

1 基于多源地理数据的三生空间功能辨析：制图方法与应用

2 刘斌^{1, 2}, 陈利顶^{1, 2*}

3 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, 100085, 北京

4 2.中国科学院大学, 100049, 北京

5 **摘要:** 三生空间功能的精准辨析与制图对揭示区域协调发展规律至关重要, 但现有研究在兼顾社会经济 -
6 自然系统关联性、判别功能堆叠场景、考量建成区功能异质性及优化制图手段等方面仍存在不足。为此,
7 本文整合以兴趣点 (POI) 数据为主、土地利用数据为辅的多源地理数据, 选取网格单元作为分析尺度, 构
8 建了融合三生空间功能辨析、定量强度测算与定性图谱绘制的综合制图方法。该方法分为四步: 首先开展
9 数据预处理, 依据《国民经济行业分类标准 (GB/T 4754-2017)》从社会经济与城市化驱动视角, 建立 POI
10 数据的三生空间功能分类标准, 并整合土地利用数据; 其次在网格尺度上匹配 POI 点的功能属性, 对无
11 POI 覆盖的低人类活动区域, 采用土地利用数据直接对其补充功能属性; 再次通过计算网格功能属性的全
12 域相对密度, 完成强度分布制图; 最后优化土壤三分法, 依据网格内功能占比确定角色权重, 结合功能属
13 性的英文首字母大小写和顺序进行编码, 生成全域三生空间功能图谱。在此基础上, 本文以京津冀地区为
14 方法应用区, 选取 2016-2024 年高德地图 POI 数据与 Dynamic World 中基于 Sentinel-2 的 10m 分辨率
15 近实时土地利用数据开展 5km 网格尺度的方法实践。结果表明, 2016、2020、2024 年三生空间功能的网格
16 强度、聚集特征及时序扩张规律, 与京津冀一体化发展的阶段进程和目标走势高度契合, 验证了方法的有
17 效性; 此外, 连同所构建的全域 15088 个网格单元的 42 种图谱类型, 也直观地体现了本方法在区域精准格
18 局优化方面的应用潜力。综上所述, 我们希望此方法最终可以为 2025 年中央城市工作会议强调的大数据
19 赋能智慧城市建设, 以及“十五五”时期国土空间优化等工作提供理论与方法参考, 助力区域可持续发展。

20 **关键词:** 三生空间; POI 数据; 功能辨析; 制图方法; 京津冀地区

21

22 Functional Discrimination of Production-Living-Ecological Spaces Based on Multi- 23 Source Geospatial Data: Cartographic Methods and Applications

24 LIU Bin^{1, 2}, CHEN Liding^{1, 2*}

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

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

28 **Abstract:** Accurate differentiation and mapping of Production-Living-Ecological space (PLES) functions are pivotal
29 to unraveling the laws governing regional coordinated development. However, existing research falls short in four
30 key aspects: integrating the correlations between socio-economic and natural systems, identifying functional
31 stacking scenarios, accounting for the functional heterogeneity of built-up areas, and refining mapping
32 methodologies. To address these limitations, this study integrates multi-source geospatial data with Point of Interest
33 (POI) data as the primary source and land use data as a supplement, adopts grid units as the analytical scale, and

34 develops a comprehensive mapping method that synergizes PLES function differentiation, quantitative intensity
35 measurement, and qualitative cartography. This method comprises four sequential steps: First, data preprocessing is
36 carried out. A PLES function classification standard for POI data is established from the perspective of socio-
37 economic and urbanization drivers in accordance with the National Economic Industry Classification (GB/T 4754-
38 2017), and land use data is incorporated for integration. Second, the functional attributes of POI points are matched
39 at the grid scale; for low human activity areas without POI coverage, land use data is directly used to supplement
40 their functional attributes. Third, the global relative density of grid functional attributes is calculated to generate
41 intensity distribution maps. Fourth, utilizing the optimized soil tripartite method, role weights are determined based
42 on the functional proportion within each grid, and coding is conducted by combining the uppercase and lowercase
43 English initials and sequential order of functional attributes to produce a global PLES function qualitative map.
44 Taking the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region as the application area, this study implements the method at a 5 km
45 grid scale using Amap POI data from 2016 to 2024 and near-real-time 10 m resolution land use data derived from
46 Sentinel-2 in Dynamic World. Results indicate that the grid intensity, agglomeration characteristics, and temporal
47 expansion patterns of PLES functions in 2016, 2020, and 2024 are highly consistent with the phased progress and
48 target trajectories of BTH integrated development, thus verifying the method's effectiveness. Additionally, the 42
49 map types identified across 15,088 grid units in the entire study area intuitively demonstrate the method's potential
50 for precise regional pattern optimization. In conclusion, this study aims to provide theoretical and methodological
51 references for big data-enabled smart city construction that was emphasized at the 2025 Central Urban Work
52 Conference, as well as for territorial space optimization during the 15th Five-Year Plan period. Ultimately, it seeks
53 to support regional sustainable development initiatives.

54 **Key Words:** production-living-ecological spaces; POI data; functional discrimination; cartographic methods;
55 Beijing-Tianjin-Hebei region

56

57 人类世背景下^[1], 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^[2], 城市
58 区域扩张成为这一过程中最显著的表现形式^[3]。城市作为以人类意志为核心的建成环境, 其景观类型的组
59 合与重构形成了复杂的功能区域群落; 而现代化基础设施的完善, 进一步凸显了生产空间集约拓展、生活
60 空间快速蔓延与生态空间持续挤压的多重矛盾^[4]。空间功能的交织叠加催生了大量复合功能区域, 也使传
61 统以土地利用类型为单一判据的城市动态监测手段面临挑战, 具体的土地利用侧重“空间覆盖类型”的静
62 态描述, 而融合景观功能异质性的功能空间更强调“功能属性”的动态表征, 二者在复合空间解析中的本质
63 差异愈发突出。

64 面对这一全球性的区域空间演变趋势, 中国在快速城镇化进程中持续提升国土空间规划的精细化水平,
65 着力破解功能复合带来的治理难题^[5-6]。2012 年党的十八大与 2013 年中央城镇化工作会议首次明确“生
66 产集约高效、生活宜居适度、生态山清水秀”的“生产-生活-生态”(三生)空间(Production-Living-Ecological
67 Spaces, PLES) 格局优化目标, 并将其纳入国土空间规划核心框架^[7]; 2025 年中央城市工作会议进一步提出
68 创新、宜居、美丽、韧性、文明、智慧“六位一体”的现代化人民城市目标体系^[8], 其中“优化城市空间结
69 构”“巩固生态环境治理成效”“建设智慧城市”等任务围绕空间功能精细化治理展开, 标志着国土空间规划
70 从宏观格局管控转向精准化、智慧化治理新阶段。在此背景下, 精准辨析三生空间功能属性、科学界定区

71 域空间类型、实现规划与政策实施的精准制图监测，成为响应韧性城市建设、城市群协调发展等国家战略
72 的核心命题。

73 现有三生空间研究已形成丰富成果^[9]，但在功能辨析与制图层面仍存在关键局限，核心表现为对土地
74 利用数据的过度依赖，而这一问题的根源在于当前仍缺乏融合社会经济发展需求与自然本底属性的三生空
75 间功能辨析景观分类界定标准。具体来看，多数研究直接沿用地利用数据进行空间划分^[10-14]，既未充分
76 考虑建成环境中功能空间的异质性^[15]，也忽略了三维城市扩张下景观与人需求交互下的功能数量差异，即
77 同一占地面积的建筑可能因内部功能的类型与数量不同，无法仅以“建成区”简单表征；部分研究甚至以
78 “建设用地 = 生活空间”“耕地 = 生产空间”的简单对应关系划分空间，忽视了城市综合体“生产 - 生活”
79 复合功能、景观公园、蓝绿空间等“生态-生活休闲”叠加属性等现实特征，最终导致识别结果与空间功能
80 真实状态存在明显偏差，未能完整表达出区域的功能属性。与此同时，就三生空间属性的分类体系而言，
81 大多数学者主要依靠土地自然属性和开发规划类型进行分类^[16]，也有部分学者参考相关国家分类标准^[17]。
82 例如，《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB50137-2011)^[18]；《土地利用现状分类》(GB/T 21010-2017)
83 与《城乡用地分类与规划建设用地标准》(GB50137-2019)^[19]等。但总体而言，现有研究大多存在分类指标
84 选取主观性过强的问题，这一问题在生产属性与生活属性的区分中表现得尤为突出；同时，对于相关参考
85 标准的选取也过度聚焦土地利用的固有属性，忽视了社会经济发展与人口需求对土地开发后功能的调整和
86 丰富作用，最终导致功能辨析的精度受到影响。

