

稿件编号: stxb202512163353

基于兴趣点数据的三生空间信息图谱构建及其在京津冀地区的应用¹

刘斌^{1,2}, 陈利顶^{1,2,*}, 杨磊^{1,2}

1.中国科学院生态环境研究中心, 区域与城市生态安全全国重点实验室, 北京 100085

2.中国科学院大学, 北京 100049

摘要:三生空间(生产空间、生活空间、生态空间)与人类生产活动、日常生活及民生福祉密切相关,其精准识别与图谱化表达,直接关系到国土空间优化、生态环境治理及区域可持续发展。当前学界虽已围绕三生空间开展大量研究,但现有成果多从土地利用类型出发赋予三生属性特征,该方法往往掩盖了空间在土地利用开发后社会感知层面的真实功能表达,且在精细尺度精准识别、语义信息挖掘等方面存在局限。整合以兴趣点(Point of Interest, POI)数据为主、土地利用数据为辅的多源地理数据,以网格单元作为具体制图显色与计算对象,通过构建三生空间信息图谱,实现对区域三生属性特征的客观真实表征。研究构建的信息图谱包含两大核心模块:一是三生空间信息强度图谱,通过量化三类功能空间的数量特征及空间关联关系,可为物流、人流、能流等相关研究提供本底网络节点数据支撑;二是三生空间信息分类图谱,通过对复合功能进行规则化编码,可准确呈现人类活动开发的阶段性结果,为国土空间优化中“关键地区”识别提供科学依据。在此基础上,以京津冀地区为典型研究区,联合2024年高德地图POI数据和基于Sentinel-2影像开发的10 m分辨率GeoAI全球土地利用数据(Dynamic World),开展三生空间信息图谱制图与实证分析。最终获取京津冀全域15088个5 km网格单元2024年的三生空间信息强度图谱,以及涵盖35种网格功能配置类型的分类图谱。综上所述,本研究通过搭建三生空间信息图谱分析框架,不仅可以为从定量与定性角度清晰辨识三生空间的分布特征及其空间关联关系、优化区域资源配置、推进国土空间优化与京津冀一体化发展等区域规划提供精准科学支撑,同时还进一步增强了POI数据应用于城市空间计算的落地可行性与推广潜力。

关键词:三生空间; POI数据; 信息图谱; 制图方法; 京津冀地区

Construction of Production-Living-Ecological space information atlas based on POI data and its application in the Beijing-Tianjin-Hebei region

LIU Bin^{1,2}, CHEN Liding^{1,2,*}, YANG Lei^{1,2}

1. State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Production-living-Ecological Space (PLES) is closely related to human production activities, daily life, and people's well-being, and its accurate identification and atlas-based expression are of great significance to territorial space optimization, ecological

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42230718)

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liding@rcees.ac.cn

environment governance, and regional sustainable development. Although extensive studies have been conducted on PLES in the academic circle, most existing results assign PLES attributes mainly based on land use type, which often obscures the real functional expression of space at the social perception level after land use development, and still has limitations in precise identification at fine scales and in-depth semantic information mining. This study integrates multi-source geographic data with Point of Interest (POI) data as the primary data source and land use data as the auxiliary data, taking grid units as the specific mapping, visualization and calculation objects, and realizes the objective and authentic characterization of regional PLES attributes and spatial patterns by constructing an information atlas of PLES. The constructed information atlas includes two core modules: one is the PLES information intensity atlas, which can provide underlying network node data support for research on logistics, population flow, energy flow and other related fields by quantifying the quantitative characteristics and spatial correlation of the three types of functional spaces; the other is the PLES information type atlas, which can accurately present the phased results of human activity development by conducting standardized coding of composite functions, thus providing a scientific basis for the identification of “key areas” in territorial space optimization. On this basis, this study takes the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region as a typical study area, then combines 2024 POI data from Amap and 10m resolution GeoAI global land use data (Dynamic World) developed based on Sentinel-2 images to carry out systematic mapping and empirical analysis of the PLES information atlas. Finally, the 2024 PLES information intensity atlas for 15,088 grid units with 5 km resolution across the entire BTH region and a classification atlas covering 35 atlas types of grid function configurations are obtained successfully. In summary, by establishing an analytical framework for PLES information atlas, this study not only provides accurate scientific support for regional planning. It helps to clearly identify the distribution characteristics and spatial relationships of PLES from both quantitative and qualitative perspectives, optimize regional resource allocation, and promote territorial space optimization and the integrated development of the BTH region. It also further improves the practical feasibility and promotion potential of applying POI data to urban spatial computing.

Key Words: Production-Living-Ecological Space; POI data; information atlas; cartographic methods; Beijing-Tianjin-Hebei region

国土空间是人类生存与发展的核心载体,“三生空间”(Production-Living-Ecological Space, PLES)的合理划分与精准识别,直接关系到国土空间优化^[1]、生态修复、国民经济发展与民生福祉^[2-3]。三生空间概念起源于国土空间功能分类研究,2012年11月,党的十八大报告首次明确提出三生空间(Production-Living-Ecological Space, PLES)理念,要求“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”^[1,4-5]。其核心是依据各类空间的主导功能,将国土空间划分为生产空间、生活空间与生态空间三大类型,旨在探讨不同功能空间的合理配置与整体优化^[6]。随着国土空间规划体系不断完善,三生空间已受到广泛关注,学界在分类体系构建、空间辨识、定量表达等方面均开展了大量研究^[7-11]。

清晰界定地域功能的基本范畴、明确功能区划的目标导向,是实现地域功能科学识别与精准表达的基本前提^[12]。当前快速城市化使人—城市—环境之间的交互更加频繁与复杂,人口增长与社会需求升级推动区域景观从单一自然属性向复合功能形态演进^[8],区域功能在社会感知层面的表达日趋复合化与多样化。但目前传统三生空间识别多依赖遥感影像解译、土地利用现状调查等数据^[13-14],虽可实现宏观尺度的类型划分与制图,却在精细尺度精准识别、动态更新及语义信息挖掘等方面存在明显局限。例如,研

究若直接依托土地利用/覆盖数据中的土地利用类型开展三生空间识别与分类^[15-17], 仅考虑土地本底自然状态, 以“建设用地=生活空间”、“耕地=生产空间”的简单对应关系划分^[6, 15-16, 18-19], 忽视如城市综合体的“产居复合”、景观公园的“生态—生活游憩”等现实发展特征, 导致识别结果与实际功能存在较大偏差, 无法反映土地开发后的真实功能状态。

此外, 土地利用类型对景观功能异质性的忽视, 容易掩盖土地开发利用后在社会感知层面的真实功能表达。现有三生空间研究缺乏融合社会经济需求与自然本底属性的统一分类界定标准, 未充分考虑建成景观的功能异质性^[18]。例如, 同样属于建成区, 居住区与工业用地分别承担生活与生产功能, 即便同类型用地也会因行业、规模不同而表现出差异化的社会功能。且普遍存在指标选取主观性较强、过度聚焦土地固有属性、忽视社会经济与人口需求对功能的调控作用等问题。具体地, 现有分类体系多依赖土地自然属性与开发规划类型^[20], 或参考空间规划、城市建设相关国家标准^[6, 13, 21-23], 如《土地利用现状分类标准》(GB/T21010-2007)、《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB50137-2011)、《第二次全国土地调查技术规程》(TD/T1014-2007)等^[6]。

兴趣点数据(Point of Interest, POI)作为一种新兴的基于位置服务(Location Based Service, LBS)的地理大数据, 不仅包含地理坐标、名称、类别、地址等多维空间信息, 且在开源获取、实时更新等方面具有显著优势, 已成为当前最为广泛使用的地理数据集之一^[24]。POI数据最直观的价值在于可实现“位置—功能”的直接关联: 工业企业POI可直接对应生产空间, 居民住宅小区POI对应生活空间, 公园绿地POI则关联生态空间。此外, POI数据优势还体现在以下方面: 一是时空精准性, POI数据包含经纬度坐标, 可实现米级空间定位, 并能实时反映空间功能动态变化; 二是语义丰富性, POI数据的“类别”属性(如“工业企业”、“超市”、“湿地公园”)直接关联空间功能, “名称”、“地址”等属性可辅助提升功能识别精度; 三是经济性与时效性, 主流地图服务平台通过用户上传、实地采集等方式实时更新POI数据, 获取成本远低于传统实地调查; 四是微观覆盖性, POI数据可覆盖城乡各类微观空间实体, 弥补了遥感影像在微观尺度功能识别中的不足。

