域中心城市市域“三生”功能演变与模拟研究

——以南京市为例

杜小娅[1],杨欣蕾[2],方　斌[2,3,4]

(1.江苏省土地开发整理中心,江苏 南京 210017)
(2.南京师范大学地理科学学院,江苏 南京 210023)
(3.南京师范大学新型城镇化与土地问题研究中心,江苏 南京 210023)
(4.江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,江苏 南京 210023)

[**摘要**] 中心城市是区域社会经济发展的增长极,其对周边地区生产、生活、生态功能协同提升的示范作用至关重要. 本文以长三角中心城市南京市为例,构建“三生”功能评价指标体系,测算 2012—2022 年的“三生”功能;利用地理探测器模型识别功能演变的影响因素;借助空间自相关模型探索生产、生活、生态功能间的权衡/协同关系;运用 PLUS 模型预测 2032 年的南京市“三生”功能格局,提出格局优化策略. 主要结果包括:①南京市“三生”功能整体存在退化现象,生态功能高值区的大幅减少是其主导原因. ②“三生”功能间存在较大范围的低低协同区,仅生产—生态功能间的高高协同区面积较大,“三生”功能的同步提升成为功能格局优化关键. ③“三生”功能演变整体受社会经济因素的影响较强,土地开发强度、GDP 和城镇化水平始终是功能演变的主导因子. ④自然发展情境下,2032 年南京市“三生”功能高值区显著退化,但市域主城区及其周边的综合功能有所提升. 本文认为市域综合功能薄弱区的“三生”功能全面提升、主城区的生态功能优化、乡村地区的生活功能提升和生态功能维持是南京市“三生”功能格局优化的重要方向.

[**关键词**] “三生”功能,权衡/协同,模拟预测,格局优化,南京市
[**中图分类号**]TU984.113　[**文献标志码**]A　[**文章编号**]1001-4616(2025)04-0014-12

Study on the Evolution and Simulation of the "Production-Living-Ecological" Functions in the City Area of the Regional Center City: a Case Study of Nanjing City

Du Xiaoya[1], Yang Xinlei[2], Fang Bin[2,3,4]

(1.Jiangsu Land Development and Consolidation Center, Nanjing 210017, China)
(2.School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)
(3.Research Center of New Urbanization and Land Problem, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)
(4.Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: The central city is the growth pole of regional socio-economic development, and its demonstrative role in synergizing and enhancing the production, living and ecological functions of the surrounding areas is crucial. This paper takes Nanjing, the center city of the Yangtze River Delta, as an example, constructs the evaluation index system of the "production-living-ecological" functions, and measures the "production-living-ecological" functions from 2012 to 2022. The geographic detector model is used to identify the influencing factors of the function evolution. With the help of the spatial autocorrelation model, the tradeoffs and synergies among the production, living and ecological functions are explored. PLUS model is used to predict the functional pattern of the "production-living-ecological" in Nanjing in 2032, and strategies to optimize the pattern are proposed. Key findings include: ①There is an overall degradation of the "production-living-ecological" functions in Nanjing, and the drastic reduction of ecological function high value areas is

收稿日期:2024-06-24.
基金项目:国家自然科学基金项目(42071229、41671174)、江苏省高校优势学科建设工程项目(164320H116).
通讯作者:方斌,博士,教授,博士生导师,研究方向:土地资源管理.E-mail:wenyanfang731@163.com

the leading cause. ②There exists a large range of low-low synergy zones among the "production-living-ecological" functions, and only the high-high synergy zones between the production and ecological functions have a large area, so the simultaneous enhancement of the "production-living-ecological" functions has become the key to the optimization of the functional pattern. ③The overall evolution of the "production-living-ecological" functions is strongly influenced by socio-economic factors, with the intensity of land development, GDP and the level of urbanization always being the dominant factors in the evolution of the functions. ④Under the natural development scenario, in 2032, the high-value areas of the "production-living-ecological" functions in Nanjing will be significantly degraded, but the comprehensive functions of the main urban area of the city and its surroundings will be improved. This paper concludes that the overall improvement of the "production-living-ecological" functions in the weak integrated function areas of the city, the optimization of ecological functions in the main urban areas, and the improvement of living functions and the maintenance of ecological functions in the rural areas are the important directions for the optimization of the "production-living-ecological" functional pattern in Nanjing.

Key words: "production-living-ecological" functions, tradeoffs/synergies, simulation forecast, pattern optimization, Nanjing city

党的二十大报告强调要“优化国土空间发展格局”“站在人与自然和谐共生的高度谋划发展”,面对“促进生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”的总体要求与我国高质量发展的时代命题,如何实现区域的生产、生活、生态功能协调发展成为关键问题. 中心城市作为区域社会经济发展的增长极,掌握其“三生”功能的演变规律及影响因素,对示范区域生产、生活、生态功能协同提升和完善区域发展战略具有指导意义[1].

“三生”功能是认识和评价国土空间发展质量的重要概念[2],学者进行了大量探讨,研究内容涵盖内涵认知[3]、分类体系和评价量化[4-5]、格局过程[6-8]、空间优化[9]等. 内涵认知方面,学界主流观点认为“三生”功能是指在人类需求驱使下,生产、生活、生态空间提供的产品与服务[10],而产品与服务的属性差异也已成为构建功能分类体系的重要依据[11]. “三生”功能评价方面,单功能评价多以基于宜居性的生活功能评价[12]和基于生态系统服务价值的生态功能评价[13]为主;综合功能评价多采取指标测算法[2]和地类合并法[14],前者是针对各类空间内涵构建评价指标体系、借助线性加权法测度“三生”空间功能大小;后者是在厘清土地利用类型与“三生”空间对应关系的基础上通过地类比较与分级赋值法确定“三生”空间功能差异. 评价的空间尺度以国家、区域宏观尺度和县、乡镇微观尺度为主,中观市域尺度的文献仍不多见. 格局过程方面,现有研究多关注生产、生活、生态功能间的空间权衡/协同与耦合协调关系,重点分析格局演变过程中的功能博弈关系与影响因素,进而提出空间优化策略. 整体而言,虽然“三生”功能研究已取得大量成果,而考虑功能演变机理,结合社会、经济、自然发展规律,开展功能格局演变趋势预测的研究还较为缺乏. 因此,本文以区域中心城市为例,结合多源数据分析市域“三生”功能演变特征,预测模拟自然发展情景下的“三生”功能空间格局,可进一步丰富“三生”功能评价研究的空间尺度和“三生”功能模拟预测方法.

