

# 成都平原土地利用重心变化与碳核算情景模拟

乌英嘎<sup>1,2</sup>, 蒲万平<sup>1,2</sup>, 董霁红<sup>1</sup>

(1.中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2.矿山生态修复教育部工程研究中心, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** [目的] 明晰成都平原土地利用重心迁移和碳排放变化趋势, 探究土地利用碳排放的影响因素, 为成都平原低碳发展提供理论与数据支持。[方法] 基于多源数据, 采用重心模型和 IPCC 碳排放系数法明确成都平原 2006—2022 年土地利用重心变化趋势和碳排放, 运用偏最小二乘法 (PLS) 回归分析与对数平均迪氏指数分解 (LMDI) 模型探究耕地碳排放和建设用地碳排放的主要影响因素, 并使用斑块生成土地利用模拟模型 (PLUS) 模拟未来土地利用格局与碳排放。[结果] ①在土地利用类型方面, 耕地、水域、建设用地和其他及未利用地重心分别向东北方向移动 4.23, 5.46, 8.44 和 31.58 km, 林地与草地向东南方向移动 11.12 和 3.41 km。在主要粮食作物方面, 水稻与玉米重心向东北方向分别移动 15.47 和 7.52 km, 小麦向西南方向移动 17.77 km。②2006—2022 年, 成都平原 33 个县域土地利用碳排放量均呈上升态势, 共增加  $1.36 \times 10^7$  t, 碳汇持续下降, 共减少  $5.68 \times 10^5$  t。③自然情景、碳增汇情景和碳减排情景下, 土地利用碳排放分别比 2022 年减少  $5.39 \times 10^5$ ,  $3.47 \times 10^5$  t 和  $4.53 \times 10^5$  t。[结论] 研究期间, 成都平原耕地流失严重, 主要流转为成都平原中部的建设用地和龙门山脉、龙泉山脉与乐山市内的林地, 未来需要加强对该区域的耕地保护, 33 个县域土地利用碳排放上升趋势明显且主要影响因素差异较大, 需因地制宜推行减源办法与增汇路径。

**关键词:** 多源数据; 土地利用重心变化; PLUS 模型; 碳核算; 成都平原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0392-17

中图分类号: X321

**文献参数:** 乌英嘎, 蒲万平, 董霁红. 成都平原土地利用重心变化与碳核算情景模拟[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 392-408. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.041; Wu Yingga, Pu Wanping, Dong Jihong. Shifts of land use gravity centers and carbon accounting scenario simulation in Chengdu Plain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 392-408.

## Shifts of Land Use Gravity Centers and Carbon Accounting Scenario Simulation in Chengdu Plain

Wu Yingga<sup>1,2</sup>, Pu Wanping<sup>1,2</sup>, Dong Jihong<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of

Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Engineering Research

Center of Ministry of Education for Mine Ecological Restoration, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** [Objective] The shifts of land use gravity centers and carbon emission change and the influencing factors of land-use carbon emissions in the Chengdu Plain were analyzed to provide theoretical and data support for the low-carbon development of the area. [Methods] Based on multi-source data, the barycenter model and IPCC carbon emission coefficient method were used to elucidate the changes in the land use gravity centers and carbon emissions in the Chengdu Plain from 2006 to 2022. Partial least squares regression analysis and the logarithmic mean division index (LMDI) model were used to explore the primary factors influencing cultivated and construction land carbon emissions. A patch-generating land use simulation

收稿日期: 2024-04-23

修回日期: 2024-07-10

资助项目: 中煤航测遥感集团有限公司项目“2023 年度自然资源遥感监测”(2023100088)

第一作者: 乌英嘎(1997—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区通辽市人, 博士研究生, 研究方向为国土空间生态监测与修复。Email: tb22160022a41@cumt.edu.cn.

通信作者: 董霁红(1967—), 女(汉族), 山西省芮城县人, 博士, 教授, 主要从事矿山复垦与生态重建等方面的研究。Email: dongjihong@cumt.edu.cn.

(PLUS) model was used to simulate future land use patterns and carbon emissions. [Results] ① In terms of land use types, the gravity centers of cultivated land, water area, construction land, and unused land shifted 4.23, 5.46, 8.44 km, and 31.58 km to the northeast, respectively, and forest land and grassland shifted 11.12 km and 3.41 km to the southeast. The gravity centers of major food crops, rice and corn, moved 15.47 km and 7.52 km to the northeast, respectively, whereas that of wheat moved 17.77 km to the southwest. ② From 2006 to 2022, the land use carbon emissions of 33 counties in the Chengdu Plain showed an upward trend, with a total increase of  $1.36 \times 10^7$  tons; and the carbon sinks continued to decline, with a total reduction of  $5.68 \times 10^5$  tons. ③ Under the natural, carbon sink, and carbon emission reduction scenarios, the carbon emissions from land use reduced by  $5.39 \times 10^5$ ,  $3.47 \times 10^5$ ,  $4.53 \times 10^5$  tons, respectively, comparing with those in 2022. [Conclusion] During the study period, a significant loss of cultivated land was observed in the Chengdu Plain; most of it was converted to construction land in the central part of the Chengdu Plain and forest land in the Longmen Mountains, Longquan Mountains, and Leshan City. In the future, the protection of cultivated land should be strengthened necessary. Carbon emissions from land use in 33 counties showed an obvious rising trend; however, the primary influencing factors are different. Therefore, source reduction and sequestration measure should be implemented according to local conditions.

**Keywords: multi-source data; land use gravity center change; patch-generating land use simulation (PLUS) model; carbon accounting; Chengdu Plain**

成都平原作为西南经济中心,存在较为严重的能源消耗和碳减排压力,迫切需要加快低碳发展的步伐。同时,成都平原又是国家重要的粮食主产区,在保障国家粮食安全方面发挥着重要作用。

地类重心是反映土地利用类型变化的重要指标,一直受到国内外学者的广泛关注。他们通过重心移动的距离和方向,深入分析了区域要素在空间上的流动性和时间上的演变趋势<sup>[1]</sup>。随着城市化、工业化以及农业现代化的快速发展,土地利用类型正经历着从传统的森林、草地等自然生态用地向建设用地、农业用地转变等重心转移的过程。研究表明,土地利用类型转变是决定陆地生态系统碳储量的关键因素,直接影响区域自然碳排放过程,改变区域碳排放水平<sup>[2]</sup>,所以土地利用类型重心的变化与碳排放之间存在着密切的联系。对土地利用碳排放的研究主要聚焦于碳排放核算<sup>[3]</sup>、碳排放影响因素分析<sup>[4]</sup>和土地利用低碳优化<sup>[5]</sup>等方面。土地利用碳排放可分为直接碳排放和间接碳排放,直接碳排放是由土地利用类型变化和土地管理方式转变导致的碳排放<sup>[6]</sup>,核算方法主要包括机理模型<sup>[7]</sup>、样地清查法<sup>[8]</sup>与遥感估测法<sup>[9]</sup>等。间接碳排放是基于人类社会经济活动所产生的碳排放<sup>[10]</sup>,核算方法主要包括实测法<sup>[11]</sup>、物料法<sup>[12]</sup>和排放系数法<sup>[13]</sup>。土地利用碳排放主要影响因素可分为 3 类<sup>[14-15]</sup>:土地利用类型转换碳排放、土地管理方式转变碳排放与土地所承载生产活动的碳排放。土地利用低碳优化主要为设定不同低碳发展情景,对未来土地利用格局进行模拟,包括 CA-Markov 模型<sup>[16]</sup>、

和 CLUS-S 模型<sup>[17]</sup>、Flus 模型<sup>[18]</sup>等早期模型和以斑块生成土地利用模拟模型<sup>[18]</sup>(patch-generating land use simulation, PLUS)模型为代表的较新模型两类。早期模型在模拟未来土地利用有较好的效果,得到了较为广泛的应用,但无法时空动态地模拟多种土地利用类型的斑块变化<sup>[19]</sup>,PLUS 模型可更准确地模拟土地利用的空间分布,被广泛地应用于地区、省、市等不同尺度的土地利用碳排放模拟研究中。

综合考虑土地利用重心变化和碳排放变化趋势,以及《四川省国土空间规划(2021—2035 年)》等政策对耕地流失面积和建设用地扩张面积的限制,结合自然和社会经济驱动因素模拟成都平原未来土地利用格局和碳排放,进一步提出低碳路径和模式,可将有限的土地资源在不同约束条件下合理配置,满足多目标土地利用需求,推动成都平原 33 个县域低碳发展,并保障粮食安全。

## 1 研究区概况

成都平原坐落于四川盆地中西部位位于北纬  $29^{\circ}11'—32^{\circ}26'$ ,东经  $103^{\circ}1'—105^{\circ}15'$ ,南北长约 380 km,东西宽约 180 km,是亚热带季风气候,夏季酷暑、冬季少冰雪,年均降水量稳定在约为 1 000 mm,拥有岷江、沱江等 12 条主要河流以及数十条支流。土壤类型多样,主要包括水稻土、紫色土和黄壤,分别占成都平原土地总面积的 44.32%,26.19%和 13.50%。根据《中国大百科全书》第 3 版对成都平原的定义,成都平原包括成都市、德阳市、绵阳市、眉山市和乐山市的部分区县,共 33 个区县。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

2.1.1 数据来源 研究采用的数据主要包括 2006, 2010, 2014, 2018, 2022 年的 Landsat 5, Landsat 8 影像数据、MODIS MCD15A3H 数据、社会经济数据、物候数据、气温与降雨数据、地貌与土壤数据、高程数据、行政区划数据与 POI 数据等(表 1)。研究时间节点的选择是基于成都平原发展历程中的几个关键里程碑。自 2006 年起,四川省开始实施金土地工程,2010 年是成都平原城市群发展规划(2009—2020 年)起始之年,2014 年成都平原多个区县进入全国第二批农村改革试验,2018 年四川省出台《四川省乡村振兴战略规划(2018—2022 年)》,2022 年习近平主席在眉山市东坡区太和镇永丰村考察调研时,强调成都平原要努力打造新时代更高水平的“天府粮仓”。总体来看,2006, 2010, 2014, 2018 和 2022 年是成都平原耕地规模利用与保护的重要时间节点,研究选用这 5 个重要节点旨在反映成都平原 2006—2022 年土地利用的演变趋势与规律,为区域可持续发展提供科学依据与策略建议。

