

地理科学
Geographical Science
ISSN 1000-0690,CN 22-1124/P

《地理科学》网络首发论文

题目：中原城市群城市扩张效率测度与优化——基于绿色全要素生产率和两阶段网络 DEA 模型
作者：任卫珍，乔家君，张子龙，万世龙
DOI：10.13249/j.cnki.sgs.20250956
收稿日期：2025-07-24
网络首发日期：2026-08-27
引用格式：任卫珍，乔家君，张子龙，万世龙．中原城市群城市扩张效率测度与优化——基于绿色全要素生产率和两阶段网络 DEA 模型[J/OL]．地理科学.
https://doi.org/10.13249/j.cnki.sgs.20250956



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2026-08-27 14:31:09　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/22.1124.P.20260827.1122.002

地　理　科　学
Geographical Science

中原城市群城市扩张效率测度与优化
——基于绿色全要素生产率和两阶段网络 DEA 模型

任卫珍[1]，乔家君[1]，张子龙[2,3]，万世龙[4]
（1. 河南大学地理科学与工程学部地理科学学院，河南 郑州 450046；2. 兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室，甘肃 兰州 730000；3. 兰州大学黄河流域绿色发展研究院，甘肃 兰州 730000；4. 中国科学院城市环境研究所，福建 厦门 361021）

摘要：基于绿色全要素生产率和城市发展全生命周期视角，构建涵盖城市建设和运营阶段的空间扩张效率综合评价体系，运用网络 DEA 模型、Malmquist 指数及冗余分析方法，从多要素投入产出和城市规模两个维度探讨效率改进路径。结果显示：①2000—2020 年中原城市群静态效率总体呈下降态势，城市间效率差异显著并于 2020 年达到峰值。城市建设阶段效率均值及 DEA 有效城市数量均低于运营阶段，是制约整体扩张效能的关键环节。②城市动态扩张效率年均下降 2.05%，其中城市运营阶段降幅大于建设阶段，且技术变化指数对其驱动作用更为突出。③2020 年 17 个非 DEA 有效城市未出现期望产出不足，但普遍存在建设用地、劳动力等要素投入冗余，以及 $PM_{2.5}$、CO_2 排放等非期望产出过量现象。资源利用率低、生态环境压力大是导致效率下降的主要原因，应结合城市投入产出结构和规模特征，制定“规模适配+结构优化”的差异化调整策略。

关键词：城市扩张效率；绿色全要素生产率；两阶段网络 DEA；中原城市群
中图分类号：K902　**doi：**10.13249/j.cnki.sgs.20250956　**cstr：**32176.14.geoscien.20250956

城市化和工业化的快速推进在驱动经济增长的同时，也引发了城市空间无序扩张、生态资源超载及土地利用低效等突出问题[1]。作为国家新型城镇化的核心载体，城市群既是城市空间扩张的活跃极核，更是高质量发展的战略支点[2-4]。但在其高速成长进程中，资源禀赋与发展需求之间的矛盾持续激化，资源透支加剧、生态负荷上升、空间结构失序等问题日益尖锐[5-6]，地域开发的过密化和无序化已显著制约了城市群的可持续性[7-10]。随着中国城镇化进入以“内涵式发展”为核心的新阶段，城市群作为国家高质量发展的战略核心区，亟需从绿色全要素生产率提升的角度，对城市空间扩张和利用全过程的效率开展系统测度和分析，为城市群存量提质增效路径设计和政策制定提供参考[11]。

当前学界对城市空间扩张效率的测度主要依托两类方法论框架：指数构建法与指标体系法。在指数构建层面，安乾等提出的城市用地增长弹性系数证实，扩张效率在区域、类型和发展阶段层面存在显著分异[12]；陈春等构建了建设用地扩张效率指数量化验证了东部

收稿日期：2025-07-24；**修订日期：**2025-10-26
基金项目：中国博士后科学基金项目（2025M770348）、国家自然科学基金项目（72050001）资助。[Foundation: China Postdoctoral Science Foundation (2025M770348), National Natural Science Foundation of China (72050001).]
作者简介：任卫珍（1995—），女，河南鹿邑人，博士，主要从事经济地理与城乡发展、资源利用与可持续性研究。E-mail: renwzh@henu.edu.cn
通信作者：乔家君。E-mail: jjqiao@henu.edu.cn

地区建设用地扩张的经济转化效能优势[13]；Guo 等从密度视角构建的土地利用效率指数表明，边缘扩张模式普遍伴随效率衰减现象，而不同扩张路径的效率响应存在系统性差异[14]。然而，城市作为复杂巨系统，其空间扩张是一个动态演化过程，虽然指数法可以反映总体效率的宏观状态，但无法反映城市扩张过程内部投入产出要素结构对效率的影响。为解决这一问题，部分学者通过构建指标体系法来测度城市扩张效率。目前，相关研究多聚焦于静态土地利用效率评估，形成了以 DEA 模型群为主体（包括三阶段 DEA[15]、超效率 SBM[16]、非期望产出 SBM[17]等）、随机前沿距离函数[18]为补充的测度体系，且普遍采用“要素投入-多维产出”的评估框架[19-20]。

然而，上述研究仍属传统土地利用效率范畴，对城市扩张过程中动态效率演变缺乏针对性测度，且传统评价体系忽视了“建设-运营”全周期效率，未整合绿色全要素生产率等新质生产力核心指标。为此，本文构建了两阶段网络 SBM 模型，将城市建设期与运营期通过链接要素纳入统一分析框架，并整合经济、社会、生态多维产出指标。这一方法创新源于新时期城市发展的本质要求：作为人口与经济活动的核心载体，城市扩张必须同步实现人口承载力强化、经济效能提升、公共服务优化，并保障可持续性发展。党的二十大确立的“人民城市”（https://www.qstheory.cn/yaowen/2022-10/25/c_1129079926.htm，数据下载日期：2023-12-21）理念进一步强调了绿色新质生产力培育的重要性。本文从动态机制视角解构城市空间扩张过程，量化空间要素与生产要素的协同供给效能，在理论上补充城市扩张效率评价方法体系，在实践上为优化要素配置、提升扩张质量提供科学决策依据。

