

DOI: 10.20103/j.stxb.202404130815

梁甜, 贺清, 杨霏, 任晓红, 张荣飞, 文传浩. 成渝地区双城经济圈县域国土空间碳汇冲突识别及多情景模拟. 生态学报, 2025, 45(1): 334-350.

Liang T, He Q, Yang F, Ren X H, Zhang R F, Wen C H. Identification and multi-scenario simulation of county territorial carbon sink conflicts in the Chengdu-Chongqing Economic Zone. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 334-350.

成渝地区双城经济圈县域国土空间碳汇冲突识别及多情景模拟

梁甜^{1,2}, 贺清², 杨霏³, 任晓红¹, 张荣飞^{4,*}, 文传浩⁵

1 重庆交通大学经济与管理学院, 重庆 400067

2 重庆财经学院公共管理学院, 重庆 401320

3 重庆工商大学成渝地区双城经济圈建设研究院, 重庆 400067

4 重庆大学环境与生态学院, 重庆 400030

5. 云南大学经济学院, 昆明 650091

摘要: 国土空间是生态系统碳汇功能和社会经济功能的重要载体, 科学识别不同发展情景下的县域国土空间碳汇冲突格局, 对国土空间低碳开发利用与碳汇风险预警具有重要现实意义。以成渝地区双城经济圈 142 个区(县)为研究对象, 从空间碳排压力、空间固碳能力和空间不稳定性 3 个维度, 构建国土空间碳汇冲突评价模型。整合社会经济数据和自然地理等多源数据, 采用生态系统服务权衡综合评估模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST)、斑块生成土地利用模拟模型(Patch-generating and Land Use Simulation, PLUS)、气泡图谱和冲突矩阵等方法, 识别并多情景模拟 1980—2050 年研究区国土空间碳汇冲突程度及潜在风险区域。结果表明: (1) 研究区土地利用类型主要表现为耕地连片、生态用地分散和建设用地多点集聚的空间布局特征, 耕地和建设用地之间的土地利用转移占主要贡献。(2) 1980—2020 年研究区国土空间碳汇冲突程度总体呈现“急剧上升-逐渐缓和”的趋势, 且预测到 2050 年, 碳减排情景(CE)下的国土空间碳汇冲突可控程度最高。(3) 依据冲突矩阵划分标准, 将研究区甄别出“三带九区”的国土空间碳汇冲突矩阵类型, 其中碳汇耐受安全区、碳汇稳态维持区等分别呈现出“边缘式”“三角式”的空间分布特征。本文为精准识别国土空间碳汇冲突提供新的研究思路, 有助于拓展土地利用冲突理论和人地关系理论的研究范畴, 为我国其他城市群制定“政域-流域”的国土空间碳汇冲突调控策略与碳汇协同监管机制提供参考。

关键词: 国土空间碳汇冲突; InVEST 模型; PLUS 模型; 土地利用变化; 成渝地区双城经济圈

Identification and multi-scenario simulation of county territorial carbon sink conflicts in the Chengdu-Chongqing Economic Zone

LIANG Tian^{1,2}, HE Qing², YANG Fei³, REN Xiaohong¹, ZHANG Rongfei^{4,*}, WEN Chuanhao⁵

1 College of Economics and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400067, China

2 College of Public Management, Chongqing Finance and Economics College, Chongqing 401320, China

3 Institute For Chengdu-Chongqing Economic Zone Development, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

4 College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400030, China

5 College of Economics, Yunnan University, Kunming 650091, China

Abstract: Land space is an important carrier of ecosystem carbon sink function and socio-economic function, and scientific

基金项目: 重庆交通大学研究生科研创新项目资助(CYB240263); 国家自然科学基金(42101036); 广东省科技计划项目(2021B1212050019); 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0046)

收稿日期: 2024-04-13; 网络出版日期: 2024-09-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: rongfei330@cqu.edu.cn

identification of county land space carbon sink conflict under different development scenarios is of great significance for the low-carbon development, utilization of land space, and early warning of carbon sink risk. The study selected 142 districts (counties) in the Chengdu-Chongqing Economic Zone as the study area. From three dimensions of spatial carbon emission pressure, spatial carbon sequestration capacity and spatial instability, the evaluation model of county territorial spatial carbon sink conflict was constructed. Integrating multi-source data including socio-economic data and natural geographical data, we conduct a comprehensive assessment of the carbon emission impacts due to natural processes and human activities in the utilization of national territorial space. We identify the degree of conflict over carbon sinks within the territorial space of the study area and analyze its evolution trends. Furthermore, we predict and simulate four scenarios to explore the evolving trends of future territorial carbon sink conflicts in the study area. The study used the methods of the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST), the Patch-generating Land Use Simulation (PLUS), the bubble mapping, and the conflict matrix to identify and simulate the degree of spatial carbon sink conflicts and the potential risk areas from 1980 to 2050 in multiple scenarios. The results showed that: (1) The land use types in the study area mainly showed the spatial distribution characteristics of contiguous cultivated land, scattered ecological land and multi-point agglomeration of construction land. The transfer of land use between cultivated land and construction land made up the principal contribution. (2) From 1980 to 2020, the degree of territorial carbon sink conflict in the study area generally presented a trend of “sharp rise-gradual moderation”. The study predicted that by 2050, the territorial carbon sink conflict under the carbon emissions reduction scenario (CE) will be the most controllable. (3) According to the conflict matrix division standard, the types of territorial carbon sink conflicts of “three zones and nine regions” in the study area were identified. The carbon sink tolerance safety zones and carbon sink steady-state maintenance zones exhibit spatial distribution characteristics described as “peripheral-style” and “triangular-style,” respectively. This paper provides a new research idea for the accurate identification of territorial carbon sink conflicts. It is helpful to expand the research scope of land use conflict theory and man-land relationship theory and provide a reference for other urban agglomerations in China to formulate “region-basin” territorial carbon sink conflict regulation strategies and carbon sink collaborative supervision mechanisms.

Key Words: territorial carbon sink conflict; InVEST model; PLUS model; land-use change; Chengdu-Chongqing economic zone

碳汇冲突是当生态系统同时承担碳汇功能和社会经济功能时,冲突双方在空间资源占有时产生的利益博弈现象^[1-2]。国土空间作为生态系统碳汇功能和社会经济功能的重要载体,在不同利用方式下扮演着碳汇实体或碳源载体的角色^[3],其利用变化对生态系统碳汇冲突有着重要影响^[4]。近年来,伴随着中国经济的高速发展与城市化进程加快,建设用地大量挤占林地、草地等具有碳汇功能的生态用地。持续粗放的国土空间开发利用导致碳汇空间格局失衡与空间碳汇功能衰退,干扰区域生态系统碳汇服务的供需平衡与自然碳循环过程,进而演化为空间碳汇冲突的“失控”^[5],阻碍了国家碳达峰碳中和“1+N”战略目标的实现,抑制了社会经济可持续发展。在此背景下,综合国土空间利用碳排风险和社会经济发展水平,协同多源数据,科学识别不同发展情景下的国土空间碳汇冲突格局,对国土空间可持续利用与碳汇风险预警具有现实重要意义。

国土空间持续粗放式开发利用势必会导致一系列生态系统碳收支平衡的改变^[6],而国土空间碳汇冲突能够较为准确地反映国土空间利用演变对生态系统碳收支平衡的影响情况。当前学者对国土空间碳汇冲突的研究较少,侧重对碳汇量估算^[7-8]、碳汇演变模拟^[9-10]、气候变化对碳汇影响的评估^[11-12]、“三生”空间冲突测度^[13]及土地利用冲突测度等内容开展相关研究。从空间碳汇冲突测度方法看,当前学者借鉴景观生态风险评价模型,并基于“风险源-风险受体-风险效应”开展国土空间碳汇冲突测度^[2]。但较少结合国土空间冲突与碳排效应,综合考虑自然碳排和人为碳排,从空间碳排压力、空间固碳能力和空间不稳定性三个维度构建碳汇冲突评价模型。生态系统服务和权衡综合评估模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST)因具有支持多指标评估、可视化能力强等优势^[14],被广泛运用于碳汇量估算中,且该模型碳库分类较细,有助于厘清国土空间格局演变对碳汇冲突的影响。从空间碳汇冲突研究尺度来看,多从全

国^[15]、省域^[16]、市域^[17]以及流域^[18]尺度展开相关研究,以县域为单元的研究相对较少。县域单元作为国土空间治理的重要单元,是双碳战略实施的最基本和最关键的行动单元^[19]。以县域为基本单元开展国土空间碳汇冲突研究将有利于剖析碳汇冲突的形成机制,更有利于区域整体实现高效联动的国土空间协同碳减排目标。

此外,现有研究大多停留在对国土空间碳汇冲突的现状评价,缺乏对未来不同发展情景下的演变模拟研究。空间碳汇冲突演变规律的多情景模拟预测,需以土地利用演变模拟为基础。土地利用演变模拟可通过多种模型实现,其中以元胞自动机(Cellular Automata, CA)为基础的衍生模型运用最广泛,且该模型经过不断发展形成了基于 TAS(Transition Analysis Strategy)的 CA 模型,如 logistic-CA^[20]和 ANN-CA^[21]模型;基于 PAS(Pattern Analysis Strategy)的 CA 模型,如 CLUE-S^[22]、Fore-SCE^[23]和 FLUS 模型^[24];基于斑块单位的 CA 模型,如 SLEUTH 模型^[25]。但上述 CA 模型存在 2 个问题:一是在揭示土地利用变化的潜在驱动因素方面具有局限性^[26];二是无法在时空上捕捉多种土地利用斑块的演变^[27]。而结合 LEAS(Land Expansion Analysis Strategy)和 CARS(CA based on Multiple Random Seeds),所构建的斑块生成土地利用模拟模型(Patch-generating and Land Use Simulation, PLUS)^[28-29]具有模拟精度高、数据处理快和能有效地模拟多地类复杂演变等优势,有效解决了上述问题。

