

郑州都市圈不透水面时空动态演变特征及驱动力分析

黄晓东¹, 李方琦¹, 吴剑², 刘文锴³, 王富强⁴, 张正良², 唐磊¹, 张小丽¹

(1. 华北水利水电大学 水资源学院, 河南 郑州 450046; 2. 新疆生产建设兵团水利局, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 华北水利水电大学 测绘与地理信息学院, 河南 郑州 450046; 4. 华北水利水电大学 黄河研究院, 河南 郑州 450046)

摘要:【目的】揭示郑州都市圈不透水面时空动态演变特征及驱动机制, 为优化不透水面空间布局 and 防治洪涝灾害提供实践参考。【方法】以郑州都市圈为研究区, 基于 2000—2020 年的长时序不透水面数据, 采用不透水面动态度、标准差椭圆、象限分析等方法揭示郑州都市圈不透水面时空动态演变特征, 运用地理探测器模型探究不透水面扩张驱动机制。【结果】①郑州都市圈不透水面年均扩张速率、动态度在 2010—2015 年达最大值, 分别为 248.70 km²/年、3.00%, 整体均呈先上升、后下降的趋势; 不透水面主要在东北、西南两个方位分布广泛, 其发展重心向西北—东北方向迁移。②郑州都市圈内不透水面空间格局呈现 3 种差异化类型分布, 整体形成“一核多极”, 伴随适应地形轴向延伸的空间格局。③驱动因子分析中, 人口与 LAI、坡度、温度、NDVI、GDP 因子交互均呈现出双因子增强的结果, 其中人口与 NDVI 交互作用效果始终最为突出。【结论】郑州都市圈不透水面扩张呈现“先快后缓”的阶段特征, 空间上形成以郑州为核心的多极联动格局, 人口增长与植被退化协同驱动了扩张进程。未来应依据各地市扩张方向差异实施分区管控, 并结合人口分布优化不透水面布局, 为都市圈防洪减灾提供支撑。

关键词:不透水面; 时空演变; 驱动力分析; 郑州都市圈

中图分类号:P237; TU984

文献标识码:A

文章编号:2096-6792(2026)05-0040-11

不透水面一般指由沥青、水泥等原材料构成的人工地表覆盖, 主要类型包含道路、停车场、建筑物屋顶等, 具有低渗透、高蓄热的物理属性, 是城市化显著特征之一^[1]。以不透水面增长为代表的城市化进程背后隐藏着一系列城市安全问题, 例如城市热岛效应^[2-3]、城市内涝^[4-5]、河流水质变化^[6-7]、土地资源结构失衡^[8-9]等。改革开放以来, 我国城市化水平日益提升, 成为世界上城市化发展最为快速的国家之一^[10]。然而, 快速城市化也带来了城市生态环境、土地资源利用、城市水安全保障等方面的严峻挑战^[11-13]。

目前, 国内外学者针对不透水面信息提取及其时空演变等相关领域已开展了较为广泛的研究。其中, 城市不透水面信息提取技术经历了从人工解

译向智能化识别的重要演进历程, 代表性方法包括基于多光谱遥感数据的不透水面光谱指数提取法^[14]、适用于地物复杂场景的变端元线性光谱混合分解模型^[15]、自动化提取影像特征的深度学习^[16]等。在不透水面时空动态演变特征研究方面, 付明花^[17]基于地理国情监测数据, 运用土地利用转移矩阵和景观格局指数等方法, 系统研究了武汉市地表覆盖的时空演变规律。杨丽媛等^[18]采用景观格局分析法, 通过构建多指标协同分析框架, 揭示了深圳市不透水面扩张、异质与破碎化特征, 克服了传统单一指数研究的局限性, 为城市不透水面景观演变提供了更全面的量化视角。近年来, 关于不透水面扩张驱动机制的相关研究也逐渐增多, 但不同区域驱动因子的空间异质性及其贡献

收稿日期/Received: 2025-02-27

修回日期/Revised: 2026-07-05

基金项目:河南省自然科学基金项目(262300421761); 水灾害防御全国重点实验室开放基金项目(2025490111); 国家重点研发计划(2023YFC3006602); 国家自然科学基金项目(U2443203, U21A20109); 国家自然科学基金项目(52279014); 农业重大科技专项(NK202319020506); 河南省科技攻关项目(242102320322); 河南省高等学校重点科研项目(24A570003); 华北水利水电大学高层次人才科研启动项目(202110005); 华北水利水电大学学科建设与发展研究项目。

第一作者:黄晓东(1987—), 男, 讲师, 硕导, 博士, 从事遥感水文方面的研究。E-mail: huangxiaodong@ncwu.edu.cn。

通信作者:刘文锴(1963—), 男, 教授, 博导, 博士, 从事遥感水文方面的研究。E-mail: liuwenkai@ncwu.edu.cn。

程度仍需深入探究,相关机理尚待深入解析。如李志等^[19]采用线性最小二乘回归法对不透水面增长驱动因素进行建模,揭示了不透水面扩张的关键因素,但该线性相关检测方法难以充分揭示驱动因素的复杂作用机理。陈蕾等^[20]采用增强回归树(Boosted Regression Tree, BRT)方法,有效克服了传统线性模型的局限性,通过机器学习算法捕捉了驱动因素间的非线性关系,并且证实邻域因素对不透水面扩张表现出显著的非线性驱动特征,为理解城市不透水面空间增长机制提供了新的研究视角和分析思路。然而,现有研究多聚焦单一城市尺度,对都市圈等区域尺度不透水面的时空演变规律及多因子驱动机制的系统分析不足,制约了都市圈跨城市协同发展的生态-社会系统均衡调控。

郑州都市圈是河南省城市化程度最高、不透水面扩张最快的区域,人口激增和不透水面扩张引发的城市水安全、生态安全等问题日益凸显。为全面了解郑州都市圈不透水面的扩张历史与现状,揭示不透水面扩张的规律,探索不透水面扩张的驱动因子,开展对郑州都市圈不透水面时空动态演变特征及驱动机制的研究十分必要。因此,本研究以郑州都市圈为研究区,基于遥感(Remote Sensing, RS)和地理信息系统(Geographic Information System, GIS)

空间计量分析方法揭示 2000—2020 年不透水面的时空演变规律,采用地理探测器模型探究不透水面扩张驱动机制,以期为郑州都市圈不透水面布局优化和郑州都市圈差异化城市空间治理提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

郑州都市圈地处中原腹地、黄河之滨($111^{\circ}08'E \sim 115^{\circ}16'E$, $33^{\circ}08'N \sim 35^{\circ}50'N$), 涵盖郑州市、洛阳市、开封市、新乡市、焦作市、许昌市、平顶山市、漯河市、济源市 9 个城市(见图 1), 总面积约 5.88 万 km^2 。该区域属暖温带半湿润大陆性季风气候, 年平均气温 14.2°C , 地形自西向东呈阶梯状分布, 从太行山-伏牛山余脉过渡至黄淮海平原。截至 2023 年末, 全域总人口 4 685 万, 占全省的 47.73%; GDP 达 35 725.98 亿元, 占全省的 60.42%, 是中部地区崛起的重要增长极。在快速城市化进程中, 郑州都市圈地表覆被格局显著改变, 2000—2020 年间不透水面面积由 6 770.71 km^2 激增至 10 410.38 km^2 , 扩张幅度达 53.8%。这种剧烈的城市空间扩张已引发城市热岛效应加剧、洪涝灾害频发等一系列生态环境问题, 严重威胁区域生态安全格局。