随着“长三角一体化发展”上升为国家战略及南京都市圈建设的深入推进,南京市经济社会快速发展[15],但空间的稀缺性和功能的外溢性也引致了不同空间为寻求最大利益产生竞争冲突[16-17]. 因此,本文以南京市为例,构建“三生”功能评价指标体系,测度 2012、2017 和 2022 年的“三生”功能,分析 2012—2022 年的功能演变规律;利用地理探测器模型识别功能演变的影响因素;借助空间自相关模型探索生产、生活、生态功能间的权衡/协同关系;运用 PLUS 模型预测 2032 年的南京市“三生”功能格局,并提出格局优化策略,以期扩展市域尺度下的“三生”功能研究,也为南京都市圈乃至长三角经济带的国土资源配置提供理论指导与实践参考.

1 数据来源与方法

1.1 研究区概况

南京市(31°14′~32°37′N,118°22′~119°14′E)辖 11 个区,位于江苏省西南部,长江下游中部地区,濒江近海,土地总面积为 6 587.03 km^2(图 1). 全市属宁镇扬丘陵地区,地形以低山缓岗为主. 气候属北亚热

带季风性湿润气候,四季分明,年平均降雨量 1 106.5 mm,年平均气温 15.4 ℃. 辖区内水域面积达 11%以上,河流湖泊众多,且主要属于长江水系. 2023 年地区生产总值 1.74 万亿元,常住人口 954.70 万人,城镇化率 87.20%,建设用地面积 1 851.32 km^2. 近年来,受区域工业化和城镇化进程加快、社会经济快速发展的影响,南京市建设用地空间快速扩张,耕地急剧减少,林地、水域等生态空间迅速萎缩,导致生产、生活和生态功能用地矛盾日益突出[18]. 而研究南京市“三生”功能的演变规律与预测其功能结构发展趋势,既是协调该区域“三生”功能用地冲突的重要课题,也对优化“三生”功能空间布局具有重要意义. 此外,南京市作为江苏省省会城市,又是长三角地区中心城市,在长江经济带与东部沿海经济带战略发展区中占据核心地位,以南京市为例开展相关研究对同类城市“三生”功能优化发展具有一定指导借鉴作用.

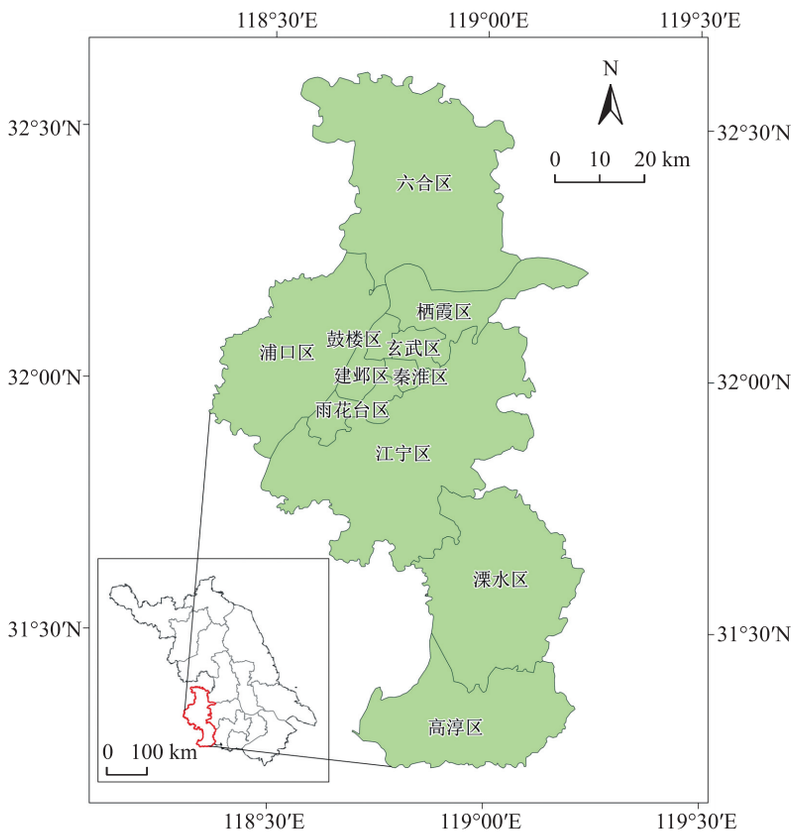


图 1　南京市区位图

Fig. 1　Location map of Nanjing

1.2　数据来源与处理

研究数据包括 2012、2017 和 2022 年的南京市地理空间数据与社会经济数据,具体数据来源与处理方式如表 1 所示. 此外,研究通过构建多尺度格网对比分析,发现使用 1 km×1 km 格网能够更好反映市域范围内“三生”功能分布格局,因此本文将以上数据统一投影于 CGCS2000_3_Degree_GK_Zone_40 坐标系,采样至 1 km 精度,并将南京市域划分为 7 019 个 1 km×1 km 研究单元,进行市域“三生”功能的时空演变特征、机理与预测模拟研究分析.

表 1　数据来源表

Table 1　Table of data sources

序号	数据名称	来源及处理
1	NDVI 数据	MODIS 数据集
2	土地利用数据	Yang 等[19]解译的中国土地覆被分类数据集
3	POI 数据	高德地图;百度地图
4	人口密度数据	LandScan 全球人口数据库
5	降水数据	

续表 1

Table 1 Continued

序号	数据名称	来源及处理
6	蒸散发数据	国家青藏高原科学数据中心
7	气温数据	
8	根系深度数据	Yan 等[20]测算的中国 1 km 植物根系深度数据集
9	土壤数据	全球土壤数据集 HWSD 2.0
10	植物可利用含水率	通过土壤质地以及土壤有机质含量计算得到[21]
11	NPP 数据	地球资源数据云平台
12	DEM 数据	NASA 地球科学数据网站
13	路网数据	OSM 数据集
14	GDP	Chen 等[22]基于 1 km×1 km 网格修正后的实际国内生产总值
15	土地开发强度	基于土地利用数据通过计算建设用地占比得到
16	城镇化水平	通过常住人口城镇化率表征,数据来源于南京市统计局
17	地形起伏度	基于 DEM 高程数据在 ArcGIS 软件中通过栅格计算器计算得到
18	景观丰富度	基于土地利用数据在 Fragstats 软件中计算得到
19	水体景观斑块密度	
20	农林牧渔业密度	基于农林牧渔业 POI 数据在 ArcGIS 软件中通过核密度分析工具计算得到

