城市蓝绿基础设施与人居福祉

基于贝叶斯网络的西安城市蓝绿空间生态系统服务权衡与协同*

杨建辉[1] 刘俊辰[1] 李钰琪[2] 白晨明[3] 王丁冉[1]

1 西安建筑科技大学建筑学院 西安 710055
2 华南理工大学建筑学院 广州 510641
3 中国市政工程中南设计研究总院有限公司 武汉 430010

摘要：【目的】量化识别中心城区蓝绿空间 ESs 的权衡协同特征及其关键驱动因子，以期为高密度城市的生态空间精准优化提供科学依据。【方法】以西安市中心城区为研究对象，集成 MSPA 景观连通性分析、InVEST 模型评估与贝叶斯网络建模，构建“景观格局—生态系统服务—驱动因子”分析框架，量化 5 类 ESs 之间的复杂关系，并基于概率推理解析其背后的驱动机制。【结果】1）固碳服务与生境质量表现出强协同关系（相关系数为 0.78），而自然可达性则与雨洪缓减、降温服务呈明显权衡关系（相关系数分别为 -0.65和-0.58）。2）土地利用类型、景观连通性、景观格局、植被覆盖率及人口密度是影响服务间交互关系的关键因子。3）景观核心指数存在约 40%的阈值效应，超过此阈值后，ESs 间的协同水平将显著提升。【结论】证实了贝叶斯网络在解析高密度城市生态系统服务复杂因果关系中的有效性。研究结果不仅揭示了城市中心区 ESs 交互作用的基本规律与关键阈值，也为通过优化景观格局来协同提升多重生态系统服务提供了具体的、可量化的规划路径。

关键词：蓝绿空间；生态系统服务；权衡与协同；贝叶斯网络；景观格局
DOI：10.12169/zgcsly.2025.09.15.0002

Ecosystem Service Trade-offs and Synergies within Urban Blue-green Space in Xi’an Based on a Bayesian Network

Yang Jianhui[1] Liu Junchen[1] Li Yuqi[2] Bai Chenming[3] Wang Dingran[1]

(1. College of Architecture, Xi’an University of Architecture and Technology, Xi’an 710055, China; 2. School of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract:【Objective】This study aims to quantitatively identify the trade-offs and synergies among ecosystem services (ESs) in blue-green spaces within central urban areas and determine their key driving factors, thereby providing a scientific basis for the precise optimization of ecological spaces in high-density cities.【Method】Taking the central urban area of Xi’an as a case study, the paper constructs an analytical framework of “landscape pattern - ecosystem services - driving factors” by combining MSPA landscape connectivity analysis, InVEST model assessment, and Bayesian network modeling to quantify

收稿日期：2025-09-15
* 基金项目：国家重点研发计划课题（2022YFC3802603）
第一作者：杨建辉（1977-），男，博士，教授，风景园林系主任，研究方向为西部城镇绿色空间规划设计理论与方法、西部城市雨洪管理规划设计方法与工程技术。E-mail：297011785@qq.com

the complex relationships among five types of ESs and to probabilistically infer the underlying driving mechanisms. 【Result】 The findings indicate that: 1) Carbon sequestration service and habitat quality exhibit a strong synergistic relationship (correlation coefficient of 0.78), whereas natural accessibility shows significant trade-offs with both flood mitigation and cooling service (correlation coefficients of −0.65 and −0.58, respectively); 2) Land use type, landscape connectivity, landscape pattern, vegetation coverage, and population density are identified as critical factors influencing the interactions among ESs; and 3) The threshold effect of the landscape core index is approximately 40%, beyond which the synergistic level among ESs is significantly enhanced. 【Conclusion】 This research validates the efficacy of Bayesian networks in deciphering the complex causal relationships of ESs in high-density urban settings. It not only reveals fundamental patterns and key thresholds governing ESs interactions in central urban areas, but also provides a concrete and quantifiable planning pathway for synergistically enhancing multiple ESs through landscape pattern optimization.

Keywords: blue-green space; ecosystem service; trade-off and synergy; Bayesian network; landscape pattern

随着全球城市化进程的加速，城市中心区作为高密度建成环境与生态功能需求矛盾最为突出的空间单元，其蓝绿空间的生态系统服务供给面临严峻挑战[1-3]。高强度开发导致生态空间破碎化与功能退化，而居民对优质生态环境的需求却持续上升[4-5]。如何在有限空间内实现生态系统服务的多目标优化，已成为当前城市规划与生态建设中的关键科学问题。