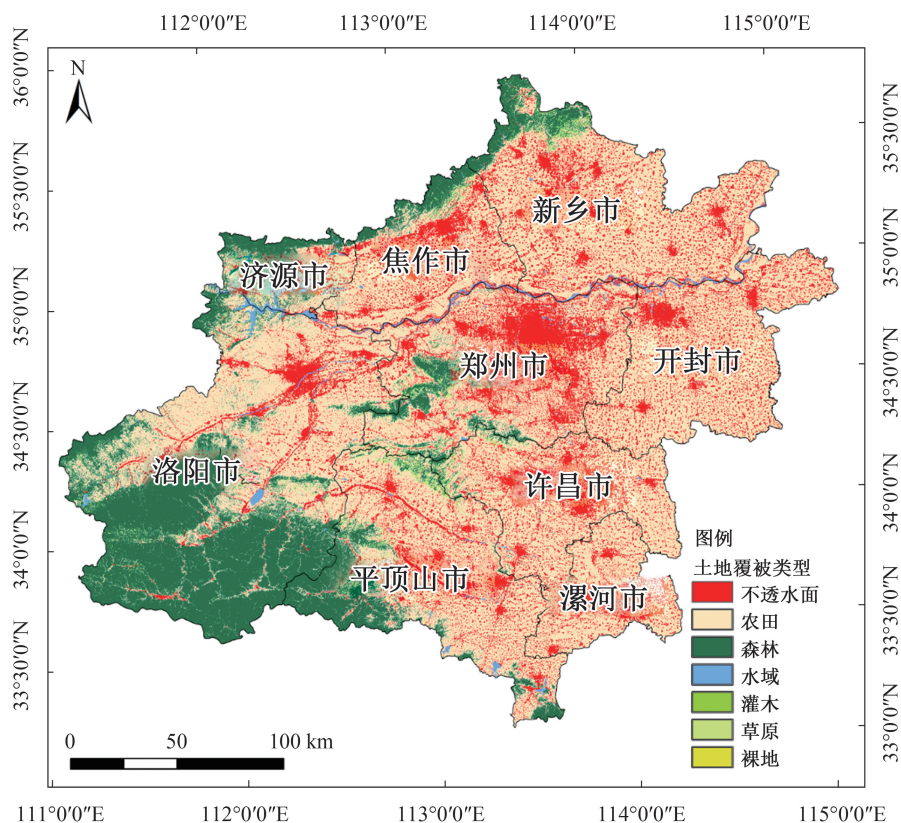


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 不透水面数据

本研究的不透水面数据采用武汉大学杨杰和黄昕教授制作的中国土地覆盖数据集(China Land Cover Dataset, CLCD),其中 CLCD-ISA 与现有的不透水面面积(Impervious Surface Area, ISA)产品表现出良好的一致性,对不透水面动态监测的总体精度达到 94.3%^[21],满足研究需求。利用 ArcGIS 软件裁剪得到郑州都市圈 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 5 期不透水面数据。

1.2.2 驱动因子数据

本研究在不透水面驱动机制分析中选取的 7 个驱动因子分别为人口、降雨量、气温、坡度、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)、GDP。数据获取来源见表 1,其中人口和 GDP 是城市化进程的直接体现,决定了土地开发需求;降雨量、气温作为关键气候因子,通过影响区域水文循环间接调控土地利用方式;坡度制约建设活动的空间分布;NDVI 和 LAI 则反映生态基底对城市扩张的阻滞效应,其动态变化常与城市化进程呈现显著的负相关关系。这 7 个因子综合覆盖了社会经济、气候、地形和生态 4 个层面,既能揭示人为主导的扩张机制,又可识别自然系统的调节作用,为不透水面的驱动分析提供多维度的研究基础。获取数据后经过重投影、重采样、裁剪等处理,将选取的 7 个驱动因子数据的空间分辨率统一为 1 km。

表 1 驱动因子数据来源

Tab. 1 Data sources of driving factors

序号	数据名称	数据来源
1	人口	http://www.resdc.cn/DOI
2	降雨量	http://www.geodata.cn
3	气温	http://www.gisrs.cn
4	坡度	https://www.gscloud.cn/
5	NDVI	https://open.geovisearth.com/
6	LAI	http://www.gis5g.com
7	GDP	http://www.resdc.cn/DOI

注:空间分辨率 1 km。

1.3 研究方法

1.3.1 不透水面增长速率及动态度

不透水面增长速率用于量化研究时段内不透水面覆盖面积的年际净增量,而动态度则表征其空间规模变化的相对速率,计算公式^[22]分别为:

$$S = (I_b - I_a) / T; \quad (1)$$

$$D = (I_b - I_a) / (I_a T) \times 100\%。 \quad (2)$$

式中: S 为不透水面增长速率; D 为不透水面动态度; I_a 、 I_b 分别为研究期初以及研究期末不透水面面积; T 为时间序列范围。

1.3.2 标准差椭圆

标准差椭圆(Standard Deviation Ellipse, SDE)作为目前空间统计模块的常规统计工具^[23],是揭示社会经济、自然等多种要素地理空间分布的空间统计方法。本研究基于郑州都市圈区位,以时序不透水面质心为椭圆中心,结合各时期不透水面面积实施动态加权,构建郑州都市圈多时相不透水面空间分布的标准差椭圆,实现郑州都市圈不透水面空间数据的可视化。

1.3.3 象限方位分析

象限方位法旨在揭示城市建设用地扩张的空间格局、扩张方向等影响因素,为城市规划、土地利用和可持续发展提供科学依据。本研究采用该方法分析 2000—2020 年郑州都市圈各市不透水面时空演进的方位差异特征。以都市圈内各市质心为空间基准点,通过构建十字轴向空间坐标系,基于方位角等分的原则形成八扇区空间^[24],将其分别与 2000—2010 年、2010—2020 年两个时间段内各市不透水面扩张范围进行空间叠合,经统计处理后形成各市不同时段不透水面扩张面积的方位扩张分布图。

1.3.4 地理探测器

地理探测器(Geographical Detector)能够探测地理要素的空间分异程度,量化揭示不同驱动要素对空间格局形成的影响权重,是一种应用于空间数据分析的统计模型^[25]。本研究基于地理探测器的因子探测与交互作用探测方法,定量解析 7 个驱动因子对郑州都市圈不透水面扩张的影响机制,揭示其空间分布的主导驱动因素。

应用地理探测器中的因子探测方法解析郑州都市圈不透水面空间分异特征,并量化不同驱动因子对其空间分异性的解释程度,解释程度的大小用 q 值来表达,具体表达式^[26]为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{k=1}^n N_k \sigma_k^2 = 1 - \text{SSW} / \text{SST}; \quad (3)$$

$$\text{SSW} = \sum_{k=1}^n N_k \sigma_k^2; \quad (4)$$

$$\text{SST} = N\sigma^2。 \quad (5)$$

式中: $k=1, 2, \dots, n$, 为驱动因子经离散化后划分的分区数; N_k 和 N 分别为第 k 分区与全区的单元数量; σ_k^2 和 σ^2 分别为第 k 分区和全区不透水面指标值的方差;SSW 为各分区内方差的加权和;SST 为

