区域实践

黔南州城市扩张时空演化与驱动机制分析

许洪燕，周宇轩，高 源

（辽宁师范大学地理科学学院，大连 116029）

摘要：基于1990—2020年多时相遥感与社会经济数据，运用空间格局分析与地理探测器等方法，对黔南州城市建设用地扩张的时空特征及驱动机制进行研究。结果表明：建设用地规模增长10.8倍，扩张过程呈“加速-低速-高速”三阶段特征；空间上重心向“西北-东南”迁移，格局由集中转向分散；驱动机制从自然区位主导转向经济、地形、人口与交通设施的多元协同。揭示了喀斯特山地城市科技-产业转型与空间重构的互动机制，为区域国土空间优化提供科学依据。

关键词：城市扩张；时空演化；驱动机制；喀斯特山地；地理探测器

中图分类号：F291.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)10－0125－10

改革开放以来，中国城镇化进程显著加速，常住人口城镇化率从1978年的17.92%提升到2024年的67%，设市城市数量由190个增加至683个。伴随工业化与城镇化的高速推进，城市建设用地快速扩张，然而，这种扩张也引发了土地资源浪费、环境污染加剧等问题[1-3]。进入新时代，中国城市空间扩展模式正由追求速度和规模转向注重提升空间利用效率与效益[4]。

从20世纪80年代中期以来，城市扩张这一课题一直受到国内外学者的广泛关注。在现有研究中，城市扩张的分析主要集中于区域和城市两种尺度。区域尺度多关注省域或城市群层面的时序异质性，如张敏等[5]对长江经济带、廖建军等[6]对长株潭城市群的研究；在城市尺度上则聚焦于东中部大中城市，如米军等[7]对上海市不透水面的分析，李靖业等[8]对南京城市扩张对土地碳储量的影响研究。然而，针对县市等小尺度单元的研究仍显不足。在研究内容上，现有成果不仅关注城市扩张的时空格局与模式特征[9-10]，还深入探讨其社会经济与环境效应[11-14]。城市扩张的驱动力因素是城市研究的热点问题[15]，国外学者提出了多种驱动因素，Seto等[16]提出影响城市扩张的因素除了人口变化、贫富差距、技术进步、经济发展等因素，还涉及政治经济结构和价值观。而国内学者对城市驱动力机制的研究多从综合性因素或单一因素进行[17]，综合性因素多从社会经济、政策、自然、交通等多方面进行综合考量。科技与产业对城市扩张的影响在现有研究中虽未被广泛探讨，但已有文献指出其具有重要影响。例如，信息技术的革新改变了传统产业的区位选择逻辑，数字经济的崛起催生了新的空间需求模式，推动城市建设用地呈现新的扩张特征[18]。技术进步和产业转型对城市空间结构和功能的重构具有重要影响[19]；单一因素研究往往探究某一驱动力因素对城市扩张的影响，如董瑶嘉等[20]探讨了行政区划调整对长春市城市空间扩展的影响与驱动力。在研究方法上，城市扩张时空特征研究主要基于遥感与统计数据，采用扩张强度、速度及景观格局等指数进行分析；驱动力研究则多融合社会人文与自然因素，运用地理探测器、多元回归等方法，其中地理探测器可有效识别变量间的非线性交互效应[21-23]。

当前针对中小尺度欠发达地区，尤其是在特殊地貌单元内，科技和产业与空间扩张的互动机理解析仍较为薄弱。黔南布依族苗族自治州作为典型

收稿日期：2025-09-26

基金项目：辽宁省教育厅社会科学项目(LJ112510165037)

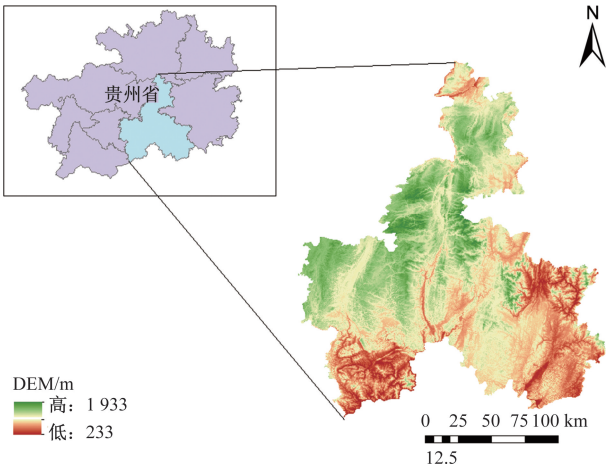
作者简介：许洪燕(2001—)，女，山东临沂人，硕士研究生，研究方向为城乡规划与土地管理；周宇轩(2000—)，男，山西太原人，硕士研究生，研究方向为区域与海洋经济地理；通信作者高源(1976—)，女，河北昌黎人，博士，副教授，研究方向为区域与海洋。

的喀斯特山地城市，正处于产业结构优化与科技创新赋能双重转型的关键阶段。为此，本文基于1990—2020 年多时相遥感影像与社会经济数据，采用主成分分析与地理探测器方法，系统识别建设用地扩张的驱动机制。在构建指标体系时，引入经济规模、产业结构、人口集聚与基础设施等多维特征，对模型进行优化，以增强驱动因素的解释力。同时，结合重心迁移法与标准差椭圆分析，精确刻画建设用地扩张的时空演变格局。从经济发展、政策调控与地形约束三个维度，综合运用多元回归与交互探测方法，揭示建设用地扩张的驱动机制，为区域的产业布局优化、国土空间精准治理和特色城镇化路径选择提供科学依据。

