

基于 CA-Markov 模型的成都市土地利用变化情景模拟及碳效应分析

刘雅雅^{1,2,3}, 李欣欣^{1,2,3}, 余向克^{1,2,3}, 黄中杰^{1,2,3}

(1. 四川省国土科学技术研究院(四川省卫星应用技术中心), 四川 成都 610045;

2. 自然资源部耕地资源调查监测与保护利用重点实验室, 四川 成都 610045;

3. 自然资源部成都平原国土生态与土地利用野外科学观测研究站, 四川 成都 610045)

摘要: 本研究基于成都市 2005 年、2010 年、2015 年、2020 年土地利用现状分析, 应用 CA-Markov 模型和情景预测模型, 通过设置 3 种土地利用变化情景预测 2030 年成都市的土地利用结构变化, 并对成都市土地利用变化导致的碳效应变化进行分析。结果表明: (1) 成都市土地利用格局变化总体呈现耕地和草地减少、建设用地增加的趋势。2005—2020 年, 建设用地面积增加最多, 耕地面积减少最多。(2) 3 种土地利用变化情景下都出现建设用地面积增加, 耕地和草地面积减少的趋势。自然发展情景建设用地增加 $3.39 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 城市发展情景建设用地增加 $5.66 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 生态保护情景建设用地增加 $1.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 生态保护情景建设用地增速明显低于自然发展情景和城市发展情景。(3) 城市发展情景下的总碳效应是自然发展情景的 1.62 倍, 是生态保护情景的 3.76 倍。建设用地扩张是影响碳效应的主要因素, 在城市建设中严格限制建设用地过度扩张, 是实现城市绿色低碳发展的重要路径。

关键词: 碳吸收; 低碳; 土地利用变化; 情景模拟

中图分类号: F301.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-4210-(2024)02-38-12

Scenario Simulation of Land Use Change in Chengdu and Carbon Effect Analysis Based on CA-Markov Model

LIU Yaya^{1, 2, 3}, LI Xinxin^{1, 2, 3}, YU Xiangke^{1, 2, 3}, HUANG Zhongjie^{1, 2, 3}

(1. Institute of Land Science and Technology of Sichuan (Satellite Application Technology Center of Sichuan), Chengdu 610045, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Investigation, Monitoring, Protection and Utilization for Cultivated Land Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610045, Sichuan, China; 3. Observation and Research Station of Land Ecology and Land Use in Chengdu Plain, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610045, Sichuan, China)

Abstract: Based on the analysis of land use status in 2005, 2010, 2015 and 2020, this study applies CA-Markov model and scenario prediction model to predict the changes in land use structure of Chengdu

收稿日期: 2023-12-08

基金项目: 四川省自然资源厅科技项目(KJ-2022-(10))

作者简介: 刘雅雅(1996—), 女, 助理研究员, 从事国土空间规划及生态保护红线研究。

in 2030, and analyzes the carbon effect change caused by land use changes in Chengdu. The results indicate that: (1) The overall trend of land use pattern changes in Chengdu shows a decrease in farmland and grassland and an increase in construction land. From 2005 to 2020, the area of construction land increased the most, and the area of cultivated land decreased the most. (2) Under the three scenarios of land use change, there is an increase in construction land area and a decrease in farmland and grassland area. Construction land in natural development scenario was increased by $3.39 \times 10^4 \text{ hm}^2$, construction land in urban development scenario was increased by $5.66 \times 10^4 \text{ hm}^2$, and construction land in ecological protection scenario was increased by $1.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$, with the growth rate of construction land in the ecological protection scenario significantly lower than that in the natural development scenario and urban development scenario. (3) The total carbon effect of urban development scenario was 1.62 times that of natural development scenario and 3.76 times of that of ecological protection scenario. The expansion of construction land is the main factor affecting the carbon effect. Strictly limiting the excessive expansion of construction land in urban construction is an important way to achieve green and low-carbon urban development.

Key words: CA-Markov model; low carbon; Chengdu; land use change; scenario simulation

土地利用变化对生态环境产生直接或间接的影响,其动态变化是全球环境变化研究中最重要课题之一^[1]。土地利用变化不断地导致土地覆盖的变化,土地覆盖变化又会引发一系列的环境变化。土地利用变化作为全球变暖的重要原因之一^[2],通过影响碳源和碳汇^[3]的格局来改变生态系统的碳循环过程,是仅次于化石燃料的第二大驱动力^[4]。研究土地利用变化下的碳效应变化,模拟低碳目标下的土地覆被演变,对于探索如何发挥好碳汇功能,如何利用城市有限的土地资源,实现土地资源的优化配置,确保城市土地利用的生态、社会和经济效益协调统一至关重要。