全区总方差。

应用交互作用探测甄别驱动因子间的耦合关系,研判因子交互后对因变量 Y 的解释效力升降态势^[27]。首先,计算两个驱动因子 X_k 和 X_{k+1} 分别对

Y 的 q 值,即 $q(X_k)$ 和 $q(X_{k+1})$;然后,将两个驱动因子进行交互并得到新的 q 值,即 $q(X_k \cap X_{k+1})$;最后,将 $q(X_k)$ 、 $q(X_{k+1})$ 和 $q(X_k \cap X_{k+1})$ 进行比较,比较结果分为 5 类,具体见表 2。

表 2 交互探测作用比较结果

Tab. 2 Comparison of results of interactive detection

判据	交互作用
$q(X_k \cap X_{k+1}) < \min[q(X_k), q(X_{k+1})]$	非线性减弱
$\min[q(X_k), q(X_{k+1})] < q(X_k \cap X_{k+1}) < \max[q(X_k), q(X_{k+1})]$	单因子非线性减弱
$q(X_k \cap X_{k+1}) > \max[q(X_k), q(X_{k+1})]$	双因子增强
$q(X_k \cap X_{k+1}) = q(X_k) + q(X_{k+1})$	独立
$q(X_k \cap X_{k+1}) > q(X_k) + q(X_{k+1})$	非线性增强

注: $\cap$ 表示两因子交互。

2 结果分析

2.1 郑州都市圈不透水面时空分析

2.1.1 不透水面的时序变化

通过计算扩张速率和动态度得到郑州都市圈及各市 2000—2020 年不透水面扩张变动情况,分别如图 2、图 3 所示。由图 2 可知:郑州都市圈不透水面覆盖面积呈现显著递增的态势,研究期内累计增长量达 3 639. 67 km²,增长率达 53. 76%;不透水

面年均扩张速率、动态度呈先上升后下降的趋势,在 2010—2015 年期间达到峰值。不透水面扩张趋势的变化主要源于政策调控的转变。在 2010—2015 年期间,受中原经济区战略推动,郑州都市圈建设快速推进,不透水面面积激增 1 243. 51 km²,年均扩张速率达 248. 70 km²/年,年均动态度达 3. 00%。2015 年后,城市建设规模与发展速度更加合理,不透水面扩张速度和动态度均明显放缓,郑州都市圈不透水面扩张进入稳定发展期。

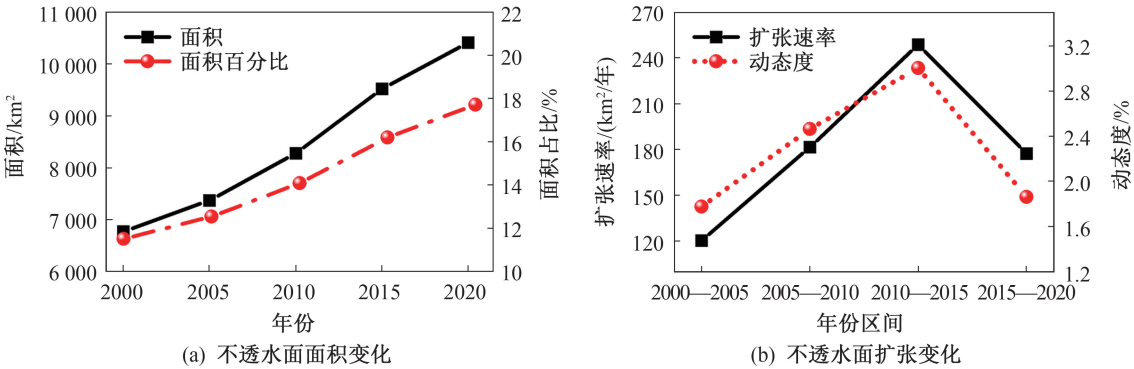


图 2 郑州都市圈整体不透水面时序变化规律

Fig. 2 Temporal variation patterns of overall impervious surface in Zhengzhou metropolitan area

由图 3 可知,郑州都市圈各市不透水面面积变化情况一致,均呈现上升趋势。郑州市不透水面面积增加最多,达 1 028. 30 km²,济源市不透水面面积增加最少,增加了 63. 18 km²。各市土地覆被类型中不透水面面积占比从大到小排序为:郑州市>焦作市>许昌市>开封市>新乡市>漯河市>平顶山市>济源市>洛阳市。其中,洛阳市的面积占比最大,造成其不透水面面积增加量排名第三,但不透水面面积占比变化却最小。

郑州都市圈各市不透水面年均扩张速率、动

态度计算结果如图 4 所示。由图 4 可知:2000—2020 年郑州市、洛阳市、许昌市、新乡市、焦作市、平顶山市、济源市的不透水面年均扩张速率、动态度在时序维度上呈现显著同步特征,均展现出初期上升,后期下降的近似阶梯式倒“U”形曲线形状;漯河市不透水面年均扩张速率、动态度均呈现下降—上升—下降的波浪形走向;开封市的年均扩张速率、动态度变化情况则具有一定差异性,但均呈现出三段式变化模式,仅在特定区间的走向上有所区别。

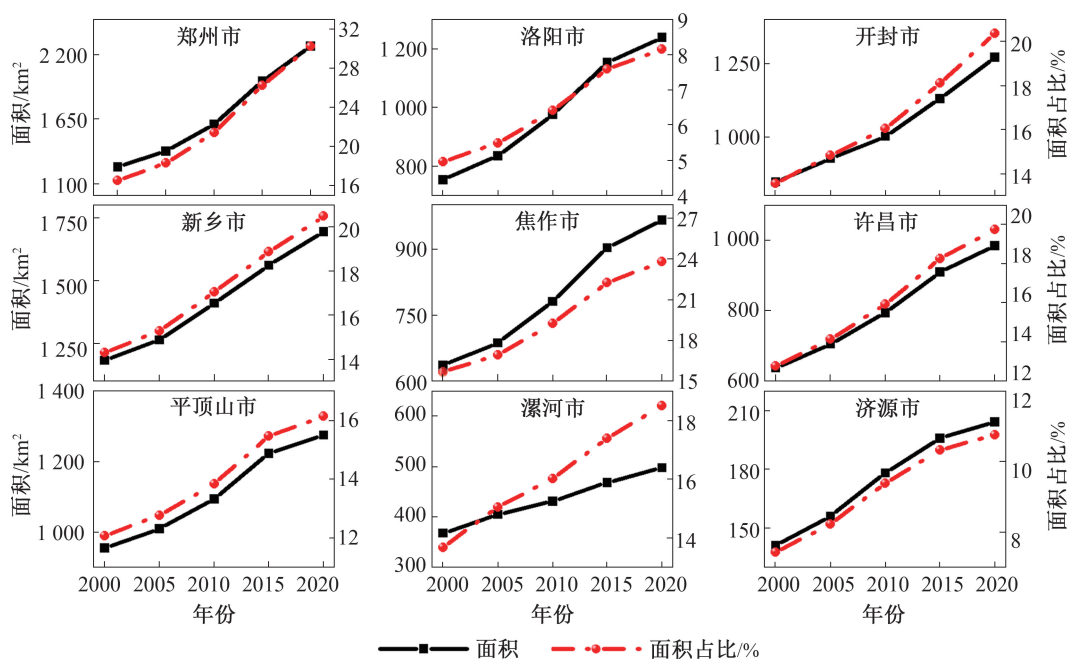


图3 郑州都市圈各市不透水面面积的时序变化

Fig. 3 Temporal variation patterns of impervious surface area in each city of Zhengzhou metropolitan area

