

DOI: 10.20103/j.stxb.202412313209

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, 45(23): - .

Niu Y F, Chen W X, Wang G Z, Wu J H, Zeng J, Liu Z L. Multi-scenario simulation of urban land expansion in Chinese urban agglomerations. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(23): - .

中国城市群城市用地扩张多情景模拟研究

牛一帆¹, 陈万旭¹, 王官政¹, 吴佳慧¹, 曾杰¹, 刘志玲^{2,*}

1 中国地质大学(武汉)区域生态过程与环境演变湖北省重点实验室, 武汉 430074

2 中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074

摘要:中国城市群作为国家新型城镇化与经济发展和发展的战略载体, 正面临城市用地扩张与生态保护的协同治理挑战。通过探究多情景模拟下中国 19 个城市群城市用地扩张的时空特征与模式, 旨在揭示其生态影响、提出生态保护策略并优化扩张路径, 为城市规划与可持续发展提供科学支撑。以往鲜有研究揭示多情景模拟下中国 19 个城市群城市用地扩张差异性特征, 这一研究不足限制了针对不同城市群特征制定精细化城市发展政策的能力。因此本研究基于多源数据, 运用 PLUS 模型和景观格局指数等方法, 揭示了 2000—2030 年中国 19 个城市群城市用地多情景时空变化特征及其扩张模式。研究结果如下: (1) 城市用地面积占比由 2000 年 1.27% 增至 2020 年 3.20%, 其中耕地转入贡献率达 65.3%, 2030 年城镇发展情景下城市用地面积最大为 $1.70 \times 10^5 \text{ km}^2$, 较 2020 年增长 4.3 倍; (2) 景观格局呈现显著异质性, 2000—2020 年, 中国城市群城市用地面积增加、破碎度增大、景观形状趋于复杂、平均规模逐渐变小, 2030 年城镇发展情景下, 城市用地面积扩张更加剧烈, 其聚集度及复杂程度均增加。核心城市表现为大规模、快速扩张, 空间形态复杂, 生态保护情景下仍保持较高的平均斑块面积, 次核心城市扩张规模相对较小, 但斑块密度和聚集度较高, 反映出适中的扩张态势, 而其他等级城市扩张规模小、速度慢, 空间形态简单, 用地扩张有限且分散; (3) 扩张模式呈现“飞地-填充”的动态转换特征, 2000—2010 年, 飞地式扩张广泛分布于哈长、辽中南、京津冀等城市群, 填充式扩张则集中于东部沿海及部分内陆城市群, 2010—2020 年, 飞地式扩张减少, 填充式扩张增加, 尤其在东部沿海及成渝、长江中游等城市群, 核心城市以填充式扩张为主, 次核心城市从蔓延-填充复合扩张逐渐向填充式主导过渡, 其他等级城市也出现填充式扩张趋势, 2030 年, 城镇发展、耕地保护和自然增长情景下, 以蔓延式扩张为主; 生态保护情景下, 发生城市用地扩张的区域较少。城镇发展情景下核心城市以蔓延式扩张为主, 次核心城市以蔓延-填充复合扩张。研究结果为城市群城镇健康发展、耕地资源可持续利用以及生态环境安全保障提供重要参考。

关键词:城市用地扩张; 多情景模拟; 景观格局指数; 扩张模式; 城市群; 中国

Multi-scenario simulation of urban land expansion in Chinese urban agglomerations

NIU Yifan¹, CHEN Wanxu¹, WANG Guanzheng¹, WU Jiahui¹, ZENG Jie¹, LIU Zhiling^{2,*}

1 Hubei Key Laboratory of Regional Ecology and Environmental Change, School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2 School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: As a strategic carrier of national new urbanization and economic development, Chinese urban agglomerations are facing the challenge of synergistic governance between urban land expansion and ecological protection. By exploring the spatial and temporal characteristics and patterns of urban land expansion in 19 Chinese urban agglomerations under multi-scenario simulations, this study aimed to reveal the ecological impacts, propose ecological protection strategies, and optimize the expansion paths to provide scientific support for urban planning and sustainable development. Few studies have

基金项目:国家自然科学基金项目(42371258)

收稿日期:2024-12-31; **网络出版日期:**2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Liuzl@cug.edu.cn

#限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台统计数据。

revealed the different characteristics of urban land expansion in the 19 Chinese urban agglomerations under multi-scenario simulation. This limitation has constrained the ability to formulate fine-grained urban development policies tailored to the characteristics of different urban agglomerations. Therefore, this study revealed the characteristics of multi-scenario spatial and temporal changes in urban land use and its expansion patterns of 19 Chinese urban agglomerations from 2000 to 2030. We used multi-source data, the PLUS model, and landscape pattern indices. The results were as follows. (1) The proportion of urban land area increased from 1.27% in 2000 to 3.20% in 2020, of which the contribution rate of arable land transfer reached 65.3%, and the maximum urban land area under the urban development scenario was $1.70 \times 10^5 \text{ km}^2$ in 2030, which was a 4.3-fold increase compared with that of 2020; (2) The landscape pattern showed significant heterogeneity. From 2000 to 2020, the urban land area of Chinese urban agglomerations increased, the degree of fragmentation increased, the shape of the landscape tended to be more complex, and the average size gradually became smaller. Under the urban development scenario in 2030, the expansion of the urban land area was more drastic, and its aggregation and complexity increased. Core cities exhibited large-scale and rapid expansion with complex spatial patterns. They still maintained a high average patch area under the ecological protection scenario. Sub-core cities exhibited relatively small-scale expansion but high patch density and aggregation, reflecting a moderate expansion trend. Other grades of cities experienced small-scale expansion, slow speed, simple spatial patterns, and limited and dispersed land use expansion; (3) The expansion pattern showed the dynamic conversion characteristics of 'enclave-infill'. From 2000 to 2010, enclave expansion was widely distributed in urban agglomerations such as Harbin-Changchun, Mid-southern Liaoning, and Beijing-Tianjin-Hebei, while infill expansion was concentrated in eastern coastal areas and some inland urban agglomerations. From 2010 to 2020, enclave expansion decreased while infill expansion increased, especially in eastern coastal areas and urban agglomerations such as Chengdu-Chongqing and the middle reaches of the Yangtze River. Core cities were dominated by infill expansion. Sub-core cities gradually transitioned from sprawl-infill composite expansion to infill domination, and infill expansion trends were also seen in other grades of cities. In 2030, under the scenarios of urban development, cultivated land protection, and natural growth, sprawl expansion was dominant. Under the scenario of ecological protection, fewer areas of urban land use expansion occurred. Sprawl expansion dominated in core cities under the urban development scenario, and sprawl-infill composite expansion occurred in the sub-core cities. The results of the study provided important references for the healthy development of cities and towns, the sustainable utilization of cultivated land resources, and the safeguarding of ecological environment in urban agglomerations.

Key Words: urban land expansion; multi-scenario simulation; landscape pattern index; expansion patterns; urban agglomerations; China

城市群作为区域经济高度集聚、新型工业化与城镇化协同发展的重要空间载体,对土地资源的需求持续增加,导致城市用地不断扩张^[1-3]。城市用地扩张是在多因素作用下,推动区域土地利用和景观格局持续变化的过程^[4],城市群作为城市用地扩张最为活跃的区域,其城市用地扩张带来的负面影响波及经济^[5]、社会^[6]和生态环境多个层面^[7]。联合国可持续发展目标(SDGs)和《新城市议程》为城市用地扩张制定国际标准,强调构建可持续城市和社区的重要性。党的二十大报告明确提出推进新型城镇化、优化城市群布局、推动城市集约发展和绿色发展的战略目标。虽然以往研究对城市用地扩张的时空特征和模式已有深入探讨,但在新型城镇化背景下,针对城市群这一特殊空间载体的城市用地扩张的系统综合分析仍显不足。因此,通过模拟并识别中国城市群城市用地扩张的时空特征及其模式,旨在为城市群城市土地的集约利用与管理实践提供参考。

以往学者们对城市扩张的研究主要集中于城市扩张的形态特征^[8]、模式^[9]、驱动力^[10]、空间模拟预测^[11]、城市扩张对社会、经济、气候、生态环境等的影响^[12]、城市扩张与碳排放^[13]、城市扩张与生态景观^[14]以