综上所述,如何科学测度国土空间碳汇冲突程度并进行多情景模拟,以及如何甄别研究区国土空间碳汇冲突潜在风险区域?是缓解区域人-地矛盾关系,推进“双碳”目标顺利实现进程中的重要科学问题。因此,本文在上述现有研究基础上,结合生态学、经济学和地理学的相关理论和方法,综合考虑国土空间利用冲突、社会经济发展和碳汇效应,创新性地从空间碳排压力、空间固碳能力和空间不稳定性 3 个维度,构建国土空间碳汇冲突评价模型。选择成渝地区双城经济圈为研究区,从县域尺度,协同多源数据,运用气泡图谱法、InVEST 模型和 PLUS 模型等方法,分析并多情景模拟 1980—2050 年研究区国土空间利用格局演变下的碳汇冲突时空演变趋势,并借助冲突矩阵方法进一步甄别研究区国土空间碳汇冲突的潜在风险区域。本文为精准识别国土空间碳汇冲突提供新的研究思路,有助于拓展土地利用冲突理论和人地关系理论的研究范畴,丰富国土空间布局优化的理论体系,为我国其他城市群制定“政域-流域”的国土空间碳汇冲突调控策略与协同监管机制提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

成渝地区双城经济圈位于“一带一路”和长江经济带交汇处,是西部陆海新通道的起点,具有连接西南西北,沟通东亚、东南亚与南亚的独特优势,在国家发展大局中具有独特而重要的战略地位。成渝地区双城经济圈地处长江流域最脆弱、最复杂、最敏感的生态保护区,在国家“生态优先,绿色发展”的低碳战略中占据重要地位。区域总面积 18.46 万 km²,全区覆盖 142 个县级行政单位(图 1)。

截至 2020 年全区常住人口约 9874.50 万人,占全国总人口的 6.94%。地区生产总值约 6.56 万亿元,占全国生产总值的 6.47%。近年来,该区域城镇化发展进程不断加快,国土空间利用格局快速变化^[30]。生态系统服务水平下降、碳汇冲突显著增高、生态风险等问题严重制约了该区域的低碳可持续发展^[31]。

1.2 研究方法

1.2.1 国土空间多情景模拟模型

PLUS 模型通过提取两期土地利用数据之间各类用地相互转化的样本进行训练,基于转化概率对未来土地利用进行模拟^[29]。PLUS 模型主要包括 2 个模块:LEAS 模块能够提取两期土地利用变化间的用地扩张部分并进行采样,采用随机森林算法挖掘并获取各类用地的驱动因素贡献率和发展概率;CARS 模块结合随机种子生成、过渡转移矩阵和阈值递减机制,在发展概率的约束下模拟未来土地利用情况。具体公式如下:

(1) 土地扩张分析策略(LEAS)

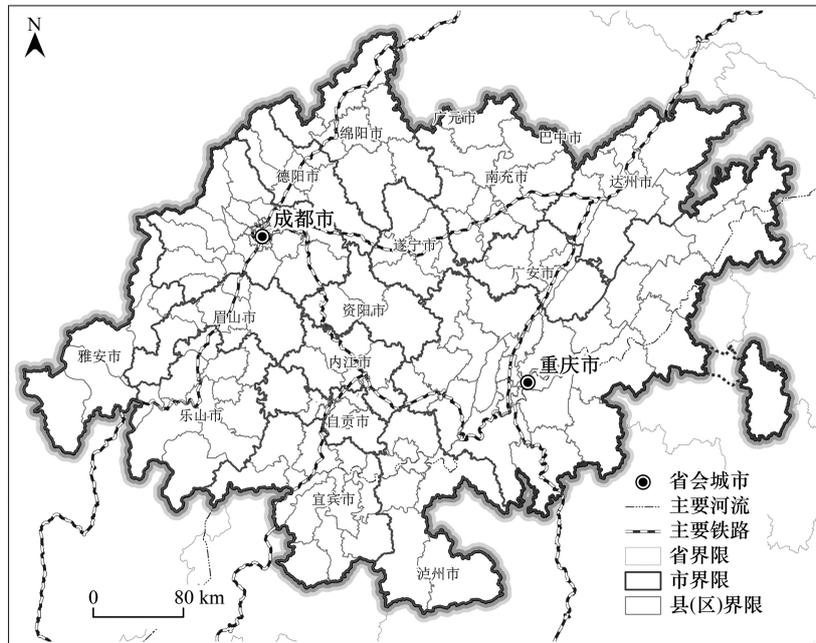


图 1 研究区概况

Fig.1 Location of the study area

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

式中, X 为由驱动因素组成的向量; M 为决策树数量; d 取值为 1 时,表示其他土地利用类型可以转变为土地利用类型 k , d 取值为 0 时,表示其他土地利用类型不可以转变为地类 k ; $h_n(X)$ 为在决策树为 n 时,计算得到的土地利用预测类型; $I[h_n(X) = d]$ 为决策树的指数函数; $P_{i,k(x)}^d$ 为空间第 i 单元处第 k 类土地利用类型的转换概率。

(2) 多类型随机斑块种子 CA 模型(CARS)

$$OP_{i,k}^{d=1,t} = P_{i,k}^d \times \Omega_{i,k}^t \times D_k^t \tag{2}$$

式中, $OP_{i,k}^{d=1,t}$ 为 i 处空间单元在 t 时刻向土地利用类型 k 转变的总概率; $P_{i,k}^d$ 为土地利用类型 k 在空间单元 i 处的适宜性概率; $\Omega_{i,k}^t$ 为土地利用类型 k 单元格 i 的领域效应; D_k^t 为自适应驱动系数。土地利用领域权重和土地利用成本矩阵(如表 1、表 2 所示)。

表 1 土地利用邻域权重

Table 1 Land use neighborhood weight

土地利用类型 Land use types	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Urban land	未利用地 Unused land
邻域权重 Neighborhood Weights	0.57	0.10	0.82	0.51	1.00	0.43

(3) 土地利用多情景设置

参考王宁飞等^[32]学者的研究,并综合考虑成渝地区双城经济圈实际发展情况,设置 4 种土地利用情景:自然发展情景(NE),延续历史时期土地利用发展趋势;经济发展情景(ED),优先考虑经济发展,增加建设用地的扩张概率,限制森林、草地等生态用地的扩张速度,以此模拟经济增长、城市化进程加快和人类活动对土地利用变化的影响;碳减排情景(CE),严格限制建成区扩张,模拟实施“双碳”生态措施的效果;可持续协调

发展情景(SC),满足经济发展和促进生态保护的同时,允许林地、草地和建设用地适度扩张。利用数量约束方法实现4种发展情景(表3),基于1980—2020年各土地利用类型发展概率,在Markov-Chain中调整各土地利用类型发展概率并保证总概率为1,初步模拟不同发展情景下的各土地利用类型斑块数量^[33],并在CARS模块输入相关参数进行实际模拟。

表2 土地利用成本矩阵

Table 2 Land use cost matrix

土地利用类型 Land use types	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Urban land	未利用地 Unused land
耕地 Cultivated land	1	1	1	1	1	0
林地 Forest land	1	1	1	1	1	0
草地 Grassland	1	1	1	1	1	0
水域 Water area	0	0	0	1	0	0
建设用地 Urban land	0	0	0	0	1	0
未利用地 Unused land	1	1	1	1	1	1

表3 不同发展情景下的土地利用类型发展概率

Table 3 Development probability of land use type in multiple scenarios

转移类型 Types of transfers	NE	ED	CE	SC
耕地→林地 Cultivated land→Forest land	—	-30%	+40%	+20%
耕地→草地 Cultivated land→Grassland	—	-40%	+30%	+10%
耕地→建设用地 Cultivated land→Urban land	—	+50%	-50%	+10%
林地→建设用地 Forest land→Urban land	—	—	-30%	—
草地→林地 Grassland→Forest land	—	—	+50%	—
草地→建设用地 Grassland→Urban land	—	+40%	-50%	—
未利用地→建设用地 Unused land→Urban land	—	+50%	-30%	—

“—”表示与1980—2020年土地利用类型发展概率保持一致,“+”表示在1980—2020年土地利用类型发展概率基础上有所增加,“-”表示在1980—2020年土地利用类型发展概率基础上有所减小;NE:自然发展情景 Natural evolution;ED:经济发展情景 Economic development scenario;CE:碳减排情景 Carbon emissions reduction scenario;SC:可持续协调发展情景 Sustainable coordinated development scenario

1.2.2 国土空间碳汇冲突评价模型

国土空间作为生态系统碳汇功能和社会经济功能的重要载体,在人地关系作用过程中,具有资源有限性、空间溢出性和用途多宜性等基本属性特征^[34]。因此,在国土空间开发利用过程中客观上存在社会、经济、生态等多方面的空间资源博弈^[35]。而碳汇冲突是国土空间开发利用过程中生态系统服务权衡利益引起的各种矛盾的集中体现。具体表现为人类活动对林地、草地等具有碳汇效应的生态空间的挤占,干扰生态系统碳收支服务供需平衡与自然碳循环,扰乱碳汇功能空间规模、结构与布局的过程。

本文结合生态学、经济学和地理学的相关理论和方法^[36-37],将国土空间利用冲突、社会经济发展和碳汇效应相结合,从空间碳排压力、空间固碳能力和空间不稳定性3个维度,构建国土空间碳汇冲突分析框架(图2),识别研究区国土空间碳汇冲突程度及潜在风险区域。其中,以空间碳排压力和空间固碳能力之差表征碳源空间和碳汇空间之间的利益博弈结果,即国土空间利用过程中的碳收支失衡程度(直接冲突);同时,以空间不稳定性表征碳汇空间和碳源空间的分布格局合理性,即国土空间利用类型在人类活动下的抗干扰能力(间接冲突)，“空间不稳定性”会加剧国土空间的碳排压力、削弱国土空间的固碳能力,加剧直接冲突,进而引发国土空间碳汇冲突的“失控”。

