

引用格式:王克晓,周蕊.近25年重庆主城区不透水面变化与驱动力分析[J].山地学报,2023,41(4):521-531.

WANG Kexiao, ZHOU Rui. Urban impervious surface changes in main urban areas of Chongqing, China and associated driving forces for the period of 1995—2020 [J]. Mountain Research, 2023, 41(4): 521-531.

近25年重庆主城区不透水面变化与驱动力分析

王克晓,周蕊*

(重庆市农业科学院 农业科技信息研究所,重庆 401329)

摘要:城市不透水面反映城市建设用地的利用强度和承载功能变化。不同城市的不透水面时空演化特征和空间分异机制因地貌不同而有所差异。重庆主城区是典型的“山城”城区,以往相关研究多关注城市建设用地,缺乏对城市不透水面的深入研究。把握重庆主城区不透水面的扩展演化过程及驱动力机制有助于理解其城市化发展进程,指导城区发展规划。本研究选取重庆主城区1995—2020年不同时期的不透水面数据,基于扩展变化测度指标、象限分析、景观格局指标以及地理探测器等方法,研究了不透水面时空变化特点及其驱动力因素。结果表明:(1)重庆主城区不透水面扩展速度和扩展强度持续增加,1995—2020年面积从125.08 km²增加到670.70 km²,年均扩展速度21.82 km²·a⁻¹,整体扩展强度指数达到17.45%;2015年以后,其扩展速度和强度均有所减缓,扩展强度下降为5.26%。(2)重庆市主城区不透水面的扩展方向主要为向北和向西发展,具有明显扩展优势的主要为渝北区和沙坪坝区;在1995—2000年、2000—2010年和2015—2020年三个时间段内,其扩展方式经历了内部填充—外向扩展—内部填充的转变,以东北和北向的扩展辐射范围最大为30 km,其次西部辐射范围达到25 km。(3)随着城市化进程发展,重庆主城区的不透水面斑块不断产生与融合,扩展过程仍处于不稳定状态,形状复杂度不断提升,斑块聚集度逐步上升。(4)主城区的不透水面主要分布在15°以下的缓坡区。主城区不透水面的空间分异是多因素共同作用的结果,人口密度、GDP等社会经济因素是重庆主城区不透水面分布分异的主要因素,高程、坡度等自然因素在一定程度上影响着城区不透水面的空间分异,但影响力相对较弱。本研究结果可为重庆主城区城市化和城区发展规划提供科学依据。

关键词:不透水面;时空特征;驱动力;重庆

中图分类号: P951

文献标志码: A

城市不透水面的时空格局变化反映了一个城市的发展水平^[1],是预测城市发展方向的风向标。明确城市不透水面的演变规律对揭示城市发展轨迹、完善用地结构、指导城市规划与建设具有重要意义^[2]。

随着遥感对地观测技术的发展,城市不透水面的遥感提取、时空变化及驱动机制等方面的研究已

经有了理论成果。例如,针对不透水面的遥感提取技术与方法,有代表性的包括影像范数结合差值指数与阈值分割算法^[3]、优化影像光谱指数和阈值的不透水面提取指数^[4]以及多尺度特征融合的深度学习方法^[5];在时空变化特征分析方面,引入不同密度等级的转移矩阵动态度和中位数中心^[6],采用扩展强度和景观指数^[7],结合不透水面平均中心、

收稿日期(Received date): 2022-12-19; **改回日期**(Accepted date): 2023-06-29

基金项目(Foundation item): 重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2021jsex-lyzxX0001)[Technology Innovation and Application Development Special of Chongqing(cstc2021jsex-lyzxX0001)]

作者简介(Biography): 王克晓(1986-),男,河南平顶山人,硕士,助理研究员,主要研究方向:资源环境遥感。[WANG Kexiao(1986-), male, born in Pingdingshan, Henan province, M.Sc., assistant professor of research, research on remote sensing of resources and environment] E-mail: 447215670@qq.com

* **通讯作者**(Corresponding author): 周蕊(1981-),女,硕士,研究员,主要研究方向:农业信息化。[ZHOU Rui(1981-), female, M.Sc., professor, specialized in agricultural informatization] E-mail: 12087836@qq.com

标准差椭圆与景观格局指数^[8],综合空间形态分析、等扇距分析及分形分析^[9];在土地覆盖类型变化驱动力分析方面,主要是考虑自然环境、人口、经济、政策和城市生态环境因素与不透水面变化的关系^[10-11],借助灰色关联分析^[12]、地理加权回归^[13]、结构方程模型^[14]、地理探测器^[15]等方法开展驱动力分析,以确定不同驱动因子对不同土地覆盖类型的影响程度。在实际应用方面,基于上述方法,学者们在多个城市已进行有益尝试:基于时序 Landsat 影像获取,利用扩张速率与强度、核密度、中位数中心点指标分析莆田市城区多年不透水面其时空变化特征,并结合灰色关联度模型探究其相关驱动因素^[16];利用光谱混合分解法对多期 Landsat 影像开展西安市^[11]和哈尔滨市中心城区^[17]不透水面提取、时空变化特征以及驱动因素分析。

不同城市的不透水面时空演化特征和空间分异机制会因所依托地貌不同而有所差异。重庆主城区是典型的“山城”地貌,加上长江、嘉陵江两大江流交汇于此,使其城市发展形态和不透水面的扩展变化呈现出独特性^[18]。自 1997 年重庆直辖,区域经济快速发展,主城区城市化进程加快,城镇建设用地和城市不透水面持续扩张。但已有研究^[18-21]关注点多集中在城市建设用地整体的时空变化,没有从不透水面时空格局变化的角度来认识城市发展进程。探讨重庆主城区不透水面的扩展特点、时空格局变化、驱动力因素及其分布的空间分异,有助于深入了解建设用地利用强度和承载功能变化,理解城市发展路径,科学把握城市扩展演化过程及驱动机制。