2.1.2 数据处理 研究借助 GEE 云平台,编写代码完成 Landsat 5, Landsat 8 影像的日期和云量筛选、影像拼接、云层去除以及影像裁剪,获取成都平原无云遥感影像,从 6 种土地利用类型中选择典型地物作为训练样本,监督分类得到 2006, 2010, 2014, 2018 和 2022 年 5 期土地利用类型数据(图 1),并通过总体分类精度

和 kappa 系数作为衡量标准来验证精度,监督分类整体精准度大于 85%, kappa 系数超过 80%(表 2),表明分类结果具有较高的准确性,满足研究要求。成都平原的水稻、小麦、玉米播种面积占粮食作物总播种面积的比例超过 70%,对这 3 种主要粮食作物进行提取。

成都平原的种植结构信息主要是通过遥感手段进行的作物面积调查,辅以实践调查进行验证。农作物信息提取是采取的是物候信息提取的方法,由于水稻、小麦、玉米等农作物在遥感影像中难以直接识别,所以依据物候信息进行作物面积信息提取。植被时序数据能够反映植被在一年中的植被生长变化状况,与植被的物候特征密切相关。为确定植被的物候变化,可以通过提取叶面积指数(leaf area index, LAI)的时间序列曲线来进行分析。水稻、小麦、玉米 LAI 时间序列曲线的生长季开始期(start of season, SOS)之前, LAI 值长期保持在较低水平,之后开始快速上升<sup>[20]</sup>。水稻、小麦、玉米等农作物进入生长季结束期(end of season, EOS)后,生理活动会发生显著变化,导致 LAI 值快速下降<sup>[21]</sup>,根据骆玉川等人研究,得到成都平原 2006—2022 年水稻、小麦、玉米作物的关键物候信息 SOS, EOS(表 3),并在此基础上于 2022 年春季和秋季去成都平原进行实地采样验证,共采集 300 个样本,其中包括水稻 150 个样本、玉米 50 个样本、小麦 50 个样本以及 50 个其他农作物样本(图 2)。通过计算得到 2022 年农作物总体精度为 80.33%和 kappa 系数为 70.15%,表明水稻、小麦、玉米作物的提取精度较好。

表 1 本研究数据来源

Table 1 Data source in this study

数据名称	分辨率/m	来源
Landsat 5, Landsat 8 影像	30	美国地质调查局( <a href="https://www.usgs.gov/">https://www.usgs.gov/</a> )
MODIS MCD15 A3 H 数据	500	美国国家航空航天局( <a href="https://ladsweb.nascom.nasa.gov/">https://ladsweb.nascom.nasa.gov/</a> )
社会经济统计数据	—	四川省各市、县政府网站
物候数据	1 000	国家生态科学数据中心( <a href="http://www.stats.gov.cn/">http://www.stats.gov.cn/</a> )
年均气温、降雨数据	1 000	资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )
地貌与土壤数据	1 000	资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )
行政区划数据	—	国家基础地理信息中心( <a href="https://ngcc.cn/ngcc/">https://ngcc.cn/ngcc/</a> )
POI 数据	—	OpenStreetMap( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> )
ODIAC 数据	1 000	日本国立环境研究所( <a href="https://db.cger.nies.go.jp/">https://db.cger.nies.go.jp/</a> )
“类 NPP-VIIRS”夜间灯光数据	500	国家地球系统科学数据中心( <a href="https://www.geodata.cn/">https://www.geodata.cn/</a> )

表 2 成都平原土地利用类型分类精度

Table 2 Classification accuracy of land use types in Chengdu Plain

分类精度	2006 年	2010 年	2014 年	2018 年	2022 年
总体精准度	87.76	88.94	86.36	85.71	87.96
kappa 系数	82.68	84.33	81.54	80.29	83.13

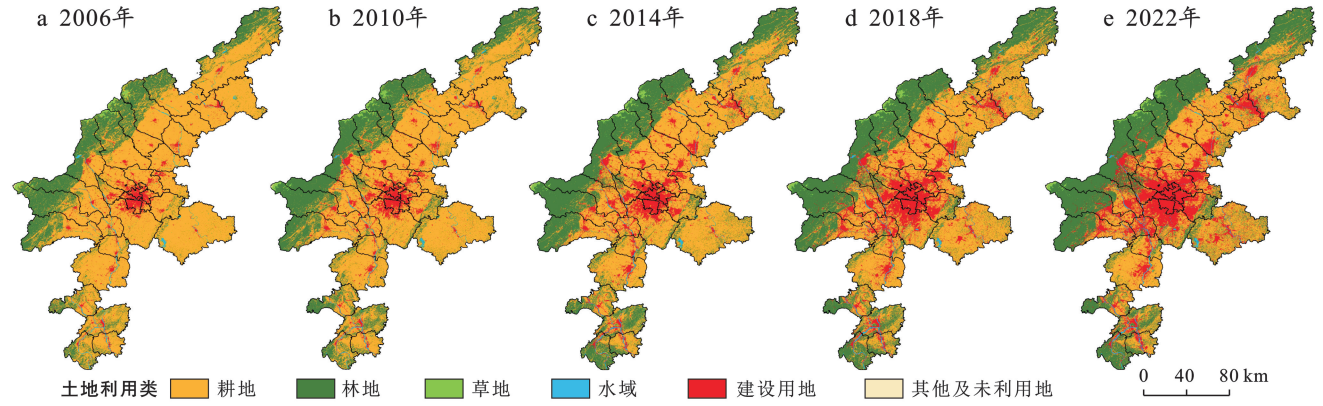


图 1 2006—2022 年成都平原土地利用类型分类结果

Fig.1 Classification results of land use types in Chengdu Plain during 2006—2022

表 3 成都平原水稻、小麦、玉米关键物候阶段

Table 3 Key phenological stages of rice, wheat and maize in Chengdu Plain

种类	SOS	EOS
水稻	2006, 2010, 2014, 2018 和 2022 年在第 115—145 d	2006, 2010 和 2014 年在第 241—265 d; 2018 和 2022 年在第 249—281 d
小麦	2006, 2010, 2014 年在第 9—49 d; 2018 和 2022 年在第 25—49 d	2022, 2018, 2014, 2010 和 2006 年均在第 113—121, 129—139 d
玉米	2006, 2010 和 2014 年在第 100—110 d, 145—161 d; 2018 和 2022 年在第 97—115 d	2006, 2010, 2014 年在第 233—265 d, 2018 和 2022 年在第 257—265 d

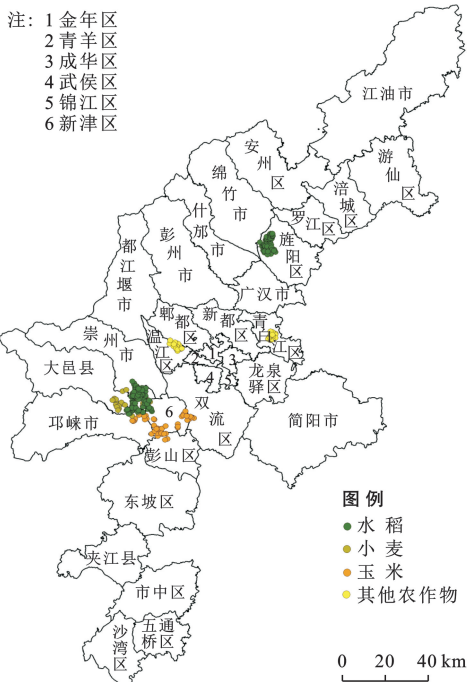


图 2 2022 年成都平原样本点

Fig.2 Chengdu Plain sample points in 2022

2.2 研究方法

2.2.1 重心模型 区域重心模型主要是以特定研究区域的空间位置为具体的研究对象,计算公式<sup>[22]</sup>为:

$$\begin{cases} X_t = \sum_{i=1}^n X_i W_i / \sum_{i=1}^n W_i \\ Y_t = \sum_{i=1}^n Y_i W_i / \sum_{i=1}^n W_i \end{cases} \quad (1)$$

$$D = [ (X_{t+1} - X_t)^2 + (Y_{t+1} - Y_t)^2 ]^{1/2} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \theta = \arctan \left( \frac{Y_{t+1} - Y_t}{X_{t+1} - X_t} \right) & (X_{t+1} - X_t \geq 0) \\ \theta = \pi + \arctan \left( \frac{Y_{t+1} - Y_t}{X_{t+1} - X_t} \right) & (X_{t+1} - X_t < 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $X_t, Y_t$  为某类土地利用类型重心的经纬度坐标;  $W_i$  为第  $i$  个小斑块的面积;  $X_i, Y_i$  为第  $i$  个斑块的中心坐标;  $D, \theta$  为特定范围内某种土地利用类型的重心迁移距离和角度。

2.2.2 IPCC 碳排放系数法 排放系数法是农业碳排放测算研究中最常见的方法。IPCC 排放系数法来源于政府间气候变化委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 的所颁布《国家温室气体清单指南》,该指南首先明确了农业领域主要碳排放的源头,再将各排放源的活动水平数据与排放系数相乘,进行量化计算。计算农业领域各种温室气体排放量后,再根据不同气体的全球变暖潜力值将其转化为碳排放当量,得到最终的碳排放总量。

(1) 碳汇核算。农作物固碳是指农作物通过光合作用将空气中的  $CO_2$  转化为碳水化合物,将碳固定在农作物体内供自身生长、发育等的过程是目前实现碳汇的重要方式之一,计算公式<sup>[23]</sup>为:

$$CS_c = \sum_{i=1}^n z_i \cdot \delta_i \cdot d_i \cdot h_i \quad (4)$$

式中:  $CS_c$  为耕地碳汇量;  $z_i$  为第  $i$  种作物碳吸收率

(表 4);  $\delta_i$  为第  $i$  种作物的经济产量;  $d_i$  为第  $i$  种作物干重比;  $h_i$  为第  $i$  种作物的经济系数。豆种、薯种、花生、油菜籽、蔬菜、水果的经济产量源于统计数据, 水稻、小麦、玉米的经济产量是基于水稻、小麦和玉米提取面积与对应的单产乘积算得。

