

综合研究

# 黄河流域三大城市群城市土地绿色利用效率的空间关联网络与影响因素

燕思宇<sup>1,2</sup>, 丁一<sup>1,2</sup>, 刘慧芳<sup>1,2</sup>, 白炜旭<sup>1,2</sup>, 朱宇婷<sup>1,2</sup>

(1.山西农业大学 资源环境学院, 山西 晋中 030800; 2.土壤健康山西省实验室, 山西 晋中 030800)

**摘要:** [目的] 研究黄河流域三大城市群城市土地绿色利用效率空间关联网络特征及影响因素, 旨在厘清城市间相互作用关系, 为协同提升城市群城市土地绿色利用效率提供科学依据。[方法] 基于非期望产出超效率 SBM 模型测算黄河流域三大城市群 2007—2022 年城市土地绿色利用效率, 利用修正引力模型和社会网络分析方法探讨各城市群城市土地绿色利用效率空间关联网络特征及其影响因素。[结果] ① 研究期内, 三大城市群城市土地绿色利用效率呈关中平原城市群 > 中原城市群 > 山东半岛城市群格局。② 三大城市群城市土地绿色利用效率空间关联网络均表现出复杂的网络结构形态, 各城市群网络存在一定的等级结构, 网络稳定性趋于下降。各网络中核心城市虹吸效应显著, 但对其他城市溢出效应相对有限。③ 地理空间邻近、经济发展水平差异是影响黄河流域三大城市群城市土地绿色利用效率空间网络形成的共同因素。[结论] 黄河流域三大城市群城市土地绿色利用效率空间关联的紧密程度具有较大进步空间, 各城市群未来需进一步重视自身空间关联网络结构, 采用差异化发展路径, 促进城市土地绿色利用效率协同发展。

**关键词:** 城市土地绿色利用效率; 空间关联网络; 影响因素; 黄河流域三大城市群

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0306-12

中图分类号: F301.2

**文献参数:** 燕思宇, 丁一, 刘慧芳, 等. 黄河流域三大城市群城市土地绿色利用效率的空间关联网络与影响因素[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 306-317. Yan Siyu, Ding Yi, Liu Huifang, et al. Spatial correlation networks and influencing factors of urban land green utilization efficiency in three major urban agglomerations of Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 306-317.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.016

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.016

## Spatial correlation networks and influencing factors of urban land green utilization efficiency in three major urban agglomerations of Yellow River basin

Yan Siyu<sup>1,2</sup>, Ding Yi<sup>1,2</sup>, Liu Huifang<sup>1,2</sup>, Bai Weixu<sup>1,2</sup>, Zhu Yuting<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong, Shanxi 030800, China; 2. Soil Health Laboratory of Shanxi Province, Jinzhong, Shanxi 030800, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial correlation network characteristics and influencing factors of urban land green use efficiency (ULGUE) in urban agglomerations were investigated in order to clarify intercity interaction relationships, in order to provide a scientific basis for the coordinated improvement of ULGUE in urban agglomerations. [Methods] ULGUE of the three major urban agglomerations in the Yellow River basin from 2007 to 2022 was measured using an undesired-output super-efficient SBM model. Subsequently, a modified gravity model and social network analysis method were employed to explore the structural characteristics of spatial correlation networks of ULGUE within each urban agglomeration and their influencing factors. [Results] ① During the study period, the ULGUE of the three urban agglomerations followed this pattern: Guanzhong plain

收稿日期: 2025-10-08

修回日期: 2025-11-21

采用日期: 2025-11-21

资助项目: 山西省哲学社会科学规划课题“新型城镇化背景下山西县域城镇低效用地再开发路径研究”(2023YY077); 山西农业大学社会科学振兴工程“山西农业新质生产力加速耕地利用绿色转型的动力机制与实践路径”(2025YB22)

第一作者: 燕思宇(2000—), 女(汉族), 河南省平顶山市人, 硕士研究生, 研究方向为土地可持续利用。Email: yansxau@163.com。

通信作者: 丁一(1984—), 女(汉族), 山东省聊城市人, 博士, 副教授, 主要从事土地可持续利用与国土空间规划研究。Email: 18235421697@139.com。

urban agglomeration>central plains urban agglomeration>Shandong peninsula urban agglomeration. ② The spatial correlation networks of ULGUE in the three major urban agglomerations exhibited complex structural patterns. Each network showed a certain hierarchical structure, and its stability tended to decrease. In each network, the siphon effects of core cities were significant, but their spillover effects on other cities remained relatively limited. ③ Geospatial proximity and differences in economic development levels were identified as common factors influencing the formation of spatial correlation networks of ULGUE in the three major urban agglomerations of the Yellow River basin. [Conclusion] There is significant potential for improving the tightness of spatial correlations within the ULGUE networks of the three major urban agglomerations in the Yellow River basin. In the future, each urban agglomeration should focus more on optimizing its own spatial correlation network structure, propose differentiated development pathways, and promote the coordinated development of ULGUE across cities.

**Keywords: urban land green use efficiency; spatial correlation networks; influencing factors; three major urban agglomerations in Yellow River basin**

城市土地作为城镇化进程中最关键的资源要素之一,其绿色利用效率关乎城市自身的空间优化与生态安全,更影响着区域整体的可持续发展能力。提升城市土地绿色利用效率,不仅是推动土地利用方式转变、实现资源高效配置的关键路径,更是助力生态文明建设、促进人地关系和谐共生的必然要求。同时,协同治理是新时期国土空间利用管理的关键需求,而城市群是促进区域协调发展的重要平台。因此,探讨城市群城市土地绿色利用效率空间关联问题已成为实现城市群协同发展和经济高质量增长的主要议题之一。

各城市资源条件、经济基础等存在空间异质性,这些差异导致城市间土地绿色利用效率展现空间非均衡性,进而驱使各类流体要素跨区域流动、影响要素远程耦合动态变化等。因此,城市土地绿色利用效率空间关联网络形成的本质为资本、劳动力等“流动性要素资源”在土地这一“非流动性要素资源”上借助“外部作用”(如市场机制、政策与制度等)产生集聚或扩散效应,进而导致城市间土地绿色利用效率的空间分异与传导,最终构建起由点、线、面相互交织的复合型空间网络结构<sup>[1]</sup>。首先,邻近城市间存在天然的地理联系,并且经济、技术发展、交通设施等不断完善极大地促进了城市间的要素流动和资源配置,使得非地理邻近的城市之间互动增加。城市间的自然地理联结特性与重大交通设施的功能影响,使城市土地绿色利用效率空间关联网络的基本节点及空间传导路径具备了存在的基础。基于上述基本节点和传导路径,在要素集散机制的调节作用下,影响城市土地绿色利用效率的各类要素通过资本流、技术流、人口流、信息流等载体,在地理空间上进行流动并重新配置。使得要素的流动会更加便捷

迅速。从而促使城市土地绿色利用效率突破地理空间,形成复杂的空间关联网络。

市场为追求资源配置效率最大化、经济效益最大化利益,会引导城市土地绿色利用相关要素不断向边际效益更高的地区流动、集中,形成城市土地绿色利用效率“核心—边缘”梯度格局。而政府可通过制度设计、资源倾斜、机制创新等综合手段,引导城市土地绿色利用效率要素向边缘区域逆向流动,增强城市间的合作,推动城市土地绿色利用效率空间关联网络的形成。

城市土地绿色利用效率是指在一定的生产技术条件下,单位城市土地利用系统中的投入(土地、资本、劳动等)与产出(经济、社会、环境综合效益)的综合映射,其本质是以尽可能少的土地要素投入和最小化生态环境损失为代价,获取最大的经济、社会、环境综合效益<sup>[2-3]</sup>。目前,国内外关于城市土地绿色利用效率(urban land green use efficiency, ULGUE)的研究多集中在城市土地绿色利用效率内涵、时空演进及影响因素等方面。城市土地绿色利用效率时空演进研究一般采用空间关联分析,多运用传统计量模型聚焦于刻画效率空间相关性、集聚性等特征<sup>[3-5]</sup>。影响因素研究方法由传统计量经济学模型如Tobit回归模型<sup>[6]</sup>、面板固定效应回归模型等<sup>[7]</sup>,逐渐向考虑空间位置的GTWR(geographically and temporally weighted regression)模型等<sup>[2,8]</sup>的方法转变,学者普遍认为城市经济规模、产业结构、科技水平、环境规制等因素影响城市土地绿色利用效率水平<sup>[2,7-9]</sup>。

