贵阳市碳排放时空差异及其影响因素

胡剑波，熊周林，郭 玮
（贵州财经大学 经济学院，贵州 贵阳 550025）

摘 要：［目的］探究典型喀斯特山地城市贵州省贵阳市碳排放的时空演变规律及其影响因素，为区域低碳发展与国土空间优化提供科学依据。［方法］基于2000，2010和2023年3期土地利用数据、县域碳排放数据及社会经济数据，在分析贵阳市碳排放时空格局的基础上，综合运用社会网络分析、Tapio脱钩模型及LMDI因素分解模型，研究其网络结构特征、脱钩演化轨迹及其影响因素贡献强度。［结果］①2000—2023年贵阳市碳排放总量持续增长但增速放缓，年均增长率为2.60%；碳排放空间关联网络呈现先集聚后优化调整的演变特征，网络结构从少数节点集中控制向多节点协同均衡转型。②研究期内，贵阳市经济增长与碳排放整体呈弱脱钩状态，但区县差异显著。花溪区、开阳县和息烽县等地2010—2023年脱钩弹性指数为－0.06，－0.09和－0.03，呈强脱钩状态，而乌当区、白云区在2000—2023年脱钩弹性指数分别为0.91和0.80，呈扩张连接状态。③LMDI分解表明，人口规模是碳排放增长的首要驱动因素，单位GDP土地占用面积是关键的抑制因素，两者的累计贡献率分别为59.74%和－20.25%。［结论］未来应依据碳源、碳汇空间分异格局探索横向生态补偿，并针对不同区县的脱钩阶段与产业基础制定差异化低碳政策，以协调山地城市人口集聚、土地利用与低碳发展之间的矛盾。

关键词：碳排放；时空差异；影响因素；贵阳市
文献标识码：A **文章编号：**1000-288X（2026）05-0281-09 **中图分类号：**F301.24，X24

文献参数：胡剑波，熊周林，郭玮.贵阳市碳排放时空差异及其影响因素[J].水土保持通报，2026，46（5）：281-289. Hu Jianbo，Xiong Zhoulin，Guo Wei. Spatiotemporal differences and influencing factors of carbon emissions in Guiyang City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2026，46（5）：281-289.
DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.018 **CSTR：32312.14.stbctb.2026.05.018**

Spatiotemporal differences and influencing factors of carbon emissions in Guiyang City

Hu Jianbo，Xiong Zhoulin，Guo Wei
（*School of Economics*，*Guizhou University of Finance and Economics*，*Guiyang*，*Guizhou* 550025，*China*）

Abstract：［Objective］The spatiotemporal evolution patterns and influencing factors of carbon emissions in Guiyang City，Guizhou Province，a typical karst mountain city，were examined in order to provide a scientific basis for regional low-carbon development and territorial spatial optimization.［Methods］Based on land use data from 2000，2010，and 2023，county-level carbon emission data，and socioeconomic data，this study analyzed the spatiotemporal patterns of carbon emissions in Guiyang City. On this basis，social network analysis，the Tapio decoupling model，and LMDI decomposition model were used to examine the network structure characteristics，the evolution of decoupling dynamics，and the contributions of different influencing factors.［Results］① From 2000 to 2023，the total carbon emissions in Guiyang City increased continuously，though at a slowing pace，with an annual average growth rate of 2.60%. The spatial correlation network of carbon emissions evolved from an initial agglomeration pattern toward a more optimized and adjusted structure，and the network structure shifted from dominance by a few central nodes to a multi-node coordinated and balanced configuration. ② During the study period，economic growth and carbon emissions in Guiyang City exhibited an overall weak decoupling state，

收稿日期：2026-01-22 **修回日期：**2026-04-24 **采用日期：**2026-04-30
资助项目：贵州省哲学社会科学规划重大课题“贵州绿色低碳城市更新效率测度及提升策略研究”（25GZZB09）
第一作者：胡剑波（1982—），男（汉族），四川省泸州市人，博士，教授，博士生导师，主要从事低碳经济与绿色发展等方面的研究。Email：hjbbo@126.com。
通信作者：熊周林（1999—），男（侗族），贵州省铜仁市人，硕士研究生，研究方向为低碳经济与绿色发展。Email：xzljy995@163.com。

accompanied by marked heterogeneity across districts and counties. Specifically, Huaxi District, Kaiyang County and Xifeng County achieved strong decoupling between 2010 and 2023, with decoupling elasticity indices of −0.06, −0.09, and −0.03, respectively. In contrast, Wudang District and Baiyun District remained in an expansive coupling state from 2000 to 2023, with elasticity indices of 0.91 and 0.80. ③ The LMDI decomposition results indicated that population size was the primary driving factor of carbon emission growth, whereas land area per unit of GDP served as a major restraining factor, with cumulative contribution rates of 59.74% and −20.25%, respectively. [Conclusion] In the future, horizontal ecological compensation should be explored based on the spatial differentiation patterns of carbon sources and sinks. In addition, differentiated low-carbon policies should be formulated according to the decoupling stage and industrial base of each district and county, so as to better reconcile the contradictions among population agglomeration, land use and low-carbon development in mountainous cities.

