

DOI: 10.5846/stxb202201050027

马银,郑敏睿,郑新奇,郭文华,刘孟兰,李佳阳,朱邦仁.基于 CA-Markov 和 MSPA 的绿色基础设施预测与时空演变分析——以京津冀城市群为例.生态学报,2023,43(16):6785-6797.

Ma Y, Zheng M R, Zheng X Q, Guo W H, Liu M L, Li J Y, Zhu B R. Prediction and spatiotemporal evolution analysis of green infrastructure based on CA-Markov and MSPA: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6785-6797.

基于 CA-Markov 和 MSPA 的绿色基础设施预测与时空演变分析

——以京津冀城市群为例

马 银¹, 郑敏睿^{2,3,*}, 郑新奇^{1,4,5}, 郭文华^{4,6}, 刘孟兰¹, 李佳阳¹, 朱邦仁¹

1 中国地质大学(北京)信息工程学院,北京 100083

2 中国人民大学公共管理学院,北京 100872

3 中国人民大学数字政府与国家治理实验室,北京 100872

4 自然资源部国土空间大数据工程技术创新中心,北京 100036

5 自然资源部北京房山综合勘测野外科学观测研究站,北京 102400

6 自然资源部信息中心,北京 100036

摘要:绿色基础设施(Green Infrastructure, GI)的合理布局有助于建立国土空间绿色发展新模式。在生态文明和高质量发展背景下,研究 GI 长时序时空双维度演变格局对提升生态环境质量、提高国土空间治理能力和实现“碳中和”目标具有重要意义。基于 CA-Markov(Cellular Automata-Markov, CA-Markov)、MSPA(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)和景观格局分析方法等构建 GI 研究模型框架,实现对 GI 过去—现在—未来的时空双维度分析。以京津冀城市群为研究区,分析了 2000—2020 年 GI 时空双维度演化特征,预测了未来 2025 和 2030 年的发展态势,讨论了协同发展过程与 GI 格局演变的对应关系,并总结 GI 优化启示。结果表明:(1)2000—2020 年,GI 面积占研究区总面积的比例呈现逐年下降趋势,由 90.82%降为 86.60%,空间上表现为西北部密集、东南部稀疏的分布态势。核心作为 GI 的主要组成部分,面积占比 57.04%—65.93%不等,同样呈现逐年下降趋势,其主要分布在研究区北部、西部和西北部。(2)2020—2030 年,研究区 GI 面积小幅度下降,但核心面积占比增长明显,2030 年占比高达 84.04%。连接桥、边缘和环等其他 GI 类型面积占比较小,其分散分布在各核心之间。(3)城市群协同发展进程提速直接导致 GI 的波动,主要体现在 2015—2020 年实质发展期和 2020—2025 年国土空间规划加速落实期。(4)未来,京津冀城市群 GI 生态网络稳定性的提升需重点关注各城市中心 GI 的面积占比和东南部的连通性问题。研究结果为快速实现 GI 检查、评估和治理提供技术支撑,也有助于实现京津冀城市群建立绿色、低碳、可持续发展新模式。

关键词:绿色基础设施;时空双维度演变;预测分析;CA-Markov;MSPA;京津冀城市群

Prediction and spatiotemporal evolution analysis of green infrastructure based on CA-Markov and MSPA: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

MA Yin¹, ZHENG Minrui^{2,3,*}, ZHENG Xinqi^{1,4,5}, GUO Wenhua^{4,6}, LIU Menglan¹, LI Jiayang¹, ZHU Bangren¹

1 School of Information Engineering, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2 School of Public Administration and Policy, Renmin University of China, Beijing 100872, China

3 Digital Government and National Governance Lab, Renmin University of China, Beijing 100872, China

4 Technology Innovation Center for Territory Spatial Big-data, Ministry of Natural Resources, Beijing 100036, China

基金项目:国家自然科学基金项目资助(42201471,72033005)

收稿日期:2022-01-05; **网络出版日期:**2023-04-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: minruizheng@ruc.edu.cn

5 *Observation and Research Station of Beijing Fangshan Comprehensive Exploration, Ministry of Natural Resources, Beijing 102400, China*

6 *Information Center of Ministry of Natural Resources of China, Beijing 100036, China*

Abstract: The rational layout of green infrastructure (GI) is conducive to establishing a new model of green development of the territorial space. Under the background of ecological civilization and high-quality development, it is significant to explore the spatiotemporal dual-dimensional evolution pattern of GI in the long run. It could improve the quality of the ecological environment, enhance the spatial governance of territorial space, and achieve the goal of carbon neutrality. This study constructed a conceptual framework of GI that involved Cellular Automata-Markov (CA-Markov), Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA), and landscape pattern analysis methods to analyze the spatiotemporal dual-dimensional analysis of GI in the past, present, and future. We took the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration as the study area. We first analyzed the spatiotemporal dual-dimensional evolution characteristics of GI from 2000 to 2020. Then we simulated the future development in 2025 and 2030. Furthermore, we discussed the correspondence between the collaborative development process and the pattern evolution of GI, and summarized the optimization insights of GI. The results showed that: (1) from 2000 to 2020, the proportion of the GI area in the study area decreased from 90.82% to 86.60%, which showed a downward trend year by year. The spatial distribution GI was dense in the northwest and sparse in the southeast. The core area accounted for 57.04% to 65.93% of the whole GI, which also emerged as a decreasing trend year by year. The core was mainly distributed in the northern, western, and northwestern parts of the study area. (2) From 2020 to 2030, although the area of GI will decline slightly, the percentage of the core area will grow significantly (84.04% in 2030). Other types of GI, such as bridge, edge, and loop, will have a smaller proportion of area. Spatially, these types will be scattered among the core. (3) The acceleration of the collaborative development of urban agglomerations directly led to fluctuations in GI's area, particularly in the substantial development period (2015—2020) and the accelerated implementation period (2020—2025). (4) In the future, the improvement of the stability of the ecological network of GI in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration should focus on the area percentage of GI in urban centers and the connectivity in the southeast of the study area. Our framework provides technical support for the rapid realization of inspection, assessment, and governance of GI. It also helps to establish a new green, low-carbon and sustainable development mode in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration.

Key Words: green infrastructure; spatiotemporal dual-dimensional evolution; predictive analysis; CA-Markov; MSPA; Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

绿色基础设施(Green Infrastructure, GI)是以生态理论为基础,针对灰色基础设施和社会基础设施提出的具有战略意义的概念,它被看作是支持区域、城市和社区发展的另一种必要基础设施^[1],是人类社会可持续发展的重要支撑。GI概念最早于1999年由美国保护基金会和农业部森林管理局组织的“GI工作组”提出,该小组将GI定义为由绿道、湿地、雨水花园、森林、乡土植被等组成的相互连接的网络,它可为野生动物迁徙和生态过程提供起点和终点,也可维护生态环境、提高生活质量,还具有管理暴雨,改善水质,节约城市管理成本等作用^[2-3]。GI旨在突破传统生态保护中关于绿化率、植被覆盖率等的局限性,最终实现生态、社会、经济的协调和可持续发展^[1-2],但随着城市的快速发展,绿色空间受到不同程度的破坏和威胁,严重削弱了GI在国土空间建设中的生态和社会作用,给国土空间的治理和优化带来压力^[4-6]。研究发现GI的碳汇作用对抵消生产生活产生的碳排起到重要作用,另外,城市中GI的碳封存效率在将来有提高的趋势^[7],其合理布局可助力“碳中和”行动^[8]。目前,我国正处于战略性控碳和国土空间规划体系转型的关键时期,GI被认为是实现“碳中和”和国土空间治理的重要途径^[9-10],因此做好GI长时序时空双维度演变格局分析具有重要的现实意义。