1　研究方法与数据来源

1.1　研究区概况

黔南布依族苗族自治州地处贵州省中南部，位于东经 106°12′～108°18′，北纬 25°04′～27°29′，总面积为26 200 km^2，东西相距 207.9 km，南北相距 269.4 km。黔南州向东以黔东南州为界，南以广西壮族自治区为界，西连安顺市、黔西南州，北接贵阳市。全州下辖都匀市、福泉市、荔波县、贵定县、瓮安县、独山县、平塘县、罗甸县、长顺县、龙里县、惠水县、三都水族自治县，共 12 个县市。到 2024 年底，黔南布依族苗族自治州常住人口为 348.96 万人。如图 1 所示。



审图号：GS(2024)0650 号

图 1　研究区位置示意图

1.2　数据来源

以黔南州下辖 2 市 10 县 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年 4 个时间节点的城市建设用地面积为主要数据，土地利用数据来源于中国土地覆盖数据集(China Land Cover Database，CLCD)数据，数据高程模型(digital elevation model，DEM)数据、坡度数据均来自中国科学院资源环境科学数据中心，公路数据、铁路数据、河网数据均来自 OSM (https://www.openstreetmap.org/)，其他社会经济数据主要来源于相应年份的《贵州统计年鉴》《黔南州统计年鉴》等。由于年代久远，部分缺失数据采用线性插值法插补。

1.3　研究方法

1.3.1　城市扩张分析

(1)年均扩张指数，是指在一段特定时期内的城市用地扩张面积与原有城市建设用地面积的比值[24]，数值越大，说明城市扩张速度越快。

$$I=\frac{1}{n}\frac{U_j-U_i}{U_i}\times 100 \tag{1}$$

式中：I 为年均扩张指数；U_j、U_i 分别为研究时间段末期和初期评价单元城市建设用地面积；n 为时间段年数。

使用年平均扩张指数研究 1990—2000 年、2000—2010 年及 2010—2020 年的黔南州的城市扩张过程。在此基础上，将各个区域的城市扩张划分为“收缩扩张(<0)”“低速扩张(0～5)”“中速扩张(5～10)”“高速扩张(>10)”四种类型[25]。

(2)重心转移。对比分析不同时期内城市建成区的重心位置分布、重心转移方向以及转移距离，揭示城市空间动态变化过程、城市扩展规律，具体计算公式为

$$X_t=\sum_{i=1}^{n}\frac{S_{ti}X_i}{\sum_{i=1}^{n}S_{ti}} \tag{2}$$

$$Y_t=\sum_{i=1}^{n}\frac{S_{ti}Y_i}{\sum_{i=1}^{n}S_{ti}} \tag{3}$$

式中：X_t、Y_t 分别为 t 时间城市建成区的重心坐标；X_t、Y_t 分别为第 i 个建成区重心的坐标；S_{ti} 为 t 时间第 i 个建成区的面积[26]。

(3)标准差椭圆。标准差椭圆方法基于研究对象的空间位置、空间结构等特征，能够全面地反映研究对象在空间上的集中度、中心性、方向性和形态等随时间的演变。标准差椭圆的重心为中心城市群建成区的重心，椭圆的长轴方向表示建成区扩张的主要趋势方向，短轴方向为次要趋势方向，城市建成区空间分布的集中程度则由椭圆的面积表示[27]。

1.3.2　城市扩张的驱动力分析

(1)主成分分析。主成分分析是把原来多个指

标划分为少数几个综合指标的多元统计方法[28],广泛应用于研究影响城市扩张的因素。通过将多个相关变量线性组合为少数几个主成分,以减少数据的维度,同时保留尽可能多的信息。这种方法能够有效处理多变量之间的相关性,提高数据分析的效率和准确性。

(2)多元线性回归分析。多元线性回归用于讨论因变量与自变量的统计学关系。参考胡苗苗等[27]、殷彪等[29]、黄潞等[30]的做法,构建包含经济发展、人口结构、劳动力配置、居民生活与交通设施5个维度的指标体系(表1),以揭示黔南州建设用地扩张的驱动机制。经济发展维度通过固定资产投资(X_1)和财政收支(X_6、X_7)反映资本投入与政策支持强度;产业结构指标(X_3~X_5)表征产业升级与技术创新对用地需求的直接塑造;人口与劳动力指标(X_8~X_{11})体现人力资源优化配置;居民收入与消费(X_{12}~X_{14})衡量发展成果转化水平;交通基础设施(X_{15})作为技术物化的载体,支撑产业流通与区域协同。

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_nx_n \tag{4}$$

式中:Y为因变量,是模型要预测或解释的结果变量;b_0为常数项;b_1,b_2,…,b_n为Y对应于x_1,x_2,…,x_n的偏回归系数。

表1 建设用地扩张的时间驱动因素

因素	驱动因子	编号
经济发展	固定资产投资	X_1
	GDP	X_2
	第一产业增加值	X_3
	第二产业增加值	X_4
	第三产业增加值	X_5
	地方财政收入	X_6
	地方财政支出	X_7
人口	常住人口	X_8
	非农业人口	X_9
劳动力	城镇单位在岗职工人数	X_{10}
	乡村从业人员数	X_{11}
	城镇居民人均可支配收入	X_{12}
居民生活	农村居民人均可支配收入	X_{13}
	社会消费品零售总额	X_{14}
交通	公路里程	X_{15}

(3)地理探测器。地理探测器(GeoDectector,GD)是揭示空间分异现象驱动力的统计学方法,是一种重要的探测地理要素的空间格局及成因的方法,逐渐被用于城市发展、社会经济等领域的研究中[31]。将城市扩张面积(Y)和影响因子(Z)进行因子探测分析(表2),自然因子(高程、坡度)在工程技术影响下,从限制条件转化为可控成本;经济因子(GDP、人口密度)体现产业升级与人口迁移对用地形态的推动;交通因子(公路、铁路密度)则通过提升区域连通性与物流效率,引导产业布局与空间重构。这些因子共同构成科技-产业与空间扩张的互动载体,系统诠释其驱动机制。各因子共同构成科技-产业-空间扩张的协同作用路径,为解析其复杂驱动机制提供系统视角。q值的计算公式为