1.3 研究方法

1.3.1 “三生”功能评价

(1)评价指标体系构建

本文基于“三生”功能内涵及南京市社会、经济、自然现状构建“三生”功能评价指标体系(表 2). 生产功能指人类以土地为劳动对象直接获取或以土地为载体进行社会生产而产出各种产品和服务的功能[7],可划分为农业生产功能和工业生产功能;生活功能是人类生存品质的体现,指在土地利用过程中产生的居住、出行、消费、娱乐等各种空间承载、物质和精神保障功能[12];生态功能指生态系统与生态过程在维持生态平衡,保障人类生产、生活运行所需的基本环境条件中发挥的作用[16]. 综上,本文选取作物生产能力和土地垦殖率表征农业生产功能,作物生产能力能够有效反映地表植被的生产能力,土地垦殖率可反映耕地资源的利用程度[23-24]. 以工业、服务业密度表征工业生产功能,其密度越高,各类产品生产效率与服务供给能力则越高,生产功能越强. 以人口密度和教育、医疗、交通设施密度共同表征生活功能,公共服务设施数量可在一定程度上反映区域生活功能水平,其分布范围与集聚程度对居民生活质量具有显著影响. 而人口密度则可表征设施服务压力,人口密度越高,设施服务压力越大,生活功能则相对越弱. 选取产水量、固碳量和生境质量表征南京市基本生态功能,其中产水量可表征区域水源供给与保持等水源涵养能力,固碳量可代表碳固存等气候调节功能,生境质量可表征区域生物多样性维持能力[25].

表 2 “三生”功能评价指标体系

Table 2 Indicator system for evaluating the "production-living-ecological" functions

一级功能(权重)	量化指标	计算方法	属性	指标权重
生产功能(0.333 3)	作物生产能力	使用 NDVI 表征	+	0.124 8
	土地垦殖率	耕地面积/区域土地总面积	+	0.128 5
	工业、服务业密度	核密度分析	+	0.080 0
生活功能(0.333 3)	人口密度	—	-	0.084 7
	教育设施密度	核密度分析	+	0.065 0
	医疗设施密度		+	0.079 8
	交通设施密度		+	0.103 8
生态功能(0.333 3)	产水量	InVEST 模型	+	0.101 7
	生境质量		+	0.115 7
	固碳量	EIMs(生态系统信息模型库)	+	0.115 9

本文对指标数据进行极差标准化处理,参照已有研究[26-27],运用熵值法计算指标权重(表 2). 熵值法作为一种多维数据分析方法,可通过计算评价指标体系中各维度的熵值来确定指标权重[28].

(2)综合评价模型构建

参考前人研究[29-30],基于上述“三生”功能评价指标数据标准化处理和指标权重确定结果,测度南京市生产功能、生活功能、生态功能及综合功能发展水平. 计算公式如下:

$$F_i=\sum_{j=1}^{n}X_{ij}W_j,$$

$$F_a=F_p+F_l+F_e,$$

式中:F_i 表示第 i 个评价单元单项功能值,X_{ij} 表示第 i 个评价单元第 j 项指标标准化值,W_j 表示第 j 项指标权重,n 为某项功能评价指标个数;F_a 表示综合功能值,F_p 表示生产功能值,F_l 表示生活功能值,F_e 表示生态功能值.

1.3.2 “三生”功能权衡/协同关系分析方法

双变量空间自相关可用于反映局部空间中两类属性的集聚与分异程度[31],本文通过计算生产、生活、生态功能两两之间的双变量局部莫兰指数来测度不同功能之间的权衡/协同关系. 计算公式如下:

$$I=V_i\sum_{j=1}^{M}S_{ij}V_j,$$

式中:I 表示自变量与因变量的局部空间关系;M 表示格网数量;V_i、V_j 分别为自变量、因变量观测值的方差标准化值;S_{ij} 表示空间权重.

1.3.3 “三生”功能演变的影响因素分析方法

(1)影响因素的选取

基于已有研究成果[1,32],本文将南京市“三生”功能作为被解释变量,从自然因素(气候、地形和水体等)、人文因素(城镇发展、农业发展和经济发展等)选取 8 个指标作为解释变量,进行南京市“三生”功能演变的影响因素分析,具体指标包括 GDP、土地开发强度、城镇化水平、地形起伏度、水体景观斑块密度、气温、景观丰富度、农林牧渔业密度.

(2)地理探测器模型

地理探测器是一类统计学方法,用于探索地理现象的空间分异现象及其驱动因素[33]. 本文运用地理探测器中的分异及因子探测模块,探测各影响因素对南京市“三生”功能即生产、生活、生态功能以及综合功能的空间分异影响程度,用 q 值度量. 公式为:

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

式中:q 表示影响因素对“三生”功能空间分异的影响程度,值域为[0,1],q 值越大,表明该影响因素对“三生”功能空间分异的解释力越强,反之则越弱;$h=1,\cdots,L$,为影响因素分层;N_h 和 N 分别为层 h 和全区单元数;σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的“三生”功能值的方差.

1.3.4 “三生”功能预测模拟方法

(1)PLUS 模型

PLUS(patch-generating land use simulation,PLUS)模型是一种基于栅格数据模拟土地利用变化的模型,可用于分析土地利用变化的驱动因素并预测未来土地利用情况,主要包括用地扩张分析策略模型(LEAS)与基于多类随机斑块种子的 CA 模型(CARS). LEAS 模块可基于两期土地利用扩张情况与驱动因子,通过随机森林算法计算未来各类用地发展概率. CARS 模块可通过随机种子生成和阈值递减机制进行未来土地利用预测[34]. 本文使用 PLUS 模型进行市域“三生”功能的预测模拟分析.