生态系统服务权衡与协同研究已形成较为系统的理论框架。Costanza 等[6]奠定了生态系统服务价值评估的理论基础，千年生态系统评估强调了权衡与协同在生态管理中的重要性[7]。Raudsepp-Hearne 等[8]揭示了生态系统服务束的形成机制，推动了从单一服务评估向多服务集成分析的转变。在研究方法上，早期研究多采用相关性分析和空间统计方法，如 Maes 等[9]提出的权衡协同度指数，虽能识别服务间的统计关联，但在因果关系构建与驱动机制识别方面存在局限。随后发展的 InVEST、ARIES 等空间显式模型提升了单一服务的量化精度[10]，但通常假设服务相互独立，难以刻画多服务间的非线性反馈与协同效应[11]。

近年来，贝叶斯网络（Bayesian Networks，BNs）等基于概率图模型的方法被逐步引入生态系统服务研究，其在处理不确定性、非线性关系及多源数据融合方面展现出独特优势[12]。例如，荔童等[13]在陕北黄土高原构建贝叶斯网络模型，通过联合概率分布与情景模拟揭示了土地利用、降水和 NPP 对协同关系的复合影响，强调了自然与社会因子的交互作用；蔡进等[14]在汾河流域引入生态系统服务权衡协同指数（TSI），结合贝叶斯网络进行敏感性分析与空间格局优化，为区域生态修复提供了量化依据。此外，田文涛与都沁军[15]在河北省综合运用 InVEST 模型与贝叶斯网络，验证了贝叶斯网络在多情景生态空间优化中的实用价值；黄强等[16]在喀斯特山区利用贝叶斯网络解析了生态系统服务权衡关系的驱动因素，并设置多情景识别生态安全格局，突出了贝叶斯网络在复杂地形条件下识别关键变量（如造林面积、实际蒸散量和降水总量）的能力；余玉洋等[17]在泾河流域、曾莉等[18]在水源涵养服务优化，以及黎斌等[19]在城市生态红线划定中均成功应用贝叶斯网络，进一步证明该方法在生态系统服务空间格局优化与决策支持中的有效性。此外，冯怡然与吴殿鸣[20]基于 MCCA 模型对苏州市生态系统服务时序演变的分析也表明，调节服务的持续增长与空间聚集特征对外围生态功能的协同具有强化作用，进一步验证了多情景模拟在生态规划中的价值。

尽管贝叶斯网络在流域及区域尺度的应用中取得了显著进展[13-19,21-23]，但其在城市中心区蓝绿空间研究中的应用仍相对缺乏。城市高密度建成环境下的生态过程更具复杂性与异质性，景观格局、连通性及人类活动等因素对服务关系的驱动机制尚需深入解析[24-25]，如周凌赟等[25]在苏南水网地区采用传统统计方法揭示了生态系统服务

“强协同-弱权衡”的空间格局，实现了分区调控，但在刻画服务间非线性因果关系方面存在不足。因此，本研究以西安市中心城区为例，集成 MSPA 景观连通性分析、InVEST 模型评估与贝叶斯网络建模，构建“景观格局—生态系统服务—驱动因子”分析框架，旨在识别蓝绿空间生态系统服务的权衡协同特征及其关键影响因素，为高密度城市生态空间优化提供科学支撑。

1　研究区概况

西安市中心城区（107° 40′—109° 49′ E，33°42′—34°45N′）总面积约 10 108 km^2，属暖温带半湿润大陆性季风气候，年均气温 13.5 ~ 14.9 ℃，年降水量 506.1 ~ 690.3 mm。作为西安市城市化程度最高、人口最密集的区域，其土地利用类型多样，涵盖建设用地、公园、绿地与水体等多种生态空间（图 1）。研究区东北与西南部生态基础较好，西北部及中心区域建成密度高，生态空间较为破碎，这一空间分异特征为探讨城市中心区生态系统服务提供了理想案例。

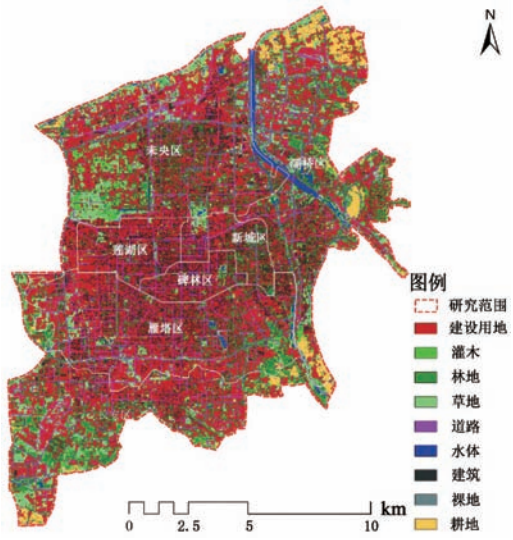


图 1　西安市中心城区土地覆盖类型

2　研究方法

2.1　技术路线

本研究构建“数据基础—指标评估—网络建模—关联分析”的技术路线（图 2）。首先，整合多源数据构建基础数据库；其次，采用 MSPA 方法评估景观连通性，并运用 InVEST 模型评估生态系统服务，随后基于评估结果构建贝叶斯网络模型，识别生态系统服务之间的协同与权衡关系；最后，结合灵敏度分析，识别与服务互动密切相关的关键因子，并探讨要素间的条件依赖关系。