及城市热岛斑块扩张^[15]等方面。城市扩张形态特征在理解城市形成与转型过程中扮演着至关重要的角色^[16]。现有研究主要通过通过对城市扩张特征的测度,以揭示城市扩张过程、用地结构和增长边界^[17]。城市扩张模式作为城市空间形态研究的核心议题,直接揭示了城市空间扩张的内在规律,并与城市形态特征、经济发展以及生态环境状况密切相关^[18-20]。以往研究综合使用定性定量的方法讨论城市扩张的模式^[21],并将其主要概括为飞地式、蔓延式和填充式三种类型^[22]。以往研究围绕城市扩张的驱动力,涵盖了社会经济因素^[23]、工业发展状况^[24]、国家政策导向^[25]、交通可达性以及自然环境条件^[26]等多个维度。城市扩张的空间模拟预测主要揭示城市扩张的潜在规律和影响,为理解城市未来发展趋势提供了重要的工具^[4]。在研究方法上,通常采用城市扩张相关指数^[27]、分形维数^[28]、景观格局指数^[29]、相关性检验^[30]、系统动力学^[31]、遥感技术与新模型相结合^[32]、地理加权回归^[33]等方法,融合多模型架构、跨学科知识交融,并将定性分析与定量测度巧妙结合,以揭示城市扩张的深层机理。在研究尺度上,现有研究大多集中于单一城市群^[4],主要关注城市扩张的速度和数量,而全国范围内城市群扩张模式的模拟与识别研究相对匮乏。尽管以往研究为城市扩张的形态特征、模式和驱动力等方面提供了丰富的理论和方法论基础,但针对我国城市群特有的发展环境及复杂多变的城市用地扩张现象,多情景模拟分析的应用尚显不足。

土地利用模拟不仅是城市地理学研究的热点领域,同时也是国土空间规划中进行“三线”划分和解决空间冲突的关键策略^[34]。当前土地利用模拟研究主要聚焦于土地利用的变化模式、变化过程及其驱动机制^[4, 35-36]。研究内容主要划分为两大类:一类侧重于通过分析城市扩张的速度、方向以及空间分异特征,对城市用地规模的动态变化进行模拟^[37],另一类研究采用多维视角,考虑人与环境的相互作用、资源的集约节约利用,以及社会经济发展、生产、生活和生态空间友好的多种情景,以模拟并预测城市空间的扩展趋势^[38]。近年来,大量研究借助土地利用预测模型,如系统动力学^[39],Logistic-CA^[40],ANN-CA^[41],未来土地利用变化情景模拟^[34],小尺度土地利用变化及效应模型^[42]等,深入模拟并分析了不同区域未来时空格局的演变过程。本研究采用基于斑块生成的土地利用模拟(patch-generating land use simulation, PLUS)模型,该模型耦合了LEAS(land expansion analysis strategy)模块和CARS(cellular automata model based on multiple random seeds)模块,在模拟自然土地利用类型及其与建设用地冲突边界的土地利用动态变化模拟方面具有优势^[43]。尽管关于土地利用变化模式、过程及其驱动机制的研究已取得显著进展,但目前针对中国城市群城市用地扩张的土地利用模拟研究仍显不足。

在全球化背景下,城市群作为经济发展和城市化进程的重要载体,其城市用地扩张的动态变化已成为国际学术界关注的焦点。国际上,美国与印度等国家在城市群用地扩张的研究领域已取得显著成就^[44-45]。国内对于长三角、长江中游等城市群的城市用地扩张研究,已积累了丰富的理论和实践成果^[46-47]。中国城市群以其独特的发展特色、显著的扩张规模与速度,以及多样化的扩张模式,为国际城市研究提供了新的视角。尽管对单个城市群的城市用地扩张已有深入研究,但对中国城市群整体扩张的研究仍显不足。本研究以中国19个城市群为研究对象,运用PLUS模型模拟了2030年城镇发展、耕地保护、生态保护和自然增长四种情景下的土地利用变化。通过Fragstats软件,本研究测度了斑块总面积、平均斑块面积、斑块密度、聚集度、平均斑块分维数和景观形状指数六个景观格局指标,刻画2000、2010、2020和2030年中国城市群城市用地扩张特征;借助公共边测度法来深入分析多情景模拟下中国城市群城市用地扩张模式,通过探究多情景模拟下中国城市群城市用地扩张的时空特征与扩张模式,以期提高城市用地的集约高效利用水平,进而促进城市群的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

“十四五”规划纲要明确提出构建19大城市群(图1)。城市群横跨平原、山地、丘陵、盆地等多种地貌,自然资源丰富,自然环境独特。特别是东部季风区,凭借其优越的自然条件,承载了更大的人口容量,集中了更

多的城市,成为城市群数量更为密集的区域。此地理分布特性不仅为我国经济发展构筑了坚实的物质支撑,同时也对可持续发展的路径提出了更为严峻的挑战。城市群作为中国经济发展质量提升的关键支撑平台^[1],不仅加速了城镇化进程,而且为城市用地有序扩张注入了内在动力。然而,城市用地迅速扩张导致土地资源紧张和生态环境恶化等问题的加剧^[7]。因此,本研究旨在通过模拟并识别中国城市群城市用地扩张的时空演变规律及其模式,以期为中国城市群未来的发展规划与空间治理提供参考。

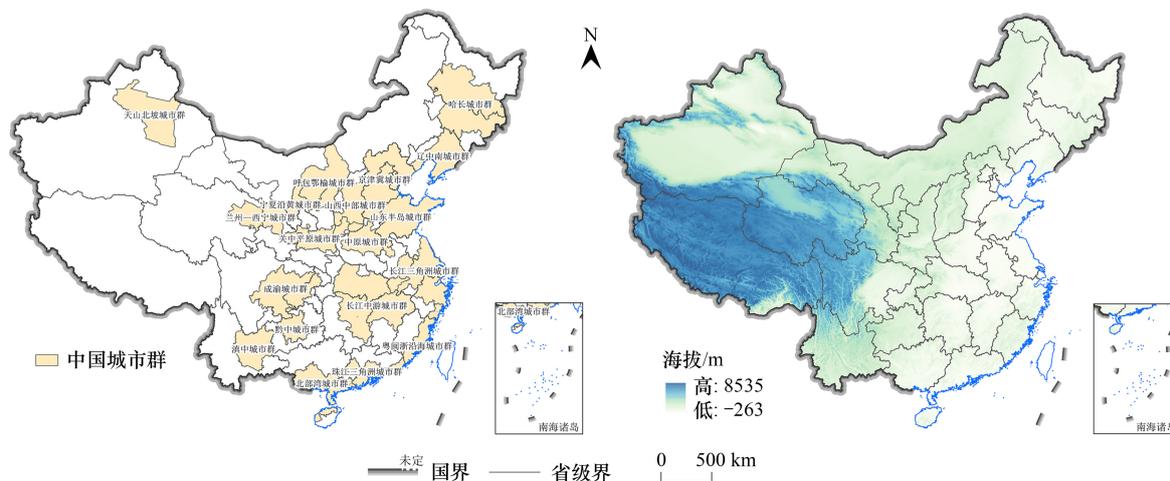


图1 中国城市群研究区位图

Fig.1 Locational map of urban agglomerations in China

1.2 数据来源

本研究涉及的土地利用遥感监测数据以及水域栅格数据,来源于资源环境科学与数据研究中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 30m,中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)的分类系统中,一级分类分为 6 类,主要根据土地资源及其利用属性,分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地。其中,建设用地在本研究中被进一步细分为城市用地和农村居民点。城市用地是指大、中、小城市及县镇以上建成区用地,以及其它建设用地等不透水地表所覆盖的开发用地;农村居民点则是指独立于城镇以外的建设用地。年平均温度和年平均降水数据,来源于 WorldClimv2.0,空间分辨率为 1km;土壤类型数据,来源于 HWSDv1.2 网站,空间分辨率为 1km;高程数据,来源于 NASA SRTM1 v3.0,空间分辨率为 30m;坡度数据,通过高程数据处理获得;人口和地均 GDP 栅格数据,来源于全球变化科学研究数据出版系统网站(<http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/Default.aspx>),空间分辨率为 1km;道路数据,来源于 OpenStreetMap;铁路数据,来源于百度地图。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用模拟