(2)模拟步骤

首先基于影响因素测算结果,选择年均 GDP 变化率、年均土地开发强度变化率、年均城镇化水平变化率、地形起伏度、水体景观斑块密度、气温、年均景观丰富度变化率、年均农林牧渔业密度变化率共 8 项指标作为影响土地“三生”功能值变化的驱动因子,其次通过 LEAS 模块计算各等级“三生”功能的发展概率,最后通过 CARS 模块设置各等级“三生”功能需求、转移矩阵及邻域权重预测未来土地“三生”功能.

(3)精度检验

使用 Kappa 系数对模型模拟精度进行检验. 结果表明各类功能模拟预测模型 Kappa 系数均处于 0.61~0.80,模拟精度处于显著水平[35].

2 结果分析

2.1 南京市“三生”功能的时空演变特征

为便于对比分析不同年份间的“三生”功能变化情况,本文利用自然断点法将 2012 年生产、生活、生态功能划分为低值区、较低值区、中值区、较高值区和高值区,并以此为标准对 2017 年和 2022 年的评价结果进行分区(图 2). 研究时段内,南京市生产、生活和生态功能发生不同程度演变.

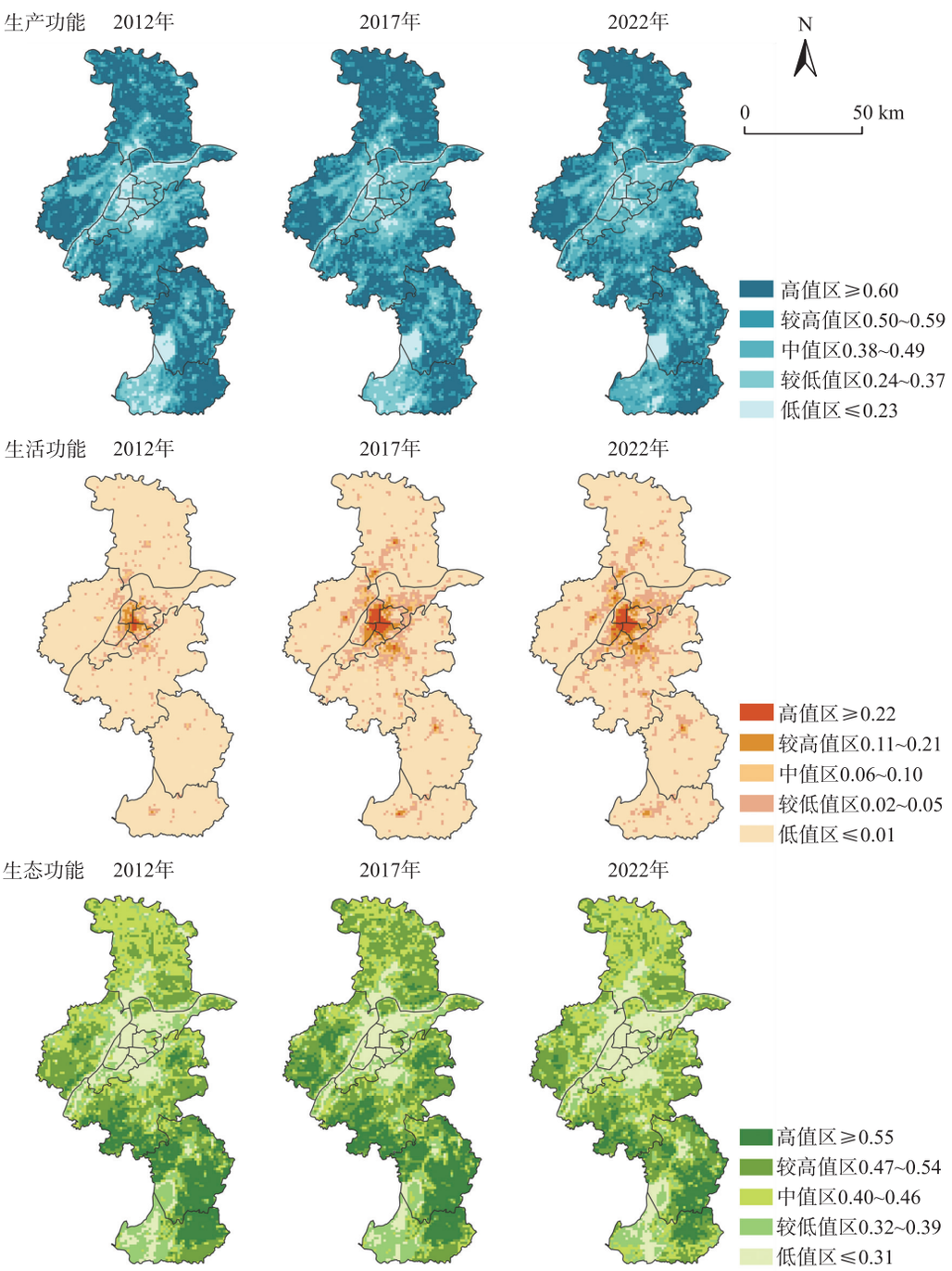


图 2 2012—2022 年南京市生产、生活、生态功能分区图

Fig. 2 Production, living and ecological functions zoning in Nanjing, 2012-2022

生产功能整体呈现乡村高于城镇的分布特征,江宁区与高淳区的变化相对显著. 其中,高淳区西部的生产功能不断提升,中值区逐渐替代较低和低值区;江宁区生产功能则呈微弱的退化趋势,中值及中值以下区域的面积占比增大. 从土地利用视角来看,耕地是南京市的主要用地类型,也是农业生产的根基,而我国的耕地保护政策为稳定耕地面积提供了极大保障,这在一定程度上致使生产功能相对稳定和“乡高城低”现象的出现.

生活功能则恰好相反,10 年间,南京市生活功能显著提升,且城镇远高于乡村,城、乡基础设施便利性的两极分化是导致这一现象的主要原因.

生态功能方面,浦口区、江宁区、溧水区和高淳区整体优于其他区域,全域生态功能先升后降. 相较于 2012 年,2017 年各区生态功能均有所提升,六合区南部、浦口区西部、溧水区东部与南部的提升最显著,主要表现为高值区、较高值区替代中值区和较低值区. 而至 2022 年,全域生态功能大幅降低,高值区和较高值区的面积占比甚至低于 2012 年水平,不透水地面的快速扩张是导致这一现象的主要原因.