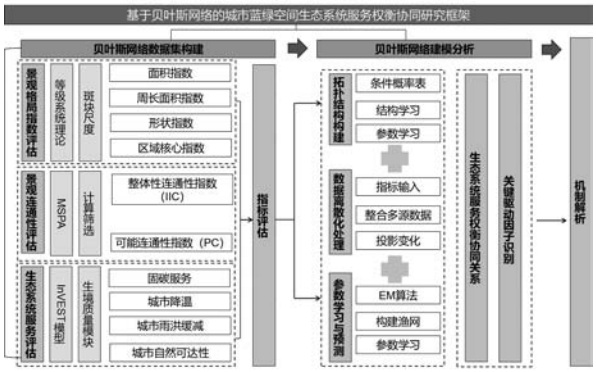


图 2　技术路线

2.2　数据来源与预处理

研究采用多源异构数据构建基础数据库，所有数据统一投影并重采样至 90 m 空间分辨率。基础地理数据源自国家地理信息公共服务平台；土地利用数据主要基于高分二号 L1A 级卫星影像（2022 年 7 月 31 日—8 月 5 日共 5 景）解译获取，云量较高或缺失区域辅以谷歌卫星影像（分辨率 1.19 m）补充；地形地貌数据源自资源环境科学与数据中心；土壤数据来源于 ORNL-DAAC 的 HYSOGs 数据库；气象数据源自国家地球系统科学数据中心；植被数据源自中国科学院生态学科数据中心；社会经济数据源自人口普查与西安市统计年鉴。数据处理包括格式转换、坐标统一与空间重采样等步骤，并基于 50 m × 50 m 渔网提取 311 991 个样本点用于建模。

2.3　贝叶斯网络数据集构建

1）景观格局指数评估。采用 Fragstats 4.2 分析景观格局指数。依据等级系统理论，将景观指数划分为斑块水平、斑块类型水平与景观水平（McGarigal，2015）[26]。选取面积指数、周长面积比、形状指数和核心区指数作为核心指标，在斑块尺度开展评估。通过比较不同景观粒度，确定最佳分析粒度，最终选用 90 m 分辨率的土地利用数据。

2）景观连通性评估。采用景观连通性指数评估生态网络结构。基于 Guidos 软件将景观划分为 7 类要素，选取整体连通性指数（IIC）和可能连通性指数（PC）作为核心指标，通过距离梯度法

确定最佳距离阈值，识别关键生态源地。

3）生态系统服务评估。选取生境质量、固碳服务、城市降温、雨洪缓减与自然可达性 5 类核心生态系统服务进行评估。基于 InVEST 模型构建评估体系，分别计算生物多样性维持能力、碳储量、降温指数、径流保持量与居民绿地可达性水平。

2.4 贝叶斯网络建模分析

贝叶斯网络结构的构建主要有专家经验法和网络结构学习两种方式。专家经验法依赖专家知识确定节点与连接关系，在经验丰富时可高效构建贴近实际的网络结构，但在知识不足或问题复杂时易受主观影响。结构学习方法则基于数据驱动，自动识别变量间依赖关系，适用于复杂数据场景，建模结果更为客观。

1）拓扑结构构建。基于景观生态学理论，在 Netica 软件中构建贝叶斯网络的拓扑结构。网络节点涵盖 5 类生态系统服务、2 类景观连通性指数、4 类景观格局指数以及人口密度、植被覆盖率等 15 项驱动因子（图 3），以此明确变量间的因果关系。利用 2022 年样本数据计算条件概率表，结合结构学习与参数学习优化模型，并通过 Netica 的推理功能实现未知变量的概率推断与依赖关系解析，最终形成生态系统服务贝叶斯网络模型，为后续权衡协同分析及驱动因子识别提供支撑。