(1) 模拟驱动因子选取

土地利用变化是一个复杂的过程,受到多种因素的影响,其中自然环境和社会经济因素对其产生主要影响。结合研究区概况及相关研究,本研究从自然环境与社会经济两个方面选取了 10 种驱动因子。具体地,自然环境因素包括年平均温度、年平均降水、土壤类型、高程和坡度;社会经济因素包括人口、地均 GDP、到道路距离、到铁路距离以及到水域距离。PLUS 模型所集成的 LEAS 模块通过提取两期土地利用数据变化间各类用地扩张的部分,并采用随机森林算法逐一对各地类扩张和驱动力的因素进行挖掘,获取各类用地的发展概率,及驱动因素对该时段各类用地扩张的贡献^[48]。

(2) 情景设置

本研究设置了“自然增长”、“城镇发展”、“生态保护”、“耕地保护”四种情景,以模拟不同规划策略下城市群的发展情况。在“自然增长”情景中,土地利用变化遵循自然规律,对于各土地利用类型的变化不做限制;在“城镇发展”情景中,重点考虑经济发展和城镇化进程的推进,在“自然增长”情景基础上,将耕地、林地、草地、水域向建设用地转化的概率提高 20%,而建设用地向其他所有地类的转化概率降低 30%;在“生态保护”情景中,强调对自然生态系统的保护,将林地、草地、水域向其他地类的转化概率降低 20%,并将耕地、未利用地、建设用地向林地、草地、水域的转化概率提高 10%;在“耕地保护”情景中,严格控制基本农田规模,保障粮食安全,将林地、草地、未利用地转为耕地的概率提高 30%,将耕地向林地、草地、未利用地、建设用地的转化概率降低 20%。具体参数设置参考现有研究^[49]。多情景模拟下的土地利用面积数据是基于 2020 年的土地利用数据计算得出,与 2020 年的数据保持一致。

(3) 模型精度校验

本研究通过将 2020 年实际土地利用数据与 PLUS 模拟数据进行比较,通过 Kappa 系数和 FOM 指数进行对比分析,以验证模型的准确性。Kappa 系数是衡量分类一致性和效果的指标,它评估模型预测与实际分类的匹配程度^[50]。Kappa 系数计算公式如下:

$$K = (P_o - P_c) / (1 - P_c) \quad (1)$$

式中, K 表示 Kappa 系数; P_o 表示总体精度,即每个随机样本模拟结果与真实土地利用数据一致的概率,其值等于正确像元数与总像元数的比值; P_c 表示预测和实际土地利用数据之间的偶然一致性。Kappa 系数取值越接近 1,表明模拟结果的精度越高。

其次,通过计算 FOM 指数来验证空间位置的一致性。与 Kappa 系数相比,FOM 指数可以更好地描述土地利用模拟的准确性。FOM 指数用于验证模拟变化与实际变化之间的一致性。FOM 指数计算公式可以表示如下:

$$FOM = \frac{B}{A+B+C+D} \quad (2)$$

式中, A 表示真实的数据变化,但被模拟为恒定的栅格单元; B 表示真实数据发生变化的栅格单元的数量,模拟结果也发生变化,并且变化是一致的; C 表示真实数据发生变化且模拟结果也发生变化的栅格单元的数量,但这种变化是不正确的类别; D 表示真实数据不改变但被模拟为改变的栅格单元的数量。FOM 值范围为 0 到 1,值越大,模拟变化和实际变化重叠越多,表明模拟精度越高。然而,在对于大区域且长时段的土地利用进行模拟时,FOM 值大多处于 0.1 到 0.2 之间^[51],因此,若 FOM 值超过 0.1 即可认定模拟结果的精度达到标准。

结果显示,在采样率 10%的前提下,Kappa 系数达到了 0.85,整体精度达到 89.1%,说明模拟结果通过了精度验证且准确度较高。同时 FOM 值为 0.16,进一步说明 PLUS 模型的模拟满足本次研究所需精度。

1.3.2 城市用地扩张特征测度

(1) 城市用地景观格局指数测度

本研究选取斑块总面积、平均斑块面积、斑块密度、聚集度、面积加权平均分维数以及景观形状指数六个景观格局指数来刻画城市扩张的景观格局特征^[52]。其中,总面积和平均斑块面积用于表征城市用地总体及平均大小水平。斑块密度和聚集度用于表达城市用地景观的破碎化程度与聚集程度。面积加权平均分维数以及景观形状指数能够分别表征城市用地景观形状的平均及总体复杂程度。

(2) 城市用地扩张模式识别

本研究采用飞地式扩张、蔓延式扩张以及填充式扩张来识别城市用地扩张模式。飞地式扩张是指新开发的城市用地与现有城市用地没有空间连接;蔓延式扩张指新开发的城市用地从现有城市用地边缘单向扩展;填充式扩张是指现有城市用地之间的缺口被新开发的城市用地填满^[19]。本研究采用公共边测度法来界定城市用地扩张模式^[53]。公式如下:

$$S = \frac{L}{P} \quad (3)$$

式中, L 和 P 分别表示目标时期内一个区域新开发城市用地和现有城市用地的公共边缘的长度以及所有新开发的城市用地的总周长。 $S=0$ 时, 为飞地式扩张; $0 < S < 0.5$ 时, 为蔓延式扩张; $S \geq 0.5$ 时, 为填充式扩张。

2 结果与分析

2.1 2000—2030 年中国城市群城市用地变化特征分析

2000、2010 和 2020 年城市用地面积分别占城市群总面积的 1.27%、2.59% 和 3.20%。2000—2020 年, 城市用地面积增加了 $8.28 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。耕地、林地和草地等生态用地是城市扩张的主要来源, 而城市用地向生态用地的转出比例较小。其中, 耕地转向城市用地的面积最多, 达到 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$; 林地和草地转向城市用地的面积分别为 $9.68 \times 10^3 \text{ km}^2$ 和 $9.56 \times 10^3 \text{ km}^2$; 农村居民点转向城市用地的面积为 $8.66 \times 10^3 \text{ km}^2$; 水域和未利用地转向城市用地的面积分别为 $3.71 \times 10^3 \text{ km}^2$ 和 $2.71 \times 10^3 \text{ km}^2$; 湿地转向城市用地的面积最少, 仅有 $1.48 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。城市用地转向水域的面积最多, 为 $6.65 \times 10^3 \text{ km}^2$; 其次是转向耕地的面积为 $3.99 \times 10^3 \text{ km}^2$; 转向湿地的面积最少, 仅有 175.46 km^2 (图 2)。2030 年城镇发展情景下, 城市用地面积最大为 $1.70 \times 10^5 \text{ km}^2$, 其主要来源是耕地, 转入面积为 $2.55 \times 10^4 \text{ km}^2$, 城市用地转为农村居民点的面积为 74.07 km^2 ; 在耕地保护情景下, 林地转为城市用地的面积最多为 $6.57 \times 10^3 \text{ km}^2$, 而湿地转为城市用地的面积最少, 为 326.43 km^2 ; 在生态保护情景下, 未利用地转为城市用地的面积最多, 为 $2.63 \times 10^3 \text{ km}^2$, 其次是草地, 为 $1.60 \times 10^3 \text{ km}^2$, 而城市用地的转出相对较少; 在