Keywords: carbon emissions; spatiotemporal differences; influencing factors; Guiyang City

随着全球气候变化问题日益严峻,推动经济社会绿色低碳转型已成为国际共识。城市作为人类活动与能源消耗的核心空间载体,其碳排放过程深刻影响着区域碳循环[1-2]。在快速城镇化进程中,建设用地增长进一步加剧了能源消耗,城市成为碳排放的关键场域[3]。然而,不同自然地理条件下,城市碳排放特征、演化路径存在显著差异。山地城市受地形环境、建设用地稀缺等条件制约[4],其碳排放集聚特征、空间关联与演化规律与平原城市存在显著差异[5-6],低碳转型路径更具特殊性与挑战性[7]。因此,系统揭示山地城市碳排放的时空演变规律及其影响因素,不仅是推动区域可持续发展的科学前提,更是实现"双碳"目标的关键举措。

近年来,碳排放的测度、时空格局演化及影响因素解析已成为学术界持续关注的议题。现有研究成果主要涵盖以下两个方面:①碳排放测度与时空格局演化方面,研究尺度已从全球[8]、国家[9]逐步细化至省域[10-11]、城市群[12]及县域[13],形成了IPCC清单法等成熟核算体系,能够有效测算耕地利用、建设用地能源消耗及工业生产过程等多种碳源。大量研究[8,10,12]从省域、城市群等尺度证实碳排放总体呈增长态势且具有显著的空间异质性与集聚特征,其演变路径因区域发展阶段、资源禀赋与土地利用结构而异。②碳排放影响因素解析方面,现有研究多采用LMDI分解模型,证实经济增长、城镇化、能源结构等是碳排放核心影响因子[10-13],通过STIRPAT模型、GWR等方法揭示了人口规模、产业结构与土地利用方式转变等因素通过直接或间接路径作用于碳排放过程[14]。此外,部分学者运用Tapio脱钩模型和引力模型探讨了不同发展阶段脱钩状态的演变特征[15]和区域碳排放的空间关联强度[16]。综上所述,现有研究为科学核算区域碳排放并识别其影响因素提供了方法支撑,但成果多集中于省域等宏观尺度和空间连通性较强的地区,针对喀斯特山地城市县域尺度的碳排放空间网络关联特征及影响因素尚缺乏深入探讨。

贵州省贵阳市是典型的喀斯特山地城市,受复杂地形、稀缺建设用地与脆弱生态共同约束,同时处于快速城镇化进程中。在此背景下,其碳排放空间关联网络呈现何种特征?经济增长与碳排放脱钩状态存在何种差异?碳排放的影响因素又体现出怎样的山地城市独特性?鉴于此,本文以贵阳市为研究区域,分析其2000—2023年的碳排放时空演变格局,综合运用社会网络分析、Tapio脱钩模型和LMDI因素分解模型探究其碳排放空间关联特征、经济与碳排放脱钩状态以及影响因素贡献强度,以期为同类山地城市优化国土空间格局,制定差异化低碳政策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵阳市位于长江上游的云贵高原黔中山原丘陵中部,地理位置介于东经106°07′—107°17′,北纬26°11′—27°22′,辖6个区,3个县,代管1个县级市。截至2023年末,该市总面积占贵州省的4.56%,常住人口达640.29万人,地区生产总值为2 368.52亿元[17]。地形地貌上,贵阳市以山地和丘陵为主,喀斯特地貌广泛分布,地势起伏较大,可开发土地资源相对有限,城镇建设与土地开发面临地形制约。贵阳市森林覆盖率达55.38%,城市空间与山川、森林、湿地交织,形成城中有山、山中有城的典型山地城市景观。

1.2 数据来源

为从长期视角揭示贵阳市碳排放时空差异特征,本文选取2000,2010和2023年3个关键年份进行分析,分别对应贵阳市工业化与城市化起步期、工业化中期及当前高质量发展阶段。使用数据主要包括碳排放、土地利用及社会经济数据。其中,碳排放数据来自欧盟委员会全球大气研究排放数据库

EDGAR(https://edgar.jrc.ec.europa.eu/),该数据库具有统一核算口径和较好的时序一致性与区域可比性[18],本文提取贵阳市县域单元的碳排放数据。土地利用数据采用武汉大学制作的30 m×30 m空间分辨率CLCD数据集,经重分类处理得到耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地等6类土地利用类型的面积数据[19]。社会经济数据来源于《贵州统计年鉴》《中国县域统计年鉴》以及各区县国民经济和社会发展统计公报,相关经济数据以2000年为基期进行平减处理。

1.3　研究方法

1.3.1　碳吸收测算

参考栾永飞等[20]的研究,确定林地、草地、水域及未利用地为碳汇,碳吸收系数分别为0.644,0.021,0.253和0.005,碳吸收量计算公式[21]为

$$C=\sum S_i \phi_i \tag{1}$$

式中:C表示林地、草地、水域及未利用地的碳吸收总量(10^4 t);i表示林地、草地、水域及未利用地;S_i表示第i类土地的面积(hm^2);ϕ_i表示第i类土地的碳吸收系数(t/hm^2)。

1.3.2　碳排放社会网络分析

(1)碳排放空间关联度测算。为直观地刻画贵阳市各县域碳排放的空间关联情况,参考许玲燕等[22]研究测算各县域碳排放的关联强度,计算公式为

$$R_{ij}=k_{ij}\frac{\sqrt[3]{G_iC_iP_i}\times\sqrt[3]{G_jC_jP_j}}{\left[d_{ij}/(e_i-e_j)\right]^2}\qquad\left(k_{ij}=\frac{C_i}{C_i+C_j}\right) \tag{2}$$

式中:R_{ij},d_{ij}表示i与j县间的碳排放关联引力值和地理距离;G_i,G_j表示两县的GDP(万元);C_i,C_j表示两县的净碳排放量(10^4 t);P_i,P_j表示两县的人口数量(万人);e_i,e_j表示两县的人均GDP(万元/人);k_{ij}为调节因子,表征i县对j县净碳排放关联的贡献率(%)。基于公式(2)的计算结果,取矩阵每行的引力强度平均值作为阈值标准,将大于或等于均值的引力关系赋值为1,反之赋值为0,构建碳排放空间关联的0~1矩阵[23]。

