城市扩张、高铁网络对城市土地绿色利用效率的空间效应
——理论分析及经验证据

章屹祯[1],邓 珍[2],曹 继[1],章 坤[3],梁双波[4],曹卫东[1]
(1. 安徽师范大学地理与旅游学院,芜湖 241002;2. 安徽师范大学生命科学学院,芜湖 241000;
3. 华侨大学旅游学院,泉州 362021;4. 中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京 210008)

摘要: 土地是资源要素的重要载体,提升城市土地绿色利用效率(ULGUE),是实现“精明增长”的关键。在现象观察与理论构建的基础上,本研究以2008—2019年中国268个城市为研究单元,融合多源数据,结合ArcGIS分析、EBM-DEA模型和空间计量等模型,揭示城市扩张、高铁网络对ULGUE的空间效应。研究表明:① 中国ULGUE具有一定的梯度分布和空间依赖特征,其核密度曲线整体右移,且峰值不断降低,土地资源“精细化”利用程度有所提升。② 城市扩张与ULGUE存在显著的非线性关系,保持合理的城市扩张能显著提升ULGUE;高铁网络加快了资源优化配置,对ULGUE具有较强的正向空间效应。③ 从溢出效应来看,城市扩张显著提升了本地ULGUE,但对邻近城市则相反;高铁网络对本地ULGUE具有较强的正外部性,但也要警惕其“虹吸效应”对邻近城市造成负面影响。④ 从区域异质性来看,省会城市能通过城市扩张缓解城市运行压力,提升ULGUE;而非省会城市和中西部地区则要合理确定空间开发边界,实现“精明增长”。就中介效应而言,经济集聚充当城市扩张与ULGUE的中介角色,而高铁网络则通过促进产业结构升级效应提升ULGUE。当前,中国正处于城镇化和高铁网络发展的快速阶段,期望本研究为提升土地绿色利用的综合效能,促进区域高质量可持续发展提供支撑。

关键词: 城市土地绿色利用效率;时空演化;空间效应;高铁网络
CSTR: 32071.14.dlyj.20230941 DOI: 10.11821/dlyj020230941

1 引言

土地是人类赖以生存的物质基础和生态文明建设的重要支撑与根本之源，转变粗放、低效的土地利用模式，对推动区域高质量可持续发展具有重要意义[1]。改革开放以来，在“土地金融”和高速交通的引导下，中国城市空间结构、规模和增长机制发生显著变化[2]。相关数据显示，中国城镇化率从1978年的17.92%攀升至2020年的63.9%，远超同期世界平均水平。尽管快速城镇化提高了城乡生产要素配置效率与居民生活水平，深刻变革了经济社会发展模式，但低密度、“跳跃式”空间扩张政策，侵占了农田、林地等绿色空间，对生态环境和土地利用效率带来一系列负面效应。因此，科学评估ULGUE的时空格局及其演化机制，对促进土地绿色高效利用，实现城市“精明增长”具有重要的理论和现实意义。

收稿日期: 2023-10-24; **录用日期:** 2024-06-06
基金项目: 国家自然科学基金项目（42371185、42401193）
作者简介: 章屹祯（1993–），男，安徽池州人，博士，讲师，研究方向为创新生态与区域发展。
E-mail: zyzhktk@163.com
通讯作者: 曹卫东（1973–），男，安徽寿县人，博士，教授，博士生导师，研究方向为区域发展与交通物流。
E-mail: weidongwh@163.com

中国知网 https://www.cnki.net

ULGUE是指在一定的生产力水平下，城市土地、劳动力、资本等要素投入与城市经济、生态环境等产出在特定空间上的综合映射，其本质是以尽可能少的土地要素投入和最小的环境损失为代价，获取最大化土地绿色经济产出，进而推动“土地–经济–生态”高效协同发展[3,4]。早期有关ULGUE的研究主要集中在其测度体系、时空格局与演化特征等方面[5,6]。相关研究主要结合随机前沿模型（SFA）、熵值法、主成分分析、数据包络模型（DEA）测度土地利用效率，并认为中国城市土地利用效率呈“梯度分布”“圈层结构”“规模递减”等特征[7,8]。随着地理信息技术和空间计量模型的普及应用，土地利用效率的溢出效应、作用机制和优化路径受到学者广泛关注[9,10]。尤其在大规模城镇化背景下，城市扩张和高铁网络逐渐成为影响ULGUE的关键变量。从运河时代到高铁时代，交通均是引致区位变化与城市发展的核心要素之一。高铁网络所产生的“时空压缩”效应打破了原有的空间体系，加快了各种“要素流”的空间交互趋势，其对ULGUE的影响不言而喻。截止2020年底中国高铁里程突破3.79万km，是全球运营里程最长的国家。根据《铁路中长期发展规划》，未来中国高铁运营里程将达4.5万km，基本覆盖省会城市和50万人口规模城市，实现2小时都市圈。高铁具有频次高、速度快、可靠性强等特征，其对ULGUE的影响不言而喻。一方面，高铁网络作为经济社会发展的桥梁纽带，加快了各类生产要素的空间集散态势，重塑了区域空间结构体系，转变了土地利用方式、类型与效率[11]。此外，高铁网络也会扩大市场辐射范围、降低交易成本，促进区域间知识与技术传播，提升土地利用价值与绿色全要素生产率[12]。另一方面，高铁网络替代了传统的出行方式，极大减少对化石能源依赖和汽车尾气排放，实现经济与环境双赢的发展局面[13]。

城市扩张作为城市空间规模变化中的普遍现象，通常指城市在地域上向外推进和扩散的动态演变过程。城市扩张的根本动力来源于城市中社会关系的不断扩大和复杂化，其主要由经济、人口、财政和土地等因素共同决定，具有高度交织性和多维性。早期相关学者主要利用居住密度、用地面积、经济增长率、人口增长率、城市用地增长弹性系数和空间碎片化、景观格局等传统的单一或多维指标测度城市扩张[14,15]。随着地理信息技术和多源遥感数据的应用，提高了城市空间识别的精准性和实时性，为科学测度城市扩张提供了新视角[16,17]。目前，城市扩张对ULGUE的影响仍未明确。一些研究认为，城市扩张是“看不见的手”失灵后城市经济和空间的过度增长，其对生态环境和土地利用效率具有较大负面效应，并主张制定相关政策法规从源头遏制城市扩张[18,19]。另有研究认为，城市扩张所导致的资源约束趋紧、生态系统破坏、土地利用效率低下等问题与高质量可持续发展的理念相背而行[20]。但也有研究认为，合理的城市扩张不仅能降低污染物集中排放，还能促进劳动分工和提高生产效率[21]。

综上所述，现有研究在相关领域取得了丰硕成果，仍存在一些值得探究的问题。首先，在“流空间”背景下，高铁网络反映了城市间经济产业相互作用、相互关联程度，而现有研究主要利用高铁是否开通的0-1类型数据探究高铁运营的空间效应，这未能体现高铁网络联系、资源互换与合作交流对ULGUE的空间效应；其次，不同类型城市的土地利用强度、效率与结构截然不同，且城市扩张与高铁发展的规模、速度也存在显著差异，仅从整体视角难以揭示其底层逻辑，需进行分区异质性检验。显然，城市扩张和高铁网络对ULGUE的影响尚不明朗。城市扩张和高铁网络对ULGUE的空间溢出效应如何，其通过何种路径作用于ULGUE？这种溢出效应是否存在空间异质性？这是本文拟解决的主要问题。鉴于此，本研究融合多源数据，结合EBM-DEA模型和空间计量模型，综合探究城市扩张、高铁网络对ULGUE的空间效应。

本研究可能的边际贡献为：首先，融入多学科理论与方法，将城市扩张、高铁网络

中国知网 https://www.cnki.net

与ULGUE纳入统一的分析框架，从空间视角识别ULGUE的驱动因素，为后续相关研究拓展新视野。其次，侧重考察城市扩张和高铁网络对ULGUE的空间溢出效应，尝试回应其外部性问题的学术关切。最后，探究城市扩张与高铁网络对ULGUE的时空异质性影响与作用路径，为因地制宜确定城市开发边界，提供科学支撑。一方面，本研究为掌握中国ULGUE的时空演化规律，推动用地结构转型，实现“土地–经济–生态”高效协同发展提供理论参考。另一方面，明晰城市扩张与高铁网络对ULGUE的空间效应，对引导空间扩张政策制定和高铁网络发展具有一定的现实意义。

2　理论框架

改革开放以来，在粗放的经济发展模式下，中国城市土地利用强度、结构和类型发生明显变化，大量的农业用地转变为工业用地，湿地、林地等绿色空间不断缩减。迫于经济发展与财政压力，部分城市实行“以地生财”的“圈地运动”，盲目扩张城市空间边界，导致严重的环境破坏、社会割裂和土地利用效率低下问题[22]。显然，粗放低效的土地利用模式已然不能满足高质量发展要求，提升ULGUE，倒逼经济转型发展，已成为缓解“人地矛盾”的必然选择[23]。尤其，在交通强国和快速城镇化的背景下，探究城市扩张与高铁网络对ULGUE的空间效应具有较强的时代背景与理论机制。

