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 L, Huang Y H, Song Z J, 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.

山地城市扩张与碳排放响应——以重庆主城为例

谢 玲[1,2],黄玉航[2],宋知劲[2],陈展图[1,2*],刘素红[3] (1.广西师范大学,广西生态脆弱区环境过程与修复重点实验室,广西 桂林 541006；2.广西师范大学环境与资源学院,广西 桂林 541006；3.北京师范大学地理学部,北京 100875)

摘要：基于重庆市主城区的土地利用数据、自然社会经济数据和“碳排放”数据,利用土地利用转移矩阵和斑块生成土地利用模拟(PLUS)模型,分析重庆市主城区 2000~2020 年间城市扩张的空间演化特征,模拟 2030 年自然发展情景、城市发展情景、生态保护情景的城市扩张,基于广义可加模型(GAM)解析 2019~2022 年研究区土地利用变化与碳排放响应关系,并计算了 3 种情景下碳排放总量.①2000~2020 年,研究区耕地减少了 928.82km^2,建设用地增加了 858.30km^2,大量的耕地转入了建设用地之中,水域、林地、草地处于一定程度上的动态变化之中.②城市扩张受自然和社会经济因素的综合作用,主要驱动因素有高程、距水域距离和距 1 级道路距离,外在政策驱动因素对城市扩张同样具有重要影响.③2020~2030 年重庆市主城区将继续处于快速城市化进程中,城市扩张方向以东向西向为主,林地、草地的扩张方向与城市扩张相反.④土地利用结构变化对碳排放的影响多呈现非线性关系,并可能存在潜在的阈值区,林地、水域、耕地变化与碳排放呈非线性,草地和建设用地变化与碳排放呈线性关系.⑤基于研究区 2030 年 3 种情景土地利用结构,估算 2030 年重庆主城区土地利用结构碳排分别为 5929.95, 6206.77, 5820.41 万 t C/a.

关键词：城市扩张；驱动力分析；PLUS 模型；GAM 模型；重庆市主城区；土地利用模拟；潜在生态冲突
中图分类号：X171.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)02-1099-15

Mountain city expansion and carbon emission response—A case study of the main urban area of Chongqing. XIE Ling[1,2], HUANG Yu-hang[2], SONG Zhi-jin[2], CHEN Zhan-tu[1,2*], LIU Su-hong[3] (1.Guangxi Key Laboratory of Environment Processes and Remediation in Ecologically Fragile Regions, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China；2.College of Environment and Resources, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China；3.Faculty of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China). *China Environmental Science*, 2026,46(2)：1099~1115

Abstract：Based on the land use data, natural socio-economic data and carbon emission data of the main urban area of Chongqing, the land use transfer matrix and the PLUS (Patching-generating Land Use Simulation) model were used to analyze the spatial evolution characteristics of urban expansion in the main urban area of Chongqing from 2000 to 2020. The development scenarios of the natural state, urban expansion and ecological protection in 2030 were simulated under the influence of endogenous driving factors. The response relationship between land use change and carbon emissions in the study area from 2019 to 2022 was analyzed based on the Generalized Additive Model (GAM), and the total carbon emissions under the three scenarios were calculated. From 2000 to 2020, the cultivated land in the study area decreased by 928.82km^2, while the construction land increased by 858.30km^2. A large amount of cultivated land was transferred to the construction land, and water areas, forest land and grassland underwent in a certain degree of dynamic change. Urban expansion is influenced by a combination of natural and socio-economic factors, with the main driving factors including elevation, distance from water areas and distance from Grade 1roads. External policy-driven factors also have a significant impact on urban expansion. From 2020 to 2030, the main urban area of Chongqing will continue to experience in a rapid urbanization process. The direction of urban expansion will mainly be eastward and westward, while the expansion direction of forest land and grassland will be opposite to that of urban expansion. The impact of changes in land use structure on carbon emissions is mostly nonlinear, and there may be potential threshold areas. Forest land, water and cultivated land show non-linear relationships, while grassland and construction land show linear relationships. Based on the land use structure of three scenarios in the study area in 2030, it is estimated that the carbon emissions of the land use structure in study area of Chongqing in 2030 will be 59.2995million tons of C/a, 62.0677million tons of C/a, and 58.2041million tons of C/a respectively.

Key words：urban expansion；driving force analysis；PLUS model；GAM model；main urban area of Chongqing；land use simulation；potential ecological conflict

收稿日期：2025-05-06
基金项目：国家自然科学基金(42293272);广西应急管理联合创新科技攻关项目(2024GXYJ043);广西哲社青年项目(24SHB002)

* 责任作者, 副教授, 879073498@qq.com

21 世纪以来,全球城市化进程不断加快,当前城市人口占比已超过世界人口的 50%,2050 年将会提升到 68%左右,预计 2030 年全球城市总面积将达到 125 万 km^2[1].城市化率的不断提高带来的是城市建设用地的不断扩张和土地非农化的加剧[2],据 IPCC 报告,建设用地产生的碳排放量占所有土地利用类型产生的碳排放量的 90%以上,也是碳排放最集中、强度最高的区域[3].“双碳”目标下,城市经济增长与“碳减排”双赢成为社会关注的焦点,受到政府和学界的关注.这对发展条件受地形、建筑用地和生态环境因素等制约的山地城市提出了更大的挑战,重庆市作为国家首批低碳试点城市,减少碳排放是其重点建设目标之一.

纵观城市扩张的现有研究,在研究内容上集中在时空特征[4-5]、驱动机制[6-8]、政策管控[9-10]等.在环境生态[11-12]影响方面包括大气污染[13-14]、水文过程与洪涝[15-16]、热岛效应[17]等多角度对城市扩张的研究.在研究方法上有利用面积—半径标度分析模型[18],构建城市增长指数[19],空间分析方法和空间重心转移模型[20],未来土地利用模拟(FLUS)模型[21-22]和反规划理论视角[23]监测和分析城市扩张过程.研究尺度上,涵盖单个城市[24]、城市群[25]、国家[26]乃至全球[27].基于各种研究方法对城市扩张背后驱动机制的探讨是政策管理的基础[28-29],现有研究多从自然地理[7]、社会经济[8]、政府行为层面[10]或综上的内外驱动力作用下的城市扩张的驱动机制剖析.同时,基于上述多因素驱动作用利用 Markov[30]、SD 模型[31]、CLUE、SLEUTH、FLUS 等元胞自动机[21,32-33]和多智能体模型(ABM)[22]等进行城市空间扩张多情景模拟也是近年来城市扩张的研究热点,各种情景下的模拟结果不尽一致,但每一种情境下的模拟均反映了特定情况下的城市扩张可能.

同时,国内外学者针对建设用地扩张对碳排放影响也开展了大量研究.集中在城市扩张和碳排放效率机制的研究[34-35],碳排放时空格局及特征分析[36-37],碳排放测算[38],碳排放影响因素及效应[39]等方面,近年来,“双碳”背景下,基于碳排放系数法,利用 CA-Markov、FLUS、InVEST 等模型对城市土地利用变化所带来的碳排放量、碳储量及碳收支等成为研究热点[30,40-42] ,基于碳排放系数法估算城市碳排放是普遍的研究方法,城市碳排放往往与土地利用变化有直接的关系,现有研究通过构建土地利用碳排放弹性系数来估算碳排放总量,但城市是一个复杂的巨系统,土地里利用数量与碳排放量并非线性变化关系,因此,碳排放估算的结果存在很大的不确定性[37,43].当前学者们对人-地关系矛盾较为突出的山地城市[6],土地利用变化引起的碳排放响应研究较少,重庆市作为国家西部地区乃至全国的中心城市,在快速城镇化过城中土地利用变化热点集中在主城区和工业主导区,经济发展、外部政策干扰是刺激土地利用变化的主要因素[44].近年来,重庆市的城市化水平显著提升,城市空间加速扩张,对于重庆市城市化核心区的城市扩张影响因素分析、城市土地利用变化对碳排放响应,未来城市扩张与生态红线和永久基本农田潜在冲突区识别,精准核算土地利用碳排放的数量是城市建设现实所需,但其研究却较为匮乏.

综上所述,现有研究在城市扩张模拟与碳排放关系方面已奠定了良好基础,但仍存在可深化之处:(1)对地形复杂、生态敏感的山地城市关注不足,其独特的“山-水-城”格局与人地关系可能呈现出不同的规律;(2)多侧重于线性相关分析,对土地利用与碳排放可能存在的复杂非线性机制挖掘不够深入;(3)模拟与机理分析偶有脱节,未能充分整合未来情景模拟与历史过程解析以相互验证.鉴于此,本研究的创新与理论贡献旨在:第一,揭示山地城市土地利用变化对碳排放的非线性驱动机制,深化人地系统耦合理论在山地语境下的应用;第二,尝试构建一个融合“格局模拟-过程解析-效应评估”的集成研究框架,为相关研究提供方法论参考;第三,阐明不同政策情景下山地城市空间增长的差异化碳效应,为山地城市的精细化空间治理与“双碳”目标协同提供理论支撑.这将为山地城市制定“碳减排”政策措施提供支撑,这对我国多山地城市的国情和高质量山地城市发展提供参考.