总结归纳文献资料,将GI研究分为三阶段。第一阶段为GI的定义讨论和类型识别。定义视角先后经历

了学科理论→社会政策→学科理论+社会政策的变化^[2-3]。同时,研究者也逐步提出形态学空间格局分析法(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)、景观格局法、成本距离法和电路理论法等 GI 提取识别方法^[11-14]。第二阶段为针对历史和现在时期的 GI 特征变化和评价研究。例如, Furberg 等借助影像数据识别 GI 变化,利用景观指数法探究 GI 对景观连通性的影响^[15]。魏家星等构建了 GI 生态网络,尝试用空间句法评价其空间优先性^[16]。顾康康等选取雨水管理、缓解热岛效应、绿色空间可达性、景观连通性、净化空气五类指标构建了绿色基础设施规划模型,开展 GI 多功能评估^[17]。第三阶段为 GI 多学科交叉研究。例如,城市生态学专家探索了 GI 与城市生态系统之间的定量关系^[18],大气专家关注 GI 影响空气质量的机制^[19],林业专家通过优化植被分布使 GI 充分发挥生态和社会作用^[20]。已有研究在时序上较多关注历史和现状,考虑历史—现状—未来长时序 GI 时空演变格局的研究模型框架更是鲜有报道。而在“碳中和”和国土空间规划新形势下,快速预测和明确 GI 长时序的分布格局可为社会—经济—环境的协调发展提供基础。另外,针对京津冀城市群,现有研究更多围绕“三区三线”、生态功能和生境质量等探讨协同发展和生态环境之间的关系^[21-22],缺乏以 GI 视角为切入点的研究成果。

综上,针对 GI 研究,如果能建立既可以分析过去、诊断现在,也可以预测未来的一体化技术方法,进而实现对 GI 的检查、评估和治理,成为管理部门和学者们关注的重点问题。本研究主要解决如何构建研究模型框架快速实现历史—现状—未来长时序 GI 数据的获取、预测和时空分析,明确城市群尺度下协同发展进程和 GI 时空演化的关系,根据预测数据提早布局和干预 GI 发展,实现国土空间治理与优化。为了实现上述目标,第一模块主要介绍模型的选择、原理和计算数据等,第二模块重点介绍了计算结果和新发现,第三模块讨论了京津冀城市群协同发展进程与 GI 格局演变的对应关系,参考研究新发现和新版空间规划方案得到 GI 优化启示。研究对实现京津冀城市群国土空间 GI 有效合理配置、生态宜居、环境可持续发展、国土空间规划转型以及城市群生态文明建设具有重要的现实意义。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

京津冀城市群位于 36°05'—42°37'N, 113°27'—119°50'E, 总面积约 21.8 万 km², 包含北京、天津、石家庄等 13 个城市^[22]。研究区在近十年间经历了实质、快速和高质量经济发展阶段^[21-23], 居民区、工业和交通用地的快速扩张占用了大量耕地、林地和草地等绿色空间资源, 导致研究区生态环境问题日益突出^[23]。在城市群协同发展、“碳中和”目标和国土空间规划背景下, GI 的合理布局成为京津冀生态环境高质量发展的重要支撑。

1.2 数据来源及预处理

本研究参考他人研究^[24-25], 并根据《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017) 标准, 将林地、耕地、草地和水域四种一级分类土地利用类型作为 GI 范围, 即 GI 包括天然林、自然草地、天然湖泊等自然形成的绿色空间, 也包括人工林、人工湖和耕地等受人为干预的半自然绿色空间。

研究数据主要包括研究区的行政边界、土地利用遥感监测数据及人口、经济、环境等辅助决策数据。各级行政边界来自国家基础地理信息数据库(<https://www.resdc.cn/>)。2000、2005、2010、2015 和 2020 年的土地利用遥感监测数据来自资源环境科学与数据中心网站(<https://www.resdc.cn/>), 该数据是通过 Landsat-TM/ETM 和 Landsat 8 遥感影像数据解译获得, 空间分辨率为 1 km。数据以省/市为单位下载, 通过 ArcGIS10.4 做拼接和重分类预处理, 并转换为 TIF 和 ASCII 码格式为 GI 识别和预测做准备。辅助决策数据主要来源于《中国城市统计年鉴》、《北京统计年鉴》、《天津统计年鉴》、《河北统计年鉴》。

1.3 研究模型框架

已有 GI 时空演化研究较多的停留在对历史和现状特征的探讨阶段^[24-25], 少量文献关注和探讨 GI 的预测问题^[26], 而对 GI 未来发展态势缺少预见性不利于国土空间规划的调整和实施。Cellular Automata-Markov

(CA-Markov)是土地利用覆被数据预测时应用最广泛的模型^[27]。为了建立既可以分析过去、诊断现在,也可以预测未来的一体化方法,本研究充分考虑 GI 的未来发展态势,从土地利用数据预测、GI 识别提取和时空双维度演变格局分析三个维度构建研究模型框架,如图 1 所示。首先在历史数据的基础上采用 CA-Markov 模型预测研究区 2025 和 2030 年土地利用数据,实现历史→现状→未来的时间线串联;其次,基于土地利用数据采用 MSPA 实现 GI 识别提取;最后在空间分析方法、变化率指数和景观格局指数的辅助下实现 GI 长时序的时空双维度定量分析。