从现实情况来看，随着“八纵八横”高速铁路网络建设，中国已成为全球高铁运营里程最长的国家。高铁网络具有较强的要素集聚与扩散能力，其释放了传统道路的运输能力，优化了资源配置效率，是实现区域绿色高效发展的重要保障。国家“十三五”规划和2016年发布的《中长期铁路网规划》提出，要完善现代综合交通运输体系，坚持网络化布局，充分发挥高速铁路对优化城市空间布局，提升经济社会效益与土地开发效率的支撑作用。城市扩张是城市发展过程中不可避免的问题，充分减少城市扩张对ULGUE的负面影响，对推动区域可持续发展具有一定的现实意义。在全球化和工业化浪潮下，资本和产业不断流入中国，导致城市建设规模不断扩大。一方面，大量农业用地转为工业用地，资源消耗、交通拥堵、空气污染等环境问题尤为突出。另一方面，在“土地财政”的压力下，一些地区无视城市发展的一般规律，盲目实施空间扩张[24]。为此，《国家新型城镇化规划（2014—2020年）》文件提出，要进一步优化城市空间结构，不断压缩建设用地规模，防止城市边界无序扩张，建设高密度、交通导向型的紧凑型城市。

从理论机制来看，古典区位论和现代区位论均认为，交通是引致运输成本、收益递增、规模经济和土地利用效率变化的关键因素。迄今为止，中国已建成相对完善的高铁网络，其巨大的运输能力和“时空压缩”效应正推动中国经济社会从“表层”到“深层”的结构性、系统性转型[25]。转型地理学擅长从社会–技术系统转型视角理解高铁网络对ULGUE的影响[26]。其中，多层次视角（MLP）理论将社会–技术系统转型抽象为利基、体制与远景3个层次相互作用的过程，并侧重解释技术创新如何克服当前语境下的技术锁定、路径依赖，实现其系统性、根本性转型[27,28]。具体而言，利基层能为高铁发展提供良好的空间，推动高铁网络发展与高铁技术研发。体制层是基础设施、文化制度、行为偏好、市场环境、技术标准等要素集合体，具备较强的稳定性[26,28]。远景是作用于体制和利基的宏观环境，如环境污染、生态破坏、经济衰退等，在本研究中可以抽象理解为ULGUE[29]。高铁网络所产生的资源配置效应、结构优化效应与技术扩散效应，通过挑战现有体制（产业、政策、市场、技术、文化、标准），构建全新的社会-技术系统，对ULGUE形成多层次、多维度效应[26,30]。这主要体现在，高铁运行对现有的基础设施、

中国知网　https://www.cnki.net

技术标准、产业结构、消费市场等产生一系列影响，并通过加快要素流动、优化资源配置、促进分工协作、调整产业布局等策略对土地利用方式、结构、效率起到决定性作用。然而，高铁网络的发展也可能引起较强的虹吸效应，导致网络边缘城市的人口、产业、资金等要素流向核心城市，从而加剧区域空间非均衡发展，引起极化发展与资源错配效应，不利于区域高质量可持续发展[31]。

城市扩张是城市地理学长期关注的核心议题，其主要通过多种效应作用于ULGUE。从正向效应来看，合理的城市扩张能够引起一定的“范围经济”效应，促进不同产业之间的交流合作，提高经济集聚的规模及质量[32]。其次，城市扩张还能推动“循环经济”与“共享经济”发展，扩大环境治理的规模效应，提升公共设施利用效率与单位面积土地效益。最后，城市扩张也会降低土地出让价格，改变土地利用类型，促进更多的闲置土地向现代服务业、旅游业转变，提升土地利用的附加值。从负向效应来看，在城镇化与“土地财政”的双重背景下，部分城市为追求经济利益，导致城市土地粗放利用与盲目扩张，抑制了ULGUE[33]。其次，城市过度扩张破坏了“空间肌理”、人文环境，引起“城中村”“中心城区衰败”等一系列经济社会问题，不利于经济效益与社会效益协同发展。此外，城市扩张侵占了农田、牧场和森林，导致城市永久性建筑迅速增加[16]，扩大了通勤距离和能源消耗，对生态环境与绿色发展造成严重负面效应。事实上，理想的城市扩张应是要素集聚优势与规模不经济之间自我平衡的结果。地方政府应基于城市人口、资源和环境共生发展理念，合理实施城市空间扩张战略，充分释放ULGUE的综合潜能[34]。

新世纪以来，城市扩张和高铁网络正在不断改变经济产业发展模式，重塑城镇空间体系，深刻影响ULGUE。未来，只有清晰的辨识城市扩张与高铁网络对ULGUE的异质性影响与空间效应，转变土地开发利用中“先发展后治理”的旧观念，积极践行在转型中发展，在发展中转型的新路径，构建“土地–经济–生态”共生演进、协同发展的制度体系，才能提升土地绿色全要素生产率，实现城市“精明增长”。本研究基于现象观察与理论构建，结合多源数据和空间计量模型，将城市扩张、高铁网络和ULGUE纳入统一的分析框架，希望能为后续相关研究提供理论基础与科学支撑（图1）。

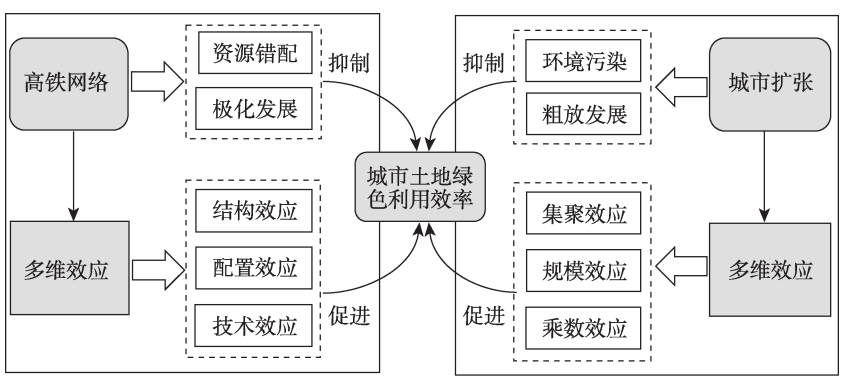

图1 城市扩张与高铁网络对ULGUE的理论分析框架

Fig. 1 Theoretical analysis framework of urban expansion and high-speed rail network on ULGUE

3 指标选取与数据来源

参考相关研究，ULGUE测度不仅包含传统经济要素产出，还需纳入生态损耗、环境污染等非期望产出。根据ULGUE的内涵，选取的ULGUE投入产出指标如下：① 投入

中国知网 https://www.cnki.net

指标：土地资源投入用城市建设用地面积表示；劳动力投入用城镇单位就业人员表示；资本投入用资本存量表示，参考张军[35]等使用永续盘存法估算城市资本存量；② 期望产出：将地区生产总值（GDP）作为期望产出，为消除通货膨胀影响，通过GDP平减指数将城市名义GDP转换为实际GDP；③ 非期望产出：参考相关文献，根据要素投入产出本质，将废水、二氧化硫、$PM_{2.5}$浓度作为非期望产出指标[3]。

以中国268个地级市为研究对象，由于统计口径和数据可获得性等原因，研究对象不包括西藏自治区、香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾省。城市建设用地、常住人口、城镇单位就业人员、工业废水、二氧化硫等数据主要来源于《中国城市统计年鉴》《中国环境年鉴》及各省市统计公报，部分地级市出现不同年份数据缺失的情况，采用插值的方式进行补充。2008—2013年DMSP和2012—2019年VIIRS夜间灯光数据来源于National Geophysical Data Center（NGDC）网站（http://ngdc. noaa. gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html）。高铁班次数据来自于盛名列车时刻表（http://www.smskb.com/），以2008—2019年高铁站经停车次数构建高铁网络，统计车次类型主要包括高铁（G字头）、动车（D字头）与城际列车（C字头）。2008—2019年$PM_{2.5}$浓度栅格数据来源于达尔豪斯大学大气成分分析组网站（http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/）。由于该数据精度为0.01°×0.01°空间分辨率，本研究使用ArcGIS软件将其解析成地级市$PM_{2.5}$浓度数据。

4　变量选取

4.1　核心解释变量

4.1.1 城市扩张（*UE*）　随着地理信息技术的发展，夜间灯光遥感数据具有较高的时间跨度和空间分辨率，是有效测度城市扩张的重要途径。DMSP-OLS与NPP-VIIRS是目前应用最广泛的夜间灯光遥感数据。其中DMSP-OLS夜间灯光数据共由六种卫星获取，数据间的连续性不强，空间分辨率较低（1 km）；NPP-VIIRS的分辨率较高（0.5 km）、探测能力较强，但容易导致数据存在偶然噪声。由于DMSP-OLS与NPP-VIIRS灯光数据存在较大差异，需对其进行相互校正与一致性处理。参考相关文献[36]，具体处理步骤如下：首先，使用最近邻法将影像重采样为1 km×1 km空间分辨率，并调整2种影像的像元偏差。其次，选取黑龙江省鸡西市作为校正地点，使用一元二次函数对DMSP-OLS灯光数据进行相互校正。由于2008—2019年中国经济一直保持着正增长，未出现停滞或倒退情况，DN值的变动也应符合该趋势。基于上述假设，按照公式（1）对DN异常取值进行调整：

$$DN_{(n,i)}=\begin{cases}0DN_{(n+1,i)}=0\\ DN_nDN_{(n+1,i)}>0DN_{(n-1,i)}>DN_{(n,i)}\\ DN_{(n,i)}\text{其他}\end{cases}\tag{1}$$

