文章编号：1673-9493（2025）01-0001-09　中图分类号：TU982.2　文献标识码：A　DOI：10.19830/j.upi.2025.053

基于“精准适配”的多情景、多规则都市圈三生空间优化探索——以北京首都都市圈为例

Exploration of Multi-scenario and Multi-rule Optimization for Production-Living-Ecological Spaces in Metropolitan Areas Based on “Precise Adaptation”: A Case Study of Beijing Capital Metropolitan Area

王凯　周亚杰　穆望舒　王文静　李长风　徐辉　贾鹏飞　秦维
WANG Kai, ZHOU Yajie, MU Wangshu, WANG Wenjing, LI Changfeng, XU Hui, JIA Pengfei, QIN Wei

摘要：我国的都市圈具有人口密度高、城镇与自然嵌套复杂的特点，生产、生活、生态空间之间矛盾突出、协调性不足。本文立足“精准适配”的区域规划理念，构建了一个多目标情景驱动、多规则体系约束的空间优化推演模型，提出了不同情景下具有多样性、可变性的空间格局优化方案。以北京首都都市圈为例，在街镇单元开展指标测算和模型推演，探索了从整体规划到局部优化的协同推演方法。分析结果验证了该空间优化策略在提升都市圈的韧性和功能效率方面的有效性，为提升区域整体的生态与经济效益提供了科学方法；该方法也突破传统的用地边界推演技术，为区域规划优化空间结构提供了量化分析手段。

Abstract: China’s metropolitan areas are characterized by high population density and complex interlacing of urban and natural landscapes, leading to prominent conflicts and insufficient coordination among Production-Living-Ecological Spaces. Based on the “Precise Adaptation” regional planning concept, this paper builds a multi-objective scenario driven, multi-rule system constrained spatial optimization model, and proposes a spatial optimization scheme with diversity and variability under different scenarios. Taking Beijing Capital Metropolitan Area as a case study, the research conducts indicator measurement and model derivation at the subdistrict/township level, exploring a synergistic derivation method from macro-planning to local optimization. The analytical results validate the effectiveness of this spatial optimization strategy in enhancing the resilience and functional efficiency of metropolitan areas, providing a scientific approach to improve regional ecological and economic benefits. This methodology also breaks through traditional land-use boundary derivation techniques, offering a quantitative analytical tool for optimizing spatial structures in regional planning.

关键词：精准适配；都市圈；多目标情景；规则体系；空间优化推演

Keywords: Precise Adaptation; Metropolitan Area; Multi-objective Scenario; Rule System; Spatial Optimization Derivation

国家“十四五”重点研发计划“城市群都市圈空间优化关键技术”课题五“典型城市群都市圈多情景空间优化的技术集成及应用示范”（2022YFC3800105）

与世界上其他主要国家或地区相比，我国的都市圈具有人口密度更高、连绵范围更广、城镇与自然嵌套更复杂等特征。作为都市圈的主要空间构成要素，生产、生活与生态空间（下称“三生空间”）之间的矛盾冲突剧烈，三生空间不协调导致生态安全风险高、空间利用不可持续、区域系统性失衡等突出问题，进而造成巨大的社会经济损失。优化三生空间成为协调城镇与自然的关系、统筹区域发展与保护、推进各项功能合理布局的重要前提。三生空间优化的核心是解决城镇（生产、生活空间）与自然（生态空间）的适配问题，以及生产与生活空间的协同问题。

在技术方法层面，以往区域规划依赖人为主观经验较多，科学量化的分析评估和空间推演相对不足。当前学术界对于区域空间的优化推演方法与模型多是对用地拓展边界进行模拟，或分别对生产、生活、生态空间的单系统结构进行优化，缺乏系统性的推演优化方法，难以实现科学统筹下的全局和整体空间最优。近年来，国土空间规划通过开

作者：王凯，博士，中国城市规划设计研究院，院长，教授级高级城市规划师。caupdwk@163.com
周亚杰（通信作者），硕士，中国城市规划设计研究院，正高级工程师。414999480@qq.com
穆望舒，博士，北京师范大学，讲师。muwangshu@bnu.edu.cn
王文静，硕士，中国城市规划设计研究院西部分院，副总规划师 / 研究中心主任，正高级工程师。43211992@qq.com
李长风，硕士，中国城市规划设计研究院，高级工程师。278650505@qq.com
徐辉，硕士，中国城市规划设计研究院战略研究中心，执行副主任，教授级高级城市规划师。flyyinghui@126.com
贾鹏飞，博士，中国城市规划设计研究院，高级工程师。jiapengfei9579@163.com
秦维，硕士，中国城市规划设计研究院西部分院，正高级工程师。513587449@qq.com

展资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价等土地使用现状的分析，在市域行政边界范围内划定城镇（生产、生活）空间和生态空间的开发管制边界，但对都市圈层面三生空间的格局优化仍缺乏有效的方法工具。为此，本研究基于笔者提出的“精准适配”区域规划理论方法[1-4]，探索科学量化的都市圈空间优化技术方法。转变过去区域规划较为依赖主观经验的“灰箱”方法，将经验规则与数据、模型驱动相结合，构建对三生空间进行多系统整体优化的“白箱”规划技术体系。