成都市位于四川盆地,历史悠久,素有“天府之国”的美誉,是中国西南地区重要的经济文化中心。近年来,随着成都城市化的发展,建设用地面积不断增加,人为活动干扰加剧,生态功能退化,碳排放量急剧增加,对生态安全构成严重威胁^[5],城市发展与生态保护之间的矛盾日益突出。本研究选取四川省成都市作为研究区,结合 Arcgis 技术对 2005—2020 年土地利用变化及由此引起的碳效应进行研究,并应用转移矩阵分析 2005—2020 年土地利用时空变化,结合 CA-Markov 模型和情景预测模型,从自然发展情景、生态保护情景和城市发展情景 3 种情景模拟预测 2030 年成都市土地利用变化和碳效应分析,以为成都市规划、管理与政策制定提供依据,为生态环境保护和低碳城市建设提供借鉴和参考。

一 研究区概况

成都市地处四川盆地西部边缘、成都平原中部。地势差异显著,西部为南北走向的龙门山脉,东部为龙泉山脉,中部和东南部为广阔的平原,形成三分之一平原、三分之一丘陵、三分之一高山的独特地貌类型。同时,气候的显著差异导致出现了明显的不同热量差异的垂直气候带,由此形成的生物资源种类多样、门类齐全,分布广泛、相对集中,为农业和旅游业的发展创造了非常有利的条件。2022年,全市总人口 2 126.8 万人,比上年增长 0.4%;全市地区生产总值达到 2.08 万亿元,比上年增长 2.8%。成都在经济实力上处于西部领先地位,但与成渝地区双城经济圈中心城市要求相比,治理和发展质量仍有待提高。

二 数据来源与研究方法

(一)数据来源

数据主要来源于 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年四川省成都市土地利用分类栅格数据、《中国能源统计年鉴》、《成都统计年鉴 2021》。

(二)研究方法

1. 土地利用变化率

土地利用变化率(K)用来表示地类的变化状况,计算公式:

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

式中: U_a 、 U_b 分别为研究初期和末期某土地利用类型的面积; T 为研究年数; K 值是某土地利用类型的年变化率,取值 $[-1, 1]$,用百分数表示^[6]。

2. 土地利用变化矩阵

土地利用变化矩阵主要分析各土地利用类型在研究时段内的变化趋势,形成一个二维矩阵。根据研究期初和期末的土地利用类型数据,首先使用 Arcgis 软件将各地类字段合并,然后使用 Analysis Tools 对合并后的数据进行空间叠加分析,通过计算建立各土地利用类型转变的概率矩阵^[7]。

3. CA-Markov 模型

CA-Markov 模型被认为是模拟和预测土地利用变化的有效模型,目前在土地利用变化研究中广泛应用^[8-9]。通过将某一时刻的土地利用类型与 Markov 过程中的可能状态进行比较,发现它只与其前一个时刻的土地利用类型有关。因此,土地利用状态可通过以下公式进行预测^[10-11]:

$$Q_{(r+1)} = P_{ij} \times Q_{(r)} \quad (2)$$

式中: $Q_{(r)}$ 、 $Q_{(r+1)}$ 分别代表 r 、 $r+1$ 时刻土地利用系统状态; P_{ij} 为土地利用类型转移概率矩阵。 P_{ij} 可用下列公式表达:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: P 为土地利用类型面积,且 $0 \leq P_{ij} < 1$; n 为土地利用类型数量; i 为初始年土地利用类型; j 为终止年土地利用类型。

CA-Markov 模型是一种网格动力学理论,其中空间相互作用和时间耦合都是局部的,并且时空耦合和形态状态都是分散分布的^[12],其计算公式如下:

$$S_{t+1} = f(S_t, Y) \quad (4)$$

式中: S 为元胞有限离散的集合状态; t 、 $t+1$ 为不同时刻; Y 为元胞的领域; f 为局部空间的元胞转化规则。

基于 CA-Markov 模型,土地利用栅格图中的每一个像元就是一个元胞,每个元胞的土地利用类型为元胞的状态。模型通过使用 GIS 软件,将转换面积矩阵和条件概率图像结合运算,以确

定元胞状态的转移, 并由此模拟土地利用类型的变化。

本文采用 Kappa 系数^[13]对土地格局演变预测的精度进行检测, 计算公式如下:

$$K_p = \frac{(P_o - P_c)}{(P_p - P_c)} \quad (5)$$

式中: P_o 为正确模拟的比例; P_c 为模型随机情况下的正确预测比例; P_p 为理想情况下正确预测的比例。通过将 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年的土地利用分类栅格数据导入 IDRISI, 利用马尔可夫模块得到 2005—2010 年的土地利用转移面积矩阵和转移概率矩阵, 利用 CA-Markov 模型预测 2015 年的土地利用分布图, 并与 2015 年进行比较。通过比较土地利用分布图, 计算出 Kappa 值, 为 0.92。该值在 0.75 至 1 之间, 表明建模效果良好, 因此该模型可用于成都市土地利用变化空间建模。

4. 不同土地利用模拟情景

情景模拟分析是通过假设不同的城市发展路径来模拟不同的土地利用变化情景。本文结合 CA-Markov 模型, 建立 2030 年成都市土地利用变化 3 种情景模式。情景 1 为自然发展情景, 仅考虑成都市自然发展下的土地利用变化; 情景 2 为城市发展情景, 土地利用类型加速向建设用地转变; 情景 3 为生态保护情景, 限制林地的土地利用类型变化^[14]。