本研究在考虑内在外在驱动因素影响下,基于高精度、动态性 PLUS 模型模拟未来重庆市主城区空间扩张格局,分析城市扩张驱动机制,利用 2019~2022 年重庆市主城区土地利用变化和碳排放数据,采用 GAM 模型构建各地类土地利用变化和碳排放响应,从潜在土地利用冲突区域识别视角,探讨冲突区的空间分布,估算 2030 年研究区碳排

放.重庆市在“十二五”期间被列为国家中心城市,也是成渝经济圈的核心城市.本研究不仅丰富了城市增长边界划定和土地利用冲突分析案例研究,促进城市管理工作的发展,并为研究区的土地管理及规划建设提出相关建议,也为其他同类城市发展建设提供参考.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

重庆主城区是重庆市的政治、经济、文化、交通和金融中心,包括渝中、渝北、江北、九龙坡、大渡口、沙坪坝、巴南、南岸、北碚共 9 个行政区(图 1),主城辖区面积 5466km^2,2020 年常住人口 1034 万人,占比 32%(全市),GDP9822 亿元,占比 39%(全市)[23].地势呈东北高、西南低,地形以丘陵、山地为主,南北走向的缙云山、中梁山、铜梁山和明月山等山脉和长江、嘉陵江,形成“两江四山”的格局,也被称为“山城”.气候属亚热带季风气候,年均温 16~18℃,全年降水充沛.重庆市各产业发展势头良好,被列为首批“国家重点中心城市”,也是成渝经济圈的重要发展极,重庆市城镇化率不断提高,主城九区作为重庆市的母城发展迅速,2020 年,主城九区的城镇化率达 90%,近年来,城市扩张变化明显.

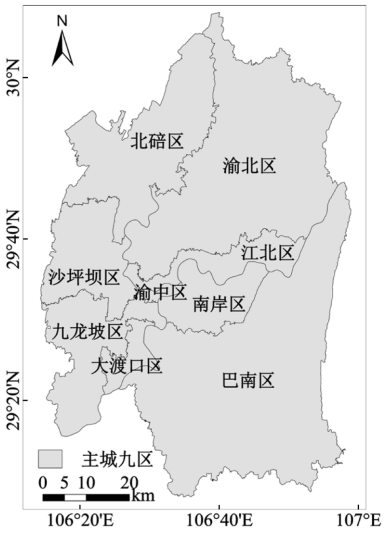


图 1　研究区示意

Fig.1　Map of the study area

审图号:GS(2020)4814 号

1.2　数据来源

主要数据来源:①2000、2010、2020 年土地利用数据来源于 GlobeLand30:全球地理信息公共产品(http://www.globallandcover.com/),土地利用类型分为耕地、森林、草地、水体和建设用地,分辨率为 30m.②1~4 级道路、高速公路、铁路、地铁站和政府驻地位置来源于 OSM(https://www.openstreetmap.org/),时间为 2020 年.③GDP、人口网格数据来源于全球变化科学研究数据出版系统(http://www.geodoi.ac.cn/),分辨率为 1km.④年降水量和气温等数据来源于国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn).⑤DEM 数据来源于地理空间数据云平台(https://www.gscloud.cn/).⑤永久基本农田生态保护红线专题数据来源于重庆市自然资源局.⑥碳排放数据为主城区 2019, 2020, 2021, 2022 年碳排放栅格数据,来源于全球实时碳数据(https://carbonmonitor-graced.com/index.html).所有数据都重采样至 30m 分辨率,并统一为 WGS 1984UTM Zone 48N 投影坐标系.

1.3　研究方法

1.3.1　土地利用转移矩阵　通过土地利用转移矩阵分析研究区在一定时期内各类土地利用的动态变化情况,以反映城市扩张的时空演化过程.该矩阵基于马尔科夫模型,对研究区 2000、2010 和 2020 年土地利用类型和数量的转移变化进行分析[16],其数学表达形式为:

$$\boldsymbol{S}_{ij}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_{11} & \boldsymbol{S}_{12} & \cdots & \boldsymbol{S}_{1n}\\ \boldsymbol{S}_{21} & \boldsymbol{S}_{21} & \cdots & \boldsymbol{S}_{2n}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \boldsymbol{S}_{n1} & \boldsymbol{S}_{n2} & \cdots & \boldsymbol{S}_{nn}\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{S}_{ij}$ 为研究期初与研究期末的土地利用状态,n 为土地利用的类型数.

1.3.2　PLUS 模型　斑块生成土地利用变化模拟模型(PLUS 模型)由中国地质大学地理与信息工程学院开发并广泛使用.PLUS 模型是基于 FLUS 模型开发的土地利用模拟模型,后者是基于人工神经网络和元胞自动机(CA)模型[45],前者是基于多类型随机补丁种子的 CA 模型.同时,PLUS 模型也优于传统的纯元胞自动机模型[46],因此本研究采用 PLUS 模型,对重庆市主城区土地利用多情景模拟.PLUS 模型包含土地扩张分析策略(LEAS)的规则挖掘模块和多类型随机斑块种子的 CA 模块(CARS),LEAS 模块是基于随机森林回归(RFR)模型来分析多种驱动因子

对不同地类变化的贡献程度,得出各类用地的发展潜力.本研究从自然驱动和社会经济驱动两方面共选择 14 个驱动因子包括:年平均气温、DEM、坡度、距水域距离、人口、GDP、距 1~4 级道路、高速、铁路、地铁站、政府的距离.随机森林回归算法可以很好的解决多变量多重共线性的问题,从自变量数据集中抽取随机样本,以确定 k 类土地利用在栅格Π上出现的概率 P_{i,k^d},表达式为:

$$P_{i,k^d}=\frac{\sum_{n=1}^{M} I=[h_n(x)=d]}{M} \tag{2}$$

式中:$d\in[0,1]$,当 d=1 时,代表其他土地利用类型转变为 k 类用地,当 d=0 时,表明土地利用类型转为除 k 以外的其他地类;x 是多个驱动力因子组成的向量,I 代表了决策树集的指示函数;$h_n(x)$是驱动因子向量 x 的第 n 个决策树的回归预测类型;M 为决策树的总数.CARS 模块是基于元胞自动机(CA)模型的派生模块,CA 具有自底向上建模、强大的并行计算和突出的时空动态表达能力,适合模拟复杂地理演变过程,已成为土地利用模拟研究的重要工具[46-47].PLUS 模型引入了一种新的规则挖掘策略和补丁生成机制,能更好地学习土地利用变化中的非线性规律.本研究采用 PLUS 模型对 2030 年重庆市主城区土地利用进行模拟预测.

城市土地利用变化往往是在各种自然环境和人为活动影响下对地表过程的改造,快速城市化背景下城市土地利用变化速度受到人类活动的强烈影响,导致生态空间被严重挤压,土地利用变化引起的碳排放数量惊人,与“碳减排”目标背道而驰.城市扩张是由多种驱动因子造成的,包括内在驱动因子和外在驱动因子(政策等因素),同时遴选城市扩张驱动因子需考虑因子易获取性、一致性、可量化性和空间差异性,本研究从自然环境和社会经济两方面选择 14 个驱动因子(图 2).本研究利用 PLUS 模型基于土地利用数据和驱动因素数据,得到各类用地转变的适宜性概率,并根据土地利用需求、各地类转换发生概率,通过约束性元胞自动机迭代运算模拟人类活动与自然影响下的重庆市主城区未来土地利用空间分布,依此划定城市增长边界,并进一步识别城市增长边界与生态红线及永久基本农田保护区的潜在冲突区域.需要特别说明的是,城市扩张同样受到宏观政策(如国土空间规划、生态保护制度)的深刻影响.然而,政策因素多为定性、规章性内容,难以直接转换为连续的栅格数据作为驱动因子.为解决这一问题,本研究通过两种途径将政策影响纳入模型:

(1)空间刚性约束:将收集到的生态保护红线、永久基本农田等矢量数据转换为二值限制栅格,在 CA 模拟环节直接禁止此类区域内的任何建设用地开发,从而将顶层空间政策作为硬性约束条件嵌入模型.

(2)参数化柔性表达:通过设置不同情景,并调整相应的土地利用转移概率与邻域权重,来模拟不同政策导向(如经济增长优先或生态保护优先)下的发展路径.因此,政策驱动虽未显现在驱动因子列表中,但其影响已深度融入本研究的整体模拟框架之中.

1.3.3 情景设置与限制性区域 重庆市作为国家中心城市及成渝地区双城经济圈的重要组成部分,其围绕国土空间优化与生态环境保护,陆续发布了《重庆市国土空间总体规划(2021−2035 年)》、《重庆市“十四五”生态环境保护规划》等政策文件,明确提出推动城镇高质量发展与生态空间刚性保护并重的发展模式.在此背景下,本研究结合重庆市社会经济演进特征及空间治理需求,参考既有研究成果与政策指引,构建 3 种未来发展情景(表 1),全面探讨重庆主城区未来土地利用变化方式.

自然发展情景:城市按照自身发展规律,依据历史土地利用变化和社会经济发展趋势自然向外发展.本情景作为未来模拟的基准参照,假设土地利用变化趋势与 2010~2020 年期间的土地利用变化趋势相同,无突发性政策干预,采用 PLUS 模型的 CA 模块模拟生成自然发展情景下 2035 年土地利用.

