

DOI: 10.20103/j.stxb.202503100531

王振伟,毛津津,汪晓春,陈万旭.中国城市群国土空间格局演变及生态系统服务价值响应研究.生态学报,2026,46(6): - .
Wang Z W, Mao J J, Wang X C, Chen W X. Spatial evolution of territorial spatial pattern and its effects on ecosystem services value in Chinese urban agglomerations. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(6): - .

中国城市群国土空间格局演变及生态系统服务价值响应研究

王振伟¹, 毛津津¹, 汪晓春¹, 陈万旭^{2,*}

¹ 湖北大学公共管理学院, 武汉 430062

² 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430074

摘要:在新型城镇化与生态文明建设双重战略驱动下,中国城市群国土空间格局经历了深刻重构。科学认识城市群尺度下国土空间格局演变与生态系统服务价值的互馈机制,是优化国土空间资源配置、推动我国高质量发展的迫切需求。然而,当前针对中国城市群国土空间格局演变与生态系统服务价值的互馈机制研究不足。因此,本文基于“三生空间”理论框架,利用标准差椭圆、国土空间开发强度综合指数、国土空间格局指数、生态系统服务价值和地理探测器等多维方法,构建 2000—2020 年长时序空间数据集,系统揭示中国城市群国土空间格局演变及其对生态系统服务价值的影响。研究结果表明:(1)中国城市群生活空间持续扩张,生产、生态空间逐渐缩减,2010 年后变化速度放缓,国土空间格局分布的指向性愈加明显。(2)国土空间开发强度指数呈“环状放射型”分布,强度由城市群中心向外递减。(3)国土空间格局变化显著,边缘密度、景观形状等指数显著上升,分形指数和聚集度指数持续降低,空间破碎化趋势加剧。(4)生态系统服务价值呈东南高、西北低的态势,价值总量不断攀升,但部分地区生态系统服务价值呈现下降趋势。(5)国土空间开发强度是生态系统服务价值变化的主要驱动力,各因子交互作用对生态系统服务价值具有双因子增强效应和非线性增强效应。研究结果可为优化中国城市群国土空间格局、提升生态系统服务价值提供科学依据,为推动区域协调发展和实现“双碳”目标背景下的高质量发展战略提供决策参考。

关键词:国土空间格局;生态系统服务价值;三生空间;地理探测器;中国城市群

Spatial evolution of territorial spatial pattern and its effects on ecosystem services value in Chinese urban agglomerations

WANG Zhenwei¹, MAO Jinjin¹, WANG Xiaochun¹, CHEN Wanxu^{2,*}

¹ School of Public Administration, Hubei University, Wuhan 430062, China

² School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Driven by national strategies of new urbanization and ecological civilization construction, Chinese urban agglomerations have undergone profound restructuring in their territorial spatial patterns. Understanding the interactive feedback mechanisms between the evolution of territorial spatial patterns and ecosystem service values at the urban agglomeration scale is critical for optimizing territorial spatial resource allocation and advancing China's high-quality development. However, current research on the evolution of the territorial spatial pattern of Chinese urban agglomerations and its impact on ecosystem service value remains inadequate. To address this gap, this study employed the “production-living-ecological space” framework and constructed a long-term spatiotemporal dataset from 2000 to 2020 via a multidimensional analytical framework. This methodology integrated Standard Deviational Ellipse analysis, land use

基金项目:国家自然科学基金项目(42371258)

收稿日期:2025-03-10; **网络出版日期:**2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cugcwx@sina.com

#限于数据的可获取性,本研究尚未含中国港澳台统计数据。

intensity, territorial spatial pattern indices, ecosystem services value (ESV) assessment, and geographical detector analysis. The research systematically investigated the evolution of territorial spatial patterns in Chinese urban agglomerations and evaluated its impacts on ESV. Key findings revealed: (1) Continuous expansion of living spaces alongside gradual contraction of production and ecological spaces, with decelerating rates of change. The directional bias in spatial distribution intensified. (2) A “concentric-radial gradient pattern” for land use intensity, exhibiting a decreasing gradient from the cores of urban agglomerations toward their peripheries. (3) Significant transformation of territorial spatial patterns: increased Edge Density and Landscape Shape Index, coupled with decreased Area-Weighted Mean Patch Fractal Dimension Index and Aggregation Index, indicating heightened spatial fragmentation. (4) ESV demonstrated a spatial pattern of higher values in the southeast and lower values in the northwest. Aggregate ESV increased over the study period, despite declines in specific regions. (5) Land use intensity emerged as the dominant driver of ESV changes. Factor interactions exhibited both bivariate enhancement and nonlinear synergy effects on ESV. This study provides a scientific foundation for optimizing territorial spatial patterns and enhancing ecosystem service values within Chinese urban agglomerations. The findings offer actionable insights for decision-making for promoting regional coordinated development and implementing high-quality development strategies under the “dual carbon” goals framework.

Key Words: territorial spatial pattern; ecosystem service value; production-living-ecological space; geographical detector; Chinese urban agglomerations

国土空间是人类生存发展和社会经济活动的载体,在生产、生活和生态三个维度中发挥着重要作用^[1]。近年来,我国社会经济实现跨越式发展,城镇化进程显著加快,城镇化率从 1978 年的 17.90% 上升到 2023 年的 66.16%,城市建成区面积从 1981 年的 7438 km² 增长到 2023 年的 64000 km²。然而,粗放式扩张模式引发多重空间异化效应,导致各类空间挤占与功能失序、资源利用效率大幅衰减、生态网络破碎化与污染扩散等一系列问题愈发严峻^[2],凸显了人地关系紧张的现实困境^[3],导致生态系统面临前所未有的挑战^[4]。当前,我国国土空间治理正经历从“增量管控”向“存量优化”的战略转型,“三生空间”协同发展中“规模刚性约束与功能弹性适配的权衡、空间冲突显性化与生态系统韧性衰减的负反馈以及局部优化决策与区域协同治理的尺度错配”^[5]三大核心矛盾亟需破解。

“三生空间”从空间功能分异视角为解析国土空间多目标权衡提供了范式基础,早期研究主要聚焦于“三生空间”分类体系构建^[6],通过“主导功能+辅助功能”多级分类法^[7]与遥感影像解译^[8]实现空间本底识别;中期逐渐转向格局演变的多情景模拟,借助 CA-Markov^[9]、FLUS^[10]等模型揭示国土空间演变的内在规律与潜在风险;近年来,面向国土空间治理的决策需求,研究逐渐转向空间冲突测度模型^[11]、开发适宜性评价矩阵^[12],形成“冲突诊断—情景推演—方案优选”的闭环决策链。这一过程标志着研究方法从定性描述向“地理信息系统—空间计量—机器学习”等多模型耦合的范式跃迁,研究尺度从宏观政策导向的国家、流域尺度向微观机理挖掘的市县乡单元递进。研究内容从聚焦理论探索转向优化国土空间格局的具体实践,为政府制定科学合理的国土空间规划和区域发展政策提供数据支持和理论依据。生态系统服务价值(Ecosystem services value, ESV)评估旨在定量描述生态系统中各项服务能力的强弱^[13],从 1997 年 Costanza 等^[14]建立了当量因子法,开展生态系统服务价值评估以来,国内外学者对于多种生态系统服务价值进行了大量探索。2003 年谢高地等^[15]构建了符合我国国情的当量因子表,并在 2015 年^[16]对其进行了修订补充。生态系统服务价值的研究主要聚焦于生态系统服务价值的核算^[17]、时空变化^[18]以及影响因素的探讨^[19]。近年来,学界愈加关注土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响,通过空间计量模型^[20–21]和地理探测器模型^[22–23]分析生态系统服务价值的演变特征及其驱动因素,其成果为国土空间格局优化、国土空间生态保护与修复等提供了重要理论支撑。然而,多数研究关注 LUCC 的类型转换效应,对国土空间格局的整体性演变如何系统影响生态系统服务价值缺乏深度解析;驱动因素分析多依赖静态截面数据,难以捕捉空间格局动态转换的长

期效应;研究尺度集中于单一行政或自然单元,缺乏对城市群这一国家战略区域多尺度、长时序的生态系统服务价值响应研究。因此,以中国城市群为对象,探索国土空间格局演变对生态系统服务价值的响应研究,能为空间精准治理提供新思路。

城市群(Urban agglomerations, UAs)作为城市发展的高级组织结构形态^[24],是人类活动最活跃的地区之一^[25]。我国城市群作为连接东中西部地区的核心空间单元,是经济快速发展与生态环境保护之间矛盾的典型区域,同时也是国土空间格局动态变化的热点区域。因此,本文基于“三生空间”理论框架,利用标准差椭圆、国土空间开发强度综合指数(Land use intensity, LUI)、国土空间格局指数、生态系统服务价值和地理探测器等方法(图1),研究2000—2020年中国城市群国土空间格局演变特征及其对生态系统服务价值的影响,为优化国土空间格局、合理配置国土资源、促进高质量发展提供理论参考和决策依据。