(2)网络结构特征指标选取。参考已有的研究,本文采用网络关系数等5个指标反映贵阳市碳排放整体网络结构特征[24]。其中,网络关系数刻画各区县间的实际连接规模;网络密度反映各区县碳排放联系的空间紧密程度;平均最短路径表征碳排放流动或影响在网络中的平均传递距离与效率;网络紧凑度从效率维度评估各区县网络结构的优化程度;网络传递性反映相邻区县碳排放联系的局部群聚特征。同时,采用点度中心度等3个指标反映贵阳市碳排放个体网络结构特征[25]。点度中心度量度各区县的直接连接数量,反映其即时影响力;接近中心度表征某区县与网络中其他区县的平均距离,反映其不受其他节点控制,快速获取或传递碳排放信息的能力;中介中心度表征各区县作为"桥梁"控制资源流动的能力,用于识别网络中各区县碳排放控制能力。计算公式参考谭德明等[24]、周汝波等[25]研究。

1.3.3　Tapio脱钩模型

为分析贵阳市碳排放与经济发展的动态关系,本文借鉴Tapio[26]提出的脱钩模型,定量评估贵阳市净碳排放与经济发展的协调关系。根据净碳排放变化量(CP)和GDP变化量(GP)的正负与脱钩指数大小判断脱钩状态,计算公式[14]为

$$\varphi=\frac{\mathrm{CP}}{\mathrm{GP}}=\frac{(C_{k+1}-C_k)/C_k}{(G_{k+1}-G_k)/G_k} \tag{3}$$

式中:φ表示脱钩指数;C_k,G_k分别表示当期净碳排放量(10^4 t)和GDP(万元);C_{k+1},G_{k+1}分别表示后一期净碳排放量(10^4 t)和GDP(万元)。

1.3.4　LMDI模型

碳排放影响因素涉及诸多方面,现有研究普遍从人口、经济、能源和环境等多重视角切入以揭示其作用机理[27]。本文结合Kaya恒等式与LMDI模型分析贵阳市碳排放的影响因素,借鉴相关研究,从单位土地碳排放强度、经济发展水平、单位GDP用地面积及人口规模4个因素构建LMDI因素分解模型[10]:

$$\begin{aligned}C'&=\frac{C'}{S}\times\frac{\mathrm{GDP}}{P}\times\frac{S}{\mathrm{GDP}}\times P\\&=C'_c\times C'_g\times C'_s\times C'_p\end{aligned} \tag{4}$$

$$\Delta C'=C'_t-C'_0=\sum_{i=c}^{p}\frac{C'^i_tC^i_0}{\ln C'^i_t-\ln C'^i_0}\ln\frac{C'^i_t}{C'^i_0}\qquad(i=c,g,s,p) \tag{5}$$

$$\rho=\frac{\Delta C'_x}{\sum|\Delta C'_x|}\times 100\% \tag{6}$$

式中:C'表示净碳排放量(10^4 t);S表示贵阳市土地总面积(10^4 km^2);GDP表示地区生产总值(万元);P表示年末人口数(万人);C'_c为单位土地碳排放强度(t/km^2);C'_g为经济发展水平(元/人);C'_s为单位GDP用地面积(km^2/元);C'_p为人口规模(万人);$\Delta C'$表示贵阳市碳排放总效应(10^4 t);ρ为相对贡献度,$\rho>0$表示该影响因素为正向效应,反之为负向效应;x为各影响因素。