林地、草地、水域和其他及未利用地主要发挥碳汇作用, 采用 IPCC 清单模型估算四种地类碳汇量<sup>[24]</sup>。

$$CS_i = \sum_{i=1}^6 x_i \cdot c_i \quad (5)$$

式中:  $CS_i$  为林地、草地、水域和其他及未利用地碳汇总量;  $x_i$  为第  $i$  种地类的面积;  $c_i$  为第  $i$  种地类的碳排放系数, 一般参考林地、草地、水域、其他及未利用地的碳吸收率分别为 0.604 6, 0.020 6, 0.253 0 和 0.000 5 t/(hm<sup>2</sup> · a)<sup>[25]</sup>。

表 4 成都平原主要农作物参数

Table 4 Parameters of main crops in Chengdu Plain %

农作物	碳吸收率	经济系数	干重比	根冠比	秸秆或根含氮比例
水稻	41.00	48.90	85.50	12.50	0.80
小麦	49.00	43.40	87.00	16.60	0.50
玉米	47.00	43.80	86.00	17.00	0.60
豆类	45.00	42.50	86.00	13.00	1.80
薯类	42.00	66.70	45.00	5.00	1.10
花生	45.00	55.60	90.00	20.00	1.80
油菜籽	45.00	27.10	82.00	15.00	0.50
蔬菜	45.00	83.00	15.00	25.00	0.80
水果	45.00	70.00	10.00	—	—

(2) 碳源核算。土地利用碳排放包括耕地农业生产、化石燃料燃烧、水泥生产和天然气燃烧。耕地农业生产碳排放主要包括农业资源投入产生的碳排放、水稻种植产生 CH<sub>4</sub> 与畜禽养殖过程中产生的 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放。鉴于成都平原大部分区县未进行能源消费公开, 无法根据能源消耗量核算建设用地碳排放。为解决这一问题, 研究选用了人为二氧化碳开放数据清单 (the open-data inventory for anthropogenic carbon dioxide, ODIAC) 数据集提取成都平原建设用地碳排放。ODIAC 是一个包括化石燃料燃烧、水泥生产和天然气燃烧产生的碳排放的高空间分辨率全球排放数据产品。为了便于计算和比较, 统一将 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> 等折算为标准 C 当量。依据 IPCC 第 4 次评估报告的规定, 折算 C 当量标准为 1 t 的 N<sub>2</sub>O 引发的温室效应等同于 298 t 的 CO<sub>2</sub> 所产生的温室效应, 1 t 的 CH<sub>4</sub> 引发的温室效应等同于 25 t 的 CO<sub>2</sub> 所产生的温室效应。1 t 的 CO<sub>2</sub> 包含 0.272 7 t 的 C, 1 t 的 N<sub>2</sub>O 和 1 t 的 CH<sub>4</sub> 所包含的 C 分别约为 81.264 6 和 6.817 5 t。

农业资源投入碳排放主要来自化肥、农药、农膜的使用、农业机械消耗的柴油、翻耕及灌溉所消耗的能源, 计算公式为:

$$CE_C = \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \beta_i \quad (6)$$

式中:  $CE_C$  为农业资源投入碳排放;  $\beta_i$  为第  $i$  种农业资源投入量;  $\varphi_i$  为第  $i$  种农业资源投入的碳排放系数, 根据已有研究, 化肥、农药、农膜、农用柴油、翻耕及灌溉的碳排放系数分别为 0.895 6 kg/kg<sup>[26]</sup>, 4.934 1 kg/kg<sup>[27]</sup>, 5.18 kg/kg<sup>[27]</sup>, 0.592 7 kg/kg<sup>[28]</sup>, 312.6 kg/hm<sup>2</sup><sup>[29]</sup> 和 4.75<sup>[27]</sup> kg/hm<sup>2</sup>。

水稻种植产生的 CH<sub>4</sub> 排放在中国 CH<sub>4</sub> 排放中所占比例较高, 对全球 CH<sub>4</sub> 排放也有较大的影响<sup>[23]</sup>, 计算公式为:

$$CE_r = \varphi_r \cdot S \times 6.817 5 \quad (7)$$

式中:  $CE_r$  为水稻碳排放量 (t);  $\varphi_r$  为稻田甲烷排放因子, 取《四川省温室气体清单编制指南》推荐的单季稻排放系数作为标准,  $\varphi_r = 156.2$  (kg/hm<sup>2</sup>);  $S$  为水稻播种面积 (hm<sup>2</sup>)。

耕地 N<sub>2</sub>O 排放包括直接和间接排放, 直接排放包括氮肥 (农业资源投入中已核算)、粪肥和秸秆还田, 直接排放系数选用《四川省温室气体清单编制指南》推荐值 (t N<sub>2</sub>O/t N) 为 0.010 9。间接排放包括大气氮沉降引起的 N<sub>2</sub>O 排放和氮淋溶径流损失引起的 N<sub>2</sub>O 排放, 排放系数分别为 0.01 和 0.007 5, 计算公式为:

$$N_c = \sum_{i=1}^n X_i \cdot \lambda_i \times 0.65 \quad (8)$$

式中:  $X_i$  为第  $i$  类畜禽数量;  $\lambda_i$  为第  $i$  类畜禽排泄系数, 《四川省温室气体清单编制指南》中牛、猪、羊、家禽的氮排泄率分别为 50, 16, 12, 0.6 kg/(头 · a);  $N_c$  为畜禽粪肥氮; 0.65 为粪便扣除淋溶径流损失率 15% 和挥发损失率 20% 后剩余比例。

$$N_j = \sum_{i=1}^n (\delta_i/h_i - \delta_i) \cdot d_i \cdot n_i \cdot r_i + \delta_i/h_i \cdot d_i \cdot z_i \cdot j_i \quad (9)$$

式中:  $N_j$  为秸秆还田氮;  $\delta_i$  为第  $i$  类作物产量;  $h_i$  为第  $i$  类作物经济系数;  $d_i$  为第  $i$  类作物干重比;  $n_i$  为第  $i$  类作物秸秆还田率, 参照《中国温室气体清单研究》取值 45.6%;  $r_i$  为第  $i$  类作物秸秆含氮率;  $z_i$  为第  $i$  类作物为根冠比;  $j_i$  为第  $i$  类作物根或秸秆含氮率。

$$N_2O_d = [(N_c/0.65 \times 20\% + (N_c + N_j) \times 10\%) \times 0.01 \quad (10)$$

$$N_2O_1 = (N_c + N_j) \times 20\% \times 0.007 5 \quad (11)$$

$$CE_i = [(N_c + N_j) \times 0.010 9 + N_2O_d + N_2O_1] \times 81.264 6 \quad (12)$$

式中: $N_2O_d$  为大气氮沉降引起的  $N_2O$  排放;  $N_2O_l$  为径流淋溶引起的  $N_2O$  排放;  $CE_i$  为耕地  $N_2O$  转碳排放。

畜禽养殖碳排放主要由畜禽胃肠发酵和畜禽排泄物产生,主要包括动物粪便管理  $N_2O$  排放、动物粪便管理  $CH_4$  排放、家禽肠胃发酵  $CH_4$  排放,计算公式为:

$$N_2O_y = \sum_{i=1}^n X_i \times \eta_i \quad (13)$$

$$CH_{4y} = \sum_{i=1}^n (X_i \times \mu_i) + \sum_{i=1}^n (X_i \times \varphi_i) \quad (14)$$

$$CE_y = CH_{4y} \times 6.817\ 5 + N_2O_y \times 81.264\ 6 \quad (15)$$

式中: $N_2O_y$  为畜禽养殖  $N_2O$ ;  $X_i$  为第  $i$  类家禽数量;  $\eta_i$  为第  $i$  类家禽粪便管理  $N_2O$  排放因子(表 5);  $CH_{4y}$  为畜禽养殖  $CH_4$ ;  $\mu_i$  为第  $i$  类家禽肠胃发酵  $CH_4$  排放系数;  $\varphi_i$  为第  $i$  类粪便管理  $CH_4$  排放系数;  $CE_y$  为畜禽养殖碳排放。

表 6 成都平原耕地碳排放影响因素指标体系

Table 6 Index system of influencing factors of cultivated land carbon emission in Chengdu Plain

类别	指标	计算原理
社会发展	城市化率(UR)	城镇人口/总人口
经济发展	农村居民人均可支配收入(RDI)	—
	地均农业产值(AAOV)	第一产业 GDP/耕地面积
资源投入	能源消耗强度(ECD)	柴油消耗量/耕地面积
	农药施用强度(PAD)	农药使用量/耕地面积
	化肥施用强度(FAD)	化肥使用量/耕地面积
	农膜使用强度(AFAD)	农膜使用量/耕地面积
种植水平	机械化水平(ML)	农业机械总动力/耕地面积
	灌溉率(IR)	灌溉面积/耕地面积
	农地经营规模(FOS)	耕地面积/农业从业人员
种植结构	复种指数(MCI)	农作物播种面积/耕地面积
	粮食作物比例(FCR)	粮食作物播种面积/农作物播种面积

偏最小二乘法(Partial LEAST squares, PLS)回归分析具体步骤详见耿亮等<sup>[30]</sup>研究,根据 VIP (Variable importance in projection, VIP)的大小,可确定自变量对于因变量的解释力度,计算公式为:

$$VIP = \sqrt{k \sum_h^m Rd(y, t_h) w_{hj}^2 / Rd(y, t_h)} \quad (16)$$

式中: $Rd(y, t_h) = r^2(y, t_h)$  反映变量  $y$  被主成分  $t_h$  解释时的变异精度,代表了主成分  $t_h$  对变量  $y$  的解释能力; $r(y, t_h)$  为  $y$  与  $t_h$  的相关系数。当  $VIP > 1$  时,为极重要指标,对因变量具有极强解释意义;当  $0.8 < VIP < 1$  时,为一般重要指标,对因变量具有一般解释意义;当  $VIP < 0.8$  时,为不重要指标,对因变量基本不具有解释意义。