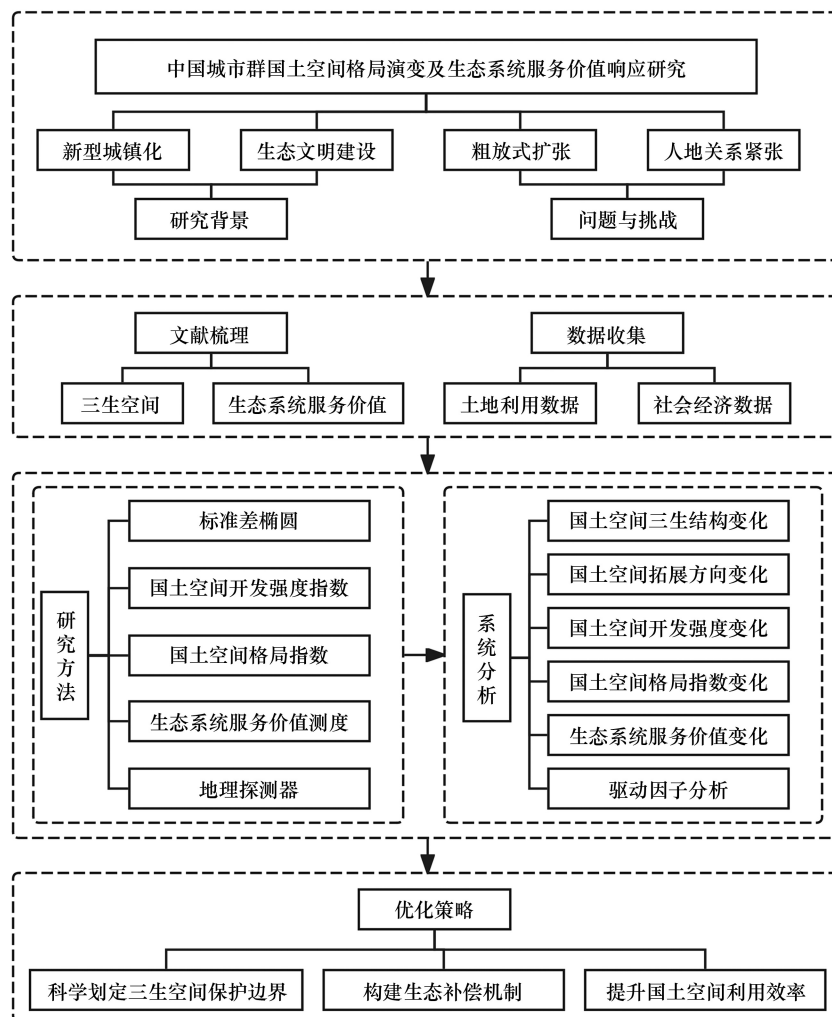


图1 技术路线图

Fig.1 Technology Roadmap

1 研究区域、方法与数据来源

1.1 研究区域概况

城市群高强度的人类活动与资源开发正深刻重塑着区域生态本底,成为国土空间格局演变与生态系统服务价值交互的核心区域。我国依据《“十四五”规划纲要》划分了19个城市群,具体包括5个国家级城市群、8个区域级城市群和6个地方级城市群^[26],空间范围覆盖30个省级行政区,形成“东部集群发展—中部轴带延

伸—西部块状聚集”的梯度分布格局(图2)。19个城市群占据我国约25%的国土面积,汇聚了83%的人口,创造了80%以上的GDP,构成全国经济要素的核心承载区^[27]。其横跨湿润—半湿润—干旱区,涵盖长江、黄河、珠江等水系的主要流域,与多个国家重点生态功能区存在空间重叠,具备国土空间功能的全国性样本特征,因此本文选取其作为研究区具有典型性和代表性。

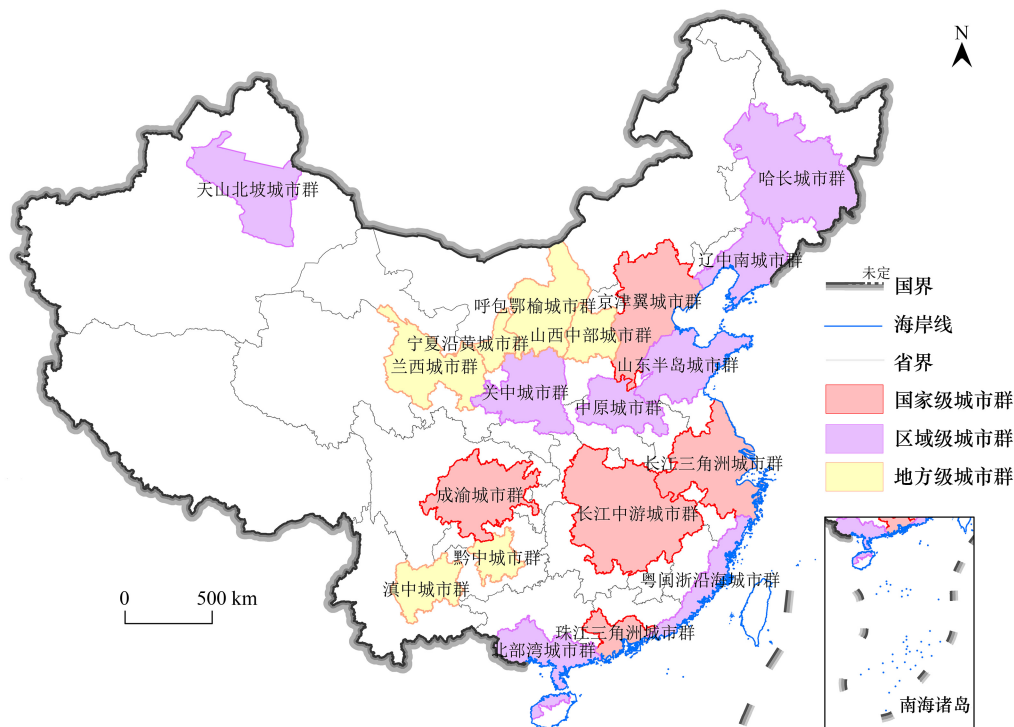


图2 研究区概况

Fig.2 Map of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 基于主体功能的“三生空间”分类

“三生空间”是指按照土地利用主要功能划分的生产空间、生活空间和生态空间的总称^[28]。生产空间是以提供工业品、农产品和服务产品为主导功能的区域,生活空间是人们用来满足居住、休憩、娱乐休闲等目的为主导功能的区域,生态空间是以提供生态产品和生态服务为主导功能的区域。本文以国土空间的生产、生活、生态功能为切入点,基于我国开发与保护发展实际和相关研究,参考宋永永等^[29]的分类标准,建立了城市群“三生空间”分类体系(表1)。

1.2.2 国土空间格局演变测度

本研究从空间分布、开发强度与生态功能三个维度入手刻画国土空间格局演变特征,综合运用标准差椭圆、国土空间开发强度和国土空间格局指数,对国土空间的时空演化进行定量分析,全面刻画国土空间格局的多维变化过程。

(1) 标准差椭圆

标准差椭圆通过直观计量国土空间分布的中心、方位角和长短轴等信息,识别国土空间类型面积的重心位置及其空间移动趋势^[30],计算公式为:

$$\text{平均中心坐标: } \bar{X}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \bar{Y}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

$$\text{方位角: } \theta = \arctan \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i'^2 - \sum_{i=1}^n y_i'^2 \right) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i'^2 - \sum_{i=1}^n y_i'^2 \right)^2 + 4 \left(\sum_{i=1}^n x_i' y_i' \right)^2}}{2 \sum_{i=1}^n x_i' y_i'} \right] \quad (2)$$

$$\text{轴标准差: } \delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cos \theta - y_i \sin \theta)^2}{n}}, \delta_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i \sin \theta + y_i \cos \theta)^2}{n}} \quad (3)$$

式中, (\bar{X}_w, \bar{Y}_w) 为加权平均中心; (x_i, y_i) 为城市群的几何中心坐标; w_i 为权重; θ 为方位角; x_i' 和 y_i' 分别为城市群中心到平均中心的坐标偏差; δ_x 和 δ_y 分别为沿 x 轴和 y 轴的标准差。

(2) 国土空间开发强度

国土空间开发强度综合指数可以描述一段时间人类对土地利用的广度和深度, 根据不同利用方式将土地分为 4 级, 并进行赋值: 其他生态空间赋值为 1, 林地、草地、水域生态空间赋值为 2, 农业生产空间赋值为 3, 工矿生产空间、城镇生活空间、农村生活空间赋值为 4^[31]。计算公式为:

$$LUI = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_i \quad (4)$$

式中, LUI 为国土空间开发强度综合指数; A_i 为第 i 类土地利用类型的分级程度指数; C_i 为第 i 类土地利用类型的面积占比。LUI 值越大表示研究区国土空间开发强度越大, 其值范围在 $[100, 400]$ 。

(3) 国土空间格局指数

国土空间格局指数通过定量指标反映国土空间模式、结构构成和空间配置特征。本文基于土地利用数据, 结合相关研究^[33-34], 从面积、形状、聚合和多样性指标中选取了边缘密度 (Edge Density, ED)、斑块密度 (Patch Density, PD)、面积加权的平均斑块分形指数 (Area-Weighted Mean Patch Fractal Dimension Index, AWMPFD)、景观形状指数 (Landscape Shape Index, LSI)、散布与并列指数 (Interspersion and Juxtaposition Index, IJI)、聚集度指数 (Aggregation Index, AI)、香农多样性指数 (Shannon's Diversity Index, SHDI)、香农均匀度指数 (Shannon's Evenness Index, SHEI) 等指标衡量城市群国土空间开发的形态变化, 采用 Fragstats4.2 软件, 通过移动窗口法对我国城市群 2000 年、2010 年、2020 年的国土空间格局演变特征进行统计。

1.2.3 生态系统服务价值

生态系统服务价值是指人类从生态系统中所获得的价值量^[34]。本研究参考谢高地等人提出的新版当量因子表^[16], 计算 ESV。公式如下:

$$ESV = \sum_{i=1}^n (VC_i \times A_i) \quad (5)$$

式中, ESV 为生态系统服务价值 (元), VC_i 是土地利用类型 i 的生态系统服务价值系数 (元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$), A_i 表示土地利用类型 i 的面积 (hm^2), n 是区域内土地利用类型数量。

根据谢高地的研究结果, 1 个标准单位生态系统服务价值当量定义为 1hm^2 农田每年平均粮食产量经济价值的 $1/7$ ^[35]。按照《中国统计年鉴》中反映的粮食作物生产情况, 本研究选择稻谷、小麦、玉米作为研究区的主要农作物, 引用全国粮食定基 CPI 数据以消除通货膨胀带来的物价波动的影响, 根据研究区域的实际情况对当量因子进行适当修正, 计算出生态系统服务价值当量因子为 $2041.87 (\text{元} \text{hm}^{-2} \text{a}^{-1})$ 。