早期三生空间分类多侧重于单一功能的界定, 而近年来的发展趋势, 越来越注重挖掘区域功能在整合社会感知与自然属性等多维特征下的“功能复合性”与“动态性”。例如乡村地区“农文旅融合空间”, 既包含生产功能(农业生产), 又兼具生活功能(乡村居住)与生态功能(田园景观)。因此, 开展三生空间规划研究, 必须实现复合功能的定量识别。这种分类体系的演化, 对数据源的语义信息丰富度与动态捕捉能力提出了更高要求, 也为POI数据的应用提供了适配场景。

近年来, 越来越多学者开始利用POI数据开展三生空间相关研究^[22, 25-27], 当前三生空间识别与制图研究多通过多源数据拟合构建识别体系^[17, 28-29], 具体包括多维度数据拟合^[28]; 土地利用与POI数据结合^[20]; 土地利用与社会经济数据融合、POI与夜间灯光遥感数据整合^[30]; 以及借助机器学习融合多源数据或直接依托POI数据进行识别^[25, 31]等方式。例如, Bu等结合城市尺度土地利用数据、斑块形状与纹理特征及社会经济特征(POI数据与夜间灯光数据), 利用机器学习进行组合训练, 实现区域全域三生空间识别^[26]; Tu等在城市中心区直接基于地理时空大数据(POI数据)对地物属性分类定性, 结合DBSCAN进行空间集聚, 完成三生空间识别^[32]; 王倩从遥感影像、DEM、POI、OpenStreetMap(OSM)、夜间灯光、NDVI、地质灾害分布及社会经济等多源数据中筛选功能性指标开展统计分析, 实现三生空间功能区分类

与制图^[33]。总体来看, 现有 POI 数据驱动的三生空间监测仍存在明显不足: 多源数据拟合易造成功能属性直观失真, 单纯依赖 POI 数据会因其与城市化范围挂钩而导致全域监测覆盖不足。因此, 高精度、多信息提取且尺度灵活的三生空间监测技术仍需进一步完善与发展。

针对上述问题, 本研究以 POI 数据为主、土地利用数据为辅, 按照“数据融合—属性匹配—强度量化—类型判别”的技术流程, 开展网格尺度三生空间信息图谱制图与分析, 拟重点解决以下关键科学问题: 在充分考虑社会感知与空间功能异质性的前提下, 如何通过全域网格尺度的定量与定性分析, 构建系统完善的三生空间识别及类型编码体系, 精准识别三生空间并解析其内部功能配置特征? 具体而言, 借鉴城市形态学、景观格局与景观图谱制图逻辑^[34–36]及区域功能空间单元划分的相关研究^[37], 构建“网格边界—网格功能属性—全域功能信息图谱”分析框架。首先, 以 POI 数据为核心、土地利用数据为补充, 引入《国民经济行业分类 (GB/T 4754—2017) 》, 依据地理实体实际开发功能与社会感知特征对 POI 数据进行三生空间属性划分, 实现社会经济功能与自然生态属性有机融合; 随后, 采用调整后的“土壤质地三角坐标法”完成网格单元功能编码; 最终, 通过计算和显色, 绘制得到三生空间信息强度图谱与分类图谱。在此技术基础上, 研究还以京津冀地区为研究区, 开展三生空间信息图谱实证制图应用与结果分析。综上所述, 该框架可精准提取三生空间结构信息, 遵循立足主体功能、兼顾非主体功能的思路^[38], 将功能叠加与多功能复合现象纳入三生空间格局演变分析框架, 为以三生空间为抓手的国土空间优化研究提供更科学的视角与可行路径, 也为城市信息网络动态监测提供关键技术与方法参考, 同时助力京津冀区域一体化高质量发展。

1 研究区域概况

京津冀 (Beijing-Tianjin-Hebei, BTH) 地区位于 36°05′—42°37′N、113°11′—119°45′E 之间, 包括 13 个城市^[39], 土地面积 21.6 万 km², 图 1 为京津冀城市群地区地级市尺度的区位分布和 2024 年的土地利用类型图。该区以首都北京市、直辖市天津市为核心, 辐射河北省 11 个地级市, 地形呈现出西北高、东南低的特征^[40]。京津冀地区 2023 年末常住人口为 10942.8 万人; 2023 年地区生产总值 (GDP) 达 10.4442 万亿元, 占全国总量的 8.29%, 是中国经济发展的重要增长极^[41]。但该区域快速城市化不仅导致北京出现人口膨胀、交通拥堵、资源紧张等“城市病”, 还进一步加剧了区域内部的发展不平衡, 尤以河北与京津两地的差距最为显著^[42]。为破解上述问题, 中国政府于 2015 年实施京津冀协同发展战略^[43], 其核心任务之一是疏解北京非首都功能; 此外, 还包括北京城市副中心与雄安新区的建设、河北省对京津科技创新成果的落地承接、承德等生态涵养区的设立等相关规划政策。这些规划政策均直接驱动了三生空间的格局变化, 因此探讨该区域三生空间信息强度与类型组合的空间分布特征, 对京津冀区域一体化高质量发展具有重要意义。

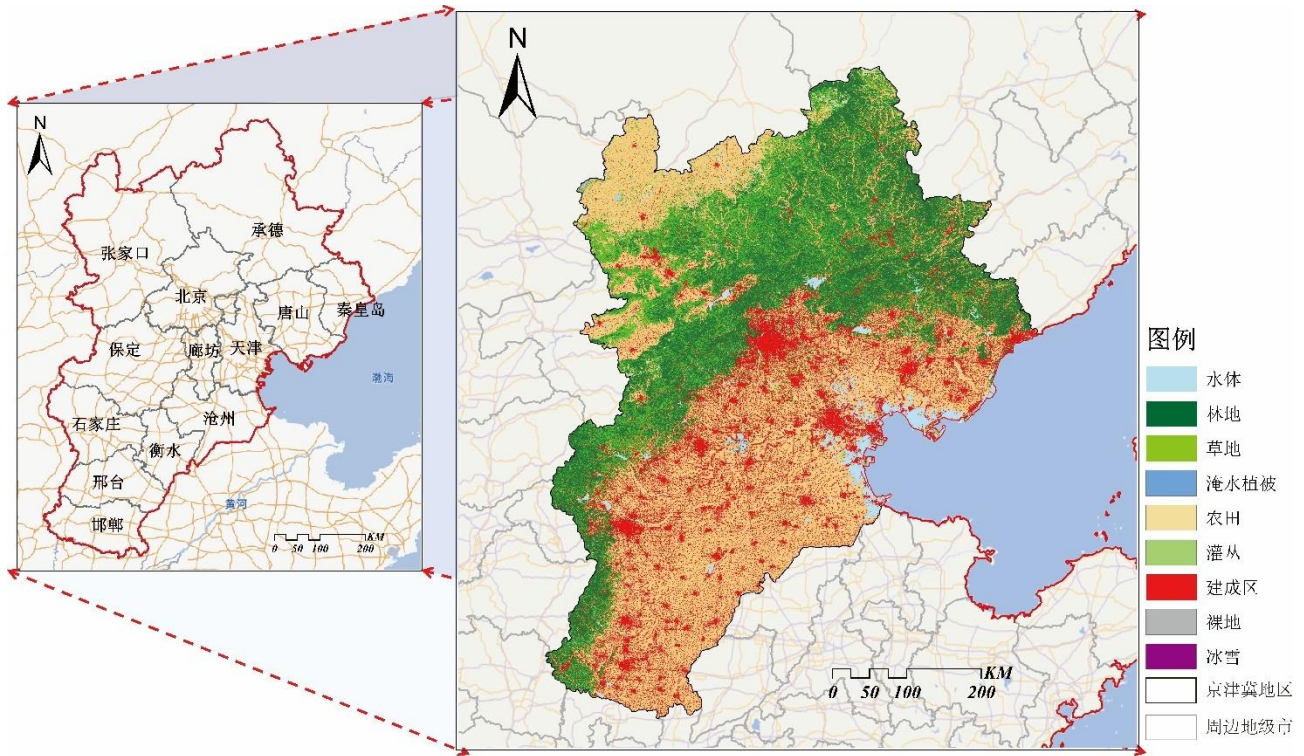


图 1 京津冀地区行政区划与土地利用类型分布图

Fig. 1 The administration and land use in the BTH region

2 基于 POI 数据的三生空间信息图谱制图技术构建

2.1 数据来源与预处理

POI 数据作为 LBS 数据集与社会感知数据，已在城市规划与地理监测开发等领域得到广泛应用。POI 数据会对地理实体（尤其建成环境中的各类空间场所）进行完善且精准的功能属性记录，将商业购物中心、山脉、公司等不同大小和形状的地理实体抽象为点要素，实现其社会经济特征的空间化，每个点包含其实际的自然或社会功能属性（如公司、山脉、小区等）和地理坐标（纬度、经度）。这些功能属性按信息丰富度可分为大类、中类和小类三个层级，不同层级对应着记录详细程度不同的行业功能的记录。例如，表 1 展示了 2016 年京津冀地区某 4 个 POI 数据点（A 到 D）的经纬度信息及具体功能属性（含明确的大类、中类、小类示例）。此外，原始的 POI 数据还包含商业信息、道路地址等内容。本研究所使用的 POI 数据来源于中国三大地图服务提供商之一的“高德地图”（Amap）^[44—45]。