黄河流域既是中国经济发展重要引擎与文化传承的核心载体,又因生态本底脆弱、地形复杂等成为中国生态环境保护的重点区域。推动黄河流域生态保护和高质量发展不仅是中国生态文明建设进程中

的核心内容,更是构成全球生态治理与文明建设体系的关键环节<sup>[10]</sup>。因此需促进区域协调发展,加速其发展模式向绿色转型,推动经济社会发展全面绿色化。位于黄河中下游的关中平原城市群、中原城市群、山东半岛城市群,其人口规模占流域总体比重较大,对土地资源需求量大,经济相对发达且拥有较多的创新主体、企业等,城市间要素流动丰富,属于黄河流域发展较迅速的城市群,对实现黄河流域高质量发展起到关键作用<sup>[11]</sup>。

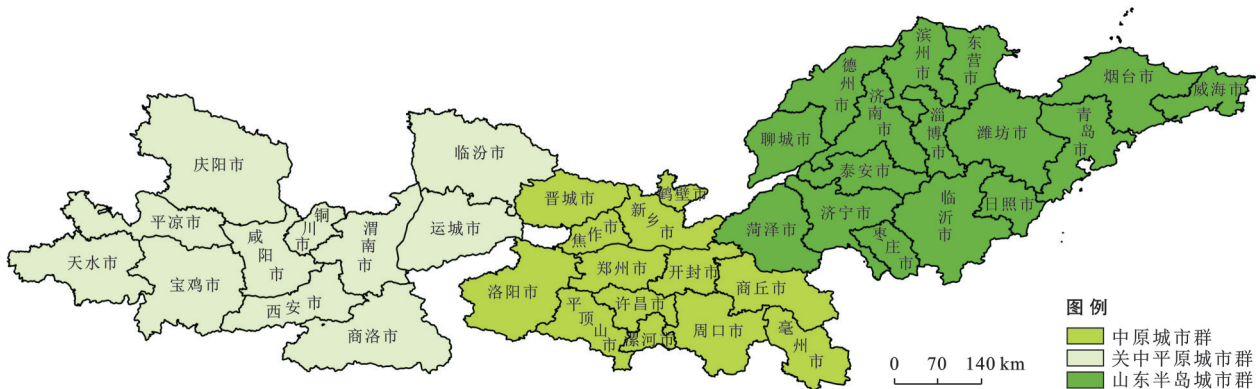
在城市土地绿色利用效率水平空间关联或地区差异方面,现有研究只能邻近性地分析城市土地绿色利用效率的空间分布差异,无法对城市土地绿色利用效率已展现出的整体联动和个体联系“关系”特征进行深入挖掘,对进一步解释城市土地绿色利用效率空间关联关系和形成机制有一定局限性<sup>[12]</sup>。同时,多数学者对黄河流域城市土地绿色利用效率研究较宏观,政策建议较同质化。因此,本研究以黄河流域三大城市群为研究区,在测度城市土地绿色利

用效率的基础上,突破基于地理邻近性的传统静态分析框架,尝试从复杂网络视角出发,分析城市土地绿色利用效率空间关联网特征,识别网络中城市群扮演的角色,探究影响网络形成的主要因素,深化对城市群土地绿色利用效率协同提升内在规律的理论认知。从而为科学制定提高城市群土地绿色利用效率的差异化策略、形成绿色发展的城市群集聚群提供参考依据,并为落实黄河流域生态保护和高质量发展战略提供服务。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

关中平原城市群、中原城市群、山东半岛城市群位于黄河中下游。截至2022年末,三大城市群总人口约占黄河流域核心区总人口数的74%,地区生产总值约占黄河流域的66%。考虑到数据可获取性,将缺失严重的关中城市群中的杨陵区以及中原城市群中的济源市剔除,最终确定40个城市为研究对象(图1)。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作,底图无修改。

图1 研究区各城市位置图

Fig.1 Location map of different cities at study area

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 城市土地绿色利用效率分析方法

(1) 非期望产出超效率SBM (slack-based measure, SBM)模型。针对传统数据包络(data envelopment analysis, DEA)模型存在无法处理非期望产出等缺陷,Tone<sup>[13]</sup>提出基于非期望产出SBM模型,但其测算结果会出现多个决策单元(decision-making unit, DMU)效率值为1,导致无法进一步比较。因此,在SBM模型基础上,Tone<sup>[14-15]</sup>提出了非径向非角度的超效率SBM模型,该模型能处理包括非期望产出在内的多个输入和输出,并进一步区分有效决策单元的效率水平。参考相关研究<sup>[2-5,16]</sup>,利用非期望产出超效率SBM模型测度城市土地绿色利用效率。假设有 $n$ 个生产决策单元(DMU)( $n=1,2,\dots,n$ ),

$m, l, h$ 分别表示每个DMU中投入、期望产出、非期望产出的数量,模型设置如下:

$$\min \theta^* = \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{m=1}^M (s_m^x / x_{jm}^t)}{1 - \frac{1}{l+h} \left[ \sum_{l=1}^L (s_l^y / y_{jl}^t) + \sum_{h=1}^H (s_h^b / b_{jh}^t) \right]} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_{jm}^t \geq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j^t x_{jm}^t + s_m^x \\ y_{jl}^t \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j^t y_{jl}^t - s_l^y \\ b_{jh}^t \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j^t b_{jh}^t + s_h^b \\ (\lambda_j^t \geq 0, S_m^x \geq 0, S_l^y \geq 0, j = 1 \dots n) \end{cases}$$

式中: $\theta^*$ 为城市土地绿色利用效率; $x'_i, y'_i, b'_i$ 分别为 DMU $_j$ 在  $t$  时期的投入、期望产出、非期望产出; $S^*_m, S^*_y, S^*_b$ 分别表示投入要素、期望产出和非期望产出的松弛变量; $\lambda$ 为约束向量。

(2) 城市土地绿色利用效率指标体系构建。基于城市土地绿色利用效率内涵并结合低碳发展理念,参考相关研究<sup>[2-5,8,16]</sup>,建立土地绿色利用效率评价指标体系,测算城市土地绿色利用效率(表 1)。其中,非期望产出运用熵值法<sup>[17]</sup>确定,由“三废”指标(工业废水、二氧化硫、烟(粉)尘排放量)构成环境污染综合指数。

表 1 城市土地绿色利用效率评价指标体系  
Table 1 Evaluation indicator system for urban land green use efficiency

指标类型	类别	具体指标
投入	土地投入	城市建设用地面积/km <sup>2</sup>
	资本投入	地均固定资产投资额/万元
	劳动力投入	地均二三产业从业人员数/万人
期望产出	经济产出	地均二三产业增加值/万元
	社会产出	在岗职工平均工资/万元
	环境产出	建成区绿化覆盖率/%
非期望产出	环境污染	地均工业废水排放量/10 <sup>4</sup> t
		地均工业二氧化硫排放量/t
		地均工业烟(粉)尘排放量/t
		地均二氧化碳排放量/10 <sup>4</sup> t