1.2.4 空间分异驱动力测度

地理探测器是一种揭示地理现象空间分异性及其驱动因素的工具, 它由因子探测器、交互作用探测器、生态探测器和风险探测器组成^[36]。本研究运用因子探测和交互作用探测, 将 2000 年、2010 年、2020 年的 ESV 作为因变量 Y , 选取 X_1 (LUI)、 X_2 (PD)、 X_3 (LSI)、 X_4 (AWMPFD)、 X_5 (IJI)、 X_6 (SHDI) 6 个指标作为自变量来探测它们之间的相互作用。计算公式为:

表 1 中国城市群三生空间分类体系表

Table 1 Classification system of production-living-ecological space in UAs

三生空间分类			中国科学院土地利用分类体系	
Production-living-ecological space classification			Land use classification system of the Chinese Academy of Sciences	
一级空间	编号	二级空间	一级地类	二级地类
Primary space	Number	Secondary space	Primary land category	Secondary land category
生产空间	1	农业生产空间	耕地	水田、旱地
Production space	2	工矿生产空间	城乡、工矿、居民用地	其他建设用地
生活空间	3	城镇生活空间	城乡、工矿、居民用地	城镇建设用地
Living space	4	农村生活空间	城乡、工矿、居民用地	农村居民点用地
生态空间	5	林地生态空间	林地	有林地、灌木林地、疏林地、其他林地
Ecological space	6	草地生态空间	草地	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地
	7	水域生态空间	水域	河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、海涂、滩地
	8	其他生态空间	未利用地	沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石砾地、其他

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \tag{6}$$

式中, q 为度量值,表示自变量对因变量的解释力,值域为 $[0,1]$, q 值越接近 1 越表明该因子对 Y 具有更强的解释力, $h=1,2,3\cdots L$ 表示自变量 X 的分层, N_h 和 N 分别为层 h 和整个区域的单元数, σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和整个区域因变量 Y 值的方差。

1.3 数据来源

本文所使用的三期土地利用数据(2000 年、2010 年、2020 年)来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>,数据获取时间为 2024 年 7 月 1 日),空间分辨率为 30m×30m。其中,三期土地利用数据以 Landsat TM/ETM 遥感影像为主要数据源,通过人工目视解译生成。该数据包括 6 个一级类型和 25 个二级类型,通过验证,该数据分类精度均大于 90%^[37]。基于以上土地利用数据,计算国土空间开发强度综合指数、国土空间格局指数和生态系统服务价值。各生态系统单位面积服务价值所用粮食产量数据来源于 2000—2020 年《中国统计年鉴》,粮食价格来自《全国农产品成本收益资料汇编 2020》,CPI 指数来源于中国国家统计局网站。

2 中国城市群国土空间时空格局演变特征

2.1 国土空间“三生”结构变化和转化特征

2.1.1 “三生空间”结构变化

2000—2020 年间我国城市群国土空间结构变化显著,生活空间持续扩张,生产空间、生态空间逐渐缩减(图 3)。生活空间由 113718.01km²扩张至 159723.49km²,生产空间由 1144210.45km²缩减至 1119184.68km²,生态空间面积由 1633252.89km²缩小至 1616162.81km²。其中,农业生产空间共缩减 50395.33km²,受退耕还林还草政策的影响,2000—2010 年减少面积最大,为 28953.56km²;工矿生产空间不断扩张,2010—2020 年涨幅最为明显,共增加 25369.55km²。城镇和农村生活空间分别增加 32234.41km²和 13771.07km²,城镇生活空间增速明显高于农村生活空间,尤其是在 2000—2010 年,城市化进程较快,城镇扩张显著,城镇生活空间增加了 25523.74km²;林地、草地和其他生态空间面积持续下降,分别减少 3340.28km²、13617.41km²、4092.83km²,水域生态空间面积增加 3960.44km²。总体来看,城市群“三生空间”变化速度逐渐放缓,2000—2010 年间国土空间格局结构变化最为显著,2000—2010 年变化量是 2010—2020 年的 1.67 倍,这与 2010 年之后城镇无序扩张的趋势得到有效遏制,土地资源约束愈加明显,空间变化逐步趋向稳定和内涵式增长密切相关。

2000 年生产、生活、生态空间分别占城市群总面积的 39.58%、3.93%和 56.49%,到 2020 年生产、生活、生态空间分别占城市群总面积的 38.66%、5.52%和 55.82%,生态空间仍然占据主体地位(图 4)。中原城市群、

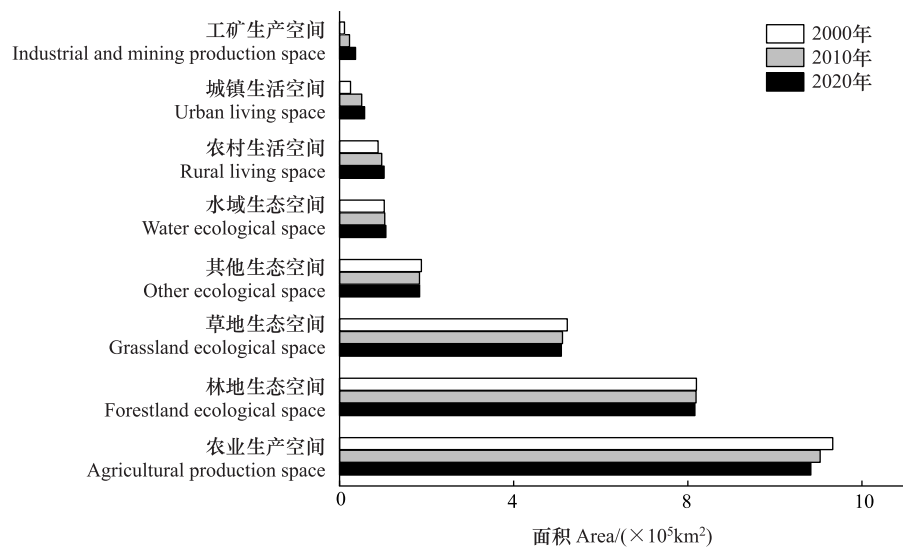


图3 2000—2020年城市群“三生空间”结构变化

Fig.3 Change of production-living-ecological space structure in UAs from 2000 to 2020

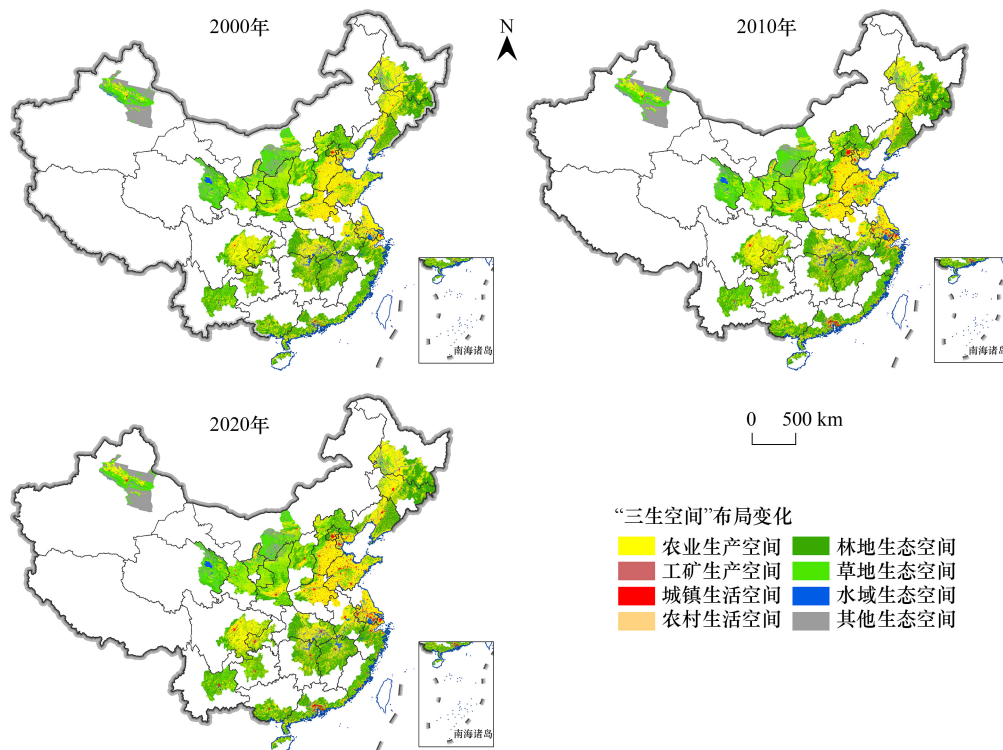


图4 2000—2020年城市群“三生空间”布局变化

Fig.4 Production-living-ecological space pattern of the UAs from 2000 to 2020

山东半岛城市群和哈长城市群等区域级城市群农业生产空间面积较大且相对集中,其中,2000年中原城市群农业生产空间面积为67695.85km²,占该城市群面积的66.68%。这些城市群地处平原,水资源充沛,为农业生产提供了极为优越的自然条件。京津冀城市群、长江三角洲城市群和珠江三角洲城市群等国家级城市群生活空间相对集中,这些地区经济发展迅猛、基础设施完善,城市化水平领先全国,形成了以大都市为核心的高密度生活空间网络。西北部城市群天山北坡城市群、呼包鄂榆城市群、兰西城市群、滇中城市群等地方级城市群

自然资源禀赋较差,开发程度较低,而生态空间富足。

2.1.2 “三生空间”结构转化

国土空间转移矩阵能清晰展现出 2000—2020 年城市群国土空间利用类型相互转化的数量和方向(图 5)。2000—2010 年农业生产空间转出面积最大,达到 97979.49km²,其中 25.53%转化为农村生活空间,20.02%转化为林地生态空间,18.19%转化为城镇生活空间。2010—2020 年农业生产空间转出面积最大,为 67696.89km²,其中 28.4%转为林地生态空间,16.51%转为农村生活空间,16.47%转为草地生态空间,而其他空