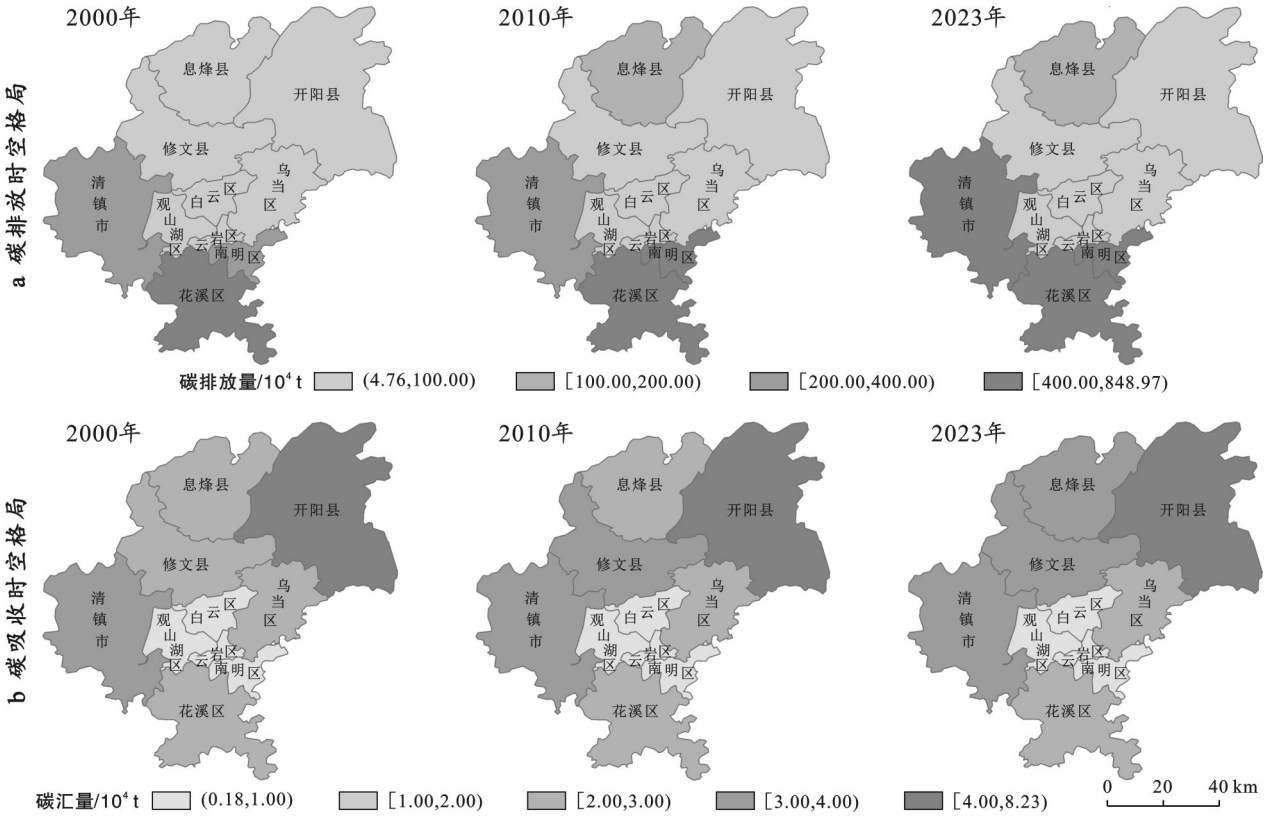
2　结果与分析

2.1　贵阳市碳排放特征

贵阳市2000—2023年碳排放量由1.28×10^7 t增

至2.25×10⁷t,年均增长率为2.60%,同期GDP由264.81亿元增至2 368.52亿元,年均增长率为9.79%,贵阳市经济增速显著高于碳排放增速,经济发展对碳排放的依赖程度呈现相对下降趋势。从产业结构看,尽管第二产业的占比从50.90%降至35.00%,但其份额依然较大且能源密集度高,仍是主要的碳排放来源[20]。贵阳市碳排放的空间分布具有显著的异质性(图1a)。南明区、清镇市和花溪区是碳排放的主要集聚区,研究期内碳排放增幅分别为178.11%,45.02%和38.49%。息烽县、修文县和开阳县等区域的碳排放总量较低,但增长趋势明显。

开阳县碳汇能力最为突出(图1b),其碳汇量3个时间点分别为7.49×10⁴ t,7.24×10⁴ t和8.23×10⁴ t。2000—2023年增长9.88%,2010—2023年增长13.75%,表明其碳汇能力在长期领先的基础上近阶段得到进一步强化。修文县、息烽县和花溪区等地碳汇能力也呈持续增强趋势,2000—2023年碳汇增加值分别为5 000,5 000和5 300 t,增长率分别为17.08%,18.24%和23.92%。从碳汇阶段性演变模式看,主要存在"先弱化后增强"与"持续增强"两类典型路径,开阳县在2000—2010年碳汇量微降3.39%,2010—2023年显著回升(增长率13.75%),最终实现整体增强;花溪区、修文县等地在两阶段均呈现持续增强态势。相比之下,云岩区、南明区、白云区和观山湖区等区域,碳汇量基数较小且涨幅有限。



注:基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2024)6567号的标准地图制作。底图无修改。下同。

图1 贵阳市碳排放和碳吸收空间分布

Fig.1 Spatial distribution of carbon emissions and carbon uptake in Guiyang City

2.2 贵阳市碳排放空间关联网络结构特征分析

2.2.1 整体网络特征分析

各县域间碳排放空间关联强度空间可视化如图2所示。由图2可以看出,2000—2023年贵阳市碳排放的空间关联格局变化显著,清镇市与观山湖区的网络地位演变对比鲜明。清镇市与其余县域的关联强度呈横向减弱趋势,观山湖区则相反,关联性显著增强。南明区、云岩区和花溪区在整个研究期内始终表现出较强的辐射与枢纽作用,南明区-云岩区、南明区-花溪区、云岩区-花溪区在3个时期均保持较高的联系强度。

贵阳市各区县碳排放空间关联网络整体特征指标如表1所示,其碳排放空间网络呈现"先增强,后减弱"的态势。2000—2010年网络关系数由38.00增至48.00条,网络密度由0.42提升至0.53,网络紧凑度由0.71提升至0.77,平均最短路径缩短至1.47,网络传

递性上升至0.55,上述指标共同表明,该阶段网络联系日益紧密、结构趋于整合、信息传递效率提升。2010—2023年网络关系数回落至40.00条,网络密度、紧凑度及传递性均出现下降,平均最短路径回升至1.56,这一变化反映出网络整体联系强度与协作效率有所减弱,局部子群结构可能趋于松散。

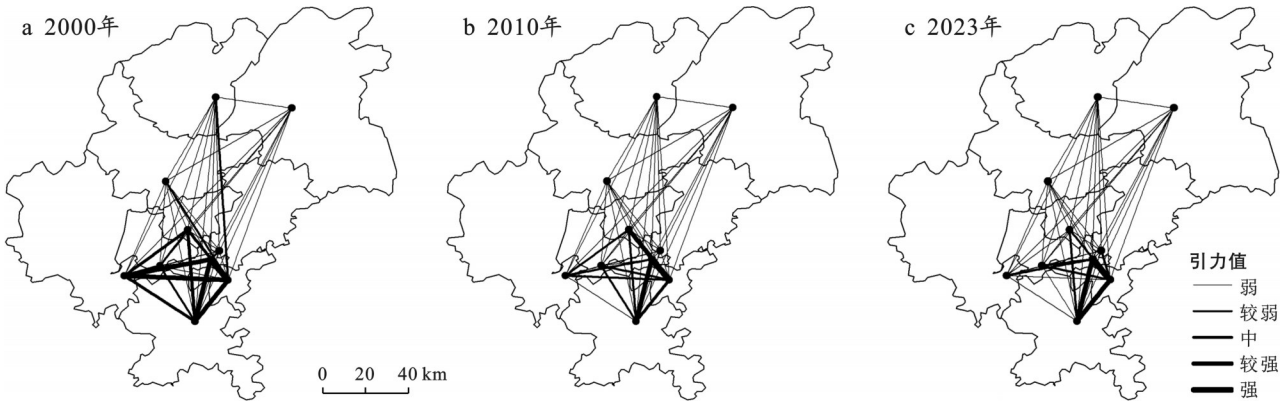


图2　贵阳市碳排放空间关联网络结构

Fig.2　Structure of spatial correlation network of carbon emissions in Guiyang City