此外，考虑到NPP-VIIRS的探测能力较强，使用0.3作为阈值去除NPP-VIIRS影像中的噪音，同时将*DN*为负值的像元赋值为0[37]。最后，利用2013年重叠影像进行DN值相关分析，将NPP-VIIRS拟合为DMSP-OLS数据。对比各函数发现幂函数的R^2较大（0.8414），拟合效果较好，本研究利用该拟合函数，将2013—2019年NPP-VIIRS灯光数据转化为类DMSP-OLS数据。基于上述融合后的2008—2019年一致夜间灯光数据，为避免影像噪声，参考相关文献[38]，以灯光亮度6为阈值提取城市空间，并借鉴Fallah等方法[39]，构建城市扩张指数（*UE*）：

$$UE=\frac{1}{2}\times\left(\frac{\sum_{t=1}^{n}N_{ith}}{\sum_{t=1}^{m}N_{it}}-\frac{\sum_{t=1}^{m-n}N_{itl}}{\sum_{t=1}^{m}N_{it}}\right)+\frac{1}{2}\tag{2}$$

中国知网　https://www.cnki.net

式中：*UE*表示城市扩张指数；*m*为像元总数；N_{jth}表示城市*j*内部第*t*个像元亮度高于全国平均像元亮度；N_{jtl}表示城市*j*内部第*t*个像元亮度低于全国平均像元亮度；N_{jt}表示城市*j*内部像元*t*。此外，引入城市扩张的平方项（UE^2）来考察城市扩张程度进一步提升与ULGUE间的非线性关系。显然，相比传统的城市扩张测度方法，该方法从像元层级识别城市内部细分区域的差异，能够更加灵敏的测度城市扩张的空间范围与程度。

4.1.2 高铁网络（*HDC*） 以2008年—2019年城市间高铁经停班次构建关联矩阵（不含港澳台），数据来源于盛名列车时刻表（http://www.smskb.com/），高铁班次统计类型包括高铁（G字头）、动车（D字头）与城际列车（C字头）。度数中心度（degree centrality）是判断节点影响力的重要指标，若某节点的度数中心度越大，则该节点在网络中的地位越高、网络服务范围越广。接近中心性（closeness centrality）侧重于从整体视角反映节点在网络中的权利与地位，即某节点到网络中其他节点的最短距离较小，则该节点的接近中心性就较高，在整体网络中更接近几何中心位置。参考相关文献，使用度数中心度（*HDC*）作为衡量高铁网络发展的指标[40]，并利用接近中心性（*HCC*）来评估模型构建的稳健性。

$$HDC_i = \sum_{j=1, j\neq i}^{n} K_{ij} \tag{3}$$

$$HCC_i = (n-1) / \sum_{j=1, j\neq i}^{n} d_{ij} \tag{4}$$

式中：HDC_i为*i*城市的度数中心度；*n*为城市个数；K_{ij}代表城市*i*与*j*直接相连的个数；HCC_i表示*i*城市的接近中心性，d_{ij}是节点*i*到节点*j*最短路径。

4.2 中介变量

参考相关文献，选取产业结构与经济集聚作为本研究的中介变量[41,42]。产业结构（*STR*）：高铁网络具有较强的空间溢出效应，其加速沿线地区资源要素空间重构与再配置，进而推动区域产业结构升级，提升ULGUE，使用第三产业占比/第二产业占比表征。经济集聚（*ECO*）：城市过度扩张导致土地资源粗放利用，不利于经济集聚发展，进而降低土地利用强度与效率，使用单位空间范围内的经济活动疏密程度表征经济集聚水平。

4.3 控制变量

参考相关文献，选取产业规模、环境规制、政府干预、外商直接投资作为本研究的主要控制变量[43,44]。产业规模（*IND*）：使用城市规模以上企业数占全国总数的比例表征[44]；环境规制（*ER*）：参考相关研究[45]，构建环境规制的综合指数表征环境规制水平；财政支出（*FIS*）：使用地方财政预算内支出占GDP比例表征；外商直接投资（FDI）：使用城市年度外商实际投资占GDP比例表征。

5 研究方法

5.1 非期望产出的超效率EBM-DEA模型

数据包络分析（DEA）模型可用于评估多要素投入产出效率，其模型主要分为基于径向度量的CCR/BBC-DEA模型和基于非径向度量的SBM-DEA模型。传统CCR和BBC模型在效率评估时易忽略非径向松弛变量，而SBM模型虽然考虑了非径向松弛变量，却损失了投入产出实际值与目标值之间的比例信息。为解决该模型中的缺陷，Tone等于2010年提出了EBM-DEA模型，该模型能同时解决径向和非径向DEA模型中的缺陷，可真实评估决策单元（DMU）的ULGUE[46]。具体模型如下：

中国知网 https://www.cnki.net

$$\gamma^{*}=\min\frac{\theta-\varepsilon_x\sum_{i=1}^{m}\frac{w_i^{-}s_i^{-}}{x_{i0}}}{\varphi+\varepsilon_y\sum_{r=1}^{s}\frac{w_r^{+}s_r^{+}}{y_{r0}}+\varepsilon_u\sum_{p=1}^{q}\frac{w_p^{-}s_p^{-}}{u_{p0}}}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\sum_{j=1}^{n}x_{ij}\lambda_j+s_i^{-}=\theta x_{i0},\ i=1,2,...,m\\ \sum_{j=1}^{n}y_{rj}\lambda_j-s_r^{+}=\varphi y_{r0},\ r=1,2,...,s\\ \sum_{j=1}^{n}u_{pj}\lambda_j+s_p^{-}=\varphi u_{p0},\ p=1,2,...,q\\ \lambda_j\geqslant 0,\ s_i^{-},s_r^{+},s_p^{-}\geqslant 0\end{cases}\tag{5}$$

式中：γ^{*}表示*ULGUE*值，λ_j指DMU_j的线性组合系数；x_{ij}，y_{rj}，u_{pj}分别表示DMU_j的第i个输入，第r个期望产出和第p个非期望产出；n，m，s和q分别代表*DMU*的数量，投入数量、期望产出和非期望产出数量；s_r^{+}和s_p^{-}分别表示期望产出和非期望产出的松弛变量，W_i^{-}和W_p^{-}分别为两者的权重；θ代表径向规划参数。非径向部分比例的参数ε取值范围为[0,1]，当$\varepsilon=0$等效于径向*CCR*模型，当$\varepsilon=1$等效于*SBM*模型。

5.2 空间计量经济学模型

由于ULGUE存在空间异质性和相关性，本地ULGUE可能会受到邻近城市的影响，从而导致传统计量方法的估计结果存在一定偏差，故需纳入合适的空间计量经济学模型进行综合评估[47]。空间计量经济学模型主要包括空间滞后（SLM）、空间误差（SEM）以及空间杜宾模型（SDM）。SLM主要研究被解释变量的空间扩散效应；SEM包含误差项的交互项，侧重揭示被忽略的自变量对被解释变量的影响。然而，SDM是SLM和SEM的一般形式，且同时具备空间自相关和溢出效应，能够有效测度被观测变量所产生的空间效应。本研究使用SDM测度城市扩张、高铁网络对ULGUE的空间效应。具体模型如下：

$$\begin{aligned}ULGUE_{it}=&\delta\sum_{j=1}^{n}w_{ij}ULGUE_{it}+\beta_1UE_{it}+\beta_2UE_{it}^{2}+\beta_3HDC_{it}+\beta_4IND_{it}+\beta_5ER_{it}\\&+\beta_6FIS_{it}+\beta_7FDI_{it}+\theta_1\sum_{j=1}^{n}w_{ij}UE_{it}+\theta_2\sum_{j=1}^{n}w_{ij}UE_{it}^{2}+\theta_3\sum_{j=1}^{n}w_{ij}HDC_{it}\\&+\theta_4\sum_{j=1}^{n}w_{ij}IND_{it}^{2}+\theta_5\sum_{j=1}^{n}w_{ij}ER_{it}+\theta_6\sum_{j=1}^{n}w_{ij}FIS_{it}+\theta_7\sum_{j=1}^{n}w_{ij}FDI_{it}+\mu_{it}+\varepsilon_{it}\end{aligned}\tag{6}$$

式中：$ULGUE_{it}$为被解释变量，表示城市i在第t年的*ULGUE*；δ为空间自回归系数；β_1~β_7为解释变量系数；θ_1~θ_7表示外生变量的空间自回归系数；w_{ij}为$n\times n$阶的空间权重矩阵；μ_i、ε_{it}分别为个体固定效应及服从正态分布的随机误差项；具体变量参见上文。