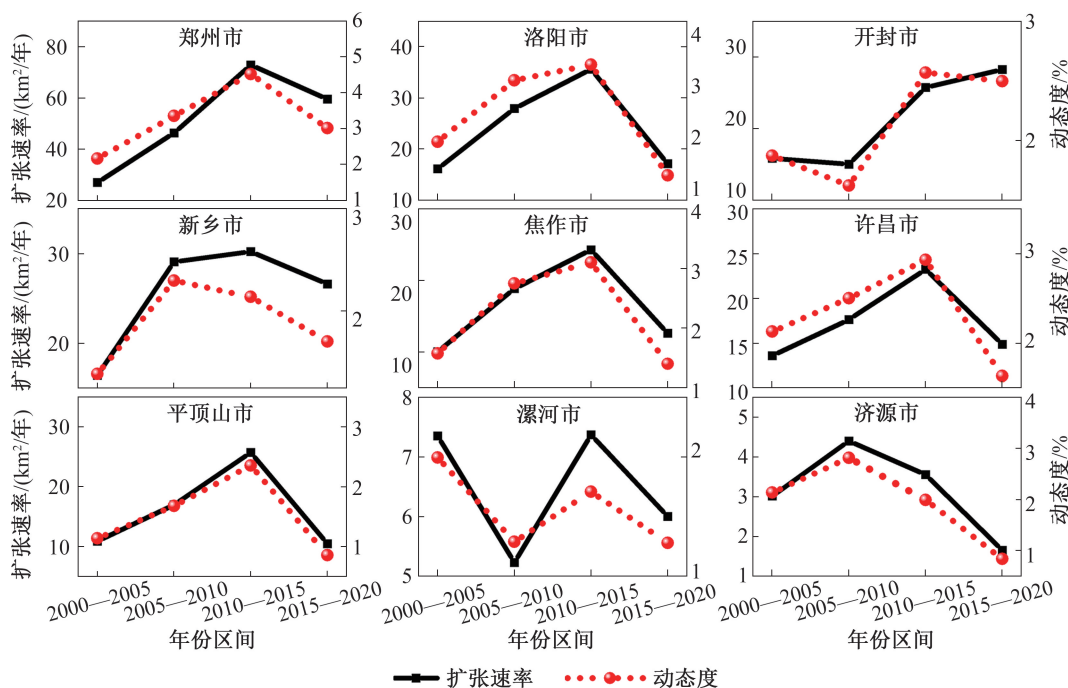


图4 郑州都市圈各市不透水面年均扩张速率、动态度变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of annual average expansion rate and dynamic degree of impervious surface in each city of Zhengzhou metropolitan area

2.1.2 不透水面空间分布特征

郑州都市圈2020年不透水面空间聚集多维可视化结果如图5所示。由图5可知,不透水面空间分布受区域分异影响,在都市圈内形成3种差异化格局。具体表现为,郑州市内主城区不透水面覆盖率达67.6%,其他区域不透水面覆盖率仅为24.29%,呈现高密度连片式核心集聚特征。作为区域副中心型城市,洛阳市不透水面格

局受地形制约形成独特的空间分布,东部陵谷川地区的不透水面分布较为集中,而西部不透水面沿西南—东北轴延伸,呈现明显的带状组团式分布。新乡、许昌、开封等节点城市不透水面形成多个局部聚集区,但规模明显小于郑州核心区不透水面空间,总体上形成了郑州都市圈“一核多极”,伴随地形适应轴向延伸的不透水面空间分布特征。

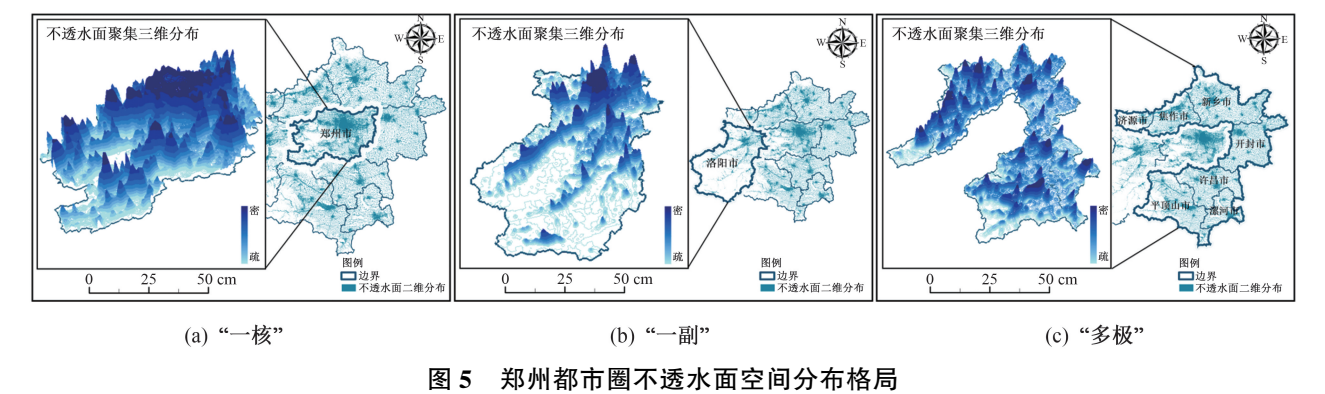


Fig. 5 Spatial distribution patterns of impervious surface in Zhengzhou metropolitan area

2.2 郑州都市圈不透水面空间扩张分析

2.2.1 郑州都市圈整体情况

2000—2020 年郑州都市圈不透水面空间分布标准差椭圆结果如图 6 所示。2000—2020 年不透水面标准差椭圆的平均中心位于郑州市范围内,并

始终在其内移动(表 3),其中 2015—2020 年平均中心迁移方向发生改变,由前 15 年的持续向西北偏移,转向东北方向移动。总体来讲,平均中心整体呈现向北偏移趋势,表明郑州都市圈不透水面空间布局整体向北扩张较为明显。

表 3 不透水面平均中心时空迁移轨迹

Tab. 3 Spatiotemporal migration trajectories of average center of impervious surface

年份	经度	纬度	偏移距离/m	偏移方向
2000	113°32′39.718″E	34°33′54.712″N	—	—
2005	113°32′35.895″E	34°33′56.986″N	117.193 9	西北
2010	113°31′53.005″E	34°34′25.191″N	1 390.161 1	西北
2015	113°31′36.247″E	34°34′36.610″N	537.404 6	西北
2020	113°32′27.716″E	34°34′57.748″N	1 446.445 2	东北