国土空间碳汇冲突指数表示为:

$$LCC = SCEP + SI - SCC \quad (3)$$

式中,LCC为评价单元国土空间碳汇冲突指数;SCEP为空间碳排压力,SI为空间不稳定性,SCC为空间固碳能力;SCEP、SCC、SI及LCC $\in [0, 1]$ 。LCC值越大,表明国土空间碳汇冲突程度越大;反之,冲突程度越小。国土空间碳汇冲突等级划分如表4所示。

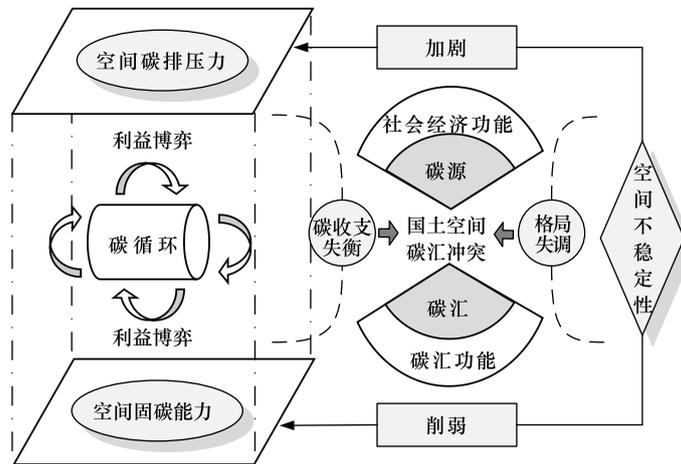


图 2 国土空间碳汇冲突分析框架

Fig.2 Territorial carbon sink conflict mechanism

表 4 国土空间碳汇冲突等级划分标准

Table 4 Standard for classification of territorial carbon sink conflict

冲突指数 Conflict index	冲突等级 Degree of conflict	特征 Characteristic
$LCC \in [0.0, 0.25)$	稳定可控	碳源和碳汇间的利益博弈基本不存在,生态系统碳收支平衡,碳汇和碳源空间分布合理,碳固持模式稳定。
$LCC \in [0.25, 0.35)$	基本可控	碳源和碳汇间的利益博弈较小,生态系统碳收支基本平衡,碳汇和碳源分布基本合理,碳固持模式基本稳定。
$LCC \in [0.35, 0.45)$	濒临失控	碳汇与碳源开始利益博弈,生态系统碳收支濒临失衡,碳汇和碳源分布濒临失调,碳固持模式濒临崩溃。
$LCC \in [0.45, 0.55)$	基本失控	碳源在博弈中占优势地位,生态系统碳收支基本失衡,碳汇和碳源分布基本失调,碳固持模式基本崩溃。
$LCC \in [0.55, 1.00]$	严重失控	碳源在利益博弈中占主导地位,生态系统碳收支失衡,碳汇和碳源空间分布失调,碳固持模式崩溃。

LCC:国土空间碳汇冲突指数 Land carbon conflict index

(1) 空间碳排压力

空间碳排压力(SCEP)用于衡量一定时期内各类社会经济活动产生的碳排放量对国土空间的压迫程度。SCEP 值越高,表明一定时期内国土空间所受碳排压力越大。其中,国土空间碳排效应(LP)用于衡量一定区域内不同国土空间利用类型的碳排放压力。参考苑韶峰^[38]和袁凯华等^[39]学者的研究,将成渝地区双城经济圈耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地的碳排放系数分别确定为 0.4689、-0.6046、-0.0206、-0.2530、65.3000 和 -0.0005kg/m²,并采用基于 IPCC 清单的直接估算法进行测度^[40]。外部环境碳排压力(ECEP)用于衡量各种人为因素和社会经济因素对国土空间造成的外部压力。国内外学者针对社会经济发展与生态系统碳汇服务功能的相关性开展了大量研究。何小钰等^[41]研究表明建设用地覆盖率、人口密度与外部环境碳排压力有显著正相关性。孙浩等^[42]研究表明 GDP 与外部环境碳排压力有显著正相关性。因此,选取建设用地覆盖率、人口密度与年均 GDP 表示外部环境碳排压力,并采用熵权法将权重分别确定为:0.35、0.23、0.42。2050 年人口密度、年均 GDP 分别通过联合国世界人口展望、世界银行预测值计算得到。计算公式如下:

$$SCEP = LP + ECEP \tag{4}$$

$$LP = \sum_{i=1}^6 S_i \times U_i \tag{5}$$

$$ECEP = \sum_{t=1}^n (f_a \times w_{ta} + f_b \times w_{tb} + f_c \times w_{tc}) \tag{6}$$

式中, S_i 为土地利用类型 i 的面积; U_i 为土地利用类型 i 的碳排放系数; n 为评价单元数量; f_a 、 f_b 、 f_c 分别为评价单元建设用地占比、人口密度、年均 GDP; w_{ia} 、 w_{ib} 、 w_{ic} 为各评价因素权重。

(2) 空间固碳能力

空间固碳能力 (SCC) 用于衡量国土空间在一定时间内所能固持的碳总量, 即碳汇效应的生态系统净初生产力。在碳循环与生态系统碳源/碳汇平衡的复杂网络中, 固碳能力直观体现生态系统对碳输入与碳输出的调节机制与风险响应能力^[43]。SCC 值越大, 表明该区域能固持的碳总量越大, 对该区域国土空间碳汇冲突的减压能力和抗风险能力越强。本文使用 InVEST 模型中的 Carbon storage and sequestration 模块的 4 种基本碳库 (地上生物量、地下生物量、土壤有机质和死亡凋落物有机质), 对区域空间固碳能力进行评估^[19]。计算公式如下:

$$C_i = C_{i_above} + C_{i_below} + C_{i_soil} + C_{i_dead} \quad (7)$$

$$SCC = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i \quad (8)$$

式中, C_i 为土地利用类型 i 的综合碳密度; C_{i_above} 为地上生物量碳库; C_{i_below} 为地下生物量碳库; C_{i_soil} 为土壤有机质碳库; C_{i_dead} 为死亡凋落物有机质碳库; S_i 为土地利用类型 i 的总面积; n 为土地利用类型数量。

碳密度数据是 InVEST 模型碳汇量计算中重要的输入参数, 其精确度很大程度上决定了最终结果的准确性。已有研究认为同一气候带的同一土地类型, 碳密度差异较小^[44]。因此, 本文参考国家生态系统科学数据中心所整理的 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集^[45], 结合前人研究^[46-47], 剔除异常值并分析合理性, 最终得到成渝地区双城经济圈碳库数据 (表 5)。

表 5 研究区不同土地利用类型碳密度值/(t/hm²)

Table 5 Carbon density values of different land use types in the study area

土地利用类型 Land use types	地上生物量碳 Aboveground biomass carbon	地下生物量碳 Belowground biomass carbon	土壤有机碳 Soil organic carbon	死亡凋落物有机碳 Litter organic carbon
耕地 Cultivated land	3.45	0.69	72.50	2.11
林地 Forest land	36.75	14.29	104.86	2.78
草地 Grassland	4.12	8.24	70.03	2.42
水域 Water area	1.62	0	64.09	1.78
建设用地 Urban land	0	0	25.25	0
未利用地 Unused land	0.08	2.11	10.76	0.96

(3) 空间不稳定性

空间不稳定性 (SI) 用于衡量国土空间利用类型空间分布格局对碳汇和碳源利益博弈产生的影响程度及对生态系统碳循环过程的干扰程度。在生态系统碳循环过程中, 碳源和碳汇具有特定的空间分布格局和碳固持模式^[48]。在碳汇可吸收量和碳源已排放量恒定的情况下, 不同格局和模式下生态系统的实际碳循环量不同, 合理的空间分布格局和稳定的碳固持模式有利于发挥碳汇极限效益^[49-50]。但随着社会经济的快速发展, 大量土地被无序开发与低效利用, 在减少碳汇资源总量的同时, 也破坏国土空间的稳定性^[51], 加剧空间碳排压力、削弱碳汇空间可发挥的最大固碳效应。参考向芳芳等^[52]、梁甜等^[53]学者的研究, 选取景观脆弱性、复杂性和暴露性, 表征空间不稳定性。其中, 复杂性指数 (CI), 反映人类活动对空间格局的影响程度及国土空间受邻近单元的干扰程度, 数值越高, 表示所受影响越大。脆弱性指数 (FI), 反映国土空间抵抗外界压力的能力, 数值越高, 表示抵抗干扰的能力越弱。参考杨帆等^[54]学者的研究, 将各类土地利用类型脆弱性指数设定为 1—6, 依次为建设用地、林地、草地、耕地、水域和未利用地。暴露性指数 (LE), 反映国土空间面临自然灾害或其他潜在风险的可能性程度, 数值越高, 表示其面临的潜在风险威胁越大。参考吴蒙等^[2]学者的研究, 用到高速公路、主要河流、省级和市级行政中心的距离表示暴露性指数, 并分别设权重为 0.15、0.20、0.35 和 0.30。2050 年高速公路、主要河流、省级和市级行政中心与自然发展状态保持一致。计算公式如下:

$$SI = FI + CI + LE \quad (9)$$

$$FI = \sum_{i=1}^n F_i \times \frac{a_i}{S} (n = 6) \quad (10)$$

$$CI = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\frac{2 \ln(0.5 P_{ij})}{\ln(a_{ij})} \left(\frac{a_{ij}}{A} \right) \right] \quad (11)$$

$$LE = \sum_{i=1}^n (f_j \times w_{ij} + f_k \times w_{tk} + f_u \times w_{tu} + f_p \times w_{ip}) \quad (12)$$