1.2.2 空间关联网络分析方法

(1) 修正引力模型。构建城市土地绿色利用效率空间关联矩阵是开展社会网络分析的重要前提。相较于其他处理空间关联关系的方法,引力模型对总量数据的处理具有更高适用性,既能从整体和个体两个维度出发掌握空间关联的核心特性,又能综合考量经济、地理等多方面影响要素,这一特性为探索空间关联网络的动态演化提供了有力支撑<sup>[18]</sup>。参考相关研究<sup>[13,19-20]</sup>,采用修正引力模型构建其空间关联矩阵,具体设定如下:

$$F_{ij} = K_{ij} \times \frac{\sqrt[3]{P_i G_i E_i} \times \sqrt[3]{P_j G_j E_j}}{D_{ij}^2} \quad (2)$$

$$K_{ij} = \frac{E_i}{E_i + E_j} \quad (3)$$

$$D_{ij} = \frac{d_{ij}}{g_i - g_j} \quad (4)$$

式中: $F_{ij}$ 指城市  $i$  对城市  $j$  的城市土地绿色利用效率联系强度; $K_{ij}$ 表示修正引力系数; $E_i, E_j$ 为城市  $i, j$  的城市土地绿色利用效率值; $P$ 为年末城市总人数; $G$ 为生产总值; $g$ 为人均生产总值; $D_{ij}$ 为城市  $i$  和  $j$  间的

经济地理距离; $d_{ij}$ 为城市  $i, j$  间的球面距离。参考相关文献<sup>[21-22]</sup>,将矩阵各行均值作为阈值,构建有向非对称二元邻接矩阵,得到城市土地绿色利用效率空间关联的二值网络。

(2) 社会网络分析法。利用社会网络分析法分析三大城市群城市土地绿色利用效率空间关联网络特征。首先,用网络密度、网络关联度、网络等级度、网络效率等指标分析整体网络特征。其中网络密度表征空间关联网络中关系的数量及复杂度,该值越大,各节点间的联系越密切。当网络关联度为 1 时,表明网络中无不可达点对数,网络具有较好的连通性;网络等级度衡量网络中节点的“控制”能力,网络等级度越大,网络等级越高;网络效率用于评估网络中各节点间的连通效率,网络效率越小,网络中溢出路路径越多样,网络结构稳定性越强。

通过度数中心度、接近中心度、中介中心度指标刻画个体网络特征。某节点度数中心度越高,意味着该节点城市在网络中越处于核心位置;接近中心度越高,节点城市之间距离越短,“行动者”角色越明显;中间中心度越高,某节点城市在网络中承担的中介作用越显著<sup>[22]</sup>。各特征值具体算法参考文献<sup>[23]</sup>。

1.2.3 影响因素选取与模型构建

二次指派程序分析(quadratic assignment procedure, QAP)作为一种非参数统计方法,突破传统模型对变量独立性的前置要求,在处理关系型数据的多重共线性难题时展现出独特优势<sup>[24]</sup>。利用 QAP 回归分析探究自变量矩阵与城市土地绿色利用效率空间关联矩阵的回归关系,通过考察自变量差异矩阵的显著性水平,揭示影响网络形成的因素<sup>[22]</sup>。

结合前人研究<sup>[3,13,25]</sup>,选取如下 8 个方面作为影响城市土地绿色利用效率空间网络形成的因素:①地理空间邻近,采用 Rook 邻接权重矩阵对地区相邻关系进行量化表征,相邻则赋值为 1,不相邻则为 0。②经济发展水平,以人均 GDP 表征。③人口集聚水平,以人口密度表征。④科技创新水平,以科学技术支出与地方一般公共预算支出比值表征。⑤产业结构,以第三产业增加值/第二产业增加值表征。⑥土地城镇化水平,以城市建设用地面积/城市土地面积表征。⑦环境规制强度,以工业固体废弃物综合利用率表征。⑧财政支持水平,以地方一般公共预算支出/GDP 表征。城市土地绿色利用效率空间关联网络的影响因素模型如下:

$$Y=f(GP, EC, PD, TI, IS, LU, ER, LFS) \quad (5)$$

式中:因变量(Y)为2022年城市群城市土地绿色利用效率空间关联矩阵;自变量GP,EC,PD, TI, IS, LU, ER, LFS 分别表示地理空间邻近、经济发展水平差异、人口集聚水平差异、科技创新水平差异、产业结构水平差异、土地城镇化水平差异、环境规制强度差异、财政支出水平差异。除GP矩阵外,其余自变量均是由城市间的绝对差异构成的差值关系矩阵<sup>[26]</sup>。

### 1.2.4 数据处理

利用MaxDEA软件中非期望产出超效率SBM模型计算2007—2022年黄河流域三大城市群城市土地绿色利用效率。并借助ArcGIS对三大城市群内部城市土地绿色利用效率进行空间可视化分析,通过自然断点法将效率值由高到低划分为5个等级。

基于修正引力模型,计算三大城市群内城市间的土地绿色利用效率联系强度,利用ArcGIS软件绘制各城市群2007年、2022年城市土地绿色利用效率空间关联网络结构图<sup>[27]</sup>。基于引力强度矩阵得到二值网络,利用UCINET6.560软件绘制空间关联网络拓扑图<sup>[28]</sup>。

### 1.3 数据来源

数据来源于《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》以及各市统计年鉴、国民经济和社会发展统计公报,缺失数据采用插值法及邻近年份数据补齐。其中,CO<sub>2</sub>排放量数据来源于EDGAR(emissions database for global atmospheric research),对所有涉及价格的数据,均以2007年为基期进行平减处理。黄河流域水系的矢量数据源自国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>)。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄河流域三大城市群城市土地绿色利用效率演进特征

研究期内三大城市群城市土地绿色利用效率大

小呈现:关中平原城市群>中原城市群>山东半岛城市群(图2)。各城市群效率值呈波动上升趋势,但研究期内效率值均未超过1,说明各城市群土地绿色利用效率偏低,仍有较大提升空间。三大城市群中资源型城市占比较多,虽然近年推动产业转型,但相应城市转型较缓慢,依赖资源发展现状并未彻底转变,导致城市群整体土地绿色利用效率较低。同时,三大城市群城市土地绿色利用效率值呈现一定阶段性特征,2007—2015年,城市土地绿色效率值均呈波动下降趋势,可能是因为这一时期中国正处于工业化和城镇化高速扩张阶段,三大城市群作为人口密集、经济活跃区域,面临“增长优先”模式下的生态环境代价。2016年后,经济发展进入高质量阶段,生态文明建设成为国家战略,政策导向、产业结构、技术创新等发生根本性转变,推动三大城市群土地绿色利用效率回升。

在各城市群中,关中平原城市群中等、较低效率城市数量有所减少;中原城市群城市土地绿色利用效率等级整体跃迁显著,位于较高效率、高效率的城市数量显著增多,由2007年的2个增加到2022年的7个;山东半岛城市群城市土地绿色利用效率等级分化减弱,上升动力不足(图3)。

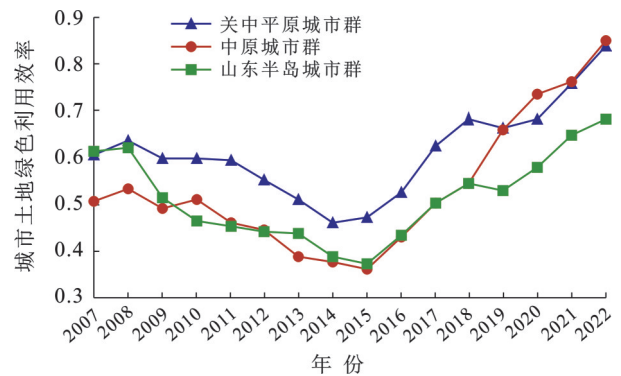


图2 三大城市群城市土地绿色利用效率演变情况  
Fig.2 Evolution of urban land green use efficiency in three major urban agglomerations