表2 建设用地扩张的空间驱动因素

因素	影响因子	编号
自然	高程	Z_1
	坡度	Z_2
经济区位	GDP	Z_3
	人口密度	Z_4
水系	河网密度	Z_5
交通	公路密度	Z_6
	铁路密度	Z_7

$$q = 1 - \frac{1}{n\sigma^2}\sum_{i=1}^{m} n_i\sigma^2 \tag{5}$$

式中:q为建设用地扩张的驱动因子解释力;n、σ^2分别为研究区的样本量和方差;m为变量或因子的分层,即分类或分区。q取值范围为[0,1],数值越大,表示该因子对城市建设用地扩张的解释力越强。

2 城市扩张的时空演化特征

2.1 城市扩张的总体演化特征

黔南州在1990—2020年城市建成区面积迅猛增长,扩张速率、扩张强度等表征城市扩张的数值以及相应的空间形态均发生了极大变化[26]。

根据影像解译数据,1990—2020年黔南州城市建设用地面积从32.68 km^{2}增长至353.94 km^2,增幅高达983.04%,年均增长10.7 km^2。从增长态势看,黔南州城市建设用地扩张呈现“加速-低速-高速”(图2)趋势。其中,在1990—2000年期间增长稍快,年均增长4.65 km^2;2000—2010年黔南州城市建设用地面积略有下降,由2000年的79.15 km^{2}下降到2010年的78.03 km^2;2010—2020年呈高速增长期,年均增长27.59 km^2,特别是到2020年增长到353.94 km^2。从1990—2020年30年来说,黔南州城市建设用地面积总体呈增加趋势。

选取黔南州1990年、2000年、2010年、2020年4个时间节点的城市建设用地空间分布数据,对黔南州城镇建设用地分布数据进行叠加,构建1990—2020年黔南州城镇建设用地扩张空间分布如图3所示。黔南州各城市扩展方向不一致。都匀市、福

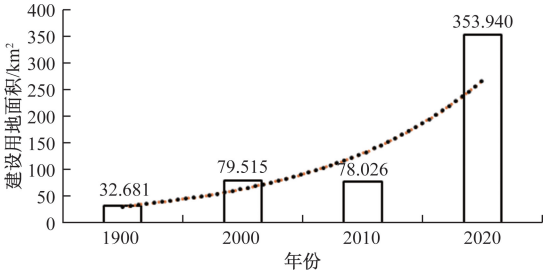


图 2　1990—2020 年黔南州城市建设用地扩张趋势

泉市的扩张方向主要是东、南、西三个方向，而东、南方向的扩展幅度最大。瓮安县、独山县、惠水县、三都县和长顺县城市扩张以北、南两方向为主。贵定县、龙里县、荔波县和平塘县在原有的城区基础上向四周扩张。长顺县城市扩张方向以东北和西南为主。

2.2　分阶段演化特征

2.2.1　1990—2000 年黔南州呈加速扩张趋势

20 世纪 90 年代，黔南州城市发展虽然处于起步阶段，发展平稳，但城市扩张速度较快（表 3）。黔南州 1990—2000 年城市建设用地面积年均增长幅度为 14.2%。福泉市（增幅 10.73 km^2）、平塘县（增幅 7.25 km^2）等地区扩张尤为迅猛（图 4）。这一空间扩张模式与同期该地区以磷煤矿产开发、初级建材加工为代表的产业发展重心高度吻合。数据显示，福泉市年均扩张指数高达 92.59，其建设用地规模从 1.16 km^2 激增至 11.89 km^2。这种超常增长与当地磷化工产业起步阶段的大规模基础设施和厂区建设直接相关，是资本深化的直接体现，通过