表1　贵阳市碳排放空间关联网络整体特征指标

Table 1　Overall characteristic indicators of spatial correlation network of carbon emissions in Guiyang City

年份	网络关系数	网络密度	网络紧凑度	平均最短路径	网络传递性
2000	38.00	0.42	0.71	1.60	0.46
2010	48.00	0.53	0.77	1.47	0.55
2023	40.00	0.44	0.72	1.56	0.45

2.2.2　个体网络特征分析

根据个体网络结构特征指标(表2),2000—2023年贵阳市碳排放空间网络呈现阶段性演化特征。①点度中心度均值由2000年的3.80升至2010年的4.80,后于2023年略降至4.00,表明区域间直接联系强度先增强后趋于稳定并略有收缩。2000年南明区和花溪区表现出较强的直接联系能力,而乌当区、息烽县等地则相对有限;至2010年,城市化推动下的产业扩展与空间整合促使南明区、白云区等地的节点连接显著增加,区域间互动整体增强;进入2023年,网络联系趋于稳定并伴随一定程度的收缩。②接近中心度均值在2000年、2010年和2023年分别为14.40,13.20和14.00,其先降后升的变化表明网络整体可达性先改善后略有下降。2000年花溪区和南明区的接近中心度较低,表明其在网络中的可达性较强,而乌当区、观山湖区等地可达性则较弱。至2010年,均值下降至13.20,显示区域之间的平均路径缩短,整体结构趋于紧凑;2023年均值回升至14.00,说明部分区域间路径距离有所增加,网络紧密程度略有下降。③中介中心度均值由2000年的2.70下降至2010年的2.07,后于2023年回升至2.50,体现了南明区、云岩区、花溪区等地对网络路径控制力的阶段性变化。2000年南明区和花溪区承担了较高的中介桥梁作用,网络对关键节点依赖性强;2010年,均值下降表明网络对南明区等中介节点的依赖略有减弱,但结构依旧集中;至2023年,随着功能区调整与产业链重组,南明区等部分区域在跨区域联系中的中介位置再度增强,网络呈现出局部结构重新集中化的趋势。

2.3　Tapio脱钩模型

2000—2023年贵阳市碳排放与经济增长整体呈弱脱钩状态(表3)。在经济持续增长的背景下,碳排放量虽保持上升,但其增长速度显著低于经济增速,表明贵阳市在推动经济发展的同时,能源利用效率与低碳转型水平得到同步提升。从阶段演变特征看,2000—2010年南明区、乌当区、开阳县和息烽县的脱钩弹性指数均超过0.80,反映出该阶段经济增长仍较大程度依赖于能源密集型产业,对碳排放的拉动作用较强,减排成效相对有限。2010—2023年花溪区、开阳县、息烽县转为强脱钩状态,体现了城市经济增长逐步向低碳化、高质量方向演进,在节能减排、生态治理及绿色转型方面取得突出成效。相比之下,乌当区、白云区在整个研究期内表现为扩张连接状态,说明其整体产业结构偏重、能源消耗强度较高,是未来低碳转型的重点区域。而南明区、云岩区、观山湖区和修文县整体处于弱脱钩状态,表明其经济增长与碳排放呈相对协调关系。总体而言,贵阳市各地区在经济发展阶段、产业结构和城市化水平上的差异,直接影响碳排放的形成机制与增长速率,进而导致碳排放与经济增长脱钩状态及其空间分布存在显著差异性。

表2 贵阳市碳排放空间关联网络个体结构特征指标

Table 2 Individual structural characteristic indicators of spatial correlation network of carbon emissions in Guiyang City

指标	年份	开阳县	花溪区	清镇市	南明区	云岩区	观山湖区	乌当区	白云区	修文县	息烽县	均值
点度中心度	2000	3.00	8.00	4.00	8.00	4.00	2.00	2.00	3.00	2.00	2.00	3.80
	2010	3.00	7.00	3.00	9.00	3.00	4.00	4.00	9.00	3.00	3.00	4.80
	2023	3.00	5.00	3.00	9.00	5.00	3.00	2.00	5.00	3.00	2.00	4.00
接近中心度	2000	15.00	10.00	14.00	10.00	14.00	17.00	17.00	15.00	16.00	16.00	14.40
	2010	15.00	11.00	15.00	9.00	15.00	14.00	14.00	9.00	15.00	15.00	13.20
	2023	15.00	13.00	15.00	9.00	13.00	15.00	16.00	13.00	15.00	16.00	14.00
中介中心度	2000	0.00	12.17	1.33	12.17	1.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.70
	2010	0.00	3.33	0.00	8.50	0.00	0.00	0.33	8.50	0.00	0.00	2.07
	2023	0.50	2.50	0.00	16.17	2.83	0.33	0.00	2.33	0.33	0.00	2.50

表3 贵阳市2000—2023年碳排放脱钩状态变化

Table 3 Changes in decoupling status of carbon emissions in Guiyang City from 2000 to 2023

地区	2000—2010年		2010—2023年		2000—2023年	
	脱钩弹性指数	脱钩状态	脱钩弹性指数	脱钩状态	脱钩弹性指数	脱钩状态
南明区	0.84	扩张连接	0.04	弱脱钩	0.72	弱脱钩
云岩区	0.57	弱脱钩	0.11	弱脱钩	0.69	弱脱钩
花溪区	0.31	弱脱钩	−0.06	强脱钩	0.31	弱脱钩
乌当区	1.24	扩张连接	0.26	弱脱钩	0.91	扩张连接
白云区	0.72	弱脱钩	0.23	弱脱钩	0.80	扩张连接
观山湖区	0.70	弱脱钩	0.12	弱脱钩	0.74	弱脱钩
开阳县	0.95	扩张连接	−0.09	强脱钩	0.63	弱脱钩
息烽县	0.81	扩张连接	−0.03	强脱钩	0.65	弱脱钩
修文县	0.70	弱脱钩	0.03	弱脱钩	0.67	弱脱钩
清镇市	−0.16	强脱钩	0.51	弱脱钩	0.35	弱脱钩
贵阳市	0.31	弱脱钩	0.06	弱脱钩	0.49	弱脱钩