表 5 畜禽养殖排放因子

Table 5 Emission factors from livestock and poultry breeding

类型	碳源因子	生猪	牛	羊	家禽
肠胃发酵	$CH_4$	1.00	52.90	8.90	—
	$N_2O$	0.159	0.691	0.064	0.007
粪便管理	$CH_4$	4.18	3.21	0.53	0.02
	$N_2O$	0.159	0.691	0.064	0.007

2.2.3 偏最小二乘法回归分析 结合现有的研究成果以及成都平原实际情况,耕地碳排放最主要的影响因素包括社会发展因素、经济因素、资源投入、种植水平、农业结构因素(表 6),社会发展因素主要为城市化率。经济因素包括农民人均可支配收入,地均农业产值。资源投入因素包括能源消耗强度、化肥施用强度、农药施用强度、农膜使用强度。种植水平因素包括机械化水平、灌溉率、农地经营规模。种植结构包括复种指数、粮食作物比例。

2.2.4 LMDI 建设用地碳排放分解模型 LMDI (Logarithmic mean divisia index, LMDI)模型因其全分解、无残差,加法与乘法分解结果具有一致性等优点,在相关研究中被广泛应用<sup>[31]</sup>,研究采用 LMDI 加法分解。

$$\Delta CE = CE_t - CE_0 = \Delta CI + \Delta BI + \Delta EI + \Delta GI + \Delta PI \quad (17)$$

式中: $\Delta CE$  为建设用地碳排放变化量;  $CE_0, CE_t$  分别为初期和末期建设用地碳排放量;  $\Delta CI, \Delta BI, \Delta EI, \Delta GI, \Delta PI$  分别为碳排放强度、利用效率、能源强度、经济发展和人口规模五种因素导致的建设用地碳排放变化量。

$$\Delta CI = \sum \frac{CE_t - CE_0}{\ln CE_t - \ln CE_0} \ln \frac{CI_t}{CI_0} \quad (18)$$

$$\Delta BI = \sum \frac{CE_t - CE_0}{\ln CE_t - \ln CE_0} \ln \frac{BI_t}{BI_0} \quad (19)$$

$$\Delta EI = \sum \frac{CE_t - CE_0}{\ln CE_t - \ln CE_0} \ln \frac{EI_t}{EI_0} \quad (20)$$

$$\Delta GI = \sum \frac{CE_t - CE_0}{\ln CE_t - \ln CE_0} \ln \frac{GI_t}{GI_0} \quad (21)$$

$$\Delta PI = \sum \frac{CE_t - CE_0}{\ln CE_t - \ln CE_0} \ln \frac{PI_t}{PI_0} \quad (22)$$

$$\varphi_C = \frac{\Delta CI}{\Delta C}, \varphi_B = \frac{\Delta BI}{\Delta C}, \varphi_E = \frac{\Delta EI}{\Delta C},$$

$$\varphi_G = \frac{\Delta GI}{\Delta C}, \varphi_P = \frac{\Delta PI}{\Delta C} \quad (23)$$

式中： $\varphi_C, \varphi_B, \varphi_E, \varphi_G, \varphi_P$  分别为  $\Delta CI, \Delta BI, \Delta EI, \Delta GI, \Delta PI$  的贡献率。

### 2.2.5 PLUS 模型下多情景土地利用格局模拟

PLUS 模型是一个基于栅格数据的可用于斑块尺度土地利用变化模拟的模型,集成了基于土地扩张分析的规则挖掘方法和多类型随机种子机制的元胞自动机模型<sup>[16]</sup>,可用于挖掘土地扩张的驱动因素并预测土地利用景观的斑块级演化。综合考虑成都平原土地利用实际情况,从自然环境、社会经济选取 18 个主要驱动因素。自然因素包括高程、坡度、年均降水、年均气温、到水域的距离。社会经济因素包括人口密度、地均 GDP、到各类道路(主干道、一级、二级、三、四级道路、铁路)距离、到机场、高铁站、政府距离、POI 核密度、夜间灯光数据。PLUS 模型的主要参数包括转换矩阵、土地利用需求和领域权重。根据 2006—2022 年成都平原各地类扩张面积的比例,确定耕地、林地、草地、水域、建设用地、其他及未利用地的领域权重值分别为 0.039 4、0.244 8、0.003 3、0.029 4、0.460 7 和 0.000 4。用地类型转移矩阵体现了不同土地利用类型之间转换的倾向性(表 7),系统中“0”表示不允许转换,“1”表示允许转换。各地类碳排放系数中,一般参考林地、草地、水域、其他及未利用地的碳吸收率分别为 0.604 6、0.020 6、0.253 0 和 0.000 5 t/(hm<sup>2</sup>·a)。2030 年耕地、建设用地碳排放系数是

基于 2006—2022 年单位面积耕地与建设用地碳排放,使用 Excel 趋势线预测得到。

表 7 2030 年成都平原土地利用类型转移成本矩阵  
Table 7 Transfer cost matrix of land use types in Chengdu Plain in 2030

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	其他及未利用地
耕地	1	1	1	1	1	1
林地	1	1	0	0	0	0
草地	1	1	1	1	1	1
水域	1	0	0	1	0	0
建设用地	1	0	0	1	1	0
其他及未利用地	1	1	1	1	1	1

基于现有的相关研究成果<sup>[13,18]</sup>,采用 PLUS 模型,针对成都平原 2030 年实现碳达峰目标,设定自然情景、碳增汇情景和碳减排情景。通过对这 3 种情景下成都平原未来土地利用空间格局的模拟,系统地评估并测算了不同政策导向对土地利用碳排放的影响。  
①自然情景下,假设成都平原的土地利用未采取任何限制条件,土地利用格局保持自然发展趋势。  
②碳增汇情景下,设定在确保粮食安全的前提下,将林地、草地和水域作为碳汇的主要来源,优先保护这些土地类型,以增加区域碳汇能力。  
③碳减排情景下,以确保粮食安全为前提,将建设用地确定为碳排放的主要来源,需严格控制建设用地的面积增长,以减少碳排放。

结合《四川省国土空间规划(2021—2035 年)》和《成都市高标准农田建设规划(2021—2030 年)》的规定,将成都平原耕地流出面积的上限设定为 15%,建设用地面积增加上限设定为 20%。根据《成都市国土空间总体规划》的全域农业保护格局,将农业保护区域视为土地流转限制条件。碳增汇情景下,设定耕地面积减少 15%。建设用地面积增加 20%,耕地流转为林地、草地和水域的面积,按照 2006—2022 年的耕地转入比例进行分配,其他及未利用地参考自然情景结果。碳减排情景下,设定耕地面积减少了 10%,建设用地面积增加了 15%。林地、草地、水域面积、其他及未利用地分配方式与碳增汇情景相同,结果详见表 8。

表 8 2030 年成都平原 3 种情景土地利用需求预测

Table 8 Prediction of land use demand in three scenarios of Chengdu Plain in 2030

km<sup>2</sup>

场景	耕地	林地	草地	水域	建设用地	其他及未利用地
自然情景	7 037.73	11 631.42	167.23	704.04	6 656.77	9.20
碳增汇情景	9 149.09	10 398.19	168.93	669.09	5 811.89	9.20
碳减排情景	9 687.28	10 111.04	168.04	661.10	5 569.73	9.20

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用类型重心变化

3.1.1 6 种土地利用类型重心变化 2006—2010 年、2010—2014 年、2014—2018 年与 2018—2022 年,成都平原耕地、林地、其他及未利用地的重心移动方向具有较强的连贯性,而草地、水域、建设用地重心变化没有连贯性(图 3)。2006—2022 年,成都平原中部与西南区域的耕地的大量转出,导致耕地重心向东北方向移动 4.23 km(表 9)。林地面积自龙门山脉起,逐步向东南方向扩展,龙泉山脉与简阳市的林地增长尤为显著,推动林地重心向东南方向移动 11.12 km。

相比较之下,草地和水域的空间分布相对固定,其重心变化呈闭环移动,分别移动了 3.41 和 5.46 km。而在城市化进程方面,德阳市与绵阳市的快速发展超越了乐山市与眉山市,导致成都平原建设用地重心向东北方向移动 8.44 km。其他及未利用地东北部流入面积大于其余区域,使得重心向东北方向移动了 31.58 km。

总体结果表明,2006—2022 年,成都平原中西部方向耕地减少面积高于东北方向,而东北方向则在水域、建设用地、其他及未利用地的扩张面积上明显高于西南方向。此外,东南方向林地与草地的增加面积高于西北方向。