5. 土地利用碳排放估算模型

土地利用碳排放估算涉及耕地、林地、草地、水域、未利用地和建设用地的碳排放和碳吸收。

(1) 能源消费碳排放。由于当前我国缺乏碳排放量的直接监测数据, 相关研究大多采用间接估算法, 即通过利用各种化石能源在生产生活过程中的消费量、各种化石能源转换为标准煤的转换系数和对应的碳排放系数来间接估算建设用地的碳排放量。本文采用间接估算法计算成都市建设用地碳排放总量, 其中化石能源是指成都市生产生活所需的原油、原煤、汽油、柴油、煤油、燃料油、天然气和液化石油气 8 种主要能源。具体计算公式如下:

$$E = \sum_{m=1}^e (A_m \times B_m) \times C_m \quad (6)$$

式中: E 为能源消费产生的碳排放总量; e 为能源种类数; m 为第 m 种能源; A_m 为第 m 种化石能源的消耗量; B_m 表示第 m 种化石能源的标准煤转换系数; C_m 为第 m 种化石能源的碳排放系数。

根据表 1 和式(6)计算得出, 2020 年成都市建设用地碳排放总量为 $1\,156.56 \times 10^4$ t, 该数据除以 2020 年建设用地面积 21.56×10^4 hm², 得出成都市建设用地碳源系数为 53.64 t/hm²。

表 1 成都市主要化石能源消耗量、标准煤转换系数和碳排放系数

能源类型	能源年消耗		标准煤转换		碳排放系数
	总量	单位	系数	单位	
原煤	3678930	t	0.7143	kg/kg	0.7476
原油	7754533	t	1.4286	kg/kg	0.5854
汽油	17821	t	1.4714	kg/kg	0.5532
煤油	7346	t	1.4714	kg/kg	0.3416
柴油	248027	t	1.4571	kg/kg	0.5913
燃料油	102013	t	1.4286	kg/kg	0.6176
液化石油气	244234	t	1.7143	kg/kg	0.504
天然气	4336020000	m ³	1.33	kg/m ³	0.4479

注: 各种化石能源消耗总量数据来源于《成都统计年鉴 2021》, 标准煤转换系数数据来源于《中国能源统计年鉴》, 碳排放系数数据来源于 IPCC。

(2)碳汇吸收。计算碳汇(吸收)量依据如下公式:

$$H_k = \sum_{k=1}^h (D_k \times N_k) \tag{7}$$

式中: h 为除建设用地外的土地利用类型数; k 为第 k 种土地利用类型; H_k 为第 k 种土地利用类型碳吸收量(t); D_k 为第 k 种土地利用类型面积(hm^2); N_k 为第 k 种土地利用类型碳吸收系数。

(3)碳效应系数。如表 2 所示,根据 Cai 等^[15] 和何勇^[16] 的研究,确定耕地的碳源系数为 0.497 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;根据方精云等^[17] 和李颖等^[18] 的研究,确定林地的碳汇系数为 -0.612 5 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;根据肖红艳等^[19] 和苏雅丽等^[20] 的研究,确定草地的碳汇系数为 -0.020 5 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;根据景勇^[21] 的研究,确定水域的碳汇系数为 -0.041 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;根据赖力^[22] 的研究,确定未利用地的碳汇系数为 -0.000 5 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

表 2 成都市主要土地利用类型碳效应系数

						单位: $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$
平均值	耕地	林地	草地	水域	未利用地	参考文献
	0.504					Cai 等 ^[15]
	-0.007					何勇 ^[16]
		-0.581				方精云等 ^[17]
			-0.021			肖红艳等 ^[19]
			-0.020			苏雅丽等 ^[20]
		-0.644				李颖等 ^[18]
				-0.041		景勇 ^[21]
					-0.0005	赖力 ^[22]
平均值	0.497	-0.6125	-0.0205	-0.041	-0.0005	

注:表中正数表示碳源或碳排放,负数表示碳汇或碳吸收,系数表示 1 hm^2 某土地利用类型的面积在 1 年内所排放(或吸收)的碳。

三 结果与分析

(一)成都市土地利用现状

成都市土地总面积为 $143.20 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。其中耕地面积 $81.49 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全市土地总面积的 56.91%;林地面积 $32.32 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全市土地总面积的 22.57%;草地面积 $5.37 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全市土地总面积的 3.75%;水域面积 $2.21 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全市土地总面积的 1.54%;未利用地面积 $0.24 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全市土地总面积的 0.17%;建设用地面积 $21.56 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全市土地总面积的 15.06%。