2.4 贵阳市碳排放影响因素分析

利用LMDI因素分解模型，得到贵阳市碳排放的驱动因素及贡献率（表4）。单位土地碳排放强度总体影响相对有限，2000—2023年贡献率为5.29%。分阶段看，2000—2010年贡献率为5.61%，对碳排放增长呈正向驱动。2010—2023年贡献率降至1.41%，表明其增长效应显著减弱。经济发展水平对碳排放呈持续的正向驱动作用，2000—2023年累计贡献率为14.72%，反映了经济活动强度与土地开发程度的密切关联。单位GDP用地面积是抑制碳排放的关键因素，2000—2023年累计贡献率达−20.25%，表明土地资源集约利用水平的提升能有效减缓碳排放增长。人口规模是研究期内推动碳排放增长的主导因素，2000—2023年累计贡献率达59.74%，主导作用较为突出[27]。

表4 2000—2023年贵阳市碳排放LMDI因素分解结果

Table 4 LMDI factor decomposition results of carbon emissions in Guiyang City from 2000 to 2023 单位：10^4 t

效应类型	2000—2010年		2010—2023年		2000—2023年	
	贡献值	贡献率/%	贡献值	贡献率/%	贡献值	贡献率/%
单位土地碳排放强度效应	723.74	5.61	245.24	1.41	968.98	5.29
经济发展水平效应	1 183.08	9.16	1 782.18	10.26	2 698.57	14.72
单位GDP用地面积效应	−1 679.76	−13.01	−2 382.65	−13.71	−3 712.26	−20.25
人口规模效应	9 324.77	72.22	12 967.82	74.62	10 948.54	59.74

3 讨 论

3.1 贵阳市碳排放时空格局与网络演化分析

研究发现，贵阳市碳排放总量持续增长但增速有所放缓，高排放区集中于南明区、花溪区和清镇市[20,27]，印证了快速城镇化背景下，建设用地扩张是区域碳排放增长的主要影响因素。碳排放空间网络在研究初期表现为南明区、花溪区等节点主导的集中式结构，2010年网络联系逐渐增强，至2023年，网络结构出现回调，中介功能向多节点扩散，呈现出向

多核协同演化的趋势。这反映出区域内部发展不均衡的现实,未来需通过优化产业空间布局、强化集约用地导向,推动高排放区域的绿色低碳转型。此外,整体网络密度与关系数呈先升后降的倒U形轨迹,反映了网络从快速构建到优化调整的动态过程。这表明贵阳市作为典型喀斯特山地城市,其城市空间拓展受地形制约:2000—2010年的快速工业化与城镇化促使要素向南明区、云岩区、花溪区等地集聚;2010年后,在城市发展战略引导和生态约束下,观山湖区、清镇市等新兴节点崛起,网络联系在达到一定密度后出现回调与结构优化。这与经济发达地区网络持续紧密化的趋势不同[25],凸显了生态脆弱地区在城市发展中协调经济增长与生态安全的动态平衡特性[28]。

3.2　脱钩状态的阶段性差异与产业转型效应

贵阳市经济增长与碳排放整体呈弱脱钩状态,与既有研究结论一致[14]。2010—2023年花溪区、开阳县、息烽县等地成功转向强脱钩,其转型路径揭示了区位、资源与产业升级方向有效结合的关键作用。如花溪区依托大学城与生态资源,推动科教、生态优势转化为绿色服务业主导的低碳产业结构;开阳县与息烽县则依托磷矿资源,推动磷化工向精细化、低碳化升级,通过“存量优化”提升碳生产力。两者共同点在于实现了本地要素禀赋与产业升级方向的匹配,从而提升了产业附加值,降低了碳排放强度。相比之下,乌当区和白云区仍处于扩张连接状态,其产业体系可能仍相对依赖传统制造和资源加工路径,绿色新兴产业的培育尚不足以对冲传统排放惯性。这表明,产业绿色转型的成效更取决于本地产业基础与升级路径的契合度。因此,未来政策应更注重基于区县禀赋的差异化引导:对于科教资源富集区,强化创新链与绿色产业链的融合;对资源型区县,聚焦传统产业绿色技术改造与循环经济体系建设。通过精准施策,推动要素与本地优势产业深度结合,培育绿色增长极,促进全市产业绿色转型均衡发展,最终推动该市整体从弱脱钩向强脱钩跨越。

3.3　影响因素的突出作用与山地城市特性分析

贵阳市LMDI分解结果凸显其碳排放影响因素的独特性,即人口规模是碳排放增长的主导因素[28],这一发现揭示了在“强省会”与“人才兴市”等战略叠加下,贵阳作为区域增长极所面临的特殊压力:即随着省会城市集聚效应的持续增强,人口与人才快速流入,直接、刚性拉动了居住、交通及城市基础设施的能源消费与碳排放。尤其在喀斯特山地城市土地资源稀缺、生态敏感、开发成本高的背景下,新增人口对建设空间的刚性需求,往往导致建设用地向丘陵坡地扩张,进一步抬升碳排放强度。另外,分解结果还发现单位GDP用地面积是碳排放的抑制因素,说明在土地资源硬约束下,提高土地利用集约度和经济产出效率,是协调城市发展、人口集聚与碳减排矛盾的重要途径。未来政策应注重在空间规划中严格集约导向,在产业引进中强化低碳标准,并利用山地地形特点发展绿色交通与能源系统,从而在发展中持续降低碳排放强度。