式中, m 为研究区评价单元总数; n 为土地利用类型总数; i 为第 i 类土地利用类型; a_i 为评价单元面积; S 为研究区总面积; F_i 为脆弱性指数; j 为第 j 个评价单元; a_{ij} 为评价单元 i 第 j 类土地利用类型的面积; P_{ij} 为周长; f_j 、 f_k 、 f_u 和 f_p 为评价单元到高速公路、主要河流、省级和市级行政中心的距离; w_{ij} 、 w_{tk} 、 w_{tu} 和 w_{ip} 为各评价因素权重。

对各项指标测算结果进行标准化处理,具体公式如下:

$$R_{ab} = \frac{X_{ab} - \min(X_{ab})}{\max(X_{ab}) - \min(X_{ab})} \quad (13)$$

式中, R_{ab} 表示标准化处理结果, X_{ab} 表示第 a 年第 b 项指数, \min 表示最小值, \max 表示最大值。SCEP、SCC、SI 和 LCC 均进行此处理。

1.3 数据来源与预处理

本文所采用的数据均来自国内外公开数据库,包括土地利用现状数据、DEM、河流水域数据等(表 6)。1980—2020 年 5 期土地利用数据,空间分辨率为 30m×30m,精度约为 90.00%,Kappa 系数约为 0.85。结合土地利用/土地覆被特征,将土地利用数据重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六大地类。借助 ArcGIS 10.5 提取 OpenStreetMap 矢量数据并进行欧氏距离分析,利用 DEM 数据进行坡度分析,使用按掩膜提取工具对数据进行提取分析。为保证空间数据精度的一致性,利用重采样工具将驱动因素数据统一转换成空间分辨率为 30m×30m 的栅格数据。

表 6 数据来源及说明

Table 6 Data source and description

数据类型 Data type	数据名称 Data name	数据来源 Data source
土地利用数据 Land use data	土地利用现状	中国科学院资源环境与数据中心 (http://www.resdc.cn)
自然数据 Natural data	DEM	中国科学院地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn)
	河流水域	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org)
	坡度	利用 ArcGIS 软件从 DEM 数据中提取生成
	年平均温度	中国科学院资源环境与数据中心 (http://www.resdc)
社会经济数据 Socioeconomic data	年平均降水	中国科学院资源环境与数据中心 (http://www.resdc)
	各级道路	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org)
	各级行政中心	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org)
	碳密度	国家生态系统科学数据中心 (https://www.cern.ac)
	夜间灯光强度	NOAA (https://www.avl.class.noaa.gov)
	人口密度	Worldpop (http://www.worldpop.org)
	国民生产总值	中国科学院资源环境与数据中心 (http://www.resdc)
人口变化率	联合国世界人口展望 (https://population.un.org)	
GDP 增长率	世界银行 (https://data.worldbank.org)	

DEM:数字高程模型 Digital elevation model;GDP:国内生产总值 Gross domestic product;NOAA:美国国家海洋和大气管理局 National Oceanic and Atmospheric Administration

2 结果与分析

2.1 国土空间演变预测

2.1.1 近 40 年研究区国土空间演变特征分析

1980—2020 年间,成渝地区双城经济圈水域、未利用地面积未发生显著变化;耕地、草地面积呈现减少趋势,

分别减少 4639.25km²(-3.92%)、2176.00km²(-18.20%);林地、建设用地面积呈现增加趋势,分别增加 968.79km²(+1.97%)、5251.27km²(+242.56%)。土地利用转移主要发生在耕地、林地、草地和建设用地之间(图 3)。

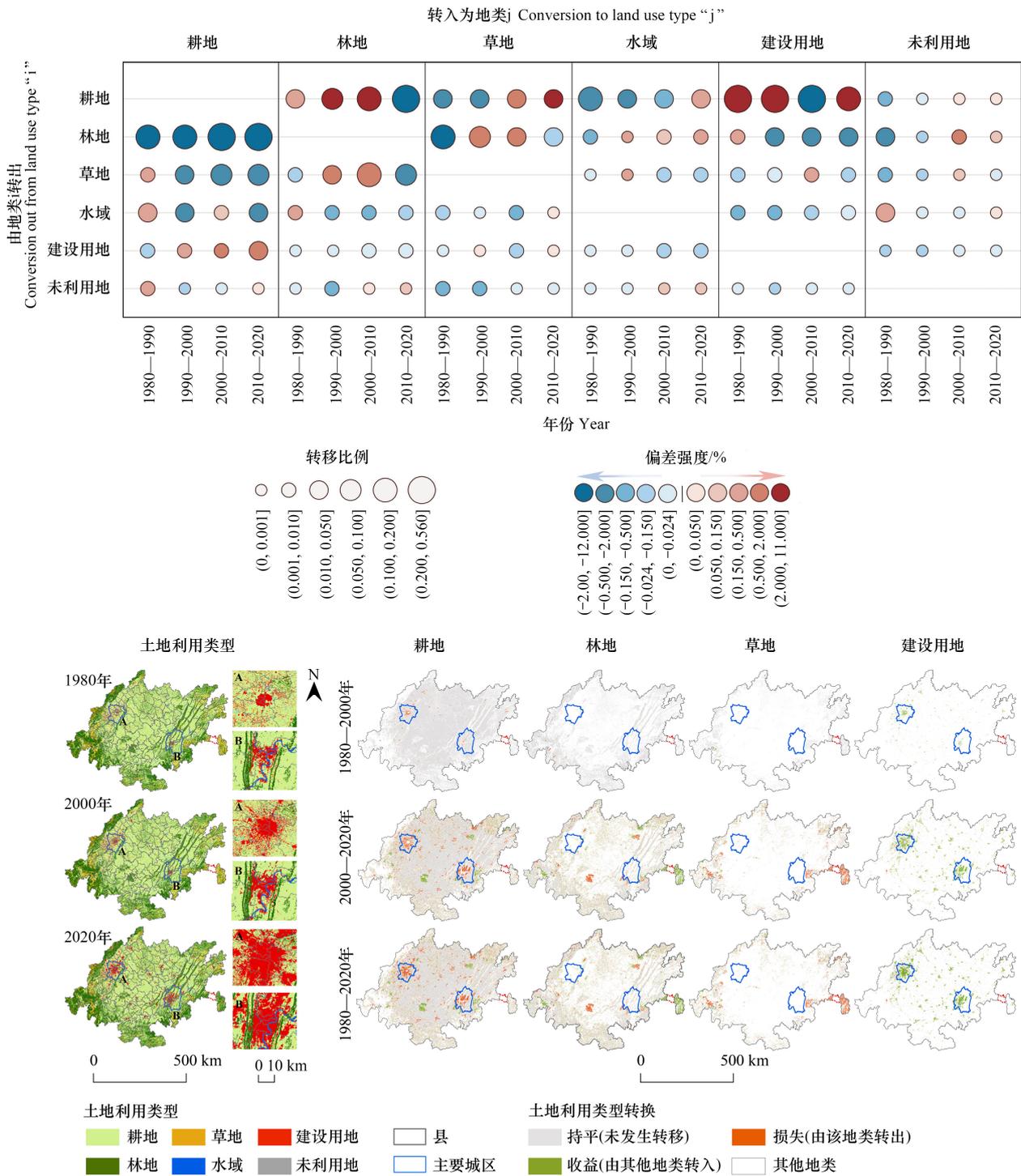


图 3 1980—2020 年研究区国土空间演变特征

Fig.3 Characteristics of territorial spatial evolution in the study area from 1980 to 2020

i:转出的土地利用类型,包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地;j:转入的土地利用类型,包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地

其中,耕地转移为建设用地的面积为 5202.64km²,是研究区土地利用转移的主要形式。林地和耕地之间的相互转移也较为频繁,耕地向林地转移 4653.17km²,占耕地转出总面积的 40.89%,同时林地向耕地转移

4752.96km²,占林地转出总面积的 78.77%。草地分别向耕地、林地转移 1383.33km²、2277.39km²,分别占草地转出面积的 6.26%、10.30%。成渝地区双城经济圈建设用地主要集中在成都市、重庆市中心城区,并呈多点集聚扩张趋势。耕地主要分布在安岳县、三台县和仁寿县等地势平坦的中部平原地区,耕地减少区域主要分布渝北区西南部、双流区南部等快速城市化地区,耕地增加区域主要分布沿滩区、大安区和梁县西部等地区。林地、草地等生态用地主要分布在石棉县、古蔺县和宣汉县等地势较为复杂的西南部,林地减少区域主要分布在沿滩区、大安区和梁县西部地区,林地增加区域主要分布在汉源县东部、丰都县东南部和黔江区等地区,草地减少区域主要分布在黔江区、涪陵区西南部和汉源县东部地区。

2.1.2 不同发展情景下研究区国土空间演变趋势预测

基于 PLUS 模型,以 2010 年的土地利用数据为预测模拟基期数据,选取 DEM、夜间灯光强度和年均气温等 15 个驱动因素,模拟 2020 年成渝地区双城经济圈的土地利用数据。并使用 FOM 统计工具进行精度验证,精度验证表明:Kappa 系数为 0.8411,总体精度为 0.9139,模拟结果准确性较高,能科学反映研究区不同时段的土地利用变化情况。基于此,本文以 2020 年土地利用数据为基础,模拟 2050 年成渝地区双城经济圈 4 种发展情景下的土地利用数据(图 4)。