1 相关文献综述

都市圈三生空间优化的相关研究主要包括对三生空间的分析评价和基于多目标情景的优化推演等，涉及城乡规划、土地利用规划、生态规划等领域的交叉研究[5-6]。

1.1 三生空间分析评价方法

既有的分析评价方法包括空间要素评价、空间功能评价和空间结构评价三类（表 1）。空间要素评价方法主要从土地利用类型角度，将各类用地归为生产、生活、生态空间三大类，基于土地利用／覆被数据，通过地类功能评分和格网统计进行评价。在评价方法上，基于空间可达、距离和密度等测评的三生空间适宜性评价为土地利用的绩效评估提供了有效方法。如基于深度学习算法的自注意力残差神经网络（SARes-NET）对生态、农业和城镇空间适宜性开展评估[10]，提高了分析精度。空间功能评价包括指标体系评价和功能价值测评等方法。空间结构评价方面，近年来多采用高分辨率遥感数据和 POI、LBS 等大数据对城市的三生空间格局进行分析评价，识别三生空间的分布特征和变化规律[9]。

人类对空间的利用往往是复合的，有研究归纳了 25 种三生空间功能组合模式，且按照主导功能会产生不同的价值评估[5]。从评价对象来看，应该包括客观的空间对象和驱动空间变化的其他因素，但目前的评价方法主要基于前者，对于驱动空间变化的社会经济、气候环境等考虑不足。同时，对于空间资源利用的复合性特点，评价的价值取向尤为重要，这些价值目标往往也是复合的，相互之间存在协调关系、耦合关系、反馈关系，这方面的系统研究尚在起步阶段。

1.2 三生空间优化方法与推演模型

在评价三生空间现状的基础上，通过预设条件对未来的三生空间规模、结构和布局开展推演，以优化各类资源的配置。推演需要结合不同目标设定情景，经济发展、粮食安全、生态保护等情景往往是推演的前提，这些情景假设分别对应生产、生活、生态的主导目标导向，对三类空间之间的转换起到约束作用。常见方法有以下几种：（1）土地利用情景模拟法。根据区域社会经济发展特征，设定不同情景下的土地利用数量约束和限制目标，借助多目标规划模型，确定未来某时点的土地利用类型数量结构；（2）多功能优化路径法。构建识别三生空间的土地利用多功能指标体系，对主导功能立足多情景进行优势度预判，进而确定三生空间的数量和位置；（3）三生空间优化的分区方法。结合区域资源禀赋、区位条件、经济基础和发展战略，明确不同类型空间的优化方向，提出空间分区的原则和方案[6,8]。

模型方面，目前多针对用地类型的调整进行推演模拟。灰色多目标优化—土地利用变化模拟（GMOP-PLUS）在约束性条件下的情景推演方面具有较高准确度[11-12]。多目标规划—未来土地利用模拟（MOP-FLUS）能够先确定整体效益下的三生空间数量结构的优化，再进行各类空间的分布模拟[13]。最小累积阻力—未来土地利用模拟（MCR-FLUS）是结合最小累积阻力（MCR）模型划定生态适宜区（ESZ），再综合考虑各种社会经济和自然环境因素，利用马尔可夫链模型和未来土地利用模拟（FLUS）模型预测未来城市拓展边界[14]（表 2）。

目前尚缺少系统性的三生空间优化方法与推演模型，优化策略仅停留在构建分区的层面，缺少全局联动的优化策略，特别是联动多尺度空间单元的优化方法。以 FLUS 和 PLUS 为主的推演模型总体上对区域各类空间的边界扩展或调整模

表 1 三生空间分析评价的主要技术方法

方法		描述	应用实例
空间要素评价	地类分析法	基于土地利用／覆被数据，通过地类功能评分和格网统计进行评价	李广东等通过整合生态系统服务与景观功能分类，对三生功能进行细化评价[5]
空间功能评价	指标体系评价	利用多源数据，构建三生功能评价体系，对行政单元或栅格单元的三生功能进行定量评价	单薇等采用多尺度融合数学模型，对江苏省的功能变化和耦合特征进行测评[7]
	功能价值测评	利用空间功能价值测算函数群建立用地功能测度体系，通过对用地主导功能的定量测度识别三生空间	冀正欣等针对张家口市三生空间的 9 种功能组合模式，开展土地利用多功能价值评估[8]
空间结构评价	空间结构分析法	基于多源、多类型数据对空间结构进行识别	曹根榕等以上海中心城区为例，利用城市 POI 数据并采用网格分析法、样方比例法、层次分析法进行三生空间识别和分析[9]

表 2 三生空间优化涉及的主要推演模型

模型名称	描述
灰色多目标优化—土地利用变化模拟（GMOP-PLUS）	通过整合多目标优化算法和土地利用变化模拟，预测优化土地利用结构和空间分布
多目标规划—未来土地利用模拟（MOP-FLUS）	通过设置决策变量、建立目标函数和约束条件来优化土地利用结构，并预测不同情景下的土地变化
最小累积阻力—未来土地利用模拟（MCR-FLUS）	结合最小累积阻力模型和未来土地利用模拟模型，通过构建不同情景模拟未来三生空间分布并予以优化，如根据生态系统服务重要性和生态环境敏感性评价来优化区域生态安全格局[15]