表 1 POI 数据属性字段示例

Table 1 Example of POI data attribute fields

POI 点 POI points	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	POI 点的字段属性 Field attributes of POI points		
			大类 Major category	中类 Medium category	小类 Subcategory
			A	115.**	39.**
B	116.**	39.**	购物服务	家电电子卖场	手机销售
C	114.**	36.**	商居用地	居住区	居住小区
D	115.**	39.**	地名	自然地名	山脉

“**”表示对详细经纬度信息的隐藏

在此，本研究引入《国民经济行业分类（GB/T 4754—2017）》搭建 POI 数据三生空间归属的分类体系，并对 2024 年高德地图 POI 数据进行系统筛选与类型归并。具体的，研究依据属性字段，参考京津冀地区 2024 年较为完整的 23 个大类的 POI 数据按照社会经济功能重新整合为生产、生活、生态三大类型，具体分类规则与归属结果见表 2。与传统依据土地利用规划或经验法则的划分方式不同，本研究从社会感知与人—城市互动视角，按照地理实体的实际行业属性与功能价值界定类型，核心划分原则为：生产空间聚焦各类提供社会服务、支撑城市运转的生产性行业相关地理实体，涵盖面向居民与社会提供各类服务的设施。例如，医院、生活服务设施（人才市场、邮局等）、加油站、商场等，本质上均属于面向社会提供服务的生产性行业范畴，故归为生产空间；生活空间则严格限定为以住宅区为核心，包含承担居民居住功能及相关配套公共设施的空间类型。生态空间则是直接由发挥生态功能的自然景观实体为依据来划分，例如山川河流等蓝绿为主的景观。总的来看，该分类体系依托国民经济核算体系制定，能够充分考虑城市化背景下建成景观的功能异质性，实现自然地理属性与社会经济功能的有机结合。此外，本研究使用的 POI 数据地理坐标系为 WGS—1984，空间投影坐标系采用 WGS—1984—World Mercator。同时，所有数据处理、空间分析与信息图谱制图均借助 ArcGIS 10.8 与 RStudio 4.3.2 完成。

表 2 POI 数据的三生空间分类标准

Table 2 Classification criteria of POI data in PLES

空间类型 Space type	相对应的 POI 点的字段属性 Field attributes of the corresponding POI points
生产空间 Production space	农林牧渔基地、工业园区、工厂、电力营业厅、供水营业厅、企业单位、购物服务、医疗卫生服务、生活服务、交通设施及道路服务、餐饮住宿服务、金融保险服务、机动车服务、科教文化服务、政府机构及社会组织等
生活空间 Living space	居住区、公共设施、风景名胜及古迹、地名地址等
生态空间 Ecological space	自然地名（含山脉、河流等）

其次，对于土地利用数据而言，面对更新频率慢，大尺度识别精度低等遥感处理困难，本文选用“Google Earth Engine”（谷歌地球引擎）提供的 GeoAI 产品（<https://www.dynamicworld.app/>）^[46]，Dynamic World。该数据集提供了基于哨兵 2 号（Sentinel-2）L1C 系列影像生成的近实时更新的 10m 分辨率的全球尺度土地利用数据。一共包含 9 种土地利用类型，分别为水体、林地、草地、淹水植被、农田、灌木灌丛、建成区、裸地、冰雪。

2.2 数据的三生空间信息属性整合与空间关联分析

为将 POI 属性特征精准落实到地理空间单元，需先结合研究目标在研究区内划定适宜的网格单元。网格尺度的选取是本研究数据运算、空间表达及精细化功能配置解读的核心基础——网格大小直接决定空间表达精度与功能识别粒度：尺度过小易造成数据冗余、放大局部噪声；尺度过大则会弱化单元内部功能差异，降低识别有效性。与传统仅用于可视化的像元、栅格单元不同，本研究将网格定义为兼具空间边界与管理意义的功能分析单元，而非单纯的可视化与运算载体；其边界既是空间采样边界，也是功能管控与发展调控的基本尺度边界。在区域行政管控与空间规划框架下，以标准化网格为基础单元开展三生空间功能配置解析，能够清晰刻画功能空间分异与发展异质性，精准识别各单元内生产、生活、生态功能的组合特征与强弱差异，为后续三生空间格局优化、功能结构调控及精细化空间管理提供科学可落地的单元基础与城市网络分析量化依据。因此，网格尺度的判断依据需同时满足研究区图谱信息的可视

性、研究问题提取的空间精度以及空间运算效率三方面要求。

随后，基于生产、生活、生态三类 POI 数据的经纬度信息，将所有 POI 点精准匹配至空间网格单元，完成点位归属与功能属性关联。通过这一“由点及面”的转换，为每个包含 POI 的网格赋予相应的三生空间功能信息。POI 数据源自地图导航类应用软件，其生成、更新与城市化进程和人类活动高度相关，因此研究区内部分网格单元未匹配到任何 POI 数据（标记为“NA”）。这类区域通常人类活动稀少、开发强度低、以自然景观为主，缺乏建成环境。为实现全域三生空间完整识别，本研究借助土地利用数据对该部分网格进行功能属性补充。具体而言，利用网格裁剪区域全覆盖的土地利用栅格数据，获取每个“NA”网格内的土地利用类型构成，再依据用地类型直接进行归类判定：建设用地归为生活空间，耕地归为生产空间，水体、林地等自然景观归为生态空间，并基于各类用地面积对它们开展后续计算。综上所述，研究区内所有网格均被赋予三生空间功能属性，为后续信息图谱构建与制图分析奠定基础。

2.3 三生空间信息图谱分析

以网格为基本单元构建三生空间信息图谱，关键在于如何将上述赋予每个网格的三生空间功能属性数据，在空间制图单元中进行分析并实现制图的显性表达。为落实这一关键步骤，本研究分别从定量的信息强度和定性的信息分类两个维度，构建三生空间信息图谱。首先，针对三生空间信息强度图谱的分析，需先计算各网格单元的三生功能强度，具体步骤如下：（1）对于已关联 POI 数据的网格单元，采用点的相对密度计算其生产、生活和生态功能强度，即该网格单元内某类功能的 POI 数量占所有空间单元内该类功能 POI 总数的比例。（2）类似地，对于基于土地利用类型确定功能属性的“NA”网格单元，则采用该网格单元内某类功能对应的土地利用类型面积占所有“NA”网格单元中该类功能对应的土地利用类型总面积的相对百分比，表征其三生功能强度，具体计算方法如式（1）所示。

$$PLES_Density_{ij} = \frac{n_{ij}}{N_i}, (i = P, L, E; j = Cell_1, \dots, Cell_m) \quad (1)$$

式中，PLES_Density_{ij}表示网格的“点（或者面积）的相对密度”，*i*表示 POI 数据或土地利用的属性类型，分为生产（*P*）、生活（*L*）或生态（*E*）三类空间属性；*j*表示分析的网格单元编号，Cell₁表示第一个网格，*m*表示网格的数量；*n*表示给定单元网格内生产（*P*）或者生活（*L*）或者生态（*E*）属性的 POI 点的数量或者土地利用类型面积；*N*是所有网格单元内生产（*P*）或者生活（*L*）或者生态（*E*）属性 POI 点数量或者土地利用类型面积的总和。

在完成所有网格三生空间强度计算后，大多数网格会呈现出多种功能类型并存的特征。为此，本文通过构建三生空间信息分类图谱，进一步辨别每个网格单元三生功能的配置组合类型。具体借鉴“土壤质地三角坐标法”，该方法以砂粒、粉粒和黏粒三种组分的含量占比（总和为 100%）为依据，通过在等边三角形坐标图中定位判断土壤质地类型^[47-48]；在本研究中，将三角形三条边分别定义为生产、生活与生态三大功能，每条边代表相应功能在单个网格中的强度百分比（0—100%）。根据网格单元内各类功能由式（1）计算得出的强度值，分别计算生产、生活、生态功能在该网格内的占比，即角色占比。例如，生