参照前文分区方法,将南京市“三生”功能综合评价结果划分为 5 级(图 3). 2012—2022 年,南京市“三生”功能低值和较低值区主要集中分布于市域主城区、溧水区西南部和高淳区西部,其余地区多为较高和高值区,中值区面积占比较小. 从时间演化上看,南京市“三生”功能高值区占比先增后减,低值和较低值区逐年减少. 具体地,2012 年的高值区主要集聚于浦口区西部、江宁区南部、溧水大部区域和高淳区东部,低值区主要集聚于市域主城区、溧水区西南部和高淳区西部;至 2017 年,高值区在六合区增加显著,市域主城区也由低值区主导演化为较低值区主导;但至 2022 年,各市辖区的高值区均显著减少,而市域南部的低值区显著减少. 与子系统分区结果进行对比发现,主城区“三生”功能的提升主要是该区生活功能显著提升所致,市域南部低值区的减少则是生产、生活功能的共同提升所致,而“三生”功能先增后减的演变规律受生态功能的影响较大.

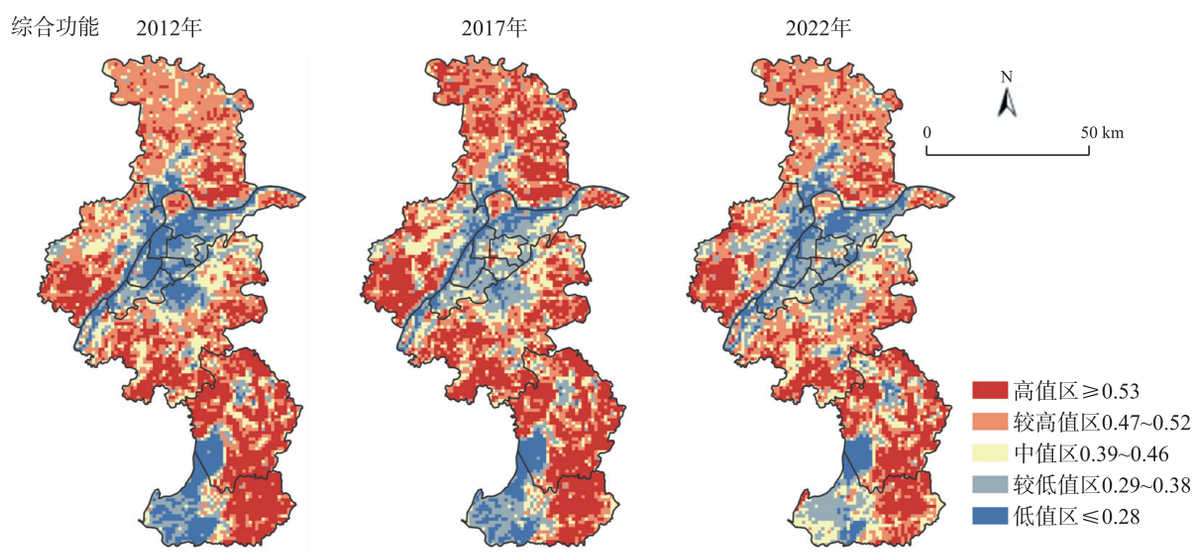


图 3　2012—2022 年南京市“三生”功能综合评价分区图

Fig. 3　Comprehensive evaluation of "production-living-ecological" functions zoning in Nanjing, 2012–2022

2.2　南京市“三生”功能的空间权衡/协同关系

借助双变量局部莫兰指数,在 ArcGIS 中对 2012—2022 年南京市生产、生活、生态功能间的空间权衡/协同关系进行分析(图 4).

生产—生活功能主要以低低协同和低高、高低权衡为主,高高协同仅在玄武区及其周边有零星分布,研究时段内主城区及其周边地带的生产—生活功能低高权衡区逐渐扩张,其余地区的空间权衡/协同关系未发生明显变化.

生产—生态功能则以低低和高高协同关系为主,低低协同区主要分布于市域南部、主城区及其周边地带,高高协同区则主要分布于乡村地区的耕地集中连片地带. 10 年间,六合区的高高协同区面积显著增大,而其他市辖区的高高协同区面积略有减小,同时,市域南部的低低协同区面积减小,高低权衡区衍生