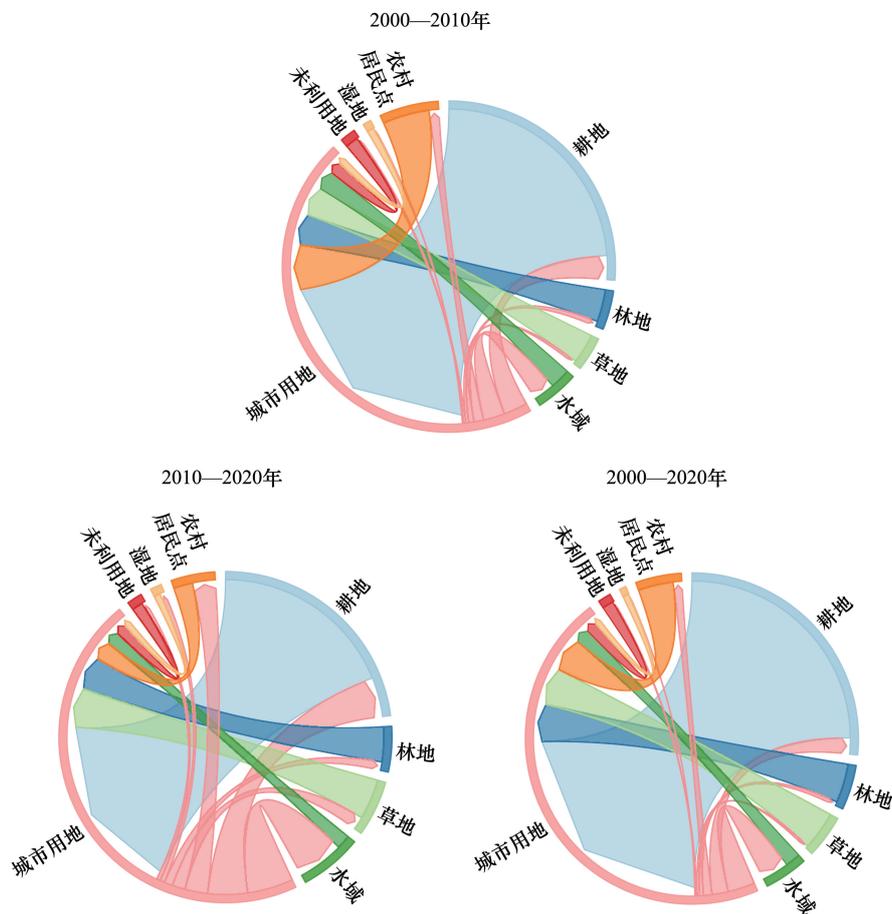


图 2 2000—2020 年城市用地转移弦图

Fig. 2 Urban land use transfer chord diagram during 2000—2020

自然增长情景下,城市用地的主要来源同样是耕地,转入面积为 $1.70 \times 10^4 \text{ km}^2$,其转出主要去向也是耕地,为 $1.72 \times 10^3 \text{ km}^2$ (图 3)。

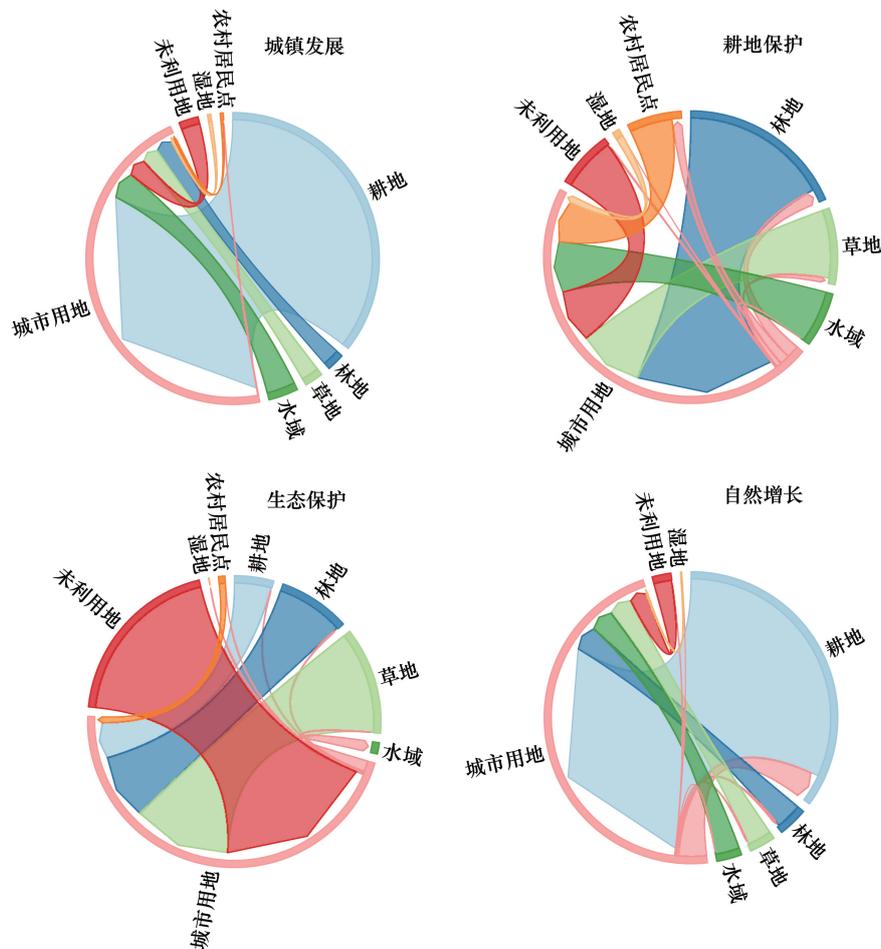


图 3 多情景模拟下城市用地转移弦图

Fig.3 Urban land use transfer chord diagram under multi-scenario simulation

2.2 2000—2030 年中国城市群城市用地景观格局时空变化特征

2000、2010 和 2020 年城市群城市用地的总面积分别为 $5.43 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $1.09 \times 10^5 \text{ km}^2$ 和 $1.36 \times 10^5 \text{ km}^2$, 呈现明显的持续增长趋势。相较于 2020 年,2030 年的城市用地面积将继续增加,特别是在城镇发展情景下,城市用地面积最大,为 $1.68 \times 10^5 \text{ km}^2$;其次是在自然增长情景下,城市用地面积为 $1.56 \times 10^5 \text{ km}^2$;耕地保护和生态保护情景下,城市用地面积较小,分别为 $1.51 \times 10^5 \text{ km}^2$ 和 $1.41 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。2000、2010 和 2020 年平均斑块面积的均值分别为 4.89 km^2 、 4.3 km^2 和 3.81 km^2 ,城市用地的平均规模呈缩小趋势,2030 年,城镇发展情景下平均斑块面积均值最高为 5.29 km^2 ,而生态保护情景下均值最低为 3.92 km^2 。斑块密度均值由 2000 年的 0.02 n/km^2 增加到 2020 年的 0.04 n/km^2 ,斑块密度均值持续上升,2030 年,生态保护情景下斑块密度均值最高为 0.044 n/km^2 ,城镇发展情景下均值最低为 0.036 n/km^2 。2000、2010 和 2020 年聚集度指数均值分别为 85.46%、84% 和 84%,与 2000 年相比,2010 和 2020 年聚集度指数均值明显降低,2030 年不同情景下,聚集度指数均值差异不明显。平均斑块分维数与景观形状指数均表明,2000—2020 年城市用地形状复杂性增加,2030 年城镇发展情景下复杂性最高,而生态保护情景下最低。2000—2020 年间,城市用地面积增加,破碎化程度加剧,聚集度下降,形状复杂性增加,这些特征在城镇发展情景下尤为明显。

2000—2020 年,城市群城市用地面积持续增加,东部沿海城市群用地面积显著多于内陆,其中京津冀、山

东半岛和长江三角洲城市群用地面积始终位居前列。中国北部城市群平均斑块面积普遍高于南部,但整体呈减小趋势。斑块密度较大的城市群主要分布在中国东部和中部地区。聚集度指数较高的城市群主要位于中国北部城市群,2000—2020年聚集度指数较高的城市群均为天山北坡、哈长和辽中南城市群,且其聚集度指数均值呈现不断下降的趋势,2000年均值分别为93.76%、93%和91.47%;2020年均值分别为92.04%、89.42%和89.49%。平均斑块分维数空间分布格局相对稳定。景观形状指数明显增加,且高值区主要分布在中国东部和北部。2000年,珠江三角洲的景观形状指数均值最高为7.04;2020年,长江中游的景观形状指数均值最高为11.83。此外,核心城市通常具有更高的城市用地扩张速度和更复杂的空间形态,这与其作为经济、文化和技术创新中心的地位密不可分。例如,北京、上海等核心城市在扩张过程中不仅表现为用地面积的快速增长,还呈现出多中心、网络化的空间结构。次核心城市则表现出较为均衡的扩张模式,既服务于核心城市的功能需求,又通过自身发展带动周边区域的经济增长,如苏州、杭州等城市在长三角城市群中的角色。而其他等级城市的扩张特征则更加多样化,其扩张速度和空间形态往往受到地方政策、自然资源禀赋、交通条件以及区域发展战略的多重影响。例如,一些资源型城市在扩张中可能更依赖于特定产业的布局,而交通枢纽城市则可能围绕交通干线形成带状扩张格局。