本研究利用 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年不同年份的不透水面数据,借助扩展变化测度指标、象限分析以及景观指数方法,分析重庆市直辖后主城区近 25 年来不透水面的时空变化特点,并基于地理探测器模型量化不同驱动因素之间的交互作用及其对不透水面空间分布的贡献率,探讨主城区不透水面的时空格局演变及其驱动关系,为重庆主城区城市化建设和发展规划提供科学依据。

1 研究区与数据源

1.1 研究区概况

重庆市位于长江上游地区(105°11'~110°11'

E、28°10'~32°13'N),主城区面积 5273 km²(图 1),以“山城”地貌为主,分布有缙云山脉、中梁山脉、铜锣山脉和明月山脉四大山脉,长江、嘉陵江两大江流交汇于此,地势起伏较大,地形切割破碎。重庆主城区作为国家中心城市,是我国西南地区经济发展的重要支撑点之一。

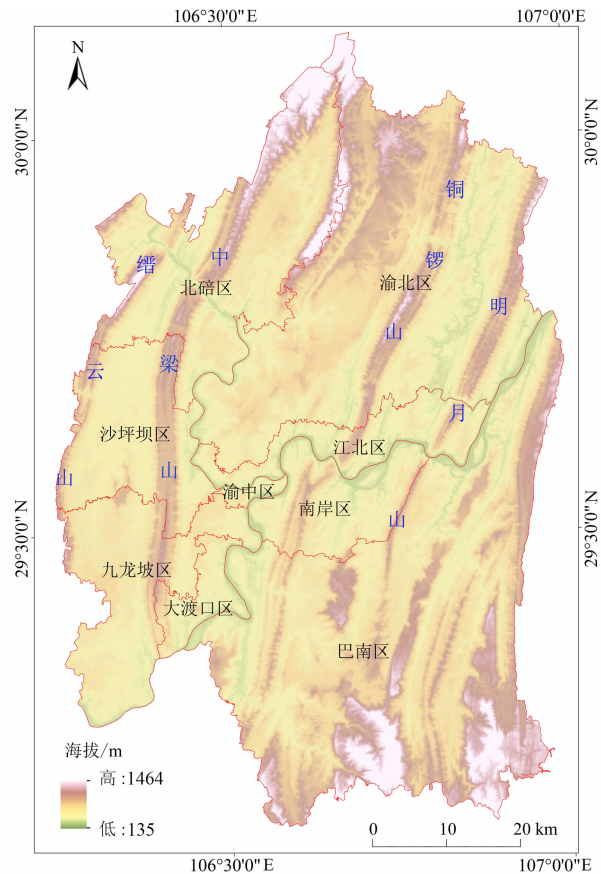


图 1 重庆主城区位置图

Fig. 1 Location of the main urban area, Chongqing, China

1.2 数据源获取

土地利用类型数据源采用重庆市 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年六个时间节点的 30 m 分辨率的中国逐年土地覆盖数据集(annual China Land Cover Dataset, CLCD)(<https://doi.org/10.5281/zenodo.5816591>)。该数据集是基于 GEE(Google Earth Engine)上可获得的 Landsat 数据,根据反射光谱、光谱指数、物候和地理位置等时空特征,结合随机森林分类器得到分类结果,主要包括农田、草地、不透水面、荒地、水体、灌木、冰雪、森林和湿地九种土地利用类型。其中,不透水面的平均精度得分超过 72%,总体精度达到 80%,且与现

有的土地覆被专题产品表现出良好的一致性^[22]。本研究先利用重庆主城区行政矢量边界对六期 CLCD 数据集进行裁剪,后通过地类编码提取获得城区不透水面空间分布。

为分析不透水面面积与经济发展和人口增长的相关性,本研究还采用了 1999—2020 年重庆主城区历年的 GDP 和人口规模数据,数据来源于对应年份的年鉴统计资料(https://tjj.cq.gov.cn/zwgk_233/tjn/)。为进一步分析其空间分异性,选取研究区的高程、坡度、人口密度和 GDP 等因子进行驱动力分析。其中,人口密度和 GDP 为 2019 年数据,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率均为 1 km;坡度数据基于 30 m 的 SRTM DEM 数据计算获取;对应的不透水面分布数据通过 2019 年的 CLCD 土地覆盖数据集提取。

2 研究方法

2.1 不透水面扩展变化测度指标

为反映研究区域内不透水面随时间的扩展变化程度,分别选取扩展速度指数 v 和扩展强度指数 R 表示研究时段内平均每年增加的不透水面面积和增长率^[10],计算公式如下:

$$v = \frac{U_b - U_a}{T} \quad (1)$$

$$R = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中, U_a 、 U_b 分别为研究初期和末期的城区不透水面增长面积; T 为年份间隔。

2.2 象限方位分析法

为比较重庆主城区在不同方向上的不透水面变化差异,以重庆渝中区解放碑为中心,东西方向、南北方向分别为横轴和纵轴,按照八个方向绘制主城区不同时期的不透水面面积变化雷达方位图,分析主城区不同方向的不透水面变化情况。

2.3 景观格局指数

为了解主城区不透水面在空间尺度上的景观分布格局变化,选取包括斑块数量(NP)、斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、斑块平均大小(AREA_MN)、总边界长度(TE)、平均边界密度(ED)、景观形状指数(LSI)、斑块平均邻接指数(CONTIG_MN)