1　理论框架与方法

1.1　理论框架

城市空间的增量式发展旨在满足人口集聚、经济生产与社会活动对承载空间的基础需求。相应地，城市空间扩张效率可以被界定为单位空间投入的社会经济产出。随着绿色发展理念的深入推进，该定义亟须将资源消耗和环境损失纳入其中，突破传统纯经济产出导向的分析框架。因此，本文将城市空间扩张效率定义为：在有限的空间内，通过优化资源转化过程，最大化实现单位空间投入的预期发展收益，同时系统性地约束其外部性成本。这就要求对城市空间扩张的全生命周期的资源配置进行根本性优化：投入端须遵循资源投入的高度集约化原则，严控土地、能源、资本等要素的消耗强度；产出端需确保各类产出指标响应发展目标，实现经济、社会、环境综合效益协同增效。针对城市空间扩张的动态性与阶段性特征，本文在以往研究的基础上[21-22]，突破传统“黑箱”评价范式，构建两阶段网络结构化的效率评价理论框架。其中，城市建设阶段侧重土地向道路、建筑与绿地等空间载体的转化；城市运营阶段则通过空间介质要素与动能要素的耦合，实现经济-生态-环境的综合效能输出，并对城市建设阶段形成反馈调节。

1.2　研究方法与数据来源

1）评价模型。①超效率网络 SBM 模型。传统 DEA 模型[23-24]将生产系统视为“黑箱”的处理方式已难以满足复杂系统的测度需求[25]。城市是经济、环境、社会等多维紧密耦合的复杂系统，其效率测度有必要从“开箱”视角出发，深入剖析系统内部结构与过程。基于此，本文构建了包含非期望产出的两阶段网络 SBM 模型①。同时，为实现对高效决策单元群体的精确区分与排序，进一步引入超效率分析方法，模型见文献[26-28]。②Malmquist 全要素生产率指数（Malmquist total factor productivity index，简称 MI）[29]。本文通过引入该指

① 模型设置节点为 2，决策单元为 30，投入、链接和产出指标数分别为 7、3 和 5，采用非导向方式进行计算。

数，基于全局参比的计算方法[30]，量化效率在时间上的演进变化。Malmquist 指数可进一步分解为技术效率变化（technical efficiency change，EC）和生产技术变化（technological change，TC），其计算过程见文献[31]。

2）评价指标体系。基于理论框架，并考虑数据可得性，构建城市空间扩张效率评价指标体系（图 1）。具体而言，城市建设阶段的核心在于物质空间的生产与更新，其活动强度直接反映在各类空间要素的投入与产出上。驱动这一空间生产过程的基础要素包括土地、资本与劳动力，分别以城市建设用地、建筑业资产合计及建筑业从业人员作为表征。这些要素的协同投入，直接推动了城市规划实施、工程建设等扩张活动，最终物化为房屋、公园等空间载体[21]。因此，房屋建筑施工面积与竣工面积被确立为产出的关键指标。同时，城市建设活动深刻影响着城市的功能网络与宜居水平，分别选取人均城市道路和人均公园绿地面积作为表征。为进一步揭示两阶段间的内在联系，将房屋建筑竣工面积、人均城市道路和人均公园绿地面积作为城市建设阶段和运营阶段的链接要素。

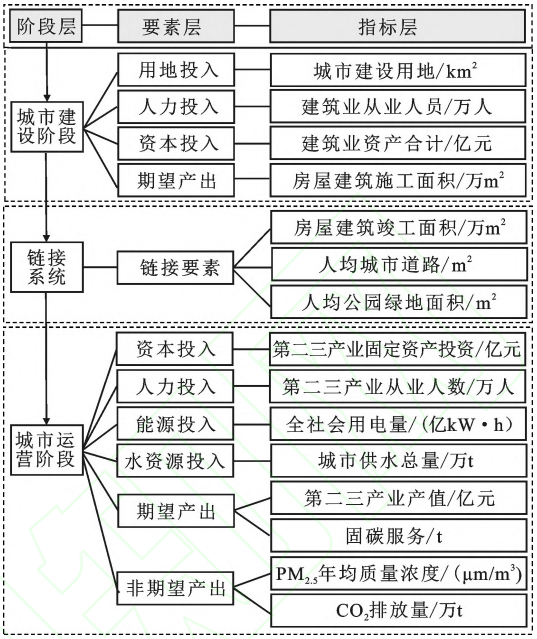

图 1　城市空间扩张效率测算指标体系

Fig.1　Indicator system for measuring urban spatial expansion efficiency

城市运营阶段的核心在于激活并优化建设阶段所积累的空间资产。该阶段将链接要素作为空间投入，并进一步将运营过程中持续投入的动能要素——劳动力、资本与能源——纳入投入体系，具体以第二三产业从业人数、第二三产业固定资产投资及城市供水总量和全社会用电量表征。在产出层面，评估城市运营绩效的核心目标在于多维价值创造。在经济维度，选取第二三产业产值作为期望经济产出，反映空间运营的经济繁荣度；在生态维度，引入固碳服务作为期望生态产出，这不仅表征了绿地等空间的关键生态系统服务功能，更深度契合国家“双碳”战略对城市碳汇能力提升的迫切需求[32]。同时，考虑到环境外部性，将 $PM_{2.5}$ 年均质量浓度和 CO_2 排放量作为非期望产出指标，用以监测环境成本[33]。

3）数据来源。本文使用的社会经济统计数据均来自《中国城市统计年鉴》[34]、《中国城市建设统计年鉴》[35]以及各省市统计年鉴（https://navi.cnki.net/knavi/yearbooks/index，2024-01-02）、统计公报等官方数据。对于个别缺失数据，采用插值法进行处理。固碳服务数据由 InVEST 模型计算得出[36]，CO_2 排放数据来自中国碳核算数据库（CEADS）（https://www.ceads.net.cn/，2024-01-06），$PM_{2.5}$ 年均质量浓度数据来自国家空气质量自动监测站点的空气质量自动监测成果（https://www.cnemc.cn/sssj/，2024-01-06）。

1.3　研究区域

中原城市群地处国家“两横三纵”城市化格局中陆桥通道与京广通道的交会枢纽，是引领全国发展的新增长极及激活新亚欧大陆桥经济走廊的核心活力地带，对于落实黄河流域生态保护和高质量发展和中部地区崛起具有重要的战略意义[37]。中原城市群横跨 5 省 30 市，发展具有显著的“大区域、多主体”复合形态。作为中国核心农耕区和最重要的商品粮生产基地之一，该区域承担着保障国家粮食安全的根本性责任，高度密集的人口与

经济活动在有限的土地空间内叠加，人地关系矛盾较为突出。经计算得出，2020 年该城市群 GDP 总量为 8.13 万亿元，在全国 19 个城市群中居第五位，但其常住人口城镇化率仅为 53.79%，低于全国平均水平。这种“规模领先”与“质量滞后”的并存现象，其根源在于其独特的城镇体系结构——中小城市占比超过 70%，省际间、城市间发展不平衡问题显著[38]。