2030年,长江三角洲、京津冀和山东半岛城市群城市用地面积最大,尤其在城镇发展情景下,分别为 $2.57 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $2.27 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $2.05 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。天山北坡、长江三角洲和辽中南城市群平均斑块面积较高,辽中南城市群在生态保护情景下平均斑块面积均值最高为 8.05 km^2 ,天山北坡城市群在城镇发展、耕地保护和自然增长情景下均表现出最高水平,分别是 13.81 km^2 、 13.22 km^2 和 11.36 km^2 。斑块密度均值最高的是粤闽浙沿海城市群,其次为长江中游和中原城市群,且各城市群均值在生态保护情景下呈现最高水平。天山北坡聚集度均值最高,尤其在生态保护情景下最高为92.93%,其他城市群聚集度指数均值在不同情景下呈现出不同水平。在城镇发展、耕地保护和自然增长情景下,长江中游、珠江三角洲和山东半岛城市群平均斑块分维数高。景观形状指数在城镇发展、生态保护和自然增长情景下以呼包鄂榆城市群最高,其次是长江中游和山西中部城市群。耕地保护情景下,景观形状指数均值最高的同样为呼包鄂榆城市群,为12.54。此外,城镇发展情景下,核心城市用地扩张规模显著,其平均斑块面积均值较高,而且在生态保护情景下仍维持较高水平,反映出其在扩张中对生态空间的重视。与核心城市相比,次核心城市在用地扩张规模、增长速度及空间形态复杂性等方面均表现出相对较低的水平,但斑块密度和聚集度仍较高,表现出一定的城市用地集中性。其他等级城市则用地扩张规模较小,速度较慢,形态相对简单,斑块面积、密度和聚集度均较低(图4)。

2.3 2000—2030年中国城市群城市用地空间扩张模式

2000—2010年,大部分地区城市用地以蔓延式为主要扩张模式,同时存在飞地式和填充式扩张。具体而言,飞地式扩张在哈长、辽中南、呼包鄂榆、宁夏沿黄、京津冀、山西中部、山东半岛、中原和成渝城市群均有所分布,反映出这些区域在快速发展过程中对周边地区的辐射和带动作用;填充式扩张则出现在哈长、辽中南、京津冀、山东半岛、关中平原、山西中部、兰州-西宁、成渝、黔中、长江三角洲、长江中游、粤闽浙沿海、北部湾和珠江三角洲城市群,表明这些区域在城市化进程中更注重内部空间的优化和利用。整体而言,飞地式扩张区域多于填充式扩张区域。从城市群内部结构来看,核心城市在这一时期往往呈现出更强的扩张动力和更复杂的扩张形态,飞地式扩张尤为明显;次核心城市则在一定程度上承接了核心城市的扩张压力,表现为填充式和蔓延式扩张并存;其他等级城市则主要以蔓延式扩张为主,扩张规模和速度相对较小。2010—2020年,城市用地扩张仍以蔓延式为主,但扩张模式呈现出新的变化。然而,其余区域均呈现填充式城市扩张,未出现飞地式城市扩张区域。填充式扩张区域主要分布在东部沿海城市群,包括哈长、辽中南、呼包鄂榆、京津冀、山西中部、兰州-西宁、关中平原、中原、山东半岛、成渝、滇中、长江三角洲、长江中游、粤闽浙沿海和珠江三角洲城市群。核心城市由于用地趋于饱和,开始更加注重内部空间的挖潜和优化,填充式扩张成为主要方式;次核心城市则在继续推进蔓延式扩张的同时,逐渐增加填充式扩张的比重;其他等级城市则随着城市化进程的推进,也开始出现一定程度的填充式扩张。这种扩张模式的变化不仅反映了城市群内部结构的调整和优化,也体现了

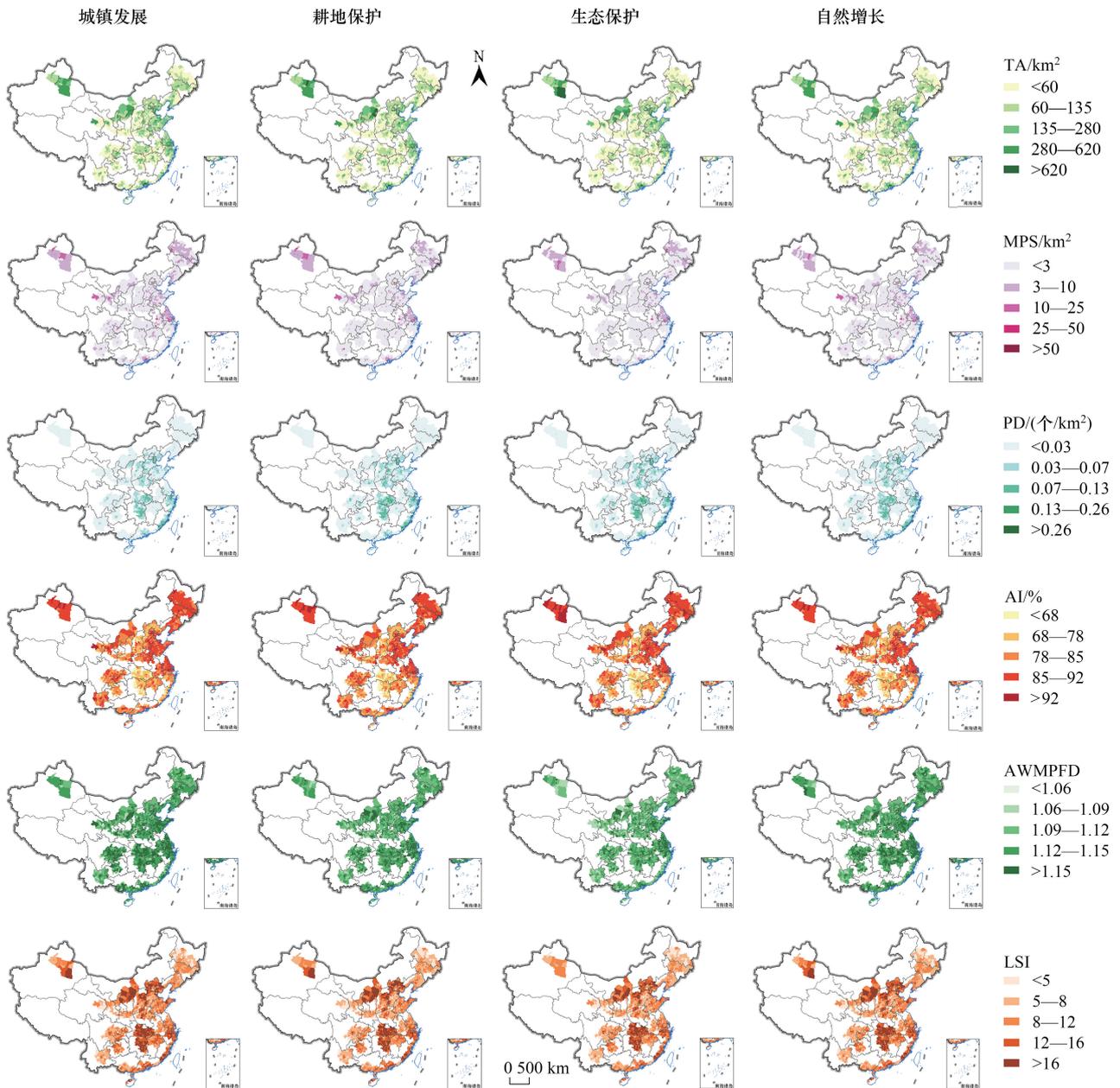


图 4 多情景模拟下城市用地景观格局指数空间分布

Fig.4 Spatial distribution of urban land use landscape pattern indices under multi-scenario simulation