87 此外，地理大数据的发展也为区域空间解读提供了新手段^[20]，其中兴趣点 (Points of interest, POI) 数
88 据作为基于位置服务数据 (Location-based service data) 的产物，能够直观记录区域景观、基础设施、自然
89 场所等土地斑块本质和其开发过后的功能属性，突破了土地利用数据的单一表征局限，在功能空间定量研
90 究中得到广泛应用。具体的这类研究的开展主要有，多维度数据源拟合搭建三生空间识别体系^[21-23]，通过
91 土地利用与 POI 数据结合^[19]、土地利用与社会经济数据融合^[24]、POI 与夜间灯光遥感数据整合^[25]，借助
92 机器学习技术融合多源数据^[26]，或完全只依靠 POI 数据进行识别^[27-28]等方式展开。但目前总的来看，多数
93 方法容易造成三生空间功能属性由于多为拟合，导致直观性表达失真，也会因为 POI 数据与城市化范围挂
94 钩，而存在全域监测覆盖不足的问题。同时，在制图技术层面，现有研究对功能类型编码规则的制定探讨
95 较少，尤其是针对复合功能区域。制图过程中，对与规划管理适配的尺度和边界选取也关注不足；且当前
96 制图多单纯依赖核密度区域分析或网格拆分法，未能充分重视和理解网格边界对其内部功能属性的保留作
97 用。

98 针对上述缺口，本研究整合多源地理数据，构建“数据融合-属性匹配-强度量化-类型判别”的三生空
99 间功能辨析与综合制图方法。首先，借鉴城市形态学尺度、景观格局以及景观图谱的制图逻辑^[29-30]，并结
100 合网格化管理实践，构建“网格边界-格中景观格局-功能强度”分析框架，将网格单元作为全域三生空间功
101 能属性的基本制图单元。其次，以 POI 数据为核心、土地利用解译数据为补充，引入《国民经济行业分类
102 标准 (GB/T 4757-2017)》，依据其中关于企业服务、产品供给等地理实体的人类开发利用功能分类，对 POI
103 数据的属性记录进行三生空间功能属性体系划分。这一过程从开发利用的视角，搭建了三生空间功能属性
104 直观表达的辨析准则；同时通过叠加土地利用数据弥补 POI 数据全域覆盖不足的问题，最终实现社会经济
105 发展与自然生态过程的融合。在制图环节，本研究创新引入土壤三分法的三角形分析原理，以生产、生活、
106 生态为三边并划分三等分范围值，依据在网格内开展三生空间功能角色的分析判别，以字母 (P-L-E) 的编
107 码构建三生空间图谱类型，实现全域功能类型的精准判别与规划监测的精准定位。基于京津冀地区 2030 年

108 建成世界级城市群的规划目标，本研究将该方法应用于京津冀协同发展实践^[31]，验证其在区域规划调控中的落地效果与应用价值^[6]。

110 综上，本研究的意义体现在理论与实践双重维度：理论上，通过 POI 与土地利用数据的主次配合，突破传统土地利用数据的识别局限，建立融合自然属性与社会经济需求的三生空间界定标准，避免复杂拟合过程，实现功能属性的精准直观表达，完善复合功能区域识别理论，为大尺度复杂景观区域的功能提取提供新思路；实践上，通过网格单元尺度的“图谱化”分析直观呈现区域发展动态，精准对接 2025 年中央城市工作会议提出的智慧城市建设与精准治理要求，为规划管理部门提供动态监测工具，助力城市更新、生态保护等工作的精准决策，为国土空间集约利用与生态保护协同发展提供技术支撑^[32-33]。

116 1. 数据来源与方法搭建

117 1.1 数据来源

118 本研究选取 POI 数据和土地利用类型数据两类地理空间数据作为主要研究数据，具体说明如下：首先是 POI 数据，作为基于位置的服务数据集与社会感知数据，随着互联网和移动终端技术的发展，它已在各领域得到广泛应用^[34]。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，实现其社会经济特征的空间化。同时，它将购物中心、山脉、公司等不同大小和形状的地理实体抽象为点要素，每个点要素主要包含功能属性（如公司、景点）和地理坐标（纬度、经度）。这些功能属性按信息丰富度分为大类、中类和小类三个层级：大类和中类分类较为笼统，多对应具体行业归属（如“商业服务”“交通运输”）或自然景观类别（如“山地”“水域”）；小类则更为具体，部分会精确到具体公司名称、饭店主营和商业零售类型等。例如，表 1 展示了 2016 年京津冀地区 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 POI 数据还包含商业信息、道路地址等内容，因与本研究相关性较弱，不做过多展示。本研究方法应用部分所使用的 POI 数据来源于中国三大地图服务提供商之一的“高德地图”^[35-36]，选取京津冀城市群 2016-2024 年的 POI 数据，具体为每年收集该地区 13 个城市、23 个类别的相关数据。

130 表 1 POI 数据属性字段示例

131 Table 1 Example of POI Data Attribute Fields

POI 点	经度	纬度	POI 数据字段属性		
			大类	中类	小类
A	115.47**	39.46**	风景名胜	风景名胜	寺庙道观
B	116.44**	39.55**	购物服务	家电电子卖场	手机销售
C	114.48**	36.60**	商居用地	居住区	居住小区
D	115.61**	39.61**	地名	自然地名	山脉

132 本研究引入《国民经济行业分类标准（GB/T 4757-2017）》并以此为依据整理 POI 数据，将京津冀地区的 23 类兴趣点数据划分为三类空间类型，具体详情见表 2。该分类思路基于国民经济核算体系视角，充分考量城市化进程与建成环境在功能层面的景观异质性，区别于传统土地利用类型以自然功能为主导的分类逻辑，实现了自然属性与社会经济属性的有机结合。

136 表 2 POI 数据的三生空间分类标准

Table 2 Classification Criteria of POI Data in PLES

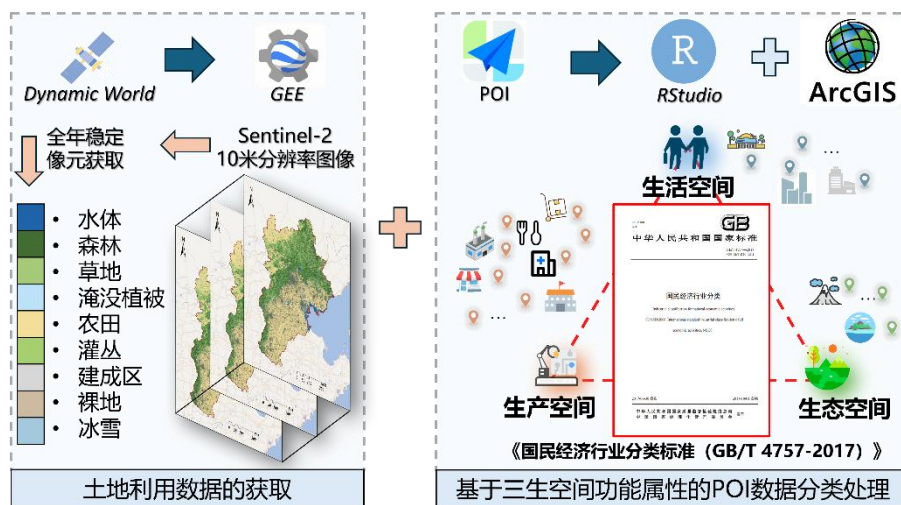
空间类型	POI 数据字段属性中对相关地理实体功能和服务的记录
生产空间	农林牧渔基地、工业园区、工厂、电力营业厅、供水营业厅、企业单位、购物服务、医疗卫生服务、生活服务、交通设施及道路服务、餐饮住宿服务、金融保险服务、机动车服务、科教文化服务、政府机构及社会组织等
生活空间	居住区、公共设施、风景名胜及古迹、地名地址等
生态空间	自然地名（含山脉、河流等）