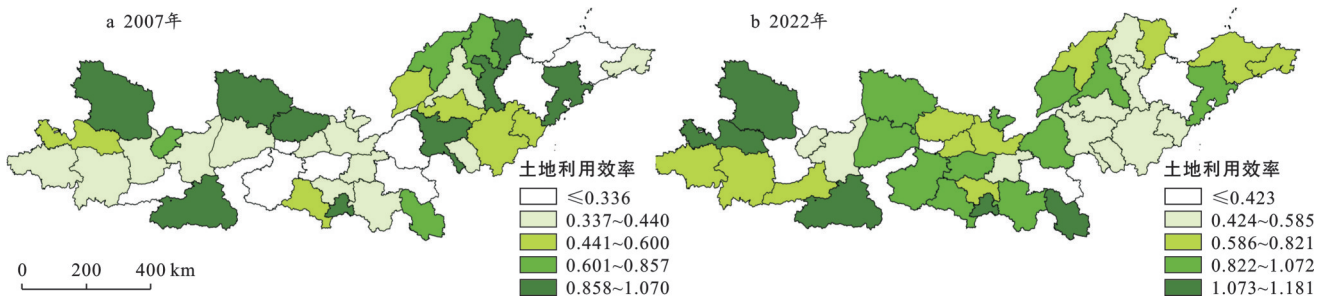


图3 黄河流域三大城市群城市土地绿色利用效率空间分布

Fig.3 Spatial distribution of urban land green use efficiency in three major urban agglomerations of Yellow River basin

### 2.2 黄河流域三大城市群城市土地绿色利用效率空间网络结构特征

#### 2.2.1 整体网络特征

2007年和2022年三大城市群各城市土地绿色利用效率空间关联网络(图4—6)表明,在引力强度上,三大城市群内城市间土地绿色利用效率联系强度整体不断提高,城市间土地绿色利用效率存在空间关联效应,且呈现出错综复杂的网络关系特征。城市土地绿色利用效率空间关联模式已突破地理邻近局限,向着更广泛的跨区域空间联动方向演进。

三大城市群的网络关系数均呈现下降趋势,关中平原、中原、山东半岛城市群网络关联数分别由2007年的21,36,57个降至2022年的16,22,44个,与

各网络最大可能关系总数110(11×10),156(13×12),240个(16×15)差距较大,说明三大城市群城市土地绿色利用效率空间关联关系仍有待加强。在关联关系方面,2007年关中平原城市群中存在西安-宝鸡强关联关系,2022年强关联关系增加,由2007年的1对增至3对,形成以西安为关键节点(西安-渭南、西安-运城、西安-商洛)强关联;中原城市群2007年存在郑州-漯河强关联关系,2022年存在以郑州市为关键节点的4对(郑州-开封、郑州-焦作、郑州-许昌、郑州-周口)强关联关系;山东半岛城市群2007年存在东营-济南、东营-淄博强关联,2022年形成以济南为关键节点(济南-泰安、济南-东营)的强关联,青岛市为次关键节点。

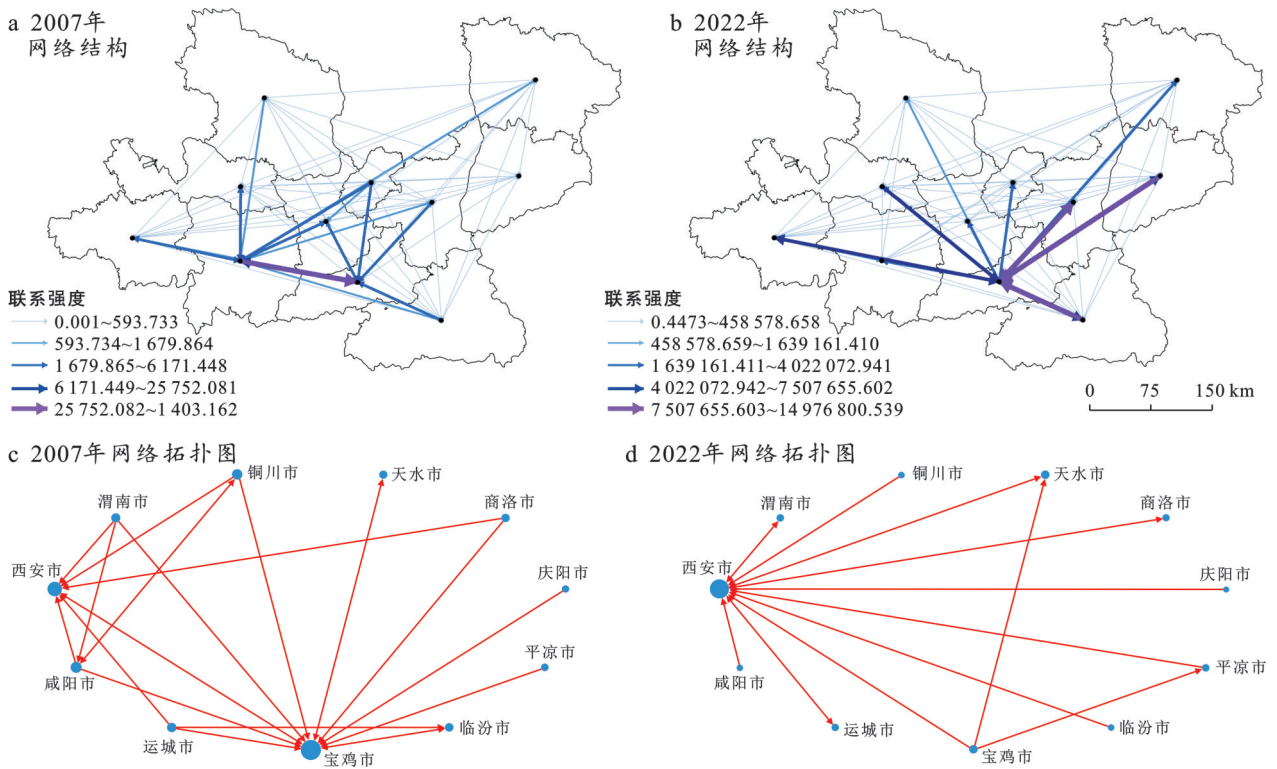


图4 关中平原城市群城市土地绿色利用效率空间关联网络结构、网络拓扑图  
Fig.4 Spatial correlation network structure and network topology of urban land green use efficiency in Guanzhong Plain urban agglomeration

(1) 网络密度。研究期内三大城市群网络密度均呈波动下降态势(图7),说明各城市群城市土地绿色利用效率空间关联网络中实际关联数减少,城市间联系的紧密性降低,网络趋于松散。网络密度整体呈现:山东半岛城市群>关中平原城市群>中原城市群态势。

(2) 网络关联度。研究期内各城市群网络关联度持续为1,说明各城市群网络中各节点城市间的可达性已实现完全可达,城市群内所有城市均在各自网络中,无孤立城市。

(3) 网络等级度。三大城市群在研究期内网络

等级度虽均有小幅度降低,但均处于中等偏上水平(0.6以上),说明各城市群空间关联网络存在较明显的等级特征,网络中的节点间具有一定从属关系。

(4) 网络效率。三大城市群网络效率在研究期内均呈增强趋势,高于中等水平。这表明各城市群空间关联网络中的冗余路线减少,城市间土地绿色利用联系更有效率,但网络稳定性变差,相关要素的传导和溢出成本增加。