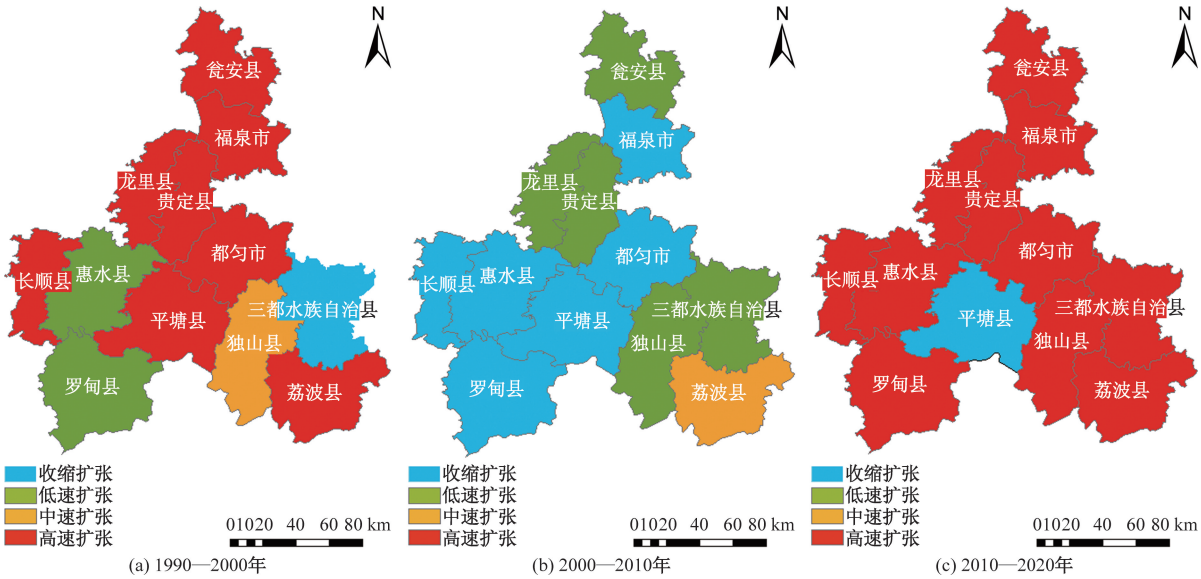
审图号：GS(2024)0650 号

图 3　1990—2020 年黔南州城市建设用地扩张

巨额固定资产投资（资本）来替代传统生产要素，为新的产业活动创造空间。

2.2.2　2000—2010 年黔南州呈低速扩张趋势

2000—2010 年，黔南州城市建设用地总面积呈现小幅收缩态势，年均变化率为－0.14%，但区域



审图号：GS(2024)0650 号

图 4　城市扩张速度空间分异

表 3　1990—2000 年黔南州城市建设用地扩张特征指数

行政区	1990 年面积/km²	2000 年面积/km²	增长面积/km²	年均扩张指数	扩张类型
都匀市	8.05	17.36	9.31	11.56	高速扩张
福泉市	1.16	11.89	10.73	92.59	高速扩张
瓮安县	1.80	6.04	4.25	23.61	高速扩张
贵定县	3.02	6.41	3.38	11.20	高速扩张
龙里县	1.88	6.74	4.86	25.85	高速扩张
惠水县	4.82	4.94	0.12	0.25	低速扩张
平塘县	1.68	8.94	7.25	43.06	高速扩张
罗甸县	2.29	2.65	0.36	1.59	低速扩张
荔波县	0.94	2.37	1.42	15.13	高速扩张
三都县	2.13	1.97	−0.16	−0.76	收缩扩张
独山县	2.20	3.88	1.67	7.60	中速扩张
长顺县	2.71	6.15	3.44	12.71	高速扩张

注:收缩扩张:年均扩张率≤0;低速扩张:0<年均扩指数≤5;中速扩张:5<年均扩指数≤10;高速扩张:年均扩指数>10。

内部空间分异显著。全州半数市、县的建设用地面积出现负增长(表 4)。福泉市、平塘县建设用地收缩最为显著,面积分别减少 3.99 km²、1.27 km²。将这一空间现象置于同期宏观背景下考量可以发现,此时正值中国对高耗能、高污染行业环保要求趋严,且资源型产品市场竞争加剧的时期。福泉市、平塘县的收缩态势,与当地以资源初加工为主的传统发展模式,在面临外部环境变化时承压的表征,其背后深层原因正包括技术升级滞后与产业转型压力密切相关。而荔波县作为此阶段唯一呈现中速扩张的区域(年均扩张指数 5.44),其增长主要得益于生态旅游产业的初步发展与相关服务设施的配套建设,旅游业的发展直接拉动了住宿、餐饮、交通等配套设施的建设需求。

表 4　2000—2010 年黔南州城市建设用地扩张特征指数

行政区	2000 年面积/km²	2010 年面积/km²	增长面积/km²	年均扩张指数	扩张类型
都匀市	17.36	17.01	−0.34	−0.20	收缩扩张
福泉市	11.89	8.50	−3.99	−2.85	收缩扩张
瓮安县	6.04	6.98	0.94	1.55	低速扩张
贵定县	6.41	6.56	0.15	0.24	低速扩张
龙里县	6.74	7.85	1.11	1.64	低速扩张
惠水县	4.94	4.93	−0.01	−0.03	收缩扩张
平塘县	8.94	7.67	−1.27	−1.42	收缩扩张
罗甸县	2.65	2.63	−0.22	−0.08	收缩扩张
荔波县	2.37	3.65	1.29	5.44	中速扩张
三都县	1.97	2.51	0.54	2.75	低速扩张
独山县	3.88	3.93	0.05	0.13	低速扩张
长顺县	6.15	5.99	−0.16	−0.27	收缩扩张

2.2.3　2010—2020 年黔南州呈高速扩张趋势

2010—2020 年,伴随《国务院关于进一步促进贵州经济社会又好又快发展的若干意见》等重大政策的深入实施,黔南州城镇空间扩张进程显著加速,进入高速扩张阶段,全州城市建设用地面积平均年增长率高达 35.36%。都匀市、独山县在建设用地增量上领先(分别为 44.41 km²、40.37 km²),而独山县与三都县在扩张速度上尤为突出(年均扩张指数分别为 102.80、78.24),如表 5 所示。这一变化与黔南州在该时期大力推进“工业强州”“数字经济”战略密切相关。例如,独山县依托省级经开区布局的装备制造产业园,形成大规模的新增建设用地需求,都匀绿茵湖产业园等科技型产业平台的建设,提升了土地承载能力与空间需求。