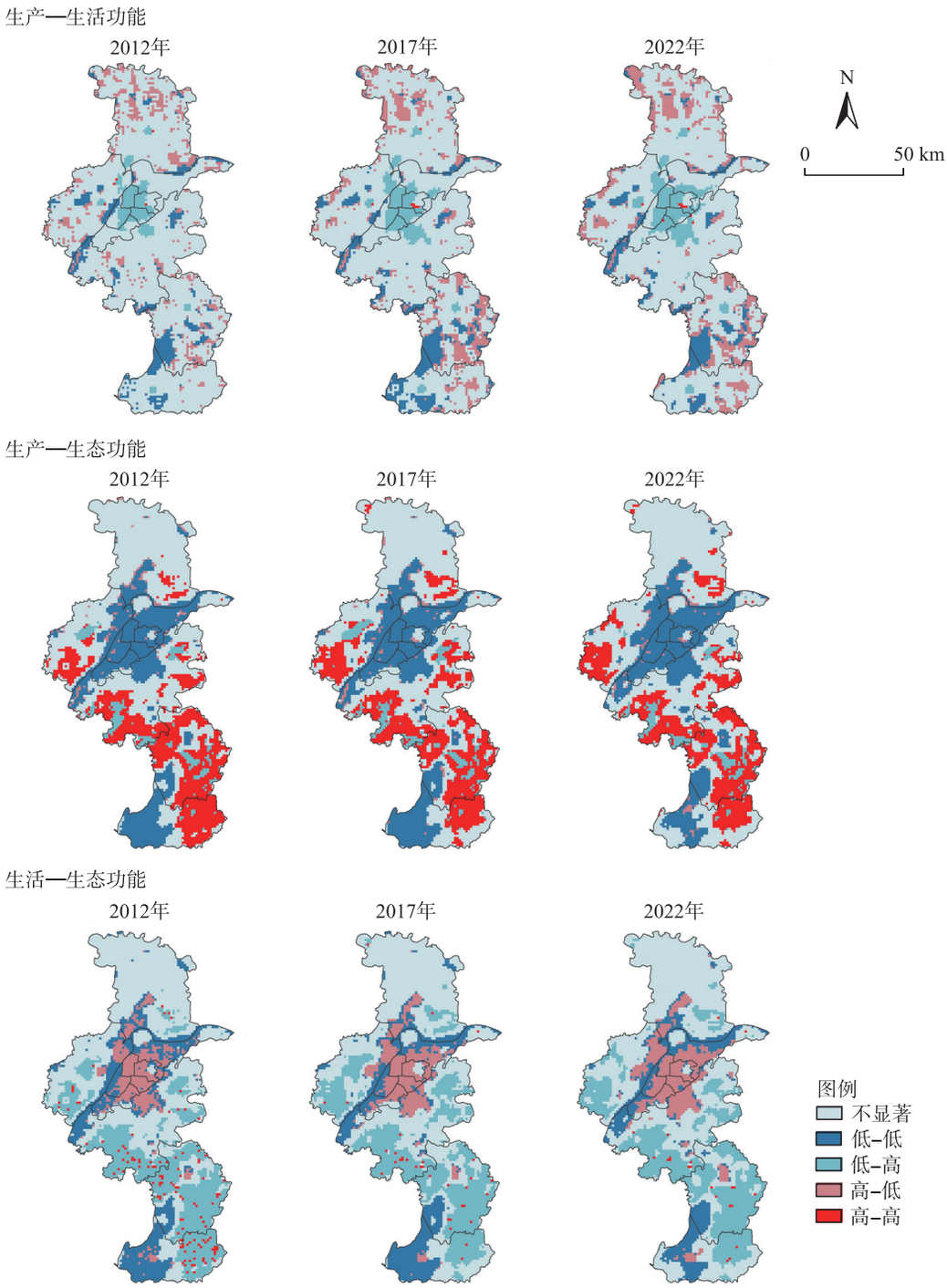


图 4　2012—2022 年南京市“三生”功能权衡/协同关系演变图

Fig. 4　The evolution of functional tradeoffs/synergies of the "production-living-ecological" in Nanjing, 2012-2022

而出.

生活—生态功能方面,2012—2022 年,低低协同区、低高权衡区和高低权衡区均集中连片分布,而高高协同区的空间分布较为零散. 其中,主城区以高低权衡为主,低低协同区分布在其外围以及市域南部,乡村地区则以低高权衡为主. 时空演变上,市域南部高高协同区和低低协同区显著减少,其余地区的生活—生态空间权衡/协同关系未发生明显改变.

2.3　南京市“三生”功能演变的影响因素分析

借助地理探测器识别南京市“三生”功能演变的关键影响因子,结果显示除地形起伏度和农林牧渔业密度以外,其余因子均通过 1%水平下的显著性检验(表 3).

生产功能演变的主导驱动因子为土地开发强度、GDP、气温和城镇化水平,其中土地开发强度和 GDP 的 q 值显著增加,气温和城镇化水平的 q 值呈波动减少的趋势,地形起伏度、水体景观斑块密度、景观丰富度和农林牧渔业密度对生产功能的影响较弱.

生活功能演变的主导驱动因子为土地开发强度、GDP 和城镇化水平,其中土地开发强度和 GDP 的 q 值较大幅度增加,城镇化水平的 q 值先减小后增加,总体呈减小趋势,这表明土地开发强度和 GDP 对生活功能的影响程度显著增强,城镇化水平的影响整体减弱.

土地开发强度、GDP 和城镇化水平也是生态功能演变的关键驱动因子,三者的 q 值先减小后增加,但总体上 q 值仍呈较大幅度增加的态势,表明这三个因子对生态功能演变的影响程度整体较强,其实质是受社会经济发展和城镇化进程加快等影响,南京市的人口向城镇聚集,为工业和服务业的发展提供了丰富的劳动力资源,促进了社会经济发展水平的提升,同时土地开发强度的不断增强造成了生态环境破坏,促使生态功能整体下降.

总体来看,生产—生活—生态综合功能演变受土地开发强度和 GDP 的影响较强,其次是城镇化水平、气温和景观丰富度,其余因子的影响则较弱,这也表明南京市“三生”功能演变受社会经济因素的影响较大,与之相比,受自然因素的影响较小.

表 3　2012—2022 年南京市“三生”功能演变的影响因子探测结果

Table 3　Detection results of influencing factors on the evolution of the "production-living-ecological" functions in Nanjing, 2012−2022

“三生”功能	年份	影响因素							
		GDP	土地开发强度	城镇化水平	地形起伏度	水体景观斑块密度	气温	景观丰富度	农林牧渔业密度
生产功能	2012 年	0.220 1***	0.254 0***	0.142 4***	0.027 3***	0.038 6***	0.165 7***	0.091 8***	0.036 6***
	2017 年	0.221 1***	0.263 9***	0.114 9***	0.015 1***	0.049 7***	0.231 9***	0.106 8***	0.021 2***
	2022 年	0.280 0***	0.352 3***	0.141 0***	0.019 1***	0.011 3***	0.124 1***	0.094 0***	0.014 8***
生活功能	2012 年	0.232 1***	0.356 2***	0.316 3***	0.003 9***	0.006 5***	0.054 7***	0.006 8***	0.064 9***
	2017 年	0.221 1***	0.263 9***	0.114 9***	0.015 1***	0.049 7***	0.231 9***	0.106 8***	0.021 2***
	2022 年	0.338 3***	0.408 5***	0.251 5***	0.005 6***	0.010 7***	0.085 9***	0.014 3***	0.001 0
生态功能	2012 年	0.356 6***	0.399 6***	0.178 7***	0.041 2***	0.051 8***	0.100 3***	0.108 9***	0.066 4***
	2017 年	0.307 2***	0.360 5***	0.154 0***	0.069 2***	0.063 2***	0.173 1***	0.088 8***	0.037 6***
	2022 年	0.426 0***	0.506 0***	0.225 5***	0.045 9***	0.032 4***	0.121 6***	0.094 0***	0.014 7***
综合功能	2012 年	0.291 8***	0.319 6***	0.161 7***	0.005 1	0.051 9***	0.151 6***	0.111 8***	0.049 4***
	2017 年	0.237 0***	0.269 5***	0.107 2***	0.008 5	0.071 3***	0.209 7***	0.114 9***	0.019 9***
	2022 年	0.325 5***	0.388 8***	0.141 7***	0.008 0	0.022 9***	0.117 5***	0.107 3***	0.017 3***

注:表中探测结果 q 值越大,影响因子对功能的作用越强;*** 表示通过 1%水平下的显著性检验.