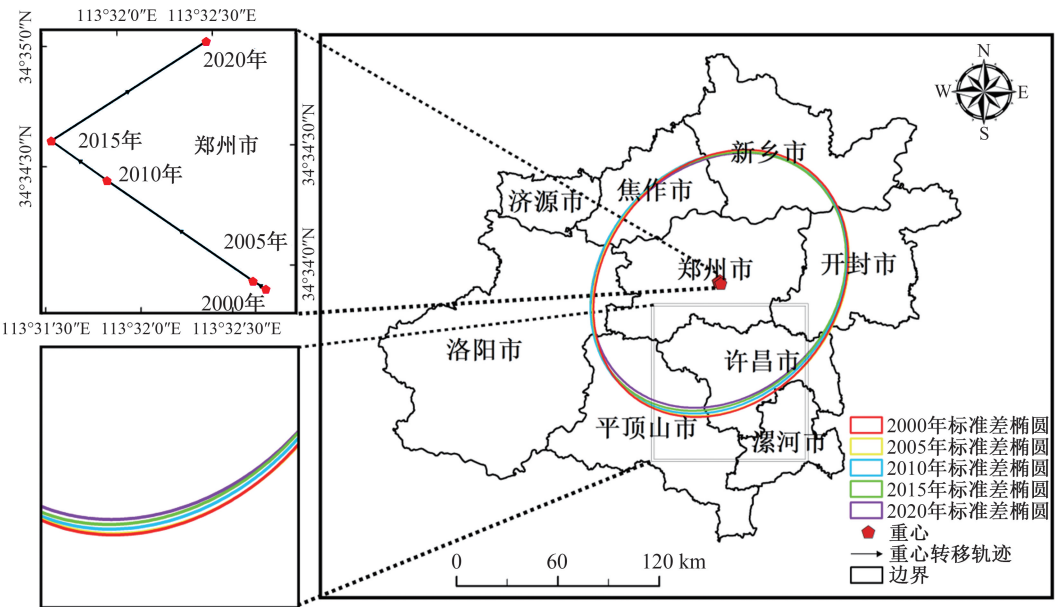


Fig. 6 Time series variation of standard deviational ellipse in Zhengzhou metropolitan area

由图 6 可知:2000—2020 年各年份标准差椭圆形状、大小、方向等各种要素趋于一致,说明近 20 年郑州都市圈不透水面空间分布的主体方向并没

有发生明显变化,其中长轴方向始终沿西南—东北向展布,表明郑州都市圈不透水面在东北、西南两个方位空间分布范围较为广泛;2005 年标准差椭

圆面积最大,表明2005年郑州都市圈不透水面空间分布数据的分散性较高,城市化建设开始探索性发展,不透水面无序扩张的可能性较大,缺乏一定的合理规划;自2005年之后,标准差椭圆面积开始持续缩减,在2020年标准差椭圆面积减至最小,表明2020年不透水面空间分布数据较为紧密均匀,说明郑州都市圈不透水面空间分布格局初步形成,

之后可能在此分布格局基础上城市扩张持续推进。

2.2.2 郑州都市圈各市情况

采用象限分析法定量研究郑州都市圈2000—2020年不透水面空间扩张规律,揭示各市扩张强度与空间分布特征,有助于识别扩张的热点区域、主要方向。郑州都市圈各市不透水面扩张的象限方位分析结果如图7所示。

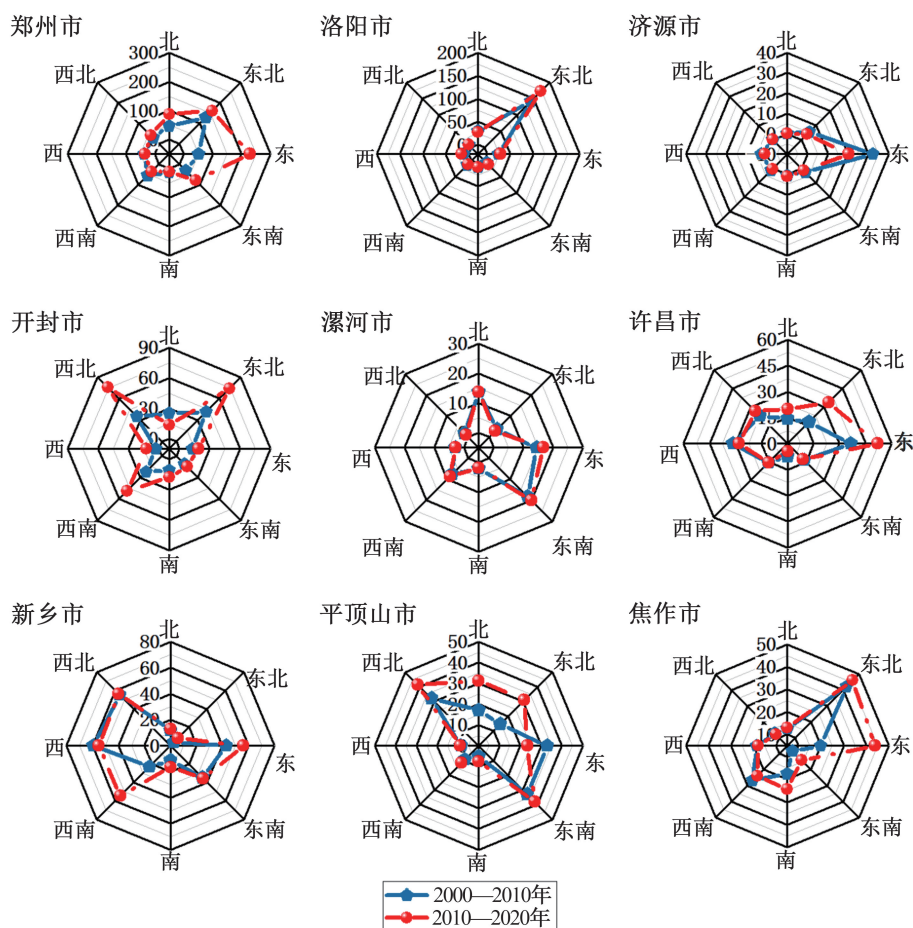


图7 郑州都市圈不透水面扩张象限分析

Fig. 7 Quadrant analysis of impervious surface expansion in Zhengzhou metropolitan area

由图7可知,各市不透水面扩张方向差异性较为显著。2000—2010年间,郑州市不透水面空间扩张以东北方向为主,而2010年后扩张热点显著东移,正东方向扩张面积显著增加,与其交通道路建设和城市开发区规划高度吻合。2000—2020年间,洛阳、济源、开封、漯河4市不透水面空间扩张因自然地理条件与城市规划管控的双重限制,其特定方位发展势能持续动力不足,主扩张方向长期趋稳。不同的是,洛阳市和济源市的不透水面主要沿单一主导方向延伸,而开封市和漯河市则表现出多向稳定扩散的特征。2000—2010年许昌市不透水面主要向正东方向扩张,2010—2020年其主要扩张方向变为正东、

东北两个方向。2000—2010年新乡市不透水面主要扩张趋势由正西、西北及正东方向逐渐向西南方向延伸。平顶山市不透水面扩张模式在2000—2010年以西北、正东与东南方向为主导,而2010年后正北、东北方向扩张强度显著增强。焦作市不透水面的空间扩张趋势显著集中于东部方向,后期形成以正东、东北两个方向为主导的空间扩张分异格局。