产功能强度占该网格内所有功能强度之和的比例，即为生产功能的角色占比；生活与生态功能的角色占比计算逻辑同理，如式（2）所示。

$$PLES_Roles_{ij} = \frac{a_{ij}}{A_j}, (i = P, L, E; j = Cell_1, \dots, Cell_m) \quad (2)$$

式中，PLES_Roles_{ij}表示计算的网格的生产（P）、生活（L）、生态（E）的角色占比；i表示某一个具体的功能属性类型，分别为生产（P）、生活（L）或生态（E）三类；j表示分析的网格单元编号，Cell₁表示第一个网格，m表示网格的数量；a表示给定单元格内i属性的强度值大小；A是指这个给定网格中所有功能属性类型的强度值总和。

得到各功能角色占比后，可将三角形每条边划分为三个等分区间，分别对应（0—1/3）、（1/3—2/3）和（2/3—1）三个占比范围，据此建立三生空间信息图谱编码规则（图2）。编码采用三类功能英文首字母组合，具体规则如下：若某一功能占比位于（2/3—1）区间，用大写字母表示；若处于（1/3—2/3）区间，用小写字母表示；若处于（0—1/3）区间，则在小写字母前添加“_”作为标识。此外，当两类及以上功能占比处于同一区间时，按占比数值从大到小依次排列。整个编码流程如图2所示。以具体网格单元为例：若某网格生产、生活、生态功能占比分别为67%、15%和18%，其三生空间信息图谱编码为“P_el”；若某网格生产、生活、生态功能占比分别为50%、30%和20%，则编码为“p_el”。最终，每个网格均可在等边三角形图中确定位置，并依据上述规则获得对应的信息图谱类型编码，基于此得到经三生空间信息强度分布图再分类与功能配置整合处理后，研究区的三生空间信息分类图谱空间分布图。

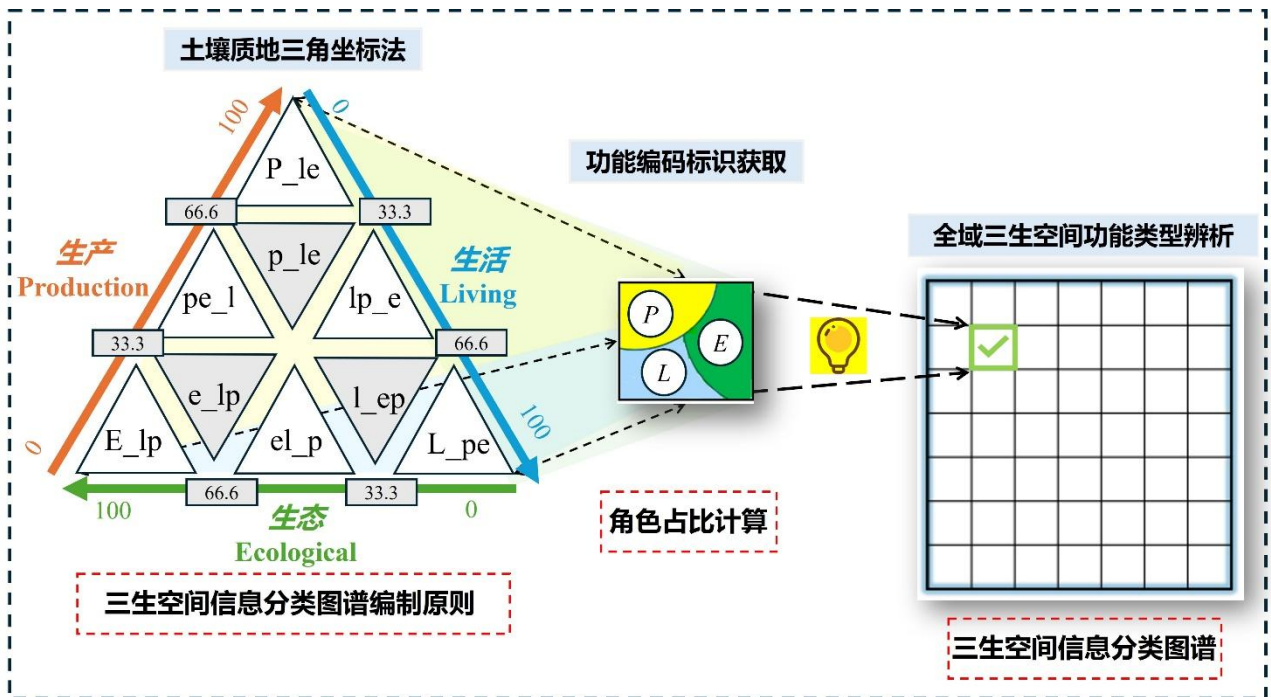


图2 三生空间信息分类图谱编码逻辑

Fig. 2 Classification and coding logic of PLES information type atlas

3 京津冀地区三生空间信息图谱绘制应用

针对京津冀城市群发展过程中存在的区域不平衡问题，以及协同一体化发展背景下产业布局优化、功能部门空间转移等国土空间规划需求，本文选取京津冀地区作为方法应用区域，针对三生空间信息图谱的实践，具体参数设置如下：基于网格尺度制图思路，综合考虑京津冀区域面积（21.6 万 km²）、本研究全域三生空间信息绘制的目标以及多源数据特征，在 1km、2km、5km、10km 多尺度试算基础上，确定以 5km×5km 作为网格分析单元。面对图谱信息分类的多样化，该尺度能够有效平衡空间粒度与区域格局表征能力，既保留城市建成区、生态涵养区等功能差异细节，又可清晰呈现三生空间的全域分异规律，同时兼顾空间运算效率与图谱制图可视性。据此将研究区划分为 15088 个 5km 网格单元，其中完整 5km 网格单元 13988 个，边缘被切割的不规则网格单元 1100 个，并以此为基础开展京津冀地区 2024 年全域三生空间图谱制图与定量、定性分析，通过解析三生空间强度分布及功能单元类型图谱特征，揭示区域一体化发展带来的空间规划现状。在 POI 空间连接处理中，无 POI 点匹配的“NA”类网格单元共 382 个，在总单元中占比始终较低，其数量变化也在一定程度上反映出 POI 数据持续完善与城市化进程不断加快的特征。依据 2.2 节的处理和分类原则，本文利用 Dynamic World 中 10m 分辨率的 9 类土地利用数据对“NA”类网格进行三生空间识别，具体为：生活空间对应建成区，生产空间对应农田，生态空间对应水体、林地、草地、淹水植被、灌木灌丛、裸地与冰雪类型。

3.1 京津冀地区三生空间信息强度图谱制图结果

以京津冀地区 2024 年为研究时点，依据上述公式（1）即可获取京津冀地区三生空间信息强度图谱，该图谱重点反映生产、生活和生态三类空间信息分布的强度（图 3）。该图谱具有以下特点：一是可清晰呈现三种空间类型的数量分布特征；二是可以直观反映三生空间的集中分布区及其空间关联关系；三是通过信息图谱化表达，可为物流、能流和人流的相关分析提供基础数据支撑。