2.4　南京市“三生”功能预测模拟

本文基于“三生”功能影响因素分析结果,借助 PLUS 模型预测自然发展情境下 2032 年南京市“三生”功能的空间格局. 依照模型运行规则,将上文的高值区、较高值区、中值区、较低值区和低值区定义为 5 种地类,而后导入年均 GDP 变化率、年均土地开发强度变化率、年均城镇化水平变化率、地形起伏度、水体景观斑块密度、气温、年均景观丰富度变化率、年均农林牧渔业密度变化率共 8 项影响因子,开展模拟预测分析(图 5).

与 2012—2022 年相比,2032 年高淳区西部生产功能仍有小幅提升,全域高值区略有减少,但整体趋于稳定. 其中,高值区减少主要发生于农村地区,农用地的减少与“非农化”是生产功能下降的主要原因. 生活功能方面,较高值区和高值区仍以市域主城区为中心向四周扩散增长,中值区主要从各市辖区中心向四周扩散增长. 相较于历史时期,至 2032 年,大部分乡镇及少部分农村居民点的生活功能显著提升,由低值区提升至较低值区和中值区. 生态功能方面,高值区与较高值区仍持续大幅减少,退化范围与农用地减少区和不透水地面增加区基本一致. 从综合功能的模拟结果来看,主城区及其周边的综合功能有所提升,主要为低值区向较低值区的演变以及较低值区向中值区的演变,但全域范围内的高值区面积显著减少,综合功能退化范围与生态功能退化范围基本一致,因此,南京市生态功能的急剧下降是综合功能退化的主要原因.

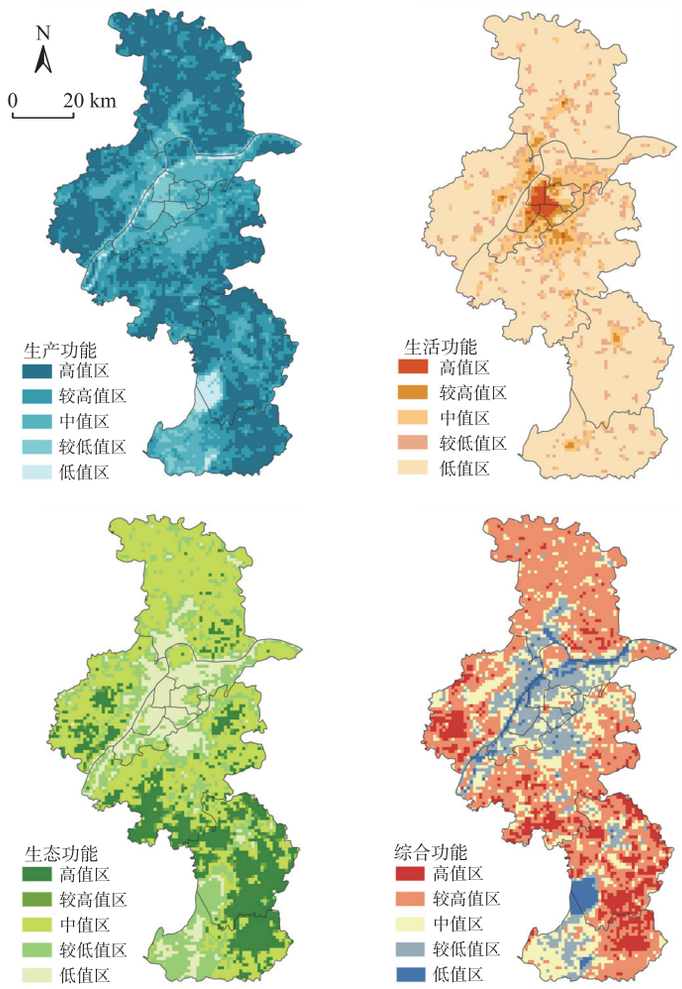


图 5　基于 PLUS 模型的 2032 年南京市“三生”功能预测模拟

Fig. 5　Simulation of "production-living-ecological" functions prediction in Nanjing in 2032 based on PLUS model

3　结论与建议

3.1　结论

本文分析了南京市 2012—2022 年的“三生”功能演变及其影响因素,探索了生产、生活、生态功能间的空间权衡/协同关系,并模拟预测 2032 年市域“三生”功能格局,研究得出以下结论:

(1)2012—2022 年,南京市“三生”功能存在退化现象,生态功能高值区的大幅减少是其主要原因. 南京市生产功能高值区虽略有减少,但整体较为稳定;生态功能先升后降,且降幅较大;生活功能虽快速提升,但城乡分异明显.

(2)“三生”功能两两之间存在较大范围的低低协同区,仅生产—生态功能间的高高协同区面积较大,“三生”功能的同步提升成为格局优化关键. 同时,生产—生活功能的高高协同区在市域主城区略有扩张,生产—生态和生活—生态的高高协同区均显著收缩.

(3)“三生”功能演变整体受社会经济因素的影响较强,受自然因素的影响较弱. 土地开发强度、GDP 和城镇化水平始终是影响生产、生活、生态功能和综合功能演变的主导驱动因子,其影响程度整体呈增强趋势,另外,气温对生产、生态和综合功能的影响较小且呈减弱的态势.

(4)自然发展情境下,2032 年南京市“三生”功能高值区显著退化,退化范围与生态功能退化范围基本一致,但市域主城区及其周边的综合功能有所提升,主要表现为低值区向较低值区的演变和较低值区向中值区的演变.

3.2　建议

结合南京市“三生”功能评价结果、功能间的空间权衡/协同分析及功能预测可以得出,溧水区西南部

和高淳区西部的生产—生活—生态功能全面提升、主城区的生态功能优化、乡村地区的生活功能提升和生态功能维持是南京市未来实现“三生”功能协调发展的重要方向. 据此提出如下优化建议:

(1)大力发展现代农业,强化基础设施建设,助力功能薄弱区全面提升. 溧水区西南部和高淳区西部生产、生活、生态功能均处于南京市全域最低水平,属功能薄弱区. 该区地势平坦,邻近石臼湖与固城湖,水陆条件便利,应因地制宜发展现代农业,同步提升生产、生态功能. 同时,需强化教育、医疗和交通设施建设,提升设施便利度.