城镇发展情景:充分考虑《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》《重庆市城市提升行动计划(2022~2025 年)》等文件中关于加快新型城镇化与综合交通枢纽建设的要求,本情景设定以经济增长为导向的快速发展路径,将耕地、林地、草地向人造地表的转移概率上调 20%,同时将人造地表向除耕地以外的其他自然用地转移的概率下调 20%,以模拟城镇快速扩张情境.

生态保护情景:为契合重庆市“十四五”生态规划与“双碳”目标,本情景设定生态优先的可持续发

展路径,强调对生态空间的严格保护和修复.依据《重庆市“十四五”生态环境保护规划》《重庆市国土空间生态保护修复规划(2021−2035 年)》中关于严格保护生态安全格局、修复生态系统服务功能的内容,将耕地、林地、草地向建设用地转移的概率降低 20%,增加 20%耕地向林地、草地的转换概率,并根据永久基本农田和生态保护红线专题数据作为禁止转化的用地,设定水域、基本农田和绿地保护区作为限制扩张区域,模拟在生态优先战略下土地利用格局的变化趋势.

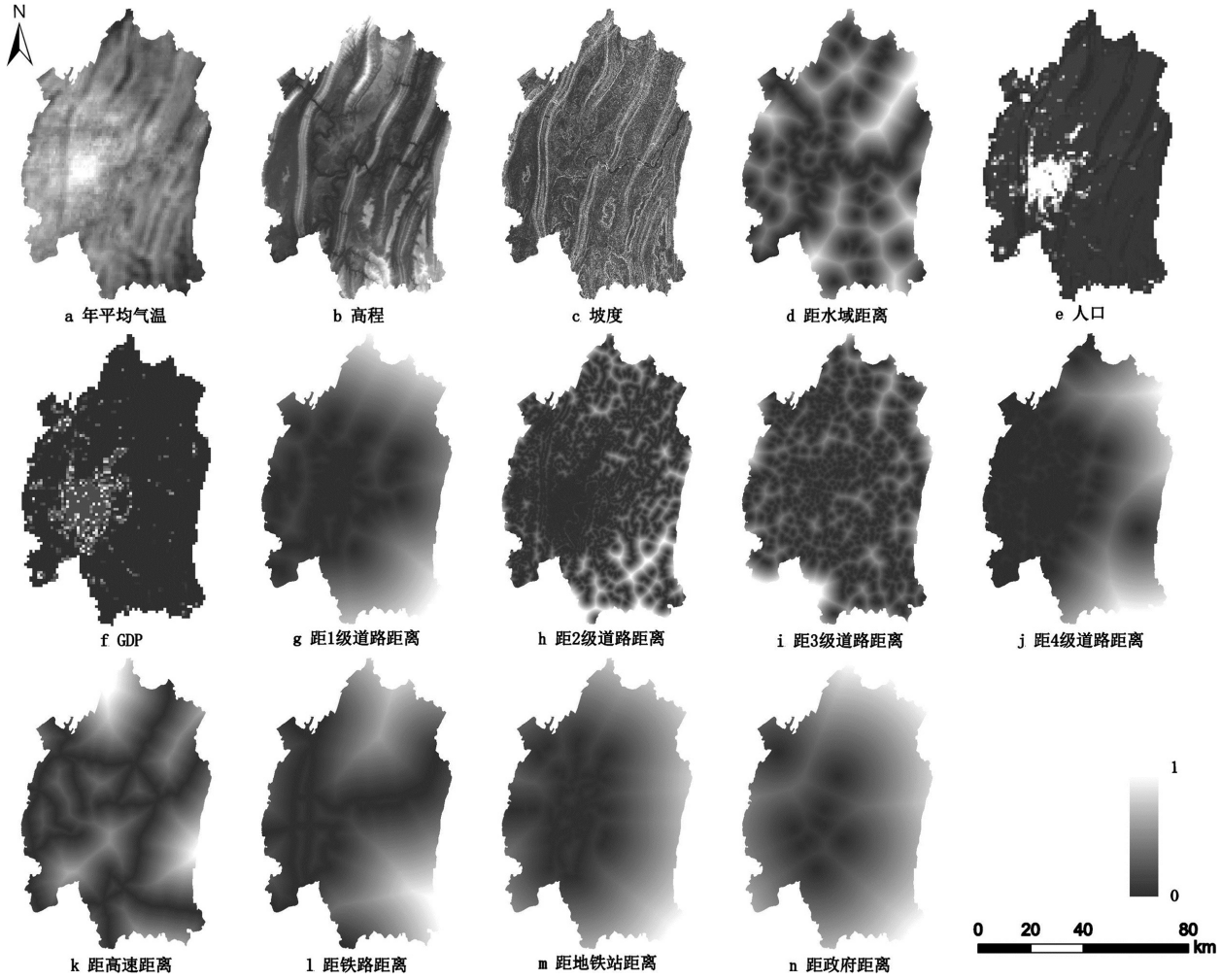


图 2　各驱动因素归一化

Fig.2　Normalized figure of each driving factor

此外,考虑到《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》中对重庆市“两江新区”的发展规划,在自然发展和城镇发展情景中都将“两江新区”的集中建设区设置为建设用地的规划发展区.

1.3.4　模型精度验证　Kappa 系数是用于评价遥感影像分类结果的一致性检验方法,通过对地面调查的地物类型数据和影像分类结果建立误差矩阵,其中矩阵列表示地面调查的地物类型,矩阵行表示影像数据的分类类型,每一个元素表示像元的数量.Kappa 系数计算公式为:

表 1　不同情景下重庆市 2030 年各土地利用类型需求像元数(个)

Table 1　Pixel numbers of land use type demands in Chongqing under different scenarios in 2030

发展情景	耕地	林地	草地	水体	建设用地	总计
自然发展情景	2619448	979712	459330	195067	1819473	6073030
城市扩张情景	2510565	969781	451394	193828	1947462	6073030
生态保护情景	2706750	998474	480174	195872	1691760	6073030

$$\text{kappa}=\frac{P_0-P_e}{1-P_e}$$
$$P_0=\frac{\sum_{i=1}^{n}P_{ii}}{N} \quad (3)$$

式中:P_0 是分类的总体精度,表示每一个随机样本分类结果与地面调查数据类型一致的概率;P_e 表示由于偶然机会造成的分类结果与地面调查数据类型相一致的概率;n 为分类的类型数量;N 为样本总数;P_{ii} 为第 i 类型的被正确分类的样本数目.当分类结果与实际类型完全吻合时,Kappa 系数的值即为 1.

1.3.5 GAM 模型 广义相加模型(GAM)是广义线性模型(GLM)的半参数扩展,由 Hastie 与 Tibshirani 于 1986 年提出[48].可以有效处理解释变量与效应变量间复杂的非线性关系[49].广义相加模型包括随机部分、加性部分和连接函数 3 个部分,连接函数的选择主要根据因变量的分布形式如指数分布族正态分布(normal)、Gamma 分布、Poisson 分布等,本研究使用平滑函数拟合自变量与因变量之间的非线性关系,以相加的形式纳入模型,模型公式如下:

$$Y=\alpha+\sum_{i=1}^{n}f(x_i)+\varepsilon_i \quad (4)$$

式中:α 为截距项;$f(x_i)$为自变量 x_i 的平滑函数;ε_i 为误差项.其中平滑函数主要包括核函数、样条函数、局部加权回归函数等,平滑函数中最常用的是样条函数,样条函数是在自变量 x 上选择若干固定节点,将其分割成若干区间,在每个区间上分别拟合多项式函数,然后利用导数来限制曲线在节点处的光滑性.平滑函数的自由度依据赤池信息准则(AIC)或专家的经验选择,也可依据残差独立原则或者广义交叉验证法(GCV)来确定[48].

本研究使用 R 语言中的“mgcv”包进行统计分析,模型假设误差服从高斯正态分布,同时考虑土地利用与碳排放呈现非线性关系,本研究采用平滑样条函数拟合碳排放与各土地利用类型数量的关系.此次平滑函数的自由度采用广义交叉验证来确定,检验水准 α=0.001.

2 结果与分析

2.1 研究区土地利用时空变化分析

重庆市主城区 2000 年、2010 年、2020 年的土地利用情况如图 3 所示.在过去的 20 年内,重庆市主城区处于高速的城市化进程中,城市用地发生了巨大的变化.建设用地以渝中区为原点,长江、嘉陵江为轴线迅速向周围扩张,大量耕地被占用,极大地改变了重庆市主城区的土地利用结构.此外,在研究区的东南部林地和草地也呈现出一定的变化.时间尺度上,以 2010~2020 年这 10 年期间的城市扩张效应最为明显.