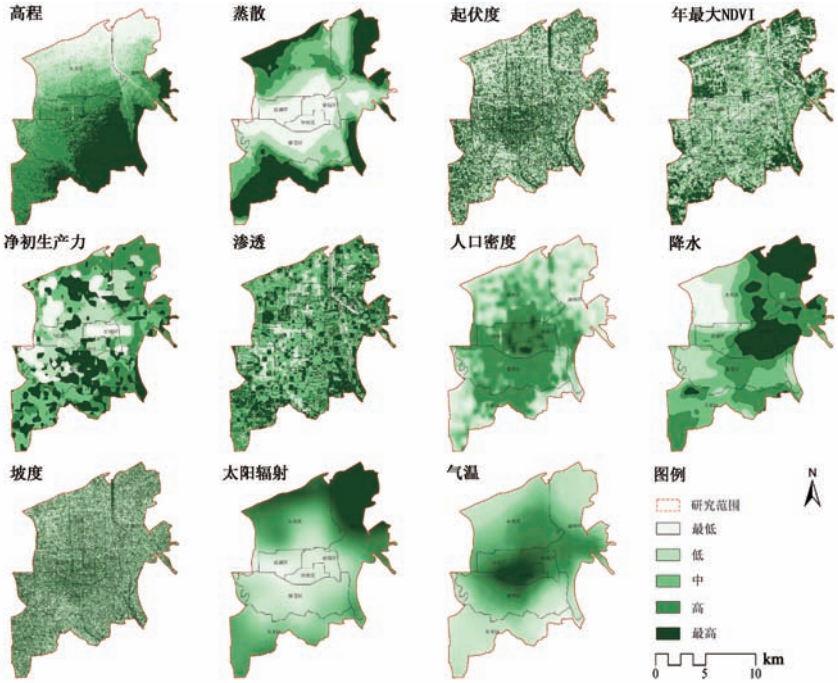


图 3 西安市中心城区生态系统服务关系驱动因子空间分布

2）数据离散化处理。为降低模型复杂度、提升计算效率，并更好地揭示变量间潜在关系，采用自然断点法将节点对应的连续变量离散化为 3～5 个等级。为保障数据可靠性与空间一致性，整合多源数据并进行投影变换与重采样，其中人口密度数据来自 WorldPop Hub（分辨率约 1 km）；太阳辐射数据源自 TerraClimate（分辨率约4 km）；气温、降水与蒸散数据来自国家地球系统科学数据中心（分辨率约 1 km）；高程数据来源于资源环境科学与数据中心（分辨率约 12.5 m）。基于高程数据在 ArcGIS 中生成坡度与起伏度指标，确保所有输入数据科学可比，为模型构建与推理分析奠定基础。

3）参数学习与预测。采用 Netica 软件进行贝叶斯网络的参数学习。鉴于数据存在缺失与复杂性，在计数法、EM 算法与梯度下降法 3 种条件概率表（CPT）学习方法中，最终选用 EM 算法进行参数估计。在 ArcGIS 中处理数据并进行因子分析，离散化后在中心城区构建 50 m×50 m 渔网，获取 311 991 个样本点。按 7∶3 比例划分训练集与验证集，经结构与参数学习后，建立最终的生态系统服务贝叶斯网络模型。模型验证采用混淆矩阵，其平均分类精度达 86.37%，表明模型具备良好的可靠性。在此基础上，基于联合概率分布与相关系数识别权衡协同关系，并通过方差