(二)成都市土地利用变化分析

如表 3 所示成都市土地利用以耕地和林地为主,约占总面积的 80%,水域和未利用地相对较少。2005 年、2010 年、2015 年及 2020 年,耕地占全域土地总面积的比例均大于 50%,分别为 63.22%、62.65%、61.30%、56.91%,主要分布在中部平原地区和东部丘陵地区,但耕地面积总体仍呈现出下降趋势;林地面积占全域土地总面积比例均大于 20%,主要位于龙门山和龙泉山等山地区域。草地、水域和未利用地面积占比较小,各研究年份变化趋于稳定。

成都市土地利用格局变化总体呈现耕地和草地减少、建设用地增加的趋势。如表 4 所示, 2005—2020 年, 建设用地面积增加最多($8.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$), 耕地面积减少最多($9.05 \times 10^4 \text{ hm}^2$), 其他土地利用类型变化较小。从 2005—2020 年地类面积变化率来看, 成都市建设用地面积变化率较大, 为 62.97%, 水域、草地、耕地和林地变化率较小, 分别为 19.59%、-12.15%、-9.99% 和 2.75%。从面积的阶段性变化来看, 建设用地和水域面积所占比重稳步上升, 耕地和未利用地面积所占比重持续下降, 林地所占比重略有上升, 草地所占比重略有下降。

表 3 成都市 2005—2020 年各地类土地利用面积及占比

年份	耕地		林地		草地		建设用地		水域		未利用地	
	面积 / hm^2	占比 /%	面积 / hm^2	占比 /%	面积 / hm^2	占比 /%	面积 / hm^2	占比 /%	面积 / hm^2	占比 /%	面积 / hm^2	占比 /%
2005 年	905367.57	63.22	314571.97	21.97	61178.85	4.27	132309.91	9.24	18506.58	1.29	100.00	0.01
2010 年	897211.75	62.65	313342.69	21.88	60533.48	4.23	140267.97	9.80	19143.51	1.34	1503.39	0.10
2015 年	877878.26	61.30	310779.63	21.70	60733.48	4.24	160071.43	11.18	21036.19	1.47	1503.39	0.10
2020 年	814879.79	56.91	323210.75	22.57	53744.34	3.75	215623.48	15.06	22131.62	1.55	2390.82	0.17

表 4 成都市 2005—2020 年各地类土地利用结构变化

时间段	耕地		林地		草地		建设用地		水域		未利用地	
	变化面积 / hm^2	变化率 /%	变化面积 / hm^2	变化率 /%	变化面积 / hm^2	变化率 /%	变化面积 / hm^2	变化率 /%	变化面积 / hm^2	变化率 /%	变化面积 / hm^2	变化率 /%
	2005—2010 年	-8155.82	-0.90	-1229.28	-0.39	-645.37	-1.05	7958.06	6.01	636.93	3.44	1403.39
2010—2015 年	-19333.49	-2.20	-2563.06	-0.82	200.00	0.33	19803.46	12.37	1892.68	9.00	0	0
2015—2020 年	-62998.47	-7.18	12431.12	4.00	-6989.14	-11.51	55552.05	34.70	1095.43	5.21	887.43	11.81
2005—2020 年	-90487.78	-9.99	8638.78	2.75	-7434.51	-12.15	83313.57	62.97	3625.04	19.59	2290.82	458.16

(三) 成都市土地利用变化转移矩阵

根据成都市 2005 年和 2020 年土地利用变化数据, 以这两年的现状地类矢量为底图, 通过 Arcgis 软件计算出 2005—2020 年成都市的土地利用变化转移矩阵(见表 5)。

表 5 成都市 2005—2020 年各地类面积土地利用转移矩阵

时间	土地利用类型	2020 年					
		耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地
2005 年	耕地	673604.17	81023.37	5060.54	127892.72	14952.53	237.00
	林地	68236.66	212866.78	21157.84	6082.67	3065.16	1757.05
	草地	7037.42	22960.57	26462.74	3381.11	283.77	335.81
	建设用地	51976.16	3266.25	726.61	73310.09	2958.39	0
	水域	11175.11	1716.72	0	4723.46	713.35	60.96
	未利用地	77.21	22.79	0	0	0	0

单位: hm^2

(四) CA-Markov 模型模拟结果分析

本研究共设定了 3 种未来发展情景,分别为自然发展情景(情景 1)、城市发展情景(情景 2)和生态保护情景(情景 3),不同情景下的土地转移概率矩阵如表 6 所示。根据分析,3 种情景下都出现建设用地面积增加,耕地和草地面积减少的趋势。情景 1 建设用地增加 $3.39 \times 10^4 \text{ hm}^2$,情景 2 建设用地增加 $5.66 \times 10^4 \text{ hm}^2$,情景 3 建设用地增加 $1.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。情景 3 建设用地增加最少,城镇化进程最为缓慢,情景 2 建设用地增加最快,该情景下共有 16.17% 耕地转为建设用地,耕地资源损失较大。3 种情景下耕地大部分都转出为建设用地,情景 1 减少 $11.50 \times 10^4 \text{ hm}^2$,情景 2 减少 $13.13 \times 10^4 \text{ hm}^2$,情景 3 减少 $9.88 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