2.3 郑州都市圈不透水面扩张驱动力分析

基于R语言构建地理探测器模型,定量解析2000—2020年郑州都市圈不透水面空间分异性的驱动机制,驱动因子探测和交互作用探测计算结果如图8所示。

2.3.1 因子探测分析

图 8 的量化分析表明,各驱动因子解释力均值从大到小依次为:人口(0.152 8)>GDP(0.127 0)>NDVI(0.108 4)>LAI(0.087 1)>温度(0.070 5)>坡度(0.068 3)>降水(0.025 8)。时序分析表明,尽管各驱动因子的解释效力呈差异化波动,但人口、GDP、NDVI 始终构成主导因子组,其解释力均值 0.129 4 显著高于次级因子组 LAI、温度、坡度的均值 0.075 3,而降水的解释力最小仅为人口驱动因子的 16.9%。NDVI 能够有效区分植被与非植被,直接反映不透水面扩张对植被的侵占;而 LAI 仅表征冠层叶片密度且不区分植被类型,在城市环境中受少量高密度绿化干扰,使其与不透水面的关联性相对较弱,这导致 NDVI 对不透水面的解释力持续优于 LAI。

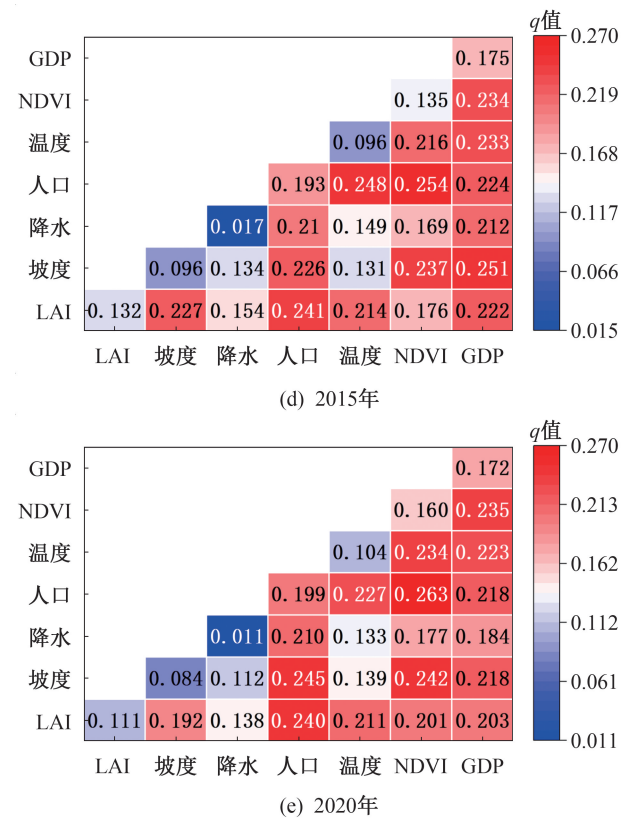
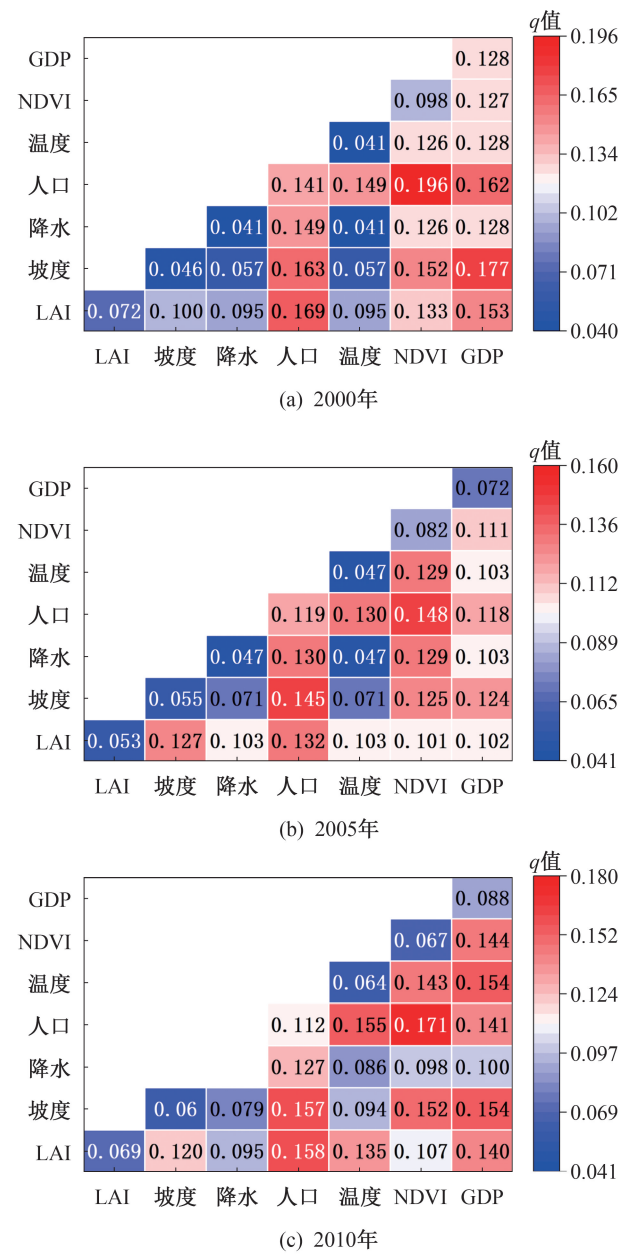


图 8 郑州都市圈不透水面扩张驱动力分析

Fig. 8 Analysis of driving force of impervious surface expansion in Zhengzhou metropolitan area

2.3.2 交互探测分析

图 8 的量化分析表明,人口与 LAI、坡度、温度、NDVI、GDP 交互作用驱动力均呈现双因子增强的结果,其中人口与 NDVI 交互作用影响效果始终最为突出,最大值达 0.263。坡度与 GDP、LAI 的交互作用主要为双因子增强,个别年份出现非线性增强结果,而坡度和 NDVI 的交互作用主要呈现非线性增强,仅 2005 年、2010 年两年为双因子增强。温度对不透水面的独立影响较弱,而温度与人口的交互作用成为关键驱动因素,其解释力不仅显著高于温度单因子,也优于温度与其他因子的任何组合,揭示了二者形成不透水面空间分异的动态正反馈机制。随着时间的推移,GDP 和 LAI 与其他因子交互作用对不透水面空间分异性解释效果明显不断增强,表明城市化过程中社会经济系统与自然生态系统不断耦合发展,传统单因子驱动模型已无法准确刻画地表覆被变化的复杂性,必须采用动态交互视角才能揭示其内在规律。

3 讨论

不透水面的时空动态变化是城市化进程中经济、社会、环境等多重因素综合作用的结果,不透水面扩张在提高城市居民生活便利性的同时也对城

市生态系统带来负面影响。因此,深入研究其时空演变规律,对于全面评估生态影响、社会效应以及制定科学优化策略具有重要价值,是推动城市可持续发展的核心基础。当前,郑州都市圈的发展亟须解决区域城市差距缩小、均衡发展推进以及城市建设与生态环境保护之间的矛盾,这些问题的有效破解是该区域实现可持续发展的关键所在。