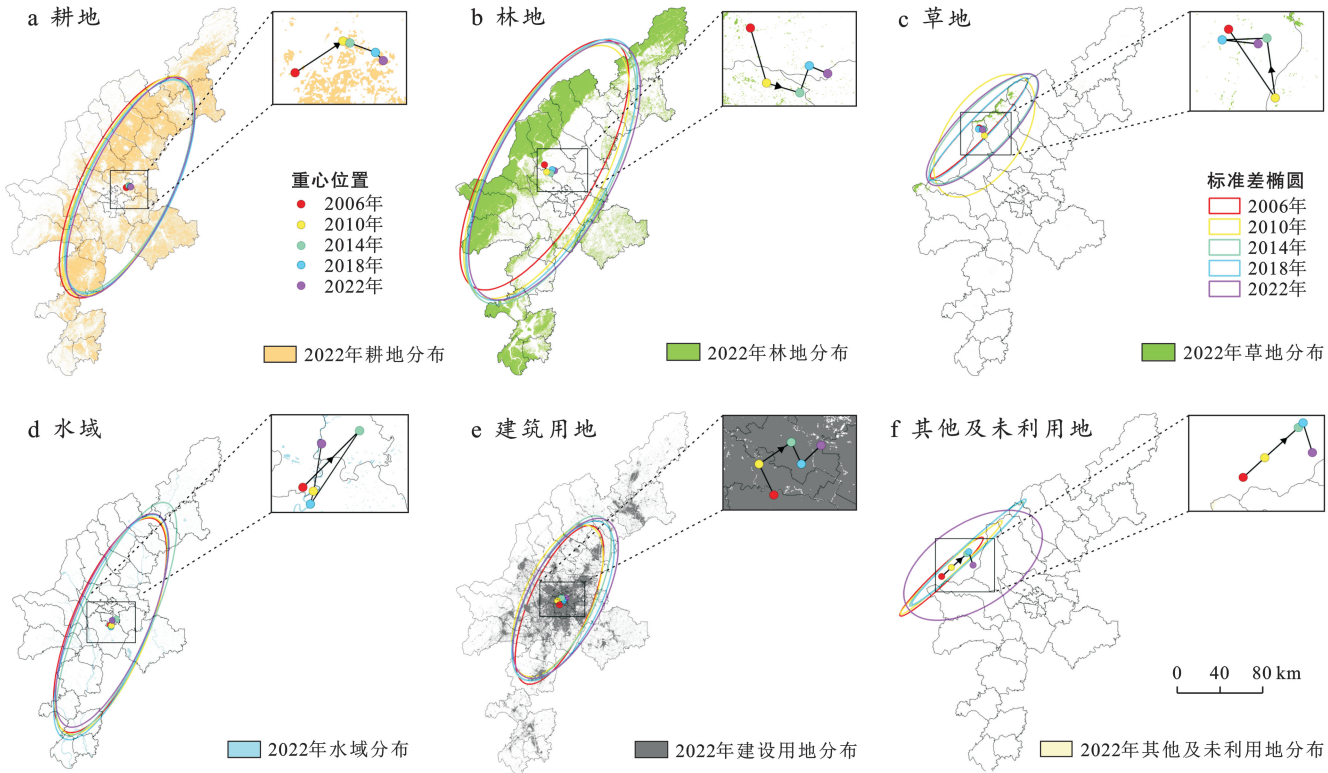


图 3 2006—2022 年成都平原土地利用类型重心变化

Fig.3 Changes of center of gravity of land use types in Chengdu Plain from 2006 to 2022

表 9 2006—2022 年成都平原土地利用类型重心移动方向和距离

Table 9 Moving directions and distances of center of gravity of land use types in Chengdu Plain from 2006 to 2022

土地利用类型	2006—2010 年		2010—2014 年		2014—2018 年		2018—2022 年		2006—2022 年	
	方向	距离/km	方向	距离/km	方向	距离/km	方向	距离/km	方向	距离/km
耕地	东北	2.63	东南	0.34	东南	1.30	东南	0.54	东北	4.23
林地	东南	7.08	东南	4.27	东北	3.53	东南	2.44	东南	11.12
草地	东南	7.01	东北	6.03	西北	4.57	东南	3.87	东南	3.41
水域	东北	9.36	西南	10.17	东北	4.71	东北	5.12	东北	5.46
建设用地	西北	4.31	东北	4.85	东南	2.95	东北	3.40	东北	8.44
其他及未利用地	东北	12.50	东北	19.24	东北	3.24	东南	14.11	东北	31.58

3.1.2 主要粮食作物水稻、小麦、玉米重心变化分析 2006—2010, 2010—2014, 2014—2018, 2018—2022 年,

成都平原水稻、小麦与玉米的重心变化展现出了显著的差异性。水稻重心变化具有明显连贯性,小麦与

玉米的重心变化则显得较为无序(图 4)。2006—2022 年,水稻重心向东北方向移动 15.47 km(表 10),表明成都平原西南方向水稻种植面积的缩减相较于东北方向更为显著;小麦重心向西南方向移动

17.77 km,反映成都平原东北方向小麦种植面积的减少程度超过了西南方向;玉米重心向东北方向移动 7.52 km,表明成都平原西南方向玉米减少面积高于东北方向。

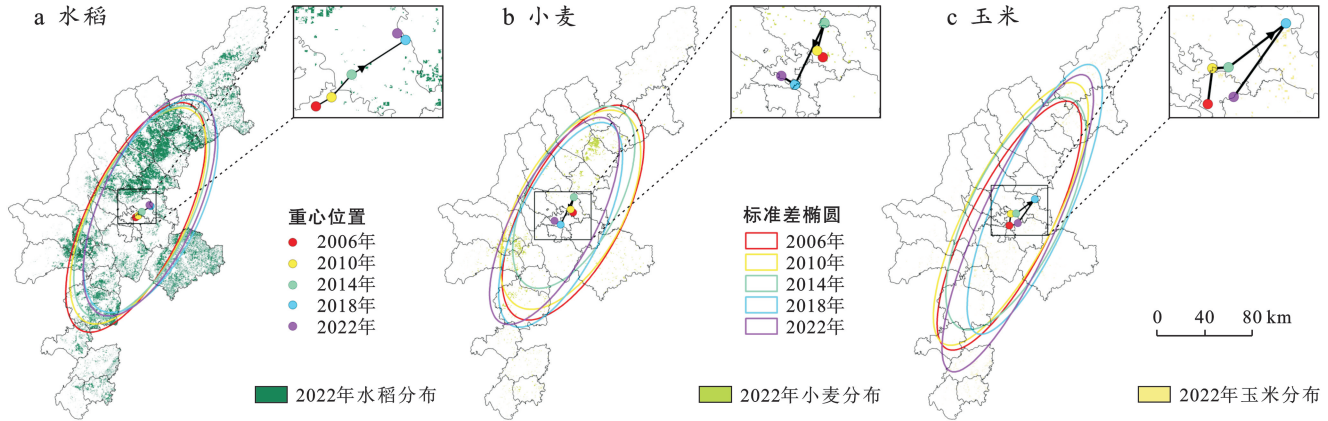


图 4 2006—2022 年成都平原水稻、小麦、玉米重心变化

Fig.4 Changes of gravity center of rice, wheat and corn in Chengdu Plain from 2006 to 2022

表 10 2006—2022 年成都平原水稻、小麦、玉米重心移动距离和方向

Table 10 Moving distances and directions of center of gravity of rice, wheat and corn in Chengdu Plain from 2006 to 2022

作物	2006—2010 年		2010—2014 年		2014—2018 年		2018—2022 年		2006—2022 年	
	方向	距离/km	方向	距离/km	方向	距离/km	方向	距离/km	方向	距离/km
水稻	东北	2.63	东北	4.32	东北	9.17	东南	1.47	东北	15.47
小麦	西北	3.16	东北	10.88	西南	25.79	西北	6.19	西南	17.77
玉米	东北	9.74	西	4.45	东北	19.95	西南	24.45	东北	7.52

### 3.2 成都平原碳源碳汇时空变化

3.2.1 成都平原碳源碳汇时间变化 成都平原在碳源与碳汇方面的变化趋势呈现出鲜明的对比,如表 11 所示。碳源方面,2006—2022 年成都平原总碳排放增加  $1.36 \times 10^7$  t。2006,2010,2014,2018,2022 年建设用地碳排放占总碳排放的比重分别为 81.62%,88.56%,90.99%,92.91 和 94.33%,呈不断增加趋势;耕地的碳排放呈逐年减少趋势,2006—2022 年耕地碳排放累计减少  $1.70 \times 10^6$  t,降幅高达 44.56%。由此可见,成都平原碳排放主要来自于建设用地,且比例还在不断上升。碳汇方面,2006—2022 年,林地的碳汇作用得到明显提升,林地碳吸收量分别为  $3.78 \times 10^5$  t,  $4.59 \times 10^5$  t,  $5.26 \times 10^5$  t,  $5.44 \times 10^5$  t,  $5.91 \times 10^5$  t,对碳汇的贡献率分别为 14.16%,18.18%,23.40%,27.46%,28.09%。而耕地作为传统上重要的碳汇场所,其碳汇能力却出现了持续下降,耕地碳汇对总碳汇的比例分别为 85.33%,81.28%,75.89%,71.75%和 71.11%,16 a 间比例共下降 14.19%。水域的碳汇作用很小,且呈波动增长的态势,16 a 间只增加 2 400 t,增幅约 17.02%。净碳排放方面,2006—2022 年成都平

原土地利用净碳排放量呈明显增长趋势,16 a 间增加了  $1.41 \times 10^7$  t,增长了 84.41%。

3.2.2 成都平原碳源碳汇空间变化 2006—2022 年,成都平原县域碳排放处于快速增长型的有 2 个,为双流区与青白江区,双流区年均增长率最高,为 5.36%。有 18 个县域的碳排放处于中速增长,主要在成都平原的中部和东北部,剩余 13 个县域呈缓慢增长,如图 5a 所示。相较于碳排放,2006—2022 年碳汇的变化类型更多,具有更为明显的空间聚集性,如图 5b 所示。处于急速下降状态的县域有 5 个,位于成都市主城区,这表明建设用地扩张对主城区的碳汇能力影响最大。同时,温江区作为唯一快速下降的县域,其碳汇状况同样引人关注。有中速下降的县域则主要集中在成都市环主城区、乐山市、沙湾区和游仙区,共计 8 个;而缓慢下降状态的县域共有 17 个,分布在成都市边缘区县、德阳市、绵阳市。此外,广汉市和市中区的碳汇呈缓慢增长趋势,值得重视。总体表明,碳汇水平下降是成都平原 33 个县域的普遍趋势。由图 5c 可知,2006—2022 年耕地碳排放处于急速下降类型的区具有 9 个,分布在成都市辖区,主要

归因于农业种植面积急剧减弱,各类化肥、农药等农业要素投入快速减少,从而导致农业碳排放下降。新都区、青白江区、都江堰市、新津区、彭山区、沙湾区等则构成了快速下降型区域,主要分布在成都市。