和聚集度指数(AI)九个景观指标来反映的重庆主城区不透水面的空间分布格局情况。其中,NP、PD、LPI 和 AREA_MN 指标用于衡量不透水面斑块的扩张与融合情况,TE、ED、LSI 用于比较不透水面斑块整体形状的复杂程度,CONTIG_MN 和 AI 两个指标来衡量不透水面斑块间的联系性和聚集力^[23]。上述指标的计算通过景观分析软件 FRAGSTATS 4.2 完成,各指标计算方法及其生态学意义可参考该软件帮助文档。

2.4 地理探测器

地理探测器包括因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测四部分,其原理和计算公式见文献[24],可用于探测城区不透水面扩张影响因素的差异。本研究基于其“因子探测”和“交互作用探测”功能,以不透水面积分布为探测因变量,以驱动因子为自变量,进行单因子贡献率及因子交互作用定量分析,探讨重庆主城区不透水面分布的空间分异特点,从而明确各因子对其空间分异的相对重要性。

本研究选用高程、坡度、GDP 以及人口密度等因素进行驱动力分析。利用自然断裂法将高程、人口密度、GDP 等数值型数据进行五级离散化,坡度数据按照《第三次全国国土调查技术规程(TD/T 1055—2019)》^[25]进行五级离散化;然后通过间隔 1 km 的格网点对上述因子图层和 CLCD 土地覆盖图层进行多值提取,并对格网点中的土地覆盖类型属性进行二值处理(1 代表不透水面,0 表示其他);最后基于不透水类型格网点和各量化因子开展地理探测分析。

3 结果与分析

3.1 不透水面面积动态扩展变化分析

如表 1 所示,重庆主城区 1995—2020 年不透水面面积呈现逐渐增长趋势,总面积共增加 545.62 km²,增长了 4.36 倍,在主城区中面积占比提升至 12.72%,年均扩展速度 21.82 km²·a⁻¹,整体扩展强度指数达到 17.45%。其中,1995—2000 年,伴随着直辖后城市化的发展,主城区不透水面面积快速增长,扩展速度 10.39 km²·a⁻¹,扩展强度 8.31%;2000—2015 年期间,随着城市化进程的加快,不透水面积扩展速度随之稳定增加,年扩展强度

表 1 研究区不透水面面积及其变化

Tab. 1 Change of impervious surface area in the study area

年份	不透水面积/km ²	所占比例/%	时间段	扩展速度/(km ² ·a ⁻¹)	扩展强度/%
1995	125.08	2.37	—	—	—
2000	177.04	3.36	1995—2000 年	10.39	8.31
2005	252.38	4.79	2000—2005 年	15.07	8.51
2010	367.58	6.97	2005—2010 年	23.04	9.13
2015	531.08	10.07	2010—2015 年	32.70	8.90
2020	670.70	12.72	2015—2020 年	27.92	5.26

保持在 8.50% 以上;2015 年以后,重庆主城区城市建成区扩展步伐放缓,不透水面扩展速度随之减小,扩展强度指标下降为 5.26%。

3.2 不透水面象限分布及拓展方向分析

如图 2 和图 3 所示,重庆市主城区在不同时间段内不透水面的扩展侧重方向变化不大,整体呈现向北和向西发展的趋势。1995—2000 年,不透水面的扩展方向集中在西南—西—西北方向,主要分布在九龙坡区、沙坪坝区和渝北区等距离象限中心 15 km 范围的近距离地带内;2000—2005 年和 2005—2010 年,主城区不透水面的主要扩展方向均在北—西北—西方向,以渝北区、北碚区和沙坪坝区为主,辐射范围扩大到距离中心 30 km 范围;2010—2015 年,不透水面扩展变化主要在东北、北、西、西南、东等五个方位表现为外向式扩展,并以东北和北向的扩展幅度最大,对应分布于渝北区和江北区,而

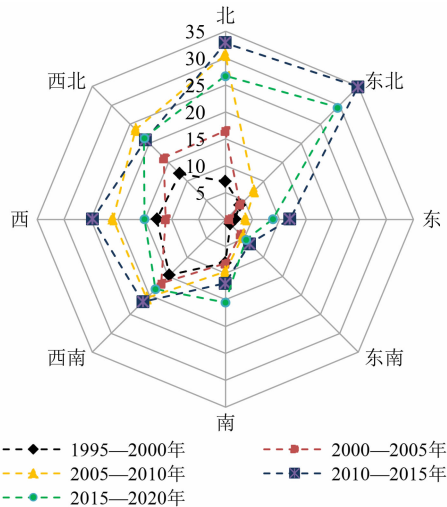


图 2 1995—2020 年研究区不透水面变化雷达图
Fig. 2 Radar map of impervious surface change in the study area in 1995—2020

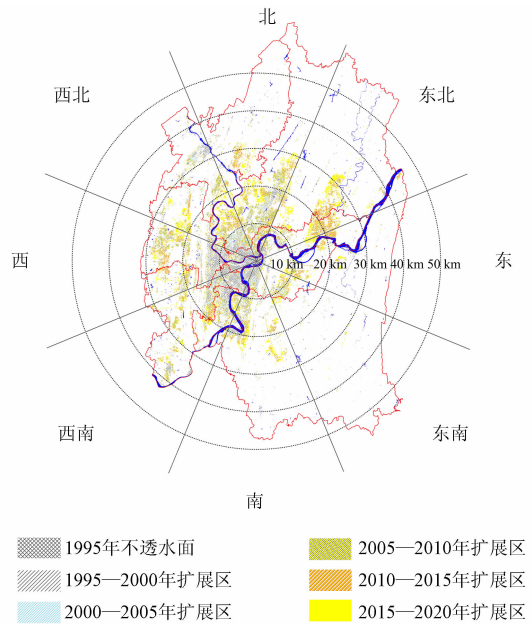


图 3 研究区不透水面时空变化图
Fig. 3 Map of spatiotemporal variation of impervious surface in the study area