情景 1 土地利用结构与 2020 年基本相同,大量耕地转化为建设用地,情景 2 与情景 1 的空间分布类似,但建设用地增速更快,情景 3 建设用地增速明显低于情景 1 和情景 2,耕地和林地的转化速度因保护力度加大而降低。

表 6 2030 年不同情景下的土地转移概率矩阵

情景	土地利用类型	耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地
情景 1	耕地	0.7462	0.0897	0.0056	0.1417	0.0166	0.0003
	林地	0.2179	0.6797	0.0676	0.0194	0.0098	0.0056
	草地	0.1164	0.3798	0.4377	0.0559	0.0047	0.0056
	建设用地	0.3931	0.0247	0.0055	0.5544	0.0224	0
	水域	0.6077	0.0934	0	0.2569	0.0388	0.0033
	未利用地	0.7721	0.2279	0	0	0	0
情景 2	耕地	0.7262	0.0897	0.0056	0.1617	0.0166	0.0003
	林地	0.2179	0.6597	0.0676	0.0394	0.0098	0.0056
	草地	0.1164	0.3798	0.4377	0.0499	0.0047	0.0016
	建设用地	0.3931	0.0307	0.0055	0.5544	0.0224	0
	水域	0.6077	0.0934	0	0.2569	0.0368	0.0033
	未利用地	0.7721	0.2279	0	0	0	0
情景 3	耕地	0.7662	0.0897	0.0056	0.1217	0.0166	0.0003
	林地	0.2179	0.6827	0.0676	0.0164	0.0108	0.0156
	草地	0.1164	0.3798	0.4377	0.0579	0.0047	0.0086
	建设用地	0.3931	0.0251	0.0155	0.5544	0.0224	0
	水域	0.6077	0.0934	0	0.2569	0.0288	0.0033
	未利用地	0.7721	0.2279	0	0	0	0

(五) 成都市土地利用碳效应变化

1. 2005—2020 年土地利用碳效应变化

土地利用结构变化通过改变自然碳过程和人为活动能源消耗格局及其综合作用,导致自然和人为活动碳排放强度的改变,进而导致区域碳效应的变化^[23]。本文基于碳效应测算模型和相关土地利用数据,计算出成都市 2005—2020 年土地利用类型变化引起的碳效应变化,结果见表 7。

表 7 2005—2020 年成都市土地利用类型转变及其引起的区域碳效应变化

土地利用变化类型	变化面积 /hm ²	碳汇系数变化值 /(t/hm ²)	碳汇量变化 /t	碳源系数变化值 /(t/hm ²)	碳源量变化 /t	总碳效应 /t
耕地—林地	81023.37	- 1.11	- 89895.43			- 89895.43
耕地—草地	5060.54	- 0.52	- 2618.83			- 2618.83
耕地—建设用地	127892.72			53.14	6796602.82	6796602.82
耕地—水域	14952.53	- 0.54	- 8044.46			- 8044.46
耕地—未利用地	237.00	- 0.50	- 117.91			- 117.91
林地—耕地	68236.66			1.11	75708.57	75708.57
林地—草地	21157.84			0.59	12525.44	12525.44
林地—建设用地	6082.67			54.25	330000.05	330000.05
林地—水域	3065.16			0.57	1751.74	1751.74
林地—未利用地	1757.05			0.61	1075.31	1075.31
草地—耕地	7037.42			0.52	3641.86	3641.86
草地—林地	22960.57	- 0.59	- 13592.66			- 13592.66
草地—建设用地	3381.11			53.66	181432.05	181432.05
草地—水域	283.77	- 0.02	- 5.82			- 5.82
草地—未利用地	335.81			0.02	6.72	6.72
建设用地—耕地	51976.16	- 53.14	- 2762169.07			- 2762169.07
建设用地—林地	3266.25	- 54.25	- 177202.23			- 177202.23
建设用地—草地	726.61	- 53.66	- 38990.26			- 38990.26
建设用地—水域	2958.39	- 53.68	- 158809.33			- 158809.33
建设用地—未利用地	0.00	- 53.64	0			0
水域—耕地	11175.11			0.54	6012.21	6012.21
水域—林地	1716.72	- 0.57	- 981.11			- 981.11
水域—草地	0			0.02	0	0
水域—建设用地	4723.46			53.68	253560.06	253560.06
水域—未利用地	60.96			0.04	2.47	2.47
未利用地—耕地	77.21			0.50	38.41	38.41
未利用地—林地	22.79	- 0.61	- 13.95			- 13.95
未利用地—草地	0	- 0.02	0			0
未利用地—建设用地	0			53.64	0	0
未利用地—水域	0	- 0.04	0			0
合计	440167.88		- 3252441.04		7662357.72	4409916.68

由表 7 可得, 2005—2020 年成都市土地利用变化引起的碳排放量高于碳吸收量, 达 440.99×10^4 t。其中, 碳汇增量达 325.24×10^4 t, 碳排放增量达到 766.23×10^4 t。建设用地占用耕地所造成的碳排放增量高达 679.66×10^4 t, 占总碳排放增量的 88.7%。虽然建设用地扩张对城市发展的影响具有重要意义, 但是因此带来的高碳排放偏离了成都建设低碳城市的发展路径, 影响了生态文明建设的工作进程。