拟较为有效，但由于缺少空间开发与保护的相关规则的输入，对区域层面的总体结构性趋势演变缺少预判，导致与后续区域规划的决策之间缺少有效衔接。目前仅在单项空间优化方面有较为有效的方法，如从人口分布及其与 TOD 交通系统的耦合关系研究出发，开展多尺度的大城市地区的生活圈结构优化[16]。三生空间优化对于促进不同尺度的国土空间资源保护利用十分重要[17]：宏观层面的三生空间比例结构是衡量国土空间保护与合理开发的依据；中观层面的三生空间细分项比例是区域空间格局优化的依据；微观层面的三生空间指标是用地布局优化的依据。其中对于都市圈三生空间优化，涉及在全局层面确定三生空间总体结构，中观层面确定关键节点和廊道，微观层面优化具体地块布局等要求，因此需要构建多尺度的空间优化模型，并找到衔接宏观和微观的中间单元层，但上述的推演方法与模型尚未考虑。

2 基于"精准适配"的都市圈空间优化理论方法

2.1 精准适配的区域规划理论方法

笔者基于多年实践，提出城镇与自然"精准适配"的区域规划理论方法：以区域中城镇与自然两个复杂巨系统为研究对象，以实现人居环境的宜居、安全为目标，解析两个复杂巨系统的互动机理，构建二者之间的适配模型，提出以自然本底分析为基础构建适配的城镇空间格局[14]。基于上述思想，构建由模型、数据驱动的"精准分析—适应布局—动态评估"的方法框架和技术体系。"精准分析"指以宜居和安全为目标导向，构建多因子、高精度的自然本底分析模型，精准识别国土空间中的"宜居""非宜居"和"安全""不安全"空间；"适应布局"指在精准分析的基础上构建和优化与自然本底适配的城镇空间格局，将城镇布局的经验规则与数据、模型驱动相结合，开展多情景、多规则的空间优化推演；"动态评估"指对城镇发展情况以及与自然的适配情况进行动态监测评估和调整优化，从而实现动态可持续发展。

精准适配的空间优化函数：

$$\max f(x,y,z,t) = \max f_L(x,y,t) \times f_S(x,y,t) \quad (1)$$

式（1）中 f_L、f_S 指基于宜居、安全两个目标分别开展自然本底的人居条件适宜性评价分析和人居条件安全性评价分析，识别自然本底中的适宜建设空间和安全风险空间；$f(x,y,z,t)=f_L(x,y,t) \times f_S(x,y,t)$ 表示城市发展测度函数，其中 $x=(x_1,\ldots,x_k)$ 表示人居生活、经济发展、基础设施、公共服务设施等要素，$y=(y_1,\ldots,y_k)$ 表示气候、土地、生态、水等宜居类要素，$z=(z_1,\ldots,z_n)$ 表示地质、水文、低温、高温等安全类要素，t 表示时间（年份），可以表示某一年或若干连续年份。

宜居性分析评价函数：

$$\max_{x_i} f_L(x_i,y,t) \leqslant g_L(y,t) \quad (2)$$

$g_L=g_L(y,t)$ 表示宜居性评价计算。

安全性分析评价函数：

$$\max_{x_i} f_S(x_i,z,t) \leqslant g_S(z,t) \quad (3)$$

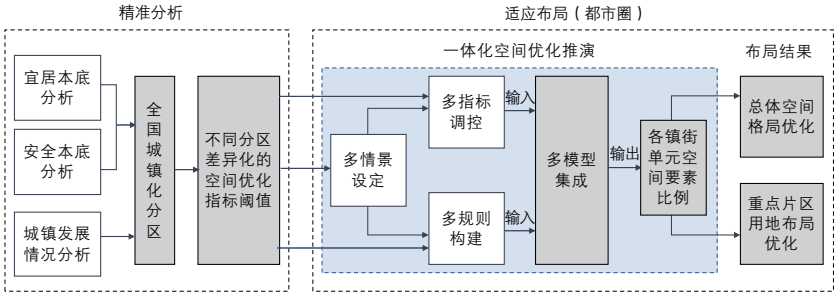
$g_S=g_S(z,t)$ 表示安全性评价计算。

2.2 基于精准适配的都市圈三生空间优化方法

基于精准适配的理论方法，本研究构建了从全国层次的精准分析和分区分类指引到都市圈层次三生空间适应布局的总体思路：在全国开展自然本底精准分析和城镇发展情况分析，划定差异化的城镇化分区和都市圈分类，并提出不同地区都市圈的差异化空间优化指标阈值，将其作为都市圈空间优化的重要前提；在都市圈层次构建多情景、多规则的三生空间优化技术体系，开展模型、数据驱动的空间优化推演，实现都市圈的适应布局（图 1）。

2.2.1 全国城镇化分区和都市圈分类指引

以宜居、安全为目标导向，构建多因子、多灾种的自然本底精准分析模型，识别全国国土空间中的适宜建设空间和不同地区的灾害风险；并结合人口、经济等城镇发展情况分析，将全国国土空间划分为若干个差异化的城镇化分区，包括体现不同地区适宜建设程度和城镇发展情况差异的一级分区，以及体现灾害风险类型差异的二级分区，由此也将位于



注：白底色框表示分析或输入条件，灰底色框表示模型方法或输出结果，蓝底色框表示“一体化空间优化推演”的总体流程。

图 1 都市圈三生空间优化总体思路

不同分区的都市圈划分为不同的类型[18]。基于不同分区空间指标的归纳总结和回归分析，发现密度强度、绿地等指标与气候条件等自然地理条件因子高度相关。面对未来气候变化等新趋势，以实现人居环境的宜居、安全为目标，在计算各分区现状空间指标阈值的基础上，因地制宜提出不同分区差异化的空间优化关键指标阈值，包括区域层面的全域生态空间①面积比例，建成区层面的人口密度、毛容积率、绿化覆盖率、蓝绿空间面积比例，作为不同类型都市圈三生空间优化的重要前提和约束条件。