在西北方位表现为内部填充式扩展。2015—2020 年,除南向为外向扩展外,其他七个方位均为内部填充式扩展,面积变化最大的仍是渝北和沙坪坝两区。总体上看,重庆市主城区不透水面面积最大的三个辖区为渝北区、九龙坡区和沙坪坝区,但具有明显扩展优势的分别是位于北—东北方向的渝北区和西向的沙坪坝区,这一扩展方向与已有研究^[18-19]关于重庆城市用地重心的变化方向基本一致。

3.3 不透水面要素景观格局分析

如表 2 所示,不透水面斑块数量 (NP)、斑块密度 (PD)、最大斑块指数 (LPI)、斑块平均大小 (AREA_MN) 指标逐年增大,说明期间不透水面斑块大量出现,且与周边斑块有不断融合的迹象,印证

表 2 1995—2020 年研究区不透水面景观格局指标变化

Tab. 2 Changes of landscape pattern indicators of impervious surface in the study area in 1995—2020

年份	NP/个	PD/(个/km ²)	LPI/%	AREA_MN	TE/km	ED/(个/ha)	LSI	CONTIG_MN/%	AI/%
1995	5187	0.95	0.28	2.41	3470.73	6.35	77.57	0.23	79.39
2000	5071	0.93	0.88	3.49	4133.40	7.56	77.60	0.26	82.67
2005	5523	1.01	1.84	4.57	5514.12	10.09	86.72	0.27	83.77
2010	6282	1.15	3.32	5.85	7464.75	13.66	97.30	0.29	84.90
2015	7921	1.45	4.19	6.70	10886.07	19.92	118.10	0.30	84.93
2020	8367	1.53	4.83	8.02	12801.54	23.42	123.63	0.32	85.77

了在大量新兴建设区出现的同时,城市不透水面斑块不断融合扩大的现象。总边界长度(TE)、平均边界密度(ED)以及景观形状指数(LSI)变化趋势基本一致,呈现增加的态势,说明重庆主城区不透水面的形状伴随着不透水面斑块的融合,复杂度在逐渐上升。尤其 2010 年以后,TE、ED 和 LSI 三个指标的上升幅度更加显著,说明此阶段不透水面的扩张并未稳定,主城区的城市发展仍处于快速发展时期。平均邻接指数(CONTIG_MN)和聚集度指数(AI)一致增大,说明 1995—2020 年重庆主城区不透水面之间的联系越来越紧密,不透水面间的聚集度逐步上升。

4 不透水面扩展变化驱动力分析

4.1 不透水面变化驱动因素分析

4.1.1 自然条件

重庆主城区被缙云山脉、中梁山脉、铜锣山脉和明月山脉等四大山脉切割,加上长江与嘉陵江两江交汇,严重限制了主城区建成区的连片发展,也成为影响重庆主城区不透水面扩展方向的主要原因。铜梁山脉将主城区东部和南部分割开来,使得重庆主城区的地势呈南北走势。地势相对平坦的北面,成为城市扩张的理想方向,也是不透水面扩展的主要方向。另外,位于主城区西侧的处于缙云山山脉与中梁山山脉之间的南北条状地势平坦区也是不透水面的主要扩展区域。

基于地形分布指数^[26]的 2020 年重庆主城区不透水面在坡度梯度区间上的统计信息(表 3)显示:不透水面中有 40.33% 分布于 2°~6°,41.12% 分布于 6°~15°,在 0°~2°内的不透水面占 10.90%。可

见,主城区不透水面的分布优势主要集中在 15°以下的缓坡区。不透水面的分布指数在坡度梯度上总体呈现减少趋势,分布指数均大于 1 的区域主要集中在 15°以内的缓坡区。因此,坡度是影响重庆主城区不透水面扩展规模的主要影响因素。

表 3 研究区不透水面坡度梯度分布指数

Tab. 3 Slope gradient distribution index of impervious surface in the study area

坡度梯度/ (°)	不透水面分布 面积/km ²	占不透水总 面积比例/%	分布指数
0~2	73.10	10.90	2.02
2~6	270.44	40.33	1.98
6~15	275.78	41.12	1.01
15~25	47.47	7.08	0.28
25 以上	3.80	0.57	0.07

4.1.2 经济发展

经济发展是城市化的主要动力,不透水面的扩展是城市化发展的一种重要体现。重庆市是我国西部唯一的直辖市。25 年以来,在国家“西部大开发”战略和“一带一路”等一系列政策的支持下,主城区经济快速发展,城市化进程明显加快,不透水面不断扩张。主城区 1999—2020 年的 GDP 数据与对应年份不透水面面积的相关性决定系数 R^2 为 0.986(图 4a),二者具有极强的相关性,说明经济的发展是重庆主城区不透水面扩展的重要推动力量。