TA: 斑块总面积; MPS: 平均斑块面积; PD: 斑块密度; AI: 聚集度; AWPFD: 面积加权平均分维数; LSI: 景观形状指数

城市化进程中不同等级城市在用地扩张特征上的差异化表现。

在城镇发展情景下,城市扩张以蔓延式为主,少数地区扩张模式为飞地式和填充式,填充式扩张区域明显多于飞地式扩张区域。填充式扩张区域包括天山北坡、哈长、辽中南、关中平原、山西中部、兰州-西宁、中原、京津冀、山东半岛、成渝、黔中、长江三角洲、长江中游、粤闽浙沿海和珠江三角洲城市群;飞地式扩张仅出现在山西中部城市群。这种扩张模式反映出核心城市在用地趋于饱和的情况下,更倾向于内部空间的挖潜和优化,次核心城市则在一定程度上承接了核心城市的扩张压力,蔓延式扩张与填充式扩张并存,其他等级城市则主要以蔓延式扩张为主,扩张速度和规模相对较小。耕地保护情景下,城市扩张模式仍以蔓延式为主,填充式扩张区域数量较多,飞地式扩张仅在哈长、京津冀、成渝和滇中城市群有少量分布。这表明在耕地保护约束

下,各等级城市均在一定程度上限制了扩张规模和速度,更加注重内部空间的利用和优化。生态保护情景下,城市扩张强度较小,大部分区域未发生城市扩张,蔓延式扩张主要分布在天山北坡、哈长、辽中南、呼包鄂榆、宁夏沿黄、兰州-西宁、山西中部、关中平原、中原、京津冀、山东半岛、成渝、滇中、黔中、长江中游、长江三角洲、粤闽浙沿海和北部湾城市群;飞地式扩张区域包括天山北坡、呼包鄂榆、京津冀、中原、成渝、滇中、黔中、长江中游、北部湾和珠江三角洲城市群;填充式扩张区域较少,仅在呼包鄂榆、成渝和长江三角洲城市群有所分布。这反映出在生态保护约束下,城市扩张受到明显限制,各等级城市在扩张过程中更加注重生态保护和可持续发展。自然增长情景下,大部分区域出现城市扩张,蔓延式扩张为主,填充式扩张区域包括天山北坡、哈长、辽中南、呼包鄂榆、兰州-西宁、关中平原、山西中部、中原、京津冀、山东半岛、成渝、长江中游、长江三角洲、粤闽浙沿海和珠江三角洲城市群;飞地式扩张仅出现在哈长城市群。未来不同情景下的城市扩张模式均以蔓延式为主。除生态保护情景外,其他情景下城市群大部分区域均发生了明显的城市扩张,耕地保护情景下填充式扩张区域明显增多。这表明在自然增长情景下,城市扩张较为普遍,但各等级城市在扩张模式上仍存在一定差异(图5)。

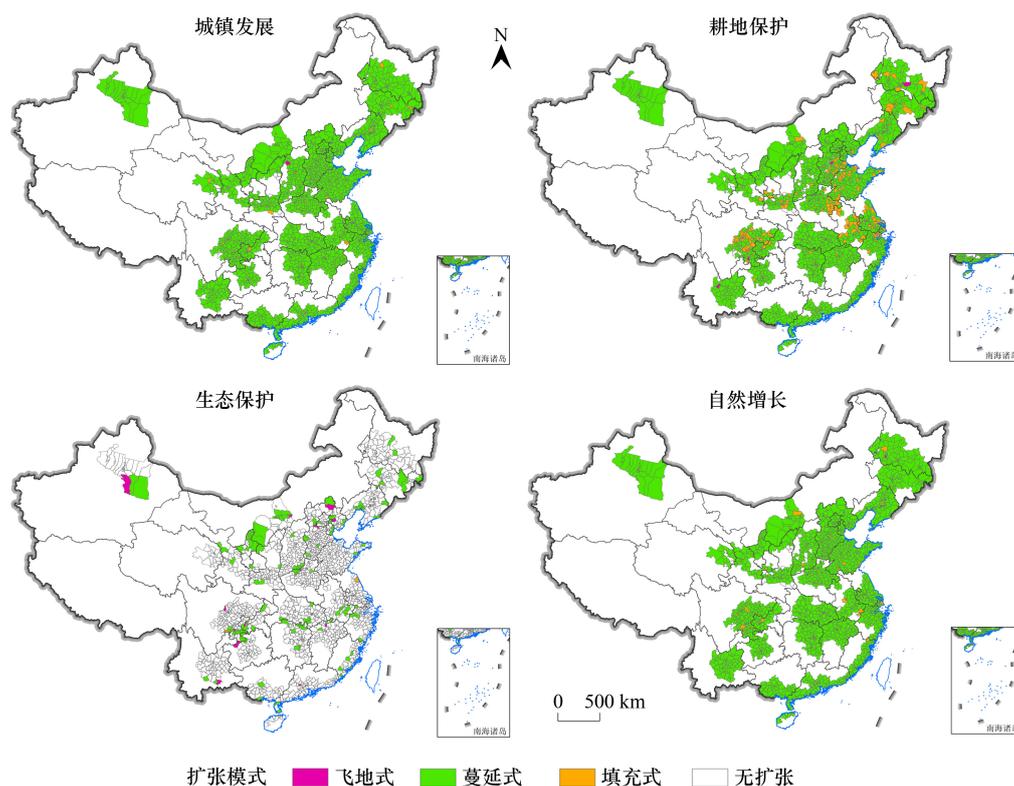


图5 多情景模拟下城市用地扩张模式空间分布格局

Fig.5 Spatial distribution of urban land expansion patterns under multi-scenario simulation

3 讨论

3.1 城市用地扩张与土地利用转换的多尺度机制及政策启示

研究揭示了中国城市群城市用地扩张的“耕地依赖型”特征:2000—2020年,65.3%的新增城市用地源自耕地转用,显著高于欧美国家以草地/未利用地为主的转化模式^[44]。这一现象与“土地财政”制度下地方政府的短期经济诉求密切相关。由于耕地转用成本低、增值收益高,导致耕地保护目标与地方发展需求形成结构性冲突。区域异质性显著:东部沿海城市群(如长三角、珠三角)填充式扩张占比较高,而内陆城市群(如哈长、天山北坡)仍以飞地式扩张为主。这种差异源于政策工具的区域适配性:东部通过“三旧改造”释放存量

用地,而内陆城市群因土地财政依赖度更高,仍依赖增量扩张驱动经济增长。

研究进一步发现,传统“一刀切”管控政策可能加剧生态风险。例如,在耕地保护情景下,林地转用比例上升 12.6%,表明刚性政策可能诱发生态用地的替代性损失。为此,本研究提出“三区管控”差异化框架:①耕地保护优先区(东部城市群)需推行“占补平衡+农村居民点整理”组合策略,通过宅基地退出释放建设用地指标;②生态修复重点区(内陆城市群)应建立“林地转化概率阈值(≤ 0.3)+碳汇交易”联动机制,抑制生态用地侵占;③城市开发弹性区(沿海城市群)可实施“容积率奖励+TOD 导向开发”,引导存量用地高效利用。这一框架突破了宏观原则性建议的局限性^[25,54],实现了政策工具与空间情景的精准匹配。

3.2 多模型融合视角下城市扩张的生态效应与保护策略

通过耦合 PLUS 模型与景观格局指数,本研究定量揭示了城市扩张对生态完整性的梯度影响。核心城市因高强度扩张导致生态网络连通性显著下降,而东部沿海城市群因填充式扩张占比较高,其边缘区生境破碎化速率较低于内陆飞地式扩张主导区域。这表明,传统蔓延式扩张通过空间累积效应显著加剧生态风险,需从“数量控制—结构优化—模式调控”协同维度制定保护策略。

多情景模拟显示,生态保护情景可抑制 35%的生态用地损失,但其效果存在等级差异:核心城市因生态空间管控能力较强,平均斑块面积(AREA_MN)仍维持较高水平;次核心城市则需通过“蔓延-填充”复合模式平衡效率与保护需求。基于此,本研究提出分级管控策略:①东部城市群应构建“廊道-组团”式生态安全格局,结合轨道交通导向开发(TOD)提升生态廊道连通性;②内陆生态脆弱区需建立“转化概率阈值-生态补偿”机制,例如将林地转用概率限制在 0.3 以下并配套碳汇交易。相较于单一政策模拟研究^[34,49],这种分级策略更契合城市群异质性发展需求。