3.4　研究启示

基于上述研究发现,本文尝试为同类喀斯特山地城市的低碳发展提供一些思考。贵阳市呈现的高排放区和高碳汇区空间分异格局,揭示了碳源与碳汇在空间上功能互补的潜力。未来可探索构建以碳排放经济贡献系数(ECC)和碳生态承载系数(ESC)为核算基础的横向碳补偿机制,依据各区县净碳排放量、ECC与ESC的评估结果,将高排放区划定为碳补偿支付区,高碳汇区划定为碳补偿受偿区,并通过财政转移、对口协作等方式实现生态保护成本与收益的区际公平分配,促进区域协同减排。另外,脱钩政策的制定需要考虑区县发展阶段差异,对已实现强脱钩的区县,应鼓励其深化技术创新与产业升级;对仍处于扩张链接状态或弱脱钩的区县,则应强化产业准入与能源结构优化,助力其突破转型瓶颈。最后,需重视人口集聚、土地利用效率与技术创新间的协同关系。在人口持续流入的背景下,城市规划应注重山地条件下的集约紧凑发展,提升空间利用效率。同时,将“人才兴市”“强省会”等战略所集聚的创新要素,更精准地导向绿色技术研发与低碳产业培育,从而为协调经济增长与碳排放控制提供有效路径。

4　结 论

(1) 贵阳市碳排放总量持续增长但增速放缓,高排放区集中于南明区、花溪区和清镇市等地区。碳排放空间关联网络经历了先集聚后优化调整的演变,个体网络特征显示直接联系强度先增后减、整体可达性相对稳定,南明区、花溪区等地的中介功能经历了先减弱后增强的阶段性变化,反映出网络结构从少数节点集中控制向多节点协同均衡的转型。

(2) 贵阳市经济增长与碳排放的脱钩状态存在显著的区县差异,贵阳市整体处于弱脱钩状态,花溪区、开阳县、息烽县等区县在2010—2023年转向强脱钩,关键在于将本地资源禀赋与产业升级方向有效结合以提升碳生产力。而乌当区、白云区等地2000—2023年呈扩张连接状态,其产业体系仍依赖传统路径,绿色转型相对滞后。

（3）人口规模是贵阳市碳排放增长的首要影响因素，累计贡献率达59.74%，凸显了“强省会”与“人才兴市”战略下贵阳市面临的特殊碳减排压力。单位GDP用地面积是抑制贵阳市碳排放的关键因素，累计贡献率为－20.25%，提升土地利用经济效率、探索山地特色集约发展道路是贵阳市实现低碳发展的关键。

参考文献(References)

[1] 胡剑波，张宽元，韩君.我国省域降碳减污绩效测度、时空分异与收敛性研究[J].统计研究，2025，42(2)：99-110.
Hu Jianbo, Zhang Kuanyuan, Han Jun. Research on the measurement, spatiotemporal differentiation and convergence of carbon and pollution reduction performance in China [J]. Statistical Research, 2025,42(2):99-110.

[2] 王鹏宇，蒲希希，陈静，等.西南喀斯特地区景观格局演变及其驱动力分析：以贵阳市花溪区为例[J].贵州师范大学学报(自然科学版)，2023，41(6)：29-41.
Wang Pengyu, Pu Xixi, Chen Jing, et al. An analysis of the evolving landscape pattern and its driving forces in the Karst region of Southwest China: Taking Huaxi District of Guiyang City as an example [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2023,41(6):29-41.

[3] 肖义，孔庆申，李茹，等.全国文明城市建设的碳减排效应[J].资源科学，2025，47(10)：2225-2239.
Xiao Yi, Kong Qingshen, Li Ru, et al. Carbon emission reduction effect of the construction of national civilized cities [J]. Resources Science, 2025,47(10):2225-2239.

[4] 刘赛艳，黄莉，高峥，等.基于FLUS-Markov模型的山地城市土地利用多情景预测：以重庆市为例[J].干旱区资源与环境，2025，39(12)：110-122.
Liu Saiyan, Huang Li, Gao Zheng, et al. Multi-scenario land use prediction for mountainous cities based on the FLUS-Markov model: A case of Chongqing [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2025,39(12):110-122.

[5] 张新生，刘佳茹，聂达文，等.关中平原城市群减污降碳协同效应的时空演变特征及驱动因素[J/OL].(2026-01-28).环境科学，1-27. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202508197.
Zhang Xinsheng, Liu Jiaru, Nie Dawen, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of the synergistic effects of pollution reduction and carbon emission reduction in the Guanzhong plain urban agglomeration [J/OL]. (2026-01-28). Environmental Science, 1-27. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202508197.

[6] 谢玲，黄玉航，宋知劲，等.山地城市扩张与碳排放响应：以重庆主城为例[J].中国环境科学，2026，46(2)：1099-1113.
Xie Ling, Huang Yuhang, Song Zhijin, et al. Mountain city expansion and carbon emission response: A case study of the main urban area of Chongqing [J]. China Environmental Science, 2026,46(2):1099-1113.

[7] Meng Jijun, Wang Can, Zou Yi, et al. Multi-scale spatiotemporal interactions between land use transformation and carbon emissions in China from 1980 to 2020 [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2026, 226: 108653.

[8] Houghton R A, Castanho A. Annual emissions of carbon from land use, land-use change, and forestry from 1850 to 2020 [J]. Earth System Science Data, 2023,15(5): 2025-2054.

[9] Li Jintao, Huang Yun, Liang Han, et al. Refined assessment of carbon emissions from land use in China: A research framework based on “provincial accounting-efficiency assessment-spatial synergy” [J]. Sustainable Cities and Society, 2025,132:106831.