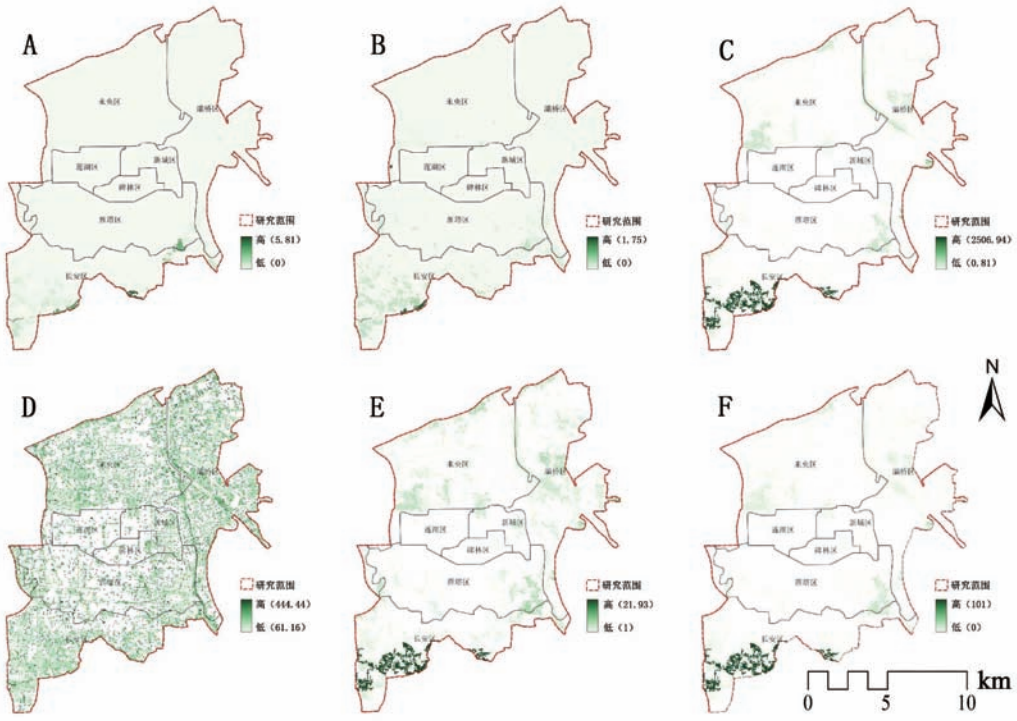
缩减（以 VR>0.5% 为阈值）进行敏感性分析，以识别关键驱动因子。

3　结果与分析

3.1　贝叶斯网络数据集构建评估

3.1.1　景观格局与连通性特征

西安市中心城区景观格局呈现显著空间分异（图 4）。东北与西南端连通性良好，生态网络较为完整，整体连通性指数（IIC）为 0.35，可能连通性指数（PC）为 0.42，表明该区域生态系统结构完整，利于物种迁徙与基因交流。相比之下，西北、中心及中南部分布少量核心区斑块，空间分布孤立，dIIC 值普遍低于 0.1，生态连通性较差，制约了生物多样性保护功能。



注：A 可能连通性；B 整体连通性；C 面积指数；D 周长面积比指数；E 形状指数；F 核心区域指数。

图 4　2022 年西安市中心城区中心城区源地重要性程度和景观格局指数分布

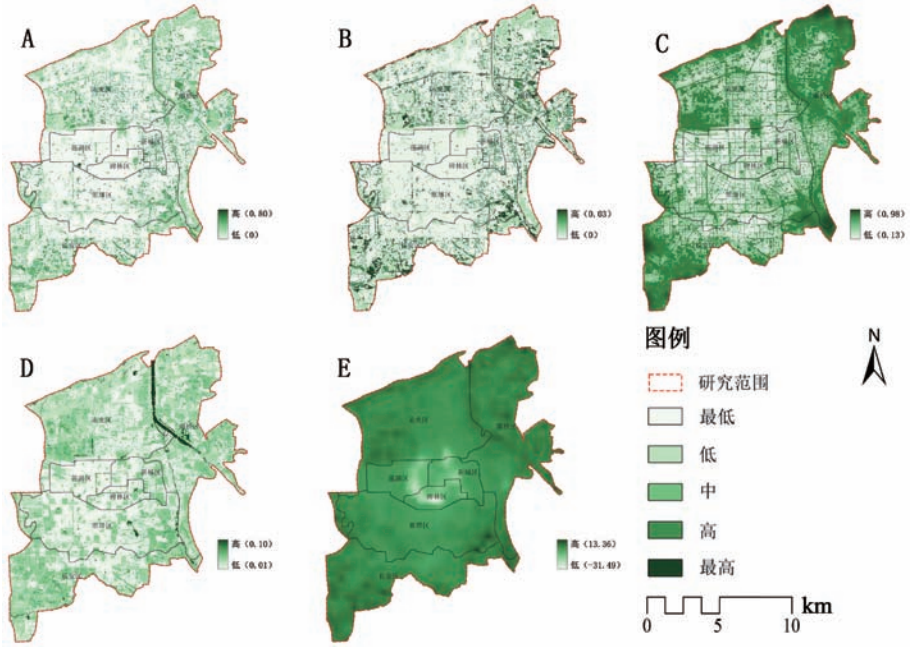
景观格局指数分析（图 4）显示，面积指数由中心向外围递减，商业区与住宅区等建成区显著高于绿地和水体。周长面积比在城市边缘和交通干线处较高，反映景观形状更为复杂。核心区域指数呈“中心高、外围低”格局，商业与政务功能区普遍超过 60%，郊区及边缘地带多低于 30%，反映出高强度开发对生态空间的挤压。

3.1.2　生态系统服务空间格局

5 类生态系统服务在空间上呈现明显梯度分布，整体表现为“距城市中心越远，服务能力越强”的特征（图 5）。生境质量在大型公园与高校绿地较高，密集建成区普遍偏低；固碳服务中林地能力最强，城市核心区高值集中于遗址公园与城市公园；城市降温服务在建成区效应普遍高于城郊，大型公园可形成 1~2 ℃降温效应；雨洪缓减服务在城郊较强，建成区相对较弱；自然可达性服务空间差异显著，莲湖、新城与碑林区供给严重不足，而长安、灞桥与未央区则供给过剩。