#### 2.2.2 个体网络特征

在整体网络特征分析的基础上,运用个体中心性指标分析城市在所处网络中的地位和作用。

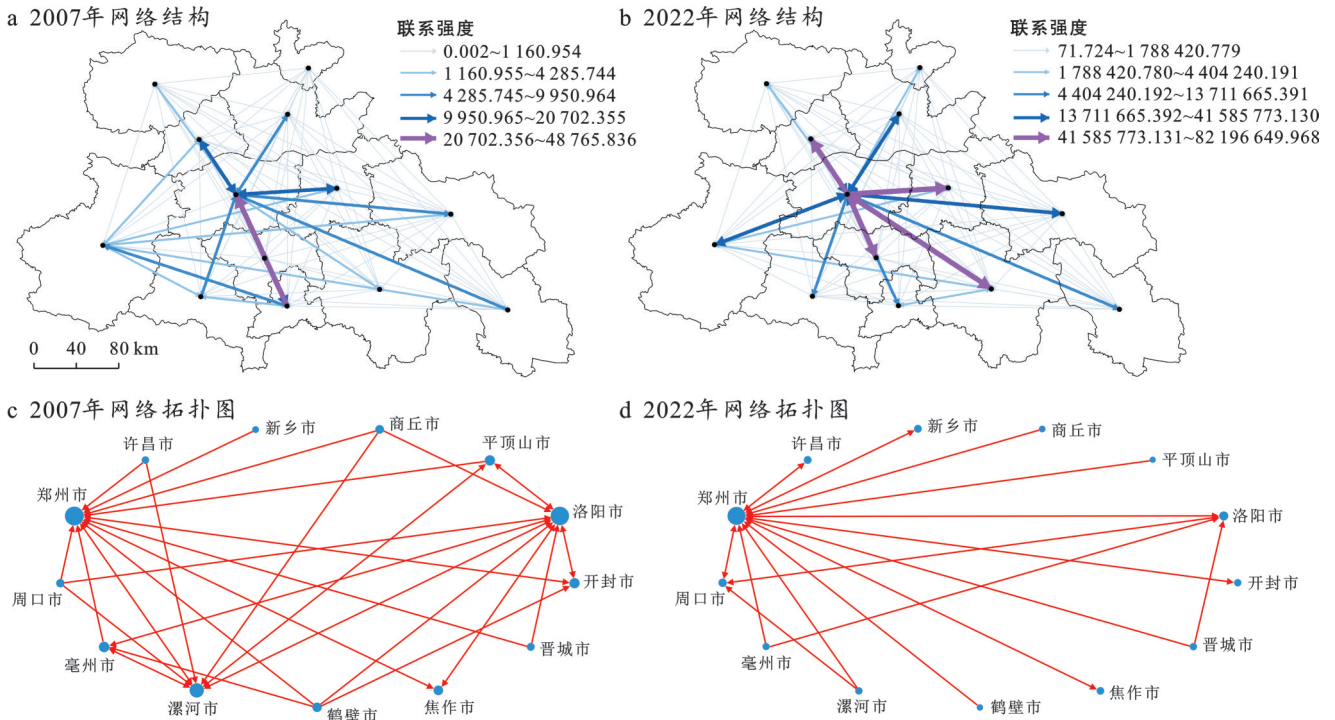


图5 中原城市群城市土地绿色利用效率空间关联网络结构、网络拓扑图  
 Fig.5 Spatial correlation network structure and network topology of urban land green use efficiency in Central Plains urban agglomeration

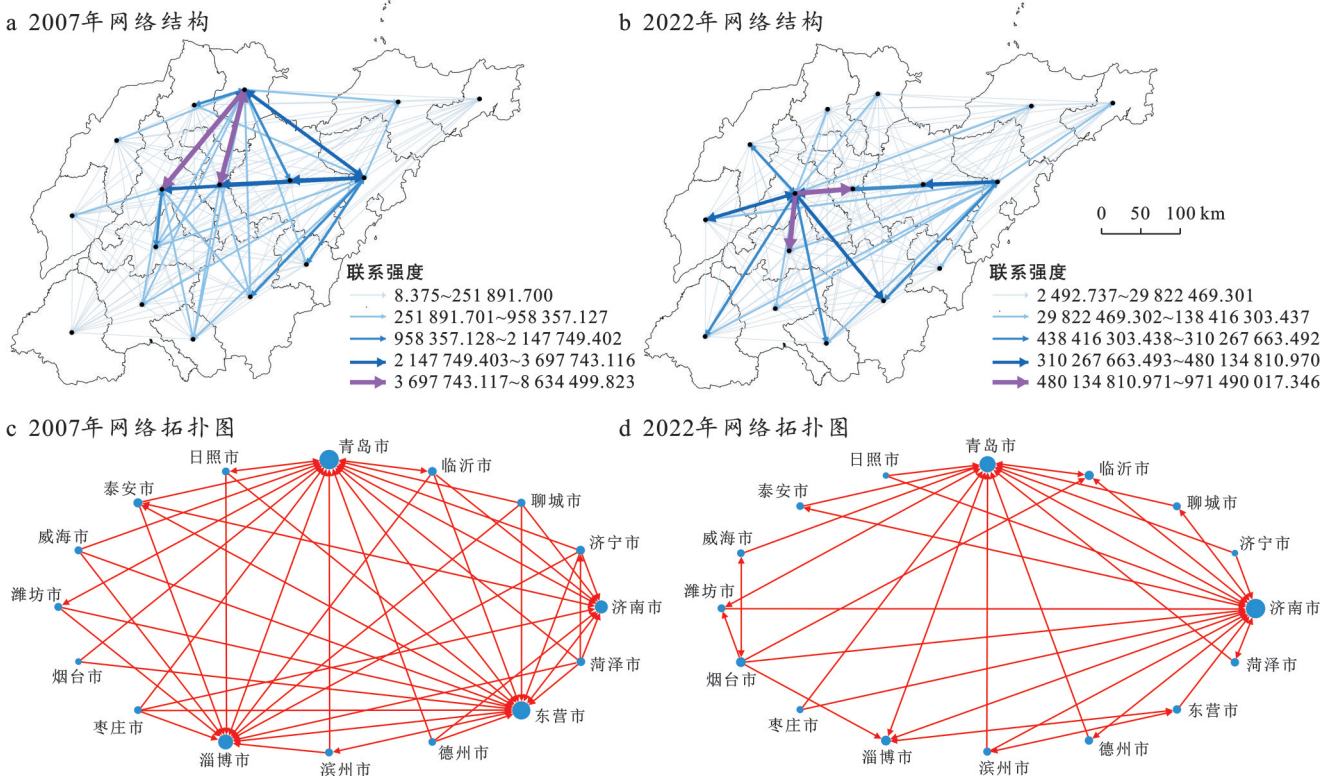


图6 山东半岛城市群城市土地绿色利用效率空间关联网络结构、网络拓扑图  
 Fig.6 Spatial correlation network structure and network topology of urban land green use efficiency in Shandong Peninsula urban agglomeration

(1) 度数中心度。由图8可知,黄河流域三大城市群度数中心度均值由大到小依次为山东半岛城市群(5.5)、中原城市群(3.385)、关中平原城市群

(2.909)。从区域差异看,关中平原城市群中西安市度数中心度显著高于均值,说明西安市与其他城市存在较多关联,位于网络核心地位,并且其点入度均

大于点出度,是网络中的受益主体。而铜川、临汾等城市度数中心度排名靠后,处于边缘位置;中原城市群中郑州市度数中心度显著高于均值,处于网络核心地位,其主要凭借自身经济实力、技术水平等影响周边城市,并且该市点入度明显大于点出度,是网络中的受益主体。鹤壁、商丘等城市度数中心度排名靠后,位于网络边缘位置;山东半岛城市群的青岛、济南度数中心度明显高于均值,处于网络核心地位,济宁、枣庄等城市度数中心度排名靠后,处于网络边缘地位。青岛、济南的点入度明显大于点出度,虹吸效应显著,在提升土地绿色利用效率水平过程中吸引且得到其他城市支持,而烟台市溢出效应明显。

整体来看,三大城市群度数中心度排名靠前的城市主要凭借地理位置、自身经济水平以及技术条件等优势影响周边城市,而位于网络边缘的城市大多经济发展规模较小,对周边城市技术、资源等吸引力较弱。

(2) 接近中心度。根据测算结果,三大城市群接近中心度均值由大到小依次为山东半岛城市群(59.165)、关中平原城市群(58.033)、中原城市群(57.384)。关中平原城市群的西安接近中心度显著高于均值,表明西安市与其他城市“距离”较短,能更快速地与其他城市产生联系;中原城市群的郑州,山

东半岛城市群的济南、青岛接近中心度均显著高于各自均值。结合度数中心度结果可知,上述城市均为各城市群网络中的核心城市,资源获得能力较强。而接近中心度排名靠后的城市,可能因地理位置偏远或经济发展水平较低等,竞争核心资源的能力较弱,导致在土地利用过程中与其他城市交往少,在网络中扮演边缘行动者角色。