2　结果分析

2.1　基于网络 SBM 模型的静态效率分析

1）城市空间扩张整体效率测度。基于 MAXDEA Ultra 9.1 软件计算的城市空间扩张效率测度结果显示，2000—2020 年中原城市群呈现鲜明的“U”型演变特征，效率均值从 2000 年的 1.0703 持续降至 2015 年的 0.9373，2020 年小幅回升至 0.9447（图 2）。这种效率衰减趋势反映了快速城镇化进程中的结构性矛盾。究其根源，在人口基数庞大、产业长期依赖工农业的刚性约束下，城乡要素错配与城市发展模式粗放形成负向循环，导致城镇化质量显著低于全国均值。尽管国家在“十二五”时期已提出城镇化质量转型要求，但深层次矛盾直至《国家新型城镇化规划（2014—2020 年）》（https://www.gov.cn/gongbao/content/2014/content_2644805.htm）实施才迎来转变，驱动着 2020 年出现效率拐点。这表明政策干预有效促进了土地要素的优化重组，尤其缓解了大城市过度集聚与中小城市发展乏力的两极分化。然而必须清醒认识到，各城市在资源禀赋、扩张模式及发展阶段上的异质性，仍使空间效率存在显著城际差异，约 60% 的城市尚未突破生产前沿面约束。

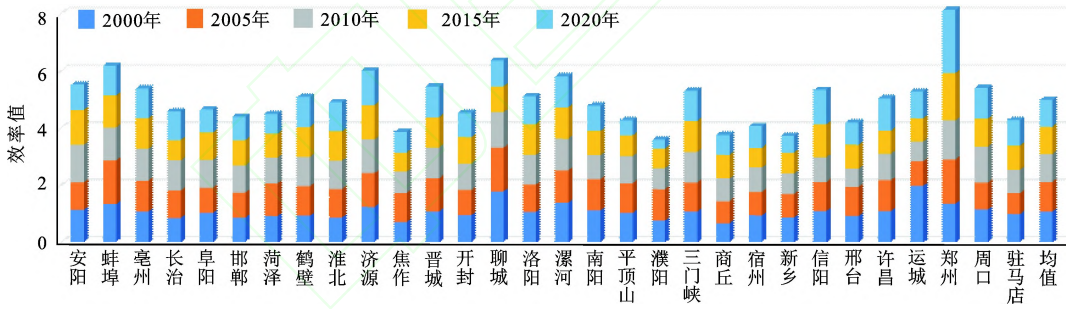

图 2　2000—2020 年中原城市群城市空间扩张效率

Fig.2　Urban spatial expansion efficiency of the Central Plains Urban Agglomeration in 2000—2020

不同城市的空间扩张效率呈现显著的时空分异与阶段性特征。除 2010 年外，研究期间内超过当期平均效率值的城市占比始终低于 50%。综合效率演化特征，可将中原城市群分为 3 类：①持续高效型：郑州、济源等 7 市效率值始终大于 1 且稳居前列，且尤以郑州表现瞩目，彰显其空间扩张的持续领先优势。此类城市相对实现了投入产出最优配比，资源环境社会综合效益突出；②持续低效型：邯郸、商丘等 6 市效率值持续小于 1，反映其扩张模式存在系统性缺陷，亟需通过控制投入规模与提升产出效益缩小发展差距；③波动发展型：其余 17 市效率排名起伏明显，表明其仅阶段性达到 DEA 相对有效，需依据时序特征制定动态改进策略。值得注意的是，2020 年各城市效率极差达到峰值，反映出城市资源配置效率的城际差异达到历史最高水平。

2）城市空间扩张子阶段效率分析。城市建设阶段与城市运营阶段的效率共同决定着城市空间扩张的整体水平。结果表明，两个子阶段的效率分布呈现显著异质性。城市建设

阶段的效率均值呈现“V”型演进趋势——由 2000 年的 1.06 降至 2015 年的 0.89 再反弹至 2020 年的 0.99，扩张效率值达到 DEA 相对有效的城市从 17 个波动降至 12 个后回升至 14 个(图 3a)，2020 年城市间效率差异达到最大。城市运营阶段则显现持续衰减态势——效率均值由 2000 年的 1.12 降至 2020 年的 1.02，DEA 相对有效的城市数量从 25 递减至 17(图 3b)。总体来看，城市建设阶段的效率均值和达到 DEA 相对有效的城市数量均低于城市运营阶段，当前城市扩张的主要矛盾集中于城市建设阶段的投入产出失调。未来政策应重点关注城市建设阶段的资源配置与要素优化，推动城市发展由“重规模扩张”到“重效益提升”转变。

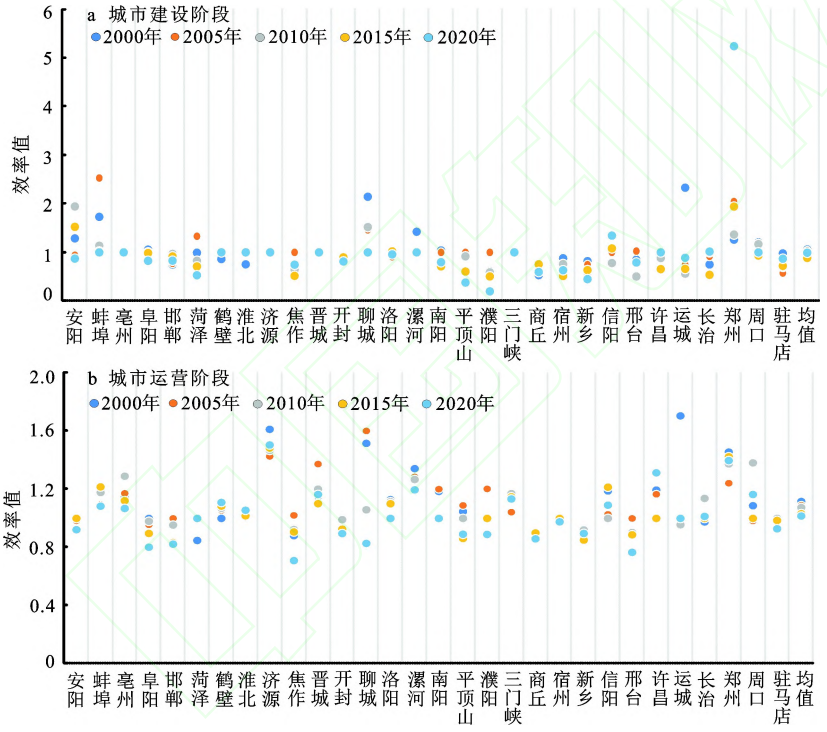

图 3　中原城市群城市建设与运营阶段的城市空间扩张效率

Fig.3　Urban spatial expansion efficiency in construction and operational stage in the Central Plains Urban Agglomeration