5.3 空间权重矩阵设定

空间权重矩阵反映不同要素间相互作用、相互依赖关系，构建空间权重矩阵是空间计量经济学分析的前提。经济距离矩阵主要揭示地理要素和经济发展对城市间联系的影响。不对称经济距离矩阵主要考虑城市间的作用程度具有较强的非对称性，即发达城市对中小城市经济产业影响更大。综合考虑地理和经济因素，分别构建经济距离矩阵（W_1）及不对称经济距离矩阵（W_2）。

中国知网　https://www.cnki.net

$$W1=\begin{cases}\dfrac{GDP_i\times GDP_j}{d_{ij}^2},(i\neq j)\\0,(i=j)\end{cases} \tag{7}$$

$$W2=\begin{cases}1/d_{ij}\times \mathrm{diag}\left(\dfrac{GDP_i}{GDP_a}\right),(i\neq j)\\0,(i=j)\end{cases} \tag{8}$$

式中：GDP_i和GDP_j分别表示城市i和j的GDP；d_{ij}指两个城市行政中心间的直线距离；$diag(...)$表示对角矩阵。

6 ULGUE的时空分异特征

6.1 ULGUE的时序演化特征

利用非期望超效率EBM-DEA模型测度中国268个城市的ULGUE，并分析其时序演化特征（图2）。研究期内，中国ULGUE的均值与峰值呈逐年增长态势，其偏度与峰度分别为1.227和1.886，表明ULGUE呈明显的正偏态分布，其均值大于中位数和众数，但也具有较强的两极分化特征。为进一步探究ULGUE时序演化特征，本研究对2008—2019年ULGUE执行核密度分析。从核密度位置来看，2008—2019年核密度的峰值存在明显的右移趋势，表明中国ULGUE整体呈现逐渐上升趋势。随着绿色发展理念的实施，地方政府摒弃粗放的土地利用模式，推进土地集约利用与“精细化”发展，不断提升土地利用的整体效率。从核密度的峰度来看，核密度的峰值从2008年的5.4下降到2019年的2.6，表明ULGUE较低的城市数量和城市间的绝对差值在不断减小。从核密度的延展性来看，研究期内核密度曲线呈明显的右尾现象，且2019年在效率为1处形成了峰值，表明近些年部分城市的ULGUE处于相对较高水平，土地资源粗放、低效利用的趋势正在得到逐步缓解。

6.2 ULGUE的空间关联特征

结合全局Moran's I指数探究2008—2019年中国ULGUE的空间自相关特征（表1）。研究期内，ULGUE的全局Moran's I指数均显著为正，具有较强的空间依赖特征。具体而言，在经济距离矩阵下，ULGUE的全局Moran's I指数在0.363~0.640之间波动，且在1%水平上具有统计学意义，表明ULGUE在地理邻近及经济产业相似的城市间具有一定的趋同效应。一方面，地理邻近城市的地理环境、地形地貌等自然条件较为相似，导致

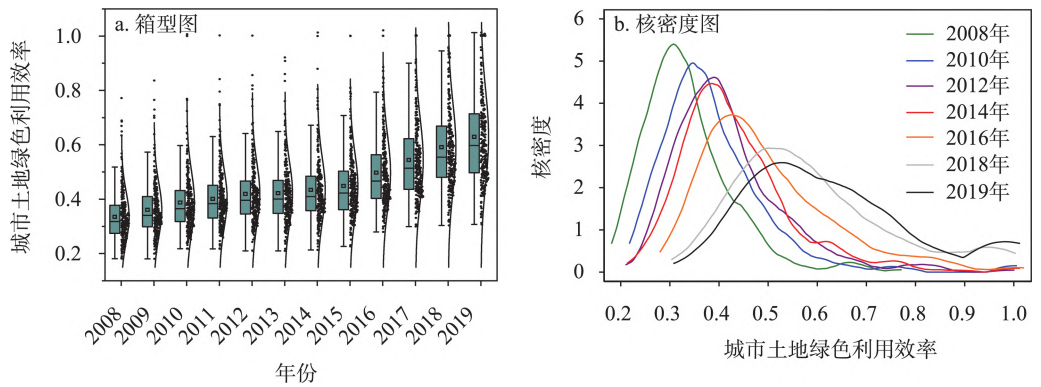

图2 ULGUE的箱型图及核密度图

Fig. 2 Box plot and kernel density analysis of ULGUE

中国知网 https://www.cnki.net

表1　ULGUE的空间自相关指数

Tab. 1　Spatial autocorrelation index of ULGUE

年份	经济距离矩阵（W1）			不对称经济距离矩阵（W2）		
	Moran's *I*	*Z*	*P*	Moran's *I*	*Z*	*P*
2008	0.450	4.545	0.000	0.071	7.506	0.000
2009	0.428	4.327	0.000	0.069	7.249	0.000
2010	0.363	3.702	0.000	0.051	5.527	0.000
2011	0.459	4.643	0.000	0.063	6.647	0.000
2012	0.450	4.543	0.000	0.062	6.558	0.000
2013	0.392	3.960	0.000	0.063	6.611	0.000
2014	0.404	4.088	0.000	0.062	6.580	0.000
2015	0.478	4.816	0.000	0.073	7.702	0.000
2016	0.377	3.794	0.000	0.054	5.709	0.000
2017	0.454	4.558	0.000	0.073	7.665	0.000
2018	0.471	4.719	0.000	0.053	5.667	0.000
2019	0.640	6.396	0.000	0.074	7.775	0.000

其土地类型、土地质量基本一致。另一方面，经济产业相似的城市其土地利用结构和利用强度等较为一致，导致ULGUE具有较强的空间自相关特征。值的注意的是，在不对称经济距离矩阵下，ULGUE的全局Moran's *I*指数相对较小，表明经济产业发展差距较大的城市间存在明显的“发展鸿沟”，不利于区域产业分工协作和互补发展，只有不断的缩小城市间经济产业发展差距，优化资源配置、促进要素双向流动，才能加快不同等级城市间的空间联系，促进区域ULGUE高效协同发展。

7　实证分析

7.1 基准回归结果分析

在模型估计之前，首先需要结合拉格朗日乘数（LM）与稳健拉格朗日乘数（Robust LM）进行检验。结果显示，在经济距离矩阵和不对称经济距离矩阵下，LM、Robust-LM均通过1%显著性检验，表明ULGUE具有一定的空间依赖性，SLM或SEM为相对理想的模型。然而，在两种权重矩阵下Wald、LR也通过了显著性检验，表明SDM不可退化为SLM或SEM。此外，在W1和W2矩阵下Hausman统计值分别为400.3811和354.557，且在1%的显著性水平下拒绝原假设，故具备固定效应的SDM更适合本研究。

表2报告了传统面板模型与SDM的估计结果，发现时空固定效应模型的对数似然值（Log-L）和拟合优度（R^2）均大于时间与空间固定效应模型，表明时空固定效应下的SDM拟合效果更优。此外，不同于SDM估计结果，传统面板模型的R^2相对较小且各变量的系数和显著性水平与SDM存在一定差异，表明忽略空间因素可能会造成有偏估计。结果显示，城市扩张及其平方项的系数分别为0.0374和−0.0834，并在1%水平下通过显著性检验，表明城市扩张和ULGUE具有显著的倒“U”型关系。一方面，城市扩张是空间结构优化的内在动力，从单中心空间结构，向多中心空间发展模式转变，能有效缓解城市交通拥堵与功能过度集中。另一方面，部分城市通过“土地金融”换取经济粗放增长、缓解财政压力，可能导城市空间“跳跃式开发”、土地资源粗放利用和环境恶化。因

中国知网　https://www.cnki.net

表2 基准回归结果

Tab. 2 Baseline regression results

解释变量	传统固定效应	固定效应的SDM		
		时空固定	空间固定	时间固定
UE	0.0249***（3.1727）	0.0374***（5.0530）	0.0390***（5.2362）	−0.0316***(−5.9147）
UE^2	−0.0609（−1.6098）	−0.0834**（−2.0869）	−0.0874**（−2.1718）	0.0530**（2.2219）
HDC	0.0140***（12.1235）	0.0033***（2.8589）	0.0033***（2.8371）	−0.0017（−1.3047）
IND	−0.0593***（−12.1458）	−0.0511***（−10.3932）	−0.0517***（−10.460）	0.0230***（8.0563）
ER	0.0453***（52.1387）	0.0230***（21.8985）	0.0235***（22.5313）	0.0278***（26.2849）
FIS	0.0938***（31.0286）	0.0322***（6.9861）	0.0352***（8.1153）	−0.0465***（−8.8252）
FDI	0.0010（0.8655）	0.0029***（2.8456）	0.0027***（2.7028）	−0.0013（−1.0205）
WX	YES	YES	YES	YES
δ	−	0.2219***	0.3759***	0.2259***
R^2	0.6938	0.9000	0.8983	0.5788
$sigma^2$	0.0033	0.0024	0.0024	0.0100
Log−L	−	5130.3034	5096.6757	2803.6772