(2)控制建设用地扩张,优化生态廊道格局,打造宜居宜业的生态之城. 市域主城区的生态功能提升空间较大,应严格控制建设用地扩张,强化工业废弃物监管制度. 同时,在城市开发建设过程中,应优先全面评估生态廊道格局,提升植物景观丰富度,优化景观生态,构建多层次、功能复合的生态网络.

(3)提升设施服务能力,深化生态农业意识,创建人地协调的和美乡村. 南京市生活功能存在显著的城、乡分异,乡村地区的生态功能也持续退化. 因此,一方面应继续加强乡村地区的生活设施服务能力;另一方面应深化生态农业意识,大力推广化肥农药减量施用技术,减少农业生产过程中的生态代价,协调人与自然关系. 此外,还应强化监管,防止农用地被过度侵占和“非农化”现象的发生.

[参考文献]

[1] 黄烈佳,鲁昭,胡伟艳. 长江经济带城市空间“三生”功能耦合协调时空演化特征及影响因素[J]. 长江流域资源与环境,2024,33(4):687-698.

[2] 雷敏,江星月,王蓉,等. 黄河流域收缩城市“三生”功能耦合协调分析[J]. 西北大学学报(自然科学版),2024,54(3):461-471.

[3] 刘继来,刘彦随,李裕瑞. 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.

[4] 黄安,许月卿,卢龙辉,等. “生产-生活-生态”空间识别与优化研究进展[J]. 地理科学进展,2020,39(3):503-518.

[5] 张露洋,雷国平,郭一洋. 基于两维图论聚类的辽宁省土地利用多功能性分区[J]. 农业工程学报,2020,36(13):242-249.

[6] 王成,唐宁. 重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化[J]. 地理研究,2018,37(6):1100-1114.

[7] 张玉臻,陈阳,王洁,等. 黄河流域“三生”功能协调性测度及其差异性优化调控[J]. 农业工程学报,2021,37(12):251-261.

[8] 时振钦,邓伟,张少尧. 近25年横断山区国土空间格局与时空变化研究[J]. 地理研究,2018,37(3):607-621.

[9] 刘志超. 新型空间规划体系下的县级“三生空间”布局与“三线”划定[J]. 规划师,2019,35(5):27-31.

[10] 段亚明,许月卿,黄安,等. “生产-生活-生态”功能评价研究进展与展望[J]. 中国农业大学学报,2021,26(2):113-124.

[11] 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.

[12] 赵宏波,谷天顺,孙东琪,等. “三生”功能视角下黄河流域城市人居环境动态演变与机制[J]. 地理学报,2023,78(12):2973-2999.

[13] 朱荣,敖泽建,蒋友严. 基于CRITIC客观赋权法的天水市生态环境脆弱性评价[J]. 中国沙漠,2024,44(3):321-331.

[14] 王乐,熊昌盛,田宇,等. 中国“三生”空间功能异质性评价、时空演变及分区调控[J]. 农业工程学报,2024,40(10):265-275.

[15] 陈振,郭杰,张雪微,等. 耦合景观生态安全格局的南京市“三生”空间多情景模拟[J]. 水土保持研究,2024,31(4):383-394.

[16] 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.

[17] 樊杰. 主体功能区战略与优化国土空间开发格局[J]. 中国科学院院刊,2013,28(2):193-206.

[18] 陈振,郭杰,欧名豪,等. “粮食—生态”双安全约束下建设用地供需多情景模拟:以江苏省南京市为例[J]. 中国土地科学,2024,38(2):61-72.

[19] YANG J,HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2022[J]. Scientific data,2023,13:3907-3925.

[20] YAN F P,WEI S G,ZHANG J,et al. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters[J]. Scientific data,2020,7(1):2.

[21] ZHOU W Z,LIU G H,PAN J J,et al. Distribution of available soil water capacity in China[J]. Journal of geographical

sciences,2005,15(1):3-12.
[22] CHEN J D,GAO M,CHENG S L,et al. Global 1 km×1 km gridded revised real gross domestic product and electricity consumption during 1992-2019 based on calibrated nighttime light data[J]. Scientific data,2022,9:202.
[23] 黄隆杨,王静,李泽慧,等. 基于自然资源大数据的城市多功能景观识别与国土空间规划分区[J]. 地球信息科学学报,2021,23(9):1617-1631.
[24] 倪维秋,夏源,赵宁宁. 乡村地域“三生空间”功能演化与耦合协调度研究:以黑龙江省为例[J]. 中国土地科学,2022,36(9):111-119.
[25] 潘翔,石培基,吴娜. 基于生态系统服务均衡性视角的生态风险评估及管控优先区识别:以兰州市为例[J]. 环境科学学报,2020,40(2):724-733.
[26] 王金伟,王启翔,冯凌. 旅游业发展对共同富裕的直接影响及空间溢出效应[J]. 地理学报,2024,79(4):1045-1067.
[27] 王志杰,苏嫄. 南水北调中线汉中市水源地生态脆弱性评价与特征分析[J]. 生态学报,2018,38(2):432-442.
[28] 徐小鹰,田煞煞. 长三角城市群科技创新、经济增长与生态环境的时空耦合及趋势预测[J]. 长江流域资源与环境,2023,32(4):706-720.
[29] 尹君锋,宋长青,石培基,等. 耦合视角下甘肃省县域乡村“三生”功能协调度的时空跃迁特征与影响因素[J]. 地理研究,2024,43(4):874-892.
[30] 康庆,郭青霞,丁一,等. 山西省“三生”功能协同/权衡关系分析[J]. 自然资源学报,2021,36(5):1195-1207.
[31] 李潇,吴克宁,冯喆,等. 网格尺度下河南省农业土地利用系统多功能的空间化及权衡/协同分析[J]. 农业工程学报,2023,39(18):242-252.
[32] 刘俊祥,张蕾,刘格格,等. 湖北省国土空间“三生”功能权衡特征及影响因素分析[J]. 水土保持研究,2024,31(2):354-366.
[33] 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.
[34] LIANG X,GUAN Q,CLARKE K C,et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation(PLUS)model:a case study in Wuhan,China[J]. Computers,environment and urban systems,2021,85:101569.
[35] 王慧,王兵,牛香,等. 面向生态康养功能提升的风景区土地利用格局模拟优化[J]. 生态学杂志,2021,40(10):3391-3400.

[责任编辑:丁　蓉]