3.1.3　生态系统服务权衡协同关系

基于训练集输入贝叶斯网络所得条件概率（图 6）及相关性与联合概率分析（图 7），将生态系统服务间关系划分为协同、弱协同、弱权衡与权衡关系。2022 年西安中心城区生态系统服务中，L 型概率分布显示多项服务呈协同关系，如生境质量与固碳服务（相关系数 0.38）、生境质量与城市降温服务（0.27）为强协同关系；城市自然可达性与生境质量（0.091）、城市自然可达性与城市降温服务（0.067）等为弱协同关系。



注：A 生境质量空间分布；B 固碳服务空间分布；C 减热指数空间分布；D 径流保持量分布；E 城市自然可达性空间分布。

图 5　2022 年西安市中心城区生态系统服务空间分布

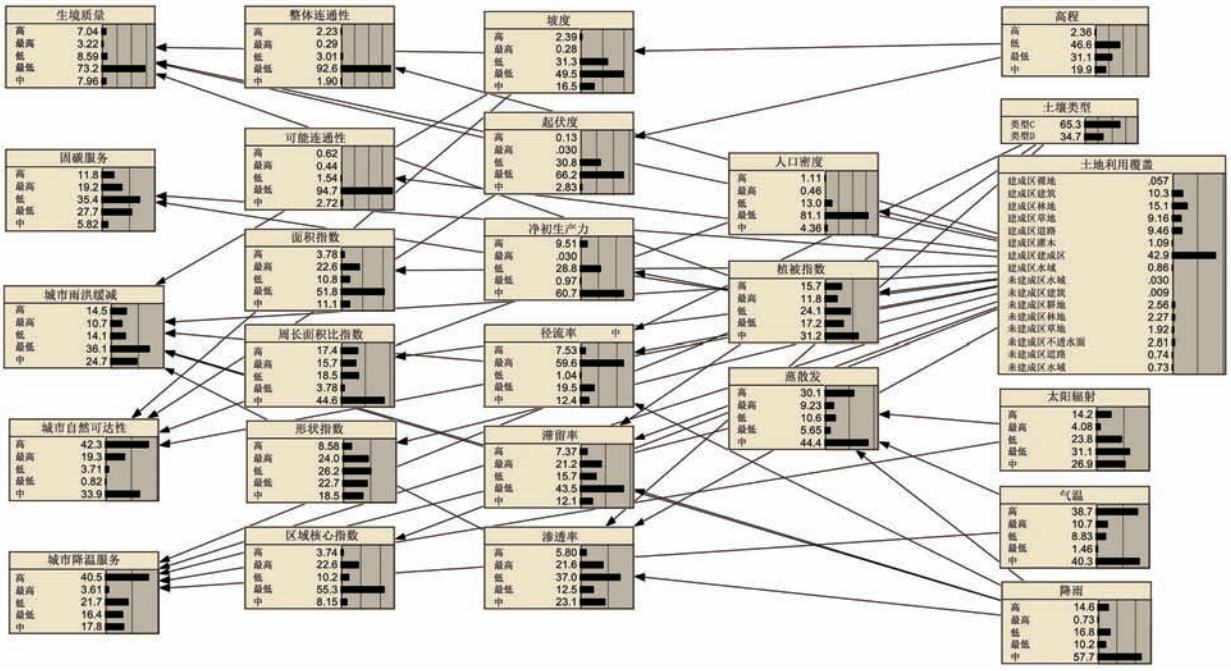


图 6　2022 年西安市中心城区生态系统服务贝叶斯网络模型

Ⅰ型概率分布显示固碳服务与城市降温(-0.005 4)及雨洪缓减服务（-0.011）之间为弱权衡关系；雨洪缓减服务与自然可达性(-0.045)及城市降温服务（-0.059）之间为强权衡关系，表明雨洪缓减能力增强可能对其他服务产生较大负面影响。此外，生境质量与其余所有服务均为协同关系，而自然可达性与其他服务均呈权衡关系（除与生境质量外）。

3.1.4　关键驱动因子识别

方差缩减分析识别出 5 类关键驱动因子：土地利用类型（VR = 8.7%）为首要因子；景观连通性指数（VR = 6.3%）对服务协同能力具有重要影响；景观格局指数（VR = 4.2%）直接影响服务供给能力；植被覆盖率（VR = 3.8%）是决