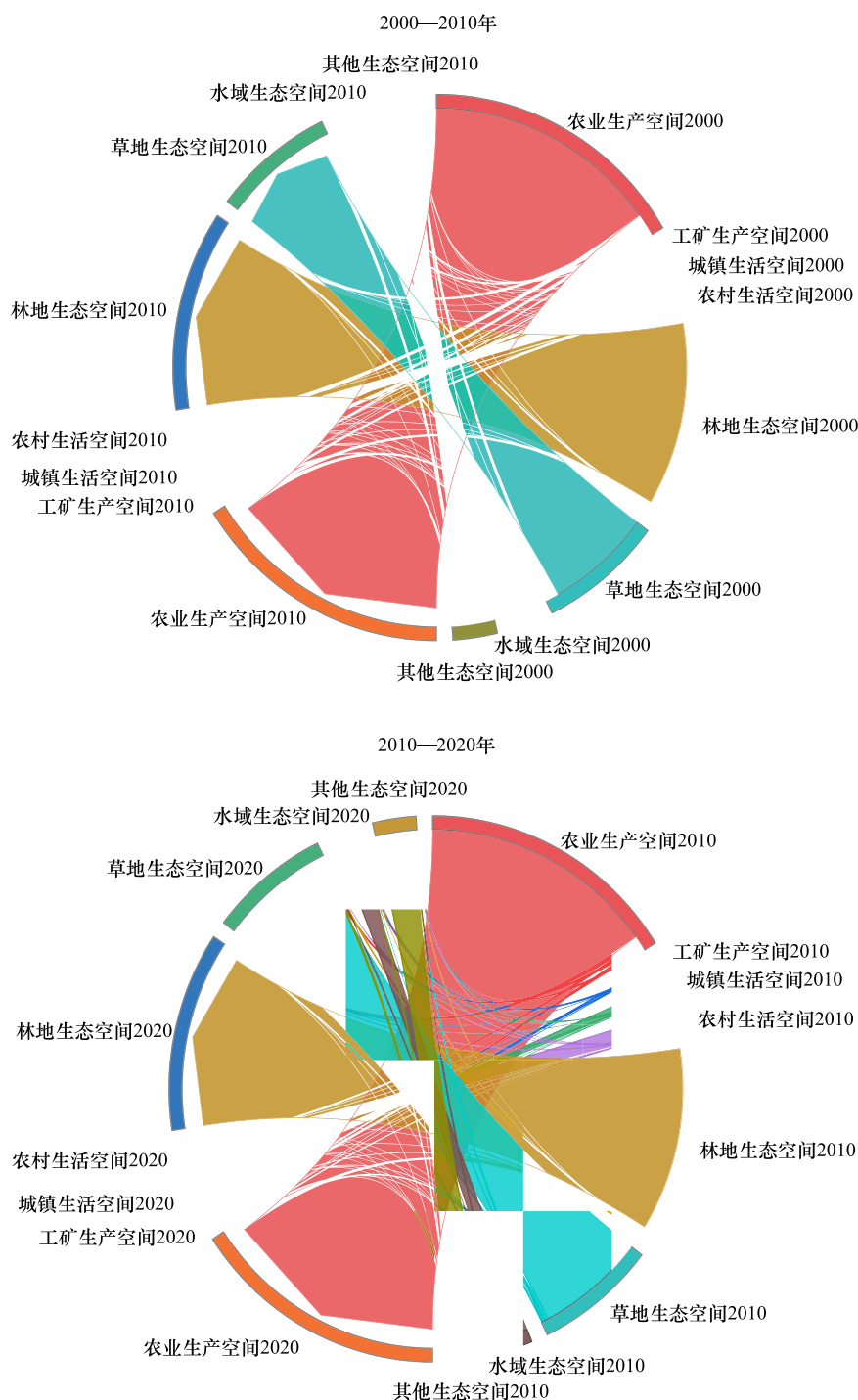


图 5 2000—2020 年城市群“三生空间”结构转化图

Fig.5 Transformation diagram of land-use in UAs from 2000 to 2020

间转入的面积为 46244.39km²,造成农业生产空间面积不断减少。2000—2010 年其他空间转为城镇生活空间的面积最大,为 25523.74km²,其中 65.48%是由农业生活空间转入,城镇生活空间面积的增长主要来源于对农业生产空间的侵占。2010—2020 年其他空间转为工矿生产空间面积最大,为 13746.38km²,其中 49.84%由农业生产空间转入,工矿生产空间面积的增长主要源于对农业生产空间的侵占。

城市群作为一种新的地理单位,功能性明显,所以更应关注城市群内部生产空间和生活空间对生态空间的侵占。2000—2020 年,生产空间转为生态空间的面积为 63196.18km²,生态空间转为生产空间的面积为 75814.61km²;生活空间转为生态空间的面积为 1964.83km²,生态空间转为生活空间的面积为 9642.23km²。由此可见,城市群中生态空间被大量侵占,共减少了 17090.08km²。从单个城市群来看,2000—2020 年间黔中城市群生态空间转为生产空间的面积最大,为 25041.05km²,其次是天山北坡城市群和哈长城市群,分别转移了 9820.65km² 和 9261.22km²。2000—2020 年珠江三角洲城市群生态空间转为生活空间的面积最大,为 28601.61km²,黔中城市群和中原城市群生态空间转为生活空间的面积分别为 8498.47km² 和 7874.17km²。

2.2 国土空间拓展方向变化

标准差椭圆能够刻画城市群国土空间格局演变的重心、方向和延展性(图 6)。从空间拓展变化及方向上看,农业生产空间的变化幅度最小,总体上呈现东北—西南的空间分布特征。工矿生产空间变化显著,其中 2000—2010 年标准差椭圆面积大幅减少, X 轴由 597.24km 增加至 641.43km, Y 轴由 1009.76km 减少至 940.89km,重心向西北方迁移。城镇生活空间标准差椭圆面积逐渐缩小,其中 2010—2020 年变化最大, X 轴由 702.96km 增加至 720.86km, Y 轴由 888.67km 减少至 862.52km,方位角从 20.32°变为 21.94°,这表明城镇生活空间集聚趋势显著,重心呈现东移北进的变化轨迹。农村生活空间变化较小,标准差椭圆面积小幅缩减,

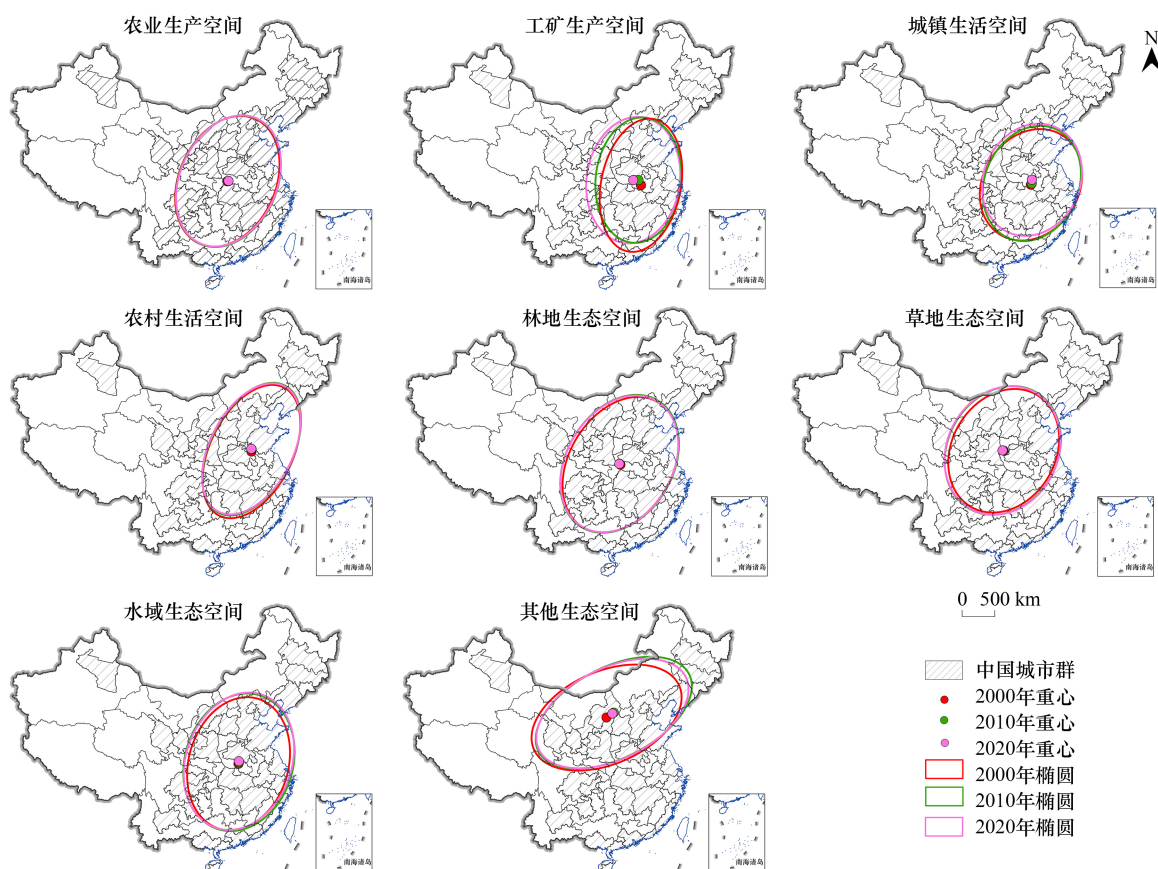


图 6 2000—2020 年城市群国土空间标准差椭圆变化

Fig.6 Changes of standard deviation ellipse of territorial space pattern in UAs from 2000 to 2020

Y 轴标准差长期显著高于 X 轴标准差,集聚趋势明显,空间重心逐渐向北移动。林地、草地生态空间标准差椭圆面积逐渐扩大,在 2000—2010 年间变化最为显著,林地、草地生态空间重心均向西北方移动。2000—2010 年,水域生态空间 X 轴由 744.94km 增加至 807.92km, Y 轴由 1015.06km 增加至 1048.9km,水域生态空间重心呈现东移北进的变化轨迹。其他生态空间的面积呈现波动下降的趋势,2010—2020 年 X 轴标准差明显缩小,其他生态空间重心呈现先向东北移动再向西南移动的趋势。