2.2.2 都市圈三生空间优化技术方法

在都市圈层面，构建“多情景设定—多规则构建—多指标调控—多模型集成”的一体化空间优化推演技术体系。

• 多情景设定：面对全球气候变化加剧以及未来经济社会和空间发展政策的不确定性，研判和设定都市圈未来发展的多目标情景；基于全国层面提出的不同分区空间优化的关键指标阈值，结合设定的目标情景，提出都市圈空间优化的关键指标阈值。

• 多规则构建：基于多情景设定，利用大模型将规划师对于都市圈空间发展规律和布局规则的经验进行参数化表达，构建规模、结构、边界等多规则体系，作为空间优化推演的重要约束和输入条件。

• 多指标调控：构建能够体现都市圈空间特征和空间绩效的指标体系，将图形化的空间现状图进行指标化、数据化转译；计算各指标的现状值，并基于多情景设定提出指标优化的目标值，作为空间优化推演的目标并输入模型。

• 多模型集成：将多情景的关键指标阈值和政策规则、多规则的规则体系、多指标的指标体系进行数学转译，并作为约束条件输入模型，开展一体化的空间优化推演。最终产出结果包括宏观层次对都市圈总体空间格局的优化，以及微观层次对重点地区的用地布局优化。

在空间优化的过程中，需要以某个中间尺度的空间作为数据统计、指标计算和模型推演的基本单元。本研究将乡镇和街道行政单元（下称镇街单元）作为空间优化的基本单元，主要出于两方面的考虑：第一，空间尺度适宜。作为都市圈全域和用地地块两个空间层次的中间尺度，镇街单元中各类空间要素比例在空间优化中得出的结果，向上可以推演都市圈总体空间优化格局，并为具体地块的用地布局预留弹性；向下可以开展具体的用地布局优化，起到承上启下和衔接传导的作用；第二，确保可行性。在数据、指标、模型驱动的技术体系下，具有行政建制的镇街单元在数据收集、指标计算方面更具有可行性。

需要指出的是，区域的空间布局与优化非常复杂，涉及多方面要素，具有不确定性和非线性的特征，不能完全脱离人的主观决策和经验。正如吴良镛先生倡导的人居环境科学理论提出的，人居环境是一个复杂巨系统，其建构要基于生态、经济、技术、社会、人文五个方面的基本要求。因此，本研究的空间优化是将人的决策、经验规则与数据、模型驱动的空间优化推演相结合的过程。

3 北京首都都市圈的空间优化探索

北京是我国首都，是全国的政治中心、文化中心、国际交往中心、科技创新中心，以北京为核心的首都都市圈是我国区域发展中不可替代的重要战略地区，其空间资源的合理利用和高质量发展对于引领国内都市圈发展具有重大意义。为此本研究以北京首都都市圈为例，开展多情景、多规则的三生空间优化探索。

基于行政单元和功能的完整性、数据的可获取性以及首都都市圈的发展政策和发展趋势等多因素考虑，确定本研究开展空间优化推演的空间范围，涵盖北京市域、雄安新区以及天津武清、廊坊市辖区和北三县等重要功能地区，总面积约 3.7 万 km^2。

① 这里的“全域生态空间”包括建设用地以外的其他所有空间。

3.1 精准分析

基于上文分析，首先明确首都都市圈属于适宜建设的重点城镇化地区，并面临较高的洪涝灾害风险，由此提出未来首都都市圈在气温上升、降水增加的气候变化趋势下应进一步增加生态空间面积的总体目标。

其次，针对具体问题，在全国本底分析的基础上进一步开展特色化、精细化分析。针对首都都市圈生态承载力下降、地下水超采引发地质灾害风险，以及近年来气候变化下洪涝风险加剧的问题，分析生态环境、地质灾害、洪涝灾害等因子，识别出未来适宜城镇建设空间和灾害风险较高空间。针对首都都市圈大气污染严重、城市热岛效应显著等问题，开展大气风场分析，识别出总体上偏南风和偏北风风场特征较为明显、北京东部地区偏东风的风频相对较高的基本特征。以此为基础，提出依托主要河流、绿地构建与主导风向基本一致、贯穿都市圈核心区的多条通风廊道和首都南部多重生态隔离带。

3.2 适应布局

3.2.1 应对未来不确定性的"多情景"设定

基于首都都市圈的现状分析和发展趋势判断，结合相关政策要求，本研究设定气候变化和可持续发展挑战下生态空间的不同增长情景，以及首都功能疏解和相关政策下城镇发展的不同情景，构建首都都市圈未来空间发展的目标情景矩阵。

一是设定气候变化不确定性下的多目标情景和生态空间面积阈值。依据全国城镇化分区对首都都市圈所在分区提出的生态空间指标阈值，以及联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）第六次评估报告对未来气候变化的预估，提出应对三种情景下洪涝灾害风险的生态空间面积的指标阈值分别为：生态空间面积保持不变、生态空间面积增长 0.3% 和增长 0.5%。