4.1.3 人口增长

人口增长是城市化的重要表现,也是推动城市发展的重要推动力量,对城区不透水面的变化有重要影响^[9]。在城市经济发展的吸引和刺激下,城市

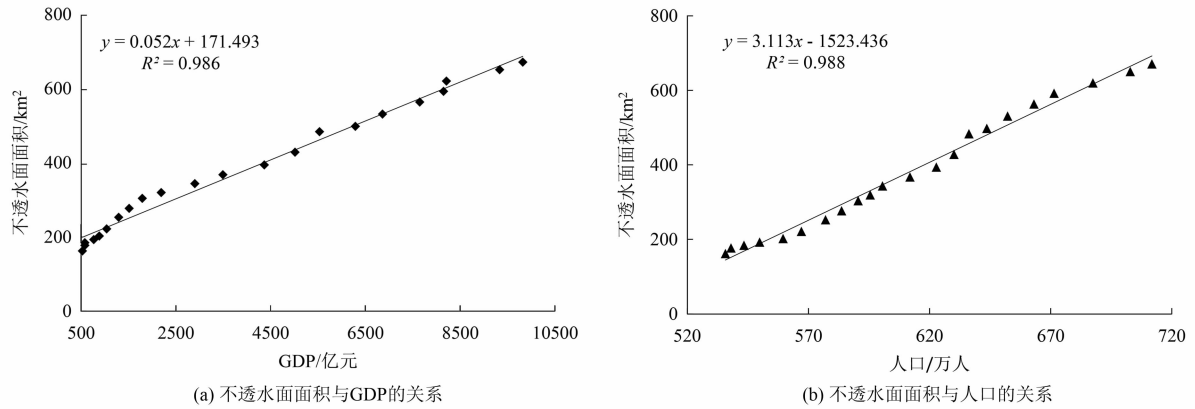


图 4 不透水面面积与城区 GDP 和人口数量的关系

Fig. 4 Relationship between impervious surface area and urban GDP and population

人口持续增长,带动住房、道路等基础设施以及教育、医疗等公共服务设施的建设需求,从而导致城区不透水面面积的增加。主城区 1999—2020 年人口数据与对应年份不透水面面积的相关性决定系数 R^2 为 0.988(图 4b),人口增长与不透水面扩展态势高度同步。重庆主城区人口的逐年增加有力推动了城市不透水面的扩展。

4.1.4 规划政策

2000 年,横跨北碚区、渝北区和江北区的重庆北部新区设立,形成了四个工业园、四个商务区和三个科技园的产业功能布局,重庆城市发展重心开始向北偏移,相应辖区的不透水面面积明显增加。2010 年,两江新区批准成立,加快了重庆向北发展的序幕。同年,两江新区东北部的龙兴工业园和鱼复工业园相继开始建设。与此同时,2003 年位于缙云山和中梁山山脉槽谷地带的重庆大学城片区批准建设,2010 年沙坪坝区西部新城正式成立,2015 年市级重大文化产业项目落地西部新城,伴随着这一系列城市发展规划实施,如今的重庆大学城片区已成为西部地区重要的科学研究中心和科技创新基地。2019—2020 年,随着西部(重庆)科学城和成渝地区双城经济圈国家战略的启动,重庆向西发展势头正盛。综上所述,重庆主城区向北和向西发展的政策是主城区不透水面扩张方向的重要推动因素。

4.2 驱动因子对不透水面分布的空间分异分析

4.2.1 单驱动因子的解释力分析

由于政策因素难以在空间上进行量化,本研究

选用高程、坡度、GDP 以及人口密度等因素进行驱动力分析。如表 4 所示,各驱动因子按照 q 统计量由大到小排序为人口密度、GDP、高程、坡度,且各因子对主城区不透水面分布的影响均通过显著性检验($P=0$)。从驱动因子对不透水面的分布影响来看,人口密度的解释力最高为 0.20,明显占主导作用;其次是 GDP,其解释力为 0.16,是影响不透水面空间分异的重要因素;高程和坡度等自然因素的解释力分别为 0.07 和 0.06,一定程度上影响着不透水面的空间分异。因子探测结果表明,在重庆主城区社会经济因素对不透水面的空间分异影响程度较大,而高程与坡度等自然因素的影响相对较弱,但其因子探测结果能够通过显著性检验,这也反映了重庆主城区典型的“山城”地貌特色。

表 4 研究区不透水面空间分异驱动因子探测结果

Tab. 4 Detection results of driving factors of impervious surface in the study area

因子探测指标	驱动因子			
	高程	坡度	GDP	人口密度
q 统计量	0.07	0.06	0.16	0.20
P 值	0.00	0.00	0.00	0.00

4.2.2 交互因子的解释力分析

交互探测可以量化驱动因子共同作用对因变量的解释力。如表 5 所示,人口密度与坡度交互作用对不透水面空间分异的影响最强,因子交互探测的 q 值最高为 0.23;交互程度对不透水面空间分异作

用的影响程度较高的还有人口密度 \cap 高程(q 值 0.21)、人口密度 \cap GDP(q 值 0.20)、GDP \cap 高程(q 值 0.19)、GDP \cap 坡度(q 值 0.21),而高程 \cap 坡度两个自然因子交互作用的 q 值为 0.10。上述因子交互作用表明,人口密度与 GDP 等社会经济因素是影响重庆主城区不透水面分布的主要因素,而自然因素对其分布的影响却有限。同时,任意两个因子的交互作用下均表现出 $q(x_i \cap x_j) > \max(q(x_i), q(x_j))$,表明上述因子两两交互作用的类型主要为交互增强型,说明引起主城区不透水面空间分异结果的并非单一影响因子,而是多因素共同作用形成。

表 5 研究区不透水面空间分异驱动因子交互探测结果

Tab. 5 Interactive detection results of driving factors of impervious surface in the study area

驱动因子	各驱动因子交互作用 q 值			
	高程	坡度	GDP	人口密度
高程	0.07	-	-	-
坡度	0.10	0.06	-	-
GDP	0.19	0.21	0.16	-
人口密度	0.21	0.23	0.20	0.20