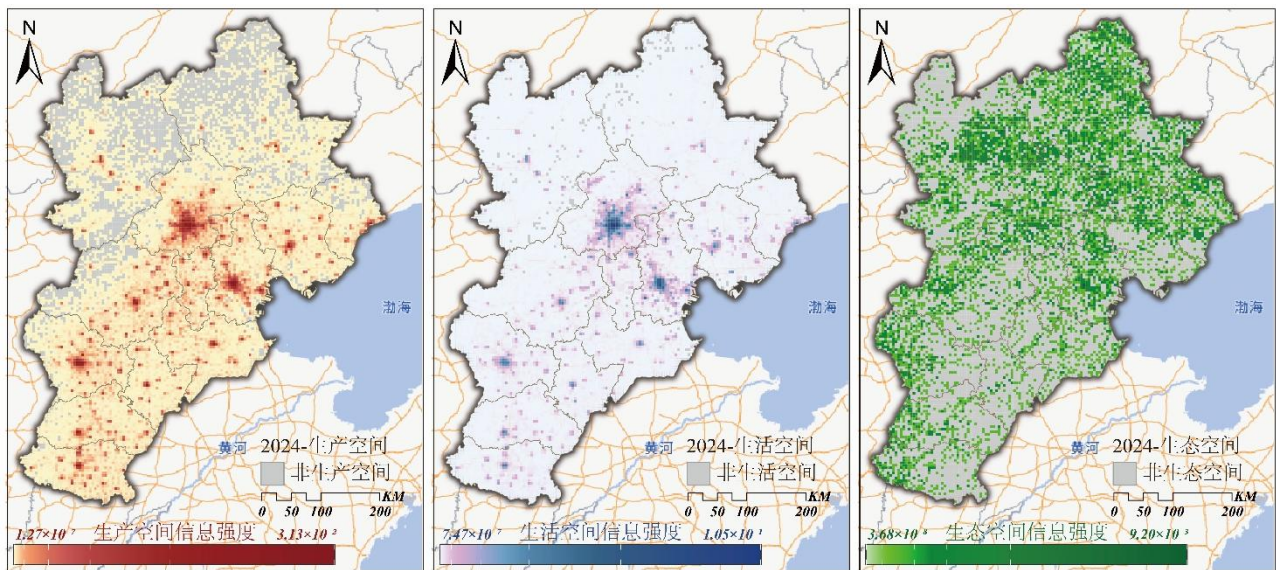


图 3 2024 年京津冀地区三生空间信息强度图谱空间分布

Fig.3 Spatial distribution of information intensity atlas of PLES in the BTH Region in 2024

从图 3 可以看出，京津冀地区 2024 年整体以生活空间为主导，且生活与生产空间呈现高关联的空间

集聚特征，即空间区位重叠度较高；在北京、天津，以及河北省南部和东南部的廊坊、保定、石家庄、邢台等城市建成区形成显著的蛛网状关联格局；生态空间分布则集中分布在河北省承德市、张家口市等北部地区，同时在京津冀地区其他区域内破碎化分布。

3.2 京津冀地区三生空间信息分类图谱制图结果

3.2.1 京津冀地区三生空间信息分类图谱空间分布特征

基于 2024 年京津冀地区三生空间信息强度分布图，依据公式（2）及改进版土壤质地三角坐标法，绘制京津冀地区三生空间分类信息图谱，共获得 35 种三生空间网格功能单元类型（如图 4 中的图例所示）。通过功能单元三生功能组合变化，实现了人类需求主导下、政策驱动的区域发展态势表达，其核心特点如下：一是可直观且规整地表征区域国土空间开发利用、相关政策实施等人类活动的空间结果；二是能为区域国土空间格局优化提供精准的“问题区域”定位依据；三是可通过生态空间的角色增减与规模变化，直接反映人与自然关系的演变规律。

为在地图上清晰、准确地表达三生空间功能信息特征，本文将 35 种类型按“单一功能主导”（编码含大写字母）和“多种功能并行”（编码均为小写字母）划分为 9 个组别，具体包括：3 个单一功能主导组别（生产主导、生活主导、生态主导）；3 个两类功能并行组别（生产—生活、生产—生态、生活—生态）；3 个三功能并行组别（含生产功能为首的生产—生活—生态、生活功能为首的生活—生产—生态、生态功能为首的生态—生活—生产三类子类型）。最终在制图表达时，考虑到 2024 年京津冀地区 3 个两类功能并行类型的空间数量差异显著，若分别独立设色易导致部分组别可视化效果较差、图谱可读性不足。同时，表 3 已详细记录各类型数量与占比信息，可与空间图谱形成有效对照。因此，本研究对 3 个两类功能并行类型采用同一色族显色方案，在保证制图清晰性的前提下，将 35 种类型降维为 7 个组别进行可视化表达，既提升了空间图谱的整体可视效果，又能结合数量统计实现精准区分。最终生成的三生空间信息分类图谱如图 4 所示。

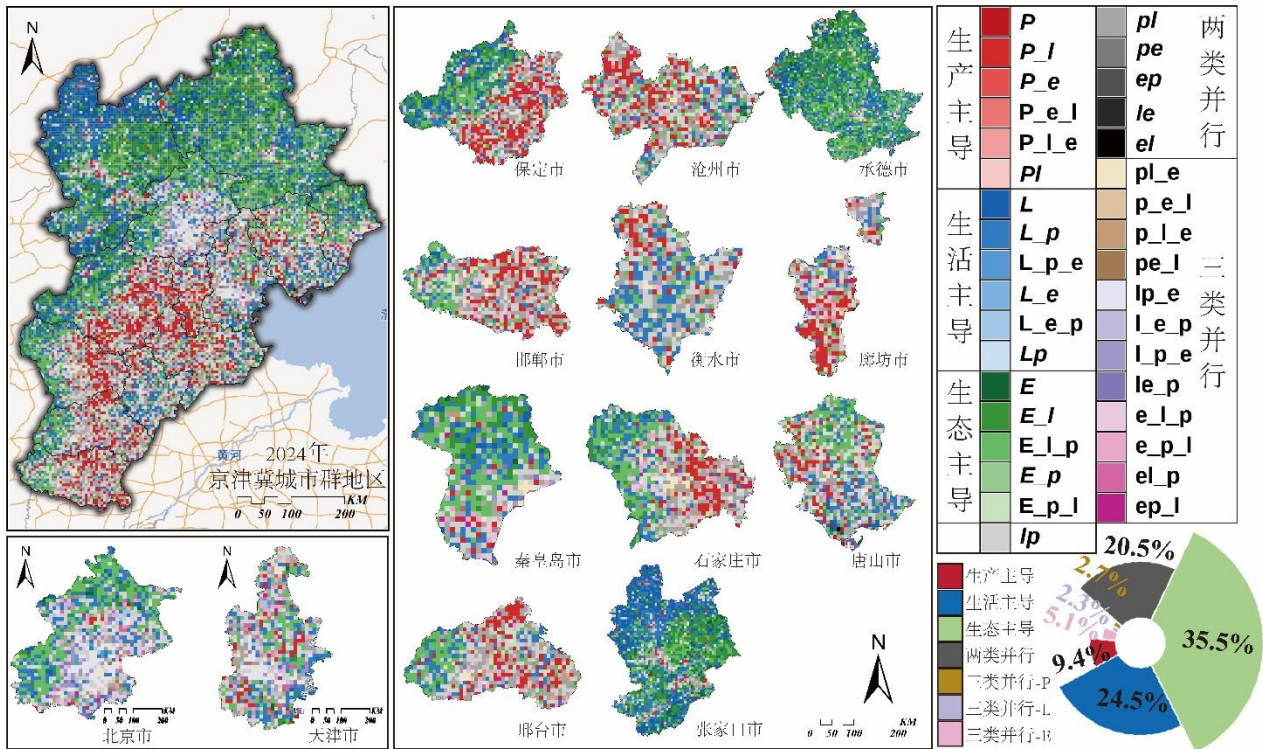


图 4 2024 年京津冀地区三生空间信息分类图谱空间分布

Fig.4 Spatial distribution of information type atlas of PLES in the BTH Region in 2024

从图 4 整体可知，京津冀地区三生空间信息类别的空间分布具有以下特征：（1）生活主导型空间主要集中分布于北京北部及京津冀西部的河北省张家口市、承德市和保定市；（2）生产主导型的分布格局高度集中，体现出区域生产功能的高度集聚与优化布局特征，具体分布于河北省中部往南的保定市、沧州市、邢台市、邯郸市、廊坊市和石家庄市；（3）生态主导型主要分布在研究区域的北部和西北部的承德市和张家口市，此外，结合图 3 中 13 个地市中包含生态功能角色的类型分布，可看出在 2024 年中相较于生态主导功能而言，生态空间的“附属功能角色”分布和数量占比较广——这既反映了城市化进程中人类活动的持续增强，也体现了建成环境中对绿色景观规划的重视，充分反映出随着人类经济社会发展和生活水平提升，生态服务也得到了高度重视；（4）北京市和天津市得益于城市化、人口红利等的加持，其三生空间信息类型的组成以三类并行的复合类型为主，分布较为杂乱，且该特征在市中心核心区域更为明显，这与两市实际发展状况高度一致。总的来看，基于上述结果可突出信息分类图谱在直观定位关键区位中的使用，同时基于实践结果也进一步凸显了本文提出的三生空间信息图谱框架的精度和准确性。