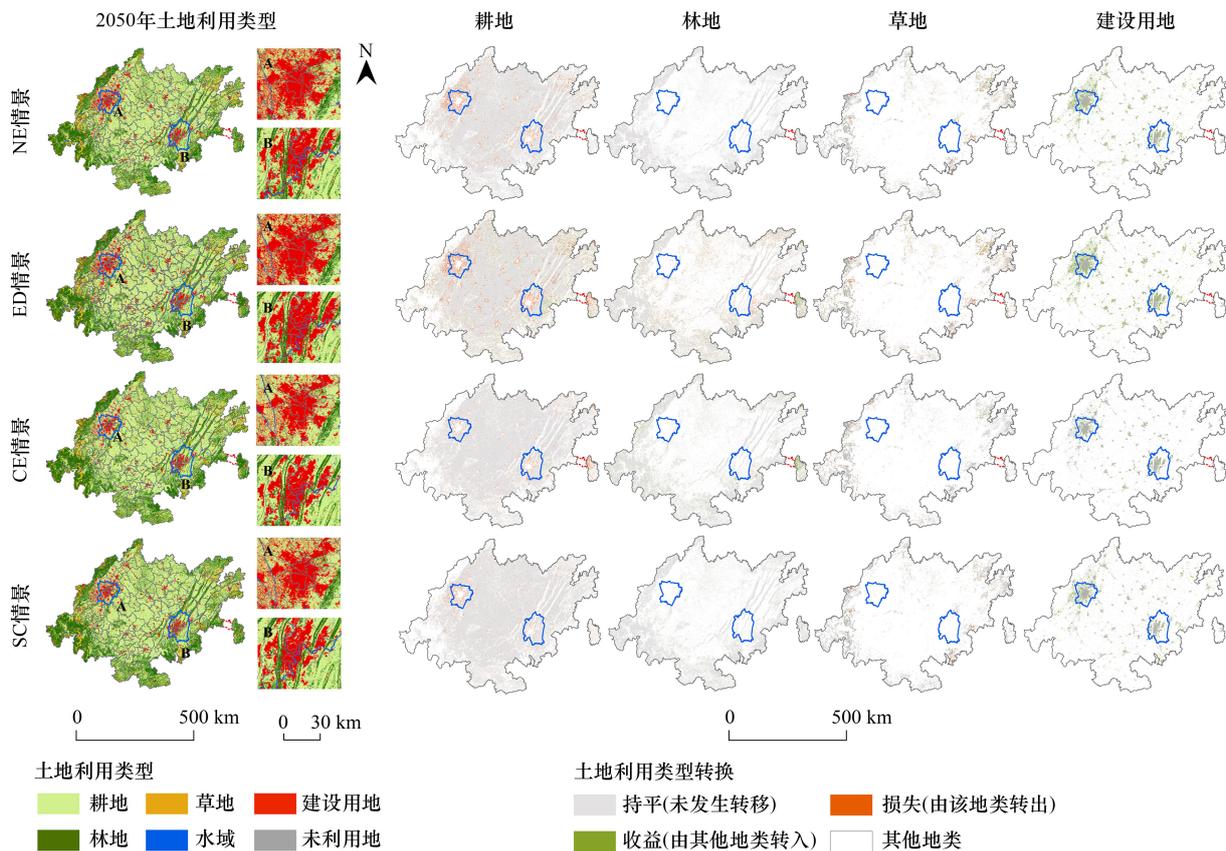


图 4 不同发展情景下研究区国土空间演变趋势预测

Fig.4 Forecast the evolution trend of territorial space in the study area under different development scenarios

NE: 自然演化情景; ED: 经济发展情景; CE: 碳减排情景; SC: 可持续发展情景

预测到 2050 年,在自然发展情景(NE)下的土地利用空间分布情况与 1980—2020 年保持一致,水域、未利用地面积未发生显著变化。耕地、草地面积将呈现减少趋势,分别减少 4099.82km²(-3.60%)、299.76km²(-3.61%)。建设用地的面积将呈现增加趋势,面积增加 3701.18km²(+49.91%)。与自然发展情景(NE)土地转移情况相比,在经济发展情景(ED)下,随着城市化进程加快,大量建设用地侵占生态用地,郫都区、温江区和船山区及其周边城市建设用地面积增加最明显。耕地转移为建设用地的面积增加 848.47km²(+26.42%),

草地转移为耕地的面积增加 562.91km^2 (+134.24%)。在碳减排情景 (CE) 下,碳达峰碳中和“1+N”政策全面推进,低碳经济发展模式进一步完善,黔江区北部草地、林地等生态用地面积增加最为明显。耕地转移为建设用地的面积减少 2136.41km^2 (-66.52%),草地转移为林地的面积增加 586.14km^2 (+68.69%)。在可持续协调发展情景 (SC) 下,通过科学规划和合理布局,经济发展与生态保护深度融合。耕地转移为建设用地的面积减少 1570.25km^2 (-48.90%),草地转移为建设用地的面积增加 93.63km^2 (+19.16%),崇州市和名山区草地面积减少较为明显。

2.2 国土空间碳汇冲突识别与预测

2.2.1 国土空间碳汇冲突时空格局演变趋势分析

结合空间碳排压力、空间固碳能力和空间不稳定性划分国土空间碳汇冲突等级,可知 1980—2000 年成渝地区双城经济圈工业发展和城市化进程相对较慢,对资源的需求较为有限,区域碳汇冲突程度整体相对可控。1980 年稳定可控、基本可控、濒临失控、基本失控、严重失控区域分别占 28.16%、47.18%、15.49%、4.93%、4.24%。1990 年基本可控区域波动最大,减少 5.63%。2000 年稳定可控区域波动最大,减少 13.38%。2000—2010 年成渝地区双城经济圈工业化、城市化进程的加速对碳汇资源造成了压力,碳汇冲突程度急剧恶化。2010 年濒临失控、基本失控、严重失控区域占比分别增加了 9.15%、12.67%、9.86%。2010—2020 年国家出台了一系列的环境保护政策和法规制度,成渝地区双城经济圈逐渐向高新技术和现代服务业等低碳产业转型,碳汇冲突程度逐渐缓和。2020 年濒临失控、基本失控、严重失控区域占比分别减少了 9.85%、10.56%、9.86% (图 5)。

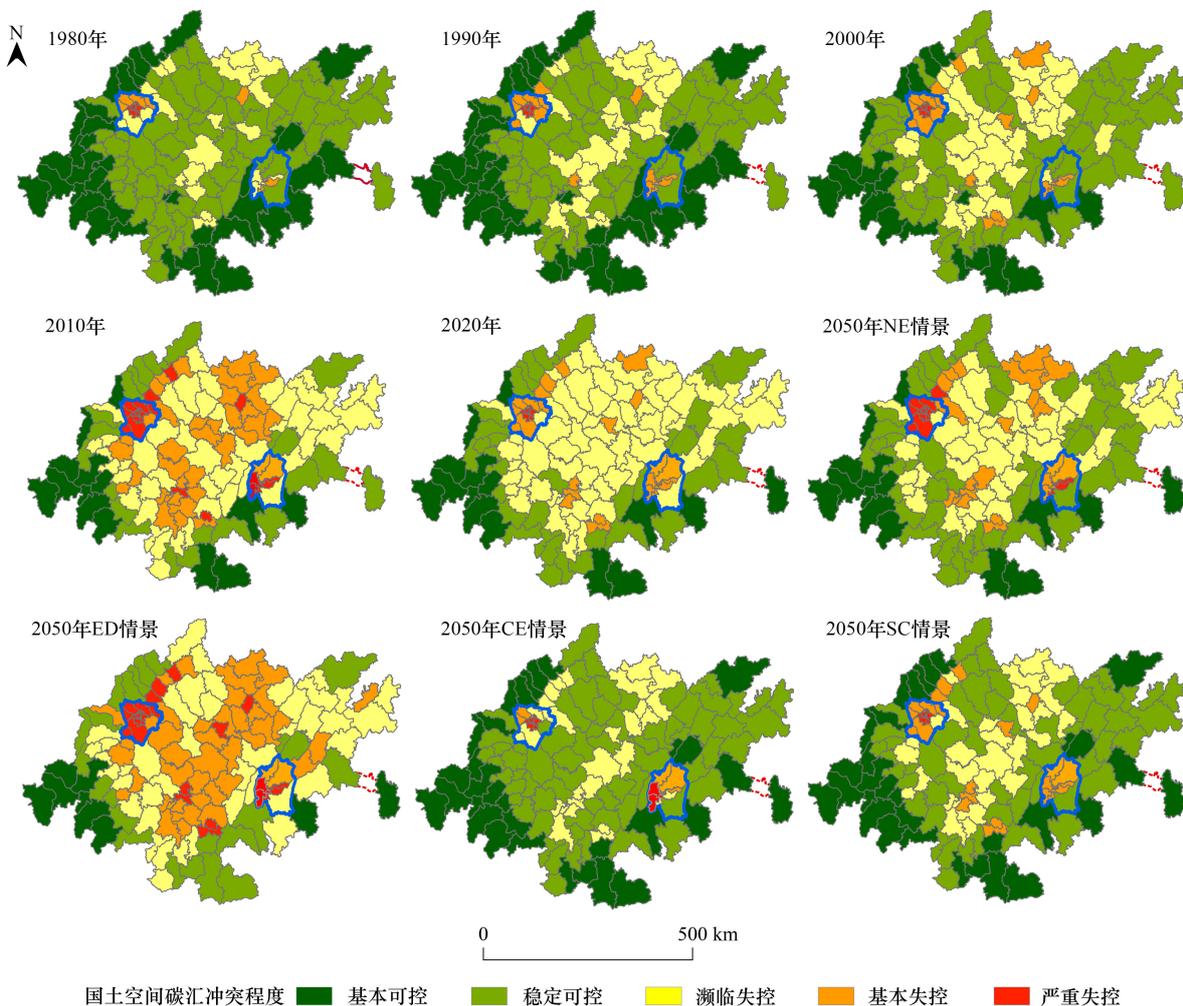


图 5 1980—2050 年碳汇冲突及其相关指数时空格局演变

Fig.5 Spatial-temporal pattern evolution of carbon sink conflicts and related indices from 1980 to 2050