注：*表示P<0.1，**表示P<0.05，***表示P<0.01；括号内为统计T值。

此，要加强土地资源开发和空间规划，打造规模化、集约化的经济发展模式，警惕城市用地无序、过度扩张。高铁网络的系数为0.0033，并在1%水平下通过显著性检验，表明高铁网络对ULGUE存在显著的正向空间效应。显然，高铁网络加快了要素流动的频次、效率，重塑了区域空间结构体系，提升了土地利用价值与绿色全要素生产率。同时，高铁网络的发展演化对当前的产业结构、政策体系、消费市场、技术标准形成一定压力，持续推动中国经济社会从“表层”到“深层”的结构性、系统性转型，从而对土地利用方式、结构、效率起到决定性作用。

7.2 空间溢出效应分析

结合偏微分方程，本研究将空间效应进一步分解为直接效应和溢出效应，重点考察城市扩张和高铁网络对本地与邻近ULGUE的边际效应（表3）。结果显示，城市扩张每提升1%，本地ULGUE提升0.0365%，而邻近城市则下降0.0594%。城市扩张平方项对ULGUE的直接效应和溢出效应分别为−0.0811%和0.2503%，且均通过显著性检验。城市化的本质是生活和生产方式的转变，合理的城市扩张可以优化产业结构，盘活存量用地，但过度的城市扩张不仅增加能源消耗和污染物排放，还造成土地资源闲置与粗放发展。对于邻近城市而言，本地城市扩张可能会产生一定的“马太效应”，导致邻近城市的人口与产业向本地城市转移，从而削弱其经济发展效率与土地投资强度。然而，本地城市进一步扩张所产

表3 空间效应分解

Tab. 3 Spatial effect decomposition

解释变量	*UE*	UE^2	*HDC*	*IND*	*ER*	*FIS*	*FDI*
直接效应	0.0365***	−0.0811**	0.0032***	−0.0515***	0.0232***	0.0323***	0.0030***
	（5.0013）	（−2.0852）	(2.9042)	（−10.4712）	（21.5647）	（6.9911）	（2.8866）
溢出效应	−0.0594***	0.2503***	−0.0038	−0.0266**	0.0096***	−0.0018	0.0051*
	（−3.9584）	（2.8390）	(−1.016)	(−2.0988)	（2.4619）	（−0.1353）	（1.6618）
总效应	−0.0229*	0.1691*	−0.0006	−0.0782***	0.0328***	0.0304**	0.0081**
	（−1.6317）	（1.9723）	(−0.1612)	（−6.2564）	（8.0320）	（2.1588）	（2.3179）

注：*表示P<0.1，**表示P<0.05，***表示P<0.01；括号内为统计T值。

中国知网 https://www.cnki.net

生的经济辐射与“极化涓滴”效应会加快资源双向流动，促进邻近城市的产业升级与经济增长。高铁网络规模每提升1%，本地ULGUE提升0.0032%，而邻近城市则下降0.0038%，但后者未通过显著性检验。一方面，高铁网络能够加快人口、产业、资金等要素的空间集聚与扩散态势，推动空间重构与产业重组，提升高铁沿线的土地利用价值与经济、社会、生态等综合效益。另一方面，高铁网络可能会产生一定的“虹吸效应”，导致邻近城市的资源要素流失，加快人口产业“空心化”，不利于土地资源规模化、集约化利用。

表3报告了各控制变量对ULGUE的直接与溢出效应。具体来看，产业集聚对本地与邻近ULGUE均显著为负，表明中国大部分城市的产业集聚质量较低，尚未形成完善的产业链与协同互补效应，反而加剧了企业间的恶性竞争。环境规制显著提升了本地与邻近ULGUE，这与本研究的期望一致。财政支出显著提升了本地与邻近ULGUE。这主要因为，财政支出可以在环境保护，基础设施建设等方面提供保障，能有效扩大土开发利用价值。外商直接投资每提升1%，本地与邻近ULGUE相应提升0.0030%和0.0051%，表明外商投资并未形成“污染天堂”效应，反而在一定程度上提升了ULGUE。

7.3 区域异质性检验

为避免不同规模城市的土地利用方式、高铁发展水平对估计结果产生偏差，需进行区域异质性检验。根据地理区划将样本城市划分为东部、中部与西部地区。此外，现有研究认为省会城市经济要素相对丰富，人口与产业地理集中度较高，其空间扩张具有一定的合理性。因此，考虑城市扩张与高铁网络对省会与非省会城市的异质性影响，对引导高铁网络发展和空间扩张政策制定具有一定的实践意义（表4）。

结果显示，城市扩张与东部、中部和西部地区的ULGUE呈倒“U”型关系，但仅东部地区通过了显著性检验。对于东部地区而言，适当的城市扩张可以优化空间布局，促进城乡用地结构调整，扩大污染治理的规模效应，提升ULGUE。然而，与东部地区相比，中西部地区经济要素相对分散，生态环境脆弱，其城市扩张并未产生明显正向空间效应，反而会付出巨大的经济和环境成本，损害原有生态系统。值得注意的是，城市扩张与非省会ULGUE具有显著的倒“U”型关系，但省会城市空间进一步扩张提升了其ULGUE，这与基准回归结果相反。实际上，部分城市的人口、产业流失较为严重，紧凑式空间开发模式有利于发挥要素集聚效应，推动“规模经济”增长。然而，省会城市经

表4　区域异质性检验

Tab. 4　Regional heterogeneity test

解释变量	东部地区	中部地区	西部地区	省会城市	非省会城市
UE	0.0420***	0.0102	0.1722	−0.0044	0.0329***
	（5.0096）	（1.1186）	（0.6361）	（−0.1797）	（4.3390）
UE^2	−0.2282***	−0.0576*	−0.3631	0.4109***	−0.1130***
	（−3.7806）	（−1.8763）	（−0.6661）	（3.1325）	（−2.7629）
HDC	0.0056***	0.0005	0.0045**	0.0077*	0.0025**
	（2.6837）	（0.5430）	（2.0476）	（1.8100）	（2.0885）
WX	YES	YES	YES	YES	YES
δ	0.3399***	0.2579***	0.1849***	0.2879***	0.1459***
	（6.4327）	（4.6469）	（3.5712）	（4.19937）	（3.8773）
R^2	0.9077	0.9675	0.8664	0.9237	0.8989
$sigma^2$	0.0026	0.0001	0.0020	0.0024	0.0023
Log−L	1581.5026	2901.2466	1267.959	575.14052	4612.6981

注：*表示P<0.1，**表示P<0.05，***表示P<0.01；括号内为统计T值。

中国知网　https://www.cnki.net

济要素相对集中，人口密度较大、交通拥挤、土地价格昂贵，城市扩张有利于“城市更新”，缓解“人地矛盾”。高铁网络显著提升了东部和西部地区的ULGUE，但对中部地区的正向效应相对较弱。一方面，高铁网络促进了中部地区资源要素非均衡流动，导致部分城市虹吸效应不断加剧，不利于ULGUE高效协同发展；另一方面，尽管高铁网络推动了中部地区的经济产业发展与技术合作，但也加快了“三高”产业向中部地区转移，加剧了土地开发利用中的“环境正义”问题。

7.4 中介效应分析

为进一步分析城市扩张和高铁网络对ULGUE的作用机理，参考中介效应三步法[48]，检验城市扩张和高铁网络是否分别通过经济集聚和产业结构作用于ULGUE。其主要步骤如下：首先在SDM基础上，考察未考虑中介变量的情况下城市扩张和高铁网络对ULGUE的影响，用模型M1表示；其次，分别考察城市扩张和高铁网络对产业结构和经济集聚的影响，用模型M2表示；最后，综合考察核心解释变量和中介变量与ULGUE间的关系，用模型M3表示。所有回归均采用时空双重固定的SDM，同时控制其余控制变量，各模型的总效应估计结果见表5。

模型（1）显示，城市扩张与经济集聚具有较强的倒U型关系，表明城市过度扩张可能加剧区域不平衡，导致产业空心化，不利于经济集聚发展。模型（2）显示，城市扩张和经济集聚系数均在1%水平下显著为正，表明经济集聚充当城市扩张与ULGUE的中介角色。显然，合理的城市扩张能通过空间结构优化，提升城市的规模经济效益与要素集聚水平，提升单位土地面积效益。模型（3）显示，高铁网络系数在1%水平下显著为正，表明高铁网络发展优化了资源配置效率，有利于产业结构高级化发展。模型（4）显示，高铁网络和产业结构均在1%水平下显著为正，表明高铁网络具有较强的要素集聚与扩散能力，能够促进沿线地区的产业转型升级，转变土地利用的结构、性质，提升ULGUE。

7.5 稳健性与内生性检验

稳健性与内生性检验是考察变量选取、参数设置和模型构建是否具有合理性的重要方式。本研究通过以下三种方法[49,50]，分别在空间固定与时空固定效应模型下，验证上述主要结论的稳健性。具体如下：首先，不对称经济距离矩阵综合考虑了城市间经济社会