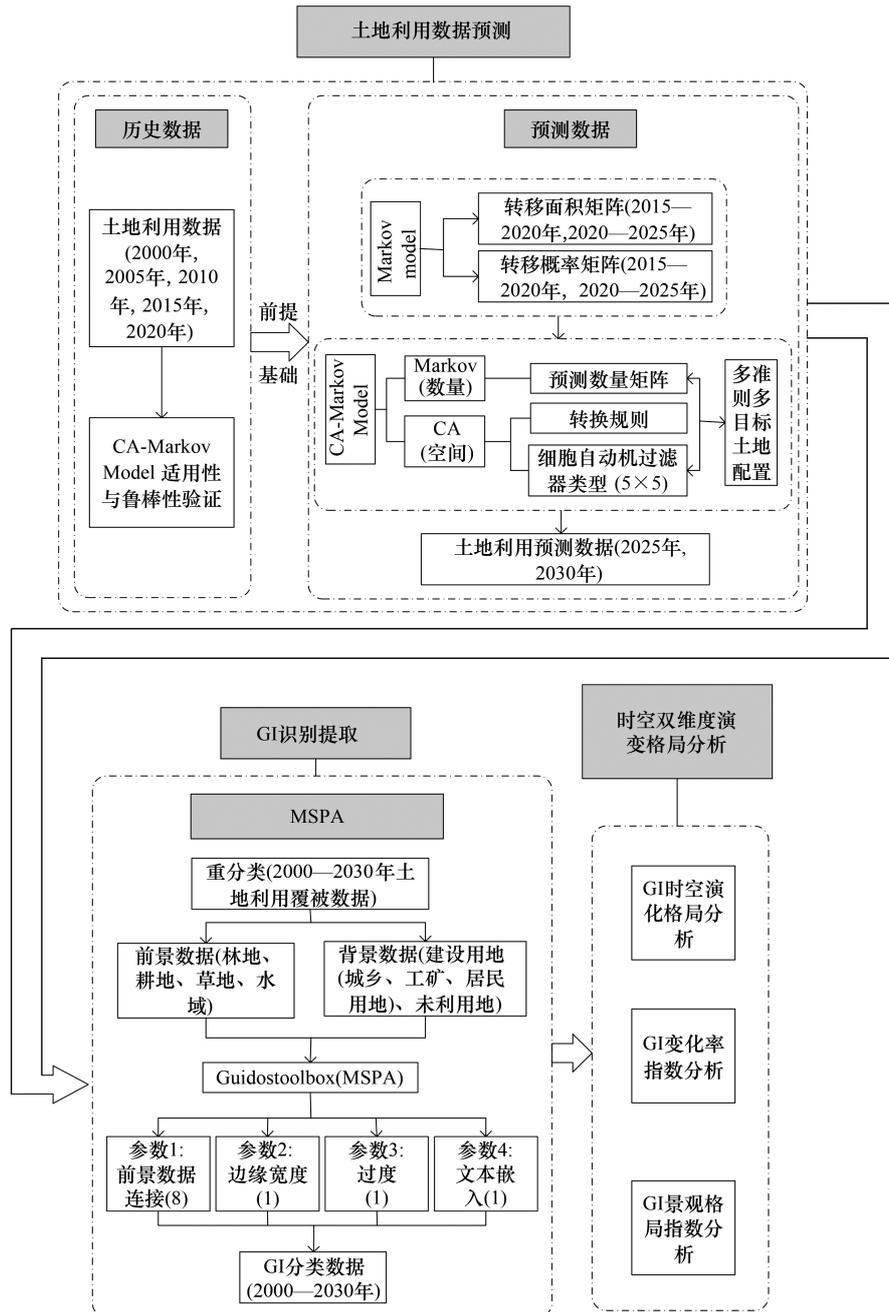


图 1 研究模型框架

Fig.1 Research model framework

CA:元胞自动机 Cellular automata; CA-Markov Model:元胞自动机-马尔科夫模型 Cellular Automata-Markov model; GI:绿色基础设施 Green infrastructure; MSPA:形态学空间格局分析 Morphological spatial pattern analysis

1.3.1 CA-Markov

元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 模型是一种状态、时间、空间均为离散状态且动态性较强的网络动力学模型,该模型结合元胞空间内各个元胞目前的状态,通过转换规则预测下一时间段元胞的状态^[28]。Markov 模型是研究中另一种常用的模型。该模型通过研究随机事件发生的可能性及变化规律来预测未来某时刻的状况,其主要根据上一时间区间内情景系统中不同的起始概率和状态转移矩阵预测该情景系统下一时间区间的发展状态^[29]。CA 模型可将预测数据和变化趋势在空间上做出表达,但无法定量反映邻域对中心元胞的影响程度,而 Markov 模型在数量预测上有更大优势,但无法在空间上表达^[30]。为了使预测结果能在时、空两个维度表达,研究选用 CA-Markov 模型实现数据预测。预测过程对模型参数进行特殊优化设置,其中适宜性图集的制作考虑到“三区三线”、地势起伏、规划数据、河流水系四种因子,通过布尔交叉法实现数据的叠加计算。

1.3.2 MSPA 参数设置

MSPA 是一种以数学形态学为基础理论识别 GI 类型的方法^[31],根据研究区自身概况,把 GI 细分类为核心、孤岛、边缘、穿孔、连接桥、环和分支七种类型^[32],如表 1 所示。研究是在 GuidosToolbox 3.0 软件的支持下,进行 GI 识别分类,该工具由欧盟委员会联合研究中心设计和更新^[12]。首先对土地利用数据进行重分类,将建筑用地(城乡、工矿、居民用地)和未利用地设置为背景数据,林地、耕地、草地和水域设置为前景数据,将重分类后的土地利用数据作为上述软件的输入数据,选取 GI 识别结果较好的参数组合完成实验,具体将 Foreground Connectivity 参数设置为 8,EdgeWidth 参数设置为 1,Transition 参数设置为 1,Intext 参数设置为 1。

表 1 GI 类型及其生态学含义

Table 1 Types of GI and their ecological implications

类型 Type	生态学含义 Ecological implications
核心 Core	前景像元面积较大的斑块集合,相当于 GI 网络的中心,其作为生态网络的“源”,为物种提供栖息地,对生物多样性的保护具有重要意义
孤岛 Islet	孤立且彼此之间连接度较低的绿色小斑块,相当于生态网络中的“生态跳岛”,在生态网络中起到媒介作用
边缘 Edge	核心与外围非绿色斑块的过渡地带,可有效的减少外界人为干扰带来的冲击,具有边缘效应
穿孔 Perforation	核心与内部非绿色斑块的过渡地带,功能与边缘类似,起到保护核心的作用,具有边缘效应
连接桥 Bridge	两个相邻核心之间连接度较高的狭长区域,代表生态网络中斑块连接的廊道,对生物迁移、能量交流、景观连接具有重要意义
环 Loop	连接同一核心的内部廊道,是核心斑块内部进行物种扩散和能量交流的通道
分支 Branch	只有一端与边缘、连接桥、环或穿孔相连的区域

GI:绿色基础设施 Green infrastructure

1.3.3 GI 演变特征测度指数

考虑到 GI 的面积和空间结构变化两方面,选用变化率指数和景观格局指数探究 GI 时空演变特征,指数的选取和定义主要参考文献^[33-34],具体如表 2 所示。

2 结果与分析

2.1 土地利用模拟预测分析

为了验证 CA-Markov 模型预测研究区土地利用数据的可行性,首先使用该模型预测了 2015 和 2020 年研究区的土地利用数据,与实际数据对比进行精度验证, kappa 系数分别为 0.8124 和 0.8077,精度满足要求,可见 CA-Markov 模型可用于研究区土地利用的模拟预测。如图 2 所示,2025 和 2030 年京津冀的土地利用格局整体保持相对稳定状态,林地和草地交错分布在研究区东北部和西部边界处,耕地主要分布在东南部地势平坦区域,城乡、工矿、居民区用地主要集中在北京市、天津市、唐山市等市中心区域,该类型在 2025—2030 年有小幅度扩张。

表 2 GI 面积变化和景观格局测度指数含义及计算公式

Table 2 Implications and calculation formula of the area change and landscape pattern measurement index of GI

指数 Index	公式 Formula	指数内涵 Index implication
单一变化率指数 Single rate of change index	$P_s = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\%$	P_s 代表单一变化率指数, U_a 和 U_b 分别代表始末两期同种 GI 类型的面积, 单位为 km^2 , T 代表研究始末时间段, 单位为年。该指数可以表达特定区域一定时间范围内某种 GI 类型变化情况
综合变化率指数 Composite rate of change index	$P_c = \frac{(\sum_{i=1}^n \Delta U_{i-j})}{(2 \sum_{i=1}^n U_i)} \times \frac{1}{T} \times 100\%$	P_c 代表综合变化率指数, U_i 代表研究初期某一 GI 类型面积, U_j 代表研究末期某一 GI 类型面积, ΔU_{i-j} 代表研究时段内第 i 类 GI 类型面积转为非 i 类 GI 类型面积的绝对值, 单位为 km^2 , T 代表研究始末时间段, 单位为年。该指数可以表达特定区域一定时间范围内所有 GI 的年变化率
斑块密度 Plaque density (PD)	$PD = \frac{N}{A}$	PD 代表斑块密度, N 代表斑块类型的数量, A 代表 GI 总面积。该指数表示单位面积上的斑块数, 是描述景观破碎化的重要指标
最大斑块指数 Largest patch index (LPI)	$LPI = \frac{\max(a_{ij})_{j=1}^n}{A}$	LPI 代表最大斑块指数, a_{ij} 代表第 i 类 GI 类型斑块 j 面积, A 代表 GI 总面积
分离度指数 Splitting Index (SPLIT)	$SPLIT = \frac{D_{ij}}{A_{ij}}$	SPLIT 代表分离度指数, D_{ij} 为 GI 类型 i 的距离指数; A_{ij} 为 GI 类型 i 的面积指数
Shannon's 多样性指数 Shannon's Diversity Index (SHDI)	$SHDI = - \sum_{i=1}^m p_i \ln(p_i)$	SHDI 代表 Shannon's 多样性指数, m 为 GI 类型数目, p_i 是 GI 类型 i 所占面积的比例。该指数在景观级别上等于各斑块类型的面积比乘以其值的自然指数之后和的负数
Shannon's 均匀度指数 Shannon's evenness index (SHEI)	$SHEI = \frac{- \sum_{i=1}^m p_i \ln(p_i)}{\ln m}$	SHEI 代表 Shannon's 均匀度指数, m 为 GI 类型数目, p_i 是 GI 类型 i 所占面积的比例