为进一步分析两个阶段城市空间扩张效率的分布模式，本文以扩张效率值是否达到 1 为界限，构建四维效能矩阵(图 4)：协同高效型(Ⅰ象限)：两个阶段均达标；运营主导型(Ⅱ象限)：运营阶段达标而建设阶段未达标；双重低效型(Ⅲ象限)：两个阶段均未达标；建设主导型(Ⅳ象限)：建设阶段达标而运营阶段未达标。根据矩阵转化情况看，研究期间内城市空间扩张效率的时序演化呈现两大趋势：①高效集群收缩：Ⅰ象限城市数量从 17 个减至 13 个，Ⅲ象限城市数从 5 个增到 12 个，反映了城市空间扩张效率退化趋势；②运营效能优势：Ⅱ象限城市数量始终多于Ⅳ象限，揭示运营阶段持续领跑建设阶段。进一步分析发现，城市建设阶段因土地、资本、劳动力等投入差异形成效率离散格局，城市运营阶段则因纳入期望或非期望产出要素，各城市效率分布呈现相对收敛特征。未来应建立象限诊断机制，依据各城市所处效能区位定制资源配置策略，驱动空间扩张向高质量范式跃迁。

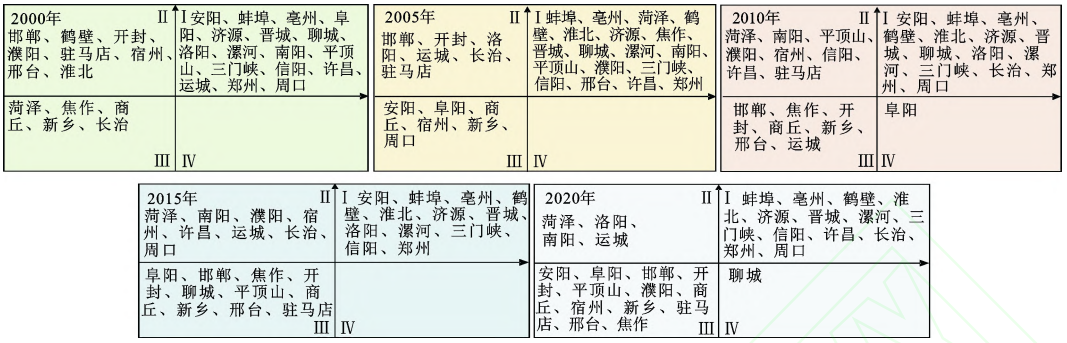

图 4　中原城市群各城市两个阶段扩张效率四象限划分

Fig.4　Four-quadrant classification of expansion efficiency in two stages for cities in the Central Plains Urban Agglomeration

2.2　基于 Malmquist 指数的动态效率分析

1）城市空间扩张整体效率的 Malmquist 指数分析。2000—2020 年城市空间扩张效率均值呈“W”型波动演进特征，整体均值为 0.9795，表明多数城市空间扩张效率呈下降趋势，年均下降幅度 2.05%（图 5）。其中，效率值高于均值的城市有 11 个，Malmquist 指数超过 1 的城市有 9 个，区域资源配置优化亟需提升。根据时段变化特征来看，2000—2005 年 Malmquist 指数均值为 0.8615，仅 5 个城市的 *MI*>1，表明该阶段实现效率提升的城市仅 5 个，反映出 21 世纪初城镇化发展过程中要素配置较为粗放；2005—2010 年 Malmquist 指数均值升至 1.0333，*MI*>1 的城市数量从 5 个增到 15 个，空间资源配置得到明显改善；2010—2015 年 Malmquist 指数均值回落至 0.9520，*MI*>1 的城市减至 13 个，“城市病”导致土地集约度下降；2015—2020 年 Malmquist 指数均值升至 1.0714，*MI*>1 城市达到 16 个，城市空间扩张效率逐步改善，这也与国家的城镇化发展历程基本一致。Malmquist 指数分解结果表明，技术效率变化整体呈“V”型波动，年均下降 1.85%；生产技术变化呈“W”型走势，年均增长 0.70%，其变化趋势与 Malmquist 指数波动趋势相一致，在驱动城市空间扩张效率提升中作用更为显著。分时段来看，仅 2000—2005 年技术效率变化值高于生产技术变化值，其余时段的生产技术变化值均大于技术效率变化值，且均大于 1。因此，提升城市空间扩张效率的关键在于加快技术进步，应进一步优化资源配置，引导城市向更加高效、集约的方向演进。

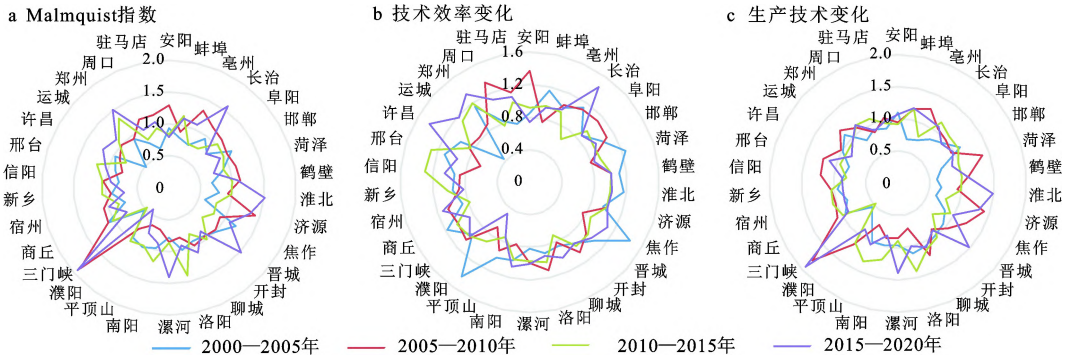

图 5　城市空间扩张效率的 Malmquist 指数及其分解

Fig.5　Malmquist index and its decomposition of urban spatial expansion efficiency