138 其次,对于土地利用数据,我们利用 Google Earth (谷歌地球)开发的实时全球土地利用类型发布平台,
 139 dynamic world 进行获取,该平台提供 2015 年之后的利用 10m 哨兵数据处理得到的土地利用数据。我们通
 140 过遥感解译获取了京津冀地区的土地利用分类及变化数据。我们选用了“Google Earth Engine”(谷歌地球引
 141 擎)平台可访问的一款 GeoAI 遥感产品数据集——“Dynamic World”(动态世界)
 142 (<https://www.dynamicworld.app/>)^[37]。该数据集为 10 米分辨率的近实时更新土地利用数据,覆盖全球尺
 143 度,适用于 2015 年 6 月 27 日至今的完整哨兵 2 号(Sentinel-2) L1C 系列数据。Dynamic World 基于
 144 Sentinel-2(哨兵 2 号)大气顶层反射率数据构建,根据地理位置不同,全球土地覆盖数据每 2-5 天更新一
 145 次。该数据集已在谷歌地球引擎中以影像集合形式开放,访问标识为“GOOGLE/DYNAMICWORLD/V1”。
 146 该数据集包含 9 种土地利用类型,分别为水体、林地、草地、淹没植被、农田、灌木灌丛、建成区、裸地、
 147 冰雪。

148 1.2 方法搭建

149 1.2.1 数据预处理及输入

150 在制图工作启动前,需先对两类数据进行预处理。即 POI 数据整理重分类及土地利用数据获取,具体
 151 而言,针对研究区域的 POI 数据,将依据研究年限与字段属性,参照表 2 中的分类标准,遍历并重新整
 152 理为生产、生活、生态三类,为后续数据网格空间连接做好准备。同时,依托 Dynamic World 平台土地利
 153 用数据 10 米高分辨率与高更新频率的优势,为获取稳定且高精度的研究区域的土地利用变化数据,我们
 154 对每个像元选取当年全年的众数像元值作为稳定值并记录;对于少数无法获取众数的像元,则采用中位数
 155 和最大值补充。完成上述两项预处理后,相关数据将作为输入,进入后续处理流程(如图 1 所示)。



157

图 1 数据预处理及输入

158

Fig.1 Data preprocessing and input

159

1.2.2 数据的空间属性整合：POI 数据的网格空间连接与土地利用数据的补充

160

我们以网格为核心管理与追踪单元，便于最终的功能界定与成像呈现。具体操作如下：首先，在输入数据前，需依据研究目标在研究区域内划分适宜大小的网格。接着，利用生产、生活、生态三类 POI 数据中的经纬度信息，将所有 POI 点精准匹配至研究区域内，再以网格为边界完成点的认领与关联。通过这种“由点及面”的方式，为研究区域内有 POI 点归属和关联的网格，赋予对应的三类功能属性。需要说明的是，POI 数据源于地图导航软件的生产应用，其产生、发展与持续完善的过程，本身就是城市化进程的直观体现。面对区域内城市化程度的空间异质性，研究年限内难免存在未关联 POI 数据的网格单元（标记为“NA”）——这类区域多为人类活动稀少、功能开发强度低的自然景观集中区。为实现全域“三生空间”识别，可单独借助土地利用数据，为这部分网格赋予三生空间功能属性。这部分区域无需考虑建成环境的异质性，直接进行直观分类即可：建成区归为生活空间，耕地归为生产空间，水体、林地等自然景观归为生态空间。综上，通过 POI 数据与网格的空间关联，结合土地利用数据的补充完善，研究区域内所有网格单元均能被充分覆盖并赋予精准的三生空间功能属性，为后续开展定量、定性制图成像提供了基础（如图 2 所示）。

172

1.2.3 定量分布制图

173

我们以网格为单位开展成像工作，核心是调用并编排上一步已赋予每个网格的三生空间功能属性。对于定量分布制图，关键是计算各网格的三生空间强度，再通过显色处理完成制图。如图 2 所示，具体流程如下：首先针对有 POI 点附着的网格单元，以“点相对密度”作为对应功能的强度——即单个网格中某类功能的 POI 点数，占该类功能所有 POI 点总数的比例。对于通过土地利用数据赋予功能属性的网格单元，采用相似原理计算功能强度，区别仅在于将“点相对密度”替换为“土地利用类型面积相对密度”，如式(1)所示。

179

$$\text{相对密度}_{ij} = \frac{n_{ij}}{N_i}, (i = P, L, E; j = \text{网格单元}_1, \dots, \text{网格单元}_m) \quad (1)$$

180

式(1)中， 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； j 代表正在被分析的网格单元， n 表示给定单元格内特定类型的兴趣点 (POI) 数据点的数量或者是土地利用的面积， N 是指某类特定的生产 (P) 或者生活 (L) 或者生态 (E) 的属性在所有网格中的属性总和。

183

完成研究区域内所有网格的上述两类强度计算后，各网格的生产、生活、生态功能属性及具体强度均已明确。此时借助色带对所有网格单元按强度数值着色，即可完成三生空间定量分布制图。