PD: 斑块密度 Plaque density; LPI: 最大斑块指数 Largest patch index; SPLIT: 分离度指数 Splitting index; SHDI: Shannon's 多样性指数 Shannon's diversity index; SHEI: Shannon's 均匀度指数 Shannon's evenness index

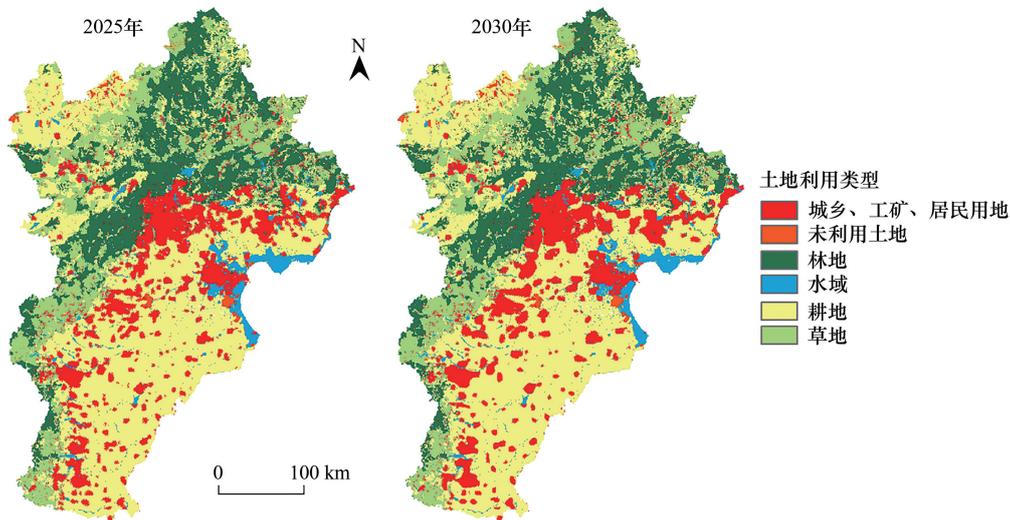


图 2 2025 年和 2030 年土地利用分布图

Fig.2 Land use distribution map for 2025 and 2030

2.2 GI 时空双维度演化格局

2.2.1 GI 时间演化特征

从时间维度视角分析,如表 3 所示,2000—2020 年 GI 总面积占研究区面积的 86.60%—90.82% 不等,占比呈现逐年下降趋势。2000 年 GI 总面积占比为 90.82%,到 2015 年时占比为 89.57%,下降约 1.25 个百分点,2015—2020 年占比下降幅度较大,约为 3 个百分点,2020 年 GI 总面积占比仅为 86.60%。从 GI 各类型角度

分析,核心面积较大,约占 GI 总面积的 60%,由核心的生态学含义可知,研究区分布有连片大面积的绿色空间;其次,面积占比较大的是连接桥、边缘和穿孔,分别为 15%、10%和 5%左右,连接桥等要素的存在,增强了 GI 生态网络的连通性,也保证了研究区内绿色空间的整体性;此外孤岛、环和分支占比相对较小,仅为 0.06%、2.50%和 1.50%左右。

表 3 京津冀 2000—2030 年 GI 各类型面积及占比/km²

Table 3 Area and proportion of various types of GI in Beijing-Tianjin-Hebei from 2000 to 2030

数据 Data	年份 Year	核心 Core	连接桥 Bridge	边缘 Edge	穿孔 Perforation	孤岛 Islet	环 Loop	分支 Branch	GI 总面积 Total area of GI
遥感监测数据(历史、现状) Remote sensing monitoring data (history, current situation)	2000	129065 (65.93%)	29053 (14.84%)	19683 (10.05%)	10373 (5.30%)	61 (0.03%)	5198 (2.66%)	2326 (1.19%)	195759 (90.82%)
	2005	127411 (65.56%)	29368 (15.11%)	19435 (10.00%)	10275 (5.29%)	121 (0.06%)	5120 (2.63%)	2627 (1.35%)	194357 (90.17%)
	2010	126198 (65.13%)	29750 (15.35%)	19236 (9.93%)	10571 (5.46%)	168 (0.09%)	5090 (2.63%)	2750 (1.42%)	193763 (89.90%)
	2015	124785 (64.64%)	30404 (15.75%)	19156 (9.92%)	10500 (5.44%)	167 (0.09%)	5110 (2.65%)	2928 (1.52%)	193050 (89.57%)
	2020	106466 (57.04%)	38346 (20.54%)	19968 (10.70%)	12244 (6.56%)	161 (0.09%)	5277 (2.83%)	4184 (2.24%)	186646 (86.60%)
预测数据(未来) Forecast data (future)	2025	149646 (83.12%)	1379 (0.77%)	5846 (3.25%)	15404 (8.56%)	338 (0.19%)	5188 (2.88%)	2233 (2.24%)	180034 (83.53%)
	2030	151132 (84.04%)	1232 (0.69%)	4699 (2.61%)	16418 (9.13%)	338 (0.19%)	4490 (2.50%)	1535 (0.85%)	179844 (83.44%)

2025、2030 年 GI 的总面积占研究区面积的比例仍然呈现下降趋势。核心面积占比有明显提高,相比 2020 年,2025 年占比提高 26.08 个百分点,为 83.12%。2030 年,核心面积占比达到 84.04%,主要受到新版国土空间规划实施的影响。连接桥和边缘的面积占比明显减小,相比于 2020 年,2025 年连接桥的面积占比下降 19.77 个百分点,仅为 0.77%,边缘的面积占比下降约 7.45 个百分点,为 3.25%,2030 年时,连接桥和边缘的面积占比仍然呈现下降趋势,分别为 0.69%和 2.61%。由此可知,GI 作为一个整体的生态网络,其核心面积的增大,会使得承担连通作用的连接桥和具有边缘效应的边缘面积逐渐减少。

2.2.2 GI 空间演化特征

从空间维度视角分析,如图 3 所示,2000—2020 年,核心主要分布在研究区的北部、西北部和西部边界处,其中承德市和张家口市的核心分布面积广,而连接桥、分支和孤岛等类型主要分布在研究区的南部、东部和东南部,包括天津、廊坊、邢台东部、邯郸东部等。核心与其他类型之间出现明显的分界线,对比图 3 可知,分界线与 200 m 高程线高度一致。研究区地势呈现由西北向东南倾斜的阶梯状,西北部地势较高,林地占比较大,绿色斑块面积较大,核心分布广泛,而东南部地势相对平坦,适宜耕种和开发,斑块面积较小,容易形成环、连接桥和孤岛等类型,导致分界线较明显。从背景区视角分析,北京、天津和唐山等城市中心的背景区呈现不断扩张的态势,2015 年和 2020 年的 GI 空间分布显示,保定、石家庄、邢台和邯郸四个城市中心的背景区面积也逐渐增大。如图 3 所示,随着时间变化,东南部 GI 呈现逐渐破碎化的状态,但连接桥逐渐增加,体现了连接桥在 GI 生态网络中的重要作用。

如图 4 所示,2025、2030 年研究区 GI 的分布特征发生显著变化,核心和其他 GI 类型之间无明显分界线,广泛分布在张家口、承德、廊坊、沧州、衡水、邢台和邯郸等地,且斑块面积增大,连通性增强。连接桥、边缘和环等其他类型分散分布在各核心之间。2000—2020 年研究区东南部的绿色空间虽分布广泛,但由于其斑块面积小,连通性较弱,被识别为连接桥、边缘、环、穿孔、分支和孤岛类型,而随着国土空间新规划政策的出台和