中速下降型有 12 个区县,主要分布在成都市、乐山市、绵阳市。而缓慢下降型的区县则有 6 个。综上所述,成都市的耕地碳排放下降速度明显大于其余地区。

表 11 成都平原 2006—2022 年土地利用碳排放

Table 11 Carbon emission of land use types in Chengdu Plain from 2006 to 2022

年份									10 <sup>4</sup> t		
		耕地碳排放	耕地碳汇	林地	草地	水域	建设用地	其他	碳排放	总碳汇	净碳排放
2006	数值/10 <sup>4</sup> t	356.39	-227.88	-37.83	-0.03	-1.41	1 582.69	0	1 939.08	-267.15	1 671.93
	比例/%	18.38	85.30	14.16	0.01	0.53	81.62	0	100	100	
2010	数值/10 <sup>4</sup> t	288.09	-205.05	-45.87	-0.04	-1.33	2 230.17	0	2 518.26	-252.29	2 265.97
	比例/%	11.44	81.28	18.18	0.02	0.53	88.56	0	100	100	
2014	数值/10 <sup>4</sup> t	258.95	-170.63	-52.62	-0.04	-1.55	2 614.40	0	2 873.35	-224.84	2 648.51
	比例/%	9.01	75.89	23.40	0.02	0.69	90.99	0	100	100	
2018	数值/10 <sup>4</sup> t	207.82	-142.16	-54.40	-0.03	-1.55	2 722.16	0	2 929.98	-198.14	2 731.84
	比例/%	7.09	71.75	27.46	0.02	0.78	92.91	0	100	100	
2022	数值/10 <sup>4</sup> t	186.91	-149.59	-59.09	-0.03	-1.65	3 107.37	0	3 294.28	-210.36	3 083.92
	比例/%	5.67	71.11	28.09	0.01	0.78	94.33	0	100	100	

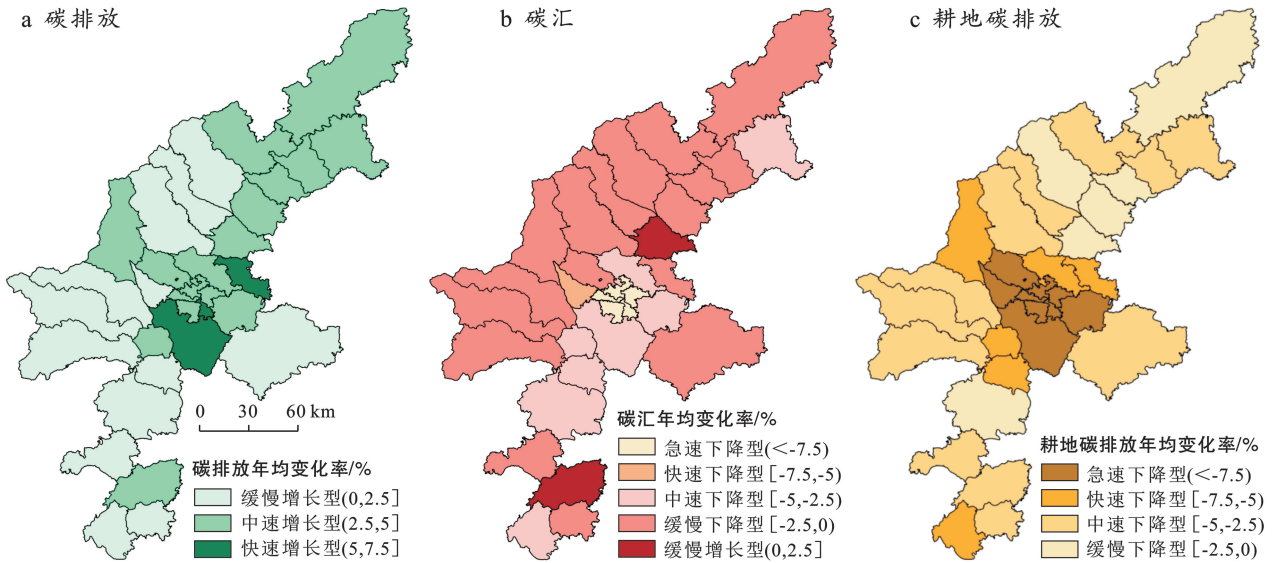


图 5 2006—2022 年成都平原土地利用碳核算年均变化率空间分布

Fig.5 Spatial distribution of land use carbon accounting of annual average change rate in Chengdu Plain from 2006 to 2022

### 3.3 耕地碳排放主要影响因素分析

借助 SPSS26 软件进行 PLS 回归分析,考虑到前 4 个主成分就有超过 80% 的累积方差解释率,选取 4 个主成分对自变量和因变量进行解析,从回归系数、VIP 值、回归模型验证对回归模型的效果进行分析,如表 12 所示。①城市化率、农民居民人均可支配收入、机械化水平与地均耕地碳排放负相关。主要因为城市化、农村居民人均可支配收入、机械化水平增加会推动农业资源投入的减少和绿色化发展,减少碳排放的产生。②地均农业产值、能源强度、农药施用强度、化肥施用强度、农膜使用强度、灌溉率、农地经营规模、复种指数、粮食作物比例与地均耕地碳排放正

相关,主要是因为能源强度、灌溉率、农药施用强度、化肥施用强度、农膜使用强度是农用资源投入的主要方式,会产生大量碳排放。复种指数是农业种植强度的重要体现,复种指数的上升会带来更多农业资源的投入与消耗,粮食作物比例是由于水稻种植会产生大量碳排放。地均农业产值与地均碳排放正相关,表明成都平原还处于追求产量而非绿色生态产品阶段。农地经营规模与地均碳排放呈正相关,表明成都平原还未实现通过规模经营提升对农业资源投入的利用率,还处于规模化前期。③值得注意的是,12 个影响因素指标对耕地碳排放有影响,对耕地碳汇能力也会有正向促进或反向抑制作用。因此,耕地低碳发展策

略不应仅局限于减少碳排放,而应兼顾提升碳汇能力,走低碳排放与高碳汇并重的可持续发展道路。

表 12 耕地碳排放 PLS 回归结果

Table 12 PLS regression results of cultivated land carbon emission

变量	非标准系数	标准系数
城市化率(UR)	-0.01	-0.03
农民居民人均可支配收入(RDI)	-0.36	-0.44
地均农业产值(AAOV)	1.72	0.10
能源消耗强度(ECD)	380.82	0.32
农药施用强度(PAI)	91.61	0.01
化肥施用强度(FAI)	43.69	0.11
农膜使用强度(AFAI)	15.69	0.29
机械化水平(ML)	-0.50	-0.06
灌溉率(IR)	63.34	0.06
农地经营规模(FOS)	96.87	0.06
复种指数(MCI)	93.58	0.37
粮食作物比例(FCR)	162.99	0.19
常数	1.69	—

利用 PLS 模型计算得到的回归方程具有良好的拟合效果(皮尔逊相关系数为 0.902 56,调整后的  $R^2$  为 0.813 36),表明该方程较为准确地量化了成都县域地均耕地碳排放与各影响因素之间的线性关系,为实现耕地低碳发展提供了较好的数据支撑。分析可知,城市化率、农民人均可支配收入、能源强度、农药施用强度、化肥施用强度、复种指数的  $VIP > 1$ ,属于极重要指标。农膜使用强度、灌溉率、农地经营规模、粮食作物比例的  $VIP \in (0.8 \sim 1.0)$ ,表明该类指标对地均碳排放有一定影响。地均农业产值、机械化水平的  $VIP < 0.8$ ,对地均碳排放影响较小,属于不重要指标。总体而言,城市化率、粮食作物比例、复种指数是目前无法为耕地低碳发展而抑制的指标,未来可通过减少复种过程中农业资源投入产生的碳排放。其余可调节的重要影响指标中,对耕地碳排放的解释度为:能源消耗强度  $>$  化肥施用强度  $>$  农药施用强度  $>$  农地经营规模  $>$  农膜使用强度,表明未来农机节能研发是降低能源强度优先选择,推进化肥农药减量增效,发展生态农业是降低耕地碳排放的重要切入点,集约化、绿色化农地规模经营和提升农膜回收率是低碳发展重要补充。

### 3.4 建设用地碳排放影响因素

成都市主城区能源强度对碳排放的抑制作用为先减小后增加,从 2006 年的  $9.01 \times 10^5$  t 增加至 2022 年的  $2.24 \times 10^6$  t(图 6a)。成都市环主城区呈持续增加的趋势,其余县域的能源强度抑制作用基本呈出先增强后减弱的变化趋势,从 2006 年的  $1.77 \times 10^6$  t 增加至 2022 年的  $1.99 \times 10^6$  t。2018 年后,成都市辖区

能源强度对建设用地碳排放的抑制效应快速增加,其余区县抑制作用则相对稳定。这表明成都市辖区能源结构优化步伐加快,能源强度对碳排放的抑制作用显著增强。成都市及周边城市碳排放强度的抑制作用经历了先增后减的趋势,其中主城区与德阳、绵阳、乐山以 2010 年为拐点,而环主城区则以 2014 年为拐点。其余区县则呈波动变化。表明随着时间推移,降低建设用地碳排放强度面临挑战,传统的减碳方式难以满足新的低碳发展要求,如图 6b 所示。成都市县域经济发展导致的碳排放基本以 2010 年为拐点呈先增强后减弱,2006—2010,2010—2014,2014—2018,2018—2022 年 4 个阶段的值分别为  $5.43 \times 10^6$ ,  $5.951 \times 10^6$ ,  $3.59 \times 10^6$ ,  $1.68 \times 10^6$  t(图 6c)。旌阳区、罗江区、广汉市、市中区、东坡区经济发展导致的碳排放呈现持续下降趋势,其余区县则呈波动变化。截至 2022 年,在 33 个县域中已有 7 个区县的经济由促进碳排放转变为抑制,且均位于成都市辖区,表明成都市辖区在低碳经济方面的发展领先于其他县域。成都市主城区人口规模对碳排放的增加效应以 2010 年为拐点基本呈先减少后增加的趋势(图 6d),2006—2010,2010—2014,2014—2018,2018—2022 年 4 个阶段的值分别为  $1.66 \times 10^5$ ,  $2.14 \times 10^4$ ,  $5.94 \times 10^4$ ,  $9.38 \times 10^5$  t。成都市环主城区、涪城区呈逐年增加的趋势,2006—2010 年的  $7.12 \times 10^5$  t 增加至 2018—2022 年的  $6.27 \times 10^6$  t,其余区县则呈波动变化。2018—2022 年,成都市辖区因人口规模增加导致建设用地碳排放增加量显著上升。2006—2022 年,成都市辖区、涪城区因人口规模过高造成的碳排放远高于其余区县,且差距逐年扩大。成都平原从 2006 年的 23 个县域表现出的抑制作用降至 2022 年的 7 个县域(图 6e)。利用效率对各县域的影响呈小范围的地域差异,成都市锦江区、青羊区、金牛区、成华区、龙泉驿区、青白江区、新都区,温江区 8 个县域利用效率逐步从抑制碳排放转变为促进碳排放,且促进作用呈不断增强,2006—2010 年的  $-1.75 \times 10^6$  t 增加至 2018—2022 年的  $1.92 \times 10^6$  t,其余区县则呈波动变化。这表明在城市发展中,建设用地面积扩张较多,建设用地利用效率低已成为成都平原 33 个县域的普遍趋势。碳排放贡献度方面,经济发展在各县域之间没有明显地域差异,是 33 个县域建设用地碳排放增加的主要因素(图 6f)。增加建设用地碳排放方面,成都市县域人口规模的贡献度  $>$  利用效率的贡献度。抑制建设用地碳排放方面,成都市主城区、乐山市和眉山市碳排放强度贡献度  $>$  能源强度贡献度。