二是设定经济社会发展和空间发展政策不确定性下的多目标情景和布局规则。预判未来非首都功能疏解和人口产业分布可能有三种发展情景：一是北京中心城区人口下降，雄安新区、通州副中心等非首都功能承载地的人口和功能较为集聚，疏解成效较显著；二是北京中心城区人口下降，人口和功能在外围多个地区分散集聚；三是北京中心城区仍集聚发展，人口继续增长，外围地区发展相对缓慢。

综合上述两个维度，形成首都都市圈未来发展的目标情景矩阵。以气候适应性的生态安全底线为核心主导目标，结合人口规模和空间发展趋势的预测，确定首都都市圈未来最可能的目标情景：雄安新区和通州副中心得到较好发展，生态空间面积保持不变、增长 0.3%、增长 0.5% 三种情景。

3.2.2 面向规划复杂性的"多规则"构建

本研究构建了城镇与区域自然环境的精准适配，以及城镇内部生产、生活空间的协同匹配两个方面的规则体系①。

（1）城镇与区域自然环境的精准适配规则

当前，首都都市圈已从大规模城镇扩张转向存量更新，未来的空间优化将以存量空间调整为主，在局部地区进行适度的增量建设。因此，城镇与自然环境的精准适配规则包括增量建设规则和存量调整规则。

在增量建设方面，首先基于精准分析识别出的适宜城镇建设空间和灾害风险空间分布，明确未来新增建设用地应位于适宜建设等级较高的地区，不适宜建设的地区应划为生态空间。其次，对于精准分析中基于大气风场分析提出的通风廊道和生态隔离带，应划定为生态空间。再次，对于相关规划已经划定的生态保护红线、永久基本农田、优良耕地、自然保护地、森林公园、风景名胜区以及重要的河流、生态廊道等，应划定为生态空间。

在存量调整方面，基于课题合作团队对近 30 年来京津冀地区建设用地拓展和宜居、安全本底的适配分析和评估[19]，发现首都都市圈内有部分建设用地位于适宜建设等级较低和地震、洪涝等灾害风险较高地区内。应优先腾退这些地区内的建设用地，尤其是土地利用效率较低②、耗能和碳排放较高的建设用地，应调整为生态空间。

（2）城镇内部生产、生活空间的协同匹配规则

首先，遵循产城融合、用地混合的空间布局原则，提出生产、生活空间的用地结构比例。在都市圈内的各城市建成区层面，参考《城市用地分类与规划建设用地标准》（GB 50137-2011）和典型国际大都市的用地结构比例③，确定都市圈建设用地大类的面积比例。在镇街单元层面，根据

① 布局规则体系的详细内容可扫描文末二维码获取。

②《上海市低效工业用地标准指南（2019 版）》明确将土地产出率（以主营业务收入计算）和土地税收产出率两个指标近三年均值均低于相应调整值的工业项目认定为低效工业用地；《厦门市低效工业用地认定标准》（2022 年 8 月印发）将土地产出率不足现行工业项目控制标准 50% 的认定为低效用地；《清远市清新区关于促进低效工业用地盘活利用实施细则》（2022 年 6 月印发）提出将亩均税收和就业人数连续两年达不到辖区内该行业平均水平 60% 的已投产工业项目认定为低效用地。

③ 大伦敦的居住用地比例为 32.6%，工商业用地比例为 4.7%；纽约市的居住用地比例为 42.2%，工商业用地比例为 7.6%；东京都 23 区的居住用地比例为 58.2%，工业用地比例为 7.3%（数据来源：石忆邵 . 国际大都市建设用地规模与结构比较研究 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.）

《国务院办公厅关于加快发展保障性租赁住房的意见》（国办发 [2021]22 号）的规定①，提出生产空间中居住用地的面积比例的指标建议；并根据《城市居住区规划设计标准》（GB50180-2018），规定居住空间应配置一定比例的生活服务空间。

其次，基于城市空间结构经典模型和国内外典型城市的生产空间分布规律，提出生产空间布局优化规则。第一，基于同心圆模型、圈层结构理论和区位理论，结合东京、伦敦、北京、上海等城市和都市圈的生产空间分布特征研究 [20-24]，生产空间布局应遵循圈层式的布局规则。第二，基于扇形模型和典型城市在交通枢纽周边布局产业园区、物流园区或商务区的规律，提出生产空间结合主要交通廊道和枢纽布局的规则。第三，基于产业集群理论，为了促进建设用地的集约紧凑利用，生产空间的布局要遵循相对集中原则，将新建或现状分散的制造业、物流空间向产业园区集中。

再次，为加强都市圈的一体化交通联系并提高通勤效率，提出交通设施的布局规则。根据《北京市轨道交通线网规划（2020 年—2035 年）》和相关研究 [25]，确定首都都市圈分圈层的轨道交通布局规则；遵循 TOD 布局原则，根据国内外经验和相关标准规范 [26-29]，提出研发办公空间和生活服务空间多依托轨道站点 800 m 左右半径范围内布局的布局规则。

3.2.3 实现空间数据化的“多指标”调控

将图形化的空间现状图进行数据化、指标化的转译，是实现数据、模型驱动的空间优化推演的必要手段和前提。这一过程分三个步骤：空间分类、构建指标体系、计算指标数值。

首先确定空间分类。以提升生态空间的安全韧性水平、推动产业空间的创新发展和提升生活空间的宜居水平为空间优化的总体目标，参考既有分区分类标准规范 [30-32] 以及《京津冀城乡规划（2015—2030）》《珠江三角洲城镇群协调发展规划（2004—2020）》等相关规划，将区域空间划分为三大类、七小类②。利用地理信息数据和人群活动大数据等多源数据，采用“土地利用 + 人群活动”的方式开展栅格尺度的都市圈三生空间现状识别，按照上述空间类型绘制现状图，作为空间优化的基础。