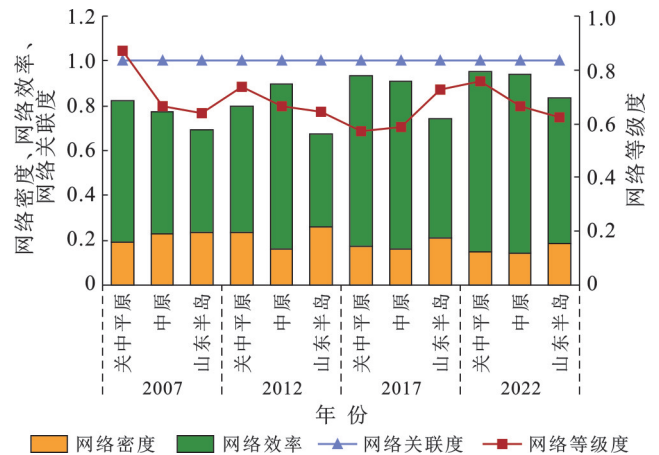


图7 三大城市群土地绿色利用效率空间关联网络的整体网络特征指标

Fig.7 Overall network characteristic indicators of spatial correlation networks of urban land green use efficiency in three major urban agglomerations

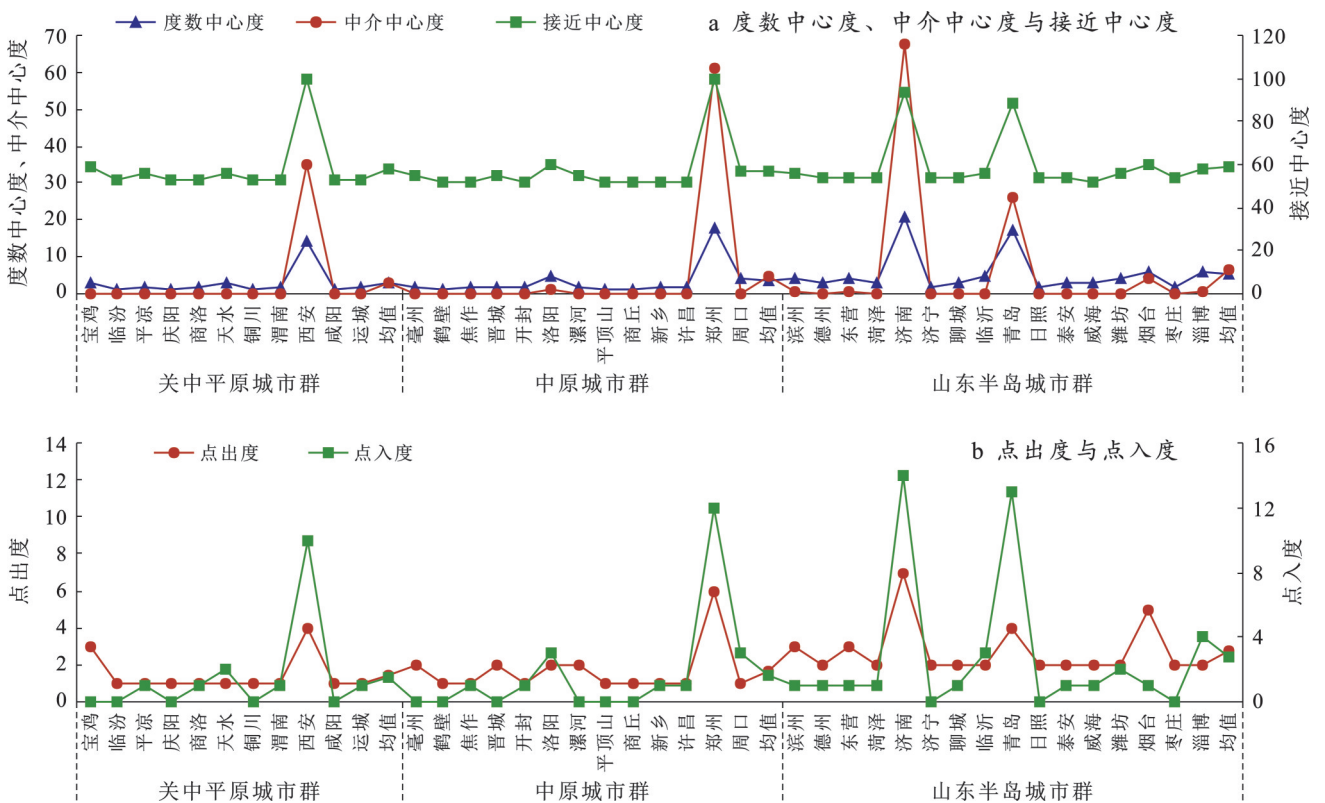


图8 2022年三大城市群城市土地绿色利用效率空间关联网络的个体网络特征

Fig.8 Individual network characteristics of spatial correlation networks of urban land green use efficiency in three major urban agglomerations in 2022

(3) 中介中心度。根据测算结果可知,三大城市群中介中心度均值由大到小依次为山东半岛城市群(6.25)、中原城市群(4.769)、关中平原城市群(3.182)。关中平原城市群的西安,中原城市群的郑州以及山东半岛城市群的济南、青岛的中介中心度均高于均值。这些城市凭借自身地理区位、经济、政策等优势,对城市土地绿色利用效率相关要素在城市间的优化配置起调控作用,成为网络的“枢纽节点”,垄断了网络关键路径。其余城市的中介中心度多为0,主要是受网络等级化结构影响。一些边缘城市因地理位置、经济条件、科技水平等对空间关联网络的控制能力较弱,并且可能因存在产业同质化等问题,彼此间抢夺资源、互补性需求低,导致网络结构扁平化,因此较少能介入核心主导的关键路径。

### 2.3 城市土地绿色利用效率空间关联网络影响因素分析

经5000次随机置换,获得各城市群城市土地绿色利用效率空间关联网络影响因素回归结果(表2)。关中平原、中原、山东半岛城市群 $R_{adj}^2$ (调整后的判定系数)依次为0.301,0.412,0.239,均通过了1%显著性水平检验,说明选取的8个变量能分别解释各城市群城市土地绿色利用效率空间关联关系的30.1%,41.2%,23.9%,拟合效果较好<sup>[29-30]</sup>。

表2 QAP回归结果  
Table 2 QAP regression results

变量	标准化回归系数		
	关中平原城市群	中原城市群	山东半岛城市群
GP	0.258***	0.251***	0.228***
EC	0.630***	0.26***	0.314***
PD	-0.171	-0.462**	-0.041
TI	0.002	-0.006***	-0.004
IS	-0.310***	0.050	0.164**
LU	-0.003*	0.524***	-0.120
ER	0.116	-0.091*	0.060
LFS	-0.002**	-0.003**	0.003
$R_{adj}^2$	0.301***	0.412***	0.239***

注:\*\*\*表示在1%水平上差异显著;\*\*表示在5%水平上差异显著;\*表示在10%水平上差异显著。

(1) 地理空间邻近系数显著为正。说明城市间越邻近,其城市土地绿色利用效率间联系越强。地理空间邻近性可为城市间土地绿色利用技术交流、合作等提供便利,减少交易成本,从而促进网络形成。

(2) 经济发展水平差异系数显著为正。经济发

展水平差距可促使资源、要素等经“虹吸-溢出”效应在城市间传导,从而对城市土地绿色利用效率空间网络产生一定促进作用。

(3) 人口集聚水平差异对中原城市群城市土地利用效率空间网络形成具有负向影响。表明城市间较大的人口差异不利于该城市群网络的形成。中原城市群中大多为传统农业城市,人口多向经济较好的中心城市流动,人口密度差异加大,可能导致资源配置向中心城市集中,破坏网络形成的均衡基础。