表5 中介效应分析

Tab. 5 Intermediary effect analysis

变量	经济集聚的中介效应		变量	产业结构的中介效应	
	模型（1）	模型（2）		模型（3）	模型（4）
	ECO	ULGUE		IND	ULGUE
UE	0.0234**	0.0186***	*HDC*	0.0156***	0.0080***
	（2.0873）	（3.8933）		（2.5633）	（2.4997）
UE^2	−0.0074***	−0.0064***	*STR*		0.0457***
	（2.4087）	（−2.9083）			（2.2256）
ECO		0.0258***	*UE*	0.0452**	0.0183***
		（2.4759）		（1.9935）	（3.9288）
HDC	0.0082**	0.0055***	UE^2	−0.0734	−0.0388**
	（1.9582）	（2.7574）		（−1.3863）	（2.0783）
控制变量	YES	YES	控制变量	YES	YES
δ	0.3758***	0.2492***	δ	0.1855***	0.3224***
R^2	0.8943	0.9016	R^2	0.8988	0.8986

注：*表示P<0.1，**表示P<0.05，***表示P<0.01；括号内为统计T值。

中国知网 https://www.cnki.net

发展的层次性与差异性，更能体现ULGUE的时空异质性与空间非均衡特征。表6的模型（1）和模型（4）是将W1矩阵替换为W2矩阵的回归结果；其次，重构核心解释变量可有效检验变量偏差对回归结果与数据均衡性的影响。高铁网络的接近中心性主要指该节点与网络中其他节点捷径距离之和，节点的接近中心性越大表明该节点更可能存在于“高铁网络中心”位置，在发出和接收关系时受其他节点控制程度较小。表6的模型（2）和模型（5）是用高铁网络的接近中心性替换度数中心度的回归结果；最后，考虑到可能存在的内生性问题，本研究以ULGUE的滞后项作为SDM的解释变量，构建动态空间杜宾模型，以期更准确的考察城市扩张、高铁网络对ULGUE的空间效应。表6的模型（3）和模型（6）是以ULGUE的滞后项作为SDM解释变量的回归结果。结果显示，在不对称经济距离矩阵下，城市扩张、高铁网络的系数和显著性水平与基准回归结果基本一致；高铁网络接近中心性指标与ULGUE依然呈明显的正向单调关系。此外，ULGUE滞后项系数显著为正，且其余变量的系数和显著性水平也均未发生明显变化，表明本研究主要结论具有较强的可靠性和稳健性。

表6　稳健性与内生性检验

Tab. 6　Robustness and endogenous test

解释变量	空间固定效应模型			时空固定效应模型		
	模型（1）	模型（2）	模型（3）	模型（4）	模型（5）	模型（6）
UE	0.0328***	0.0344***	0.0119**	0.0343***	0.0363***	0.0103*
	（4.4544）	（4.6544）	（1.9532）	（4.8493）	（4.8693）	（1.7306）
UE^2	−0.0705*	−0.0641*	−0.0629*	−0.0733*	−0.0683*	−0.0492*
	（−1.7716）	（−1.6567）	（−1.7925）	（−1.8886）	（−1.7111）	（−1.6635）
HDC	0.0037**	0.0140***	0.0021**	0.0037***	0.0128***	0.0022**
	（3.1858）	（3.5870）	（2.0863）	（3.2888）	（3.2540）	（2.2248）
$Lag_{(UCUL)}$	–	–	0.7602***	–	–	0.7622***
			（44.8511）			（45.386）
WX	YES	YES	YES	YES	YES	YES
δ	0.5969***	0.2009***	0.3299***	0.4269***	0.3809***	0.3419***
R^2	0.8997	0.9003	0.9325	0.9002	0.8984	0.9347
$sigma^2$	0.0026	0.0024	0.0016	0.0024	0.0024	0.0016
Log−L	5129.2056	5138.0667	5285.247	5092.7293	5098.2497	5304.7826

注：*表示P<0.1；**表示P<0.05；***表示P<0.01；括号内为统计T值。

8　结论与讨论

8.1　结论

土地绿色高效利用是生态文明建设的重要支撑与根本之源。在现象观察与理论构建的基础上，本研究结合中国268个城市面板数据，利用ArcGIS分析、EBM-DEA模型和空间计量经济学等模型，探究了ULGUE的演化格局及城市扩张、高铁网络对其影响及空间效应，主要结论如下：

（1）研究期内，中国ULGUE均值从2008年的0.335上升到2019年的0.630，表明中国ULGUE普遍偏低，在土地利用过程中仍然存在结构失衡、粗放滥用等问题，但其核密度曲线整体右移，且峰值不断降低，反映城市间ULGUE的整体差距逐渐缩小，土地“精细化”利用程度有所提升。

（2）城市扩张及其平方项的系数分别为0.0374和−0.0834，且均通过了显著性检验，

中国知网　https://www.cnki.net

表明城市扩张与ULGUE具有显著的倒“U”型关系，即适当的城市扩张能够提高产业发展的层次与质量，优化土地资源配置，但过度扩张会导致生态破坏、土地资源错配与粗放发展等负面效应。高铁网络能够重塑既有的社会–技术体制，推动经济社会从“表层”到“深层”的系统性重塑，进而不断转变土地利用的结构与类型，对ULGUE产生显著的正向空间效应。

（3）从空间溢出效应来看，高铁网络具有较强的资源集聚与扩散效应，显著提升了本地城市的ULGUE，但也要防范其网络“虹吸效应”，导致邻近的人口产业“空心化”，不利于其土地资源规模化、集约化利用；从区域异质性来看，省会城市要素地理集中度较高，能够通过城市扩张进行“城市更新”，缓解“人地矛盾”；但非省会城市和中西部地区要严守土地利用红线，合理确定城市开发边界，充分释放ULGUE的综合效能。从中介效应来看，经济集聚在城市扩张与ULGUE中充当中介角色，高铁网络能够促进城市产业转型升级，进而提升ULGUE。

8.2 讨论

基于上述主要结论，本研究提出几点可能的政策启示：① 转变土地利用结构，优化建设用地布局，推动土地利用协同高效发展。要进一步优化资源配置，加快中西部地区的土地利用结构调整和产业承接转移，通过要素集聚、产业集聚、人才集聚与资金集聚，提升土地利用强度，从源头上控制和减少闲置土地。同时，大力转变土地利用类型，通过“腾笼换鸟”与“退二进三”等措施，着力盘活存量用地，优化产业结构，激活土地利用价值和发展效能。② 发挥高铁网络的要素重配与体制重构效应，提升城市土地绿色利用的综合效益。高铁网络是推动区域经济产业转型发展与社会–技术体制重构的关键动力与重要源泉，其具有较强的结构效应与技术效应，能够打破既有的市场均衡，通过优化资源配置、调整产业布局，转变土地利用的类型与结构。③ 因地制宜，设计差异化的空间扩张战略，促进城市“精明增长”。在区域非均衡发展的背景下，中国部分城市人口产业快速流失，导致过度的城市扩张，不仅不利于集聚经济与规模经济发展，而省会城市资源要素过度集聚，城市扩张可以有效优化其空间结构，提升资源配置效率与劳动生产率。因此，省会城市可以通过城市扩张和功能转移方式，构建多中心空间发展模式，推动“城市更新”，缓解“人地矛盾”，实现生产要素的优化组合和合理配置，提升城市管理水平和运行效率。然而，对于部分中小城市要严格控制空间增长边界，挖掘现有土地潜力，引入市场竞争机制，实现城市“精明增长”。

在理论构建与实证研究的基础上，本研究侧重探究城市扩张与高铁网络对ULGUE的空间效应，为提升ULGUE，实现区域高质量可持续发展提供一定的借鉴意义，但也存在以下不足。一方面，ULGUE的内涵丰富，涉及层面广泛，如何综合经济、环境、社会等多要素、多主体，科学、准确的测度ULGUE还有待改进。另一方面，本研究的夜间灯光处理方法解决了长时间序列灯光影像数据集中影像间不稳定等问题，但是该方法并未完全解决影像中像元DN值饱和问题。因此，如何解决城市层面的夜间灯光提取精度、夜间灯光拟合效果及不同年份之间夜间灯光DN值的波动对城市扩张程度产生的影响，仍值得深入探究。

致谢：真诚感谢匿名评审专家在论文评审中所付出的时间和精力，专家对本文理论内涵、结果分析、图表规范及文本逻辑等方面的修改意见，使本文受益匪浅。

参考文献（References）

[1] 刘彦随. 现代人地关系与人地系统科学. 地理科学,2020, 40(8): 1221-1234. [Liu Yansui. Modern Human-earth

中国知网 https://www.cnki.net

relationship and Human-earth system science. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(8): 1221-1234.] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2020.08.001.

[2] Wei G, He B J, Sun P, et al. Evolutionary trends of urban expansion and its sustainable development: Evidence from 80 representative cities in the belt and road initiative region. Cities, 2023, 138: 104353. DOI: 10.1016/j.cities.2023.104353.