2.3 国土空间开发强度变化

利用公式(4)绘制国土空间开发强度图谱(图 7),分析人类活动对于陆地表面的影响。社会经济的持续发展需要更多土地作为发展空间,致使建设用地不断扩张,国土空间开发强度不断上升,LUI 均值从 2000 年的 238.83 上升到 2020 年的 242.39。从各城市群年均强度来看,山东半岛城市群、中原城市群强度均值位于各城市群前列,2020 年两个城市群强度指数均值分别为 296.61 和 292.81,这与生产空间、生活空间面积不断扩大密切相关,两个城市群地处华北平原,是我国重要的粮食主产区,农业生产空间占比高。珠江三角洲城市群强度指数增长最快,年均增长率为 0.17%,而关中城市群强度指数均值出现负增长,从 2000 年的 242.21 降到 2020 年的 240.62,关中地区作为我国重要的生态屏障,近年来为加强生态文明建设,严格实施生态保护红线制度,限制了部分生态敏感区的开发,因而出现负增长。天山北坡城市群开发强度指数最低,2020 年 LUI 平均值为 158.84,远低于其他城市群。天山北坡地区人口稀疏,城镇化水平低,城市发展缓慢,同时天山地区是我国重要的生态功能区,承担着水源涵养、沙漠化防治和保护生物多样性的重任,因此天山北坡城市群的开发受到严格限制,开发强度一直较低。近年来,各城市群之间的开发强度差异日渐扩大,在经济发展中都扮演了不同角色,东部地区城市群受到更多资源倾斜,基础设施建设和产业升级快速推进,而中西部城市群更多的承担了生态保护的任务,未来伴随着区域协调发展战略的深入推进,城市群之间的差异会逐渐缩小。

从空间分布来看,国土空间开发强度指数总体上呈现东南高、西北低的格局,呈“环状放射型”分布,由中

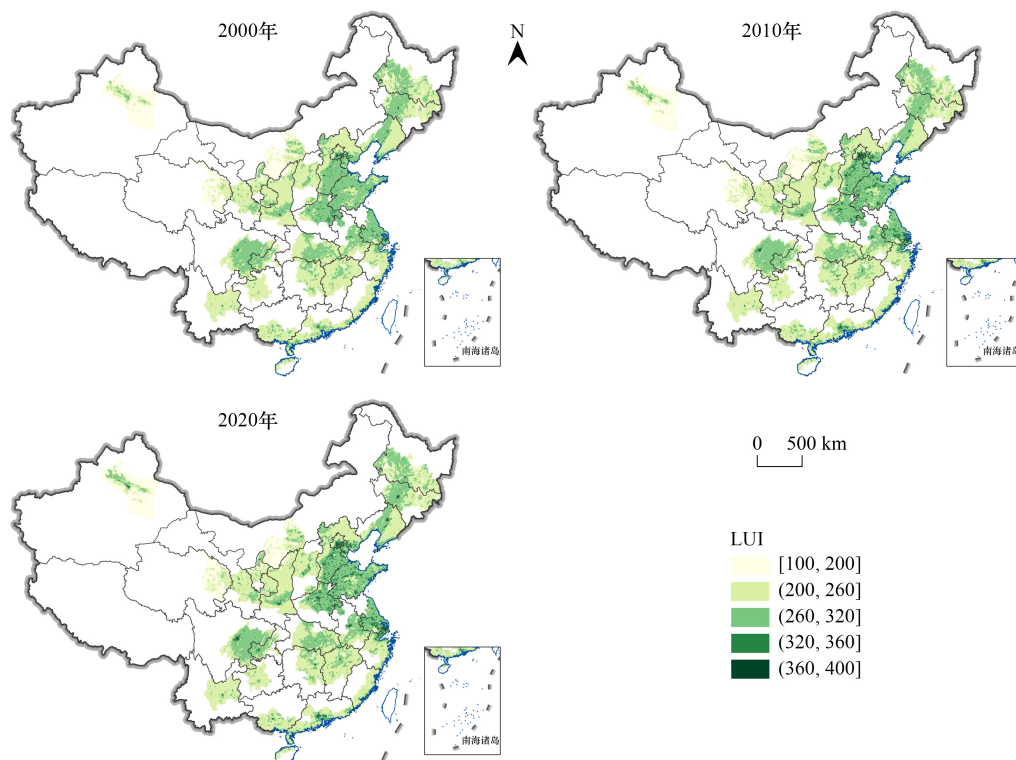


图 7 2000—2020 年城市群国土空间开发强度空间分布

Fig.7 Spatial distribution of LUI in UAs from 2000 to 2020

心向外蔓延,城市群之间开发强度差异显著,具有明显的聚集特征。低值区($100 \leq LUI \leq 200$)主要分布在我国西北部,特别是6个地方级城市群中。中值区($200 < LUI \leq 260$)主要分布在哈长城市群、辽中南城市群、黔中城市群、滇中城市群、关中城市群、成渝城市群、粤闽浙沿海城市群等区域级城市群中。高值区($260 < LUI \leq 400$)则主要分布在5个国家级城市群中。国土空间开发强度与自然地理条件、经济发展水平和政策、规划导向密切相关。国家级城市群多处于地势平坦、气候湿润地区,人口密度高、城镇化水平高,享受更多政策资源倾斜,开发强度要显著高于区域级城市群和地方级城市群。我国西北地区经济相对落后,人口稀少,土地开发活动有限,自然条件也限制了土地利用的规模和强度,所以开发强度指数长期处于低值区。

2.4 国土空间格局指数变化

图8反映了两种趋势,ED、PD、LSI、IJI、SHDI、SHEI的数值逐渐增加,AWMPFD和AI指数不断下降,可见20年间城市群的国土空间格局变化显著。ED和PD的增长表明研究区斑块趋于小型、破碎化;LSI指数从2000年的297.15增长至2020年的305.68,表明空间破碎化程度增加,这种破碎化格局增强了生态系统内部的边界效应,导致种群交流和物质循环受到阻碍;IJI指数的增长意味着景观异质性增加,国土空间类型更加多样;SHDI和SHEI的上升也说明研究区内景观更加多样,景观类型均衡发展。AWMPFD指数的下降表明人类活动的干扰更加明显,地类斑块的形状日渐规则;AI指数从2000年的65.7下降到2020年的64.7,说明随着国土空间开发强度的提高,相同类型地类的空间聚集性减弱,各地类分布更加分散。

按照不同地类分析(图9),生产空间的ED、PD、LSI、IJI指数攀升,AWMPFD和AI指数下降,这与研究区整体变化一致,生产空间出现大量小斑块,破碎化程度加剧,优势斑块的地位被逐渐削弱,景观类型更加多样。其中,工矿生产空间的变化最为显著,LSI由2000年的57.31增长至2020年的135.68,扩大2.37倍,AI指数由2000年的43.57降至2020年的26.4,缩小了40.41%,对生产空间的连续性和生产效率产生不利影响。城

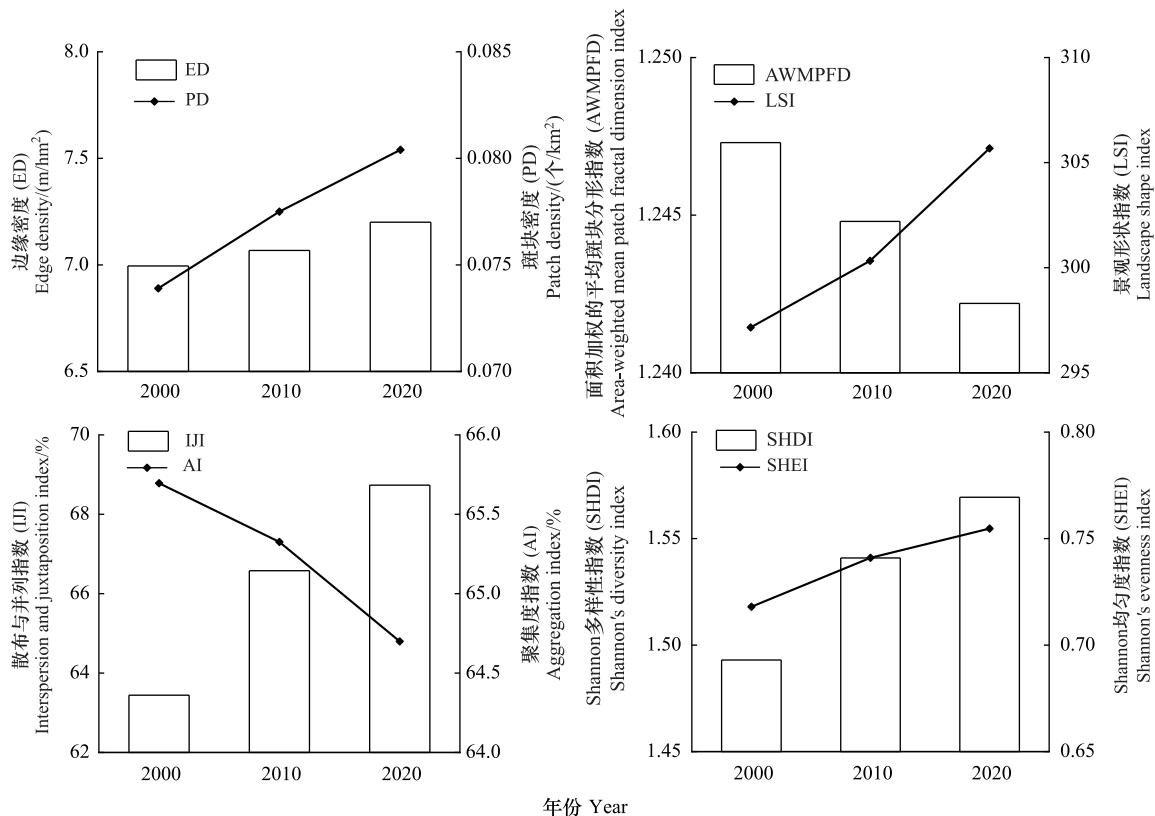


图8 2000—2020年城市群国土空间格局指数的变化

Fig.8 Change in the national spatial pattern indicators of UAs from 2000 to 2020

镇生活空间和农村生活空间的 PD、ED、IJI、AI 指数显著上升,说明生活空间内部更加复杂、细碎,功能交织更加明显,整体布局更加紧凑、集中。林地、草地生态空间的斑块形状更加复杂,景观多样性增加,2000—2010 年,两者的 ED、PD 和 LSI 指数出现了不同程度的下降;水域生态空间的聚集度降低,景观破碎化程度增加;其他生态空间的 ED 和 PD 指数不断下降,AWMPFD 和 IJI 指数上升。由于生态保护政策的相继出台,人类活动得到控制,小斑块逐渐消失或合并,廊道连通性改善,生态空间更加连续化、规则化,生态系统稳定性增强,整体生态功能得到提升。