2. 2030 年土地利用碳效应变化预测

根据碳效应测算模型和 3 种未来发展情景预测分析, 计算出 3 种未来发展情景下成都市土地利用类型转变所带来的碳效应变化, 结果见表 8、表 9、表 10。

表 8 情景 1 成都市土地利用类型转变及其引起的区域碳效应变化

土地利用变化类型	变化面积 /hm ²	碳汇系数变化值 /(t/hm ²)	碳汇量变化 /t	碳源系数变化值 /(t/hm ²)	碳源量变化 /t	总碳效应 /t
耕地—林地	72886.34	- 1.11	- 80867.39			- 80867.39
耕地—草地	4552.32	- 0.52	- 2355.83			- 2355.83
耕地—建设用地	115048.68			53.14	6114032.15	6114032.15
耕地—水域	13450.87	- 0.54	- 7236.57			- 7236.57
耕地—未利用地	213.20	- 0.50	- 106.07			- 106.07
林地—耕地	70130.22			1.11	77809.48	77809.48
林地—草地	21744.97			0.59	12873.02	12873.02
林地—建设用地	6251.46			54.25	339157.51	339157.51
林地—水域	3150.22			0.57	1800.35	1800.35
林地—未利用地	1805.81			0.61	1105.15	1105.15
草地—耕地	6216.40			0.52	3216.99	3216.99
草地—林地	20281.89	- 0.59	- 12006.88			- 12006.88
草地—建设用地	2986.65			53.66	160265.38	160265.38
草地—水域	250.66	- 0.02	- 5.14			- 5.14
草地—未利用地	296.63			0.02	5.93	5.93
建设用地—耕地	84659.40	- 53.14	- 4499054.61			- 4499054.61
建设用地—林地	5320.11	- 54.25	- 288629.15			- 288629.15
建设用地—草地	1183.51	- 53.66	- 63507.80			- 63507.80
建设用地—水域	4818.66	- 53.68	- 258670.58			- 258670.58
建设用地—未利用地	0	- 53.64	0			0
水域—耕地	13352.83			0.54	7183.82	7183.82
水域—林地	2051.26	- 0.57	- 1172.30			- 1172.30
水域—草地	0			0.02	0	0
水域—建设用地	5643.93			53.68	302971.86	302971.86
水域—未利用地	72.84			0.04	2.95	2.95
未利用地—耕地	1845.95			0.50	918.36	918.36
未利用地—林地	544.87	- 0.61	- 333.46			- 333.46
未利用地—草地	0	- 0.02	0			0
未利用地—建设用地	0			53.64	0	0
未利用地—水域	0	- 0.04	0			0
合计	458759.69		- 5213945.76		7021342.96	1807397.20

如表 8 ~ 10 所示, 3 种情景下 2030 年成都市土地利用变化引起的碳排放量高于碳吸收量, 分别为 $180.74 \times 10^4 \text{ t}$, $293.24 \times 10^4 \text{ t}$, $77.94 \times 10^4 \text{ t}$, 情景 2 总碳效应是情景 1 的 1.62 倍, 是情景 3 的 3.76 倍。情景 1 碳汇增量达 $521.39 \times 10^4 \text{ t}$, 碳排放增量达到 $702.13 \times 10^4 \text{ t}$ 。建设用地占用耕地所带来的碳排放增量高达 $611.40 \times 10^4 \text{ t}$, 占总碳排放增量的 87.08%; 建设用地占用林地所带来的碳排放增量为 $33.92 \times 10^4 \text{ t}$, 占总碳排放增量的 4.83%。如表 9 所示, 情景 2 碳汇增量达 $528.41 \times 10^4 \text{ t}$, 碳排放增量达到 $821.65 \times 10^4 \text{ t}$ 。建设用地占用耕地所带来的碳排放增量高达 $697.72 \times 10^4 \text{ t}$, 占总碳排放增量的 84.92%; 建设用地占用林地所带来的碳排放增量为 $68.84 \times 10^4 \text{ t}$, 占总碳排放增量的 8.38%。如表 10 所示, 情景 3 碳汇增量达 $533.43 \times 10^4 \text{ t}$, 碳排放增量达到 $611.36 \times 10^4 \text{ t}$ 。建设用地占用耕地所带来的碳排放增量高达 $525.09 \times 10^4 \text{ t}$, 占总碳排放增量的 85.89%; 建设用地占用林地所带来的碳排放增量为 $28.68 \times 10^4 \text{ t}$, 占总碳排放增量的 4.69%。