[3] 梁流涛, 雍雅君, 袁晨光. 城市土地绿色利用效率测度及其空间分异特征: 基于284个地级以上城市的实证研究. 中国土地科学, 2019, 33(6): 80-87. [Liang Liutao, Yong Yajun, Yuan Chenguang. Measurement of urban land green use efficiency and its spatial differentiation characteristics: An empirical study based on 284 cities. China Land Science, 2019, 33(6):80-87.] DOI: 10.11994/zgtdkx.20190613.141215.

[4] 卢新海, 陶向前, 匡兵等. 环保考核、政府环境注意力与城市土地绿色利用效率. 中国土地科学, 2023, 37(8): 104-112. [Lu Xinhai, Tao Xiangqian, Kuang Bing, et al. Environmental assessment, environmental attention of government and green utilization efficiency of urban land. China Land Science, 2023, 37(8): 104-112.] DOI: 10.11994/zgtdkx.20230719.161917.

[5] Cui X, Wang X. Urban land use change and its effect on social metabolism: An empirical study in Shanghai. Habitat International, 2015, 49: 251-259. DOI: 10.1016/j.habitatint.2015.05.018.

[6] Lu X, Kuang B, Li J. Regional difference decomposition and policy implications of China's urban land use efficiency under the environmental restriction. Habitat International, 2018, 77: 32-39. DOI: 10.1016/j.habitatint.2017.11.016.

[7] Mu B, Mayer A L, He R, et al. Land use dynamics and policy implications in Central China: A case study of Zhengzhou. Cities, 2016, 58: 39-49. DOI: 10.1016/j.cities.2016.05.012.

[8] Liu S, Lin Y, Ye Y, et al. Spatial-temporal characteristics of industrial land use efficiency in provincial China based on a stochastic frontier production function approach. Journal of Cleaner Production, 2021, 295: 126432. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126432.

[9] 卢新海, 李佳, 刘超, 等. 中国城市土地绿色利用效率驱动因素及空间分异. 地理科学, 2022, 42(4): 611-621. [Lu Xinhai, Li Jia, Liu Chao, et al. Driving factors and spatial differentiation of the urban land green use efficiency in China. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(4): 611-621.] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2022.04.006.

[10] Tang Y, Wang K, Ji X, et al. Assessment and spatial-temporal evolution analysis of urban land use efficiency under green development orientation: Case of the Yangtze River Delta urban agglomerations. Land, 2021, 10(7): 715. DOI: 10.3390/land10070715.

[11] 王姣娥, 景悦, 杨浩然. 中国高铁–民航竞争网络的空间演化模式及影响因素. 地理科学, 2020, 40(5): 675-684. [Wang Jiao'e, Jing Yue, Yang Haoran. The evolution mode of China's HSR-air competitive networks and its driving factors. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(5): 675-684.] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2020.05.001.

[12] 齐昕, 王立军, 张家星, 等. 高铁影响下城市群空间关联形态与经济增长效应研究. 地理科学, 2021, 41(3): 416-427. [Qi Xin, Wang Lijun, Zhang Jiaxing, et al. Spatial association of urban agglomeration and its economic growth effect under the influence of high-speed railway. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(3): 416-427.] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2021.03.006.

[13] 王绍博, 罗小龙, 郭建科, 等. 高铁网络化下东北地区旅游空间结构动态演变分析. 地理科学, 2019, 39(4): 568-577. [Wang Shaobo, Luo Xiaolong, Guo Jianke, et al. Dynamic evolution of tourism spatial structure under the improvement of the high speed rail network in Northeast China. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(4): 568-577.] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2019.04.006.

[14] Qi T, Ren Q, Zhang D, et al. Impacts of urban expansion on vegetation in drylands: A multiscale analysis based on the vegetation disturbance index. Ecological Indicators, 2023, 147: 109984. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.109984.

[15] 魏乐, 周亮, 孙东琪, 等. 黄河流域城市群扩张的时空格局演化及情景模拟: 以呼包鄂榆城市群为例. 地理研究, 2022, 41(6): 1610-1622. [Wei Le, Zhou Liang, Sun Dongqi, et al. The evolution of spatio-temporal pattern and scenario simulation of urban agglomeration expansion in the Yellow River Basin: A case study in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin Urban Agglomeration. Geographical Research, 2022, 41(6): 1610-1622.] DOI: 10.11821/dlyj020210566.

[16] 张翰超, 宁晓刚, 王浩, 等. 基于高分辨率遥感影像的2000—2015年中国省会城市高精度扩张监测与分析. 地理学报, 2018, 73(12): 2345-2363. [Zhang Hanchao, Ning Xiaogang, Wang Hao, et al. High accuracy urban expansion monitoring and analysis of China's provincial capitals from 2000 to 2015 based on high-resolution remote sensing imagery. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(12): 2345-2363.] DOI: 10.11821/dlxb201812006.

[17] 侯亚丽, 匡文慧, 窦银银. 全球超大城市空间扩张及分形特征研究. 地理学报, 2022, 77(11): 2687-2702. [Hou Yali, Kuang Wenhui, Dou Yinyin. Analysis of urban expansion and fractal features in global 33 megacities from 2000-2020. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(11): 2687-2702.] DOI: 10.11821/dlxb202211001.

中国知网 https://www.cnki.net

[18] 范建双, 周琳, 虞晓芬. 高速铁路和城市蔓延对雾霾污染的异质性影响. 地理研究, 2021, 40(4): 1146-1164. [Fan Jianshuang, Zhou Lin, Yu Xiaofen. The heterogeneity effect of high-speed railway and urban sprawl on haze pollution. Geographical Research, 2021, 40(4): 1146-1164.] DOI: 10.11821/dlyj020200178.

[19] Han J. Can urban sprawl be the cause of environmental deterioration? Based on the provincial panel data in China. Environmental Research, 2020, 189: 109954. DOI:10.1016/j.envres.2020.109954.

[20] Shi K, Shen J, Wang L, et al. A multiscale analysis of the effect of urban expansion on $PM_{2.5}$ concentrations in China: Evidence from multisource remote sensing and statistical data. Building and Environment, 2020, 174: 106778. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106778.

[21] Zhang Y, Wang L, Tang Z, et al. Spatial effects of urban expansion on air pollution and eco-efficiency: Evidence from multisource remote sensing and statistical data in China. Journal of Cleaner Production, 2022, 367: 132973. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132973.

[22] 李汝资, 刘耀彬, 王文刚, 等. 中国城市土地财政扩张及对经济效率影响路径. 地理学报, 2020, 75(10): 2126-2145. [Li Ruzi, Liu Yaobin, Wang Wengang, et al. China's urban land finance expansion and the transmission routes to economic efficiency. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(10): 2126-2145.] DOI: 10.11821/dlxb202010007.

[23] 龙花楼, 陈坤秋. 基于土地系统科学的土地利用转型与城乡融合发展. 地理学报, 2021, 76(2): 295-309. [Long Hualou, Chen Kunqiu. Urban-rural integrated development and land use transitions: A perspective of land system science. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(2): 295-309.] DOI: 10.11821/dlxb202102004.

[24] Liu Y, Fan P, Yue W, et al. Impacts of land finance on urban sprawl in China: The case of Chongqing. Land Use Policy, 2018, 72: 420-432. DOI: 10.3390/land10070715.

[25] 施震凯, 邵军, 王美昌. 创造还是破坏: 高铁开通对制造业就业变动的影响效应. 经济评论, 2021, (1): 68-81. [Shi Zhenkai, Shao Jun, Wang Meichang. Creation or destruction? The effect of high-speed railway on employment of manufacturing industry. Economic Review, 2021, (1): 68-81.] DOI:10.19361/j.er.2021.01.05.

[26] Hansen T, Coenen L. The geography of sustainability transitions: Review, synthesis and reflections on an emergent research field. Environmental Innovation and Societal Transitions, 2015, 17: 92-109. DOI: 10.1016/j.eist.2014.11.001.

[27] 余振, 龚惠文, 胡晓辉. 可持续性转型地理研究综述与展望. 地理科学进展, 2021, 40(3): 498-510. [Yu Zhen, Gong Huiwen, Hu Xiaohui. Geography of sustainability transitions: A sympathetic critique and research agenda. Progress in Geography, 2021, 40(3): 498-510.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2021.03.013.

[28] Geels F W. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. Research Policy, 2002, 31(8/9): 1257-1274. DOI: 10.1016/S0048-7333(02)00062-8.

[29] Geels F W. The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. Environmental Innovation and Societal Transitions, 2011, 1(1): 24-40. DOI: 10.1016/j.eist.2011.02.002.

[30] 胡晓辉, 董柯. 可持续性转型研究动态与经济地理学展望. 地理研究, 2022, 41(1): 18-33. [Hu Xiaohui, Dong Ke. A review on sustainability transitions and its research agendas in economic geography. Geographical Research, 2022, 41 (1): 18-33.] DOI: 10.11821/dlyj020210442.