5 讨论

5.1 山地城市不透水面扩展演化过程的独特性

城市不透水面的扩展强度、方向和时空结构特征可以体现出城市的发展水平及其社会经济发展状况。自重庆市直辖后,重庆市主城区不透水面积的扩展速度和扩展强度持续增加。2015 年以后,主城区不透水面扩展速度和强度均有所放缓,但 GDP 产值仍然保持在高速增长。这是响应国家经济内涵式发展要求,经济发展方式由城市规模和速度效益向城市质量和品质效益转变取得的成效。近 25 年来,重庆市主城区在不同时间段内不透水面的扩展侧重方向变化不大,但不同时期不透水面扩展方式有所不同,扩展方式也先后经历了内部填充—外向扩展—内部填充的转变过程。这种在扩展方向上的差异性和方式上蔓延类型是与之前学者关于重庆主城区建设用地扩展方向^[20]和山地城市建设用地扩展蔓延方式^[21]的研究结果是一致的,而又与平原城市

建设用地的蔓延方式^[27]有所不同。重庆市主城区不透水面联系愈加紧密,斑块聚集度不断上升,反映出主城区城市建设用地在多中心模式形成的同时,也在有组织地扩张。

5.2 山地地貌对城市不透水面空间分布形态的重塑

自然条件对于城市建设用地的扩张起着关键作用。随着城镇化水平的提升,经济、人口条件的作用逐渐突显,控制着建设用地的扩张规模和方向等^[28]。本研究基于地理探测法分析了高程、坡度等自然因素与人口密度、GDP 等社会经济因素对主城区不透水面分布的影响程度,其驱动因子的重要性与通过灰色关联分析得出的重庆市主城区建设用地扩展驱动因子^[20]的结果一致。在人口增长与经济发展两大推动因素的驱使和相关城市开发政策的指引下,受限于“山城”地貌和“两江”两大主要自然环境因素,主城区不透水面空间分布呈现出“山水之城”的独特形态。

5.3 不透水面变化驱动机制对城市规划政策的指导

2015 年以后,重庆主城区不透水面的扩展速度和扩展强度有所减弱,扩展模式主要表现为内部填充式,景观格局上表现出不透水面斑块的扩张、融合和聚集度的上升,GDP 产值和所吸纳的人口规模依然处于连续高速增长状态。结果说明粗放式城市开发模式不再是城市经济发展和人口城市化的唯一途径。在国家可持续发展要求下,规划政策和产业政策是引领城市未来发展的关键环节。当前,西部(重庆)科学城连片规划建设高新产业基地,加紧引进高科技人才发展高新科技产业,正是开发城市未来经济发展潜力,提升城市未来竞争力的重要决策。

6 结论

(1) 近 25 年来,重庆主城区不透水面从 125.08 km²增加到 670.70 km²,增大 4.36 倍,在主城区中的面积占比提升至 12.72%,年均扩展速度 21.82 km² · a⁻¹,扩展强度指数为 17.45%。2015 年以后,重庆主城区城市建成区扩展步伐放缓,不透水面扩展速度随之减小,扩展强度有所下降。

(2) 近 25 年来,重庆主城区不透水面扩展方向整体呈现向北和向西发展趋势,具有明显扩展优势

的主要为渝北区和沙坪坝区。在 1995—2000 年、2000—2010 年和 2015—2020 年的三个时间段内,主城区不透水面的扩展方式经历了内部填充—外向扩展—内部填充的转变过程。

(3) 近 25 年来,随着城市化的不断发展,重庆主城区不透水面斑块不断经历新生与融合的周期过程,扩展仍不稳定,复杂度不断提升,城市发展处于快速发展期,联系愈加紧密,斑块聚集度逐步上升,城市凝聚力不断提高。

(4) 重庆的“山城”地貌和“两江”是影响重庆主城区不透水面扩展方向的主要原因,坡度是影响重庆主城区不透水面扩展规模的主要限制因素,分布在 15°以下缓坡区的不透水面占 81.45%;经济发展规模与人口数量是推动主城区不透水面扩展的主要驱动因素,历年 GDP、人口规模与对应不透水面面积的相关性决定系数 R^2 分别为 0.986 和 0.988。社会经济因素是主城区不透水面空间分异的主要影响因素,高程、坡度等自然因素的影响相对较弱,主城区不透水面的空间分异是多因素共同作用的结果。规划政策对重庆主城区不透水面的扩张方向具有巨大推动作用。

参考文献 (References)