3.2.2 京津冀地区三生空间信息分类图谱的数量特征

表 3 给出了京津冀地区三生空间信息分类图谱的完整数量统计，从中可以看出，该区域内生态功能为首、生活功能为首和生产功能为首的空间单元占比分别为 40.65%、36.72%和 22.63%，这一比例特征在一定程度上反映了京津冀地区三生空间的现状格局。数据显示，独立以生活（L）、生态（E）和生产（P）类型存在的空间单元占比分别仅为 9.09%、1.76%和 0.29%；其中独立生活空间占比相对较高，这与区域内广泛分布的农村聚居区密切相关。同时，上述数据也表明，随着经济社会的快速发展，具有复合功能

的空间单元占比正逐步提升。具体来看，生态功能为首三生复合空间（E_{1p}）、生活功能为首的生活—生产复合空间（L_p）、生态功能为首的生态-生活复合空间（E_l），以及生产功能为首的生产—生活复合空间（pl）这四类复合空间占比较大，分别达到 18.53%、14.59%、10.72%和 10.49%；此外，占比较高的类型还有“lp”和“P_l”，占比分别为 9.92%和 8.25%。

表 3 京津冀地区 2024 年三生空间信息分类图谱数量统计

Table 3 Quantity statistics of PLES information type atlas in the BTH Region in 2024

生态功能为首的图谱类型 Ecological function-dominated atlas type			生活功能为首的图谱类型 Living function-dominated atlas type			生产功能为首的图谱类型 Production function-dominated atlas type		
编码	数量	占比/%	编码	数量	占比/%	编码	数量	占比/%
E	265	1.76	L	1371	9.09	P	44	0.29
E _{1p}	2796	18.53	L _p	2201	14.59	pl	1582	10.49
E _l	1617	10.72	lp	1497	9.92	P _l	1245	8.25
E _p ₁	602	3.99	lp _e	155	1.03	pl _e	164	1.09
e _p ₁	323	2.14	l _p _e	76	0.50	p ₁ _e	101	0.67
e ₁ _p	219	1.45	l _e _p	72	0.48	pe ₁	80	0.53
E _p	83	0.55	L _p	54	0.36	p _e ₁	65	0.43
ep ₁	143	0.95	le _p	47	0.31	P _e	42	0.28
el _p	80	0.53	L _p _e	32	0.21	P ₁ _e	43	0.28
ep	5	0.03	L _e _p	32	0.21	Pl	25	0.17
el	1	0.01	le	1	0.01	P _e ₁	19	0.13
			L _e	2	0.01	pe	4	0.03
合计 Total	6134	40.65		5540	36.72		3414	22.63

表 4 可进一步反映国土空间三生功能复合单元的数量特征：生产—生活—生态三类功能组合的空间单元占比 33.46%，生产—生活两类功能组合的空间单元占比 43.77%，生活—生态两类功能组合的空间单元占比 10.74%，而生产—生态两类功能组合的空间单元仅占 0.89%。这一结果充分表明，生产与生活空间具有高度融合性，尤其在城市地区，二者往往交织共生、密不可分；生活—生态组合单元占比较高，说明在城市化与人类经济社会发展进程中，既要满足人类基本生活需求，更需持续提升生活质量，宜居健康环境的营建离不开生态空间的支撑。生产—生态组合单元占比极低，核心原因在于生态空间以保护、提供休闲服务功能为主，而生产空间通常伴随高强度人为干扰，二者存在一定的功能矛盾；而生产—生活—生态三类功能组合单元占比较高，一方面是由于人们生活追求的提升，既需要舒适的生活环境，也注重健康的工作环境；另一方面，本研究采用 5km 尺度的空间分析单元，较大的覆盖面积使得部分单元内同时包含三类空间的 POI 信息。

表 4 京津冀地区 2024 年三生空间信息分类图谱复合类型数量统计

Table 4 Quantity statistics of information atlas composite type of PLES in the BTH region in 2024

图谱组合类型 Information atlas composite types	总单元数 Total number of cells	生产—生活—生态组合 Composite groups in production—living—ecological	生产—生活组合 Composite groups in production—living	生产—生态组合 Composite groups in production—ecological	生活—生态组合 Composite groups in living—ecological
网格单元数 Number of grid cells	15088	5049	6604	134	1621
百分比/% Percentage	100	33.46	43.77	0.89	10.74

4 讨论

4.1 三生空间信息图谱技术的应用推广讨论

随着城市系统的持续演进，本研究从功能空间视角出发，通过三生空间的网格单元制图，结合多源地理数据与《国民经济行业分类（GB/T 4754—2017）》的整合分析，有效揭示了三生空间强度与类型的

分布规律。基于该方法在京津冀地区的实践验证与显著应用效果，本文在这里从结果深化应用、多领域融合拓展等维度，展开方法的应用推广讨论。

(1) “人—地—环境系统”的格局优化支撑：本研究方法获取的三生空间功能强度数据与定性类型划分，直接反映了区域内人类开发活动与环境承载的互动关系。基于此，结合区域发展规划定位与周边土地利用现状，可精准识别并筛选出亟待优化的网格单元。具体而言，为推进生态涵养区规划建设，可将规划范围内当前以生产功能为主导的三生空间网格作为重点调控对象，通过功能置换、开发强度管控等方式，统筹生态保护与发展需求；此外，针对建成环境集中区域的三生空间单元，可通过测算其城市热效应强度，一方面辅助局地气候区的精准识别，另一方面在基于自然的解决方案框架下，结合城市形态要素，探究景观格局与三生空间功能单元类型的关系，并从蓝绿空间、三维景观格局等城市功能空间结构与景观形态视角，开展三生空间功能单元与地表温度关联的科学分析及景观调控模拟，进而为城市降温与人居环境优化提供支撑^[49—53]。

(2) 产业格局的精准提取与动态监测：POI数据中“公司企业”大类字段对产业信息的记录具备完备性，结合全面的生产—生活空间定量数据与类型制图结果，可精准识别产业格局分布特征，清晰揭示社会经济发展在城市系统中的演化态势，为国土空间优化相关政策制定提供定量支撑。例如，在职住平衡优化^[54—57]、路网系统调整、公共交通网络规划等场景中，可通过产业空间与人口分布的耦合分析，明确设施配套缺口与布局优化方向，提升规划决策的科学性与针对性；同时可为城市更新工作提供数据支撑，如在老旧小区改造项目中，通过产业集聚度、人口密度与周边设施配套的关联分析，精准匹配改造需求与资源配置，助力改造方案的科学制定。

(3) 规划设计工作的高效支撑：网格功能单元类型图谱可为规划设计提供直观参考，且随着网格精度的提升，其辅助作用将进一步强化。以社区生活圈划定为例，可选取精细化网格单元尺度，通过梳理社区居民点周边基础设施配置清单，以功能类型图谱网格为底图，结合路网系统分布，精准绘制15分钟、5—10分钟等不同层级的社区生活圈范围，为公共服务设施优化布局、生活圈品质提升提供实操性依据^[58—59]。

(4) 交互式监测平台的开发与拓展：在现有制图方法的基础上，可进一步规范技术流程、完善功能模块，构建完整且专门的区域功能空间交互式监测平台。具体而言，通过将该方法与GeoAI平台深度融合，引入大数据算法模型，可拓展其在城市景观可持续规划与发展中的应用场景，进而丰富大数据技术与人工智能在该领域的应用途径，为城市治理的智能化、精准化提供技术支撑^[51]。这一建设方向可参考北京市发展和改革委员会打造的“北京市产业地图”(<https://project.fgw.beijing.gov.cn/zt/2024/cydt/>)——作为典型的多方交互应用平台，其通过整合产业布局、政策导引、园区资源等多维信息，实现“地图+数据+服务”的交互功能，为城市产业规划与企业精准布局提供高效支撑，可为城市规划政策实施交互式可视化平台的建设提供实践借鉴。在该平台的具体地方应用拓展中，可结合功能空间辨析框架，进一步开展尺度灵活变换的城市与乡村三生空间对比分析^[11]，重点关注城市中心与乡村地区的结果差异，同时深化城乡交错带的类型分布特征与梯度分析，通过精准刻画城乡功能分异规律，为科学引导城市扩张、优化乡村建设布局提供针对性技术支撑。