本研究结果表明,郑州都市圈不透水面在近20年中扩展迅速,年均扩张速率、动态度呈现先上升、后下降的总体趋势,这与丁雪等^[28]研究得出的滇中城市群不透水面时序变化结果(下降-上升-下降)不同,表明城市化进程中不同城市群和都市圈不透水面具有不同的时序演变特征。同时,研究发现郑州都市圈各市不透水面扩张方向呈现出明显的差异性。其中,郑州、洛阳、济源3市的不透水面扩张方向较为单一,但郑州的扩张方向出现了显著转变,洛阳和济源的保持相对稳定。相比之下,其他城市的不透水面扩张则表现为多方位协同发展的态势。这种空间差异的形成主要受城市发展阶段、社会经济驱动力、规划政策导向以及自然地理条件等多重潜在因素的综合影响,且在不同时期的主导因素有所差异。对郑州都市圈不透水面驱动机制的研究发现,人口因素对不透水面扩张的影响最为显著,而其他因素如LAI、坡度、降水、温度、NDVI、GDP等对不透水面扩张的影响相对较弱,这一结论与Jiang Huiping等^[29]、黄璐等^[30]的研究结果一致,表明人口增长和城市化进程是推动不透水面扩张的核心驱动力。随着城市人口的增加,城市基础设施和建筑用地的需求也随之增加,导致不透水面的快速扩张。未来研究可重点关注不同城市群和都市圈不透水面扩张的时空分异特征,深入剖析其背后的自然地理约束、经济社会发展差异及规划政策导向等多维驱动机制,以期为城市不透水面空间布局优化和区域可持续发展提供科学依据。

城市土地资源的稀缺性和城市形态的功能性决定了不透水面的扩张不可避免,因此优化城市不透水面空间布局成为降低不透水面负效应的有效手段。基于本研究结果,提出以下建议:通过构建人口-空间协调模型,科学调控人口规模、优化人口结构、引导人口空间再分布,实现都市圈区域协调发展过程中人口动态与不透水面扩张的协同管控,合理预防人口高密度集聚引发的过度开发风险。同时,基于现有不透水面分布格局,科学规划各地市未来不透水面扩张重点方位及区域,优化城际设施联通,缩小核心-边缘发展落差等协同策略,构建

均衡发展体系以提升区域竞争力。

4 结论

1) 郑州都市圈不透水面面积持续呈上升趋势,由2000年的6 770.71 km²增加到2020年的10 410.38 km²,共增加3 639.67 km²,增长53.76%。不透水面整体年均扩张速率、动态度呈先上升后下降的趋势。郑州市是郑州都市圈不透水面面积扩张最多的城市,占整个都市圈不透水面扩张面积的28.25%。扩张面积最少的城市是济源市,仅占都市圈不透水面扩张面积的1.74%。

2) 郑州都市圈整体不透水面始终在东北、西南两个方位分布较为广泛,同时呈现出向北扩张的趋势。郑州都市圈各市不透水面都有不同程度的扩张现象,其中郑州市、新乡市、平顶山市、焦作市热点扩张方向存在变动,其余地区不透水面主要扩张方向基本保持稳定。郑州都市圈内呈现3种不同不透水面类型分布,但整体形成“一核多极”,伴随适应地形轴向延伸的不透水面空间格局。

3) 人口、GDP和NDVI是郑州都市圈不透水面扩张的主要驱动因子,LAI、温度和坡度作用次之,降水影响最弱,其中人口与NDVI交互作用影响效果始终最为突出。温度单因子影响较弱,但与人口的交互作用显著增强,成为郑州都市圈不透水面扩张的关键驱动因素。

参 考 文 献

- [1] 黄晓东,刘文锴,曹润祥,等.不透水面扩张对郑州主城区降水特征的影响[J].水资源保护,2022,38(6):22-30.
[Huang Xiaodong, Liu Wenkai, Cao Runxiang, et al. Effects of impervious surface expansion on precipitation characteristics in main urban area of Zhengzhou City[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 22-30.]
- [2] Xia Haiping, Chen Yunhao, Song Conghe, et al. Analysis of surface urban heat islands based on local climate zones via spatiotemporally enhanced land surface temperature[J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 273: 112972.
- [3] Gao Meiling, Li Zhenhong, Tan Zhenyu, et al. Simulating the response of the surface urban heat environment to land use and land cover changes: a case study of Wuhan, China[J]. Remote Sensing, 2021, 13: 4495.
- [4] Mustafa A, Szydlowski M, Qarani Aziz S. Optimizing impervious surface distribution and rainwater harvesting for urban flood resilience in semi-arid regions[J]. Urban Science, 2025, 9(12): 523.
- [5] Yin Zheng, Liu Gong, Zheng Zhi, et al. Sustainable Stormwater management: runoff impact of urban land layout with multi-level impervious surface coverage[J]. Sustainability, 2025, 17(8): 3511.