[31] 王姣娥, 景悦, 杨浩然. 高速铁路对国内民航旅客运输的替代效应测度. 自然资源学报, 2019, 34(9): 1933-1944. [Wang Jiaoe, Jing Yue, Yang Haoran. Impacts of high-speed rail on China's domestic air transportation. Journal of Natural Resources, 2019, 34(9): 1933-1944.] DOI: 10.31497/zrzyxb.20190910.

[32] Wang S, Yang C, Li Z. Spatio-temporal evolution characteristics and spatial interaction spillover effects of new-urbanization and green land utilization efficiency. Land, 2021, (10): 1105. DOI: 10.3390/land10101105.

[33] Tan S, Hu B, Kuang B, et al. Regional differences and dynamic evolution of urban land green use efficiency within the Yangtze River Delta, China. Land Use Policy, 2021, 106: 105449. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105449.

[34] 张瑞, 文兰娇, 王宁柯, 等. 科技创新对城市土地绿色利用效率的影响: 以武汉都市圈48个区县为例. 资源科学, 2023, 45(2): 264-280. [Zhang Rui, Wen Lanjiao, Wang Ningke, et al. Impact of scientific and technological innovation on green use efficiency of urban land: A case study of 48 districts and counties in the Wuhan Metropolitan Area. Resources Science, 2023, 45(2): 264-280.] DOI: 10.18402/resci.2023.02.03.

[35] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000. 经济研究, 2004, (10): 35-44. [Zhang Jun, Wu Guiying, Zhang Jipeng. The estimation of China's provincial capital stock: 1952-2000. Economic Research Journal, 2004, (10): 35-44.] DOI: CNKI:SUN:JJYJ.0.2004-10-004 .

[36] 董鹤松, 李仁杰, 李建明, 等. 基于DMSP-OLS与NPP-VIIRS整合数据的中国三大城市群城市空间扩展时空格局. 地球信息科学学报, 2020, 22(5): 1161-1174. [Dong Hesong, Li Renjie, Li Jianming, et al. Study on urban spatiotemporal expansion pattern of three first-class urban agglomerations in China derived from integrated DMSP-OLS

中国知网 https://www.cnki.net

and NPP-VIIRS nighttime light data. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(5): 1161-1174.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190711.

[37] Li X, Zhou Y, Zhao M, et al. A harmonized global nighttime light dataset 1992-2018. Scientific Data, 2020, 7(1): 1-9. DOI: 10.1038/s41597-020-0510-y.

[38] 秦蒙, 刘修岩. 城市蔓延是否带来了中国城市生产效率的损失? 基于夜间灯光数据的实证研究. 财经研究, 2015, 41(7): 28-40. [Qin Meng, Liu Xiuyan. Does urban sprawl lead to urban productivity lossess in China? Empirical study based on nighttime light data. Journal of Finance and Economics, 2015, 41(7): 28-40.] DOI: 10.16538/j. cnki.jfe.2015.07.002.

[39] Fallah B N, Partridge M D, Olfert M R. Urban sprawl and productivity: Evidence from US metropolitan areas. Papers in Regional Science, 2011, 90(3), 451-472. DOI: 10.1111/j.1435-5957.2010.00330.x.

[40] 章屹祯, 汪涛, 张晗. 基于金融细分行业的长三角城市网络的组织模式及驱动因素. 地理科学进展, 2022, 41(4): 567-581. [Zhang Yizhen, Wang Tao, Zhang Han. Organizational models and driving factors of the Yangtze River Delta urban network based on different financial industries. Progress in Geography, 2022, 41(4): 567-581.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2022.04.003.

[41] Li H, Wang Z, Zhu M, et al. Study on the spatial-temporal evolution and driving mechanism of urban land green use efficiency in the Yellow River Basin cities. Ecological Indicators, 2023, 154: 110672. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110672.

[42] Wang F, Wang H, Liu C, et al. Does economic agglomeration improve agricultural green total factor productivity? Evidence from China's Yangtze river delta. Science Progress, 2022, 105(4): 00368504221135460. DOI: 10.1177/00368504221135460.

[43] 章屹祯, 汪涛, 张晗. 产业集聚对雾霾污染与生态效率的非线性影响及溢出效应. 生态学报, 2022, 42(16): 6656-6669. [Zhang Yizhen, Wang Tao, Zhang Han. Non-linear impact and spilover effects of Industrial agglomeration on haze and ecologic al effectiveness. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6656-6669.] DOI: 10.5846/stxb202105201317.

[44] 卢新海, 任文琴, 杨浩, 等. 城市交通紧凑式发展对土地绿色利用效率的影响: 基于空间计量的实证分析. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(3): 113-124. [Lu Xinhai, Ren Wenqin, Yang Hao, et al. Impact of compact development of urban transportation on green land use efficiency: An empirical analysis based on spatial measurement. China Population, Resources and Environment, 2023, 33(3): 113-124.] DOI: 10. 12062/cpre. 20221035.

[45] 叶琴, 曾刚, 戴劭勍, 等. 不同环境规制工具对中国节能减排技术创新的影响: 基于285个地级市面板数据. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(2): 115-122. [Ye Qin, Zeng Gang, Dai Shaoqing, et al. Research on the effects of different policy tools on China's emissions reduction innovation: Based on the panel data of 285 prefectural-level municipalities. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(2): 115-122.] DOI: 10.12062 /cpre.20170915.

[46] Tone K, Tsutsui M. An epsilon-based measure of efficiency in DEA: A third pole of technical efficiency. European Journal of Operational Research, 2010, 207(3): 1554-1563. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.07.014.

[47] Pace R K, Lesage J P. A sampling approach to estimate the log determinant used in spatial likelihood problems. Journal of Geographical Systems, 2009, 11(3): 209-225. DOI: 10.1007/s10109-009-0087-7.

[48] Kuang Y, Yang J, Abate M C. Farmland transfer and agricultural economic growth nexus in China: Agricultural TFP intermediary effect perspective. China Agricultural Economic Review, 2022, 14(1): 184-201. DOI: 10.1108/CAER-05-2020-0076.

[49] 邵帅, 张可, 豆建民. 经济集聚的节能减排效应: 理论与中国经验. 管理世界, 2019, 35(1): 36-60, 226. [Shao Shuai, Zhang Ke, Dou Jianmin. Effects of economic agglomeration on energy saving and emission reduction: Theory and empirical evidence from China. Journal of Management World, 2019, 35(1): 36-60, 226.] DOI: 10.19744/j.cnki.11-1235/f.2019.0005.

[50] Polloni Silva, Silveira N, Ferraz D, et al. The drivers of energy-related CO_2 emissions in Brazil: A regional application of the STIRPAT model. Environmental Science and Pollution Research. 2021, 28(37), 51745-51762. DOI: 10.1007/s11356-021-14097-w.

中国知网 https://www.cnki.net

Spatial effects of urban expansion and high-speed rail network on urban land green use efficiency: Theoretical analysis and empirical evidence

ZHANG Yizhen[1], DENG Zhen[2], CAO Ji[1], ZHANG Kun[3],
LIANG Shuangbo[4], CAO Weidong[1]

(1. School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China; 2. College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China; 3. College of Tourism, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China; 4. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China)

Abstract: Land is an important carrier of resource elements, and improving urban land green use efficiency (ULGUE) is the key to realize "smart growth". On the basis of phenomenon observation and theoretical construction, this study takes 268 cities in China from 2008 to 2019 as research units, integrates multi-source data, and combines ArcGIS analysis, EBM-DEA model and spatial econometrics model to reveal the spatial effects of high-speed rail network and urban expansion on ULGUE. The results show that: (1) Chinese LGUE has certain gradient distribution and spatial dependence characteristics; its core density curve has shifted to the right as a whole, the peak value has continued to decline, and the efficiency of land resource use has improved. (2) There is a significant nonlinear relationship between urban expansion and ULGUE, and maintaining a reasonable urban expansion can significantly enhance ULGUE. High-speed rail network accelerates the optimal allocation of resources and has a strong positive spatial effect on ULGUE. (3) From the perspective of spillover effect, urban expansion has significantly improved the local ULGUE, but it is the opposite for neighboring cities; The high-speed rail network has strong positive externalities for local city ULGUE, but we must be wary of its “siphon effect” that has a negative impact on neighboring cities. (4) In terms of regional heterogeneity, capital cities are able to alleviate the pressure of urban operations through urban sprawl and enhance ULGUE. However, non-provincial capital cities and central and western regions should rationalize their spatial development boundaries to achieve “smart growth”. Therefore, it is necessary to formulate differentiated spatial expansion strategies according to local conditions and form a new development pattern in which land development and utilization are compatible with the economy, industry, and ecological environment. In terms of mediating effects, economic agglomeration acts as a mediator between urban expansion and ULGUE, while the high-speed rail network enhances ULGUE by promoting the upgrading of industrial structure. Currently, China is in a rapid stage of urbanization and high-speed rail development, and it is expected that this study will provide support for enhancing the comprehensive effectiveness of green land use and promoting high-quality sustainable regional development.

Keywords: urban land green use efficiency; spatiotemporal evolution; spatial effect; high-speed rail network

中国知网 https://www.cnki.net