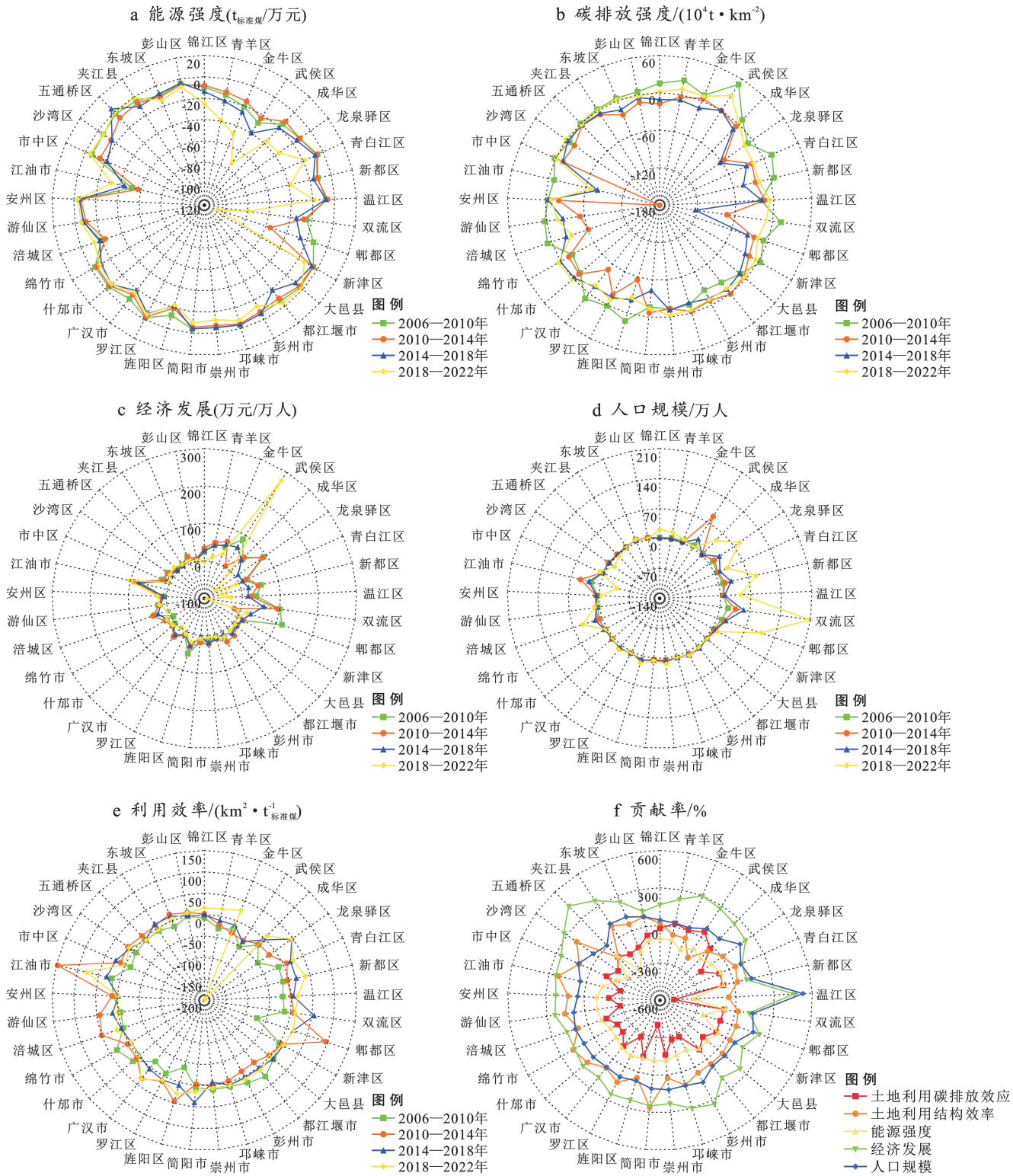


图 6 成都平原 2006—2022 年建设用地碳排放影响因素分解和贡献率

Fig.6 Decomposition and contribution rates of carbon emission from construction land in Chengdu Plain from 2006 to 2022

### 3.5 土地利用格局多情景模拟

比较 2022 年成都平原现状土地利用类型与模拟土地利用类型,对其进行精度验证。用 kappa 系数模拟来衡量土地利用类型图的空间位置一致性, kappa 系数值大于 0.75,说明两类土地利用类型空间

位置较一致。采样率为 0.01 进行 kappa 系数检验, 值为 0.752,表明 PLUS 模拟结果与真实结果较为一致,能较好模拟成都平原未来土地利用空间分布格局,将 3 种情景参数输入 PLUS 模型,结果如图 7 所示。

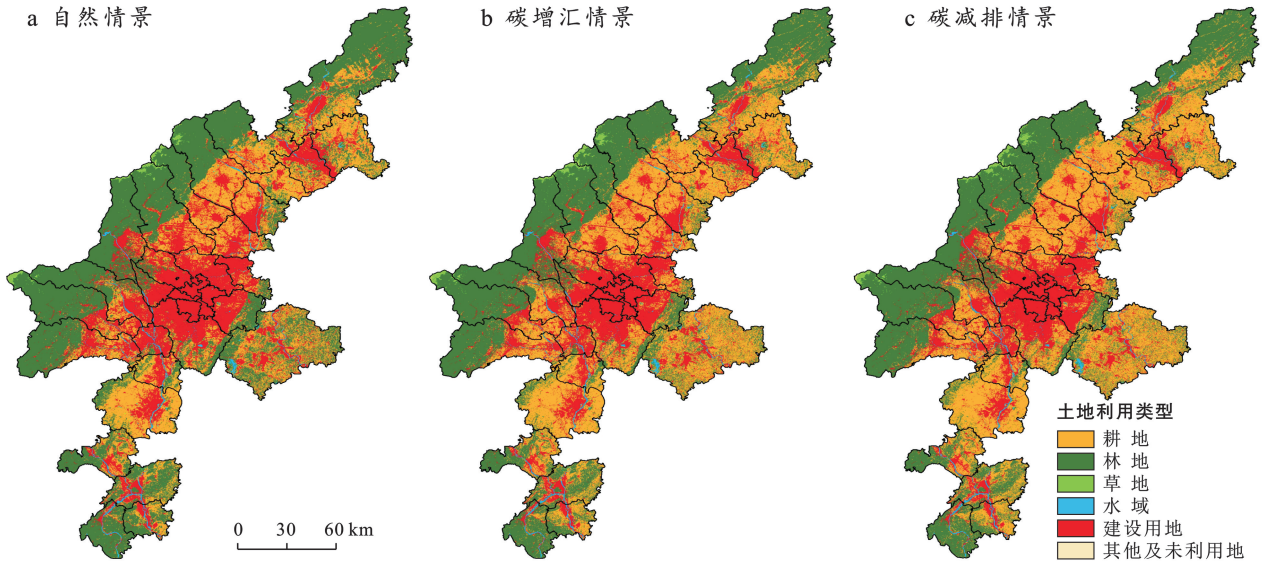


图 7 成都平原 2030 年 3 种情景下土地利用类型需求预测

Fig.7 Land use demand projections in three scenarios in Chengdu Plain in 2030

3.5.1 不同情景下土地利用面积差异 根据图 7 可以看出,耕地、林地仍是成都平原未来主要的土地利用类型,不同情景下土地利用类型的空间格局基本一致,林地主要分布在龙泉山脉、龙门山脉和乐山市内,建设用地主要分布在成都平原中部,德阳市和绵阳市也有较大增幅,草地、水域面积依旧保持相对稳定的空间分布。①自然情境下,地类面积大小顺序为:林地面积>耕地面积≈建设用地面积>水域面积>草地面积>其他及未利用地面积(表 13)。自然情景下耕地流失严重,林地成为土地的最主要地类,建设用

地面积与基本与耕地面积持平,土地利用格局难以支撑粮食安全的需求。②碳增汇情景下,地类面积大小顺序为:耕地面积>林地面积>建设用地面积>水域面积>草地面积>其他及未利用地面积。碳增汇情景下耕地流失比自然情景减弱,耕地是土地的最主要地类,土地利用格局基本支撑粮食安全的需求。③碳减排情景下,地类面积大小顺序为:林地面积≈耕地面积>建设用地面积>水域面积>草地面积>其他及未利用地面积。总体而言,碳减排情景下耕地流失最少,对粮食安全保障最高。

表 13 2030 年 3 种情景下成都平原 6 种土地利用类型面积与 2022 年面积的对比

Table 13 Comparison of area of six land use types in Chengdu Plain under three scenarios in 2030 and 2022 km<sup>2</sup>