- [6] Zhang Xiaohong, Wu Yiyun, Gu Baojing. Urban rivers as hotspots of regional nitrogen pollution [J]. *Environmental Pollution*, 2015, 205: 139–144.
- [7] Wang Hui, Xiong Xiong, Wang Kehuan, et al. The effects of land use on water quality of alpine rivers: a case study in Qilian Mountain, China [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 875: 162696.
- [8] Zou Lilin, Liu Yansui, Wang Yongsheng. Research progress and prospect of land-use conflicts in China [J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(2): 298–309.
- [9] Gao Junbo, Zhang Xinyi, Yu Chao, et al. How to rebalance the land-use structure after large infrastructure construction? from the perspective of government attention evolution [J]. *Land*, 2023, 12(8): 1632.
- [10] Qiao Wenyi, Huang Xianjin. Assessment the urbanization sustainability and its driving factors in Chinese urban agglomerations: an urban land expansion-urban population dynamics perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 449: 141562.
- [11] 梁昌梅, 张翔, 李宗礼, 等. 武汉市城市化进程中河湖水系的时空演变特征 [J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(6): 61–68. [Liang Changmei, Zhang Xiang, Li Zongli, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of river and lake systems in the urbanization process of Wuhan City [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2019, 40(6): 61–68.]
- [12] Zhou Yuxuan, Lu Yi. Spatiotemporal evolution and determinants of urban land use efficiency under green development orientation: insights from 284 cities and eight economic zones in China, 2005–2019 [J]. *Applied Geography*, 2023, 161: 103117.
- [13] 黄晓东, 刘文锴, 胡青峰, 等. 城市不透水面景观格局对水体热缓释作用影响的尺度效应 [J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2026, 47(1): 152–160. [Huang Xiaodong, Liu Wenkai, Hu Qingfeng, et al. Urban impervious surface landscape patterns on the thermal mitigation function of water bodies and its scale effects [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2026, 47(1): 152–160.]
- [14] 曹勇, 陶于祥, 邓陆, 等. 一种抑制裸地的不透水面指数构建 [J]. *国土资源遥感*, 2020, 32(3): 71–79. [Cao Yong, Tao Yuxiang, Deng Lu, et al. An impervious surface index construction for restraining bare land [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2020, 32(3): 71–79.]
- [15] 黄晓东, 刘文锴, 韩宇平, 等. 一种基于 DELSMA 模型的城市不透水面提取方法 [J]. *测绘科学*, 2019, 44(10): 79–86. [Huang Xiaodong, Liu Wenkai, Han Yuping, et al. A method of estimating urban impervious surface based on DELSMA model [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(10): 79–86.]
- [16] 王晶, 高帅, 郭亮, 等. 基于多尺度特征融合的 U-Net 网络高分影像不透水面提取研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2022, 37(4): 811–819. [Wang Jing, Gao Shuai, Guo Liang, et al. Impervious surface extraction from high-resolution images based on multi-scale feature fusion in U-Net Network [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, 37(4): 811–819.]
- [17] 付明花. 武汉市不透水层时空格局分析及其在城市内涝成因分析中的应用 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017. [Fu Minghua. Exploring the spatio-temporal patterns of impervious layer in Wuhan and its application in the analysis of urban water-logging [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.]
- [18] 杨丽媛, 陈洋波. 1979—2020 年深圳市不透水面信息提取及其时空格局变化分析 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(5): 198–205. [Yang Liyuan, Chen Yangbo. Information extraction and analysis on temporal and spatial pattern changes of surfaces impervious to water in Shenzhen City during 1979–2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(5): 198–205.]
- [19] 李志, 李鹏, 刘强. 长江中游大城市不透水面增长模式及其驱动因素 [J]. *生态学报*, 2018, 38(11): 3766–3774. [Li Zhi, Li Peng, Liu Qiang. Study on a model of water surface growth and its driving factors in large cities along the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(11): 3766–3774.]
- [20] 陈蕾, 郭熙, 韩逸, 等. 基于 BRT 模型的南昌市城市扩张时空特征及驱动因素研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(2): 322–333. [Chen Lei, Guo Xi, Han Yi, et al. Research on spatio-temporal characteristics and driving factors of urban expansion in Nanchang City based on BRT Model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(2): 322–333.]
- [21] 杨杰. 中国 30 米年度土地覆盖数据集及其动态变化 (1985—2022 年) [DS/OL]. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (2023–11–23) [2024–11–27]. <https://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/9de270f3-b5ad-4e19-afc0-2531f3977f2f>. [Yang Jie. China's 30-meter annual land cover dataset and its dynamic changes (1985–2022) [DS/OL]. National Glacier Permafrost and Desert Science Data Center (2023–11–23) [2024–11–27]. <https://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/9de270f3-b5ad-4e19-afc0-2531f3977f2f>.]
- [22] 唐志光, 邓刚, 李少为, 等. 基于 Google Earth Engine 的湖南省近 30 年不透水面时空变化研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 2020, 36(2): 41–46. [Tang Zhiguang, Deng Gang, Li Shaowei, et al. Study on the spatiotemporal variation of impervious surface in Hunan Province for nearly 30 years based on google earth engine [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2020, 36(2): 41–46.]
- [23] Lefever D W. Measuring geographic concentration by means of the standard deviational ellipse [J]. *American Journal of Sociology*, 1926, 32(1): 88–94.
- [24] 肖琳, 田光进. 天津城市扩张空间模式与驱动机制研究 [J]. *资源科学*, 2014, 36(7): 1327–1335. [Xiao Lin, Tian Guangjin. Study on spatial modes and driving mechanisms of Tianjin's urban expansion [J]. *Resources Science*, 2014, 36(7): 1327–1335.]
- [25] Wang Jinfeng, Zhang Tonglin, Fu Bojie. A measure of spatial stratified heterogeneity [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 250–256.
- [26] 祁鹏卫, 张贤. 2000—2019 年重庆市植被覆盖时空变化特征及其驱动因素 [J]. *生态学报*, 2022, 42(13): 5427–5436. [Qi Pengwei, Zhang Xian. Spatiotemporal variation

- characteristics and driving factors of vegetation cover in Chongqing from 2000 to 2019[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(13): 5427–5436.]
- [27] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116–134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116–134.]
- [28] 丁雪,邵馨,邓瑞芳,等. 2000—2020年滇中城市群不透水面时空动态演变及驱动力分析[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(4): 364–373. [Ding Xue, Shao Xin, Deng Ruifang, et al. Spatiotemporal Dvamics and driving forces of impervious surlaces in the central Yunnan urban agglomeration from 2000 to 2020[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(4): 364–373.]
- [29] Jiang Huiping, Guo Huadong, Sun Zhongchang, et al. Urban-rural disparities of carbon storage dynamics in China's human settlements driven by population and economic growth [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 871: 162092.
- [30] 黄璐,谷达华,刘勇. 重庆市中心城区不透水面扩张及驱动力分析[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(11): 155–165. [Huang Lu, Gu Dahua, Liu Yong. Spatio-temporal evolution of impervious surface and the driving factors in the central urban area of Chongqing[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2023, 45(11): 155–165.]

Spatiotemporal Dynamic Evolution Characteristics and Driving Force Analysis of Impervious Surfaces in Zhengzhou Metropolitan Area

HUANG Xiaodong¹, LI Fangqi¹, WU Jian², LIU Wenkai³, WANG Fuqiang⁴,
ZHANG Zhengliang², TANG Lei¹, ZHANG Xiaoli¹

(1. School of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;
2. Water Conservancy Bureau of Xinjiang Production and Construction Corps, Urumqi 830002, China;
3. College of Surveying and Geo-informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 4. Yellow River Institute of Science, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: **【Objective】** Revealing the spatiotemporal dynamic evolution characteristics and driving mechanisms of impervious surfaces in the Zhengzhou metropolitan area provides practical reference for the optimization of impervious surface spatial layout and the prevention and control of urban flood disasters. **【Methods】** Taking the Zhengzhou metropolitan area as the study area, based on the long-term impervious surface data from 2000 to 2020, methods such as the dynamic degree of impervious surfaces, standard deviational ellipse, and quadrant analysis were adopted to reveal the spatiotemporal dynamic evolution characteristics of impervious surfaces in the Zhengzhou metropolitan area. The geographical detector model was used to explore the driving mechanisms of the expansion of impervious surfaces. **【Results】** (1) The average annual expansion rate and dynamic degree of the impervious surface in the Zhengzhou metropolitan area reached their maximum values of 248.70 km²/a and 3.00%, respectively, during 2010–2015. Overall, both showed a trend of first increasing and then decreasing. The impervious surface was mainly distributed extensively in the northeast and southwest directions, and its development center of gravity migrated towards the northwest-northeast direction. (2) The spatial patterns of impervious surfaces in the Zhengzhou metropolitan area had three differentiated types of distribution, collectively forming a monocentric-multipolar system with topography-guided axial extension. (3) Driving factor analysis revealed that the interaction of population with LAI, slope, temperature, NDVI, and GDP consistently demonstrated bivariate interaction enhancement, with the interaction between population and NDVI exhibiting the most pronounced influence. **【Conclusions】** Impervious surface expansion in the Zhengzhou metropolitan area shows a phased pattern of rapid growth followed by slower growth. Spatially, a multipolar coordinated pattern centered on Zhengzhou has formed, and population growth and vegetation degradation jointly drive the expansion process. In the future, zonal management should be implemented based on differences in expansion directions among cities, and impervious surface layout should be optimized by considering population distribution, thereby providing support for flood prevention and disaster reduction in the metropolitan area.

Keywords: impervious surface; spatiotemporal evolution; driving force analysis; Zhengzhou metropolitan area

(编辑:乔翠平)