184

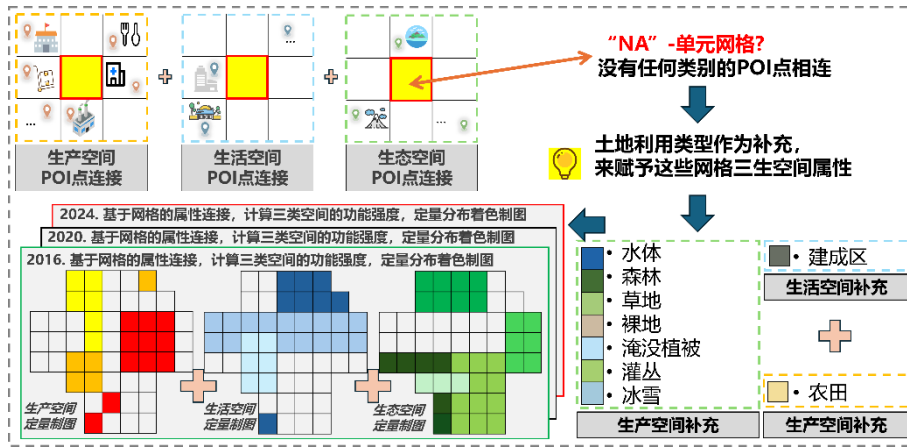


图 2 数据整合与三生空间定量制图

Fig.2 integration of data sets and Quantitative Mapping of PLES

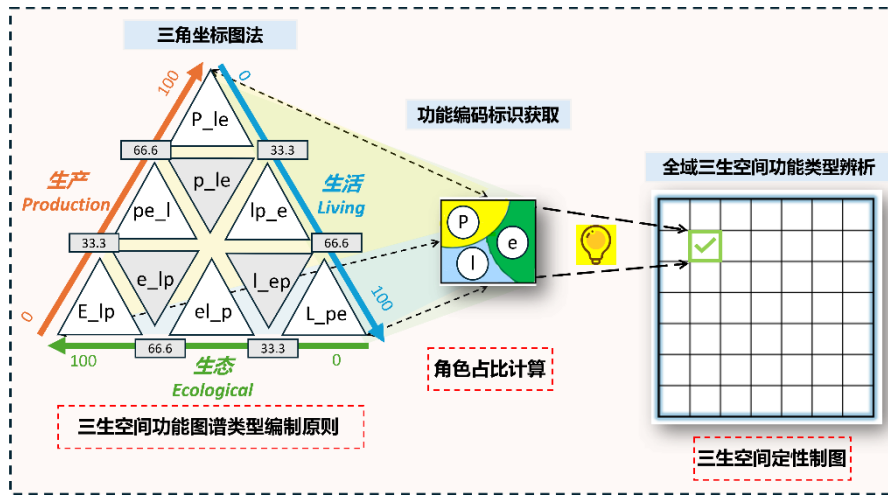
1.2.4 定性类型制图

完成所有网格定量强度计算后，多数网格会呈现多种功能类型共存的情况。我们希望在传统定量分布基础上，进一步定义每个网格的三生空间类型，形成功能空间的类型图谱。具体而言，我们引入“土壤质地三分法（三角坐标图法）”并加以调整：该方法原本以砂粒（0.05-2mm）、粉粒（0.002-0.05mm）、黏粒（<0.002mm）的含量占比（总和 100%）为依据，通过等边三角形坐标定位判定土壤质地^[38-39]；我们将三角形三条边重新定义为生产（Production）、生活（Living）、生态（Ecological）三大功能，每条边对应功能的角色占比（0-100%）。计算逻辑调整为以单个网格为主体：根据网格内包含的功能属性 POI 点（或土地利用类型），计算各类功能的角色占比，即生产功能的 POI 点数（或土地利用类型面积），占该网格内所有功能 POI 点总数（或土地利用类型面积之和）的比例，同理可得生活、生态功能的角色占比，如式（2）所示。

$$\text{角色占比}_{ij} = \frac{a_{ij}}{A_j}, (i = P, L, E; j = \text{网格单元}_1, \dots, \text{网格单元}_x) \quad (2)$$

式（2）中， 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； j 代表正在被分析的网格单元， a 表示给定单元格内特定类型的兴趣点（POI）数据点的数量或者是土地利用的面积， A 是指某类特定的生产（P）或者生活（L）或者生态（E）的属性在这个网格中的属性总和。

随后将三角形三条边各三等分，划分出（0-1/3）、（1/3-2/3）、（2/3-1）三个区间，并制定图谱编码规则：选取三类功能英文首字母组合编码，占比处于（2/3-1）区间的用大写字母，（1/3-2/3）区间的用小写字母，（0-1/3）区间的小写字母前加“_”区分；若两类功能占比处于同一区间，则按数值大小排序（数值大的在前），整个流程如图 3 所示。例如：某网格生产、生活、生态功能占比分别为 67%、15%、18% 时，其定性图谱类型编码为“P_e_l”。最终，每个网格可在等边三角形中找到对应位置，结合编码规则完成所有网格的图谱类型的编码，确定其三生空间类型图谱后，依据不同类型的着色设定成像，最终完成全域的三生空间定性制图。



209

210

图 3 三生空间定性制图

211

Fig.3 Qualitative Mapping of PLES

212 2 方法应用与结果

213 2.1 方法应用区域概况

214 京津冀地区涵盖 13 座城市（如图 4 所示），地理坐标介于北纬 36°05'—42°37'、东经 113°11'—119°45'
 215 之间，地处中国华北地区渤海湾腹地，总面积达 21.6 万平方公里，约占中国国土总面积的 2.25%^[40-41]。该
 216 区域以首都北京市、直辖市天津市为核心，辐射河北省 11 个地级市，地形呈现出显著的西北 — 东南向
 217 高程梯度^[42]。从经济与人口规模来看，京津冀地区常住人口超 1 亿，2023 年地区生产总值（GDP）达
 218 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。

219 作为中国三大重点发展区域之一，京津冀城市群与粤港澳大湾区、长三角城市群共同构成中国区域发
 220 展的核心引擎^[43]。不过，该区域快速的城市化进程不仅导致北京出现人口膨胀、交通拥堵、资源紧张等严
 221 重“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，例如：河北
 222 与北京的城镇人均可支配收入差距从 2014 年的 2.44 万元增至 2020 年的 3.83 万元，2022 年进一步扩
 223 大至 4.27 万元^[44]，形成了明显的发展落差。为破解上述问题，中国政府于 2015 年实施京津冀协同发展
 224 战略^[45]，其核心任务之一是疏解北京非首都功能，具体包括一般性制造业、区域性物流基地、专业市场及
 225 政府职能部门的空间区位转移。加之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
 226 地承接，以及承德等生态涵养区的设立，均体现出三生空间的结构优化，是推动区域空间重构以助力京津
 227 冀一体化协调发展的重要手段。

228 当前，京津冀一体化发展步入关键阶段，恰逢“十五五”规划即将启动与京津冀协同发展战略深化实
 229 施的重要节点。因此对该区域开展研究，核心目的在于探索三生空间功能格局监测对京津冀一体化发展成
 230 效的表征作用，通过评估与对照分析，为后续区域高质量一体化发展提供参考依据。

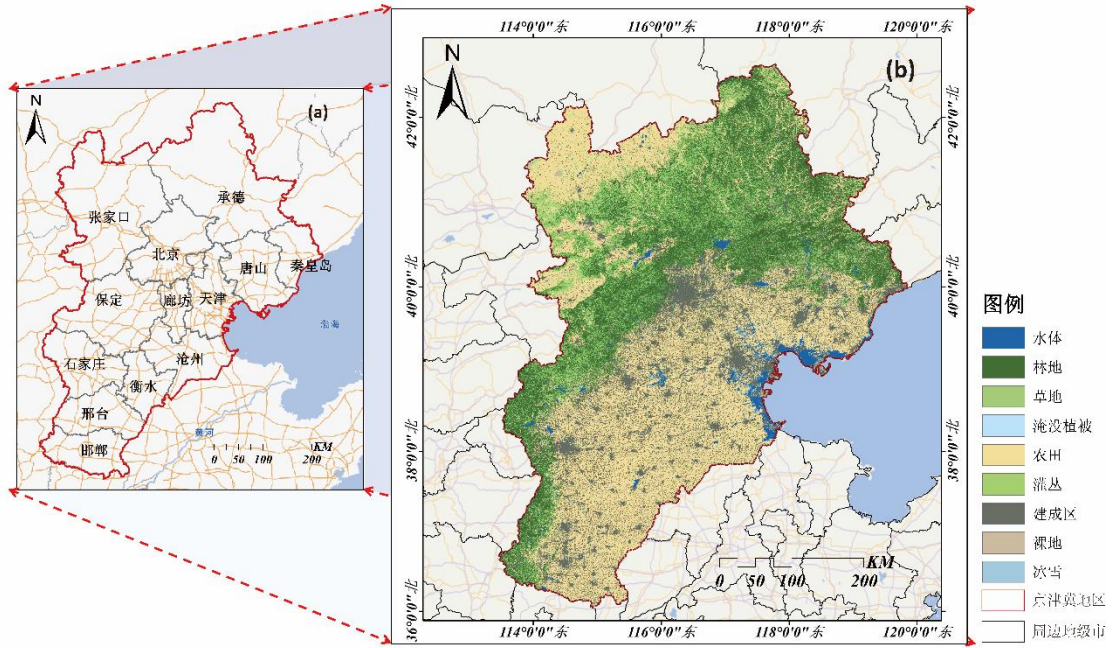


图 4 方法应用区域

Fig. 4 Application Area of the Method

2.2 综合制图方法应用与结果

基于京津冀城市群发展过程中的区域不平衡问题，以及协同一体化发展中产业布局优化、功能部门空间转移等国土空间规划需求，我们选择京津冀地区作为方法应用区域，具体实践如下：结合 2015 年后 POI 数据逐渐稳定的特征，以及《京津冀协同发展规划纲要（2015-2030 年）》覆盖“十三五”“十四五”的十年实施周期，我们将网格单元设定为 5km 尺度，开展京津冀地区全域 2016 年、2020 年及 2024 年的时序制图与“三生空间”定量、定性制图，通过分析“三生空间”强度分布及功能单元类型图谱变化，揭示一体化发展带来的空间规划效益。在具体实施过程中，共创建 15088 个网格单元，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；此外，经 POI 空间连接后，无 POI 点连接的“NA”类网格单元数量变化为 2016 年 1528 个、2020 年 958 个、2024 年 382 个，在总单元中占比始终较低，POI 数据的不断记录完善，表现着城市化进程的不断加快。依据 2.3.2 的原则，本研究在土地利用补充时的“三生空间”分类如下：生活空间对应的土地利用类型为建成区；生产空间对应的土地利用类型为农田；生态空间对应的土地利用类型为水体、林地、草地、淹没植被、灌木灌丛、裸地、冰雪。