2)城市空间扩张子阶段效率的 Malmquist 指数分析。城市空间扩张效率在城市建设阶段整体呈波动态势，效率变化均值为 0.9989，年均下降 0.11%(图 6)。指数分解结果表明，4 个时期技术效率变化均值分别为 1.0339、0.9619、0.9615 和 1.0743，生产技术变化均值分别为 0.8605、1.2083、1.0346 和 1.0257，且其发展趋势与 Malmquist 指数基本一致。城市空间扩张效率在城市运营阶段整体呈现出先下降再上升的“V”形波动趋势，效率变化均值为 0.9917，年均下降 0.83%。4 个时期技术效率变化均值分别为 0.9900、0.9944、0.9635 和 0.9841，生产技术变化均值分别为 0.9234、0.9729、0.9991 和 1.1701。综上，中原城市群两阶段效率变化均值均呈下降态势，且运营阶段的降幅明显高于建设阶段。此外，约 2/3 的城市出现效率下降，这与 Malmquist 指数下降的城市相一致，且生产技术变化是影响 Malmquist 指数变化的主要原因。当前亟需以提升技术进步变化为导向，完善城市建设与运营的创新生态系统，推动核心技术应用。

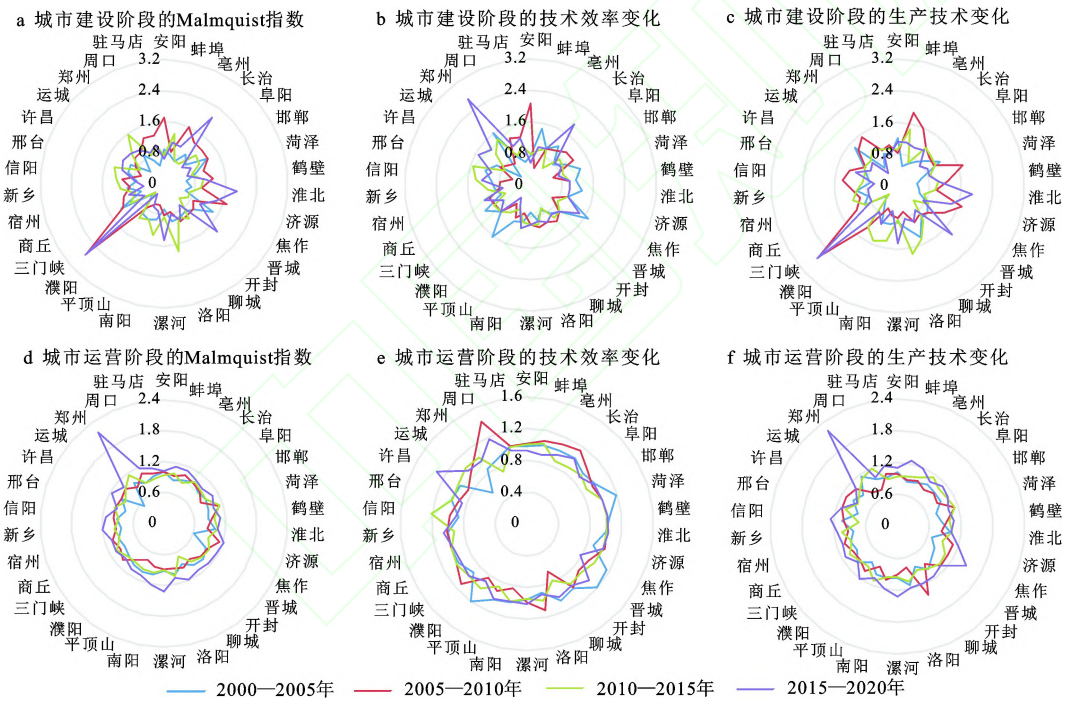

图 6　城市建设阶段、城市运营阶段的 Malmquist 指数及其分解

Fig.6　Malmquist index and its decomposition at the stage of urban construction and operation stage

2.3　城市空间扩张效率的改进分析

松弛变量作为测度资源配置偏误的工具，可用于衡量投入冗余与产出情况，为效率改进提供依据。本文基于 2020 年两阶段网络 SBM 模型的测度结果，对 17 个非 DEA 有效(效率值小于 1)的城市进行效率损失溯源[39]。需要说明的是，计算得出的“相对冗余”是指生产要素未被充分利用的潜在空间，而“相对不足”则表征现有冗余投入可转化的增量空间[40]。结果显示(表 1)，中原城市群未出现期望产出不足情况，但普遍存在投入要素冗余和非期望产出过剩问题。资源利用率低与生态环境压力大已成为制约城市空间扩张效率改善的主要因素。

1)基于投入产出要素的效率改进分析。投入要素分析显示，17 个城市普遍存在资源

表 1　2020 年中原城市群非 DEA 有效城市的投入冗余与产出不足分析

Table 1　Input redundancy and output deficit of non-DEA-efficient cities in the Central Plains Urban Agglomeration, 2020

城市	投入冗余率							非期望产出冗余率		期望产出不足率		
	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*	*H*	*I*	*J*	*K*	*L*
安阳	13.47	38.42	0.00	13.75	19.70	0.00	27.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
阜阳	0.00	0.00	0.00	10.50	0.00	1.30	47.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
邯郸	4.79	0.00	0.00	0.00	27.55	0.00	27.07	0.00	20.08	0.00	0.00	0.00
菏泽	56.97	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
焦作	42.63	0.00	0.00	0.00	12.92	3.23	11.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
开封	0.00	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
聊城	0.00	0.00	0.00	20.51	75.09	0.00	52.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
洛阳	41.92	43.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
南阳	46.40	19.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
平顶山	0.00	0.00	0.00	27.06	0.00	0.00	1.03	0.00	13.12	0.00	0.00	0.00
濮阳	0.00	0.00	0.00	10.25	0.00	44.38	39.31	16.18	0.00	0.00	0.00	0.00
商丘	0.00	0.00	0.00	0.00	17.32	16.92	41.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
宿州	0.00	16.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.77	0.00	33.53	0.00	0.00	0.00
新乡	11.71	0.00	0.00	0.00	33.42	0.00	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
邢台	50.32	0.00	39.19	0.00	37.83	6.96	60.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
运城	21.57	41.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
驻马店	18.78	2.88	0.00	0.00	0.00	0.00	29.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注：*A*、*B*、*C*、*D*、*E*、*F*、*G*分别为城市建设用地、建筑业就业人数、建筑业资产、城市供水总量、全社会用电量、二三产业固定资产投资和二三产业就业人数；*H*、*I*、*J*、*K*、*L*分别为$PM_{2.5}$年均质量浓度、CO_2排放量、房屋建筑施工面积、二三产业产值和固碳服务。