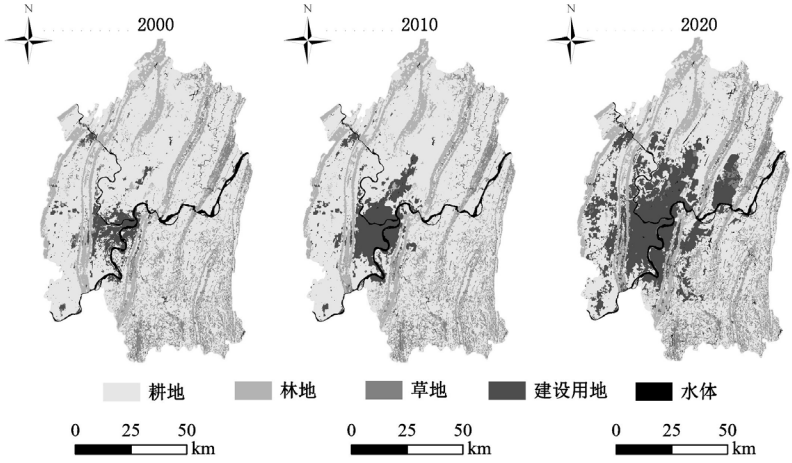


图 3 2000、2010、2020 年重庆市主城区土地利用

Fig.3 Land use map of Chongqing's main urban areas in 2000, 2010 and 2020

基于研究区 2000, 2010, 2020 年的土地利用数据,重庆市主城区 2000~2010、2010~2020、2000~2020 年,3 个不同时期的各类用地转移桑基图(图 4).结果表明 2000 年以来,重庆市主城区土地利用结构

特征变化明显,各类用地转移频繁,以耕地转出和建设用地转入为主要转移模式.2000~2010 年,重庆市主城区耕地共转出了 202.37km^2,主要转为建设用地和草地.耕地共转入 79.63km^2,以建设用地(22.15km^2)和草地(31.22km^2)转入为主.最稳定的是林地,只有 19.07km^2 和 17.21km^2 分别发生了转入转出.2010~2020 年研究区的土地转移模式较上一阶段明显,共有 1088.34km^2 面积的土地发生了转移,其中耕地的转出量为 763.79km^2,转入量为 102.88km^2,建设用地转出量仅为 6.28km^2,而转入量达到了最大值 681.50km^2.20 年间,耕地向其他地类转出了 928.82km^2,其中有 81.91%转入了建设用地,有 6.44%转入了林地.建设用地转入量为 858.30km^2,有 88.64%来源于耕地转入,5.71%来源于草地转入.2000~2020 年间,随着研究区城镇化率的不断提升,城市面积快速扩张驱使城市建成区周围的耕地大量转为建设用地为城市发展服务.

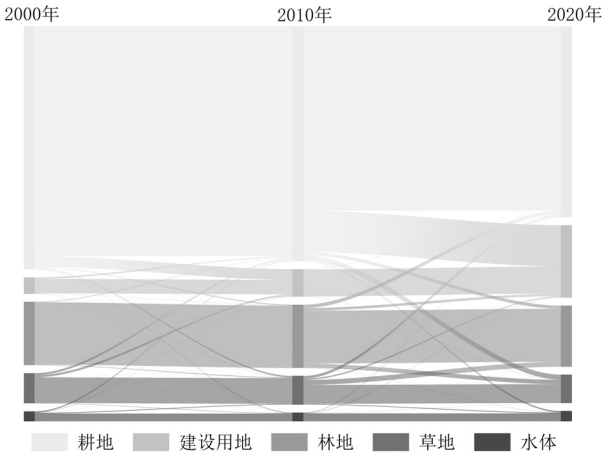


图 4　2000~2010、2010~2020、2000~2020 年研究区各类用地转移桑基图

Fig.4　Sankey map of various land transfers in the study area during 2000~2010, 2010~2020 and 2000~2020

2.2　各类用地变化驱动因素分析

由于水域面积在研究期内面积变化不大,因此基于 PLUS 模型分析耕地、林地两类用地变化的驱动力排名,结果如图 5 所示.

综合各地类的分析结果,本研究将贡献度超过 0.1 的驱动因子列为主要驱动因子.由图 5 可知,耕地扩张的主要驱动因子是距 1 级道路距离、高程和 GDP.将耕地增加区域和耕地扩张主要驱动因子栅格数据叠加可以看出(图 6),研究区耕地面积增加的区域主要分布在远离 1 级道路和 GDP 相对较低以及高程较高区域.重庆市主城区城市扩张不断挤压着农业空间,驱使耕地只能新增在远离城区,经济发展不活跃的地区.

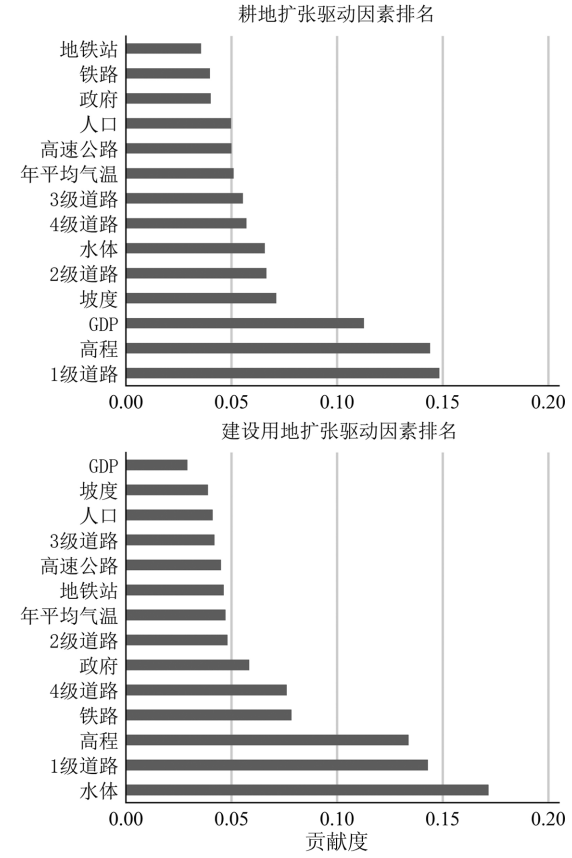


图 5　重庆市主城区各类用地扩张的驱动因素贡献度排名

Fig.5　Contribution ranking of various driving factors of land expansion in Chongqing's main urban areas

从图 5 中可以看出,建设用地扩张的主要驱动因子有距水域距离、距 1 级道路距离和高程.这侧面反映了重庆市“两江四山”的地势格局严重影响着城市扩张方向.新增的建设用地主要在临江、临水的城市建设区大面积扩展.其次是距 1 级道路距离和高程对建设用地的贡献,因为地形因素决定了城市建设的难度和成本,一般来说,城市扩张会避开地形起伏较大的地区.从图 7 可以看出,扩张的建设用地主要分布在重庆市相对平坦的老城区周围以及山脉之间的山谷地区.另外,距 1 级道路的距离也是建设用地增长的主要驱动因素,原因是 1 级道路可以看成一般的城市主干道,是城市道路系统的骨架和城区的重要组成部分,因此,1 级道路距离对建设用地扩张有较大影响.

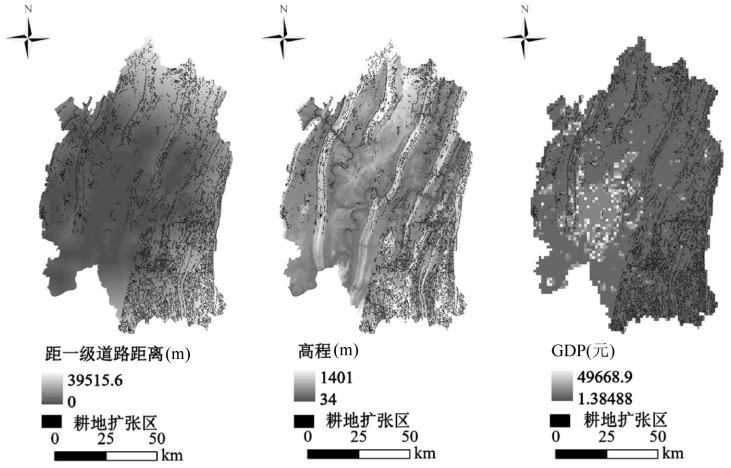


图 6 耕地扩张主要驱动因素

Fig.6 The main driving factors of cultivated land expansion

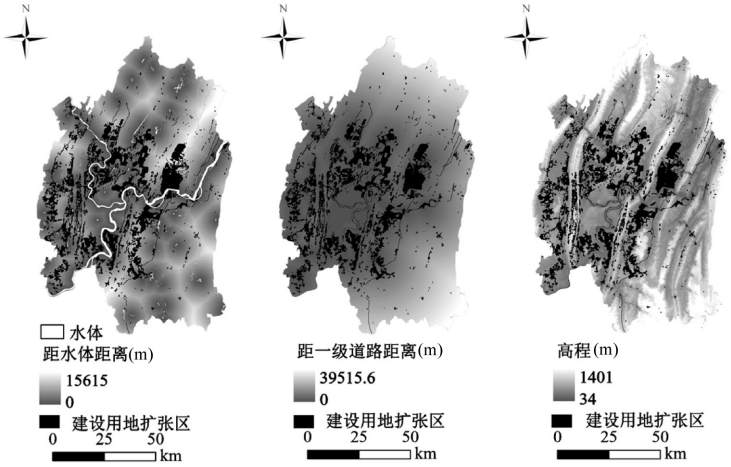


图 7 建设用地扩张主要驱动因素

Fig.7 The main driving factors of construction land expansion

2.3 基于 PLUS 模型的重庆市土地利用模拟结果

2.3.1 精度评估 图 8b 和 8c(由 Markov 用地需求)分别基于 PLUS 模型考虑各驱动因素模拟研究区 2020 年和 2030 年(自然情境下)土地利用.2020 年研究区模拟土地利用空间分布(8b)与 2020 年研究区实际土地利用空间分布(图 8a)对比发现,PLUS 模型模拟东部两江新区和西南部双福新区,土地用与实际偏差较大,其余用地的组成和分布情况与实际情况基本吻合.通过精度效验,模拟结果总体精度达 83.17%,Kappa 系数为 0.792,模拟结果较好,各地类模拟精度分别为耕地 80.25%,林地 84.71%,草地 68.92%,水体 93.44%,其中,建设用地模拟精度达到了 83.56%,模拟精度较高,PLUS 模型对重庆市主城区城市扩张模拟具有较高可信度.