3.3 城市用地扩张模式转型与可持续治理路径

中国城市群扩张模式呈现“飞地-填充”动态转换规律:2000—2010 年哈长、京津冀等城市群飞地式扩张占比较高,反映核心城市极化效应;2010 年后东部沿海填充式扩张显著提升,表明土地集约利用需求增强。这一发现突破了传统静态分类的局限^[53]。

为缓解城市用地破碎化,需构建“增量管控-存量优化”协同路径:①增量前端建立“LEI 指数-公共边测度”双预警机制,当飞地式扩张占比超 40%时触发空间管制;②存量更新端推广“产权整合-功能混合”模式,例如将低效工业用地容积率提升至 2.5 以上;③治理层级上,核心城市应聚焦生态空间精细化管控,次核心城市需加强跨行政区协同规划。相较于国际“低密度蔓延”治理经验^[44],本研究提出的路径更契合发展中国家高密度城镇化特征。

3.4 与国际研究的理论对话及范式创新

本研究揭示的中国“耕地依赖型”扩张模式,为全球土地系统科学提供了新认知。与发达国家不同^[44],中国城市群 65.3%的新增建设用地源于耕地转用,这一现象与土地财政制度、耕地占补平衡政策密切相关,反映了转型经济体特有的“政府-市场”二元驱动机制。研究进一步发现,这种模式虽支撑了经济增长,但也导致耕地流失速率较高。因此,发展中国家需构建“效率-安全-生态”协同的扩张路径,例如通过“指标流转-跨区补偿”机制平衡区域发展权。

在方法论层面,多模型融合框架(PLUS-景观指数-公共边测度)突破了传统 CA 模型在空间解析能力上的局限性^[40],实现了扩张过程“格局-机制-效应”的系统性模拟。例如,通过 LEAS 模块识别出交通可达性对耕地转用的贡献率显著高于传统认知的经济因子,这为优化国土空间规划提供了新依据。相较于国际主流模型(如 FLUS),本研究实现了多情景模拟下扩张模式的动态识别,推动了城市扩张模拟从“空间预测”向“政策实验室”的范式转型,为发展中国家高密度城镇化情景下的精细化治理提供了方法支撑。

4 结论

本研究运用 PLUS 模型模拟了 2030 年中国 19 个城市群的土地利用变化,并测度了 2000、2010、2020 及

2030年四个时间节点的中国城市群城市用地景观格局指数,识别了2000—2030年中国城市群城市用地空间扩张模式,揭示了中国城市群地区的城市扩张特征。研究的主要结论如下:

(1)2000—2020年,耕地、林地、草地、未利用地、湿地及农村居民点向城市用地的转入面积显著高于城市用地向这些地类的转出面积,而水域相反。耕地、林地和草地等生态用地是城市扩张的主要来源,而城市用地向生态用地的转出比例较小。2030年,城镇发展情景下,城市用地面积最大,主要来源于耕地转入;耕地保护情景下,林地转为城市用地面积最多;生态保护情景下,未利用地转为城市用地面积最多,城市用地转出相对较少;自然增长情景下,城市用地主要来源于耕地转入,转出主要去向也是耕地。

(2)2000—2020年,城市用地面积增加、城市用地平均规模减小、破碎化程度和景观形状复杂性均在加剧。城市用地规模大、破碎化程度高的地区主要分布在中国东部城市群。核心城市表现出更快的扩张速度和更复杂的空间形态,次核心城市则表现为均衡扩张,而其他等级城市的扩张特征则更加多样化。2030年,城镇发展情景下的景观格局指数均达到最高,显示出城市用地面积扩张更剧烈,破碎化程度、集聚度和复杂程度均有所增加。核心城市表现为大规模、快速扩张,空间形态复杂,且在生态保护情景下仍保持较高的平均斑块面积,凸显其对生态空间的重视,次核心城市扩张规模相对较小,但斑块密度和聚集度较高,显示出一定的用地集中性,反映出适中的扩张态势和较高的用地效率,而其他等级城市扩张规模小、速度慢,空间形态简单,用地扩张有限且分散。

(3)2000—2020年,中国城市群城市用地扩张模式呈现显著的时空分异特征,整体以蔓延式扩张为主导,但飞地式和填充式扩张在不同时期和区域表现出明显差异。2000—2010年,飞地式扩张广泛分布于哈长、辽中南、京津冀等城市群,体现了快速发展区域对周边的辐射带动作用;填充式扩张则集中于东部沿海及部分内陆城市群,如长江三角洲、珠江三角洲等,反映了这些地区对内部空间优化利用的重视。2010—2020年,扩张模式发生显著转变,飞地式扩张减少,填充式扩张成为主要方式,尤其在东部沿海及成渝、长江中游等城市群,这与核心城市用地趋于饱和及内部挖潜需求增加密切相关。次核心城市从蔓延式与填充式并存逐渐向填充式主导过渡,其他等级城市也出现填充式扩张趋势。2030年,不同情景下城市用地扩张模式呈现差异化特征。在城镇发展、耕地保护和自然增长情景下,大部分区域城市用地扩张显著,以蔓延式为主,耕地保护情景下填充式扩张区域增多。生态保护情景下,城市用地扩张区域较少,有效抑制了快速扩张。城镇发展情景下,核心城市在用地趋于饱和的情况下,更倾向于内部空间的挖潜和优化,次核心城市则在一定程度上承接了核心城市的扩张压力,蔓延式扩张与填充式扩张并存,其他等级城市则主要以蔓延式扩张为主,扩张速度和规模相对较小。耕地保护情景下,各等级城市均在一定程度上限制了扩张规模和速度,更加注重内部空间的利用和优化。生态保护情景下,城市扩张受到明显限制,各等级城市在扩张过程中更加注重生态保护和可持续发展。自然增长情景下,城市扩张较为普遍,但各等级城市在扩张模式上仍存在一定差异。

参考文献(References):

- [1] Fang C L, Yu D L. Urban agglomeration: an evolving concept of an emerging phenomenon. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162: 126-136.
- [2] 方创琳. 天山北坡城市群可持续发展战略思路与空间布局. *干旱区地理*, 2019, 42(1): 1-11.
- [3] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 陈利顶, 李双成. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径. *地理学报*, 2016, 71(4): 531-550.
- [4] 张丽芳, 方创琳, 高倩. 天山北坡城市群城市景观时空扩张过程及多情景模拟. *生态学报*, 2021, 41(4): 1267-1279.
- [5] Liu Y S, Li Y H. Revitalize the world's countryside. *Nature*, 2017, 548(7667): 275-277.
- [6] Wang X R, Hui E C, Choguill C, Jia S H. The new urbanization policy in China: which way forward *Habitat International*, 2015, 47: 279-284.
- [7] Fang C L, Wang Z B, Xu G. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in China: a city-level perspective analysis. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(11): 1519-1532.
- [8] 海凯, 王思远, 马元旭, 杨瑞霞, 涂平, 梁娟珠, 刘卫华, 吴林霖. “一带一路”沿线地区城市扩张和形态变化分析. *地理学报*, 2020, 75(10): 2092-2108.
- [9] 王亚楠, 苏明明, 王玉萍. 黄河流域城市扩张时空特征与区域差异——基于资源型城市与非资源型城市的对比. *中国农业资源与区划*,