过量投入现象。在建设用地方面，10 个城市呈现显著冗余态势，其中菏泽、邢台的土地粗放利用状况尤为突出，折射出城镇化进程中土地资源配置失衡的深层次矛盾。在劳动力投入方面，建筑业就业人数指标在 7 个城市存在冗余，更为显著的是，二三产业就业人数指标在 12 个城市存在冗余，是冗余情况最严重的投入项，这表明城市活动中存在一定程度的劳动力过剩，需要通过强化劳动力技能培训、促进劳动力转移等措施提高劳动力资源的利用效率。在资产投入方面，濮阳、商丘等 5 个城市的二三产固定资产投资呈现显著超量投入，邢台市的建筑业资产冗余尤为突出，亟需从“规模优先”向“质量导向”转变。部分城市水电资源利用效率短板明显，6 个城市的供水总量、7 个城市的用电量存在过度配置现象。其中，平顶山、聊城的供水冗余较高，聊城、邢台、新乡 3 个城市的用电冗余较高，需要进一步提高资源节约集约利用水平。从环境负外部性看，濮阳市的 $PM_{2.5}$ 质量浓度以及邯郸、宿州、平顶山等市的 CO_2 均存在一定程度的过量排放，导致效率未实现相对有效。因此，未来城市发展应着重优化资源投入结构，切实提升各类能源资源要素的配置效率，同时强化污染物控制和生态环境治理。这不仅是缓解资源浪费与环境压力的关键举措，更是实现城市高质量发展与空间扩张效率提升的重要保障[8]。

2）基于不同城市规模的效率改进分析。“规模-效率”关联分析结果显示，中原城市群城市空间扩张存在以下 3 种现象：一是效率洼地特征显著。在 17 个非 DEA 有效的城市中，大、中、小城市分别为 6、10、1 个，占相应规模类型总数的 85.71%，50.00% 和 33.33%，效率低下现象在大城市中最为突出。二是核心引擎效应突出。郑州市作为城市群内唯一特大城市及区域核心，以较高的开放型经济水平和城市化水平为支撑，实现了投入-产出关系的相对最优状态，形成了明显的效率极核。三是规模悖论显现。整体而言，小城市的效率均

值（0.898 0）高于大城市（0.823 3）与中等城市（0.728 1）。就大城市而言，除长治外，邯郸等6座大城市均陷低效困局，其根源在于要素配置失衡，城市发展过程中长期依赖土地、资本与劳动力的大规模投入驱动模式并未得到根本改变，亟需建立规模约束机制，遏制“摊大饼”式无序扩张。就中等城市而言，其城市化发展水平相对落后，效率低下的原因可主要归纳为两类：一是对于南阳、菏泽等土地投入冗余型城市，应通过盘活存量建设用地、推进存量空间再开发实现提效；二是对于阜阳、商丘等人力投入过剩型城市，应着力优化劳动力空间配置，促进人口-产业-空间的协调匹配。就小城市而言，问题主要在于土地和人力投入过度，应强化要素投入结构调整，形成以高效利用和集约增长为导向的发展范式。

3 结论与讨论

本文基于绿色全要素生产率与城市发展全生命周期视角，构建了涵盖城市建设和运营阶段的城市空间扩张效率评价体系，对2000—2020年中原城市群城市空间扩张的静态与动态效率进行系统测度，并利用冗余分析，从多要素投入产出和城市规模两个维度探讨效率改进路径。主要结论和启示如下。

1）2000—2020年中原城市群城市空间扩张效率整体呈“U”型变化趋势。初期效率下降主要源于粗放式扩张模式主导下的土地资源低效利用——城市普遍以“摊大饼”式外延扩张为主，土地供给与人口集聚、产业需求之间匹配不足，形成典型的“扩张驱动陷阱”。后期效率进入微升阶段，得益于区域协调发展战略与国土空间规划管控的政策效应。值得注意的是，城际效率差异呈动态扩大态势，并于2020年达到峰值，区域发展不均衡问题突出。分阶段对比分析显示，城市运营阶段效率均值及达到DEA相对有效的城市数量均高于城市建设阶段，表明建设阶段效率滞后是制约整体扩张效能的关键环节。从动态视角来看，2000—2020年中原城市群城市空间扩张效率年均下降2.05%，且城市运营阶段降幅更为明显。Malmquist全要素生产率指数分解结果显示，技术变化边际效益递减，反映了“量增质滞”的结构性矛盾。

2）2020年17个非DEA有效城市虽未出现期望产出不足现象，但普遍存在投入过量与非期望产出超排的“双元冗余”困境，反映要素错配与环境压力的复合效应。当前，在人口增速放缓、存量优化成为主导的发展阶段，城市扩张亟需从外延式增长转向内涵式提升。为此，应结合城市投入产出结构与规模差异，构建“规模适配+结构优化”的差异化效率提升体系。高规模城市应强化全周期智能化管理与资源集约化利用，实现土地供给与产城需求的动态平衡；中小城市需聚焦产业-土地的匹配优化，通过低效用地再开发、闲置空间再利用等举措提升存量土地利用效率。同时，还应强化技术创新与低碳基础设施建设协同推进，形成“土地减量-提质并行”和“生态-产业”共同发展新格局。

本文在城市空间扩张效率的测度与优化方面提供了评价方法和政策启示，但仍存在拓展空间，未来研究可从以下3个方面深化。一是完善指标体系，将交通网络、信息基础设施、地均GDP等变量纳入分析框架，以更全面地反映城市经济密度与土地利用效益；二是强化城市群内部异质性与跨区域协同机制分析，探讨要素流动、功能分工与效率演化的动态机制；三是顺应人口负增长与城市存量优化并行的新趋势，将城市更新、空间再开发与空间扩张效率研究相融合，探索集约高效、绿色低碳的空间演化路径。从而为城市群高质量发展提供更加科学的理论支撑与决策依据。

参考文献（References）：

[1] Huang Z H, Du X J. Urban land expansion and air pollution: Evidence from China[J]. Journal of Urban Planning and