2.3.2 2030 年多情景土地利用动态分析 图 9 显示了不同情景下,重庆市主城区未来各类用地的面积变化情况.自然发展情景中,各类用地面积变化量较少,总变化量为 1103km^2.建设用地增速放缓但仍然增加明显,扩张面积达 530km^2,占土地转移总面积的 48.1%.耕地、林地和草地的面积继续减少,其中耕地面积将减少 514km^2,大部分转为到建设用地.城市扩张情景中,建设用地较自然发展情景增加 69km^2,但只占土地转移总面积的 45.5%,其原因在于:城市扩张情景下,其余土地利用类型的变化更为剧烈,总土地利用变化量为 1316km^2,为三种情景中的最大值.耕地、林地面积较自然发展情景分别减少了 98km^2、11km^2,说明较快的城镇化速度会使土地利用更迅速地由生态用地向城镇用地转变.生态保护情景中,总土地利用变化量仅为 912km^2,建设用地较自

然发展情景减少了 87km^2,而耕地增加了 78km^2.同样与自然发展情景对比,林地虽然仍然呈现下降趋势,但其下降速率更低,说明生态保护情景中土地利用呈现更稳定的状态.

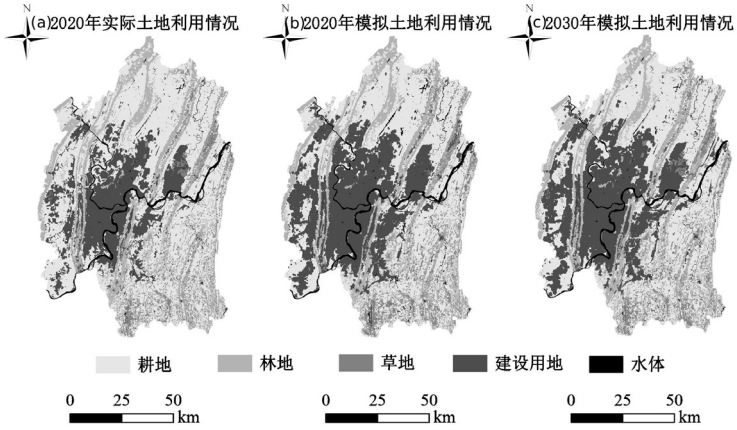


图 8　重庆市主城区实际土地利用与未来土地利用模拟

Fig.8　Simulated map of future land use in the main urban area of Chongqing

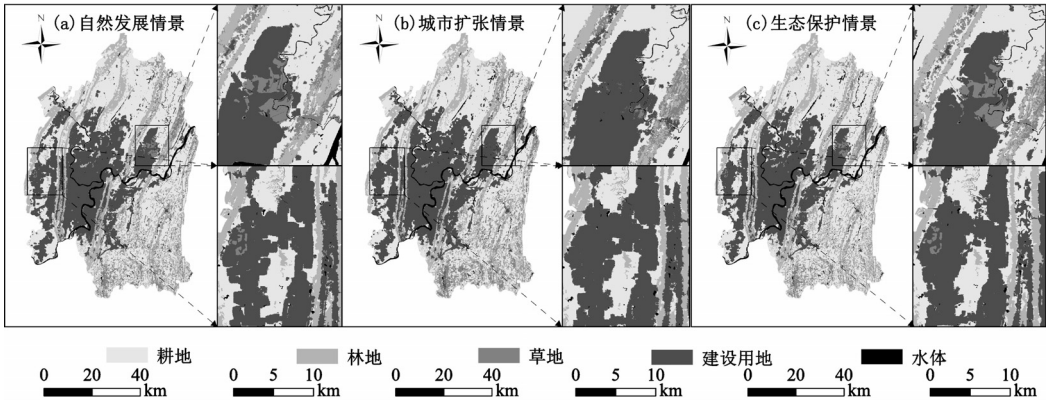


图 9　重庆主城区 2030 年多情景未来土地利用模拟

Fig.9　Multi-scenario future land use simulation map of the main urban area of Chongqing

从变化格局上看,未来 10 年内土地利用格局还将继续发生较大的变化,城市建设用地向周围扩张明显,而耕地随城市化被蚕食严重,耕地出现严重破碎化,尤其是已有建成区的周边地区,扩张模式进一步加剧了粮食安全的威胁.水域变化不明显,林地和草地有一定量的相互转化,以研究区东南部为主要变化区域.

不同情景下的土地利用变化格局整体相似.城市扩张情境下,渝北区中部、东部将有大片土地转换为建设用地,生态保护背景下则仅在其东部有少部分草地和耕地转化为建设用地.未来 10 年城市建成区还将继续蔓延,东西方向上均会有不同程度扩张,东部长江以北的龙兴、鱼嘴和长江以南的茶园、界石等是潜在的城市建设用地扩张区域.东部的西永和西彭也将会成为城市建设用地扩展的备选地,中梁山西侧的城市化程度将更为显著.在城市化的影响下,大量的耕地将继续被占用,但林地、草地等自然生态用地在人为影响下 2030 年被转化为城市用地的趋势减弱,这是生态环境改善和城市可持续发展的良好信号.

2.4　土地利用变化和碳排放的响应关系

将 2019~2022 年重庆主城区碳排放变化与研究期间各类用地面积变化做广义可加分析,拟合效果见表 2,拟合图见图 10.在表 2 中,*edf* 表示自由度,当 *edf* 接近 1 时,表示碳排放与该类土地利用面积变化为线性关系,当 *edf*>1 时,碳排放与该类土地利用面积变化为非线性关系.*F* 代表该类土地利用数量变化对碳排放的重要性,*F* 值越大说明该地类变化对

碳排放相对越重要,从表 2 中可知,草地、建设用地数量变化对碳排放影响最重要,水域面积变化对重庆主城区碳排放影响最微弱.*P* 值代表各地类变化对碳排放拟合结果的显著性,其中林地和草地变化与碳排放具有显著影响,显著性水平 $P<0.01$,总体显著性水平 $P<0.05$,$R^2=0.803$.结合表 2 和图 10 可知,土地利用结构变化对重庆市主城区碳排放的影响多呈现非线性关系,并可能存在潜在的阈值区,2019~2022 年间重庆市主城区建设用地和草地数量变化与碳排放呈线性关系,林地、耕地、水域变化与碳排放呈非线性关系.研究期间,草地面积增加 42.11km^2 减少了 1.05×10^{3}t 的碳排放,建设用地 408.15km^2 的增加却带来 1.5×10^{3}t 增加的碳排放,减少了 503.67km^2 的林地面积增加了 0.8×10^{3}t 的碳排放,耕地增加了 63.32km^2 减少了 0.5×10^{3}t 的碳排放,总的碳排放增加了 750t.

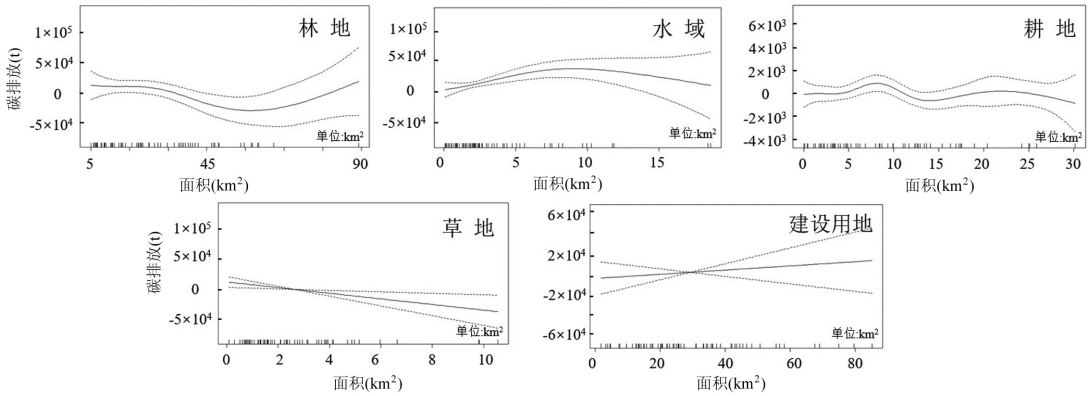


图 10 重庆市主城区 2019~2022 年各类土地利用变化与碳排放关联效应

Fig.10 Correlation effect of various types of land use change and carbon emissions in the main urban area of Chongqing from 2019 to 2022

表 2 模型拟合效果参数

Table 2 Model fitting effect parameters

变量	*edf*(估计自由度)	*F*
水域变化量	1.84	0.62
耕地变化量	1.36	1.04
林地变化量	3.27	1.17
建设用地变化量	1.05	2.71
草地变化量	1	2.35