- [1] 李益敏, 杨舒婷, 吴博闻, 等. 昆明市呈贡区不透水面时空变化及驱动力分析[J]. 自然资源遥感, 2022, **34**(2): 136–143. [LI Yimin, YANG Shuting, WU Bowen, et al. Spatiotemporal evolution of impervious surface and the driving factors in Chenggong District, Kunming City [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, **34**(2): 136–143] DOI: 10.6046/zrzyyg.2020187
- [2] 刘美, 杜国明, 于凤荣, 等. 哈尔滨城乡梯度建设用地结构变化及不透水面遥感监测分析[J]. 遥感技术与应用, 2020, **35**(5): 1206–1217. [LIU Mei, DU Guoming, YU Fengrong, et al. Remote sensing monitoring and analysis of urban-rural gradient construction land and impervious surface in Harbin [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, **35**(5): 1206–1217] DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.5.1206
- [3] 段潘, 张飞, 刘长江. 基于 Sentinel-2A/B 的新疆典型城市不透水面提取及空间差异分析[J]. 遥感学报, 2022, **26**(7): 1469–1482. [DUAN Pan, ZHANG Fei, LIU Changjiang. Extraction of the impervious surface of typical cities in Xinjiang based on Sentinel-2A/B and spatial difference analysis [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, **26**(7): 1469–1482] DOI: 10.11834/jrs.20210174
- [4] 崔雯卓, 林晨, 陈曦, 等. 半城市化地区不透水面遥感提取优化方法研究[J]. 地理与地理信息科学, 2022, **38**(5): 31–39. [CUI Wenzhuo, LIN Chen, CHEN Xi, et al. Optimization method of remote sensing extraction of impervious surface for peri-urbanized areas [J]. Geography and Geo-Information Science, 2022, **38**(5): 31–39] DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2022.05.005
- [5] 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] DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.4.0811
- [6] 宋小琪, 林志奎. 2003—2019 年厦门市不透水面时空演变特征[J]. 亚热带资源与环境学报, 2022, **17**(1): 79–86. [SONG Xiaqi, LIN Zhilei. Spatiotemporal evolution characteristics of impervious surface in Xiamen City during 2003 and 2019 [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2022, **17**(1): 79–86] DOI: 10.19687/j.cnki.1673-7105.2022.01.011
- [7] 王姗姗, 蒲英霞, 李升峰, 等. 利用长时序流域不透水面数据集探索城市增长模式——以秦淮河流域为例[J]. 遥感技术与应用, 2022, **37**(3): 739–750. [WANG Shanshan, PU Yingxia, LI Shengfeng, et al. Exploring the urban growth patterns using long-time series impervious surface dataset in the Qinhuai River Basin [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, **37**(3): 739–750] DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.3.0739
- [8] 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] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.027
- [9] 沈非, 袁甲, 黄薇薇, 等. 基于地学信息图谱的合肥市城市扩展时空特征及驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(2): 202–211. [SHEN Fei, YUAN Jia, HUANG Weiwei, et al. Analysis on spatiotemporal characteristics and driving forces of Hefei urban expansion based on geo-informatic map [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, **24**(2): 202–211] DOI: 10.11870/cjlyzyhj2015.2004
- [10] 尹振南, 周廷刚, 李洪忠, 等. 粤港澳大湾区不透水面变化及城市扩展研究[J]. 地理与地理信息科学, 2021, **37**(2): 106–113. [YIN Zhenan, ZHOU Tinggang, LI Hongzhong, et al. Study on impervious surface change and urban expansion of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Geography and Geo-Information Science, 2021, **37**(2): 106–113] DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2021.02.015
- [11] 周鹏, 谢元礼, 高志远, 等. 西安市不透水面的变化及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2020, **40**(3): 274–281. [ZHOU

- Peng, XIE Yuanli, GAO Zhiyuan, et al. Changes and driving forces of impervious surfaces in Xi'an City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, **40**(3): 274 – 281] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.040
- [12] 吴玉刚. 华北平原农地利用变化及驱动力分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2018, **39**(6): 160 – 164. [WU Yugang. Analysis on agricultural land use changes and driving forces in North China Plain [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, **39**(6): 160 – 164] DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20180624
- [13] 赵昊, 刘平辉. 鄱阳湖生态经济区土地城镇化时空格局特征与驱动因素分析[J]. *江西农业学报*, 2019, **31**(1): 98 – 105. [ZHAO Hao, LIU Pinghui. Analysis of spatio-temporal pattern characteristics and driving factors of land urbanization in Poyang Lake ecological economic zone [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2019, **31**(1): 98 – 105] DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2019.01.17
- [14] 许冬凡, 张加龙, 刘钱威, 等. 西南省会城市扩展时空变化及驱动因素分析[J]. *科学技术与工程*, 2022, **22**(20): 8616 – 8622. [XU Dongfan, ZHANG Jialong, LIU Qianwei, et al. Analysis of the extended spatial and temporal changes of southwest provincial cities [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, **22**(20): 8616 – 8622]
- [15] 赵小凤, 刘梦丽, 王柏源. 基于地理探测器的城市建设用地规模时空差异及影响因素分析[J]. *中国土地科学*, 2018, **32**(5): 29 – 35. [ZHAO Xiaofeng, LIU Mengli, WANG Baiyuan. Spatio-temporal disparity of urban construction land and its impact factors in China based on geodetector [J]. *China Land Science*, 2018, **32**(5): 29 – 35] DOI: 10.11994/zgtdkx.20180504.132327
- [16] 许承权, 白雅晴, 田玉刚, 等. 基于 UCI 指数的 1988—2021 年莆田市城区不透水面时空演变分析[J]. *地域研究与开发*, 2023, **42**(1): 174 – 180. [XU Chengquan, BAI Yaqing, TIAN Yugang, et al. Spatio-temporal evolution analysis of impervious surface in Putian City from 1988 to 2021 based on UCI index [J]. *Areal Research and Development*, 2023, **42**(1): 174 – 180] DOI: 10.3969/j.issn.1003-2363.2023.01.029
- [17] LI Miao, ZANG Shuying, WU Changshan, et al. Spatial and temporal variation of the urban impervious surface and its driving forces in the central city of Harbin [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, **28**(3): 323 – 336. DOI: 10.1007/s11442-018-1475-z
- [18] 国洪磊, 周启刚. 基于 RS 和 GIS 的城市用地扩展的时空特征研究——以重庆主城区为例[J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2016, **33**(4): 35 – 42. [GUO Honglei, ZHOU Qigang. Study on temporal and spatial characteristics of urban land expansion based on RS and GIS—taking main city of Chongqing as an example [J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Sciences Edition)*, 2016, **33**(4): 35 – 42] DOI: 10.16055/j.issn.1672-058X.2016.0004.006
- [19] 李建辉, 周启刚, 陈倩, 等. 基于 RS 和 GIS 的建设用地变化研究——以重庆市主城九区为例[J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2012, **29**(1): 76 – 81 + 90. [LI Jianhui, ZHOU Qigang, CHEN Qian, et al. Research on the change of construction land based on RS and GIS—taking nine urban districts of Chongqing as an example [J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Sciences Edition)*, 2012, **29**(1): 76 – 81 + 90]
- [20] 嵇涛, 杨华, 何太蓉. 重庆主城区建设用地扩展的时空特征及驱动因子分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(1): 60 – 66. [JI Tao, YANG Hua, HE Tairong. Analysis on spatial-temporal characteristics and driving forces of urban construction land expansion in the metropolitan area of Chongqing [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(1): 60 – 66] DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201401009
- [21] 吕志强, 代富强, 周启刚, 等. 近 30 年来典型山地城市建设用地蔓延的时空特征分析[J]. *水土保持研究*, 2014, **21**(1): 193 – 197. [LYU Zhiqiang, DAI Fuqiang, ZHOU Qigang, et al. Spatiotemporal analysis of built-up area sprawl in a typical hilly city in the recent 30years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, **21**(1): 193 – 197] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2014.01.038
- [22] 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. DOI: 10.5194/essd-13-3907-2021
- [23] 程结海, 胡盼, 袁占良. 基于夜光遥感数据的中原城市群建成区时空变化分析[J]. *测绘通报*, 2022(9): 39 – 44. [CHENG Jiehai, HU Pan, YUAN Zhanliang. Analysis of temporal and spatial changes of the central plains urban agglomeration based on luminous remote sensing data [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(9): 39 – 44] DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2022.0261
- [24] WANG Jinfeng, LI Xinhui, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, **24**(1): 107 – 127. DOI: 10.1080/13658810802443457
- [25] 中华人民共和国自然资源部. 第三次全国国土调查技术规程: TD/T 1055-2019[S]. 北京: 地质出版社, 2019. [Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Technical regulation of the third nationwide land survey: TD/T 1055-2019 [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2019]
- [26] 李靖, 廖和平, 蔡进, 等. 山地城市边缘土地利用格局与变化的地形梯度分布特征分析——以重庆市巴南区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, **27**(2): 296 – 305. [LI Jing, LIAO