其次构建指标体系。（1）将全国城镇化分区提出的空间优化关键指标作为首都都市圈空间的总体指标和基本约束条件。（2）从空间表征和绩效评价两个维度，对应空间分类，构建与空间直接相关、能够描绘都市圈三生空间基本特征和体现空间绩效的指标体系：空间表征指标是描述主要用地要素规模和比例的指标，反映空间的基本特征；绩效评价指标是评价空间的效率、价值的指标，反映空间的功能绩效（表 3）。

最后，计算指标数值并提出优化目标。（1）分别计算首都都市圈全域和各镇街单元的现状指标值，对三生空间现状进行评价和分析，识别出表现较好和较差的指标及其分布在哪些镇街单元③。（2）确定各指标的优化目标值。对于表现

表 3 区域空间分类及其表征指标与绩效评价指标

空间分类		空间表征指标	绩效评价指标
总体指标		生态空间面积比例； 建成区人口密度； 建成区毛容积率； 建成区绿化覆盖率； 建成区蓝绿空间面积比例	
生产空间	制造业空间	制造业用地面积比例	高新技术企业密度； 制造业网络相关度； 轨道站点 800 m 生产空间覆盖率； 专利密度； 专利网络关联度
	研发办公空间	研发办公用地面积比例	
	物流空间	物流用地面积比例	轨道站点 800 m 生产空间覆盖率
生活空间	居住空间	居住用地面积比例	轨道站点 800 m 生活空间覆盖率； 社区公共服务水平； 公园绿地步行 5 分钟生活空间覆盖率
	生活服务空间	生活服务用地面积比例	大型商业休闲设施 5 km 覆盖率； 轨道站点 800 m 生活空间覆盖率
生态空间	自然生态空间	自然生态用地面积比例； 河湖水面比例	水源涵养指数； 生物多样性比例； 植被指数； 水源涵养指数； 重要自然生态空间联通度指数
	农业空间	农业用地面积比例	优良耕地面积比例

注：表中的“总体指标”为上文（2.2.1 小节）在全国层面提出的不同分区的空间优化关键指标，均为空间表征指标；空白表示无绩效评价指标。

① 《国务院办公厅关于加快发展保障性租赁住房的意见》（国办发 [2021]22 号）规定，将产业园区中工业项目配套建设行政办公及生活服务设施用地面积占项目总用地面积的比例上限由 7% 提高到 15%，用于建设宿舍型保障性租赁住房。

② 本研究对空间的分类强调主导功能，未设置复合空间。根据主导功能确定空间类型，做到全覆盖、不交叉、不重叠。

③ 镇街单元指标的计算方法：一是确定计算的镇街单元范围。自然生态空间只统计自然生态用地面积比例≥ 50% 的镇街单元，共 107 个；农业空间只统计农业用地面积比例≥ 40% 的镇街单元，共 232 个；生产空间只统计生产与生活用地面积比例≥ 30% 且自然生态用地面积比例＜ 50% 和农业用地面积比例＜ 60% 的乡镇街道，共 284 个；生活空间只统计生活用地面积比例≥ 30% 且自然生态用地面积比例＜ 50% 和农业用地面积比例＜ 60% 的乡镇街道，共 232 个。二是进行指标计算和分布分析，计算各镇街单元的各指标数值，并进行空间分布分析。三是对各指标的表现进行评价，将各指标计算结果分为“很好、较好、一般、较差、差”5 个级别，然后计算出各指标不同级别的镇街单元数量和比例。

较好的指标，在空间优化推演过程中提出不低于现状值的优化目标，作为模型推演的输入条件；对于表现较差的指标，则提出空间优化的目标数值。

3.2.4“多模型”集成的一体化空间优化推演

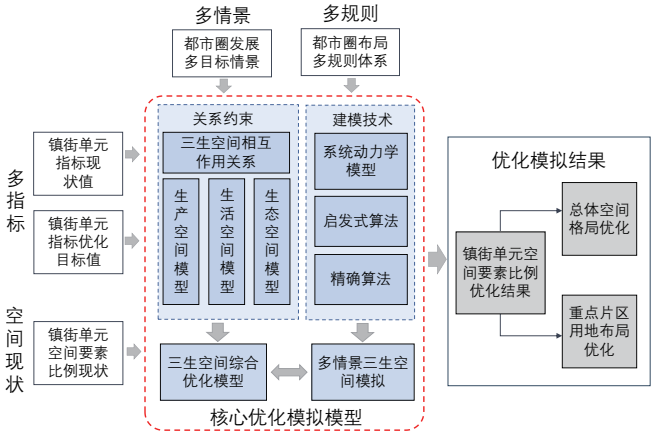
本研究提出利用空间过程模拟模型发现和验证城市群都市圈的关键要素和关键指标，厘清都市圈发展的指标、规则等约束条件，并进行空间优化的集成方法论。这一方法论的核心是解决指标、规则等约束条件的参数化、规范化表达问题。