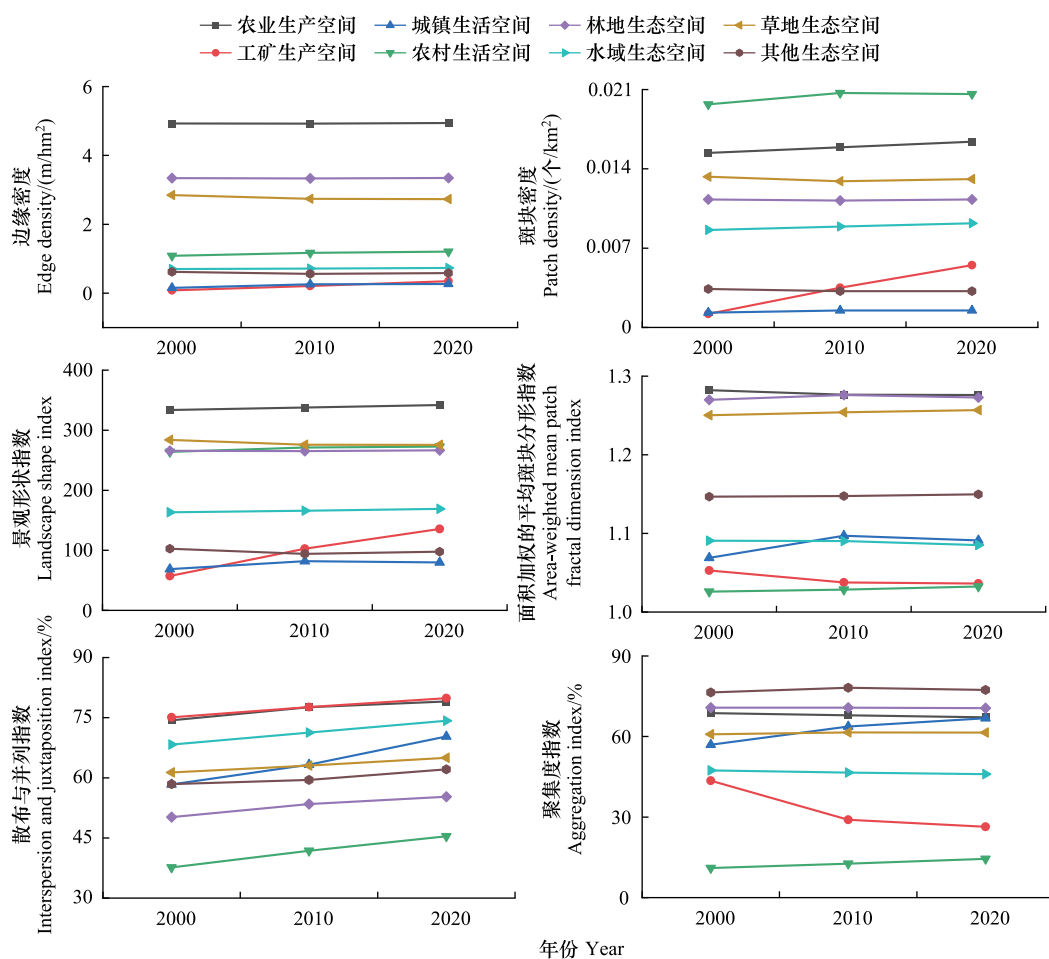


图 9 2000—2020 年城市群每种土地利用类型的国土空间格局指标

Fig.9 National spatial pattern indicators of each land-use type in UAs from 2000 to 2020

3 生态系统服务价值响应及驱动机理

3.1 生态系统服务价值响应的时空变化

我国城市群生态系统服务价值在空间上从西北向东南逐渐升高,与各城市群的自然条件基本一致。2000 年、2010 年、2020 年我国城市群的 ESV 总值分别为 72440 亿元、73579 亿元和 74698 亿元,生态系统服务价值总值正在以每年 1.5% 的速度增长。尽管农业生产空间、林地生态空间、草地生态空间和其他生态空间面积减少,但是水域生态空间的面积显著扩张,弥补了其他地类面积变化所导致的生态系统服务价值的降低,对于城市群 ESV 的增长具有重要作用。生态系统服务价值高值区主要分布在我国东南部、东北部城市群,尤其是沿海地区这些降水充沛、植被茂盛的地方(图 10);长江三角洲城市群和珠江三角洲城市群等国家级城市群 ESV 显著高于我国中西部城市群,这些城市群经济发达、人口密集,土地开发强度较高,生态系统面临较大压力,但

其优越的自然条件和生态保护资源的大量投入,确保了其具有较高的生态系统服务价值且变化稳定。生态系统服务价值低值区主要分布在西北部城市群,这些地区气候相对恶劣,生态环境脆弱,未利用地较多。生态系统服务价值极值区主要分布青海湖、长江中下游地区、海河入海口和珠江入海口。

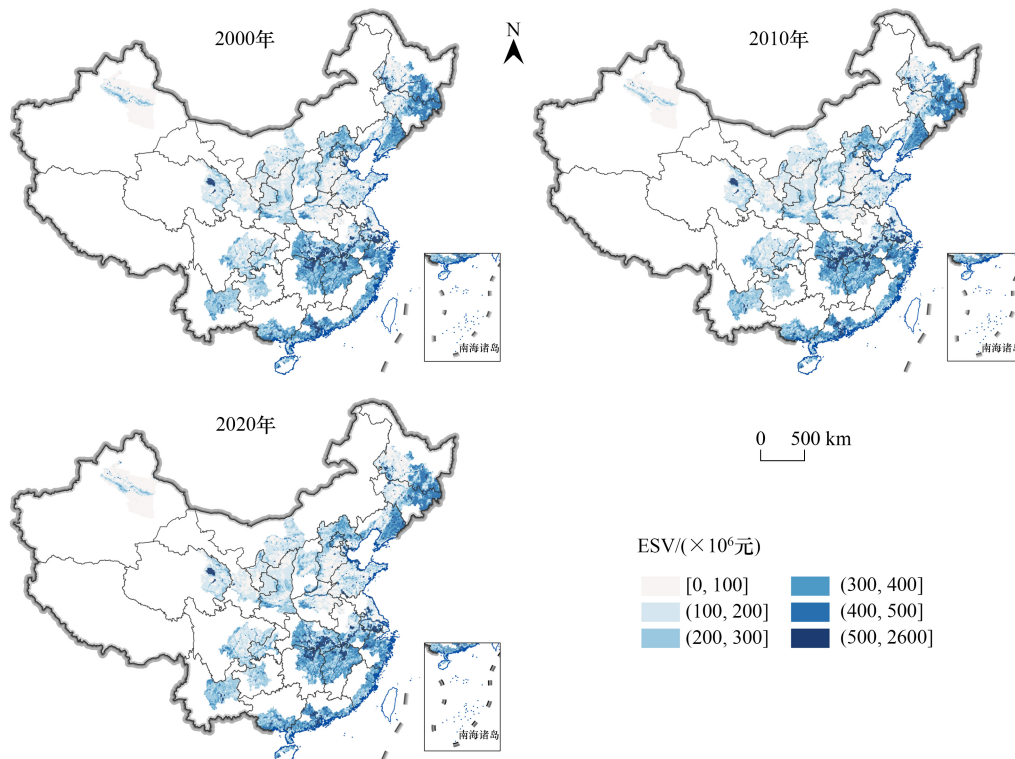


图 10 2000—2020 年城市群 ESV 的空间分布

Fig.10 Spatial distribution of ESV in UAs from 2000 to 2020

各个城市群之间的 ESV 差异显著,其中,长江中游城市群生态系统服务价值一直处于领先地位,2000 年 ESV 总量为 13343.67 亿元,2020 年增长到 13356.23 亿元,其次是哈长城市群和长江三角洲城市群,2020 年的 ESV 总量分别为 8644.55 亿元和 8274.76 亿元,宁夏沿黄城市群 ESV 总量最低,2020 年 ESV 总量仅为 616.58 亿元。经过 20 年的发展,城市群之间 ESV 的差距并未缩减,反而持续扩大。从总量上看,我国城市群 ESV 呈上升趋势,但是哈长城市群、珠江三角洲城市群、天山北坡城市群和山西中部城市群 ESV 逐年递减,这与生态空间被大量侵占,国土空间开发强度持续扩大密切相关,应当优化土地利用方式,加强生态环境保护与修复。长江三角洲城市群、兰西城市群、成渝城市群、辽中南城市群等城市群 ESV 逐年上升,其中,山东半岛城市群的 ESV 增速最快,ESV 总量增加了 957.68 亿元,辽中南城市群、京津冀城市群 ESV 总量分别增长了 419.33 亿元和 374.01 亿元,这与我国近年来划定生态保护红线,出台生态补偿政策密不可分。