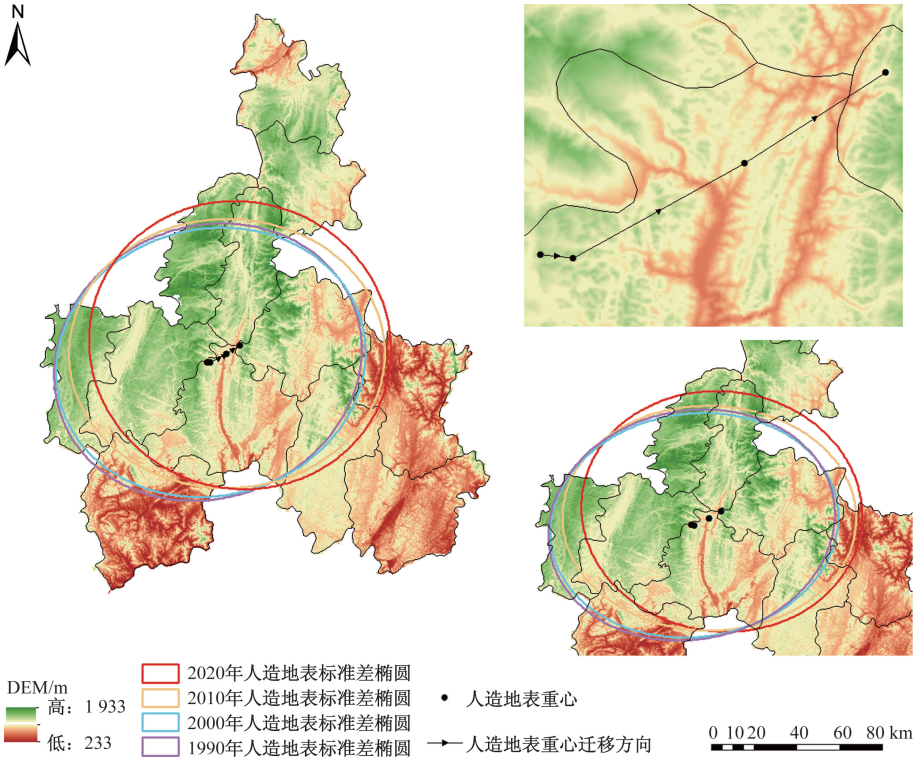
表 5　2010—2020 年黔南州城市建设用地扩张特征指数

行政区	2010 年面积/km²	2020 年面积/km²	增长面积/km²	年均扩张指数	扩张类型
都匀市	17.01	61.42	44.41	26.10	高速扩张
福泉市	8.50	26.73	18.23	21.45	高速扩张
瓮安县	6.98	38.43	31.45	45.04	高速扩张
贵定县	6.56	15.53	8.97	13.67	高速扩张
龙里县	7.85	37.14	29.29	37.31	高速扩张
惠水县	4.93	39.62	34.07	70.39	高速扩张
平塘县	7.67	15.11	7.44	9.70	中速扩张
罗甸县	2.63	13.47	10.85	41.29	高速扩张
荔波县	3.65	18.56	14.90	40.80	高速扩张
三都县	2.51	22.16	19.65	78.24	高速扩张
独山县	3.93	44.30	40.37	102.80	高速扩张
长顺县	5.99	21.59	15.61	26.08	高速扩张

2.3　建设用地重心迁移与扩张方向演变

研究期间,建成区重心迁移轨迹呈西北-东南-东北-西北演进,重心在平塘县和都匀市之间徘徊(图 5)。标准差椭圆面积经历了“减少-增加-增加”的过程,表明黔南州建成区的空间分布经历了“集中-分散-分散”的演变过程,椭圆面积在 2020 年达到最大值14 940.67 km²,表明建成区在 2020 年分散程度最大。

建成区重心变动大致可分为三个阶段:1990—2000 年阶段,重心从平塘县西北方向东南方移动,移动距离为 1.41 km,椭圆面积缩小 306.56 km²,空间上呈收缩趋势;2000—2010 年,重心在平塘县内,从西北方向移动到东北方向,移动距离 8.55 km,该重心移动距离最远,椭圆面积增加了 328.93



审图号：GS(2024)0650 号

图 5 1990—2020 年黔南州标准差椭圆及其重心变动

km^2，空间上呈扩张趋势；2010—2020 年阶段，建成区重心由平塘县向西北方向移动到都匀市，移动距离为 7.23 km，椭圆面积增大了 328.3 km^2，空间上呈扩张趋势。1990 年标准差椭圆的长轴方向为“西南-东北”方向，到 2000 年标准差椭圆的长轴方向虽为“西南-东北”方向，但偏向“东-西”方向，到 2010 年标准差椭圆的长轴方向为“东-西”方向，2020 年标准差椭圆的长轴方向为“西北-东南”，说明黔南州建成区空间分布格局从“西南-东北”方向逐渐向“西北-东南”转换。

通过旋转角参数量化分析发现，建成区扩张主轴方向从 1990 年的 68.9°（NE-SW 向）持续偏转至 2020 年的 107.1°（SE-NW 向），累计增加 38.2°，年均变化率达 1.27°。这一方向转变过程具有明显的阶段性特征：1990—2000 年东南向迁移阶段（位移 1.41 km）对应旋转角增加 7.4°，主要表现为沿剑江河谷地的轴向填充；2000—2010 年东北向迁移阶段（位移 8.55 km）对应旋转角剧增 13.4°，与贵新高速公路建成引发的产业廊道形成高度吻合；2010—2020 年西北向折返阶段（位移 7.23 km）则对应旋转角跃升 17.4°，这一异常变化与“都匀-独山”政策飞地体系建设直接相关。

3　黔南州城市建设用地扩张驱动因素

3.1　时间演化驱动因素分析

选取 15 个反映社会经济发展的指标作为自变量，因变量 Y 代表城市建设用地面积。考虑到 15 个自变量之间可能存在高度共线性，采用高相关性剔除法（$|r|>0.95$）对初始 15 个社会经济指标进行特征选择，最终筛选出 7 个核心解释变量。对这 7 个变量进行主成分分析（PCA），旨在将相关指标浓缩为能够反映内在经济结构特征的少数几个综合因子。分析结果显示，数据适合进行因子分析（KMO＝0.812，Bartlett 检验 $P<0.001$），共提取出两个累计方差贡献率达 93.03%的主成分因子（F_1、F_2）。

$$F_1=0.421X_3+0.427X_2+0.413X_8+0.352X_{12}+0.4X_{13}+0.359X_{10}+0.187X_{15} \quad (6)$$

$$F_2=0.019X_3+0.088X_2+0.147X_8+0.490X_{12}+0.281X_{13}+0.297X_{10}+0.748X_{15} \quad (7)$$

最后，将提取的主成分因子作为核心解释变量，以城市建设用地面积为因变量，构建多元线性回归模型。得到的驱动模型为

$$Y=1.622+0.852F_1-0.219F_2 \quad (8)$$

式中：Y 为建成区面积；F_1 为第一主成分；F_2 为第

二主成分。从拟合结果中可看出该模型拟合程度较高,调整后$R^2=0.866$,$F=28.98$,$P<0.001$。因此从中可以看出这两个主成分与建成区面积变化的拟合情况较好,回归方程有着显著意义。具体分析如下。