2.2.1 定量制图结果

遵照 1.2.3 中的研究方法，我们对京津冀地区 15088 个 5km 网格单元的“三生空间”属性进行功能强度计算，最终获取了该区域 2016 年、2020 年及 2024 年生产空间、生活空间、生态空间的定量网格单元强度分布结果，如图 5 所示。借助定量制图的显色强度，结合非功能网格单元的数量与区位变化，可直观表征功能扩张强度及功能单元格局的演变特征。京津冀地区“三生空间”动态演化特征显著，具体如下：

(1) 生产空间：扩张节奏先缓后增，核心区网络成型

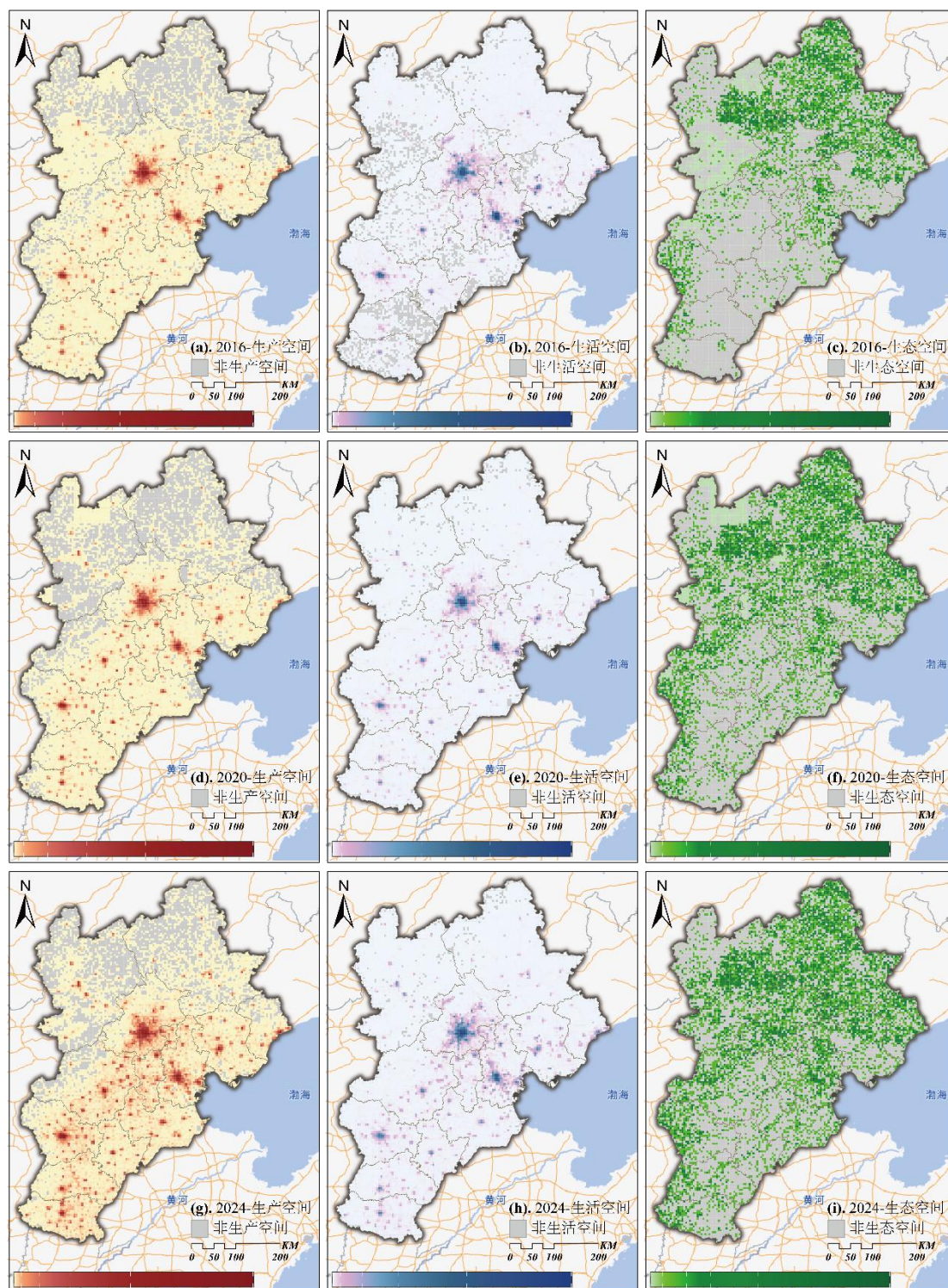
253 如图 5 (a) (d) (g) 所示, 生产空间呈现“先放缓后显著增加”的扩张趋势, 具体表现为灰色非生
254 产空间功能网格单元数量的变化: 2016 年为 3139 个, 2020 年增至 3904 个, 2024 年回落至 3183
255 个。这类非生产空间功能单元集中分布于北京市北侧的承德市、张家口市及周边区域。此外, 高值聚集区
256 持续向北京、天津及河北省南部的保定、石家庄、廊坊等地集中, 2024 年已形成明显的“蛛网状”功能
257 关联网络, 反映出区域生产协同性的显著提升。

258 (2) 生活空间: 扩张态势持续, 高值区与生产空间趋同

259 如图 5 (b) (e) (h) 所示, 生活空间是三类功能中功能网格占比最高的类型, 且呈现持续扩张态势
260 ——非生活空间功能网格单元数量从 2016 年的 1727 个, 降至 2020 年的 376 个, 2024 年进一步减少
261 至 254 个, 递减趋势明显。从强度分布来看, 生活空间强度聚集区分布集中且稳定, 新增扩张区域多为
262 低强度网格单元, 其高值聚集区的变化特征与区位分布结构和生产空间高度相似。这表明生活空间扩张与
263 生产空间布局协同推进, 契合区域人口集聚与城镇发展的空间逻辑, 也体现了城乡融合发展的趋势。

264 (3) 生态空间: 扩张与提质并行, 破碎化特征显著

265 如图 5 (c) (f) (i) 所示, 生态空间同样呈现持续扩张态势, 非生态空间功能网格单元数量逐年递
266 减, 2016 年为 9510 个, 2020 年降至 8139 个, 2024 年为 8001 个。与其他两类空间相比, 生态空间
267 的区位变化和空间特征最为突出, 以显著的破碎化形式实现空间扩张; 同时, 生态空间的动态演化伴随破
268 碎化分布的高值网格单元, 且高值空间数量明显增多、强度持续增强。这说明京津冀地区生态保护修复的
269 质量显著, 生态空间质量不断提升, 破碎化扩张模式也反映了区域对生态斑块的精细化保护与系统性修
270 复。



271

272

图 5 2016 年、2020 年和 2024 年京津冀地区三生空间的定量强度分布制图

273

Fig. 5 Quantitative Mapping of PLES in the BTH region for the years 2016, 2020, and 2024