3.2 关键驱动因子分析

根据公式(6)探测 2000—2020 年城市群国土空间格局演化对生态系统服务价值影响的关键驱动因子及其解释力,研究以 2000 年、2010 年、2020 年城市群 10km×10km 网格尺度的生态系统服务价值作为因变量,利用地理探测器评估相关驱动因子对生态系统服务价值的影响结果,选取 X_1 (LUI)、 X_2 (PD)、 X_3 (LSI)、 X_4 (AWMPFD)、 X_5 (IJI)、 X_6 (SHDI) 6 个指标(图 11)。各驱动因子均通过了显著性检验,不同程度地对生态系统服务价值的空间分异做出解释。解释力较高的因子为 X_1 、 X_4 和 X_6 。 X_1 是城市群生态系统服务价值的主要驱动力, q 值在三个时间节点中均保持在最高水平(2000 年 $q=0.1057$,2010 年 $q=0.104$,2020 年 $q=0.1008$),对研究区生态系统服务空间分布具有关键影响,随着开发强度的提高,ESV 受到了更大的压力与干扰。 X_4 和 X_6

的解释力较高,空间类型的多样性与边界复杂性对 ESV 分布具有重要作用。 X_2 和 X_5 的解释力较小,局部景观破碎化的程度对整体 ESV 影响较弱。从时间上看,6 个指标对于因变量的解释力在逐渐减弱,表明研究区域内国土空间格局更加复杂,土地利用类型之间的边界逐渐模糊、功能叠加效应增强,单一指标难以准确反映 ESV 的变化特征。人类活动的加剧和生态保护的推进,使国土空间格局呈现出分散与集聚并存的双向变化趋势,这也证明了单一指标无法全面反映这种复杂的动态变化。

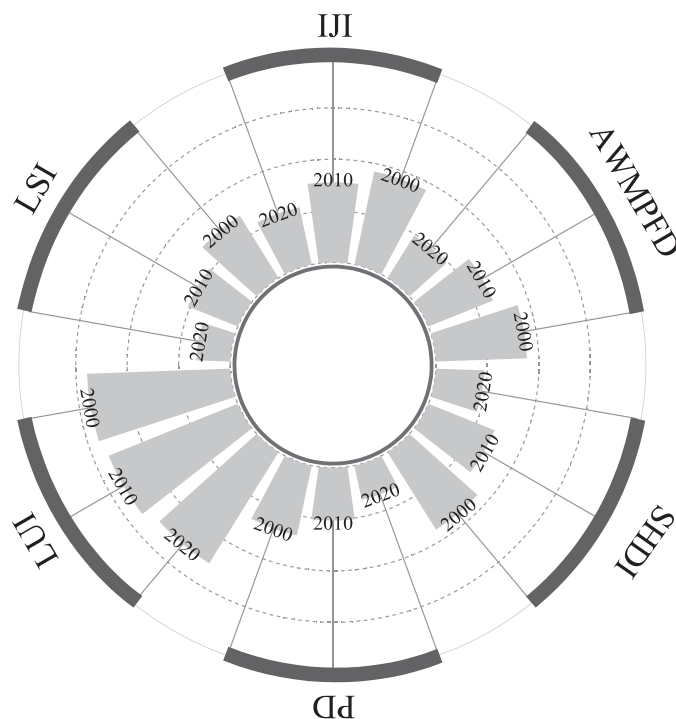


图 11 2000—2020 年城市群驱动因子地理探测分析结果

Fig.11 Geographical detection analysis results of driving factors for UAs from 2000 to 2020

3.3 驱动因子交互作用分析

以 2000 年、2010 年、2020 年为研究年份,对影响因子进行交互探测,得到不同因子之间的交互探测结果(图 12)。研究发现,任意两个驱动因子的交互作用均大于单因子的影响,两两交互的类型主要表现为交互增强或非线性增强,由此说明生态系统服务价值的演变并非由单一因子影响造成的。其中,2000 年、2010 年、2020 年的 $X_2 \cap X_3$ 、 $X_3 \cap X_5$ 交互后的 q 值均显著大于二者 q 的最大值,表现为双因子增强。 $X_1 \cap X_4$ 两两交互后表现为非线性增强,交互影响对生态系统服务价值的空间分异解释力最强($q=0.2$),处于优势主导地位,可见在高强度开发区域,斑块形状的简单化对 ESV 的负面影响会被进一步放大,这是因为开发强度的提高与生态连通性的削弱存在叠加效应,导致生态系统服务功能的退化更为严重。 X_1 与其他因子间的交互作用最为显著,城市建设用地大量扩张、耕地无序开垦、矿产资源大规模开发等人类活动导致其与其他因子间的作用关系更为复杂,对研究区国土空间格局的干扰作用也更为强烈。

本研究表明,LUI 是 ESV 的主要驱动力,LUI 与其他因子间的交互作用也最为显著,可见国土空间开发强度是确定生态系统服务价值高低的关键因素,LUI 的增加反映了更高比例的生态空间被转化为生产和生活空间,这种现象在五个国家级城市群中最为突出。LUI 的增加会使生物栖息地大幅减少、连通性降低,削弱生态系统提供气候调节、水源涵养和土壤保持服务的能力。同时,高强度开发伴随着资源的过度消耗和环境污染,进一步加剧区域生态环境压力。在经济飞速发展的长江三角洲城市群、珠江三角洲城市群中,土地利用的高强度开发对 ESV 的负面影响尤为显著。

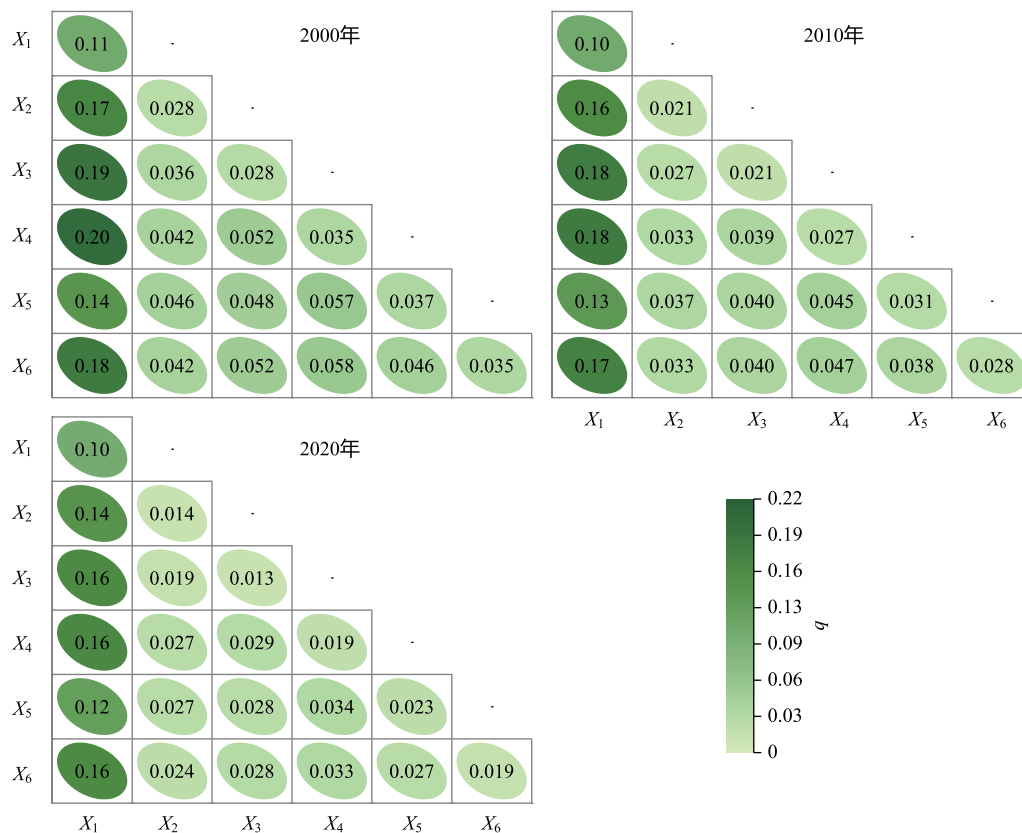


图 12 2000—2020 年城市群多因子交互探测结果

Fig.12 Multi-factor interaction detection results in UAs from 2000 to 2020

4 结论与讨论

4.1 结论

本研究基于土地利用数据和统计年鉴数据,对 2000—2020 年我国城市群国土空间开发强度综合指数、国土空间格局指数和生态系统服务价值进行了测算,通过地理探测器模型探测不同影响因子对 ESV 的解释力。研究结果可为优化中国城市群国土空间格局、提升生态系统服务提供科学依据,为推动区域协调发展和实现“双碳”目标背景下的高质量发展战略提供决策参考。主要研究结果如下:

(1) 国土空间结构变化显著,生活空间挤占生态和生产空间现象突出。生活空间持续增长,尤其是城镇生活空间增幅较大;工矿生产空间不断扩大,但农业生产空间大幅萎缩;生态空间受到挤占,尤其是林地、草地生态空间减幅较大。但从时间维度看,各类用地空间冲突在 2010 年之后逐渐趋于缓和。

(2) 国土空间格局变化方向性明显。工矿生产空间、林地、草地生态空间重心均向西北生态脆弱区推进,加剧开发—保护矛盾,农业生产空间、城镇、农村生活空间、水域、其他生态空间重心均向东北粮食主产区聚集,诱发土地资源竞争,生态环境压力增大。

(3) 国土空间开发强度区域差异显著。开发强度层级固化,高值区集中在国家级城市群,中值区集中在区域级城市群,低值区则集中在西部地方级城市群,受生态约束陷入“低开发陷阱”;强度从城市群中心向外逐渐降低,呈“环状放射型”分布。

(4) 国土空间格局指数变化显著。国土空间格局指数表现出明显的空间异质性,ED、PD、LSI、IJI、SHDI、SHEI 均呈上升趋势,AWMPFD 和 AI 呈下降趋势,人类活动正在简化生态斑块形状但土地类型混杂,国土空

间形态和功能更加复杂。

(5) ESV 空间分异特征更加突出。我国城市群生态系统服务价值连年攀升,主要靠水域生态补偿效应抵消林地、草地空间损失,总体上呈现东南高、西北低的空间分布特征。东南部高值区与西北部低值区差异持续扩大,暴露自然本底与政策投入的“双重马太效应”。