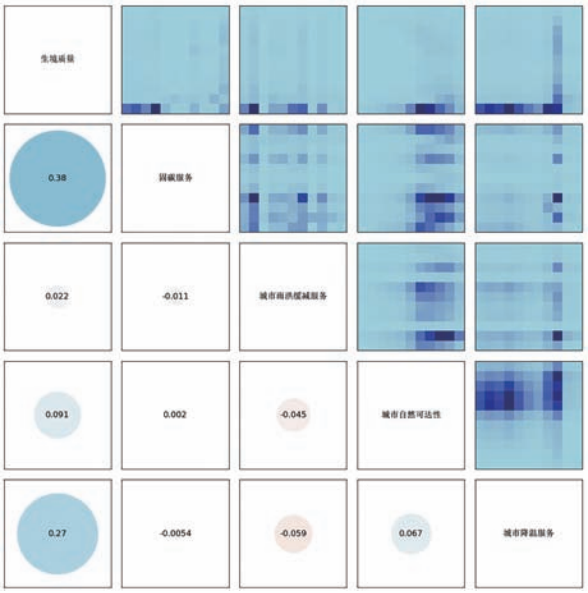


图 7　相关性分析与联合概率分布

定固碳与生境质量的关键因子；人口密度（VR = 2.1%）对自然可达性服务具有双重影响。这些因子通过复杂相互作用共同塑造生态系统服务格局及其相互关系。

4　讨论

4.1　城市中心区生态系统服务权衡协同的空间分异机制

研究表明，西安市中心城区生态系统服务间的权衡与协同关系呈现显著空间分异。固碳服务与生境质量在生态网络完整区域表现出强协同关系，与 Raudsepp-Hearne 等[8]的研究结果一致；而自然可达性与雨洪调节、降温服务间则呈显著权衡，反映高密度建成区中生态功能与人类需求间的空间张力。这一格局可能由多重因素共同驱动：一是高强度开发与绿地破碎化限制了生态功能连通性；二是高人口密度抬升自然可达性需求，挤压了水文与气候调节类服务的空间配置。需指出，本研究基于横截面数据，尚难全面揭示其动态演变与因果机制，相关结论有待多时相数据与过程模型的进一步验证。

4.2　贝叶斯网络方法在城市生态系统服务研究中的适用性

构建的贝叶斯网络模型有效整合多源数据，处理复杂因果关系并实现敏感性分析。相较于传统方法，贝叶斯网络兼具相关性分析与 InVEST 模型优势，支持对城市生态系统更系统的解析。模型验证平均分类精度达 86.37%，表明该方法具备良好适用性，但其结构构建仍部分依赖专家经验，参数学习亦需大量数据支持，存在一定局限。

4.3　关键驱动因子的识别与生态空间规划指引

识别出的关键驱动因子为城市生态空间优化提供了明确依据。土地利用类型作为首要因子（VR = 8.7%），表明用地结构对服务交互格局影响显著，建议规划中提高生态用地比例、控制建设强度，并推动功能复合的土地布局。景观连通性（VR = 6.3%）的重要性则提示应构建连续生态网络以增强服务协同，具体可通过统筹生态廊道、水系绿带与节点公园以提升空间完整性。进一步分析发现，景观核心指数存在约 40%的响应阈值，超过该值后服务协同能力显著提升，为核心斑块保护与绿地规划提供了量化依据。针对自然可达性与调节类服务间的潜在权衡，建议在绿地配置中引入服务协同评估工具，结合贝叶斯网络开展多情景分析，以探索不同方案下的服务关系演变，推动生态服务协同提升与空间优化的有机结合。

4.4　展望

本研究尚存若干局限：基于单一年份数据，难以捕捉服务关系的动态演变；贝叶斯网络结构部分依赖专家经验，具有一定主观性；对社会经济因素考量不足。未来研究可结合多时序遥感数据揭示演变趋势，引入社会调查构建综合研究框架，开展跨城市对比以检验普适性，并融合机器学习方法提升预测精度，强化情景模拟能力以更好地支持城市规划决策。

5　结论

1）方法论上，本研究证实了贝叶斯网络在处理高密度城市生态系统服务复杂因果关系中的有效性。该方法不仅能解析服务间非线性的权衡协同关系，更能通过概率推理识别出背后关键的景观格局与社会经济驱动因子（如土地利用类型、景观核心指数等），为城市生态空间的精细化管理与多目标协同优化提供了强有力的决策支持工具。

2）理论认知上，揭示了城市中心区生态系统服务交互作用的基本规律。服务间关系受城市空间梯度与景观结构配置的深刻影响。一方面反映

了高密度建成环境下人类活动与生态功能在空间竞争上的本质矛盾；另一方面为设定科学的生态空间管控目标提供了定量依据。

3）实践应用上，研究成果为高密度城市的生态空间规划提供了明确的优化路径。生态空间规划应首要关注土地利用结构的优化与生态网络的连通性构建系统性提升生态系统服务的协同供给能力。针对不同分区的服务特征，应采取差异化策略，如在权衡冲突区通过优化蓝绿空间布局来缓解功能矛盾，在协同潜力区则通过强化主导功能来最大化综合效益。

参考文献

[1]SETO K C,GÜNERALP B,HUTYRA L R.Global forecasts of urbanexpansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2012,109(40):16083-16088.