(4) 科技创新水平差异仅对中原城市群城市土地利用效率空间网络形成产生影响,其差异系数显著为负。中原城市群中郑州、洛阳等城市主要聚焦于第二、三产业,核心城市的科技扩散对多以传统农业为主的边缘城市而言缺乏一定承接载体,跨城合作动力不强,从而抑制网络形成。

(5) 产业结构差异正向影响山东半岛城市群空间关联关系,负向影响关中平原城市群。山东半岛城市群积极落实产业结构优化、新旧动能转换的政策要求,促使城市产业结构差异化,城市间的绿色需求互补性增强,促进相关资源流动,有利于促进网络形成。关中平原城市群中城市多以传统重工业、资源型产业为主,产业结构差异增大可能会引起技术传递断裂、政策冲突等问题,导致城市间土地绿色利用合作成本加大,从而抑制网络形成。

(6) 土地城镇化水平差异负向影响关中平原的空间关联关系,正向影响中原城市群。关中平原城市群内多数城市产业同质化,城市间土地城镇化水平差异越小,城市间协同合作成本越低,从而促进城市间要素流动。而中原城市群内城市分工不同,产业结构差异较大,城市间土地城镇化水平差异越大,可能越促进城市间供给-需求的强关联,驱动要素流动。

(7) 环境规制强度差异仅对中原城市群空间网络形成产生影响,其差异系数显著为负。中原城市群内城市环境规制强度差异主要可归因于产业结构的差异,周边城市可能较难满足郑州、洛阳的固废处理与土地环保要求,跨城合作可能因成本高、技术不匹配难以落地,从而抑制网络形成。

(8) 财政支持水平差异负向影响关中平原、中原城市群空间关联网络的形成。可能原因在于城市间财政支持水平差异缩小,能进一步解决关中平原城市群的“单核虹吸-边缘弱质”困境与中原城市群的技术适配性等问题,增强城市合作主动性,激活协同治理机制,推动网络形成。

### 3 结论

(1) 研究期内,三大城市群城市土地绿色利用效率均呈上升趋势,效率整体呈现:关中平原城市群>中原城市群>山东半岛城市群,但各城市群效率值均未超过1,存在较大提升空间。

(2) 黄河流域三大城市群城市土地绿色利用效率网络的网络密度、网络关联数均呈下降趋势,表明整体网络关联密切性下降,并且网络内存在一定的等级结构,网络稳定性降低。

(3) 三大城市群的城市土地绿色利用效率空间关联网络中的核心城市分别为关中平原城市群的西安市、中原城市群的郑州市、山东半岛城市群的济南市和青岛市,这些城市的虹吸效应显著,对网络中其他城市土地绿色利用效率空间关联起到重要的调控作用,也发挥着“中介”“桥梁”作用,但对边缘城市的溢出效应相对有限。

(4) 地理空间邻近和经济发展水平差异是影响黄河流域三大城市群城市土地绿色利用效率空间网络形成的重要因素。此外,产业结构、土地城镇化水平、财政支持水平差异对关中平原城市群城市土地绿色利用效率空间关联网络的形成起抑制作用;人口集聚水平、科学创新技术水平、土地城镇化水平、环境规制强度、财政支持水平差异对中原城市群空间关联网络的形成起抑制作用;产业结构差异正向驱动山东半岛城市群网络形成。

### 4 讨论

研究结果表明,黄河流域三大城市群城市土地绿色利用效率在空间布局上并非彼此孤立,而是均表现出一定的空间网络关联特征。城市间土地绿色利用效率关联并非偶然产生,受到地理空间邻近、经济发展水平差异等多重因素共同影响。这一网络化特征凸显了城市土地绿色利用效率空间关联特征,说明区域间的协同合作对整体城市土地绿色利用效率提升具有重要作用。基于上述研究发现,提出以下建议:

(1) 城市土地绿色利用效率的提高不仅依赖于城市自身在土地集约规划、生态保护策略与产业绿色转型方面的内部优化,还与城市间相关要素流动、政策协同等紧密关联。因此,未来在制定土地绿色利用政策时应突破传统的“定点施策”,进一步聚焦于城市土地绿色利用效率空间关联网络特征,识别网络中位于核心地位以及充当桥梁、中介作用的城市,发挥其辐射、带动效能。并且构建跨区域合作机制,畅通技术、人才、知识等的流通渠道,从而提高城

市土地绿色利用效率的协同发展。

(2) 协同提升城市群土地绿色利用效率,不仅要优先考虑城市土地绿色利用效率空间关联网络中处于核心地位且具有明显功能定位的城市,还要加强核心城市与边缘城市间的沟通合作。三大城市群网络中核心城市虹吸效应显著,未来应通过产业协作、技术外溢等路径,推动城市土地绿色利用发展动能向外围城市有效传导,以增强网络中核心城市的溢出效应,打破马太效应,增强网络稳定性。

(3) 结合网络结构与影响因素,因地制宜制定政策。三大城市群均应重视地理邻近性、经济发展水平差异对城市土地绿色利用效率空间关联网络产生的关键正向作用。关中平原城市群网络单核虹吸现象显著,边缘城市结构扁平化,未来应进一步明确各城市定位,优化产业分工,发展城市的比较优势,为增强核心城市的溢出效应提供路径,也可减少因同质化竞争带来的土地资源错配、环境污染等问题。此外,政府可牵头建立土地绿色利用技术平台与共享机制等,进一步打破行政壁垒。中原城市群需发挥郑州市的核心引领作用,培育位于二级节点上的洛阳作为网络次中心城市,缓解中心压力。可在次中心城市建立“绿色技术中试基地”,增强与周边城市在土地绿色利用技术、人才等方面的交流,提高边缘城市的技术适配性。并且,政府在环境规制标准上禁止“一刀切”,需分领域、分步骤推进,同时加强对欠发达地区的财政支持,共同打造绿色生态屏障。山东半岛城市群需进一步强化济南、青岛双核联动,以双核为核心搭建高层次、开放式产业协同创新平台体系。通过平台推动跨城市创新链与产业链深度对接,带动其他城市更好融入网络,促进新旧动能转化(传统产业绿色升级、新兴绿色产业壮大),为土地绿色利用相关要素跨城流动提供支撑。

### 参考文献(References)

- [1] 张苗,刘璇,彭山桂,等.中国省域土地利用碳排放效率的空间关联网络演变特征与形成机制[J].中国土地科学,2023,37(10):91-101.  
Zhang Miao, Liu Xuan, Peng Shangui, et al. Evolution characteristics and formation mechanism of spatial correlation network of provincial land use carbon emission efficiency in China [J]. China Land Science, 2023, 37(10): 91-101.
- [2] 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[J].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 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2022,