2.5 基于生态红线和基本农田保护区的土地利用冲突诊断分析

随着城市化的不断加速,城市扩张中呈现出生态环境破坏、城市无序蔓延等问题[50].因此,本研究基于生态红线和基本农田保护区数据,识别研究区城市扩张与上述区域的潜在冲突区(作为刚性约束理论上不存在冲突区域),同时重庆市政府于 2007 年也颁发了包括《重庆市“四山”地区开发建设管制规定》等系列生态保护的文件[51],但实际上 2020 年城市扩张与生态红线和基本农田保护区已存在冲突区域.由于 PLUS 模型将自然要素考虑纳入了元胞学习规则之中,减弱了选取自然用地作为建设用地的扩张区域的转移规则,如图 11 所示,模拟了三种情景下 2030 年重庆市主城区城市扩张与生态保护的潜在冲突区,主城区建设用地模拟结果与永久基本农田在巴南区、九龙坡区、北碚区等中心城区外围有小部分重叠;自然发展、生态保护和城市扩张 3 种情景下,2030 年重庆市建设用地模拟结果与生态保护区均有少部分的重叠(因 2020 年城市建设用地已与生态保护红线、永久基本农田及水体存在 180.5km^2 的重叠).由 Markov-PLUS 模型模拟可知,3 种情景下,重庆市主城区建设用地分别扩张至 1619.31, 1522.6, 1687.3km^2,结合重庆市生态红线和永久基本农田专题数据,识别潜在土地利用冲突面积分别为 351.4, 247.6, 382.6km^2.冲突区域主要分布在缙云山北部和中梁山北部的北碚,中梁山南部中梁镇及大渡口组团西南,铜锣山以西以南的界石组团.

图 11 显示了 2030 年 3 种情景下,重庆市主城区城市扩张与生态保护红线、永久基本农田和水体潜在冲突区的空间分布,其中生态保护情景下城市扩张与生态保护潜在冲突面积最小,但 3 种情景均存在城市扩张与生态保护的冲突,鉴于此,重庆市主城区在城市扩张过程中亟需注重生态安全的保护.重

庆市主城区的城市扩张分别以侵占耕地、林地为主,通过建设用地、草地、林地和碳排放之间的拟合关系及 PLUS 模型模拟 2030 年的土地利用结构,估算 2030 年重庆主城区土地利用变化下碳排放达 5929.95 万 t C/a(自然发展情景)、5820.41 万 t C/a(生态保护情景)和 6206.77 万 t C/a(城市扩张情景).

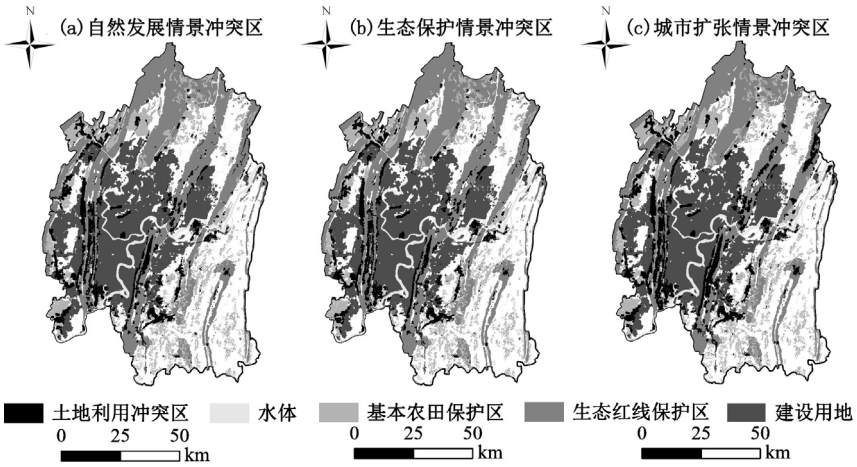


图 11　三种情景下重庆主城区建设用地与生态保护潜在冲突区空间分布

Fig.11　The spatial distribution of potential conflict areas between construction land and ecological protection in the main urban area of Chongqing under three scenarios

3　讨论

本研究面向地形起伏大、生态约束强的山地城市,提出“PLUS 多情景模拟—GAM 非线性响应—冲突诊断”的综合框架,系统阐述了重庆市主城区城市用地的演化特征及其内在驱动力,设置自然发展、生态保护和城镇发展 3 种情景,既将地方规划目标参数化(如建设用地转移概率增加 20%、重点片区规划约束)后与 PLUS 迭代耦合,提升情景模拟的可靠性,并对不同情景下建设用地与生态保护红线、基本农田潜在冲突区域识别,通过土地利用变化与碳排放关联响应,探明了碳排放与各类土地利用变化之间的非线性—阈值关系,估算了碳排放的数量,为研究区“双碳”战略行动计划及区域土地资源管理和城市规划建设提供相关参考.

在多因素、多情景土地利用的模拟上,本研究基于 PLUS 模型对重庆市主城区土地利用进行模拟研究,其变化特点与朱康文[52]的研究相符,也与其他大都市圈的城市扩张演化特征相似[53-55].重庆市主城区城市扩张主要受自然环境因素高程、距水域距离和社会经济因素距 1 级道路距离驱动因素的影响,这体现了城市扩张驱动因素的空间异质性,不同区域的驱动因素影响有显著差别,如连宏萍等学者[56]以我国 35 个大中城市为研究样本,认为影响我国城市建设用地扩张的三大重要因素为居民收入水平、城市人口数量和交通条件;马歆等学者[57]研究发现中原城市群建设用地扩张影响较大的包括 GDP、实际使用外资金额、全市固定资产投资、工业总产值、财政收入 5 个因素.运用 PLUS 模型模拟得出的重庆市主城区 2030 年土地利用情况表明,未来建设用地将不断向周边蔓延,城市扩张方向以向西为主,这与黄方[58]的研究相符,也与重庆市“十四五”规划和成渝经济圈相关发展战略相契合.

在城市土地利用变化和碳排放响应上,GAM 模型结果表明,土地利用结构变化对碳排放的影响存在显著的非线性关系(如林地、水域、耕地).这与许多基于线性假设的研究结论有所不同[43].这可能意味着,生态用地碳汇功能的发挥存在边际效应或临界阈值,例如,当林地覆盖率破碎化到一定程度以下,其碳汇能力可能发生断崖式下降.这一非线性响应的揭示,挑战了简单的‘增林即增汇’线性思维,强调了对生态系统服务进行系统性、整体性保护的必要性,也为后续研究建立更复杂的非线性碳排放预测模型提供了关键参数依据.本研究将 PLUS 模型与 GAM 模型相结合,很好的解释了土地利用的变化与碳排放响应的过程机理,构成了一个从格局到过程、

从预测到机理解析的完整逻辑链条,这套框架对于研究其他具有空间异质性的复杂环境问题(如生物多样性流失、城市热岛效应等)具有可迁移的理论和方法论价值.

本研究虽然在城市扩张模拟与碳排放响应关系方面取得了一定发现,但仍存在一些局限性,首先,在数据源方面,本研究使用的土地利用数据源于公开的遥感解译产品(如 CLCD/Globeland30).尽管这些数据经过严格验证且被广泛使用,但其分类精度和空间分辨率(30 米)仍可能对微观尺度的土地利用转换识别存在不确定性,进而可能影响模型模拟的准确性与最终碳排放计算的精确度.未来的研究可尝试融合更高分辨率的遥感影像与实地调查数据,以提升数据质量.其次,在驱动因子选取上,本研究主要基于数据的可获取性和现有文献,选取了自然和社会经济类因子,然而,城市扩张是一个极其复杂的过程,受到众多无形或难以量化的驱动因素影响,例如微观的土地利用政策、土地价格机制、以及居民偏好等人为因素还缺乏定量化研究.本研究的模型未能将这些因素完全纳入,这可能导致对城市扩张内在机理的解释存在不足,并可能使模拟结果(特别是在政策敏感区)存在一定偏差.这种偏差会进一步传递至 2030 年不同情景的碳排放估算结果中,因此,在未来的研究中还将加上述因子的考虑进行多情景模拟研究.此外,本研究采用碳排放数据产品与土地利用做关联响应分析,但是该碳排放数据产品核算的是电力、地面运输、工业、居民消费、国内航空、国际航空的碳排放与建设用地碳排放关联性最强,这也是 2019~2022 年间建设用地扩张带来碳排放数量较高的原因,在后续研究中通过综合多因素核算碳排放的方法,进一步验证研究区土地利用变化数量与碳排放之间的响应关系.最后,本研究不仅实证分析了重庆市主城区的案例,其主要理论价值在于:(1)揭示了山地城市生态用地碳汇功能的非线性响应特征,深化了人地关系复杂性的理论认知;(2)提供了一个集成空间模拟与机理解析的综合性研究框架范例;(3)论证了空间异质性背景下差异化政策干预对于实现‘双碳’目标的重大理论意义与实践价值.

4 结论

4.1 2000~2020 年,重庆市主城区的土地利用情况变化显著,整体呈现耕地减少(共减少了 928.82km^2)和建设用地增加(共增加了 858.30km^2)的趋势.耕地绝大部分转为建设用地,沿江地区土地利用变化显著.