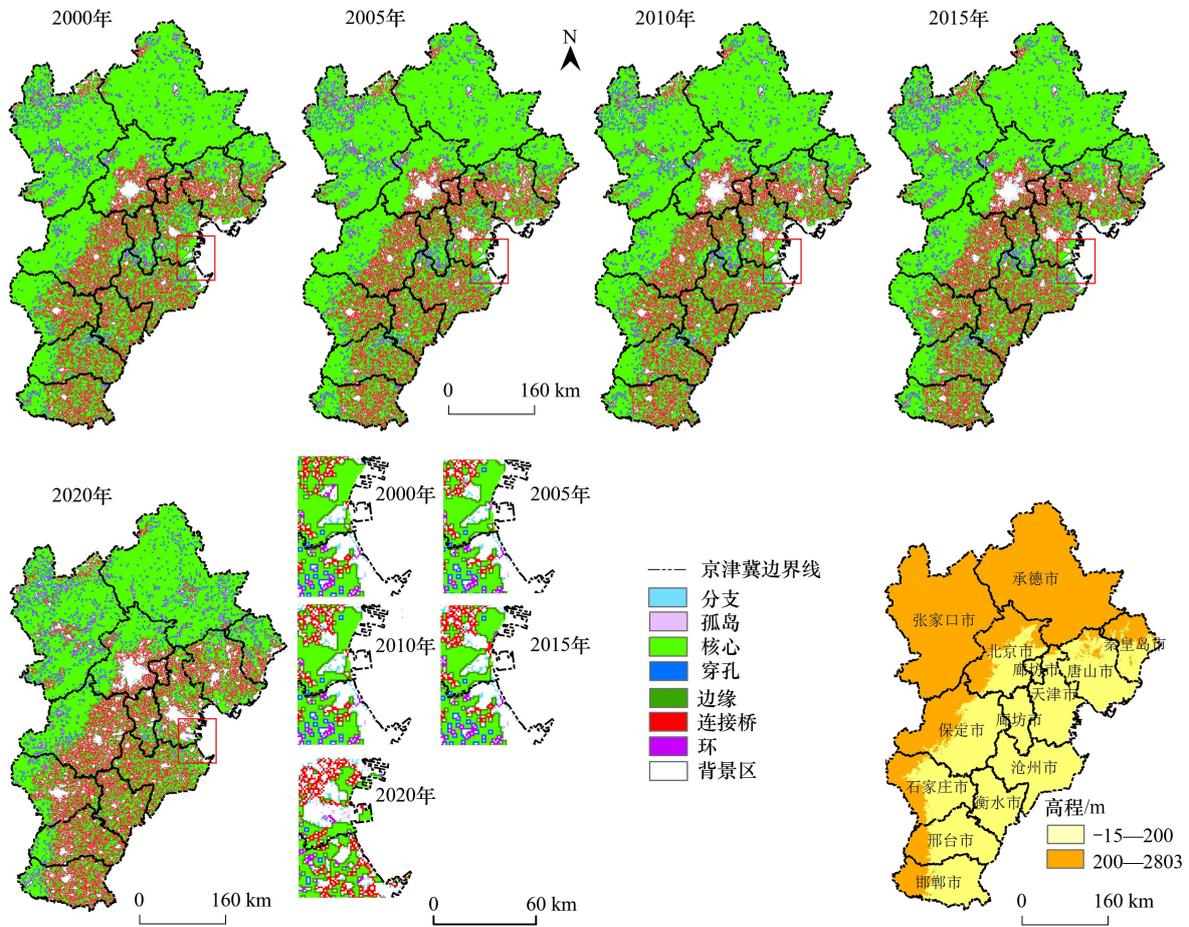


图3 2000—2020年GI各类型空间分布图

Fig.3 Spatial distribution map of various types of GI from 2000 to 2020

实施,GI 受到保护,斑块边界外延,面积不断增大,被识别为核心。但值得注意的是,北京、天津、唐山、廊坊、保定东、石家庄东、邢台和邯郸城市中心的背景区面积扩大趋势明显,由此可见,城市中心的GI 优化是增强GI 生态网络整体性、充分发挥GI 生态作用的关键。

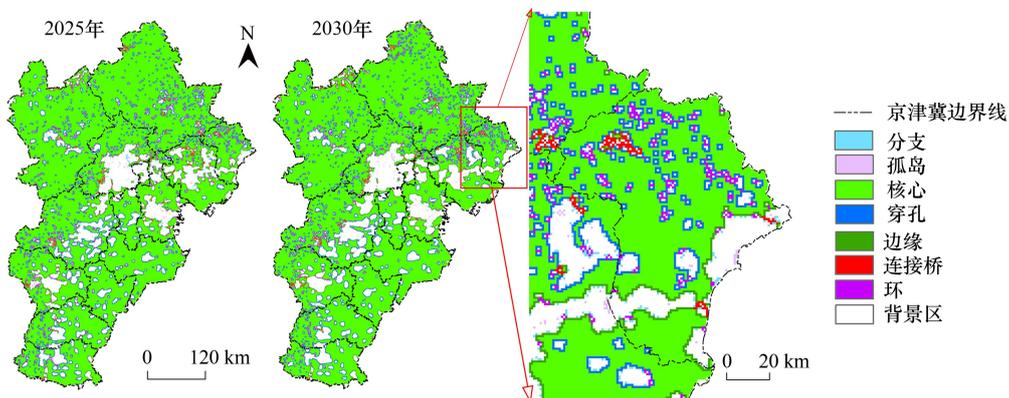


图4 2025年和2030年GI各类型分布图

Fig.4 Distribution of types of GI in 2025 and 2030

2.3 变化率和景观格局指数分析

2.3.1 变化率指数分析

从时间维度视角分析,如表 4 所示,GI 各类型的单一变化率指数呈现先稳定后波动的变化趋势,2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年三个时段的变化率较平稳,2015—2020 年、2020—2025 年和 2025—2030 年变化率指数出现明显的变化波动。另外,孤岛的变化率指数变化波动最大,呈现降—升—降的变化趋势,变化率指数最大为 21.99%,最小为-0.72%。不同类型在整个生态网络中的作用不同,其稳定性也存在较大的差异^[26]。GI 综合变化率指数整体呈现先上升后下降的变化趋势,前三个时间段分别为 0.27%,0.14%和 0.18%,变化率较小;而 2015—2020 年和 2020—2025 年的综合变化率指数明显增加,分别为 4.74%和 4.14%,与 GI 各类型在该时间段内单一变化率指数变化保持一致;到 2025—2030 年时,变化率下降 3.04 个百分点,为 1.10%。

表 4 京津冀城市群 2000—2030 年 GI 各类型单一、综合变化率指数

Table 4 Single and comprehensive change rate index of various types of GI in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2000 to 2030

数据 Data	年份 Year	单一变化率指数/% Single rate of change index							综合变化率 指数/% Composite rate of change index
		核心 Core	分支 Branch	边缘 Edge	孤岛 Islet	连接桥 Bridge	环 Loop	穿孔 Perforation	
遥感监测数据 (历史、现状)	2000—2005	-0.26	2.59	-0.25	19.67	0.22	-0.30	-0.19	0.27
Remote sensing monitoring data (history, current situation)	2005—2010	-0.19	0.94	-0.20	7.77	0.26	-0.12	0.58	0.14
预测数据(未来)	2010—2015	-0.22	1.29	-0.08	-0.12	0.44	0.08	-0.13	0.18
Forecast data (future)	2015—2020	-2.94	8.58	0.85	-0.72	5.22	0.65	3.32	4.74
	2020—2025	8.11	-9.33	-14.14	21.99	-19.28	-0.34	5.16	4.14
	2025—2030	0.20	-6.25	-3.92	0.00	-2.13	-2.69	1.32	1.10