表 9 情景 2 成都市土地利用类型转变及其引起的区域碳效应变化

土地利用变化类型	变化面积 /hm ²	碳汇系数变化值 /(t/hm ²)	碳汇量变化 /t	碳源系数变化值 /(t/hm ²)	碳源量变化 /t	总碳效应 /t
耕地—林地	72886.34	- 1.11	- 80867.39			- 80867.39
耕地—草地	4552.32	- 0.52	- 2355.83			- 2355.83
耕地—建设用地	131290.82			53.14	6977187.90	6977187.90
耕地—水域	13450.87	- 0.54	- 7236.57			- 7236.57
耕地—未利用地	213.20	- 0.50	- 106.07			- 106.07
林地—耕地	70130.22		-	1.11	77809.48	77809.48
林地—草地	21744.97		-	0.59	12873.02	12873.02
林地—建设用地	12688.59		-	54.25	688387.90	688387.90
林地—水域	3150.22		-	0.57	1800.35	1800.35
林地—未利用地	1805.81		-	0.61	1105.15	1105.15
草地—耕地	6216.40		-	0.52	3216.99	3216.99
草地—林地	20281.89	- 0.59	- 12006.88			- 12006.88
草地—建设用地	2665.05		-	53.66	143007.66	143007.66
草地—水域	250.66	- 0.02	- 5.14			- 5.14
草地—未利用地	85.45		-	0.02	1.71	1.71
建设用地—耕地	84659.40	- 53.14	- 4499054.61			- 4499054.61
建设用地—林地	6612.47	- 54.25	- 358743.27			- 358743.27
建设用地—草地	1183.51	- 53.66	- 63507.80			- 63507.80
建设用地—水域	4818.66	- 53.68	- 258670.58			- 258670.58
建设用地—未利用地	0	- 53.64	0			0.00
水域—耕地	13352.83		-	0.54	7183.82	7183.82
水域—林地	2051.26	- 0.57	- 1172.30			- 1172.30
水域—草地	0		-	0.02	0	0
水域—建设用地	5643.93		-	53.68	302971.86	302971.86
水域—未利用地	72.84		-	0.04	2.95	2.95
未利用地—耕地	1845.95		-	0.50	918.36	918.36
未利用地—林地	544.87	- 0.61	- 333.46			- 333.46
未利用地—草地	0	- 0.02	0			0
未利用地—建设用地	0		-	53.64	0	0
未利用地—水域	0	- 0.04	0			0
合计	482198.53		- 5284059.89		8216467.15	2932407.26

表 10 情景 3 成都市土地利用类型转变及其引起的区域碳效应变化

土地利用变化类型	变化面积 /hm ²	碳汇系数变化值 /(t/hm ²)	碳汇量变化 /t	碳源系数变化值 /(t/hm ²)	碳源量变化 /t	总碳效应 /t
耕地—林地	72886.34	- 1.11	- 80867.39			- 80867.39
耕地—草地	4552.32	- 0.52	- 2355.83			- 2355.83
耕地—建设用地	98806.55		-	53.14	5250876.40	5250876.40
耕地—水域	13450.87	- 0.54	- 7236.57			- 7236.57
耕地—未利用地	213.20	- 0.50	- 106.07			- 106.07
林地—耕地	70130.22		-	1.11	77809.48	77809.48
林地—草地	21744.97		-	0.59	12873.02	12873.02
林地—建设用地	5285.89		-	54.25	286772.95	286772.95

表 10 (续)

土地利用变化类型	变化面积 /hm ²	碳汇系数变化值 /(t/hm ²)	碳汇量变化 /t	碳源系数变化值 /(t/hm ²)	碳源量变化 /t	总碳效应 /t
林地—水域	3476.05			0.57	1986.56	1986.56
林地—未利用地	5020.96			0.61	3072.83	3072.83
草地—耕地	6216.40			0.52	3216.99	3216.99
草地—林地	20281.89	- 0.59	- 12006.88			- 12006.88
草地—建设用地	3092.31			53.66	165934.74	165934.74
草地—水域	250.66	- 0.02	- 5.14			- 5.14
草地—未利用地	459.31			0.02	9.19	9.19
建设用地—耕地	84659.40	- 53.14	- 4499054.61			- 4499054.61
建设用地—林地	5406.29	- 54.25	- 293304.76			- 293304.76
建设用地—草地	3338.55	- 53.66	- 179148.04			- 179148.04
建设用地—水域	4818.66	- 53.68	- 258670.58			- 258670.58
建设用地—未利用地	0	- 53.64	0			0
水域—耕地	13352.83			0.54	7183.82	7183.82
水域—林地	2051.26	- 0.57	- 1172.30			- 1172.30
水域—草地	0			0.02	0	0
水域—建设用地	5643.93			53.68	302971.86	302971.86
水域—未利用地	72.84			0.04	2.95	2.95
未利用地—耕地	1845.95			0.50	918.36	918.36
未利用地—林地	544.87	- 0.61	- 333.46			- 333.46
未利用地—草地	0	- 0.02	0			0
未利用地—建设用地	0			53.64	0	0
未利用地—水域	0	- 0.04	0			0
合计	447602.52		- 5334261.61		6113629.16	779367.55