- 42(4):611-621.
- [3] 卢新海,杨喜,陈泽秀.中国城市土地绿色利用效率测度及其时空演变特征[J].中国人口·资源与环境,2020,30(8):83-91.  
Lu Xinhai, Yang Xi, Chen Zexiu. Measurement and temporal-spatial evolution characteristics of urban land green use efficiency in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2020,30(8):83-91.
- [4] 杨喜.新旧动能转换背景下中国城市土地绿色利用效率时空格局及溢出效应研究[D].湖北 武汉:华中师范大学,2020.  
Yang Xi. Research on temporal-spatial pattern and spillover effects of urban land green use efficiency in China under the background of new and old kinetic energy conversion [D]. Wuhan, Hubei: Central China Normal University, 2020.
- [5] 韩球,何佟佟.黄河流域城市土地绿色利用效率测度及其时空演变[J].河南大学学报(自然科学版),2022,52(4):405-415.  
Han Lu, He Tongtong. Measurement of urban land green use efficiency and its spatiotemporal evolution in the Yellow River basin [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2022,52(4):405-415.
- [6] 彭文英,陈泽宇,孙加峰,等.京津冀土地绿色利用效率时空格局及影响因素[J].水土保持学报,2024,38(4):257-266.  
Peng Wenying, Chen Zeyu, Sun Jiafeng, et al. Spatiotemporal pattern of green land use efficiency in Beijing-Tianjin-Hebei and its influencing factors [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(4):257-266.
- [7] 孙燕,吴莉莉,张云鹏,等.“减污降碳”视角下长三角城市土地绿色利用效率的动态演进及影响因素[J].环境科学,2025,46(9):5577-5586.  
Sun Yan, Wu Lili, Zhang Yunpeng, et al. Dynamic evolution and influencing factors of urban land green use efficiency in the Yangtze River delta from the perspective of “pollution reduction and carbon reduction” [J]. Environmental Science, 2025,46(9):5577-5586.
- [8] 马明,毛理虎,刘宇戈,等.安徽省城市土地绿色利用效率时空分异及其影响因素[J].水土保持通报,2025,45(1):306-316.  
Ma Ming, Mao Lihu, Liu Yuge, et al. Spatiotemporal differentiation and influencing factors of urban land green utilization efficiency in Anhui Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(1):306-316.
- [9] 丁一,郭青霞,秦明星.黄河流域资源型城市土地绿色利用效率时空演变及影响因素[J].农业工程学报,2021,37(19):250-259.  
Ding Yi, Guo Qingxia, Qin Mingxing. Temporal-spatial evolution and influencing factors of land green use efficiency of resource-based cities in the Yellow River basin, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(19):250-259.
- [10] 左其亭,杨智楷,张伟,等.黄河流域生态保护和高质量发展研究述评与展望[J].人民黄河,2024,46(9):25-31.  
Zuo Qiting, Yang Zhikai, Zhang Wei, et al. Review and prospect of research on ecological protection and high-quality development in the Yellow River basin [J]. Yellow River, 2024,46(9):25-31.
- [11] 苗长虹.黄河流域城市群基本特征与高质量发展路径[J].人民论坛·学术前沿,2022(22):62-69.  
Miao Changhong. Essential features and high-quality development approach of urban agglomerations in the Yellow River basin [J]. Frontiers, 2022(22):62-69.
- [12] 刘学峰,丁翔宇,董会忠,等.黄河流域绿色发展效率空间关联网络及影响因素研究[J].资源开发与市场,2024,40(2):194-204.  
Liu Xuefeng, Ding Xiangyu, Dong Huizhong, et al. Research on spatial correlation network and influencing factors of green development efficiency in the Yellow River basin [J]. Resource Development & Market, 2024,40(2):194-204.
- [13] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2001,130(3):498-509.
- [14] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2002,143(1):32-41.
- [15] Xie Xue, Fang Bin, Xu Hanzeyu, et al. Study on the coordinated relationship between urban land use efficiency and ecosystem health in China [J]. Land Use Policy, 2021,102:105235.
- [16] 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[J].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 [J]. China Land Science, 2019,33(6):80-87.
- [17] 黄婧涵,蓝庆新,展金泳.“一带一路”沿线国家经济环境耦合协调水平评价研究[J].中国软科学,2023(2):202-213.  
Huang Jinghan, Lan Qingxin, Zhan Jinyong. Research on the evaluation of the coupling coordination degree between economic development and environment of countries along the belt and road [J]. China Soft Science, 2023(2):202-213.
- [18] 方大春,王琳琳.我国碳排放空间关联的网络特征及其影响因素研究[J].长江流域资源与环境,2023,32(3):

- 571-581.
- Fang Dachun, Wang Linlin. Network characteristics and influencing factors of spatial correlation of carbon emissions in China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(3):571-581.
- [19] 刘军. 整体网分析:UCINET 软件实用指南[M]. 3版. 上海:格致出版社, 2019:5-385.
- Liu Jun. Whole network approach [M]. 3rd Ed. Shanghai: Gezhi Press & Shanghai People's Publishing House, 2019:5-385.
- [20] 谭德明, 欧阳芳兰, 张彩平. 长江经济带净碳汇空间网络特征及驱动因素[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(5): 315-326.
- Tan Deming, Ouyang Fanglan, Zhang Caiping. Spatial network characteristics and driving forces of net carbon sequestration in Yangtze River economic belt [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(5): 315-326.
- [21] 刘敏, 陈银蓉, 王珏, 等. 中国土地利用碳排放效率的空间关联网及其驱动因素:基于国家重大战略区域的考察[J]. *资源科学*, 2024, 46(12):2462-2476.
- Liu Min, Chen Yinrong, Wang Jue, et al. The spatial association network and driving factors of land use carbon emission efficiency in China: An investigation in the National Major Strategic Regions [J]. *Resources Science*, 2024, 46(12):2462-2476.
- [22] 钱昭英, 刘书杰. 黄河流域农业绿色低碳生产效率空间关联网结构特征及驱动因素识别[J]. *干旱区资源与环境*, 2024, 38(2):27-38.
- Qian Zhaoying, Liu Shujie. On the characteristics and drivers of spatial correlation network of green low-carbon agricultural production efficiency in the Yellow River basin [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2024, 38(2):27-38.
- [23] 张红伟, 李佳妮, 柴季, 等. 长江经济带城市建设用地利用效率的空间关联网及协同治理路径[J]. *长江流域资源与环境*, 2025, 34(2):331-342.
- Zhang Hongwei, Li Jiani, Chai Ji, et al. Spatial networks and collaborative governance paths of urban construction land use efficiency in the Yangtze River economic belt [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2025, 34(2):331-342.
- [24] 刘传明, 马青山. 黄河流域高质量发展的空间关联网及驱动因素[J]. *经济地理*, 2020, 40(10):91-99.
- Liu Chuanming, Ma Qingshan. Spatial association network and driving factors of high quality development in the Yellow River basin [J]. *Economic Geography*, 2020, 40(10):91-99.
- [25] 高思齐, 赵媛, 郭付友. 黄河流域高质量发展空间关联网演化及机制研究:基于七大城市群的分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2025, 41(1):57-68.
- Gao Siqi, Zhao Yuan, Guo Fuyou. Structural evolution and driving mechanism of spatial correlation network of high-quality development in the Yellow River basin: An empirical analysis of the seven urban agglomerations [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2025, 41(1):57-68.
- [26] 韩冬日, 刁燕霞, 王心娟. 黄河流域减污降碳协同治理效率空间网络关联特征及驱动因素[J]. *环境科学*, 2025, 46(6):3592-3603.
- Han Dongri, Diao Yanxia, Wang Xinjuan. Correlation characteristics and driving factors of spatial network of collaborative governance efficiency of pollution reduction and carbon reduction in the Yellow River basin [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(6):3592-3603.
- [27] 陆杉, 熊娇, 李雯. 长江中游地区农业生态效率空间关联网演化及驱动因素[J]. *生态学报*, 2024, 44(8): 3199-3212.
- Lu Shan, Xiong Jiao, Li Wen. Evolution and driving factors of spatial correlation network of agricultural eco-efficiency in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(8):3199-3212.
- [28] 杨丽华, 王伟, 毛伟, 等. 中国海洋新质生产力空间关联网结构及驱动因素[J]. *经济地理*, 2025, 45(4):13-25.
- Yang Lihua, Wang Wei, Mao Wei, et al. Structure and driving factors of spatial correlation network of marine new quality productive forces in China [J]. *Economic Geography*, 2025, 45(4):13-25.
- [29] 单玉红, 程秋月, 柯新利, 等. 流空间视角下湖北省县域土地利用碳排放关联态势及其影响因素研究[J]. *中国土地科学*, 2024, 38(3):48-59.
- Shan Yuhong, Cheng Qiuyue, Ke Xinli, et al. Research on the correlation pattern and trend of land use carbon emissions and its influencing factors in counties of Hubei Province from the perspective of flow space [J]. *China Land Science*, 2024, 38(3):48-59.
- [30] 吉雪强, 张跃松. 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网结构及动因[J]. *自然资源学报*, 2023, 38(3): 675-693.
- Ji Xueqiang, Zhang Yuesong. Spatial correlation network structure and motivation of carbon emission efficiency in planting industry in the Yangtze River economic belt [J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(3):675-693.