4.2 研究区各类用地的时空格局变化是自然(高程、距水体距离为主要驱动因素)和社会经济因素(距 1 级道路距离为主要驱动因素)综合作用的结果,此外,人为的政策驱动因素对城市扩张同样具有重要影响.

4.3 未来 10 年内重庆市主城区将继续处于快速城市化进程中,城市扩张方向以东西两个方向上扩展为主.林地、草地的扩张方向与城市扩张相反,主要聚集于主城区东南侧,水体的变化较不明显.沙坪坝区、九龙坡区和北碚区成为土地利用变化的热点地区.

4.4 未来大量耕地转变为建设用地的城市扩张模式为粮食安全和耕地保护拉响了警报,城市的热岛效应持续增强.但自然生境如林地、草地、水体的用地面积减少趋势变缓,未来发展向生态友好型倾向.

4.5 研究区草地和建设用地数量变化与碳排放呈线性关系,林地和耕地表现为非线性关系,模拟三种情景下 2030 年研究区城市扩张,碳排放分别为 5929.95 万 t C/a(自然发展情景)、5820.41 万 t C/a(生态保护情景)和 6206.77 万 t C/a(城市扩张情景),研究区在城市扩张过程中亟需注重生态安全的保护.

参考文献:

[1] 李 宇,孟 丹,叶海鹏,等.俄罗斯典型城市扩张时空格局与驱动机制——基于遥感决策融合与多元离散回归模型 [J]. 地理研究, 2021,40(11):2967-2985.
Li Y, Meng D, Ye H P, et al. Spatiotemporal pattern and driving forces of typical Russian cities: Based on remote sensing decision fusion and multiple discrete regression model [J]. Geographical Research, 2021, 40(11):2967-2985.

[2] 方创琳.改革开放 30 年来中国的城市化与城镇发展 [J]. 经济地理, 2009,29(1):19-25.
Fang C L. The urbanization and urban development in China after the reform and opening-up [J]. Economic Geography, 2009,29(1): 19-25.

[3] Ghosh S, Dinda S, Das Chatterjee N, et al. Spatial-explicit carbon emission-sequestration balance estimation and evaluation of emission susceptible zones in an Eastern Himalayan city using Pressure-Sensitivity-Resilience framework: An approach towards achieving low carbon cities [J]. Journal of Cleaner Production, 2022:336,330417.

[4] 张 涛,王光辉,郑利娟,等.近 30 年中国城市群城市建设用地扩张遥感监测与时空变化特征分析 [J]. 遥感学报, 2024,28(11):2838-2849.
Zhang T, Wang G H, Zheng L J et al. Remote sensing monitoring and spatiotemporal characteristic analysis of urban construction land expansion in the urban agglomerations of China in the past 30years [J].

National Remote Sensing Bulletin, 2024,28(11):2838−2849.

[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.
Zhang M, Yang L Y, Hu Z W, et al. Spatiotemporal differentiation and influencing mechanism of urban expansion in the Yangtze River Economic Belt, China [J]. Acta Geographica Sinica,2024,79(2):439−461.

[6] Wang Z, Lv C. Urban land expansion and its driving factors of mountain cities in China during 1990-2015 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2018,28(8):1152−1166.

[7] 王亚楠,苏明明,董航宇.中国资源型与非资源型城市扩张驱动机制差异 [J]. 资源科学, 2024,46(6):1226−1237.
Wang Y N, Su M M, Dong H Y. Differences in the driving mechanisms of urban spatial expansion between resource−based and non−resource−based cities in China [J]. Resources Science, 2024,46(6):1226−1237.

[8] 欧阳晓,朱　翔,贺清云.城市群城市用地扩张时空特征及驱动机制研究:以长株潭城市群为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2020,29(6):1298−1309.
Ou Y X, Zhu X, He Q Y. Study of spatio−temporal pattern and driving mechanism of urban land expansion in urban agglomeration: A case study of the Changsha−Zhuzhou−Xiangtan urban agglomeration [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020,29(6):1298−1309.

[9] Siabi E K, Kabo−Bah A T, Anornu G, et al. Future land use simulation modeling for sustainable urban development under the shared socioeconomic pathways in West African megacities: Insights from Greater Accra Region [J]. Journal of Environmental Management, 2025,376:124300.

[10] 汪韬阳,张　过,李沛然,等.基于 DMSP/OLS 夜光遥感影像的城市扩张政策驱动因素分析 [J]. 测绘学报, 2018,47(11):1466−1473.
Wang T Y, Zhang G, Li P R et al. Analysis on the driving factors of urban expansion policy based on DMSP/OLS remote sensing image [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018,47(11):1466−1473.

[11] 高彬嫔,吴映梅,李　琛,等.滇中城市群城市扩张动态演变对生态系统健康的影响 [J/OL]. 环境科学, 1−15[2025−04−28]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202410275.
Gao B P, Wu Y M, Li C et al. Effects of urban sprawl dynamics on ecosystem health in the central Yunnan urban agglomeration [J/OL]. Environmental Science [2025−04−28].https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202410275.

[12] 刘希朝,李效顺,陈　鑫,等.江苏省城镇化与生态环境耦合测度及空间冲突诊断 [J]. 农业工程学报, 2023,39(13):238−248.
Liu X C, Li X S, Chen X et al. Coupling measurement and spatial conflict diagnosis between urbanization andecological environment in Jiangsu Province of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultura, 2023,39(13):238−248.

[13] Zhang J, Fu M, Wang L, et al. Impact of urban shrinkage on pollution reduction and carbon mitigation synergy: Spatial heterogeneity and interaction effects in Chinese Cities [J]. Land, 2025,14(3):537.

[14] Xiong Q, Wu X, Yu C. Characteristics of spatial and temporal evolution and coupling relationships between urbanization and atmospheric particulate matter in the Qianzhong urban agglomeration [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2025,31(3/4):605−634.

[15] Das A, Sahoo S N. Impact of land use and climate change on urban flooding: A case study of Bhubaneswar city in India [J]. Natural Hazards, 2025,121(7):8655−8674.

[16] She Z, Liu Z, Cai H, et al. Disproportionate increase of flood−exposed population in Chinese cities under urban expansion and climate variation [J]. Ecological Indicators, 2025,172:113314.

[17] 杨　浩,王旭峰,张松林,等.甘肃省城市热岛效应变化特征及其对城市扩张的响应 [J]. 遥感技术与应用, 2025,40(1):110−121.
Yao H, Wang X F, Zhang S L et al. Change characteristics of urban heat island effect and its response to urban expansion in Gansu Province [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2025,40(1):110−121.

[18] 侯亚丽,匡文慧,窦银银.全球超大城市空间扩张及分形特征研究 [J]. 地理学报, 2022,77(11):2687−2702.
Hou Y L, Kaung WH, Dou Y Y. Analysis of urban expansion and fractal features in global 33 megacities from 2000~2020 [J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(11):2687−2702.

[19] Jiao L M, Liu J F, Xu G, et al. Proximity expansion index: An improved approach to characterize evolution process of urban expansion [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2018,70:102−112.

[20] 陈展图,冯　冰,肖丽梅,等.广西北部湾经济区城市群空间扩展研究——基于夜间灯光数据 [J]. 地域研究与开发, 2024,43(3):77−82.
Chen Z T, Feng B, Xiao L M et al. Spatial expansion of urban agglomerations in Guangxi Beibu Gulf Economic Zone based on night−time lighting data [J]. Areal Research and Development, 2024,43(3):77−82.

[21] 曹冰昱,杨永崇,钟　飞,等.空间规划背景下的城镇扩张模拟研究 [J]. 测绘科学, 2021,46(5):189−195,202.
Cao B Y, Yang Y C, Zhong F et al. Simulation on urban expansion under the background of spatial planning [J]. Science of Surveying and Mapping, 2021,46(5):189−195,202.

[22] 付　涛,易　宏,吴俐民,等.适宜性评价与模型模拟的三类空间划定研究 [J]. 测绘科学, 2021,46(6):164−173.
Fu T, Yi H, Wu L M et al. Study on three types of space delimitation for suitability evaluation and model simulation [J]. Science of Surveying and Mapping, 2021,46(6):164−173.

[23] 张亚飞,廖和平,李义龙.基于反规划与FLUS模型的城市增长边界划定研究——以重庆市渝北区为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2019,28(4):757−767.
Zhang Y F, Liao H P, Li Y L. Delimitation of urban growth boundary based on anti−planning and FLUS model: A case study of Yubei District, Chongqing, China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019,28(4):757−767.

[24] 李启珍,胡希军,韦宝婧,等.长沙市绿色空间与城市扩张耦合关系研究 [J]. 经济地理, 2022,42(11):87−94.
Li Q L, Hu X J, Wei B J et al. Coupling relationship between green space and urban expansion in Changsha [J]. Economic Geography, 2022,42(11):87−94.

[25] 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.

Zhang M, Yang L Y, Hu Z W et al. Spatiotemporal differentiation and influencing mechanism of urban expansion in the Yangtze River Economic Belt, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2024,79(2):439-461.

[26] 刘 奎,王 健,康 翔,等.基于空间集散效应的中国城市空间扩张驱动机制——以中国 273 个城市为例 [J]. 城市发展研究, 2022,29(6):15-24.
Liu K, Wang J, Kang X et al. Research on the driving mechanism of China's urban spatial expansion based on the spatial aggregation—apread effects [J]. Urban Development Studies, 2022,29(6):15-24.