（1）多规则和多指标的参数化表达

在开展模型推演前，将上述“多规则”的规则体系、“多指标”的指标体系进行参数化表达，并作为约束条件输入模型。研究对 3.2.2 和 3.2.3 小节涉及的规则和指标进行了整理分析并分为五类：复合指数类、连通度类，覆盖率类、面积和面积比例约束类、临近性布局类。每类的数学表达类似，除连通度类约束和目标为二次模型外，其他均为线性或整数线性模型①。

（2）“多模型”集成的方法框架

三生空间综合优化推演模型主要在镇街单元尺度进行，其指标、规则等约束条件涵盖了三生空间的相互作用关系，需要在给定的复杂约束条件下实现三生空间协同布局的整体最优。因此在计算方法上以混合整数优化技术为基础，通过结合精确算法和启发式算法进行求解，旨在提高整体绩效，促进协调发展。模型的直接推演结果是各镇街单元的空间要素比例优化，进一步，向上可得出都市圈的总体空间格局优化结果，向下可指导重点片区的用地布局优化（图 2）。模拟结果由 Gurobi 软件求解上述优化模型计算得出，并在 ArcGIS Pro 中制图展示。



注：白底色框表示分析或输入条件，蓝底色框表示模型方法，灰底色框表示输出结果。

图 2 模型集成框架

（3）空间优化推演结果

本研究针对“多情景”设定中未来首都都市圈最可能出现的发展情景进行了空间优化推演，即雄安新区和通州副中心得到较好发展，生态空间面积保持不变、增长 0.3%、增长 0.5% 三种情景下的三生空间布局优化（图 3）。

在情景 1，即生态空间总量保持不变的情况下，其布局仍然可以发生调整优化，但布局较为分散；在情景 2 和情景 3 生态空间总量分别增长 0.3% 和 0.5% 的情景下，主要在首都都市圈东北区域和雄安新区出现了较明显的生态空间增长。对于生产空间，三种情景均出现了由中心城区向外疏散的特征，在生态空间增长 0.3% 和 0.5% 的情景下，生产空间总量分别减少 9.7 km^2 和 16.2 km^2。生活空间则出现了与生态空间相反的结构调整，主要减少的区域在首都都市圈东北部和雄安新区；在生态空间增长 0.3% 和 0.5% 的情景下，生活空间分别减少 69 km^2 和 115 km^2。

通过空间优化推演，首都都市圈的空间绩效和品质得到了提升，可通过推演前后的指标计算得到验证。例如：在上述三种情景下，首都都市圈内的生态连通度分别增加 1.1%、2.0% 和 2.5%，证明空间结构的调整对生态连通度的提升有正向作用。在生态空间增加的情景下，生产空间和生活空间总量相应减少，但轨道站点 800 m 覆盖率等指标仍然得到了提升。例如：在生态空间增加 0.5% 的情景下，生产空间和生活空间的轨道交通 800 m 覆盖率分别提升了 2.5% 和 1.8%，同样证明了通过模型优化调整三生空间的结构可以在资源有限的情景下起到提升系统整体效能的作用。

3.3 首都都市圈空间优化的实践应用

空间优化结果应用于京津冀城乡规划、首都都市圈规划等多个规划实践项目，取得了积极成效，为京津冀的城镇空间格局优化、新城新区选址和控制建设用地的无序增长提供了重要支撑。基于精准分析识别的区域风险空间，构建了京津冀“一区三带多廊多心”的区域生态安全格局[33]，保证了区域和流域整体水生态安全格局结构与功能的完整性和延续性，为雄安新区区域性防洪格局的构建和安全韧性空间布局提供支撑；为非首都功能疏解和集中承载地建设提供科学依据，极大推动了京津冀地区城镇空间格局的优化和生态环境的改善。规划促进了永定河生态修复、南苑森林公园、通州和北三县之间绿带等环首都公园体系重大工程落地建设，环首都地区的无序开发建设得到有效控制，实现了北京地区规划建设用地累计减量 130 km^2，推动生态修复投资 370 亿元[4]，极大改善了京津冀的人居环境。

① 具体指标、规则及相应的表达公式可扫描文末二维码获取。

图 3 生态空间不同增长情景下三生空间布局优化方案

4 结语和展望

本研究基于“精准适配”的区域规划理论方法，构建了都市圈多情景、多规则的三生空间优化技术体系，并成功应用于首都都市圈的空间优化和规划实践。实现了从主要依靠主观经验的“灰箱”规划方法到数据、模型、规则驱动的“白箱”规划技术的转变，以期为我国不同地区的都市圈实现生产、生活、生态空间的协调和匹配提供科学系统、

广泛适用的方法工具。从近年趋势看来，全球气候变化不断加剧，经济社会发展的不确定性加强，都市圈发展的目标情景和布局规则也将更加复杂多变。未来应进一步加强都市圈发展多目标情景的预判研究，以及多目标情景下布局规则体系的科学构建，从而推动都市圈空间优化技术体系的更新迭代和都市圈的动态持续优化。从未来技术演变来看，人工智能代理（AI-Agent）将成为智能模型的重要基础，因此对于三生空间优化的流程，从数据获取与分析、模型搭建、情景与规则设定均可以进行不断优化迭代，为更精准的推演结果提供支撑。UPI

注：本文图表均为作者绘制。

参考文献

[1] 王凯，徐辉，周亚杰．“国家空间规划论”要义：精准分析与适应性技术的方法及应用 [J]. 城市规划学刊，2022(6): 8-17.