[2]袁旸洋,罗尚岑,郭蔚,等.城市蓝绿空间生态效益测度及关键影响因子识别:以南京中心城区为例[J].中国城市林业,2025,23(4):1-11.

[3]TZOULAS K,KORPELA K,VENN S,et al.Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure:a literature review[J].Landscape and Urban Planning,2007,81(3):167-178.

[4]王成.全域森林城市建设的基本内涵、必要性、可行性和实施路径[J].中国城市林业,2023,21(5):1-8..

[5]KABISCH N,QURESHI S,HAASE D.Human-environment interactions in urban green spaces:a systematic review of contemporary issues and prospects for future research[J].Environmental Impact Assessment Review,2015,50:25-34.

[6]COSTANZA R,D'ARGE R,DE GROOT R,et al.The value of the world's ecosystem services and natural capital[J].Nature,1997,387(6630):253-260.

[7]CARPENTER S R,DEFRIES R,DIETZ T,et al.Millennium ecosystem assessment:research needs[J].Science,2006,314(5797):257-258.

[8]RAUDSEPP-HEARNE C,PETERSON G D,BENNETT E M.Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2010,107(11):5242-5247.

[9]MAES J,EGOH B,WILLEMEN L,et al.Mappingecosystem services for policy support and decision making in the European Union[J].Ecosystem Services,2012,1(1):31-39.

[10]SHARP R,TALLIS H T,RICKETTS T,et al.InVEST 3.3.0 User's Guide[M].Stanford:The Natural Capital Project,Stanford University,2016.

[11]BAGSTAD K J,SEMMENS D J,WAAGE S,et al.A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation[J].Ecosystem Services,2013,5:27-39.

[12]LANDUYT D,BROEKX S,D'HONDT R,et al.A review of Bayesian belief networks in ecosystem service modelling[J].Environmental Modelling & Software,2013,46:1-11.

[13]荔童,梁小英,张杰,等.基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系及其驱动因子分析:以陕北黄土高原为例[J].生态学报,2023,43(16):6758-6771.

[14]蔡进,危小建,江平,等.基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例[J].环境科学,2024,45(5):2780-2792.

[15]田文涛,都沁军.基于生态系统服务权衡协同关系的河北省优先优化区域识别[J/OL].环境科学,2025.[2025-03-10].https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkx.202411226.

[16]黄强,陈田田,王强,等.喀斯特山区生态系统服务权衡关系分异特征及生态安全格局识别:以贵州省为例[J].地理科学,2024,44(6):1080-1091.

[17]余玉洋,李晶,周自翔,等.基于贝叶斯网络的生态系统服务空间格局优化:以泾河流域为例[J].干旱区地理,2022,45(4):1268-1280.

[18]曾莉,李晶,李婷,等.基于贝叶斯网络的水源涵养服务空间格局优化[J].地理学报,2018,73(9):1809-1822.

[19]黎斌,何建华,屈赛,等.基于贝叶斯网络的城市生态红线划定方法[J].生态学报,2018,38(3):800-811.

[20]冯怡然,吴殿鸣.基于 MCCA 模型的苏州市生态系统服务权衡协同时空特征与多情景模拟[J].中国城市林业,2025,23(4):51-60.

[21]YU H R,JIANG J Y,GU X C,et al.Using dynamic Bayesian belief networks to infer the effects of climate change and human activities on changes in regional ecosystem services[J].Ecological Indicators,2025,170:113023.

[22]HU Y,XUE J,ZHAO J P,et al.Dynamic Bayesian networks for spatiotemporal modeling and its uncertainty in tradeoffs and synergies of ecosystem services:a case study in the Tarim River Basin,China[J].Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2024,38(11):4311-4329.

[23]PHAM H V,SPEROTTO A,FURLAN E,et al.Integrating Bayesian Networks into ecosystem services assessment to support water management at the river basin scale[J].Ecosystem Services,2021,50:101300.

[24]HAASE D,LARONDELLE N,ANDERSSON E,et al.A quantitative review of urban ecosystem service assessments:concepts,models,and implementation[J].Ambio,2014,43(4):413-433.

[25]周凌赟,丁金华,杨阳.苏南水网地区生态系统服务权衡协同与分区调控:以苏州吴江区为例[J].中国城市林业,2025,23(4):33-40.

[26]MCGARIGAL K.Fragstats help[J].University of Massachusetts:Amherst,MA,USA,2015,182.