(6) LUI 是 ESV 变化的关键驱动因子。LUI 对 ESV 的解释力持续领先,印证了国土开发强度是 ESV 的首要胁迫源。非线性增强效应表明高强度开发区内斑块形状规则化将会放大 ESV 损失;在城市群尺度中更需关注整体空间组织模式而非局部破碎化。

4.2 讨论

探究国土空间格局演变与生态系统服务价值之间的关联,有助于从生态系统的整体性和动态性出发保护生态系统结构、功能与资源的可持续供给能力,为国土空间规划提供更好的指引^[38]。城市群生态空间被生产、生活空间大规模侵占,反映了快速城镇化进程中的国土空间代价。这一趋势与樊杰^[39]提出的“生产-生活-生态”空间冲突理论高度吻合。草地、林地等关键生态空间缩减,将会直接削弱水源涵养、生物多样性维护等调节服务;工矿生产空间向西北扩张,与生态本底脆弱的西北城市群形成空间开发与生态承载力错位,极易导致区域生态风险累积,加剧生态环境破坏。对比刘纪远^[40]全国尺度研究,本成果首次量化了城市群这一战略核心区的空间冲突强度,为“三区三线”精准管控提供实证基准。国土空间格局指数变化表明建设用地无序蔓延导致生态空间被切割,边缘效应削弱核心生态功能区功能,与郑博福等^[41]景观破碎化导致 ESV 衰减的结论一致。可见国土空间格局指数变化与 ESV 空间分异呈显著关联。尽管东南部城市群 ESV 总量高,但 LSI、IJI 的急剧上升也暗示其生态韧性潜在衰退,这与单纯依赖 ESV 总值评估的结论形成互补警示。

随着国土空间格局的复杂化和生态系统服务功能的下降,传统的开发模式已经无法适应未来城市群可持续发展的需求。为了应对这一挑战,应当:

(1) 科学划定三生空间保护边界。政府应当摒弃传统以生产空间为主导的开发模式,加快构建以生活空间主导、生态空间优先、生产-生活-生态空间统筹协调的可持续发展格局。

(2) 构建生态补偿机制。建立生态补偿机制是贯彻落实科学发展观的重要举措,国家应当建立多种生态补偿标准,坚持“谁开发谁保护、谁受益谁补偿”的原则,因地制宜选择生态补偿模式。

(3) 提升国土空间利用效率。我国应当优化国土空间格局,提高土地利用效率,不断探索和推进全域土地综合整治,构建生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀的自然资源空间新格局。

本研究提供了有关国土空间格局演变与生态系统服务价值之间关系的初步探索,但仍存在一些不足。首先,数据的获取主要依赖于土地利用变化和统计年鉴数据,未来可以结合更精细的遥感数据和长时间序列的环境监测数据,更准确地捕捉空间变化与生态功能变化的动态关系。其次,未来可以进一步探讨不同类型的生态空间对 ESV 的贡献差异,以及不同生态环境下,不同开发强度对 ESV 的具体影响机制。

参考文献 (References):

- [1] 王丹阳,陈逸,黄贤金,宋娅娅,李升峰,施利锋. 基于空间冲突的区域国土空间优化研究——以江苏省为例. 长江流域资源与环境, 2022, 31(4): 832-839.
- [2] 贺大为,金贵,王新生,郭柏枢. 长江经济带国土空间开发与保护路径优化. 生态学报, 2023, 43(14): 5776-5787.
- [3] 龚健,高静,陈光,杨建新. 国土空间格局优化情景分析:理论与方法. 中国土地科学, 2024, 38(2): 1-10.
- [4] 黄安,许月卿,卢龙辉,刘超,张益宾,郝晋珉,王惠. “生产-生活-生态”空间识别与优化研究进展. 地理科学进展, 2020, 39(3): 503-518.
- [5] 周国华,彭佳捷. 空间冲突的演变特征及影响效应——以长株潭城市群为例. 地理科学进展, 2012, 31(6): 717-723.
- [6] 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. 地理学报, 2017, 72(7): 1290-1304.
- [7] 樊杰,周侃. 以“三区三线”深化落实主体功能区战略的理论思考与路径探索. 中国土地科学, 2021, 35(9): 1-9.
- [8] 冀正欣,刘超,许月卿,黄安,卢龙辉,段亚明. 基于土地利用功能测度的“三生”空间识别与优化调控. 农业工程学报, 2020, 36(18): 222-231, 315.

- [9] 胡碧松, 张涵玥. 基于 CA-Markov 模型的鄱阳湖区土地利用变化模拟研究. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 1207-1219.
- [10] 冯雨柯, 翟石艳, 姜昕彤, 罗静静, 闫培雪, 董畅畅, 韩嘉惠. 中原城市群“三生”空间模拟及生态效应评估——基于未来土地利用模拟模型和共享社会经济路径情景. 生态学报, 2023, 43(20): 8292-8308.
- [11] 谭洁, 范思毓, 余德, 邓慧婷, 廖朝阳, 刘琴. 洞庭湖生态经济区“三生”空间冲突特征与预测. 环境科学, 2025; 1-17. (2025-05-14). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjks.202502145>.
- [12] 石龙宇, 冯运双, 高莉洁. 长三角县域国土空间开发适宜性评价方法研究——以长兴县为例. 生态学报, 2020, 40(18): 6495-6504.
- [13] 张剑飞, 阳文锐, 李晶晶, 沈守云, 马力, 陈亮. 北京市生态系统服务价值时空变化及其驱动力. 生态学报, 2025, 45(1): 306-318.
- [14] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Ecological Economics, 1998, 25(1): 3-15.
- [15] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [16] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [17] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [18] 李思源, 倪欢, 牛晓楠, 冯梦凡, 吴宇, 冯欢. 闽三角城市群土地利用与生态系统服务价值时空演变及未来多情景模拟. 地理与地理信息科学, 2024, 40(5): 28-34, 41.
- [19] 赵祖伦, 罗军华, 李威, 黄亮, 尹林江, 吕思思, 赵卫权. 喀斯特山地城市群生态系统服务价值演变及影响因素. 水土保持研究, 2024, 31(5): 410-420.
- [20] 李月, 刘静兰, 白晓永, 冯霞, 邱林. 长江上游水源涵养区生态系统服务价值多尺度空间分异——格局、过程与驱动力. 生态学报, 2025, 45(7): 3062-3078.
- [21] 邵明, 董宇翔, 林辰松. 基于 GWR 模型的成渝城市群生态系统服务时空演变及驱动因素研究. 北京林业大学学报, 2020, 42(11): 118-129.
- [22] 王若思, 潘洪义, 刘翊涵, 唐玉萍, 张之风, 马红菊. 基于动态当量的乐山市生态系统服务价值时空演变及驱动力研究. 生态学报, 2022, 42(1): 76-90.
- [23] 林卫, 周金星, 何荣晓, 陈宗铸, 陈毅青, 王韞韬, 钟云芳, 雷金睿. 琼北地区“三生”空间生态系统服务价值时空演变及其驱动因素探测. 生态环境学报, 2025, 34(8): 1317-1328.
- [24] Fang C L, Yu D L. Urban agglomeration: an evolving concept of an emerging phenomenon. Landscape and Urban Planning, 2017, 162: 126-136.
- [25] 牛一帆, 陈万旭, 王官政, 吴佳慧, 曾杰, 刘志玲. 中国城市群城市用地扩张多情景模拟研究. 生态学报, 2025(23): 1-14. (2025-09-19). <https://link.cnki.net/doi/10.20103/j.stxb.202412313209>.
- [26] 方创琳. 新发展格局下的中国城市群与都市圈建设. 经济地理, 2021, 41(4): 1-7.
- [27] 李国平, 朱婷, 孙瑀. 高质量区域空间格局构建下中国经济区划调整研究. 地理科学, 2024, 44(1): 20-29.
- [28] 崔家兴, 顾江, 孙建伟, 罗静. 湖北省三生空间格局演化特征分析. 中国土地科学, 2018, 32(8): 67-73.
- [29] 宋永永, 薛东前, 夏四友, 米文宝. 近 40a 黄河流域国土空间格局变化特征与形成机理. 地理研究, 2021, 40(5): 1445-1463.
- [30] 卢照地, 张正峰. 京津冀国土空间格局演变及其驱动因素的区域差异性研究. 中国土地科学, 2022, 36(10): 42-52.
- [31] Zeng J, Wu J H, Chen W X. Coupling analysis of land use change with landscape ecological risk in China: a multi-scenario simulation perspective. Journal of Cleaner Production, 2024, 435: 140518.
- [32] 李涛, 高毅华, 王姣娥. 西成高铁陕西段沿线土地利用和景观格局变化的梯度效应. 生态学报, 2025, 45(4): 1629-1645.
- [33] 宋慧仙, 角媛梅, 周伟奇, 王佳. 近 70 年云南省气候景观时空异质性. 生态学报, 2025, 45(13): 6157-6169.
- [34] 温馨, 陈春. 基于“三生空间”的长江流域重庆段生态系统服务价值时空演变研究. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2022, 39(3): 128-140.
- [35] 陈万旭, 李江风, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析. 自然资源学报, 2019, 34(2): 325-337.
- [36] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [37] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 徐新良, 张树文, 颜长珍, 李仁东, 吴世新, 胡云锋, 杜国明, 迟文峰, 潘涛, 宁静. 2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征. 地理学报, 2018, 73(5): 789-802.
- [38] 王可心, 刘欣, 张云路. 国土空间用地变化与生态系统服务价值时空演变关系. 中国城市林业, 2021, 19(5): 28-33.
- [39] 樊杰. 中国主体功能区划方案. 地理学报, 2015, 70(2): 186-201.
- [40] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.
- [41] 郑博福, 黄琼瑶, 陶林, 谢泽阳, 艾彪, 朱元皓, 朱锦奇. 赣南地区景观格局变化及其对生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2021, 41(15): 5940-5949.