2.3.2 景观格局指数分析

从时间维度视角分析,如表 5 所示,各景观格局指数在 2020 年或 2025 年呈现变化拐点,与上述 GI 的时间变化特征和变化率指数特征保持一致。斑块密度、最大斑块指数、Shannon's 多样性指数和 Shannon's 均匀度指数均在 2020 年增大。2000—2020 年,斑块密度由 0.0731 增至 0.0864,到 2025 年,又减少至 0.0244;2000—2015 年,最大斑块指数由 38.6623 变为 38.7098,而到 2020 年时,增至 45.5810,相比于 2015 年,增幅约为 17.75%;Shannon's 多样性指数和 Shannon's 均匀度指数在 2000—2020 年呈现增加的趋势,在 2020—2030 年则呈现减小的变化趋势。由此可见,研究区 GI 的景观格局在 2015—2020 年受到破坏,到 2020 年时景观破碎化程度较高,2020—2025 年 GI 的景观格局指数变化较大,景观格局状态逐渐恢复,到 2030 年时 GI 连通性得到改善。

表 5 京津冀城市群 2000—2030 年 GI 景观格局指数

Table 5 Landscape pattern index of GI of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2000 to 2030

年份 Year	PD	LPI	SPLIT	SHDI	SHEI
2000	0.0731	38.6623	4.4967	1.2388	0.5957
2005	0.0730	38.6959	4.5215	1.2401	0.5963
2010	0.0738	38.6992	4.5473	1.2435	0.5980
2015	0.0745	38.7098	4.5611	1.2461	0.5992
2020	0.0864	45.5810	4.0006	1.2877	0.6192
2025	0.0244	46.9571	2.7550	1.0014	0.4816
2030	0.0220	46.3279	2.7716	0.9816	0.4721

为了进一步探究各城市 GI 在景观格局破碎化严重年份的差异性,选取 2020 年斑块密度和 Shannon's 多样性指数进一步分析。如图 5 所示,廊坊、衡水、邢台和沧州等市的斑块密度较大,GI 破碎化程度较高,而承

德市、秦皇岛市和张家口市的斑块密度较小,GI 破碎化程度较低,同时,承德市和张家口市的 Shannon's 多样性指数较小,与常玉珣的研究结果保持一致^[35]。虽然 2020 年研究区 GI 的景观格局整体破碎化较为严重,但承德市、张家口市和秦皇岛市的 GI 连通性和稳定性保持良好的状态(图 3)。三座城市接壤分布在研究区的北部和西北部(图 3),所处地势较高,相比地势低的平原地区,该区域建设用地开发适宜度较弱,更有利于林地和耕地的保持^[21,35],大面积的树林和作物形成 GI 自然联动区域,在快速协同发展过程中具有一定的自我保护和自我调节能力。因此,在 GI 规划和优化过程中需注重 GI 生态网络和自然联动区的构建。

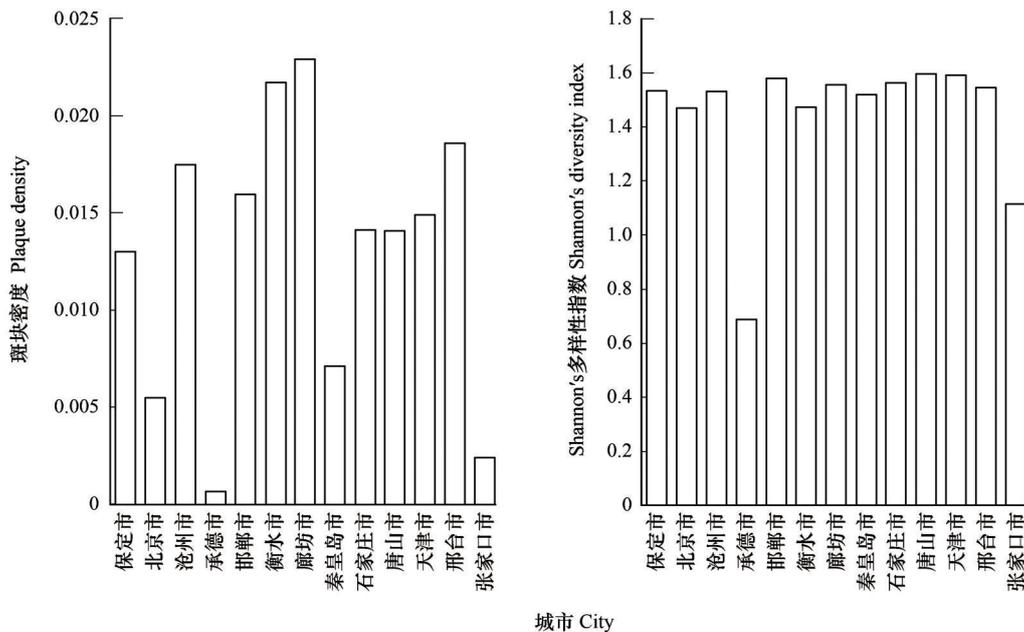


图 5 2020 年研究区各城市 PD 和 SHDI 柱状图

Fig.5 Histogram of PD and SHDI of cities in the study area in 2020

PD:斑块密度 Plaque density; SHDI:Shannon's 多样性指数 Shannon's diversity index

3 讨论

3.1 京津冀城市群协同发展影响 GI 格局演变

京津冀区域合作最早于 1986 年提出,2009 年左右三地对该合作发展达成共识并全面启动,同时关于京津冀区域发展的规划也于 2014 年完成编制^[36]。在此阶段内,各区域间协同发展进程推动缓慢,使得 2000—2015 年 GI 总面积、核心区面积和各景观指数指标处于相对平稳状态,如图 6 所示。2015—2020 年京津冀协同发展上升为国家发展战略,为保证区域协同和经济发展,用地类型相互转换速度加快,GI 各指标出现明显的变化拐点,总面积和核心区面积均呈现明显的下降趋势,变化率随之变动,景观破碎化明显加剧(图 6)。此结果与已有研究保持一致,交通、工业和居民区用地的扩张占用了耕地、林地、草地等绿色空间^[23,37],导致 GI 波动明显。从人地关系的视角出发,人类和社会因素对 GI 格局的影响远大于自然因素,建设用地扩张、人口增长、法律政策和规划建议是影响 GI 的主要人为因素^[38],这也是京津冀城市群协同发展进程推动越快 GI 变化越明显的原因。按照国家战略发展要求,2020—2030 年京津冀城市群需继续以疏解北京非首都功能为目标,实现世界级城市群的发展,逐渐完成“十四五”规划和国土空间规划的实施和落实。研究表明未来研究区建设用地的扩张将侵占城乡边缘地带的耕地和绿地^[27],导致 GI 面积及各指数的波动变化(图 6),也导致背景区的扩张。