- Heping, CAI Jin, et al. Distribution characteristic on terrain gradient of land use pattern and change in the fringe of mountainous cities: A case study of Banan District in Chongqing [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(2): 296–305] DOI: 10.11870/cjlyzyhj201802008
- [27] 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. [CAI Enxiang, KOU Ziwei, MENG Ke, et al. Spatio-temporal characteristics of urban expansion in Zhengzhou from 1990 to 2020 [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2022, **56**(4): 674–684] DOI: 10.16445/j.cnki.1000-2340.20220706.001
- [28] 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. [ZHOU Lingnan, PAN An, LUO Fang. Spatial-temporal evolution and driving forces of construction land expansion in Chengdu from 1980 to 2018 [J]. *Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences)*, 2023, **43**(2): 186–194] DOI: 10.11929/j.swfu.202112065

Urban Impervious Surface Changes in Main Urban Areas of Chongqing, China and Associated Driving Forces for the Period of 1995—2020

WANG Kexiao, ZHOU Rui*

(*Institute of Agricultural Science and Technology Information, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China*)

Abstract: Urban impervious surface reflects the change in the utilization intensity and bearing function of urban construction land. Owing to distinct urban geomorphic features in different cities, urban impervious surfaces are characterized by distinct spatio-temporal evolution patterns and spatial differentiation.

The main urban area in Chongqing, China has a typical mountainous landform, where the most scientific attentions were paid to urban construction land planning; however, there were lacked of in-depth investigation into the changes in urban impervious surface, which could provide a new insight into the specific way how a mountain city developed substantially. It is quite necessary by a case study to grasp the evolution process and dynamic mechanism of impervious surface expansion in the main urban area of Chongqing for urban layout and orientation.

In this study, it collected impervious surface datasets from 1995 to 2020 for the main urban area of Chongqing; then it analyzed its spatiotemporal characteristics and relevant driving factors using extended change measurement index, quadrant analysis, landscape pattern index and GeoDetector.

Results were obtained as listed here. (1) The expansion speed and intensity of the impervious area in the main urban area of Chongqing had continued to increase since 1995; the area from 125.08 km² in 1995 increased to 670.70 km² in 2020 with an average annual expansion rate of 21.82 km² · a⁻¹; the overall expansion intensity index reached 17.45%. After 2015, the expansion speed and intensity slowed down, with decreasing expansion strength of 5.26%. (2) The expansion direction of the impervious surface showed a trend of development towards the north and west of Chongqing; comparably, Yubei District and Shapingba District had obvious expansion advantages. During 1995—2000, 2000—2010 and 2015—2020, the expansion mode went through a transformation from internal filling to external expansion, and then internal filling, with the maximum expansion radiation range of 30 km in the northeast and north directions, followed by a radiation range of 25 km in the west. (3) With the development of urbanization, impervious surface patches in the main urban area had undergone a continuous process of emerging and integrating, but the expansion process was still in an unstable state, with

constantly increasing complexity of their shapes, as well as gradually increasing of patch aggregations. (4) The impervious surface of main urban area was mainly distributed on gently sloping areas of below 15° . The spatial differentiation of impervious surfaces was the combined result of multiple. Social and economic factors, such as population density and GDP, were main factors contributing to the spatial differentiation of impervious surfaces; whereas natural factors such as elevation and slope affected the spatial differentiation of impermeable surfaces weakly.

This study helps to systematically grasp the spatiotemporal changes and driving mechanisms of the impervious surfaces, and further provide scientific basis for urbanization planning in Chongqing.

Key words: impervious surface; spatiotemporal characteristics; driving force; Chongqing

(责任编辑 钟雨倩)