4.2 三生空间信息图谱技术的优势与意义讨论

通过对比现有三生空间识别与监测相关研究,本研究构建的三生空间信息图谱技术具有三方面鲜明优势:(1)在空间单元上,本研究采用的网格并非传统意义上的栅格或像元,而是在栅格数据基础上形成的标准化管理与成像单元。该网格可通过功能强度或类型编码,对内部像元、栅格所对应的景观格局与空间功能进行整体化表达,具备灵活的尺度对比能力,既可以在大区域内识别关键功能区域,也可在小尺度上解析空间功能类型的配置结构。(2)在可视化表达上,类型编码体系为定性空间信息的完整、直观可视化提供了新的技术途径,提升了空间功能表达的系统性与可读性。(3)在数据逻辑层面,进一步增强了POI数据应用于城市空间计算的落地可行性与推广潜力。采用POI数据为主、土地利用数据为辅的方式,在保证全域完整制图的同时,能够直接反映区域的实际社会功能,区别于传统方法仅依赖土地自然属性或多源数据复杂统计拟合的间接表达,更贴近真实的人—城市—环境交互特征。此外,本研究结果对国土空间优化与生态系统服务提升具有明确应用价值。具体为:借助三生空间信息图谱,可直观识别不同区域与空间单元的三生功能组合状况,判断功能短板与空间配置合理性,为公共服务设施布局优化、生活圈品质提升提供科学依据。同时,三生空间信息图谱可为城市尺度下物流、人流、信息流的关联分析提供统一基础单元,支撑人—城市—环境系统交互的定量解析。以各网格单元的空间强度作为网络分析中的起点(Origin)与终点(Destination),可刻画网格尺度下物质流的流入与流出特征,为识别职住关系、解析人口通勤模式提供功能空间背景,进而揭示三生空间对区域物质代谢、城市动态过程与资源环境利用效率的影响机制^[60—63]。最终为城市交通网络优化与空间治理提供技术支撑与数据基础。

4.3 研究的不足

尽管本研究提出的三生空间信息图谱分析具有较好的应用前景,但仍存在一些不足。其一,在POI数据的更新与运用方面,由于不同运营商的关注侧重点存在差异,其提供的POI数据详细程度各不相同,这直接影响了信息图谱表达的准确性。未来需综合多家运营商的POI数据,进一步提升数据的准确性与全面性;其二,本研究建立的方法在京津冀地区实证研究中,基于空间运算效率的考量,设定5×5km为空间分析单元。但POI数据仅提供点位信息,未涵盖空间面状信息,这会影响到信息表达的空间精度,进而降低三生空间信息图谱的表征精度。未来需结合POI数据的空间覆盖范围的详细程度,开展更高精度的空间分析;其三,POI数据主要反映人类活动强度,在人类活动较弱的自然景观区域,POI分布通常较为稀疏。本研究虽采用土地利用数据进行补充,但仍存在一定误差:例如自然保护区、国家公园等具有明确生态属性与刚性边界的区域,因内部存在少量公共服务设施POI,在与其他功能空间叠加或邻近时,可能弱化大型生态保护区的识别精度,导致部分生态空间被误判为生活功能空间,从而淡化其核心生态属性。如何科学处理这类典型生态区域的POI信息,仍有待进一步研究。

5 结论

三生空间是当前国土空间优化、缓解城市病的重要规划对象,其监测技术的提升是国土空间规划动态监测与格局优化的关键支撑。快速城市化背景下,空间功能日趋复合化,现有以土地利用数据或经验法则为主的分类与识别方法,难以精准捕捉土地开发利用过程中由人类需求驱动的社会感知层面真实功能状态,且缺乏复合功能的类型化编码体系,难以支撑多尺度规划决策。为解决这些问题,本研究以网

格为基本分析单元, 构建以POI数据为主、土地利用数据为辅的三生空间识别框架, 通过引入《国民经济行业分类(GB/T 4754-2017)》进行三生空间属性划分, 不仅兼顾土地自然属性与社会经济属性, 还充分考虑了同一土地利用类型的功能异质性, 突出人—城市—环境交互下的社会感知特征, 为三生空间精细化分类与表达提供了基础。在此基础上, 结合改良的土壤质地三角坐标法对网格单元进行三生空间类型编码, 构建三生空间强度图谱与分类图谱分析技术。该技术可以系统地揭示区域三生空间的功能强度特征与发展类型, 有效弥补现有研究在信息提取和表达方面的技术短板。同时, 基于网格单元尺度下的功能辨析与强度计算, 还可以为城市和区域网络分析提供功能空间视角下的起点与终点本底条件, 推动区域计算、空间制图与动态监测在社会感知维度的融合应用。最后, 为验证上述技术体系的可行性与有效性, 本文以京津冀地区2024年5km网格为研究对象开展实证应用, 结果表明该技术对区域功能空间的区位特征信息的捕捉和表征效果良好。总体而言, 该技术在景观格局优化、物质流分析等方面具有明确的生态学意义与应用价值, 可为地理大数据在区域可持续规划中的深度应用提供可行技术支撑, 并且助力京津冀地区区域一体化发展及其世界级城市群的建设。

参考文献:

- [1] 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. 地理科学进展, 2017, 36(3): 378-391.
- [2] 戈大专, 陆玉麒. 面向国土空间规划的乡村空间治理机制与路径. 地理学报, 2021, 76(6): 1422-1437.
- [3] 陆玉麒. 中国空间格局的规律认知与理论提炼. 地理学报, 2021, 76(12): 2885-2897.
- [4] 黄安, 许月卿, 卢龙辉, 刘超, 张益宾, 郝晋琨, 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] 李广东, 方创琳. 城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析. 地理学报, 2016, 71(1): 49-65.
- [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] 高新蕊, 李平星, 梁鑫, 王履华. “三生”协同视角下生态空间识别与优化研究进展与展望. 热带地理, 2025, 45(10): 1892-1903.
- [8] Yin J D, Dong J W, Hamm N A S, Li Z C, Wang J H, Xing H F, Fu P. Integrating remote sensing and geospatial big data for urban land use mapping: a review. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 103: 102514.
- [9] Chen Y, Su X Y, Wang X K. Spatial transformation characteristics and conflict measurement of production-living-ecology: evidence from urban agglomeration of China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(3): 1458.
- [10] Zhang T J, Zhang C F, Wang Q, Yang C H, Zhang J, Zhang C X, Zhang Q P. Research on sustainable land use in Alpine meadow region based on coupled coordination degree model—from production–living–ecology perspective. Sustainability, 2024, 16(12): 5213.
- [11] 刘小茜, 马思克, 杨磊, 杜宜霖. 城乡地域系统“三生”空间识别与特征——以北京市海淀区为例. 地理学报, 2025, 80(10): 2720-2736.
- [12] 樊杰. 我国主体功能区划的科学基础. 地理学报, 2007, 62(4): 339-350.
- [13] 胡立莉. 甘肃省沿黄城镇带“三生”空间时空格局演变研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- [14] 肖蕊, 邵怀勇, 李峰, 谢洪斌. 四川省“三生空间”分类评价与时空格局分析. 湖北农业科学, 2021, 60(11): 146-152.