预测 2020—2050 年,NE 情景下基本可控面积减少 10.56%,濒临失控、基本失控、严重失控面积分别增加 4.53%、15.49%、6.34%。与自然发展情景(NE)下的碳汇冲突情况相比,在经济发展情景(ED)下,失控区域显著增加,稳定可控、基本可控、濒临失控区域占比分别减少 4.23%、18.31%、1.41%,基本失控、严重失控区域占比分别增加 15.49%、8.45%。在碳减排情景(CE)下,可控区域显著增加,稳定可控、基本可控区域占比分别增加 11.26%、14.08%。濒临失控、基本失控、严重失控区域占比分别减少 5.63%、11.27%、7.75%。在可持续协调发展情景(SC)下,各类的转化相对均衡稳定可控、基本可控、区域占比分别增加 11.26%、4.22%。濒临失控、基本失控、严重失控区域占比分别减少 7.05%、0.71%、6.34%(图 5)。其中,成都市、重庆市主要城区及其周边区域碳汇冲突程度最高,主要受空间碳排压力和空间固碳能力的影响。成渝双城连接地带碳汇冲突程度较高,主要受空间碳排压力、空间固碳能力和空间不稳定性的共同影响。

2.2.2 国土空间碳汇冲突矩阵类型甄别

为进一步评估成渝地区双城经济圈国土空间碳汇的潜在冲突风险,参考王光辉和王雅琦^[55]的相关研究,结合前文对研究区国土空间碳汇冲突的识别结果,以水平坐标表示碳汇冲突的严重性,纵坐标表示碳汇冲突发生可能性,将成渝地区双城经济圈 142 个县域单元划分为“三带九区”的国土空间碳汇冲突潜在风险矩阵(图 6、表 7)。

(1)“三带”。碳汇富集带,该地带国土空间碳汇功能潜力与效益最突出,生态用地覆盖率最高,是区域碳储量的核心后备区,对区域碳平衡的能力最强。碳阈缓冲带,该地带为碳汇富集与碳源泛滥的交界地带,土地利用类型变化程度较高,国土空间碳汇能力稳定性较差,是精准调控碳排、缓解碳汇冲突的关键地带。碳源泛滥带,该地带土地无序利用与过度开发程度最强,建设用地覆盖率最高,人-地矛盾关系最突出,是碳排放的主要源头。

表 7 1980—2050 年碳汇冲突“三带九区”冲突矩阵甄别结果

Table 7 Screening results of the “three zones and nine zones” conflict matrix of carbon sink conflicts during 1980—2050

“三带” Three zones	“九区” Nine zones	地区名称 Regional names
碳汇富集带 Carbon sink enrichment zone	碳汇耐受安全区	都江堰、峨边彝族自治县、峨眉山市、金口河区、马边彝族自治县、古蔺县、叙永县、洪雅县、汉源县、芦山县、石棉县、荣经县、江津区、南川区
	碳汇稳态维持区	彭州市、绵竹市、安州区、珙县、屏山县、兴文县、黔江区
	碳汇优化潜力区	大邑县、宣汉县、什邡市、华蓥市、邻水县、沐川县、沙湾区、合江县、纳溪区、雨城区、丰都县
	碳汇紊乱脆弱区	邛崃市、大竹县、通川区、夹江县、丹棱县、威远县、名山区、高县、叙州区、筠连县、北碚区、璧山区、涪陵区、綦江区、永川区、忠县、江油市
	碳汇失衡偶发区	达川区、前锋区、青神县、仁寿县、盐亭县、梓潼县、射洪市、江安县、长宁县、荣县、巴南区、梁平区、铜梁区
碳阈缓冲带 Carbon threshold buffer zone	碳阈波动检测区	崇州市、简阳市、开江县、渠县、中江县、犍为县、市中区、泸县、三台县、游仙区、营山县、蓬溪县、乐至县、自流井区、大足区、垫江县、合川区、开州区、荣昌区、万州区、云阳县、长寿区
	碳阈先导振荡区	广安区、岳池县、井研县、五通桥区、东坡区、彭山区、嘉陵区、西充县、资中县、安居区、大英县、南溪区、雁江区、富顺县、沿滩区
	碳阈轴心响应区	金堂县、龙泉驿区、罗江区、武胜县、高坪区、南部县、蓬安县、仪陇县、东兴区、隆昌市、翠屏区、安岳县、贡井区、潼南区
碳源泛滥带 Carbon source overflow zone	碳源核心控制区	成华区、锦江区、郫都区、青白江区、青羊区、双流区、温江区、武侯区、新都区、新津区、广汉市、旌阳区、江阳区、龙马潭区、涪城区、阆中市、顺庆区、市中区、船山区、大安区、大渡口区、江北区、九龙坡区、南岸区、沙坪坝区、渝北区、渝中区、金牛区

(2)“九区”。碳汇耐受安全区(共 14 个区县),该地区碳汇系统极为稳定,生态恢复能力强,能够承受较高强度的外界干扰而不影响碳汇功能;碳汇稳态维持区(共 7 个区县),该地区呈现出稳定的碳汇状态,对于外部环境的干扰具有一定的抵抗机制;碳汇优化潜力区(共 11 个区县),该地区碳汇能力未充分发挥,通过科学合理的土地利用规划与管理措施,具有巨大的碳增汇潜力;碳汇紊乱脆弱区(共 18 个区县),该地区生态系统脆弱,碳汇功能易受到外界干扰的影响;碳汇失衡偶发区(共 13 个区县),该地区可能由特定的人类活动或

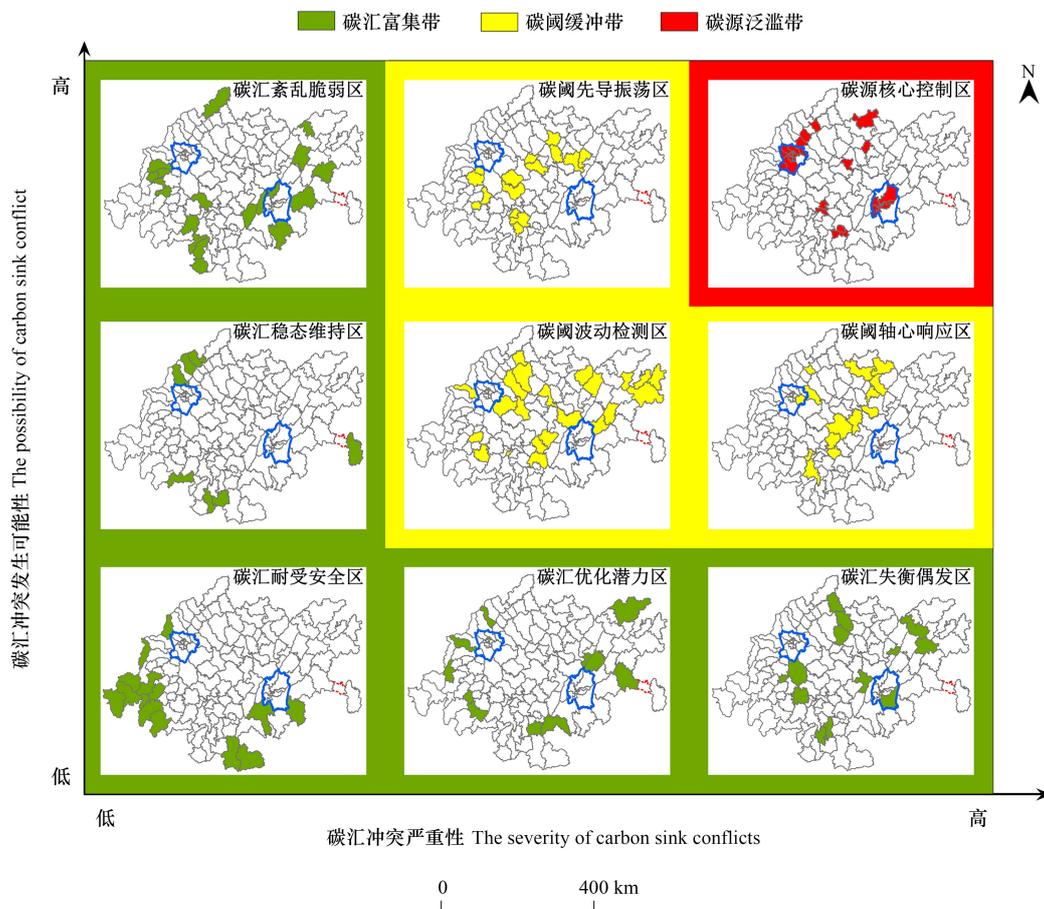


图 6 研究区县域国土空间碳汇冲突潜在风险矩阵

Fig.6 Potential risk matrix of county territorial carbon sink conflicts in the study area

自然事件触发碳汇失控现象;碳阈波动监测区(共 22 个区县),该地区碳阈值波动较大,需建立定期监测机制,以掌握碳阈值变化动态,为预警与调控提供科学依据;碳阈先导振荡区(共 15 个区县),该地区碳阈值变化较为频繁,是碳汇功能变化的先导区域,对于预测碳汇变化趋势具有重要意义;碳阈轴心响应区(共 14 个区县),该地区是碳阈值变化的核心区域,对土地利用变化和气候变化响应最敏感;碳源核心控制区(共 28 个区县),该地区为碳排放的主要源头,碳汇功能严重受损。