[10] 王亚娟，翟晨曦，刘彩玉，等.宁夏土地利用碳排放时空差异及影响因素分析[J].环境科学，2024，45(9)：5049-5059.
Wang Yajuan, Zhai Chenxi, Liu Caiyu, et al. Analysis of spatiotemporal differences and influencing factors of land use carbon emissions in Ningxia [J]. Environmental Science, 2024,45(9):5049-5059.

[11] 李志英，朱晓珊，杨丽，等.云南省土地利用碳排放时空演变特征及影响因素[J].水土保持通报，2023，43(5)：297-303.
Li Zhiying, Zhu Xiaoshan, Yang Li, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and influencing factors of carbon emissions in Yunnan Province based on land use changes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(5):297-303.

[12] 田培，赵泽群，邓若瑄，等.长江中游城市群降碳-减污-扩绿-增长耦合协调的时空演变及影响机制[J].水土保持通报，2026，46(2)：284-294.
Tian Pei, Zhao Zequn, Deng Ruoxuan, et al. Spatiotemporal evolution and influencing mechanisms of coupling coordination of carbon reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth in urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026,46(2):284-294.

[13] 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.

[14] 黄怀玉，唐园清，龚直文，等.基于STIRPAT-GWR模型的重庆市土地利用碳排放动态演进及影响因素[J].环境工程技术学报，2024，14(4)：1195-1205.

Huang Huaiyu, Tang Yuanqing, Gong Zhiwen, et al. Dynamic evolution and influencing factors of land use carbon emissions in Chongqing based on STIRPAT-GWR model [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024,14(4):1195-1205.

[15] 谢甜甜,吴雅,黄棕翰,等.第一批低碳试点城市土地利用碳排放的脱钩效应与影响因素[J].水土保持通报,2025,45(4):294-303.
Xie Tiantian, Wu Ya, Huang Zonghan, et al. Decoupling effects and influencing factors of land-use carbon emissions in first batch of low-carbon pilot cities [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(4):294-303.

[16] 韩磊,刘洁,胡紫洁,等.基于土地利用变化的陕西省碳排放时空特征及碳补偿[J].生态学报,2025,45(20):10036-10047.
Han Lei, Liu Jie, Hu Zijie, et al. Study on the spatio-temporal characteristics of carbon emissions and carbon compensation in Shaanxi Province based on land use change [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(20):10036-10047.

[17] 贵阳市统计局.2024版贵阳统计年鉴[EB/OL].(2024-12-31)[2026-04-24]. https://www.guiyang.gov.cn/ztzlsjtj/ztzlsjtjtjnj/202501/t20250106_86580385.html
Guiyang Municipal Bureau of Statistics. Guiyang Statistical Yearbook 2024 [EB/OL]. (2024-12-31)[2026-04-24]. https://www.guiyang.gov.cn/ztzlsjtj/ztzlsjtjtjnj/202501/t20250106_86580385.html

[18] 王姝,胡晓清,尹小玲,等.耦合碳收支分区与主体功能区的湖南省双碳空间管理单元划分[J].生态学报,2025,45(21):10405-10419.
Wang Shu, Hu Xiaoqing, Yin Xiaoling, et al. Delineation of dual-carbon spatial management units in Hunan Province by coupling carbon budget zoning and major functional zones [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(21):10405-10419.

[19] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021,13(8):3907-3925.

[20] 栾永飞,郑光辉,陈国磊.贵阳市碳排放效应与土地利用变化模拟分析[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2024,45(3):39-47.
Luan Yongfei, Zheng Guanghui, Chen Guolei. Simulation analysis of carbon emission effect and land use change in Guiyang City [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2024,45(3):39-47.

[21] 胡剑波,郭玮,樊国杰,等.长江经济带县域碳收支时空演化特征及碳补偿分区[J].中国土地科学,2025,39(10):136-146.
Hu Jianbo, Guo Wei, Fan Guojie, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of county-level carbon budget and carbon compensation zoning in the Yangtze River economic belt [J]. China Land Science, 2025,39(10):136-146.

[22] 许玲燕,马慧瑶,杜建国.中国省际交通碳排放效率空间关联网络结构及驱动因素[J].软科学,2026,40(1):76-84.
Xu Lingyan, Ma Huiyao, Du Jianguo. Spatial correlation network structure and driving factors of inter-provincial transportation carbon emissions efficiency in China [J]. Soft Science, 2026,40(1):76-84.

[23] 郑航,叶阿忠.城市群碳排放空间关联网络结构及其影响因素[J].中国环境科学,2022,42(5):2413-2422.
Zheng Hang, Ye Azhong. Spatial correlation network structure and influencing factors of carbon emission in urban agglomeration [J]. China Environmental Science, 2022,42(5):2413-2422.

[24] 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.

[25] 周汝波,洪武扬.社会网络分析视角下广东省土地利用碳排放空间关联与碳平衡优化分区[J].环境科学,2025,46(9):5403-5414.
Zhou Rubo, Hong Wuyang. Spatial correlation and optimization zoning of carbon emission from land use in Guangdong Province from the perspective of social network analysis [J]. Environmental Science, 2025, 46(9):5403-5414.

[26] Tapio P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 [J]. Transport Policy, 2005,12(2):137-151.

[27] 贺祥,杨层,安小敏,等.贵州省碳源碳汇时空演变与影响因素研究[J].水土保持研究,2025,32(4):297-309.
He Xiang, Yang Ceng, An Xiaomin, et al. Research on the spatiotemporal evolution and influencing factors of carbon sources and sinks in Guizhou Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(4):297-309.

[28] 吴承敏,任海利.基于国土空间格局变化的碳代谢过程及其空间分异特征:以贵州省为例[J].长江流域资源与环境,2025,34(3):627-640.
Wu Chengmin, Ren Haili. Carbon metabolism process and its spatial differentiation characteristics based on changes in national land spatial pattern: A case study of Guizhou Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025,34(3):627-640.