(1)规模增长与要素集聚因子(F_1),是驱动建设用地扩张的核心动力。其在回归模型中的系数为0.852,且为正向影响,贡献最大。从因子载荷来看,F_1在GDP(X_2)、第一产业增加值(X_3)、常住人口(X_8)、城镇居民人均可支配收入(X_{12})、农村居民人均可支配收入(X_{13})等指标上具有较高的正载荷。这表明F_1综合反映了区域经济总量、人口规模和居民收入的同步增长,以及由此带来的生产要素在空间上的快速集中。结合黔南州1990—2020年的发展历程,其产业结构由传统农业向现代化工、新型建材、特色农产品加工及大数据服务业转型升级。这一过程伴随着资本密集度的显著提高,体现为磷化工精加工、新型干法水泥生产线等重资产项目的巨额投资;同时,通过茶叶、辣椒的精深加工大幅提升产品附加值,以及大数据产业的高知识密度特性,共同驱动了区域产出效率的跨越式增长。由此带来的经济规模扩张与非农就业岗位增加,吸引了人口(X_8)向城镇集聚,并带动居民收入整体跃升,最终为承载新兴产业园区、商业设施与居住区,触发了建设用地的空间扩张。

(2)基础设施与乡村发展因子(F_2),对建设用地扩张呈现微弱的负向抑制效应,其系数为−0.219。观察其构成,F_2在公路里程(X_{15})上载荷极高,同时与农村居民人均可支配收入(X_{13})和社会消费品零售总额(X_{14})关联密切。这一因子结构揭示了一个更为复杂的影响机制:一方面,交通基础设施(X_{15})的完善在初期会引导开发,但从长远看,它通过提升区域可达性和连通性,可能促进土地资源的更有效配置和利用,从而在一定程度上抑制了中心城区的过度集聚与粗放扩张。另一方面,农村居民收入(X_{13})与全社会消费水平(X_{14})的提升,反映了乡村地区内在发展活力的增强,这可能减缓了农村人口流出的压力,对建设用地的快速扩张起到了结构性的缓冲作用。

3.2 空间演化驱动因素分析

基于经自然断点法(5级划分)处理的变量数据,运用地理探测器方法进行分析,揭示黔南州建设用地空间扩张驱动机制的时空分异特征,如图6和表6所示。

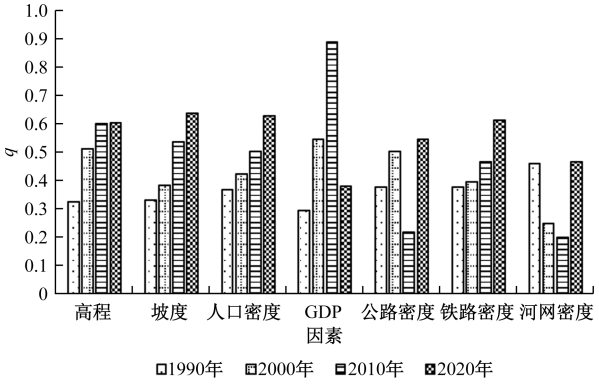


图6 空间影响因素决定力q值

表6 地理探测器双因子交互影响统计结果

年份	非线性减弱	单因子非线性减弱	双因子增强	两因子独立	非线性增强	总计
1990	0	0	12(57.1%)	0	9(42.9%)	21
2000	0	0	6(28.6%)	0	15(71.4%)	21
2010	0	0	10(47.6%)	0	11(52.4%)	21
2020	0	0	9(42.9%)	0	12(57.1%)	21

注:设交互后驱动力为$q(Z_1\cap Z_2)$,若$q(Z_1\cap Z_2)<\min[q(Z_1),q(Z_2)]$,为非线性减弱;若$\min[q(Z_1),q(Z_2)]<q(Z_1\cap Z_2)<\max[q(Z_1)]$,$q(Z_2)$为单因子非线性减弱;若$q(Z_1\cap Z_2)>\max[q(Z_1),q(Z_2)]$,为双因子增强;若$q(Z_1\cap Z_2)=q(Z_1)+q(Z_2)$,两因子独立;若$q(Z_1\cap Z_2)>q(Z_1)+q(Z_2)$,为非线性增强。

20世纪90年代,城市扩张虽以自然区位与基础交通条件为主导,但交互探测结果已初步显现。在河网密度($q=0.459$)、公路密度($q=0.377$)等因子独立作用的同时,公路密度∩河网密度的交互q达0.631(交互探测结果如表7所示),呈现典型的非线性增强,表明交通与水源因子在城镇化初期已产生协同放大效应,反映在“县县通公路”政策引导下,交通线路沿河谷地带布局的典型特征。

进入21世纪,驱动机制从“单极主导”向“协同放大”的转变。GDP因子解释力在2000年($q=0.546$)超越传统因子,交互探测进一步显示,其与各地理要素的交互作用普遍呈现非线性增强。交互探测进一步揭示,这一阶段非线性增强型交互比例急剧上升至71.4%(表6),其中坡度∩GDP的交互q达0.722(表7),体现了在“西电东送”工程推动下,磷煤化工等重工业通过技术进步突破地形限制的空间响应。这一时期的协同机制表现为资源型产业在政策引导下与地形条件的深度作用。

至2020年,在“新时代推进西部大开发形成新格局”和“数字经济”战略引领下,驱动机制进一步转化。交互探测结果表明,坡度($q=0.637$)与公路密度($q=0.544$)的交互作用q达0.728,体现了“交