Development, 2018, 144(4): 05018017.
[2] 欧阳晓. 基于共生理念的长株潭城市群城市用地扩张模拟及优化调控[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2020: 1-3. [Ouyang Xiao. Simulation and optimization of urban land expansion in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration based on the notion of symbiosis. Changsha: Hunan Normal University, 2020: 1-3.]
[3] 方创琳, 张国友, 薛德升. 中国城市群高质量发展与科技协同创新共同体建设[J]. 地理学报, 2021, 76(12): 2898-2908. [Fang Chuanglin, Zhang Guoyou, Xue Desheng. High-quality development of urban agglomerations in China and construction of science and technology collaborative innovation community. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(12): 2898-2908.]
[4] 方创琳. 中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向[J]. 地理学报, 2014, 69(8): 1130-1144. [Fang Chuanglin. Progress and the future direction of research into urban agglomeration in China. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(8): 1130-1144.]
[5] Li Y, Beeton R J S, Sigler T et al. Enhancing the adaptive capacity for urban sustainability: A bottom-up approach to understanding the urban social system in China[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 235: 51-61.
[6] Buyantuyev A, Wu J G. Urban heat islands and landscape heterogeneity: Linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns[J]. Landscape Ecology, 2010, 25(1): 17-33.
[7] 杨勇, 任志远, 樊新生. 中原城市群土地利用综合评价与分区研究[J]. 经济地理, 2017, 37(9): 177-184. [Yang Yong, Ren Zhiyuan, Fan Xinsheng. Land use comprehensive evaluation and regionalization in Zhongyuan Urban Agglomeration. Economic Geography, 2017, 37(9): 177-184.]
[8] 张诗嘉, 刘晓英, 杜书云. 中原城市群城市土地利用效率时空差异及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(10): 2417-2429. [Zhang Shijia, Liu Xiaoying, Du Shuyun. Spatial-temporal differences and influencing factors of urban land use efficiency in Central Plains Urban Agglomeration. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(10): 2417-2429.]
[9] 陈德静, 王晓青, 濮励杰, 等. 城市土地利用效率时空演化及其与经济增长脱钩关系研究——以长三角城市群为例[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(10): 2018-2031. [Chen Dejing, Wang Xiaoqing, Pu Lijie et al. Spatiotemporal evolution of urban land use efficiency and its decoupling relationship with economic growth: A case study of Yangtze River Delta Urban Agglomeration. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(10): 2018-2031.]
[10] Wu J G. Urban sustainability: An inevitable goal of landscape research[J]. Landscape Ecology, 2010, 25(1): 9444.
[11] 冯雨柯, 翟石艳, 姜昕彤, 等. 中原城市群“三生”空间模拟及生态效应评估——基于未来土地利用模拟模型和共享社会经济路径情景[J]. 生态学报, 2023, 43(20): 8292-8308. [Feng Yuke, Zhai Shiyan, Jiang Xintong et al. Simulating spatio-temporal pattern of production-living-ecological space and evaluating eco-environmental effects in Zhongyuan Urban Agglomeration based on FLUS model and shared socioeconomic pathways. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8292-8308.]
[12] 安乾, 李小建, 吕可文. 中国城市建成区扩张的空间格局及效率分析 (1990—2009)[J]. 经济地理, 2012, 32(6): 37-45. [An Qian, Li Xiaojian, Lv Kewen. A research on the spatial structure and efficiency of China’s expansion of urban built-up area (1990—2009). Economic Geography, 2012, 32(6): 37-45.]
[13] 陈春, 冯长春. 建设用地扩张效率指数研究[J]. 地域研究与开发, 2011, 30(2): 133-136. [Chen Chun, Feng Changchun. Research on construction land expansion efficiency index. Areal Research and Development, 2011, 30(2): 133-136.]
[14] Guo X, Chen Y, Jia Z Y et al. Spatial and temporal inequity of urban land use efficiency in China: A perspective of dynamic expansion[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2024, 104: 107357.
[15] 王家庭, 曹清峰. 我国 35 个大中城市空间扩张效率测度[J]. 城市问题, 2013(10): 8-14. [Wang Jiating, Cao Qingfeng. Measurement on the technical efficiency of urban spatial expansion based on 35 cities of China. Urban Problems, 2013(10): 8-14.]
[16] 边志强, 钟顺昌. 碳排放权交易试点对城市土地绿色利用效率的影响[J]. 中国土地科学, 2023, 37(11): 52-62. [Bian Zhiqiang, Zhong Shunchang. Impact of carbon emission trading pilot policy on urban land green use efficiency. China Land Science, 2023, 37(11): 52-62.]
[17] Song Y, Yeung Godfrey, Zhu D L et al. Efficiency of urban land use in China’s resource-based cities, 2000—2018[J]. Land Use Policy, 2022, 115: 106009.
[18] 周慧敏, 刘玉, 王成新, 等. 中国省级城市用地效率与用地扩张的空间关系研究——基于精明增长理论的思考[J]. 地域研究与开发, 2021, 40(3): 157-162+180. [Zhou Huimin, Liu Yu, Wang Chengxin et al. Spatial relationship between land use efficiency and land expansion in China’s provincial cities: Based on the theory of smart growth. Areal Research and Development, 2021, 40(3): 157-162+180.]
[19] Bampatsou C, Halkos G. Economic growth, efficiency and environmental elasticity for the G7 countries[J]. Energy Policy, 2019, 130: 355-360.
[20] Ouyang X, Wei X, Wei G E et al. The expansion efficiency of urban land in China’s urban agglomerations and its impact on ecosystem services[J]. Habitat International, 2023, 141: 102944.