从“三带九区”的分布特征来看,碳汇耐受安全区主要分布在都江堰、峨边彝族自治县等生态用地覆盖率高的区域,呈现出明显的“边缘式”分布特征。碳汇稳态维持区主要分布在彭州市、绵竹市等发展潜力尚未完全释放的区域,呈现出明显的“三角式”分布特征。碳汇优化潜力区主要分布在大邑县、宣汉县等区域,呈现出“外围环式”分布特征。碳汇紊乱脆弱区主要分布在邛崃市、大竹县等区域,呈现出“内外双环式”分布特征。碳汇失衡偶发区主要分布在达川区、前锋区等绿色经济增长前沿区域,呈现出“散点式”的分布特征。碳阈波动检测地区主要分布在崇州市、简阳市等繁荣萌芽区域,呈现出“团组式”的分布特征。碳阈先导振荡区主要分布在广安区、岳池县等快速发展区域,呈现出“轴心式”分布特征。碳阈轴心响应区主要分布在金堂县、龙泉驿区等双城经济辐射交会区域,呈现出明显的“轴线式”分布特征。碳源核心控制区主要分布在成华区、锦江区等核心发展区域,呈现出“两极一轴”的分布特征。

3 讨论

3.1 国土空间碳汇冲突识别结果分析

当前学者对国土空间碳汇研究主要集中在碳汇量估算^[7-8]、碳汇演变模拟^[9-10]以及气候变化对碳汇影

响的评估^[11-12],较少涉及国土空间演变下的碳汇冲突识别。在土地开发利用过程中,无序粗放的国土空间开发方式引致碳汇空间格局失衡与空间碳汇功能衰退,干扰区域生态系统碳汇服务的供需平衡与自然碳循环过程^[56],进而演化为国土空间碳汇冲突的“失控”。本文结合生态学、经济学和地理学的相关理论和方法^[36-37],参考吴蒙^[2]、郑洋^[57]的相关研究,创新性地将国土空间利用冲突、社会经济发展和碳汇效应相结合,从空间碳排压力、空间固碳能力和空间不稳定性 3 个维度,构建国土空间碳汇冲突评价模型。并从县域尺度,基于社会经济数据和自然地理等多源数据,综合考虑研究区国土空间利用过程中的自然碳排和人为碳排效应,识别研究区国土空间碳汇冲突程度及其演变趋势。1980—2020 年,随着成渝地区双城经济圈的城市化进程加快和国家生态文明建设目标的提出,研究区的国土空间碳汇冲突整体经历“冲突加剧-冲突缓解”的演变规律。2000 年以前,研究区城市化进程相对较慢,对资源的需求较小,国土空间碳汇冲突程度较低且近 50%的区县处于冲突可控等级。2000—2010 年成渝地区双城经济圈的城市化、工业化进程加速,大量碳汇空间资源被占用和破坏,碳汇冲突失控区域增加近 32%,碳汇冲突程度加剧,尤其是重庆市和成都市的中心城区。自党的十八大以来,生态文明建设战略和“生态优先、绿色发展”目标的相继提出,成渝地区双城经济圈的社会经济发展逐渐向绿色低碳、生态环保转型。2020 年,研究区国土空间碳汇冲突失控区域减少近 30%,冲突程度虽有所缓解,但仍面临冲突失控的风险。

3.2 国土空间碳汇冲突多情景模拟结果分析

为进一步探讨成渝地区双城经济圈未来国土空间碳汇冲突的演变趋势,本文利用 PLUS 模型^[32]预测模拟自然发展情景(NE)、经济发展情景(ED)、碳减排情景(CE)和可持续协调发展情景(SC)4 种发展情景下的国土空间利用模式。PLUS 模型具有模拟精度高、数据处理快和能有效地模拟多地类复杂演变等优势,适合进行较大尺度的土地利用多情景预测。预测到 2050 年,在 NE 情景和 ED 情景下,研究区国土空间碳汇冲突程度较 2020 年都有所加深,失控面积将分别增加近 26%和 23%。而在 CE 情景和 SC 情景下,研究区的碳汇冲突都有明显缓解,失控区域分别减少近 25%和 14%。这与王朝阳等^[58]的相关研究结果是相似的。国土空间碳汇冲突程度较高且有失控风险的区域主要分布在经济活动较大、地势相对平坦的地区,如成都市和重庆市的中心城区、成渝地区双城经济圈的中部地区。由于这些地区的经济快速发展所带来的对土地资源的需求增加,国土空间利用类型变化速率加快,导致碳汇空间结构的稳定性被破坏、国土空间固碳能力下降、国土空间自然碳排和人类经济活动碳排压力增大,由此引发碳汇冲突频繁发生,区域生态安全受到威胁。但本文在设置上述 4 种发展情景时,部分参数的设置较为主观,也缺乏对政策因素的考量,在今后研究中可以对此进行改进,使研究结果更加贴合研究区的客观实际,提高研究的准确性和实用性。

同时本文在风险矩阵理论的基础上,参考王灿等^[59]的相关研究,将研究区的 142 个县域单元划分为“三带九区”的国土空间碳汇冲突矩阵。本文发现研究区共有 28 个县域单元被甄别为碳源泛滥带,是研究区碳汇冲突程度及冲突发生频率最高的区域,占研究区县域总数的 19.72%。共有 51 个县域单元被甄别为碳阈缓冲带,是碳汇冲突发生的潜在区域,占研究区县域总数的 35.92%。共有 63 个县域单元被甄别为碳汇富集区,是区域碳储量的核心后备区,占研究区县域总数的 44.36%。因此,控制研究区的城市扩展速度并促进其经济发展的绿色转型,减轻人口过剩及国土空间过度利用负担,优化并严格遵守区域的生态保护红线、城市开发边界和永久性基本农田边界,对缓解成渝地区双城经济圈县域国土空间碳汇冲突及冲突风险预警具有重要现实意义,为研究区今后国土空间规划提供科学参考。

3.3 政策建议

(1)碳汇富集带:“保护优先、绿色发展”。一是精准划分“三区三线”,推进“六江”生态廊道等生态项目建设,实施碳达峰碳中和区域联合行动,巩固生态环境“共建共保”工作成果。二是严格实施生态保护相关法规和政策,保护生态用地的完整性和稳定性,为区域碳汇提供坚实保障。(2)碳阈缓冲带:“生态修复,精准调控”。一是设立和扩大自然保护区,进一步保护自然生态系统,减少碳排放并促进生态系统的自然恢复。二是加强跨区域协同合作,通过建立联合监测站、共享监测数据、开展联合研究等方式,共同制定国土空间碳汇

冲突调控策略与碳汇协同监管机制。(3)碳源泛滥带:“产业转型、节能减排”。一是加快能源结构优化,加快建设特高压交流工程(甘孜-天府南-成都东、天府南-铜梁)和国家天然气(页岩气)千亿立方米产能基地。发挥四川水电和天然气等清洁能源优势,统筹调配打通“能源大动脉”,构建成渝地区“能源互联网”。二是推动产业结构绿色转型升级,降低高能耗、高排放产业的比重。鼓励发展服务业、高新技术产业等低能耗、低排放的产业,推动绿色低碳发展。三是建立绿色金融体系,包括绿色信贷、绿色债券、绿色基金等,为产业绿色转型提供资金支持。

4 结论

(1)1980—2020年间,研究区各土地利用类型呈现明显的空间分异特征,主要表现为耕地集中、生态用地分散和建设用地多极化发展的特征。耕地转移为建设用地是土地利用转移的主要形式。4种情景的差异主要体现在耕地、林地、草地和建设用地之间。(2)1980—2020年间,碳汇冲突程度呈现“急剧上升-逐渐缓和”的趋势,预测到2050年,不同发展情景下的研究区国土空间碳汇冲突整体可控程度排序依次为:CE>SC>NE>ED。(3)依据“三带九区”的冲突矩阵划分标准,1980—2050年间,碳汇耐受安全区、碳汇稳态维持区等区域分别分布在生态用地覆盖率高、发展潜力尚未完全释放等区域,并呈现出“边缘式”“三角式”等空间分布特征。

参考文献(References):

- [1] Liu G H, Cui F L, Wang Y. Spatial effects of urbanization, ecological construction and their interaction on land use carbon emissions/absorption: evidence from China. *Ecological Indicators*, 2024, 160: 111817.
- [2] 吴蒙,王琳琳,程进.长三角城市群国土空间碳汇冲突测度及空间格局特征分析. *资源科学*, 2022, 44(10): 2048-2059.
- [3] 赵宁,周蕾,庄杰,王永琳,周稳,陈集景,宋珺,丁键滢,迟永刚.中国陆地生态系统碳源/汇整合分析. *生态学报*, 2021, 41(19): 7648-7658.
- [4] 易丹,欧名豪,郭杰,韩逸,易家林,丁冠乔,吴文俊.土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望. *资源科学*, 2022, 44(8): 1545-1559.
- [5] Tian Y Y, Zhou D Y, Jiang G H. Conflict or Coordination? Multiscale assessment of the spatio-temporal coupling relationship between urbanization and ecosystem services: the case of the Jingjinji Region, China. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106543.
- [6] 丁明磊,杨晓娜,赵荣钦,张战平,肖连刚,谢志祥.碳中和目标下的国土空间格局优化:理论框架与实践策略. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1137-1147.
- [7] Waleed M, Sajjad M, Shazil M S. Urbanization-led land cover change impacts terrestrial carbon storage capacity: a high-resolution remote sensing-based nation-wide assessment in Pakistan (1990 - 2020). *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, 105: 107396.
- [8] 杨明新,杨秀春,赵云,黄青东智,李成先,曹文强,陈昂,谷强,李泽宇,王守兴.黄河源区高寒草地碳储量估算及其影响因素. *生态学报*, 2023, 43(9): 3546-3557.
- [9] Zhu L Y, Song R X, Sun S F, Li Y, Hu K. Land use/land cover change and its impact on ecosystem carbon storage in coastal areas of China from 1980 to 2050. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109178.
- [10] 赵胤程,覃盟琳,庞雅月,王政强,史倩倩.基于FLUS-InVEST模型的北部湾城市群生态空间碳汇演变模拟及驱动因素研究. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 345-355.
- [11] Zhao J F, Xie H F, Ma J Y, Wang K L. Integrated remote sensing and model approach for impact assessment of future climate change on the carbon budget of global forest ecosystems. *Global and Planetary Change*, 2021, 203: 103542.
- [12] 李汇文,王世杰,白晓永,操玥,田义超,罗光杰,陈飞,李琴,吴路华,王金凤,王明明,田诗琪,邓元红,胡泽银,杨钰杰,李朝君,路茜,习慧鹏,陈欢,冉晨,罗旭玲.气候变化及生态恢复对喀斯特槽谷碳酸盐岩风化碳汇的影响评估. *生态学报*, 2019, 39(16): 6158-6172.
- [13] 潘方杰,万庆,曾菊新,王宏志,黄琦.城镇化进程中湖北省“生产—生活—生态”空间冲突演化及其影响因素. *经济地理*, 2023, 43(2): 80-92.
- [14] 张徐,李云霞,吕春娟,毕如田,夏露,郭岩松,王煜,许彩彩,孙波.基于InVEST模型的生态系统服务功能应用研究进展. *生态科学*, 2022, 41(1): 237-242.
- [15] Li N, Zhou S N, Margenot A J. From prairie to crop: Spatiotemporal dynamics of surface soil organic carbon stocks over 167 years in Illinois, U.S.