274

2.2.2 定性制图结果

275

以京津冀地区 2016 年、2020 年、2024 年为时间节点，采用 2.2.4 中改良的土壤质地三分法（三角

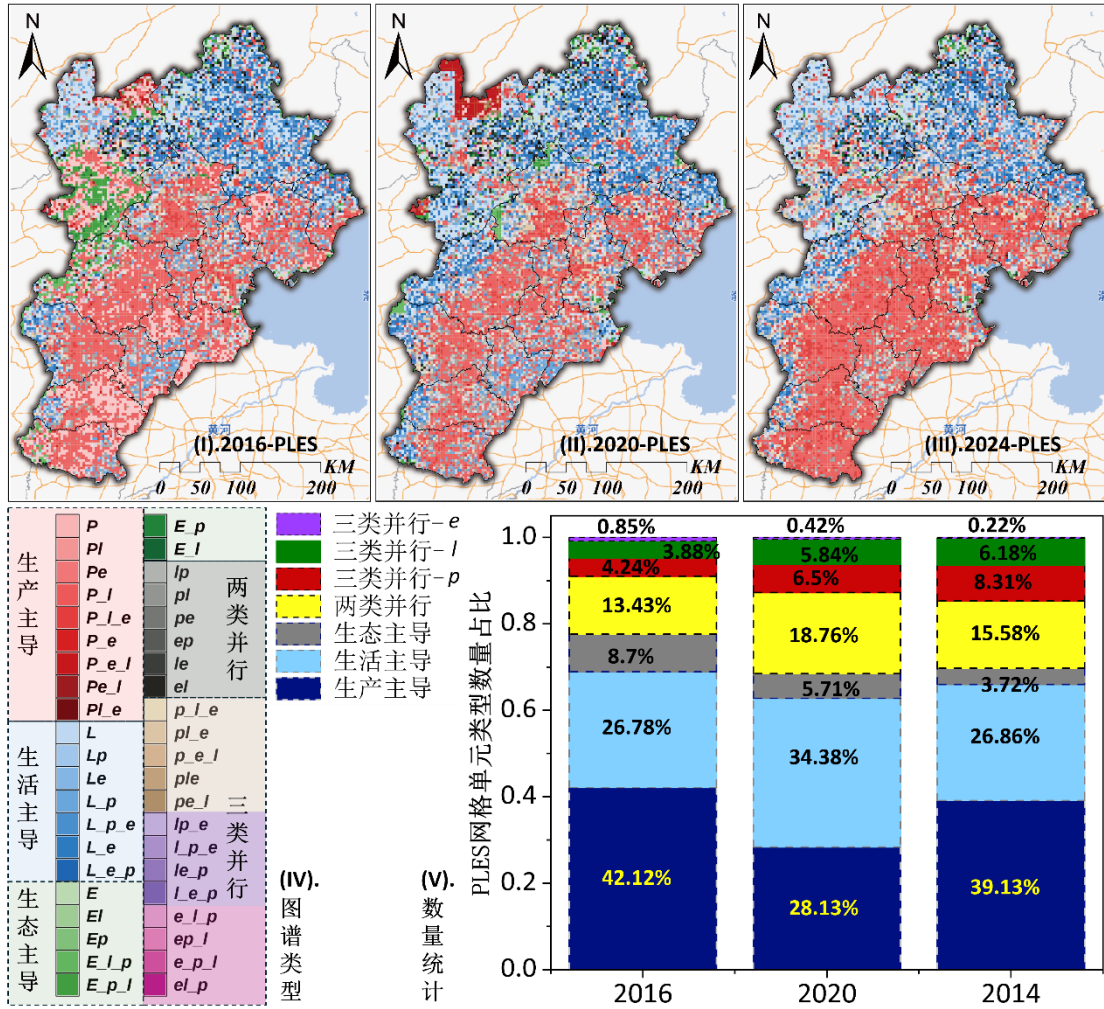
276

坐标图法）图谱绘制原则，我们共识别出 42 种三生空间网格功能单元图谱类型。与图 5 的功能强度分布

277 不同，此处的类型判别可直观反映区域发展水平、政策目标与人口环境条件共同作用下的空间现状；且类
278 型主导变化引发的功能空间编码调整，能直接作为政策与规划手段落实效果的对照依据，清晰凸显城市发
279 展需求的演变方向。基于成像显色的差异化需求及功能角色占比的编码规则，42 种类型按“单一功能主
280 导”（含大写英文字母编码）和“多种功能并行”（仅含小写字母编码）划分为 7 个组别：包括“生产主
281 导”“生活主导”“生态主导”3 个单一功能主导组；“生产-生活”“生产-生态”“生活-生态”3 个两类功能并行
282 组；以及“生产-生活-生态（p 为首）”“生活-生产-生态（l 为首）”“生态-生活-生产（e 为首）”3 个三类
283 功能并行组。为便于色带显色区分，我们将三类双功能并行组合并显色，最终完成 42 种类型向 7 个组
284 别的降维，定性制图结果如图 6（I）（II）（III）（IV）所示。

285 此外，从图 6（V）的图谱类型数量统计可见，京津冀地区“三生空间”类型以“生产主导”“生活主
286 导”及“两类并行”三类组别为主（共 21 种图谱类型）。其中，生活主导型空间集中分布于北京北部及
287 京津冀西部的河北省相关区域；生态主导型图谱数量持续减少，但结合图 4 中生态功能强度单元的扩张
288 趋势，可看出生态空间正逐步从“主导功能”向“附属支撑功能”转变——这既反映了城市化进程中人类
289 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；而三功能并行组中以“e 为首”的类型占
290 比最低，三年间均不足 1% 且呈持续下降态势。区域功能类型转换的核心变化集中在张家口 - 保定 - 石
291 家庄沿线及京津冀西部、西北部边界地区，主要发生“生产主导型”到“生活主导型”、“生态主导型”到
292 “生活主导型”的转换；同时，北京、天津及冀南、冀东相关地市的空间功能类型破碎化程度持续缓解，
293 尤其是 2024 年“生产主导型”空间形成稳定且集中的主要类型分布格局，体现了区域生产功能的集聚整
294 合与空间布局优化。

295



296

297

图 6 2016 年、2020 年和 2024 年京津冀地区三生空间的定性图谱类型制图

298

Fig. 6 Qualitative Mapping of PLES in the BTH region for the years 2016, 2020, and 2024

299 3 讨论

300 3.1 方法应用结果精度讨论

301 基于我们所使用数据的高精度，关于制图结果的精度讨论，我们将以制图结果所反映的城市发展动态
302 规律为核心，结合具体城市功能空间的规划现状评估及政策文件目标展开对比分析。

303 基于京津冀地区的应用场景，我们选取了两类核心参考资料：一是北京市发展和改革委员会开发整理
304 的北京市产业地图（来源：多方交互应用平台 <https://project.fgw.beijing.gov.cn/zt/2024/cydt/>）中的“京津冀
305 协同创新共同体空间布局图”；二是《京津冀国土空间规划（2021—2035年）》。结合 3.2.1 和 3.2.2 中对
306 制图结果的空间解读，可清晰识别三生空间的演化特征，这既揭示了京津冀一体化发展的阶段性成效，契
307 合《京津冀国土空间规划（2021—2035年）》中“主体功能明显、优势互补、高质量发展”的空间布局要
308 求，也与布局图中“西北部生态涵养区”“中南部功能区”、“发展轴”及“节点和城市连接网络”等空间规划特
309 征高度吻合，具体表现为：区域空间协同性显著增强，生产与生活空间高值区向京、津及冀中南核心城市
310 集聚形成“蛛网状”关联网络，既体现了非首都功能疏解与区域产业协同成效，也通过生活空间与生产空
311 间的高度协同提升了人口、公共服务与产业发展的空间匹配度，推动城镇化质量持续优化；同时生态空间
312 实现扩张与质量提升并行，破碎化高值区逐步形成，筑牢华北生态屏障，实现了发展与保护的统筹协调。

313 综上，制图方法的结果与现有规划政策、发展目标的高度契合，不仅印证了该方法的可靠性，也凸显
314 了其在区域规划发展中的重要应用价值与潜力。

315 3.2 方法的应用推广讨论

316 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
317 理数据与《国民经济行业分类标准（GB/T 4757-2017）》的整合分析，有效揭示了功能时空强度与类型的动
318 态演变规律。基于该方法在京津冀地区的实践验证与显著应用效果，在这个部分从结果深化应用、多领域
319 融合拓展等维度，展开方法的推广价值与应用路径讨论。