- 2024, 45(6): 223-233.
- [10] 车通, 李成, 罗云建. 城市扩张过程中建设用地景观格局演变特征及其驱动力. 生态学报, 2020, 40(10): 3283-3294.
- [11] 田宇, 熊昌盛. 顾及建设用地聚集与排斥性的城市扩张模拟: 以义乌市为例. 地理研究, 2024, 43(4): 861-873.
- [12] 孙斌栋, 郑涛. 省会城市行政边界扩张对省域经济增长的影响. 地理科学, 2023, 43(7): 1133-1143.
- [13] 田一豆, 赵先超. 基于 Markov-PLUS 模型的长株潭城市群建设用地扩张模拟及碳排放响应分析. 生态学报, 2024, 44(1): 129-142.
- [14] 戚琦, 王玲, 陈俊辰, 王彬宇, 贺淑钰, 韩建南, 李兆华, 李昆. 武汉市城市快速扩张与生态系统服务价值权衡/协同的交互作用. 地理科学, 2024, 44(6): 953-963.
- [15] 乔治, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨俊. 城市热岛斑块遥感识别及空间扩张路径研究——以北京市为例. 地理科学, 2022, 42(8): 1492-1501.
- [16] Barau A S, Maconachie R, Ludin A N M, Abdulhamid A. Urban morphology dynamics and environmental change in Kano, *Nigeria*. *Land Use Policy*, 2015, 42: 307-317.
- [17] Wang J, Liu J Z. Study on the urban expansion and model of Lianyungang City based on the multi-temporal remote sensing images. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 2159-2164.
- [18] 侯亚丽, 匡文慧, 窦银银. 全球超大城市空间扩张及分形特征研究. 地理学报, 2022, 77(11): 2687-2702.
- [19] 张敏, 郑利娟, 何宇华. 近 30 年长江经济带城镇扩张特征及影响因素. 测绘科学, 2022, 47(8): 186-196, 203.
- [20] 于溪, 李强, 肖逸雄, 陈晋. 基于 GlobeLand30 的中国城市扩张模式及其对生态用地的影响. 地理与地理信息科学, 2018, 34(3): 5-12.
- [21] Kuang W H, Chi W F, Lu D S, Dou Y Y. A comparative analysis of megacity expansions in China and the U.S. Patterns, rates and driving forces. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 132: 121-135.
- [22] Xu C, Liu M S, Zhang C, An S Q, Yu W, Chen J M. The spatiotemporal dynamics of rapid urban growth in the Nanjing metropolitan region of China. *Landscape Ecology*, 2007, 22(6): 925-937.
- [23] Colsaet A, Laurans Y, Levrel H. What drives land take and urban land expansion: A systematic review. *Land Use Policy*, 2018, 79: 339-349.
- [24] 舒帮荣, 朱建军, 李永乐, 曲艺, 雍新琴. 不同经济发展阶段下城市用地规模扩张动力研究——基于省际面板数据的考察. 中国土地科学, 2013, 27(11): 65-71.
- [25] Zhou Y, Huang X J, Chen Y, Zhong T Y, Xu G L, He J L, Xu Y T, Meng H. The effect of land use planning (2006—2020) on construction land growth in China. *Cities*, 2017, 68: 37-47.
- [26] Xian S, Li L Y, Qi Z X. Toward a sustainable urban expansion: a case study of Zhuhai, China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 230: 276-285.
- [27] 赵燕如, 邹自力, 张晓平, 危小建. 基于 LEI 和 MSPA 的南昌市城市扩张类型与生态景观类型变化关联分析. 自然资源学报, 2019, 34(4): 732-744.
- [28] 王海军, 王惠霞, 邓羽, 宋涛, 祁帆, 张辉. 武汉城市圈城镇用地扩展的时空格局与规模等级模式分异研究. 长江流域资源与环境, 2018, 27(2): 272-285.
- [29] Liu J F, Jiao L M, Zhang B E, Xu G, Yang L D, Dong T, Xu Z B, Zhong J, Zhou Z Z. New indices to capture the evolution characteristics of urban expansion structure and form. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107302.
- [30] 叶强, 莫正玺, 许乙青. 1979—2014 年长沙市城市功能用地扩展与驱动力研究. 地理研究, 2019, 38(5): 1063-1079.
- [31] Zheng X Q, Zhao L, Xiang W N, Li N, Lv L N, Yang X. A coupled model for simulating spatio-temporal dynamics of land-use change: a case study in Changqing, Jinan, China. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 106(1): 51-61.
- [32] 高倩, 方创琳, 张小雷, 刘海猛, 任宇飞. 丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展的时空演变特征及影响机理. 生态学报, 2019, 39(4): 1263-1277.
- [33] 罗奎, 方创琳, 马海涛. 中国城市化与非农就业增长的空间格局及关系类型. 地理科学进展, 2014, 33(4): 457-466.
- [34] 王旭, 马博文, 李丹, 陈昆仑, 姚华松. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测. 自然资源学报, 2020, 35(1): 230-242.
- [35] 任胤铭, 刘小平, 许晓聪, 孙嵩松, 赵林峰, 梁迅, 曾莉. 基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响. 生态学报, 2023, 43(11): 4473-4487.
- [36] 乔治, 蒋玉颖, 贺瞳, 卢应爽, 徐新良, 杨俊. 土地利用变化模拟研究进展. 生态学报, 2022, 42(13): 5165-5176.
- [37] 周亮, 车磊, 周成虎. 中国城市绿色发展效率时空演变特征及影响因素. 地理学报, 2019, 74(10): 2027-2044.
- [38] 赵宏波, 魏甲晨, 孙东琪, 刘雅馨, 王爽, 谭俊涛, 苗长虹. 基于随机森林模型的“生产-生活-生态”空间识别及时空演变分析——以郑州市为例. 地理研究, 2021, 40(4): 945-957.
- [39] 曹祺文, 顾朝林, 管卫华. 基于土地利用的中国城镇化 SD 模型与模拟. 自然资源学报, 2021, 36(4): 1062-1084.
- [40] 焦利民, 杨璐迪, 刘稼丰, 张博恩, 许刚. 顾及城市空间结构信息的元胞自动机模型构建及其应用. 地理科学, 2019, 39(8): 1276-1283.
- [41] Yang X, Chen R, Zheng X Q. Simulating land use change by integrating ANN-CA model and landscape pattern indices. *Geomatics, Natural*

- Hazards and Risk, 2016, 7(3): 918-932.
- [42] Kiziridis D A, Mastrogianni A, Pleniou M, Tsiftsis S, Xystrakis F, Tsiripidis I. Improving the predictive performance of CLUE-S by extending demand to land transitions: The trans-CLUE-S model. *Ecological Modelling*, 2023, 478: 110307.
- [43] 赵霖雨, 崔柳, 王佳, 陈思. 基于土地利用模拟预测模型分析的城市绿色空间发展多情景模拟及建设时序研究——以湛江市中心城区为例. *生态学报*, 2023, 43(15): 6307-6320.
- [44] Hamidi S, Ewing R. A longitudinal study of changes in urban sprawl between 2000 and 2010 in the United States. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 128: 72-82.
- [45] Sahana M, Hong H Y, Sajjad H. Analyzing urban spatial patterns and trend of urban growth using urban sprawl matrix: a study on Kolkata urban agglomeration, India. *Science of The Total Environment*, 2018, 628: 1557-1566.
- [46] 欧维新, 张振, 陶宇. 长三角城市土地利用格局与 PM_{2.5}浓度的多尺度关联分析. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(7): 11-18.
- [47] 沈威, 鲁丰先, 秦耀辰, 谢志祥, 李阳. 长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素. *生态学报*, 2019, 39(11): 3937-3951.
- [48] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, Liu S S, Wang B Y, Yao Y. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.
- [49] Chen W X, Wang G Z, Gu T C, Fang C L, Pan S P, Zeng J, Wu J H. Simulating the impact of urban expansion on ecosystem services in Chinese urban agglomerations: a multi-scenario perspective. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 103: 107275.
- [50] Zhang S Q, Yang P, Xia J, Wang W Y, Cai W, Chen N C, Hu S, Luo X G, Li J, Zhan C S. Land use/land cover prediction and analysis of the middle reaches of the Yangtze River under different scenarios. *Science of The Total Environment*, 2022, 833: 155238.
- [51] Chen Y M, Li X, Liu X P, Ai B. Modeling urban land-use dynamics in a fast developing city using the modified logistic cellular automaton with a patch-based simulation strategy. *International Journal of Geographical Information Science*, 2014, 28(2): 234-255.
- [52] Xu T T, Gao J. Directional multi-scale analysis and simulation of urban expansion in Auckland, New Zealand using logistic cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019, 78: 101390.
- [53] 欧阳晓, 朱翔. 中国城市群城市用地扩张时空动态特征. *地理学报*, 2020, 75(3): 571-588.
- [54] 王田雨, 岳文泽. 面向碳增汇的国土空间格局优化: 理论框架与行动逻辑. *自然资源学报*, 2024, 39(5): 1008-1021.