[21] Gao J X, Song J B, Wu L F. A new methodology to measure the urban construction land-use efficiency based on the two-stage DEA model[J]. Land Use Policy, 2022, 112: 105799.
[22] 王兆峰, 于沛鑫. 长江经济带城乡融合发展效率时空动态演化及其驱动机制[J]. 地理科学, 2025, 45(7): 1407-1419. [Wang Zhaofeng, Yu Peixin. Spatio-temporal dynamic evolution and driving mechanism of efficiency of urban-rural integration development in the Yangtze River Economic Belt. Geographical Science, 2025, 45(7): 1407-1419.]
[23] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
[24] Qu J J, Wang B H, Liu X H. A modified super-efficiency network data envelopment analysis: Assessing regional sustainability performance in China[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2022, 82: 101262.
[25] Ren W Z, Zhang Z L, Wang Y J et al. Measuring regional eco-efficiency in China (2003—2016): A "Full World" perspective and network data envelopment analysis[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(10): 3456.
[26] Tone K, Tsutsui M. Network DEA: A slacks-based measure approach[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 197(1): 243-252.
[27] Wang M, Feng C. Regional total-factor productivity and environmental governance efficiency of China's industrial sectors: A two-stage network-based super DEA approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 273: 123110.
[28] 张丽琨, 张亚萍, 梁远. 中国工业企业绿色技术创新效率的测度与评价——基于超效率网络 SBM-Malmquist 模型分析[J]. 技术经济, 2022, 41(7): 13-22. [Zhang Likun, Zhang Yaping, Liang Yuan. The measurement and evaluation of green technology innovation efficiency of industrial enterprises in China: Analysis based on network super SBM-Malmquist model. Journal of Technology Economics, 2022, 41(7): 13-22.]
[29] Färe R, Grosskopf S, Norris M et al. Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries[J]. The American Economic Review, 1994, 8(2): 66-83.
[30] 杨骞, 刘鑫鹏, 孙淑惠. 中国科技创新效率的时空格局及收敛性检验[J]. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(12): 105-123. [Yang Qian, Liu Xinpeng, Sun Shuhui. Spatiotemporal pattern and convergence test of China's scientific and technological innovation efficiency. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2021, 38(12): 105-123.]
[31] 徐伟, 李直儒, 施慧斌, 等. 基于 Super-SBM 模型和 Malmquist 指数的中国工业创新效率评价[J]. 宏观经济研究, 2021(5): 55-68. [Xu Wei, Li Zhiru, Shi Huibin et al. An evaluation of China's industrial innovation efficiency based on Super-SBM model and Malmquist index. Macroeconomics, 2021(5): 55-68.]
[32] 张宇, 罗金玲, 刘秋华, 等. 面向可持续发展的南流江流域生态系统碳汇功能潜力区识别[J]. 地理科学, 2025, 45(6): 1206-1217. [Zhang Yu, Luo Jinling, Liu Qiuhua et al. Identification of carbon sink potential area for sustainable development in the Nanliu River Basin. Geographical Science, 2025, 45(6): 1206-1217.]
[33] 岳立, 任婉瑜. 黄河流域城市能源综合效率时空分异与影响因素研究[J]. 地理科学, 2024, 44(4): 630-639. [Yue Li, Ren Wanyu. Spatio-temporal distribution and influencing factors of urban comprehensive energy efficiency in the Yellow River Basin. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(4): 630-639.]
[34] 国家统计局. 中国城市统计年鉴[M]. 2001—2021. 北京: 中国统计出版社, 2001—2021. [National Bureau of Statistics. China city statistical yearbook. 2001—2021. Beijing: China Statistics Press, 2001——2021.]
[35] 住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴[M]. 2000—2020. 北京: 中国统计出版社, 2000—2020. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development. China urban construction statistical yearbook. 2000—2020. Beijing: China Statistics Press, 2000—2020.]
[36] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(6): 1018-1029. [Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River Basin based on InVEST and CA-Markov models. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 1018-1029.]
[37] 周桂芳, 周彦兵, 胡涛. 中原城市群县域碳排放时空演变及影响因素分析[J]. 管理学刊, 2023, 36(3): 19-34. [Zhou Guifang, Zhou Yanbing, Hu Tao. Analysis on temporal and spatial pattern evolution and influencing factors of county carbon emission in Zhongyuan Urban Agglomeration. Journal of Management, 2023, 36(3): 19-34.]
[38] 孙颖琦, 张子龙, 陈兴鹏, 等. 多源数据视角下黄河流域城市体系的规模等级与网络结构分析[J]. 地理科学, 2024, 44(2): 268-277. [Sun Yingqi, Zhang Zilong, Chen Xingpeng et al. Size-hierarchy and network structure analysis of urban system in the Yellow River Basin using multi-source data. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(2): 268-277.]
[39] 郑德凤, 郝帅, 孙才志, 等. 中国大陆生态效率时空演化分析及其趋势预测[J]. 地理研究, 2018, 37(5): 1034-1046. [Zheng Defeng, Hao Shuai, Sun Caizhi et al. Spatio-temporal pattern evolution of eco-efficiency and the forecast in mainland of China. Geographical Research, 2018, 37(5): 1034-1046.]
[40] 郭文娟, 肖海金, 王博. 基于 DEA 模型的科研院所科技成果转化效率测度分析——以中国科学院为例[J]. 科技管理研究, 2023, 43(15): 73-81. [Guo Wenjuan, Xiao Haijin, Wang Bo. Measurement and analysis of transformation efficiency

of scientific and technological achievements in scientific research institutes based on DEA model: Taking the Chinese Academy of Sciences as an example. Science and Technology Management Research, 2023, 43(15): 73-81.]

Measuring and optimizing urban expansion efficiency in the Central Plains Urban Agglomeration: Based on green total factor productivity and two-stage network DEA model

Ren Weizhen[1], Qiao Jiajun[1], Zhang Zilong[2,3], Wan Shilong[4]

(1. *College of Geographical Sciences*, *Faculty of Geographical Science and Engineering*, *Henan University*, *Zhengzhou* 450046, *Henan*, *China*; 2. *Key Laboratory of Western China's Environmental Systems* (*Ministry of Education*), *College of Earth and Environmental Sciences*, *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*; 3. *Institute of Green Development for the Yellow River Drainage Basin*, *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*; 4. *Institute of Urban Environment* (*IUE*), *Chinese Academy of Sciences*, *Xiamen* 361021, *Fujian*, *China*)

Abstract: Against the backdrop of "connotative development" emerging as the core guiding principle of new-type urbanization, urban agglomerations, as strategic core regions for national high-quality development, are gradually shifting their spatial expansion mode from "incremental growth" to "stock-based quality improvement." Scientific assessment and optimization of the spatial expansion efficiency of urban agglomerations is of great theoretical and practical significance for promoting their green, efficient, and intensive development, as well as for improving territorial spatial policies. From the perspectives of green total-factor productivity and the full life cycle of urban development, this study constructs a comprehensive evaluation system for spatial expansion efficiency encompassing both the urban construction and operation stages. Employing the network DEA model, the Malmquist index, and redundancy analysis, it explores efficiency improvement pathways from the dual dimensions of multi-factor input-output and city scale. The results indicate that: 1) From 2000 to 2020, the static efficiency of the Central Plains Urban Agglomeration exhibited an overall fluctuating-declining trend. The inter-city efficiency disparities were remarkable and reached there peak in 2020. The mean efficiency and number of DEA-efficient cities during the construction stage were both lower than those in the operation stage, representing the key constraint on overall expansion performance. 2) The dynamic expansion efficiency declined at an average annual rate of 2.05%, with a greater reduction in the operation stage than in the construction stage, and the technological change index exerted a particularly prominent driving effect. 3) In 2020, the 17 non-DEA-efficient cities showed no insufficiency in desirable outputs but generally presented input redundancy in factors including construction land and labor force, alongside excessive undesirable outputs such as $PM_{2.5}$ and CO_2 emissions. Low resource utilization efficiency and high eco-environmental pressures were the main causes of efficiency decline. Differentiated adjustment strategies combining "scale adaptation and structural optimization" should be formulated based on each city's input-output structure and scale characteristics.

Key words: urban expansion efficiency; green total factor efficiency; two-stage network DEA; Central Plains Urban Agglomeration