- A. *The Science of the Total Environment*, 2023, 857(Pt 1): 159038.
- [16] 周嘉, 王钰萱, 刘学荣, 时小翠, 蔡春苗. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究. *地理科学*, 2019, 39(12): 1955-1961.
- [17] 张振龙, 侯琰珍, 孙鸿鹄. 市域国土空间碳排放测算及低碳化发展效率差异. *自然资源学报*, 2023, 38(6): 1464-1481.
- [18] 许蕊, 黄贤金, 王佩玉, 刘泽森, 梁洁, 杨琳, 张秀英. 黄河流域国土空间碳中和度研究——以内蒙古段为例. *生态学报*, 2022, 42(23): 9651-9662.
- [19] 王丽蓉, 石培基, 尹君锋, 张伟萍, 石晶, 李雪红, 程番苑. 碳中和视角下甘肃省县域碳收支时空分异与国土空间分区优化. *环境科学*: 2024, 45(7): 4101-4111.
- [20] Chen Y M, Li X, Liu X P, Ai B. Modeling urban land-use dynamics in a fast developing city using the modified logistic cellular automaton with a patch-based simulation strategy. *International Journal of Geographical Information Science*, 2014, 28(2): 234-255.
- [21] Omrani H, Parmentier B, Helbich M, Pijanowski B. The land transformation model-cluster framework: applying k-means and the Spark computing environment for large scale land change analytics. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 111: 182-191.
- [22] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, Limpiada R, Espaldon V, Mastura S S A. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. *Environmental Management*, 2002, 30(3): 391-405.
- [23] Sohl T, Saylor K. Using the FORE-SCE model to project land-cover change in the southeastern United States. *Ecological Modelling*, 2008, 219(1/2): 49-65.
- [24] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [25] Herold M, Goldstein N C, Clarke K C. The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 286-302.
- [26] Sohl T L, Claggett P R. Clarity versus complexity: land-use modeling as a practical tool for decision-makers. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129: 235-243.
- [27] Yang J X, Gong J, Tang W W, Liu C. Patch-based cellular automata model of urban growth simulation: integrating feedback between quantitative composition and spatial configuration. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2020, 79: 101402.
- [28] 胡丰, 张艳, 郭宇, 张盼盼, 吕帅, 张长春. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测. *干旱区地理*, 2022, 45(4): 1125-1136.
- [29] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, Liu S S, Wang B Y, Yao Y. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.
- [30] 李竹, 王兆峰, 吴卫, 邵海琴. 碳中和目标下中国省域碳平衡能力与城镇化的关系. *自然资源学报*, 2022, 37(12): 3136-3152.
- [31] 冯新惠, 李艳, 王诗逸, 余迹, 杨佳钰, 吴能君. “双碳”目标下城市形态对碳排放的影响: 以长江经济带为例. *环境科学*, 2024, 45(6): 3389-3401.
- [32] Wang N F, Chen X P, Zhang Z L, Pang J X. Spatiotemporal dynamics and driving factors of county-level carbon storage in the Loess Plateau: a case study in Qingcheng County, China. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109460.
- [33] 李琛, 高彬斌, 吴映梅, 郑可君, 武燕. 基于 PLUS 模型的山区城镇景观生态风险动态模拟. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(1): 84-94.
- [34] 董光龙, 周俏薇, 孙传璋, 王珏, 柯钦华. 基于“多宜性—稀缺性—多样性”的粤港澳大湾区土地利用冲突识别. *农业工程学报*, 2023, 39(17): 245-255.
- [35] 姚成斌, 周明忠, 张迪, 刘纯军, 姚成勇, 刘平爱, 易祥飞. 乌蒙山区县域三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化. *贵州师范大学学报: 自然科学版*, 2024, 42(1): 45-54.
- [36] 张潇, 谷人旭. 土地利用冲突的时空格局刻画与多情景模拟研究——以长江三角洲城市群为例. *地理研究*, 2022, 41(5): 1311-1326.
- [37] 胡凯群, 林美霞, 齐涛, 叶红, 张国钦, 睢晋玲, 陈天翼, 姚霞, 卢新. 快速城镇化过程中的城市蔓延与生态保护冲突空间识别与量化评估——以长三角生态绿色一体化发展示范区为例. *生态学报*, 2022, 42(2): 462-473.
- [38] 苑韶峰, 唐奕钰. 低碳视角下长江经济带土地利用碳排放的空间分异. *经济地理*, 2019, 39(2): 190-198.
- [39] 袁凯华, 梅响, 陈银蓉, 兰梦婷. 中国建设用地集约利用与碳排放效率的时空演变与影响机制. *资源科学*, 2017, 39(10): 1882-1895.
- [40] 黄珂敏, 曲建升, 李杰, 葛钰洁, 丁洁兰, 宋东桓. 全球气候变化科学评估主导者特征研究——基于 IPCC AR6 作者的科学计量分析. *中国科技论坛*, 2023(12): 125-136.
- [41] 何小钰, 庄雅焯, 邱穗萱, 李桦, 招扬, 卢思言, 林锦耀. 城市三维空间结构对碳排放影响的尺度效应. *生态学报*, 2024, 44(2): 612-624.
- [42] 孙浩, 郭劲光. 地方经济增长目标管理对碳排放效率的影响. *自然资源学报*, 2024, 39(1): 186-205.
- [43] 田茜, 杨芳, 王召欢, 张庆印. 陆地生态系统土壤 CO₂ 排放对模拟增温的响应特征及影响因素. *生态学报*, 2024, 44(5): 1928-1939.

- [44] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [45] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集. *中国科学数据*, 2019, 4(1): 90-96.
- [46] 帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋珉. 基于 InVEST 与 CA-Markov 模型的昆明市碳储量时空演变与预测. *环境科学*, 2024, 45(1): 287-299.
- [47] 毛永发, 周启刚, 王陶, 罗泓然, 伍龙江. 耦合 PLUS-InVEST-Geodector 模型的三峡库区碳储量时空变化及其定量归因. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(5): 1042-1057.
- [48] 罗莎莎, 赖庆标, 林彬, 甄江红. “三生”空间视角下东南丘陵地区土地利用冲突识别. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 148-156, 397.
- [49] 邱陈澜, 王彩侠, 章瑞, 冯悦, 张云路, 李雄, 王凯平. 京津冀城市群生态空间固碳服务功能及其与景观格局的关系特征. *生态学报*, 2022, 42(23): 9590-9603.
- [50] 李珊, 温榕冰, 李建军, 杨豪, 陈婷婷, 朱宁. 中国五大城市群用地景观格局对碳排放绩效的影响. *经济地理*, 2023, 43(12): 91-102.
- [51] 韩雨非, 刘艳中, 陈勇, 汪樱, 张祚, 陈弘映, 谭玉川. 碳排放视角下武汉市土地生态风险时空格局演变. *水土保持研究*, 2024, 31(2): 331-341.
- [52] 向芳芳, 黄丽萍, 陈荣清. 基于综合视角的县域国土空间冲突测度与功能优化——以江西省宜黄县为例. *水土保持通报*, 2024, 44(1): 158-171.
- [53] Liang T, Du P, Yang F, Su Y X, Luo Y C, Wu Y, Wen C H. Potential Land-Use Conflicts in the Urban Center of Chongqing Based on the “Production-Living-Ecological Space” Perspective. *Land*, 2022, 11(9): 1415.
- [54] 杨帆, 金晓斌, 刘晶, 张晓琳, 宋家鹏, 李权荃, 周寅康. 时空动态视角下快速城市化地区景观生态风险评价与分区. *农业工程学报*, 2023, 39(18): 253-261.
- [55] 王光辉, 王雅琦. 基于风险矩阵的中国城市韧性评价——以 284 个城市为例. *贵州社会科学*, 2021(1): 126-134.
- [56] Yue C, Ciaia P, Houghton R A, Nassikas A A. Contribution of land use to the interannual variability of the land carbon cycle. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3170.
- [57] 郑洋, 程琳琳, 王义方, 王俊奇. 资源型城市空间冲突测度及其空间响应研究. *地理科学进展*, 2023, 42(2): 275-286.
- [58] 王朝阳, 张军以, 李海懿, 苏维词. 重庆市土地利用冲突多尺度时空演化与多情景演化模拟. *生态学报*, 2024, 44(3): 1024-1039.
- [59] Wang C, Wang H W, Wu J H, He X, Luo K, Yi S Y. Identifying and warning against spatial conflicts of land use from an ecological environment perspective: A case study of the Ili River Valley, China. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119757.