表7 地理探测器双因子交互探测结果

两因子交互探测(Z_1～Z_7)	1990年	2000年	2010年	2020年
DEM∩坡度	0.385	0.532	0.612	0.698
DEM∩人口密度	0.395	0.535	0.622	0.718
DEM∩GDP	0.625	0.678	0.758	0.625
DEM∩公路密度	0.628	0.672	0.625	0.742
DEM∩铁路密度	0.605	0.674	0.735	0.755
DEM∩河网密度	0.578	0.612	0.548	0.752
坡度∩人口密度	0.398	0.518	0.592	0.692
坡度∩GDP	0.592	0.612	0.722	0.602
坡度∩公路密度	0.625	0.673	0.612	0.728
坡度∩铁路密度	0.612	0.592	0.682	0.712
坡度∩河网密度	0.572	0.532	0.498	0.748
人口密度∩GDP	0.615	0.642	0.702	0.652
人口密度∩公路密度	0.632	0.658	0.588	0.748
人口密度∩铁路密度	0.608	0.622	0.662	0.752
人口密度∩河网密度	0.578	0.582	0.468	0.755
GDP∩公路密度	0.532	0.673	0.612	0.578
GDP∩铁路密度	0.618	0.592	0.692	0.672
GDP∩河网密度	0.598	0.592	0.622	0.482
公路密度∩铁路密度	0.512	0.632	0.452	0.692
公路密度∩河网密度	0.631	0.652	0.582	0.755
铁路密度∩河网密度	0.629	0.412	0.625	0.752

通强国”试点省建设中山区高速公路桥隧技术的突破；人口密度(q=0.628)与铁路密度(q=0.614)的交互q达0.752，反映了“陆海新通道”建设带动的人口-交通协同效应。标志着科技进步已成为突破自然约束、优化要素配置的关键力量。

4 结论与建议

4.1 结论

基于1990—2020年多源数据，运用多种空间分析与计量方法，对黔南州城市扩张的时空演化特征与驱动机制进行了系统研究，得出以下主要结论。

(1)在时间演化上，黔南州城市扩张呈现显著的阶段性特征。30年间，全州城市建设用地面积增长了10.8倍，经历了三个阶段：1990—2000年为加速扩张阶段，年均扩张指数较高，与全州资源型工业和基础制造业的快速发展密切相关；2000—2010年进入调整阶段，城市扩张速度整体放缓，甚至部分区域出现建设用地收缩，年均变化率为−0.14%；2010—2020年进入高速扩张阶段，年均增长率达35.36%，与“工业强州”战略下科技产业园区的全面建设密切相关。

(2)在空间格局上，黔南州城市扩张表现出由集中向分散、主轴方向动态偏转的演变规律。30年间，城市建设用地重心在平塘县与都匀市之间呈“西北-东南-东北”方向迁移。标准差椭圆面积先收缩后急剧扩张，表明城市空间格局由相对集中转向显著的分散化，空间离散程度在2010年后持续增强。扩张主轴方向也从“西南-东北”向，逐步偏转为“西北-东南”向，与重大交通基础设施和产业政策高度契合。

(3)黔南州城市建设用地扩张的驱动机制经历了从单一主导到多元协同的深刻演变。时间维度上，其根本动力源于经济规模扩张、产业结构升级及伴随的人口集聚效应；空间维度上，呈现由早期“自然区位主导”向“经济规模单极驱动”，再转型为“地形约束、人口分布与现代化交通基础设施协同驱动”的清晰路径。这一过程深刻体现了科技进步通过提升工程能力、改善区位条件，与产业升级通过重塑生产要素空间需求，二者共同作用于国土空间开发格局的复杂互动关系，驱动机制日趋非线性化与系统化。

4.2 建议

基于以上结论，为推动黔南州新型城镇化向更高质量、更可持续的方向发展，提出以下政策建议。

(1)实施基于地形约束分级的差异化空间管制策略。针对研究发现的坡度和高程已成为最强约束因子的结论，建议建立与地形条件相匹配的分级管控体系。在坡度15～25°的区域，推广生态护坡、阶梯式开发等适应性地形利用技术，并通过开发强度奖励机制引导合理布局；在坡度25°以上区域实行建设限制，确需开展的建设项目应采用新型建筑工艺与地下空间开发技术。在都匀、福泉等扩张显著区域设立山地城市开发示范区，推动工程建设技术与复杂地形条件的有效协同。

(2)建立产业布局与基础设施协同发展的联动机制。基于产业驱动与交通基础设施的协同效应，在福泉-瓮安磷化工产业带、都匀经开区等空间扩张主轴方向上，推行产业项目与基础设施的协同规划。将交通设施配套要求纳入项目准入标准，建立包含税收贡献(建议不低于20万元/666.67 m^2)、研发投入(建议不低于营业收入3%)等指标的综合评价体系，确保产业升级与基础设施改善同步推进。

(3)构建统筹发展与保护的国土空间动态调控机制。针对驱动机制日趋复杂化的特征，创新国土空间治理工具。建立建设用地指标与生态保护成效的联动机制，允许开发强度较高的区域通过支持生态敏感地区的保护修复工作获取发展空间，并将

生态系统服务功能纳入指标体系。这一机制可将研究中揭示的基础设施与乡村发展的抑制效应转化为积极的区域协调工具,促进经济发展与生态保护的良性互动。

参考文献

[1] 王之芬,梁新秀,占笔成,等. 快速城市化流域全氟化合物的污染特征及生态风险[J]. 北京大学学报(自然科学版),2019,55(3):543-552.

[2] WANG S, GAO S, LI S, et al. Strategizing the relation between urbanization and air pollution: empirical evidence from global countries[J]. Journal of Cleaner Production, 2020(1): 118611-118615.

[3] 郭向阳,穆学青,丁正山,等. 长三角多维城市化对PM2.5浓度的非线性影响及驱动机制[J]. 地理学报,2021,76(5):1274-1293.

[4] 方创琳. 中国新型城镇化高质量发展的规律性与重点方向[J]. 地理研究,2019,38(1):13-22.