[2] WANG K, XU H, ZHOU Y. Theoretical approach and practice of “National Spatial Planning Theory”: how Chinese cities and towns precisely adapt to nature and culture[J]. Frontiers of urban and rural planning, 2024(2): 3-16.

[3] 王凯．国家空间规划论（第二版）[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2025.

[4] 王凯．“精准适配”：区域与城市可持续发展理论、方法与实践概述 [J]. 当代建筑，2025(1): 7-20.

[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 [J]. 地理学报，2016, 71(1): 49-65.

[6] 江东，林刚，付晶莹．“三生空间”统筹的科学基础与优化途径探析 [J]. 自然资源学报，2021, 36(5): 1085-1101.

[7] 单薇，金晓斌，冉娜，等．江苏省土地利用“生产—生活—生态”功能变化与耦合特征分析 [J]. 长江流域资源与环境，2019, 28(7): 1541-1551.

[8] 冀正欣，刘超，许月卿，等．基于土地利用功能测度的“三生”空间识别与优化调控 [J]. 农业工程学报，2020, 36(18): 222-231.

[9] 曹根榕，顾朝林，张乔扬．基于 POI 数据的中心城区“三生空间”识别及格局分析——以上海市中心城区为例 [J]. 城市规划学刊，2019(2): 44-53.

[10] LI A, ZHANG Z, HONG Z, et al. Evaluation method for ecology-agriculture-urban spaces based on deep learning[J]. Scientific reports, 2024, 14(1): 11353.

[11] DONG K, WANG H, LUO K, et al. The use of an optimized grey multi-objective programming-PLUS model for multi-scenario simulation of land use in the Weigan-Kuche River Oasis, China[J]. Land, 2024, 13(6): 1-19.

[12] 张波，潘佩佩，王新云，等．基于 GMOP PLUS 耦合模型的京津冀土地利用变化多情景模拟及功能关系分析 [J]. 地理与地理信息科学，2023, 39(5): 8-16.

[13] 赵寿露，李石华，许新惠，等．耦合 MOP-FLUS 模型的滇中城市群“三生”空间格局优化 [J]. 水土保持研究，2022, 29(4): 322-328.

[14] 李红润，刘慧芳，王瑾，等．基于 Markov-FLUS-MCR 模型的晋中市“三生”空间优化 [J]. 农业工程学报，2022, 38(10): 267-276.

[15] 杨天荣，匡文慧，刘卫东，等．基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局 [J]. 地理研究，2017, 36(3): 441-452.

[16] 陆化普，刘若阳，张永波，等．基于 TOD 模式的城市空间结构优化研究 [J]. 中国工程科学，2023, 24(6): 137-145.

[17] FU J, BU Z, JIANG D, et al. Sustainable land use diagnosis based on the perspective of production–living–ecological spaces in China[J]. Land use policy, 2022, 122: 106386.

[18] 王凯，陈明，张丹妮．国家城镇空间格局的优化——基于经济潜力和安全风险维度的新思考 [J]. 国际城市规划，2023, 38(1): 1-9. DOI: 10.19830/j.upi.2022.741.

[19] 王凯，匡文慧，方伟华，等．中国近三十年城市开发建设的空间适配特征 [J/OL]. 中国科学：地球科学 (2025-03-21)[2025-03-25]. https://doi.org/10.1360/SSTe-2024-0187.

[20] 赵璐，赵作权．北京市产业空间圈层结构与布局优化 [J]. 开发研究，2017(2): 46-48, 174-177, 49-52.

[21] 尹德挺，张锋．圈层视域下东京都市圈就业人口空间分布演变及其新动向 [J]. 日本学刊，2023(5): 94-119, 170.

[22] 李福映，陈思伽，冯楚芸，等．产业链集群视角下珠三角产业空间布局特征与规划应对 [J]. 城市发展研究，2024, 31(7): 60-69.

[23] 王如昀．伦敦与北京圈层数据比较分析 [J]. 北京规划建设，2020(2): 179-181.

[24] 杨晓春，马涛，洪武扬．伦敦大都市区产业—空间系统协同演化研究及启示 [J]. 现代城市研究，2024(10): 108-115.

[25] 杨少辉，李长波，高广达，等．轨道交通与区域协同发展研究 [J]. 城市交通，2022, 20(2): 11-20.

[26] 王楠，杨少辉，付凌峰，等．中国主要城市轨道交通覆盖通勤空间特征研究 [J]. 城市交通，2021, 19(5): 91-99。

[27] 吴韬，严建伟．城市轨道交通站点可达性度量及评价——以天津市为例 [J]. 地理与地理息科学，2020, 36(1): 75-81.

[28] 王亚洁．国外城市轨道交通与站域土地利用互动研究进展 [J]. 国际城市规划，2018, 33(1): 111-118. DOI: 10.22217/upi.2017.081.

[29] 城市轨道沿线地区规划设计导则 [Z]. 住房和城乡建设部，2015.

[30] GB 50137-2011. 城市用地分类与规划建设用地标准 [S]. 住房和城乡建设部，2011.

[31] 国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南 [Z]. 自然资源部，2023.

[32] 市级国土空间总体规划编制指南（试行）[Z]. 自然资源部，2020.

[33] 京津冀城乡规划（2015—2030）[R]. 中国城市规划设计研究院，2016.

（本文编辑：张祎娴）

本文更多增强内容扫码进入