320 **（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，
321 直接反映了区域内人类开发活动与环境承载的互动关系。如京津冀案例中，北京市海淀区以生产 - 生活功
322 能为主导的区域特征，与河北省承德市以生态功能为核心的空间属性，清晰呈现了不同地理区位的功能定
323 位差异。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：
324 若需推进生态涵养区的规划建设，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
325 象，通过功能置换、开发强度管控等方式实现生态保护与发展的协调；此外，针对建成环境集中区域的三
326 生空间单元，可通过测算其城市热效应强度，一方面辅助局部气候区的精准识别，另一方面可在基于自然
327 的解决方案框架下，通过景观格局调整优化部分单元的三生空间功能类型，进而助力城市降温与人居环境
328 改善。此外，还可以能基于规范网格的功能类型的基础上以物质流分析开展城市代谢的精准空间监测与规
329 划管理。

330 **（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，
331 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
332 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，在任职平衡优化、路网
333 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

334 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
335 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
336 造方案的科学制定。

337 **(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
338 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
339 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
340 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；同时可
341 基于类型考量，通过类型调控转变，实现区域定位格局的精准优化。

342 **(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
343 块，构建完整的，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，
344 引入大数据算法模型，能够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
345 智能在相关领域的应用途径，为城市治理的智能化、精准化提供技术支撑。这一方向可参考北京市发展
346 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
347 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，实现了“地图 + 数据 + 服
348 务”的交互功能，为城市产业规划与企业精准布局提供了高效支撑，可为城市规划政策实施交互式可视化
349 平台的建设提供实践借鉴。

350 3.3 方法的局限与不足

351 当前方法在适配深度规划实践与复杂计算需求时，仍存在一定的局限性，仍然具备优化空间。随着城
352 市化加速推进，人口需求与区域功能供给的动态适配性要求不断提升，现有以 POI 数据为主、土地利用
353 数据为辅的研究模式，虽已整合行业服务、自然属性等信息并归为三类功能类型，但仍存在显著不足：一
354 是对 POI 数据字段的挖掘不够充分，属性分类缺乏精细化拆分；二是尚未实现对区域复合功能区的地量
355 强度监测，难以直接匹配现实中功能混合的空间特征；三是未建立起数据属性、社会功能与政策定位三者
356 的有效关联，导致分析维度不够全面。

357 4 结论

358 三生空间的动态变化对揭示城市发展规律、支撑空间调控规划具有重要意义，但当前精细尺度下其功
359 能属性的有效提取仍是未解决的关键问题。现有研究对功能空间的定义与识别多局限于土地利用自然属
360 性，对社会经济驱动因素、人口发展需求及建成环境功能异质性的考量不足，尤其在全域尺度三生空间功
361 能的完整辨析中存在明显短板。

362 针对上述问题，本文基于区域形态、景观格局与社会需求的内在逻辑，以网格化尺度为研究载体，构
363 建多源地理数据支撑的三生空间功能识别与制图方法，并开展实证应用。该方法具体分为四步：（1）获取
364 Google Earth Engine 平台 GeoAI 产品 Dynamic World 提供的 10m 分辨率稳定土地利用数据并完成预处
365 理；参照《国民经济行业分类标准（GB/T 4757-2017）》对 POI 数据中的地理实体进行三生空间功能属性
366 划分，实现地理实体社会经济属性与自然属性的直接功能表征。（2）基于上述数据完成网格单元的三生空
367 间属性附着与计算，充分兼顾区域景观尤其是建成环境的功能异质性；针对 POI 覆盖受城市化程度限制
368 的问题，采用土地利用自然属性补充低人类干扰区域（无 POI 数据附着的网格单元）的属性信息，最终

369 实现全域尺度网格单元的三生空间属性完整附着。(3) 计算每个网格内三生空间各功能类型的“点 - 面”
370 要素占比: 即对 POI 点数据统计对应功能类型的数量占比, 对土地利用数据核算对应功能类型的面积占
371 比, 综合两类占比作为强度制图的显色依据; 结合时序数据分析, 可清晰识别具体功能的空间扩张路径与
372 强度时空演变特征。(4) 优化传统三分法, 构建功能图谱编码体系: 通过计算网格单元内三生空间的角色
373 占比, 采用英文大小写组合与排列顺序进行图谱类型编码, 为城市精准管理与规划提供便捷工具。

374 结合中国城市群战略与京津冀一体化建设需求, 本文选取京津冀地区开展方法验证, 通过 5km 网格
375 的定量强度制图与定性图谱构建, 得出以下结果: 生产与生活空间功能强度高值区呈现“蛛网状”城市链
376 接网络特征, 生态空间功能强度呈增强趋势但破碎化问题突出; 同时完整识别出 42 种功能单元图谱类
377 型。应用结果证实了该制图方法的有效性, 也彰显其在区域可持续发展研究中的实用价值。需说明的是,
378 本研究构建的方法仍存在不足, 主要体现在网格关联属性的深度调用优化方面, 未来需进一步丰富三生空
379 间功能辨析的层级与维度。

380 最后, 本文探讨了该方法在现有地学数据定量实践中的推广应用方向, 包括完善规划管理交互平台、
381 强化类型图对城市生活圈规划设计的实践指导等。总体而言, 研究从多源地理大数据的城市计算视角出
382 发, 建立与规划方法、城市发展政策的呼应机制, 为大数据时代下区域与城市的可持续发展及规划提供技
383 术支撑。

384

385 参考文献

- 386 [1] 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*, 第 61 卷, 第 11 期,
387 第 1123-1131 页, 2006 年 11 月.
- 388 [2] J. Yin *et al.*, “Integrating remote sensing and geospatial big data for urban land use mapping: A review,”
389 *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 103, p. 102514, Dec. 2021,
390 doi: 10.1016/j.jag.2021.102514.
- 391 [3] T. Elmqvist *et al.*, “Urbanization in and for the Anthropocene,” *npj Urban Sustain*, vol. 1, no. 1, p. 6, Feb.
392 2021, doi: 10.1038/s42949-021-00018-w.
- 393 [4] J. V. Henderson, A. J. Venables, T. Regan, and I. Samsonov, “Building functional cities,” *Science*, vol. 352,
394 no. 6288, pp. 946–947, May 2016, doi: 10.1126/science.aaf7150.
- 395 [5] 黄金川, 林浩曦, 漆潇潇, Jinchuan H., Haoxi L., and Xiaoxiao Q., “面向国土空间优化的三生空间研究进
396 展,” *Progress in Geography*, vol. 36, no. 3, pp. 378–391, 2017, doi: 10.18306/dlkxjz.2017.03.014.
- 397 [6] 方创琳. “中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向,” *地理学报*, 第 69 卷, 第 8 期, 第
398 1130-1144 页, 2014 年 8 月.
- 399 [7] 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*, 第 71 卷, 第 1
400 期, 第 49-65 页, 2016 年 1 月.
- 401 [8] 中国社会科学院财经战略研究院课题组. “中国特色城市现代化的理论内涵与战略取向 —— 学习贯彻
402 2025 年中央城市工作会议精神,” *经贸经济*, 第 46 卷, 第 10 期, 第 5-17 页, 2025 年 10 月.
- 403 [9] Huang A. *et al.*, “Research progress of the identification and optimization of production-living-ecological
404 spaces,” *Progress in Geography*, vol. 39, no. 3, pp. 503–518, 2020, doi: 10.18306/dlkxjz.2020.03.014.
- 405 [10] G. Zhou, D. Zhang, Q. Zhou, and T. Shi, “Study on the Spatiotemporal Evolution Characteristics of the
406 ‘Production–Living–Ecology’ Space in the Yellow River Basin and Its Driving Factors,” *Sustainability*, vol.