[5] 张敏,杨励雅,胡卓玮,等. 长江经济带城市扩张的时空分异特征及影响机制[J]. 地理学报,2024,79(2):439-461.

[6] 廖建军,李欣,王志远,等. 长株潭都市圈建设用地增长格局及驱动因素研究[J]. 世界地理研究,2023,32(9):133-145.

[7] 米军,张肖,刘良云. 1985—2020年上海市不透水面时空特征演化分析[J]. 遥感技术与应用,2023,38(2):297-307.

[8] 李靖业,梁羽洁,杨桂山,等. 城市扩张对土地碳储量的影响及其梯度效应——以南京市为例[J]. 中国土地科学,2025,39(3):45-57.

[9] 欧阳晓,朱翔. 中国城市群城市用地扩张时空动态特征[J]. 地理学报,2020,75(3):571-588.

[10] 翟浩然,唐新明,王光辉,等. 中国超大城市建设用地遥感监测与时空格局[J]. 遥感信息,2019,34(4):39-47.

[11] XIE H, ZHU Z, WANG B, et al. Does the expansion of urban construction land promote regional economic growth in China? evidence from 108 cities in the Yangtze River Economic Belt[J]. Sustainability, 2018, 10(11): 4073-4073.

[12] TANG J J, ZHOU L, DANG X W, et al. Impacts and predictions of urban expansion on habitat quality in the densely populated areas: a case study of the Yellow River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 151: 110320.

[13] RAFAEl B D V, MONTSERRAT B P. How urban spatial expansion influences CO_2 emissions in Latin American countries[J]. Cities, 2023, 139: 1-14.

[14] WEI L, ZHOU L, SUN D Q, et al. Evaluating the impact of urban expansion on the habitat quality and constructing ecological security patterns: a case study of Jiziwan in the Yellow River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 145: 109544.

[15] 周棱楠,潘安,罗芳. 1980—2018年成都市建设用地扩张时空演变及驱动力分析[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2023,43(2):186-194.

[16] SETO K C, FRAGKIAS M, GÜNERALP B, et al. A meta-analysis of global urban land expansion[J]. PLoS One, 2017, 6(8): 23777.

[17] 闫梅,黄金川. 国内外城市空间扩展研究评析[J]. 地理科学进展,2013,32(7):1039-1050.

[18] 张潇,陆林,任以胜,等. 中国城市蔓延的时空演变格局及其影响因素[J]. 经济地理,2021,41(3):77-85.

[19] 孙瑜康,李国平,席强敏. 技术机会、行业异质性与大城市创新集聚——以北京市制造业为例[J]. 地理科学,2019,39(2):252-258.

[20] 董瑶嘉,王甫园,王开泳. 行政区划调整对城市空间扩展的影响与驱动力——以长春市九台撤市设区为例[J]. 中国科学院大学学报(中英文),2024,41(5):612-624.

[21] 张亚球,姜放,纪梦达,等. 基于遥感指数的区县级生态环境评价[J]. 干旱区研究,2020,37(6):1598-1605.

[22] 魏雨涵,钱建平,范伟伟,等. 基于RSEI的漓江流域生态环境质量动态监测[J]. 中国水土保持科学(中英文),2021,19(1):122-131.

[23] 石天戈,时卉. 基于地理探测器的乌鲁木齐城市扩张特征与时空驱动因素分析[J]. 干旱区地理,2021,44(3):867-876.

[24] 蓝斐芳,付波霖,何宏昌,等. 基于多时相夜间灯光和光学遥感的广西城市格局时空动态变化[J]. 桂林理工大学学报,2022,42(2):425-437.

[25] 蔡恩香,寇紫薇,孟珂,等. 1990—2020年郑州城市扩张时空特征分析[J]. 河南农业大学学报,2022,56(4):674-684.

[26] 李爽,张晓虹. 1843—2020年上海城市扩张时空过程及机理分析[J]. 地理学报,2024,79(5):1286-1302.

[27] 胡苗苗,闫庆武,李建辉. 基于DMSP/OLS和NPP/VIIRS夜光影像的中原城市群城市扩张的时空演变及驱动力分析[J]. 自然资源遥感,2024,36(1):189-199.

[28] 邓保彪,王雅琪,翁睿,等. 快速城镇化背景下迅速扩张型城市空间演化时空特征及驱动力机制——以合肥市为例[J]. 资源开发与市场,2019,35(10):1280-1287.

[29] 殷彪,汪丽君,宋苑震. 形态演变和驱动发展:天津城市空间拓展与影响因素研究[J]. 现代城市研究,2024(2):1-8.

[30] 黄潞,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.

[31] 王雅竹,段学军,杨清可,等. 近30年江苏省建设用地扩张的时空特征、模式与驱动因素研究[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(7):1531-1540.

Analysis of the Spatio-temporal Evolution and Driving Mechanism of Urban Expansion in Qiannan Prefecture

XU Hongyan, ZHOU Yuxuan, GAO Yuan

(School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: Based on multi-temporal remote sensing and socio-economic data spanning from 1990 to 2020, methods including spatial pattern analysis and geographical detector was employed to conduct a study on the spatio-temporal characteristics and driving mechanisms of the expansion of urban construction land in Qiannan Buyei and Miao Autonomous Prefecture. The findings indicate that the scale of construction land has increased by 10.8 times. The expansion process is characterized by three distinct stages such as "acceleration-low-speed-high-speed". Spatially, the center of gravity has migrated in the "northwest-southeast" direction, and the spatial pattern has shifted from a concentrated state to a more dispersed one. This research reveals the interactive mechanism between the science-technology-industry transformation and spatial reconstruction in karst mountainous cities, thereby providing a scientific foundation for the optimization of regional territorial space.

Keywords: urban expansion; spatiotemporal evolution; driving mechanism; Karst mountainous region; geographical detector