- [15] Zhao Y Q, Cheng J H, Zhu Y G, Zhao Y P. Spatiotemporal evolution and regional differences in the production-living-ecological space of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(23): 12497.
- [16] Zhou G L, Zhang D, Zhou Q, Shi T. Study on the spatiotemporal evolution characteristics of the “production–living–ecology” space in the Yellow River Basin and its driving factors. *Sustainability*, 2022, 14(22): 15227.
- [17] 张银, 张翊. 云南边境地区瑞丽市三生空间识别. *江西农业学报*, 2022, 34(6): 187-193.
- [18] 郎峥, 陈德超, 杨子豪, 詹宏娟, 许艳, 周旺辉. 城市“三生”空间适宜性评价与影响因素研究. *环境监测管理与技术*, 2025, 37(5): 40-49.
- [19] Li H Z, Fang C Y, Xia Y, Liu Z Y, Wang W. Multi-scenario simulation of production-living-ecological space in the Poyang Lake area based on remote sensing and RF-Markov-FLUS model. *Remote Sensing*, 2022, 14(12): 2830.
- [20] 刘岩, 夏敏. 基于土地利用和 POI 数据的乡村“三生空间”划定——以南京市溧水区为例. *农村经济与科技*, 2023, 34(14): 34-36, 78.
- [21] Wang Y X, Yang S W. Identification of surface thermal environment differentiation and driving factors in urban functional zones based on multisource data: a case study of Lanzhou, China. *Frontiers in Environmental Science*, 2024, 12: 1466542.
- [22] Ni M Y, Zhao Y D, Ma C H, Jiang W Z, Xie Y M, Hou X L. Spatial identification and change analysis of production-living-ecological space using multi-source geospatial data: a case study in Jiaodong Peninsula, China. *Land*, 2023, 12(9): 1748.
- [23] 扈万泰, 王力国, 舒沐晖. 城乡规划编制中的“三生空间”划定思考. *城市规划*, 2016, 40(5): 21-26, 53.
- [24] Liang Y T, Hu Y F. Regional development assessment based on POIs and Geotree: a case study in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Environment, Development and Sustainability*, 2024, 26(7): 18785-18809.
- [25] Yang Y, Liu Y W, Zhu C M, Chen X M, Rong Y, Zhang J, Huang B B, Bai L L, Chen Q, Su Y, Yuan S F. Spatial identification and interactive analysis of urban production—living—ecological spaces using point of interest data and a two-level scoring evaluation model. *Land*, 2022, 11(10): 1814.
- [26] Bu Z Q, Fu J Y, Jiang D, Lin G. Production–living–ecological spatial function identification and pattern analysis based on multi-source geographic data and machine learning. *Land*, 2023, 12(11): 2029.
- [27] 周杭, 樊红. 基于众源地理数据的城市功能区及其热点的识别研究. *武汉大学学报: 工学版*, 2022, 55(4): 417-426.
- [28] 陈建坤, 牟风云, 陈林, 田甜. 重庆市三生空间时空格局研究. *西北林学院学报*, 2022, 37(3): 246-253.
- [29] Fu J Y, Gao Q, Jiang D, Li X, Lin G. Spatial–temporal distribution of global production–living–ecological space during the period 2000–2020. *Scientific Data*, 2023, 10: 589.
- [30] Wang S, Tian J, Namaiti A, Lu J M, Song Y Z. Spatial pattern optimization of rural production-living-ecological function based on coupling coordination degree in shallow mountainous areas of Quyang County, Hebei Province, China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, 11: 1169007.
- [31] Lou G, Chen Q X, He K, Zhou Y, Shi Z. Using nighttime light data and POI big data to detect the urban centers of Hangzhou. *Remote Sensing*, 2019, 11(15): 1821.
- [32] Tu X Q, Fu C, Huang A, Chen H L, Ding X. DBSCAN spatial clustering analysis of urban “production–living–ecological” space based on POI data: a case study of central urban Wuhan, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(9): 5153.
- [33] 王倩. 基于多源数据的生产—生活—生态空间(三生空间)定量识别及优化研究——以雅安市名山区为例[D]. 雅安: 四川农业大学, 2023.
- [34] 陈利顶, 张艳杰, 马思克. 景观生态学研究的多尺度性与尺度选择. *应用生态学报*, 2025, 36(7): 1933-1940.

- [35] Cai T Y, Duan J. Construction and application of characteristic townscape knowledge graph based on space gene theory. *Cities*, 2025, 167: 106289.
- [36] 傅伯杰, 赵文武, 陈利顶. 地理—生态过程研究的进展与展望. *地理学报*, 2006, 61(11): 1123-1131.
- [37] 张虹鸥, 黄恕明, 叶玉瑶. 主体功能区划实践与理论方法研讨会会议综述. *热带地理*, 2007, 27(2): 191-192.
- [38] 方创琳. 中国城市发展格局优化的科学基础与框架体系. *经济地理*, 2013, 33(12): 1-9.
- [39] Ren X Z, Xiong R, Ni T H. Spatial network characteristics of carbon balance in urban agglomerations—a case study in Beijing-Tianjin-Hebei city agglomeration. *Applied Geography*, 2024, 169: 103343.
- [40] Zhou T, Jiang G H, Zhang R J, Zheng Q Y, Ma W Q, Zhao Q L, Li Y L. Addressing the rural in situ urbanization (RISU) in the Beijing-Tianjin-Hebei region: Spatio-temporal pattern and driving mechanism. *Cities*, 2018, 75: 59-71.
- [41] 颜建军, 熊万灵, 刘亦文. 生态治理政策对国家重大战略区域生态系统变化的影响——以京津冀地区为例. *生态学报*, 2025, 45(23): 11491-11505.
- [42] 武义青, 冷宣荣. 京津冀协同发展十周年回顾与展望. *经济与管理*, 2024, 38(2): 1-8.
- [43] 张贵, 赵勇冠. 邻近—联通—效率: 区域一体化分析新框架——对京津冀协同发展的新诠释. *天津社会科学*, 2024(1): 58-74.
- [44] Fang Y B, Yu H, Chen Y Q, Fu X H. Spatial distribution characteristics and influencing factors of the retail industry in Ningbo City in Eastern China based on POI data. *Sustainability*, 2024, 16(17): 7525.
- [45] Zhang J, Yuan X D, Lin H. The extraction of urban built-up areas by integrating night-time light and POI data—a case study of Kunming, China. *IEEE Access*, 2021, 9: 22417-22429.
- [46] Brown C F, Brumby S P, Guzder-Williams B, Birch T, Hyde S B, Mazzariello J, Czerwinski W, Pasquarella V J, Haertel R, Ilyushchenko S, Schwehr K, Weisse M, Stolle F, Hanson C, Guinan O, Moore R, Tait A M. Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 2022, 9: 251.
- [47] 郭中领, 张科利, 董建志, 王颖, 刘宏远, 王维. 利用分形理论解决不同土粒分级标准间土壤质地资料的转换问题. *地理科学*, 2011, 31(10): 1254-1260.
- [48] 何海龙, 齐雁冰, 吕家珑, 彭佩佩, 晏梓然, 唐子茜, 崔珂, 张恺玥. 中国土壤质地分类系统的发展与建议修订方案. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(3): 501-510, 496.
- [49] Zhou Y, Yang Y, Wang H. Impact of urban features on land surface temperature across the diurnal cycle under LCZ framework. *Urban Climate*, 2026, 65: 102760.
- [50] Wan B, Shen N, Zhang H, Sheng Q. Analyzing the impact of urban morphology on urban land surface temperature from the perspective of spatial configuration and explainable machine learning: A case study of seven cities. *Sustainable Cities and Society*, 2026, 138: 107165.
- [51] Li H, Yang J, Xin J, Yu W, Ren J, Yu H, Xiao X, Xia J (Cecilia). Investigating the effect of urban form on land surface temperature at block and grid scales based on XGBoost—SHAP. *Environmental Modelling & Software*, 2026, 195: 106738.
- [52] Li J, Liu Z, Shao Z, Fu H. Regulation of blue-green landscape fragmentation on day-night surface urban heat island: A case study of kunming. *Sustainable Cities and Society*, 2026, 138: 107173.
- [53] Jia J, Jing Z, Wang L, Yao Y, Zhai Y, Li R, Chang B, Lee S, Brown R D, Ren Z. Unraveling the 3D structure of urban green spaces: Key drivers of cooling effects across urban heat scenarios. *Environmental Impact Assessment Review*, 2026, 120: 108409.
- [54] Calabrese F, Diao M, Di Lorenzo G, Ferreira J, Ratti C. Understanding individual mobility patterns from urban sensing data: a mobile phone trace example. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 26: 301-313.
- [55] Koga C, Saito T, Hanazato M, Kondo N, Saito M, Ojima T, Kondo K. Living in public rental housing is healthier than private rental housing a 9-year cohort study from Japan Gerontological Evaluation Study. *Scientific Reports*, 2024, 14: 7547.

- [56] Sari Aslam N, Cheng T, Cheshire J. A high-precision heuristic model to detect home and work locations from smart card data. *Geo-spatial Information Science*, 2019, 22(1): 1-11.
- [57] Schleith D, Widener M, Kim C. An examination of the jobs-housing balance of different categories of workers across 26 metropolitan regions. *Journal of Transport Geography*, 2016, 57: 145-160.
- [58] 任亚鹏, 刘启明, 刘馨, 李欣. 30分钟社区生活圈视角下的武汉市主城区绿色空间公平性评价. *风景园林*, 2024, 31(11): 94-102.
- [59] 罗雪瑶, 柴彦威. “x分钟城市”的概念、内涵与规划方法. *国际城市规划*, 2024, 39(3): 12-22.
- [60] 韩骥, 周燕. 物质代谢及其资源环境效应研究进展. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 1049-1060.
- [61] 戴铁军, 刘瑞, 王婉君. 物质流分析视角下北京市物质代谢研究. *环境科学学报*, 2017, 37(8): 3220-3228.
- [62] 楚春礼, 徐盛国, 姜贵梅, 鞠美庭, 荆克迪, 白雪, 黄磊. 中国城市自然生态系统保护研究. *生态经济*, 2014, 30(9): 162-166.
- [63] 王雪, 施晓清. 基于gis的产业生态学研究述评. *生态学报*, 2017, 37(4): 1346-1357.