[27] He C, Liu Z, Gou S, et al. Detecting global urban expansion over the last three decades using a fully convolutional network [J]. Environmental Research Letters, 2018,14(3),034008.

[28] Alice C, Yann L, Harold L.What drives land take and urban land expansion? A systematic review [J]. Land Use Policy, 2018,79:339-349.

[29] Yussif K, Dompreh E B, Gasparatos A. Sustainability of urban expansion in Africa: a systematic literature review using the Drivers-Pressures-State-Impact-Responses (DPSIR) framework [J]. Sustainability Science, 2023,18(3):1459-1479.

[30] Wu Y, Li C, Shi K F, et al. Exploring the effect of urban sprawl on carbon dioxide emissions: An urban sprawl model analysis from remotely sensed nighttime light data [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022,93:106731.

[31] Cheng Z, Hu X. The effects of urbanization and urban sprawl on CO_2 emissions in China [J]. Environment, Development and Sustainability, 2023,25(2):1792-1808.

[32] Liu X, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects [J]. Landscape and Urban Planning, 2017,168:94-116.

[33] 王端睿,毛德华,王宗明,等.东北地区土地覆被格局变化模拟:基于 CLUE-S 和 Markov-CA 模型的对比分析 [J]. 地理科学, 2024,44(2):329-339.
Wang D R, Mao D H, Wang Z M et al. Simulation of land cover pattern change in Northeast China: A comparative analysis based on CLUE-S and Markov-CA models [J]. Geographical Science, 2024,44(2):329-339.

[34] Wen H, Yu H, Nghiem X H. Impact of urban sprawl on carbon emission efficiency: Evidence from China [J]. Urban Climate, 2024,55:101986.

[35] Wang Z, Zhu C. Does urban sprawl lead to carbon emission growth? — Empirical evidence based on the perspective of local land transfer in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,455:142319.

[36] 牛亚文,赵先超,胡艺觉.基于 NPP-VIIRS 夜间灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究 [J]. 环境科学学报, 2021,41(9):3847-3856.
Niu Y W, Zhao X C, Hu Y J. Spatial variation of carbon emissions from county land use in Chang-Zhu-Tan area based on NPP-VIIRS night light [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021,41(9):3847-3856.

[37] 张 娜,孙芳城,胡钰苓,等.长江经济带三大城市群土地利用碳排放的区域差异及空间收敛性 [J]. 环境科学, 2024,45(8):4656-4669.
Zhang N, Sun F C, Hu Y L et al. Regional difference and spatial convergence of land use carbon emissions in three urban agglomerations of Yangtze River Economic Belt [J]. Environmental Science, 2024,45(8):4656-4669.

[38] 田一豆,赵先超.基于 Markov-PLUS 模型的长株潭城市群建设用地扩张模拟及碳排放响应分析 [J]. 生态学报, 2024,44(1):129-142.
Tian Y D, Zhao X C. Simulation of construction land expansion and carbon emission response analysis of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration based on Markov-PLUS model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(1):129-142.

[39] 苏王新,孙然好.中国典型城市群城镇化碳排放驱动因子 [J]. 生态学报, 2018,38(6):1975-1983.
Su W X, Sun R H. Carbon emissions from urbanization in typical urban agglomerations of China:Spatial patterns and drivers [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(6):1975-1983.

[40] 潘浩之,施 睿,蔡子攀,等.基于城市土地利用碳排放源识别的国土空间规划支撑研究——以南京市为例 [J]. 现代城市研究, 2024,(1):1-7,15.
Pao H Z, Shi R, Cai Z P et al. Study on supporting territorial spatial panning through identification carbon emission sources in urban land use:A case study of Nanjing [J]. Modern Urban Research, 2024,(1):1-7,15.

[41] 林 彤,杨木壮,吴大放,等.基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及预测——以广东省为例 [J]. 中国环境科学, 2022,42(10):4827-4839.
Lin D, Yang M Z, Wu D F et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model-A case study in Guangdong Province [J]. China Environmental Science, 2022,42(10):4827-4839.

[42] 许澳康,胡梦珺,石 晶,等.石羊河流域生态系统碳储量时空变化及多情景模拟 [J]. 中国环境科学, 2024,44(6):3365-3375.
Xu A K, Hu M J, Shi J, et al. Spatial and temporal variability of ecosystem carbon storages and multi-scenario simulation in the Shiyang River basin [J]. China Environmental Science, 2022,42(10):4827-4839.

[43] 邓灵颖,李红波.武汉城市圈土地利用碳排放时空演变及驱动因素 [J]. 水土保持研究, 2024,31(1):345-353.
Deng L Y, Li H B. Spatial and temporal evolution of land use carbon emissions and analysis of driving factors in Wuhan Metropolitan Area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(1):345-353.

[44] 向书江,张 骞,王 丹,等.近 20 年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析 [J]. 自然资源学报, 2022,37(5):1198-1213.
Xiang S J, Zhang Q, Wang D et al. Response and vulnerability analysis of carbon storage to LUCC in the main urban area of Chongqing during 2000~2020 [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(5):1198-1213.

[45] Guan Q. Understanding spatio-temporal patterns of land use/land cover change under urbanization in Wuhan, China, 2000~2019 [J]. Remote Sensing, 2021,13(16),3331.

[46] Liang X, Guan Q, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021,85:101569.

[47] Xie L, Wang H, Liu S. The ecosystem service values simulation and

driving force analysis based on land use/land cover: A case study in inland rivers in arid areas of the Aksu River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2022,138:108828.

[48] Hastie T J, Tibshirani R J. Generalized additive models [M]. London:Chapmanand Hall, 1990:89-90.

[49] Mclean M W, Hooker G, Staicu A M, et al. Functional generalized additive models [J]. Journal of Computational and Graphical Statistics, 2014,23(1):249-269.

[50] 邹欣怡,赵　伟,蒲海霞,等.重庆市南岸区城市边界扩张及生态环境效应研究 [J]. 水土保持研究, 2019,26(4):252-258,264.
Zou X Y, Zhao W, Pu H X et al. Study on urban boundary expansion and ecological environment effect in Nanan District of Chongqing City [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(4):252-258,264.

[51] 重庆市“四山”地区开发建设管制规定 [Z]. 重庆市人民政府公报, 2007,(8):7-8.
Regulations on the development and construction control of the "Four Mountains" area in Chongqing municipality [Z]. Bulletin of the Chongqing Municipal People's Government, 2007,(8):7-8.

[52] 朱康文,李月臣,周梦甜.基于 CLUE-S 模型的重庆市主城区土地利用情景模拟 [J].长江流域资源与环境, 2015,24(5):789-797.
Zhu K W, Li Y C, Zhou M T. Land use scenario simulation of the main city of Chongqing based on the CLUE-S model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015,24(5):789-797.

[53] 刘天林,刘明皓,荆　磊,等.一种顾及驱动因子重要性的双约束 RF-Patch-CA 城市扩张模拟方法 [J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(2):63-70.
Liu T L,Liu M H, Jing L et al. An urban expansion simulation method of dual constrained RF-Patch-CA considering the importance of driving factors [J]. Geography and Geo-Information Science, 2021, 37(2):63-70.

[54] 蒋金亮,周　亮,吴文佳,等.长江沿岸中心城市土地扩张时空演化特征——以宁汉渝 3 市为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2015,24(9): 1528-1536.
Jiang J L, Zhou L, Wu W J et al. A Comparative study on spatiotemporal characteristics of urban expansion for the central cities along the Yangtze River——A case study of Nanjing, Wuhan and Chongqing [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015,24(9):1528-1536.

[55] 孙　伟,刘崇刚,王苏宁.基于生态约束的城市开发边界模拟研究——以南京为例 [J]. 自然资源学报, 2021,36(11):2913-2925.
Sun W, Liu C G, Wang S N. Simulation research of urban development boundary based on ecological constraints: a case study of Nanjing [J]. Journal of Natural Resources,2021,36(11):2913-2925.

[56] 连宏萍,何　琳,章文光.中国城市建设用地扩张的驱动因素及其异质性研究——基于 35 个大中城市面板数据的实证分析 [J]. 北京师范大学学报(社会科学版), 2021,(3):46-57.
Lian H P, He L, Zhang W G. Driving factors and divergency of urban construction land expansion in China: An empirical analysis based on panel data of 35 large and medium-sized cities [J]. Journal of Beijing Normal University (Social Sciences), 2021,(3):46-57.

[57] 马　歆,和舒敏,黄婷婷,等.城市用地扩张的时空格局特征及驱动因素分析——以中原城市群为例 [J]. 生态经济, 2020,36(3):105-111,167.
Ma Q, He S M, Huang T T et al. Analysis of spatial-temporal pattern characteristics and driving factors of urban land expansion: Taking central plains city cluster as an example [J]. Ecological Economy, 2020,36(3):105-111,167.

[58] 黄　方.重庆市土地利用空间格局分析及其预测模拟 [D]. 重庆:重庆大学, 2013.
Huang F. Analysis and simulation of land use spatial pattern of Chongqing municipality [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.

作者简介：谢　玲(1990-),女,新疆库尔勒人, 副教授,博士,主要从事区域可持续发展与生态环境遥感研究.发表论文 20 余篇.142837594@qq.com.