3.2 京津冀城市群 GI 优化启示

(1) 政策导向,规划先行

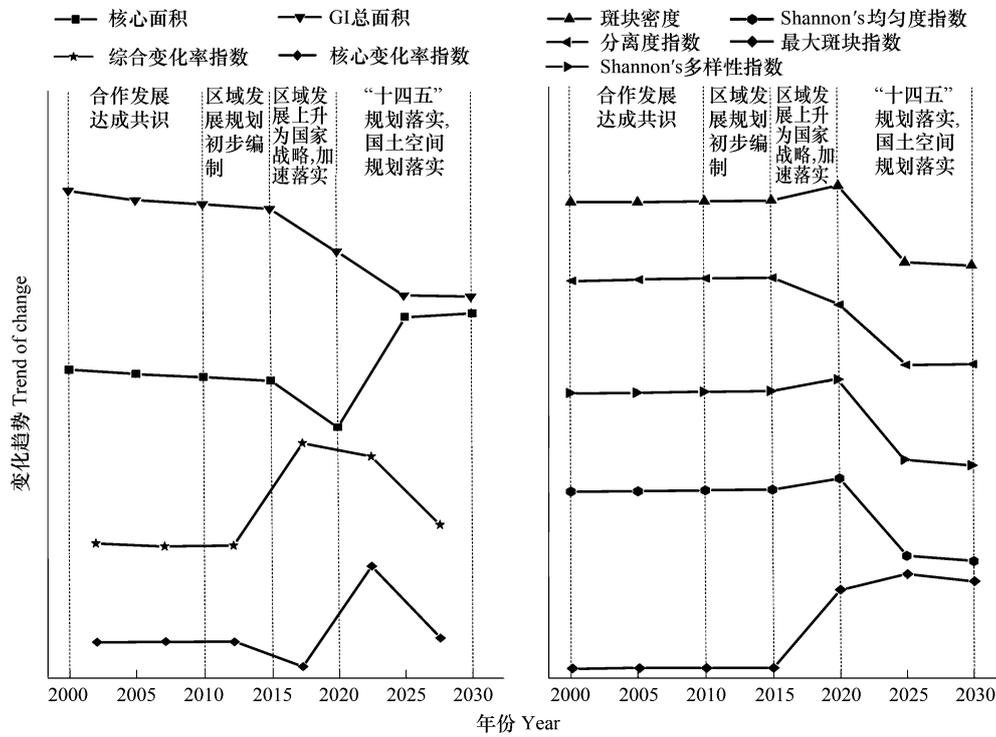


图 6 京津冀城市群协同发展进程中 GI 指标变化图

Fig.6 Indicator change of GI in the process of synergistic development of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

京津冀城市群协同发展进程的推进直接影响 GI 各指标的拐点变化,两者存在明显的对应关系,政策因素是影响 GI 合理布局和向好发展的关键因素。目前中国追求低碳排、重治理、优环境、高质量的发展模式,这将给研究区 GI 的优化和治理奠定政策基调。由图 3 和图 4 可知,城市中心和研究区东南部是国家政策关注的重点。作为首都经济圈的京津冀城市群,其发展需以国家政策为导向,结合自身经济、文化、生态和区位发展状态和本底概况,制定适宜研究区 GI 发展的政策,并结合国土空间规划过程中划定的“三区三线”做好 GI 规划,重视未利用地的“返绿”行动和行道树的种植,切实保证 GI 生态网络的整体性,增强其在城市内部的连通性。

(2) 常态评估,精准优化

城市群的可持续发展是多层次和多维度的复杂问题,国内外相关研究从经济、社会、人口和生态环境四个视角选择指标定期评估城市 and 城市群发展状态和阶段,及时对发展过程中呈现的问题做出响应^[39]。GI 作为城市中自然和半自然绿色空间的集合,能提供丰富的生态服务功能,其面积占比、景观格局指数、人均 GI 面积等可以纳入生态环境指标来评估城市的可持续发展状态^[40]。另外,城市群的发展强调各城市间的融合和协同,但各城市实行同一 GI 优化策略,则缺乏适宜性和严谨性。将研究区分为现状保持区、优化提升区和连通性增强区三大区域,如图 7 所示。现状保持区包括张家口市、承德市和秦皇岛市,该区域 GI 分布面积广,核心面积占比较大,因此该区域内保持 GI 的分布现状是实现其生态功能和社会功能的根本任务。优化提升区包括北京市、唐山市和天津市,该区域内城市中心 GI 的分布面积严重不足,直接影响 GI 的整体性和连通性,因此注重城市内部森林公园建设、居住区绿化设施的规划和道路两侧行道树的种植是该区域优化的首要方案。连通性增强区主要包括研究区南部的保定市、石家庄市和邯郸市等七个地级市,在该区域内 GI 的分布较为广泛,但景观格局破碎化较其他两个区域严重,因此增强 GI 间的连通性是解决本区域问题的根本方法。

4 结论

本文基于 CA-Markov、MSPA 和景观格局分析方法等构建了集土地利用数据预测、GI 识别提取和时空双维度演变格局于一体的研究模型框架,以资源环境科学与数据中心网站提供的长时序、解译精度高且范围广泛的土地利用遥感监测数据为数据保障,并以京津冀城市群为案例区进行模型运用和 GI 时空演变规律探索。得到以下结论:

(1) 该模型框架可从历史、现状和未来长时序的角度实现 GI 的预测和时空双维度演化分析,整合串联了研究时间,增强了数据的连续性。模型技术的组合和重要过程参数的设置可以提高 GI 数据获取效率,可满足快速且大范围的 GI 检查、评估和治理的研究需求。同时逻辑思路的明确性、数据的可获得性、操作步骤的简单性等提高了模型框架的可复制性,在国土空间评估大框架内可实现快速推广和实践。

(2) 2000—2020 年,GI 面积占研究区总面积的占比 86.60%—90.82% 不等,呈现逐年下降趋势;核心约占 GI 总面积的 60% 左右,主要分布在北部、西部和西北部,其他类型占比较小,主要分布在南部、东部和东南部;2020—2030 年,GI 的总面积仍呈现小幅度下降趋势,核心面积占比增长幅度较大,连接桥和边缘的面积下降明显。

(3) 2015—2020 年和 2020—2025 年 GI 变化波动大,2020、2025 年 GI 各指数出现变化拐点,这主要受到《京津冀协同发展规划纲要》、生态文明建设、“十四五”规划和新版国土空间规划实施等国家政策的影响。

(4) 城市群协同发展进程推进与 GI 的变化拐点和格局演变存在明显的对应关系,主要体现在 2015—2020 年和 2020—2025 年,此时间段内 GI 变化率和景观格局指数变化波动较大;结合研究结果文章得出“政策导向,规划先行”和“常态评估,精准优化”的京津冀城市群 GI 优化启示。

GI 作为城市群中重要组成部分,不仅关系着城市群的环境质量和城市宜居性,也会进一步影响城市群“双碳”目标的实现,因此,城市群 GI 和碳之间的关系研究还有待探索^[1]。就我国城市群尺度的研究而言,不同城市群之间 GI 特征变化是否存在共性问题,GI 类型如何组合和布局可以更好的在城市群中发挥生态和社会作用,城市群中不同城市之间的 GI 如何贯通和联合等问题亟待研究。

参考文献 (References):

- [1] Benedict M, McMahon E. Green infrastructure: smart conservation for the 21st century. *Renewable Resources Journal*, 2002, 20(3): 12-17.
- [2] Mell I. Green infrastructure: concepts, perceptions and its use in spatial planning. Newcastle: Newcastle University, 2010; 30-65.
- [3] Wright H. Understanding green infrastructure: the development of a contested concept in England. *Local Environment*, 2011, 16(10): 1003-1019.
- [4] 夏函, 张万顺, 彭虹, 李琳, 黄攀攀, 夏晶晶. 基于主体功能区规划的中国城市化地区生态功能评估. *地理科学*, 2020, 40(6): 882-889.
- [5] 葛翔宇, 周智敏, 周艳丽. 城市化、外商投资和产业结构因素对中国环境的影响. *中国环境科学*, 2020, 40(3): 1374-1385.
- [6] 樊杰. 地域功能—结构的组织途径——对国土空间规划实施主体功能区战略的讨论. *地理研究*, 2019, 38(10): 2373-2387.
- [7] Chen W Y. The role of urban green infrastructure in offsetting carbon emissions in 35 major Chinese cities: a nationwide estimate. *Cities*, 2015, 44: 112-120.
- [8] Ma Y, Zheng X Q, Liu M L, Liu D Y, Ai G, Chen X Y. Spatio-temporal evolution characteristics analysis and optimization prediction of urban