- 407 14, no. 22, p. 15227, Nov. 2022, doi: 10.3390/su142215227.
- 408 [11] Y. Zhao, J. Cheng, Y. Zhu, and Y. Zhao, "Spatiotemporal Evolution and Regional Differences in the
409 Production-Living-Ecological Space of the Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze
410 River," *IJERPH*, vol. 18, no. 23, p. 12497, Nov. 2021, doi: 10.3390/ijerph182312497.
- 411 [12] H. Li, C. Fang, Y. Xia, Z. Liu, and W. Wang, "Multi-Scenario Simulation of Production-Living-Ecological
412 Space in the Poyang Lake Area Based on Remote Sensing and RF-Markov-FLUS Model," *Remote Sensing*,
413 vol. 14, no. 12, p. 2830, June 2022, doi: 10.3390/rs14122830.
- 414 [13] Y. Chen, X. Su, and X. Wang, "Spatial Transformation Characteristics and Conflict Measurement of
415 Production-Living-Ecology: Evidence from Urban Agglomeration of China," *IJERPH*, vol. 19, no. 3, p.
416 1458, Jan. 2022, doi: 10.3390/ijerph19031458.
- 417 [14] T. Zhang *et al.*, "Research on Sustainable Land Use in Alpine Meadow Region Based on Coupled
418 Coordination Degree Model—From Production–Living–Ecology Perspective," *Sustainability*, vol. 16, no. 12,
419 p. 5213, June 2024, doi: 10.3390/su16125213.
- 420 [15] 郎崢, 陈德超, 杨子豪, 等. "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*,
421 第 37 卷, 第 5 期, 第 40-49 页, 2025 年 10 月.
- 422 [16] 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
423 经济与科技*, 第 34 卷, 第 14 期, 第 34-36 页, 2023 年 7 月.
- 424 [17] 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*, 第 72 卷, 第 7
425 期, 第 1290-1304 页, 2017 年 7 月.
- 426 [18] Y. Wang and S. Yang, "Identification of surface thermal environment differentiation and driving factors in
427 urban functional zones based on multisource data: a case study of Lanzhou, China," *Front. Environ. Sci.*, vol.
428 12, p. 1466542, Sep. 2024, doi: 10.3389/fenvs.2024.1466542.
- 429 [19] M. Ni, Y. Zhao, C. Ma, W. Jiang, Y. Xie, and X. Hou, "Spatial Identification and Change Analysis of
430 Production-Living-Ecological Space Using Multi-Source Geospatial Data: A Case Study in Jiaodong
431 Peninsula, China," 2023.
- 432 [20] 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)*, 第
433 55 卷, 第 4 期, 第 417-426 页, 2022 年 4 月.
- 434 [21] 刘小茜, 马斯克, 杨磊, 等. "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
435 理学报*, 第 80 卷, 第 10 期, 第 2720-2736 页, 2025 年 10 月.
- 436 [22] 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*, 第 34 卷, 第 6 期, 第 187-193
437 页, 2022 年 6 月.
- 438 [23] 陈建坤, 牟风云, 陈林, 等. "重庆市三生空间时空格局研究," *西北林学院学报*, 第 37 卷, 第 3
439 期, 第 246-253 页, 2022 年 3 月.
- 440 [24] J. Fu, Q. Gao, D. Jiang, X. Li, and G. Lin, "Spatial-temporal distribution of global production-living-
441 ecological space during the period 2000–2020," *Sci Data*, vol. 10, no. 1, p. 589, Sept. 2023, doi:
442 10.1038/s41597-023-02497-1.
- 443 [25] S. Wang, J. Tian, A. Namaiti, J. Lu, and Y. Song, "Spatial pattern optimization of rural production-living-
444 ecological function based on coupling coordination degree in shallow mountainous areas of Quyang County,
445 Hebei Province, China," *Front. Ecol. Evol.*, vol. 11, p. 1169007, May 2023, doi: 10.3389/fevo.2023.1169007.
- 446 [26] Z. Bu, J. Fu, D. Jiang, and G. Lin, "Production–Living–Ecological Spatial Function Identification and Pattern
447 Analysis Based on Multi-Source Geographic Data and Machine Learning," *Land*, vol. 12, no. 11, p. 2029,
448 Nov. 2023, doi: 10.3390/land12112029.
- 449 [27] Y. Yang *et al.*, "Spatial Identification and Interactive Analysis of Urban Production—Living—Ecological
450 Spaces Using Point of Interest Data and a Two-Level Scoring Evaluation Model," 2022.

451 [28] G. Lou, Q. Chen, K. He, Y. Zhou, and Z. Shi, "Using Nighttime Light Data and POI Big Data to Detect the
452 Urban Centers of Hangzhou," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 15, p. 1821, Aug. 2019, doi: 10.3390/rs11151821.

453 [29] T. Cai and J. Duan, "Construction and application of characteristic townscape knowledge graph based on
454 space gene theory," *Cities*, vol. 167, p. 106289, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.cities.2025.106289.

455 [30] 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-
456 1940

457 [31] 李国平, 何晶彦, 冯雨雪. "京津冀协同发展: 分析框架、实践进展和路径优化," *城市发展研究*, 第
458 31 卷, 第 12 期, 第 19-27 页, 2024 年 12 月.

459 [32] 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*, 第 76 卷, 第 6
460 期, 第 1422-1437 页, 2021 年 6 月.

461 [33] 陆玉麒. "中国空间格局的规律认知与理论提炼," *地理学报*, 第 76 卷, 第 12 期, 第 2885-2897
462 页, 2021 年 12 月.

463 [34] Y. Liang and Y. Hu, "Regional development assessment based on POIs and Geotree: a case study in Beijing-
464 Tianjin-Hebei region," *Environ Dev Sustain*, vol. 26, no. 7, pp. 18785–18809, June 2023, doi:
465 10.1007/s10668-023-03415-6.

466 [35] Z. Jun, Y. Xiao-Die, and L. Han, "The Extraction of Urban Built-Up Areas by Integrating Night-Time Light
467 and POI Data—A Case Study of Kunming, China," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 22417–22429, 2021, doi:
468 10.1109/ACCESS.2021.3054169.

469 [36] Y. Fang, H. Yu, Y. Chen, and X. Fu, "Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of the
470 Retail Industry in Ningbo City in Eastern China Based on POI Data," *Sustainability*, vol. 16, no. 17, p. 7525,
471 Aug. 2024, doi: 10.3390/su16177525.

472 [37] C. F. Brown *et al.*, "Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping," *Sci Data*,
473 vol. 9, no. 1, p. 251, June 2022, doi: 10.1038/s41597-022-01307-4.

474 [38] 何海龙, 齐雁冰, 吕家珑, 等. 中国土壤质地分类系统的发展与建议修订方案[J]. *农业资源与环境学报*,
475 2023, 40(3): 501-510.

476 [39] 郭中领, 张科利, 董建志, 等. "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,"
477 *地理科学*, 第 31 卷, 第 10 期, 第 1254-1260 页, 2011 年 10 月.

478 [40] Y. Wang, H. Liu, G. Mao, J. Zuo, and J. Ma, "Inter-regional and sectoral linkage analysis of air pollution in
479 Beijing–Tianjin–Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration of China," *Journal of Cleaner Production*, vol. 165,
480 pp. 1436–1444, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.210.

481 [41] X. Ren, R. Xiong, and T. Ni, "Spatial network characteristics of carbon balance in urban agglomerations— a
482 case study in Beijing-Tianjin-Hebei city agglomeration," *Applied Geography*, vol. 169, p. 103343, Aug.
483 2024, doi: 10.1016/j.apgeog.2024.103343.

484 [42] T. Zhou *et al.*, "Addressing the rural in situ urbanization (RISU) in the Beijing–Tianjin–Hebei region: Spatio-
485 temporal pattern and driving mechanism," *Cities*, vol. 75, pp. 59–71, May 2018, doi:
486 10.1016/j.cities.2018.01.001.

487 [43] 颜建军, 熊万灵, 刘亦文, 李铭轩. 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
488 冀地区为例. *生态学报*, 2025, 45 (23)

489 [44] 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*, 第 38 卷, 第 2 期, 第 1-8
490 页, 2024 年 3 月.

491 [45] 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
492 释," *天津社会科学*, 2024 年第 1 期, 第 85-97 页, 2024 年 1 月.

493