四 讨论与建议

(1)2005—2020 年成都市土地利用结构变化总体呈现耕地和草地减少、建设用地增加的趋势,在工业化和城市化经济快速发展的背景下,如何维持城市发展和生态文明建设的平衡、加快生态文明建设是成都市发展的关键问题。

(2)2005—2020 年成都市土地利用变化导致的碳排放增量高于碳汇增量,达 440.99×10^4 t。土地利用类型的变化是影响碳效应的重要因素,在城市建设中,必须严格限制建设用地过度扩张,集约节约用地,发展绿色清洁能源,推进退耕还林政策,提升碳汇水平,加快城市绿色低碳发展。

(3)本文基于 CA-Markov 模型模拟分析,设定 3 种不同的情景。3 种情景下建设用地面积均增加,耕地大量转为建设用地,其次是林地转化为建设用地。情景 2 总碳效应是情景 1 的 1.62 倍,是情景 3 的 3.76 倍;情景 2 中耕地转为建设用地的面积是情景 1 的 1.14 倍,是情景 3 的 1.33 倍;情景 2 中林地转为建设用地的面积是情景 1 的 2.03 倍,是情景 3 的 2.40 倍。情景 2 相比于其他两种情景,城镇化发展速度最快,这表明过度强调城市发展,不仅会导致耕地面积大幅减少,威胁粮食安全,同时还会破坏土地利用格局,威胁生态安全。因此,成都市应加快推进生态文明建设,在新型工业化和城镇化发展战略中优先发展资源节约型和环境友好型社会,推动城市科学发展、绿色发展,增强城市可持续发展能力。

参考文献:

- [1] 邢容容, 马安青, 张小伟, 等. 基于 Logistic-CA-Markov 模型的青岛市土地利用变化动态模拟 [J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 111-114.
- [2] 余德贵, 吴群. 基于碳排放约束的土地利用结构优化模型研究及其应用 [J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(8): 911-917.
- [3] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋, 等. 区域土地利用结构的碳效应评估及低碳优化 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 220-229.
- [4] 路昌, 雷国平, 周浩, 等. 松嫩平原肇源县土地利用结构低碳优化研究 [J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 310-315.
- [5] 李欣欣, 张安明. 低碳视角下的重庆市土地集约利用评价研究 [J]. 水土保持研究, 2014, 21(4): 268-273.
- [6] 朱康文, 雷波, 李月臣, 等. 生态红线保护下的两江新区土地利用 / 覆盖情景模拟及生态价值评估 [J]. 环境科学研究, 2017, 30(11): 1801-1812.
- [7] 裴杰, 王力, 柴子为, 等. 基于 RS 和 GIS 的深圳市土地利用 / 覆被变化及碳效应分析 [J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 227-233.
- [8] Zhou L, Dang X, Sun Q, et al. Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 55: 102045.
- [9] Da R E C, Guimaraes A C S, Da M R S, et al. Future scenarios based on a CA-Markov land use and land cover simulation model for a tropical humid basin in the Cerrado/Atlantic forest ecotone of Brazil [J]. Land Use Policy, 2021, 101(1): 105141.
- [10] 李亚楠, 多玲花, 张明. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的土地利用格局与生境质量时空演变及预测——以江西省南昌市为例 [J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 345-354.
- [11] 崔旺来, 蔡莉, 奚恒辉, 等. 基于土地利用 / 覆盖变化的浙江大湾区生态安全评价及多情景模拟分析 [J]. 生态学报, 2022, 42(6): 2136-2148.
- [12] 胡碧松, 张涵玥. 基于 CA-Markov 模型的鄱阳湖区土地利用变化模拟研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 1207-1219.
- [13] Lin W, Sun Y, Nijhuis S, et al. Scenario-based flood risk assessment for urbanizing deltas using future land-use simulation (FLUS): Guangzhou Metropolitan Area as a case study [J]. Science of the Total Environment, 2020, 739: 139899.
- [14] 许小娟, 刘会玉, 林振山, 等. 基于 CA-MARKOV 模型的江苏沿海土地利用变化情景分析 [J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 213-218.
- [15] Cai Z C, Kang G D, Tsuruta H, et al. Estimate of CH₄ emission from year round flooded rice growing season in China [J]. Pedosphere, 2005, 15(1): 66-71.
- [16] 何勇. 中国气候、陆地生态系统碳循环研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [17] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算 [J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2007, 37(6): 804-812.
- [18] 李颖, 黄贤金, 甄峰. 江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊 2): 102-107.
- [19] 肖红艳, 袁兴中, 李波, 等. 土地利用变化碳排放效应研究——以重庆市为例 [J]. 重庆师范大学学报 (自然科学版), 2012, 29(1): 38-42.
- [20] 苏雅丽, 张艳芳. 陕西省土地利用变化的碳排放效益研究 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 152-156.
- [21] 景勇. 四川盆地西北部土地利用碳排放时空变化及脱钩效应分析 [D]. 成都: 四川师范大学, 2022.
- [22] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究 [D]. 南京: 南京大学, 2010.
- [23] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋, 等. 南京市不同土地利用方式的碳储量与碳通量 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 164-170.