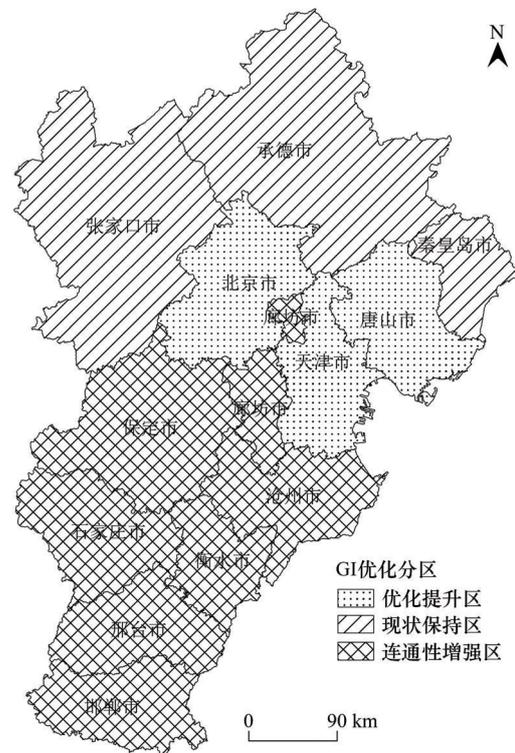


图 7 京津冀 GI 区域协同优化分区

Fig.7 Regional synergy optimization partition of GI in Beijing-Tianjin-Hebei

- green infrastructure; a case study of Beijing, China. *Scientific Reports*, 2022, 12: 10702.
- [9] 王云才, 申佳可, 彭震伟, 象伟宁. 适应城市增长的绿色基础设施生态系统服务优化. *中国园林*, 2018, 34(10): 45-49.
- [10] 李凯, 侯鹰, Hans Skov-Petersen, Peter S.Andersen. 景观规划导向的绿色基础设施研究进展——基于“格局—过程—服务—可持续性”研究范式. *自然资源学报*, 2021, 36(2): 435-448.
- [11] Vogt P, Riitters K H, Estreguil C, Kozak J, Wade T G, Wickham J D. Mapping spatial patterns with morphological image processing. *Landscape Ecology*, 2007, 22(2): 171-177.
- [12] Wang J X, Xu C, Pauleit S, Kindler A, Banzhaf E. Spatial patterns of urban green infrastructure for equity: a novel exploration. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 238: 117858.
- [13] Carroll C, McRae B H, Brookes A. Use of linkage mapping and centrality analysis across habitat gradients to conserve connectivity of gray wolf populations in western north America. *Conservation Biology*, 2012, 26(1): 78-87.
- [14] Wei J X, Qian J, Tao Y, Hu F, Ou W X. Evaluating spatial priority of urban green infrastructure for urban sustainability in areas of rapid urbanization; a case study of Pukou in China. *Sustainability*, 2018, 10(2): 327.
- [15] Furberg D, Ban Y F, Mörtberg U. Monitoring urban green infrastructure changes and impact on habitat connectivity using high-resolution satellite data. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 3072.
- [16] 魏家星, 宋轶, 王云才, 象伟宁. 基于空间优先级的快速城市化地区绿色基础设施网络构建——以南京市浦口区为例. *生态学报*, 2019, 39(4): 1178-1188.
- [17] 顾康康, 程帆, 杨倩倩. 基于 GISP 模型的城市绿色基础设施多功能性评估. *生态学报*, 2018, 38(19): 7113-7119.
- [18] Zoppi C. Ecosystem services, green infrastructure and spatial planning. *Sustainability*, 2020, 12(11): 4396.
- [19] Tiwari A, Kumar P. Integrated dispersion-deposition modelling for air pollutant reduction via green infrastructure at an urban scale. *Science of the Total Environment*, 2020, 723: 138078.
- [20] Jaworek-Jakubska J, Filipiak M, Michalski A, Napierała-Filipiak A. Spatio-temporal changes of urban forests and planning evolution in a highly dynamical urban area; the case study of wrocław, Poland. *Forests*, 2019, 11(1): 17.
- [21] 卢龙辉, 陈福军, 许月卿, 黄安, 黄玲. 京津冀“生态系统服务转型”及其空间格局. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 532-545.
- [22] 荔琢, 蒋卫国, 王文杰, 吕金霞, 邓越. 基于生态系统服务价值的京津冀城市群湿地主导服务功能研究. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1654-1665.
- [23] 王迪, 韩立建, 李世玉, 李伟峰, 钱雨果, 周伟奇, 谭晓芮, 李国栋. 城市群空气污染综合评估范式与应用——以京津冀城市群 PM_{2.5} 污染为例. *生态学报*, 2021, 41(11): 4278-4287.
- [24] 李空明, 李春林, 曹建军, 王昊, 刘森, 吕久俊, 郝真. 基于景观生态学的辽宁中部城市群绿色基础设施 20 年时空格局演变. *生态学报*, 2021, 41(21): 8408-8420.
- [25] Chang Q, Liu X W, Wu J S, He P. MSPA-based urban green infrastructure planning and management approach for urban sustainability: case study of Longgang in China. *Journal of Urban Planning and Development*, 2015, 141(3): A5014006.
- [26] 林鸿煜, 钱晶, 严力蛟, 黄绍荣. 基于形态学空间格局分析与 CA-Markov 模型的武义县绿色基础设施时空格局变化及情景模拟. *浙江农业学报*, 2019, 31(7): 1193-1204.
- [27] 刘东亚. 土地利用变化时空动力学方法构建与应用研究. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [28] Liu D Y, Zheng X Q, Wang H B. Land-use Simulation and Decision-Support system (LandSDS): Seamlessly integrating system dynamics, agent-based model, and cellular automata. *Ecological Modelling*, 2020, 417: 108924.
- [29] Sonnenberg F A, Beck J R. Markov models in medical decision making; a practical guide. *Medical Decision Making*, 1993, 13(4): 322-338.
- [30] Ahmadi M, Soffianian A, Alebrahim A. Modeling land use/cover changes by the combination of Markov chain and cellular automata Markov (CA-Markov) models. *International Journal of Environment and Health*, 2015, 1(1): 16.
- [31] Soille P, Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(4): 456-459.
- [32] Vogt P, Riitters K. GuidosToolbox: universal digital image object analysis. *European Journal of Remote Sensing*, 2017, 50(1): 352-361.
- [33] Ning J, Liu J Y, Kuang W H, Xu X L, Zhang S W, Yan C Z, Li R D, Wu S X, Hu Y F, Du G M, Chi W F, Pan T, Ning J. Spatiotemporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010—2015. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(5): 547-562.
- [34] 付扬军, 师学义, 和娟. 汾河流域景观破碎化时空演变特征. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1606-1619.
- [35] 常玉珺, 高阳, 谢臻, 张天柱, 于希泽. 京津冀地区生境质量与景观格局演变及关联性. *中国环境科学*, 2021, 41(2): 848-859.
- [36] 崔丹, 吴昊, 吴殿廷. 京津冀协同治理的回顾与前瞻. *地理科学进展*, 2019, 38(1): 1-14.
- [37] 刘正佳, 钟会民, 李裕瑞, 文琦, 刘雪琦, 简钰清. 近 20 年中国粮食生产变化特征及其对区域粮食供需格局的影响. *自然资源学报*, 2021, 36(6): 1413-1425.
- [38] Tayouga S, Gagné S. The socio-ecological factors that influence the adoption of green infrastructure. *Sustainability*, 2016, 8(12): 1277.
- [39] 杨艺, 李国平, 孙瑀, 付华. 国内外大城市体检与规划实施评估的比较研究. *地理科学*, 2022, 42(2): 198-207.
- [40] 黄云凤, 张项童, 崔胜辉, 黄葳, 许肃, 王岚. 绿色城市评价指标体系的构建与权重. *环境科学学报*, 2020, 40(12): 4603-4612.