土地利用类型	2022 年	自然情景	碳增汇情景	碳减排情景
耕地	10 763.64	7 042.46	9 150.77	9 688.97
林地	9 773.02	11 626.25	10 394.06	10 106.95
草地	166.99	167.23	168.99	168.10
水域	651.65	704.04	668.13	660.14
建设用地	4 843.24	6 656.77	5 812.08	5 569.91
其他及未利用地	7.85	4.47	7.20	7.16

3.5.2 6 种土地利用类型重心变化 6 种土地类型中,成都平原林地、水域、建设用地、其他及未利用地在自然情景、碳增汇情景和碳减排情景重心移动方向一致(图 8)。林地重心向东南方向移动,水域向东北方向移动,建设用地向东北方向移动,其他及未利用地向东北方向移动,地类重心移动距离顺序均为:自然情景>碳增汇情景>碳减排情景(表 14),表明 4 种地类未来变化具有很明显的趋势性,自然情景地类变化强度>碳增汇地类变化强度>碳减排地类变化强度。成都平原耕地和草地的重心移动则没有一致性。

根据重心移动方向分析,未来成都平原东北方向的绵阳市与德阳市建设用地、水域和未利用地的扩张面积会高于西南地区的乐山市与眉山市,东南方向林地增加面积增速会高于西北方向龙门山脉林地增加面积,林地与草地因未来发展情景的不同,面积流入流出方向存在较大差异。

3.5.3 成都平原 3 种情景下土地利用碳排放分析 根据表 15 可知,自然情景下,成都平原 2030 年的土地利用碳排放为  $3.03 \times 10^7$  t,相比 2022 年减少  $5.39 \times 10^5$  t,可在 2030 年实现碳达峰目标,耕地碳

排放下降  $5.38 \times 10^5$  t,是实现碳达峰的主要原因。碳增汇情景下,成都平原 2030 年土地利用碳排放为  $2.74 \times 10^7$  t,比 2022 年减少  $3.47 \times 10^6$  t,减少量介于自然情景和碳减排情景之间。碳减排情景下,成都平

原 2030 年土地利用碳排放为  $2.63 \times 10^7$  t,比 2022 年减少  $4.53 \times 10^6$  t,是碳排放下降最多的情景,建设用地碳排放下降  $3.89 \times 10^6$  t,是实现碳达峰的主要途径。

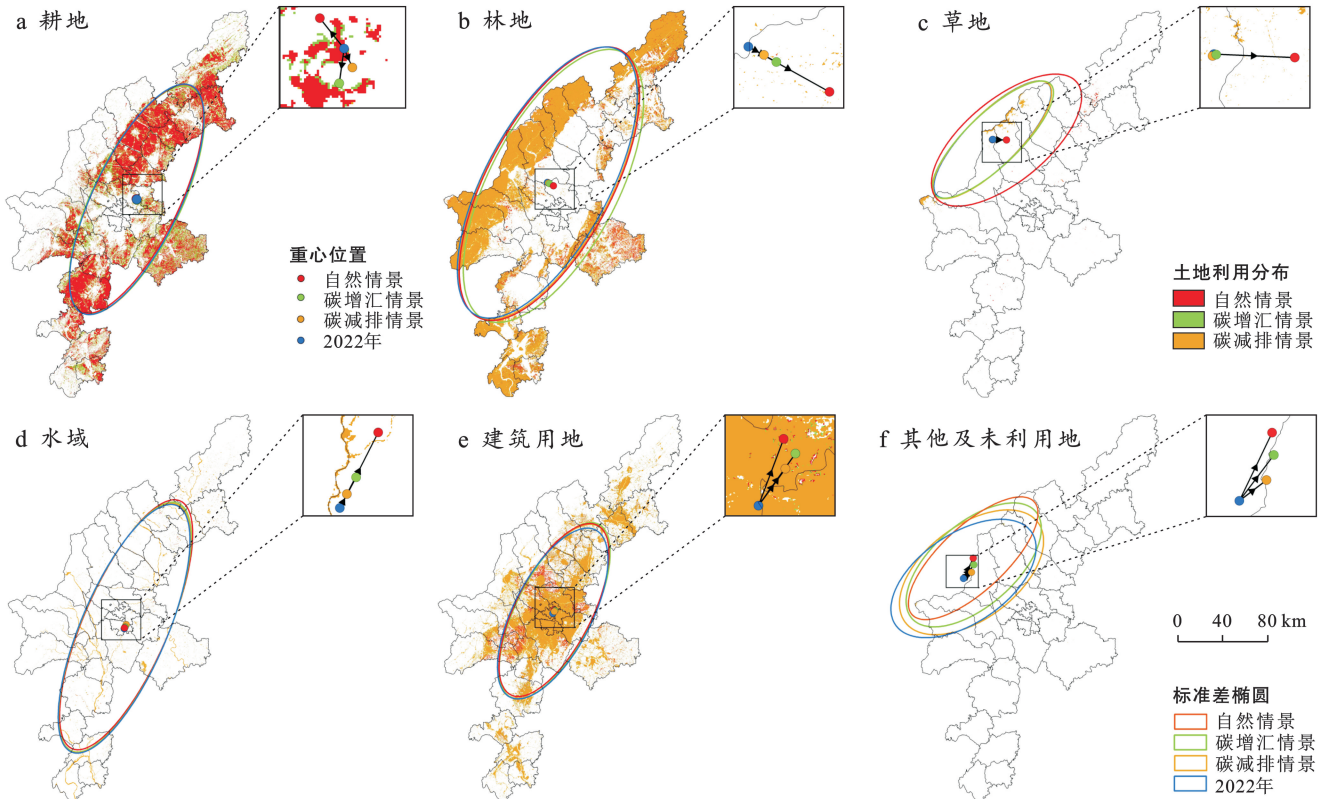


图 8 2022—2030 年 3 种情境下成都平原土地利用类型重心变化

Fig.8 Gravity center changes of land use types in Chengdu Plain under three scenarios from 2022 to 2030

表 14 2022—2030 年 3 种情境下成都平原土地利用类型重心移动方向和距离

Table 14 Directions and distances of gravity center movement of land use types in Chengdu Plain under three scenarios from 2022 to 2030

地类	自然情景		碳增汇情景		碳减排情景	
	方向	距离/km	方向	距离/km	方向	距离/km
耕地	西北	0.54	西南	0.49	东南	0.27
林地	东南	6.29	东南	2.14	东南	1.18
草地	东北	12.63	东南	0.41	西南	0.36
水域	东北	4.01	东北	1.64	东北	0.74
建设用地	东北	3.38	东北	3.02	东北	2.14
其他及未利用地	东北	20.21	东北	15.28	东北	9.06

表 15 成都平原 3 种情景下土地利用碳排放量 2030 年与 2022 年对比

Table 15 Comparison of land use carbon emissions under three scenarios in Chengdu Plain between 2030 and 2022  $10^4$  t

土地利用类型		耕地	林地	草地	水域	建设用地	其他及未利用地	总碳排放量
2022 年	碳排放量	37.32	-59.09	-0.03	-1.65	3 107.37	0.00	3 083.92
	碳排放量	-16.47	-70.29	-0.03	-1.78	3 118.59	0.00	3 030.01
自然情景	变化	-53.79	-11.20	0.00	-0.13	11.22	0.00	-53.91
	碳排放量	-22.42	-62.84	-0.03	-1.69	2 823.62	0.00	2 736.64
碳增汇情景	变化	-59.74	-3.75	0.00	-0.04	-283.75	0.00	-347.28
	碳排放量	-23.20	-61.11	-0.03	-1.67	2 718.60	0.00	2 631.27
碳减排情景	变化	-60.52	-2.02	0.00	-0.02	-388.77	0.00	-452.65

## 4 结论

(1) 成都平原中部和西南区域的耕地转出面积较大,耕地重心向东北方向移动 4.23 km。林地面积从龙门山脉向东南扩展,其重心向东南方向移动 11.12 km。草地和水域由于相对固定的空间分布,其重心变化呈闭环移动,分别移动了 3.41 km 和 5.46 km。德阳市和绵阳市的城市化速度快于乐山市和眉山市,建设用地重心向东北方向移动了 8.44 km,其他及未利用地的重心也向东北方向移动了 31.58 km。成都平原中部和南部地区的水稻转出面积大于其他地区,导致水稻重心向东北方向移动,而小麦和玉米的转出面积相对较为分散,未呈现持续性的变化趋势。

(2) 2006—2022 年,成都平原 33 个县域土地利用碳排放量整体呈持续上升趋势,碳排放量增加  $1.36 \times 10^7$  t;碳汇呈下降趋势,碳汇量减少  $5.68 \times 10^5$  t,反映了一种负增长的态势。成都市辖区和绵阳市的土地利用碳排放增加速度尤为显著,成都市主城区碳汇下降速度亦居前列,而成都市耕地的碳排放下降速度则呈现明显的空间分异。

(3) 成都市辖区在能源结构优化和经济绿色发展方面取得显著进展,能源强度对碳排放的抑制作用增强,已有 7 个区的经济发展模式实现从促进到抑制碳排放的转变。但成都市辖区和涪城区由于人口规模过大,导致碳排放远高于其他区县,且差距逐年扩大。建设用地利用效率降低和碳排放强度控制难度增加成为当前面临的挑战。预计至 2030 年,成都平原在自然情景下可实现碳达峰,主要得益于耕地碳排放的显著下降;碳增汇情景下碳排放减少量适中;而碳减排情景下,碳排放将实现最大程度的下降,这主要得益于建设用地碳排放的大幅减少,是实现碳达峰的关键途径。

## 5 讨论

研究表明,2006—2022 年成都平原农民人均可支配收入、耕地经营规模、粮食作物种植比例对耕地碳排放的影响与 Guo Zhangdong 等<sup>[32]</sup>的研究展现出高度一致。此外,经济发展导致碳排放量先增加后减少<sup>[33]</sup>,特别是部分区县的经济由促进碳排放向抑制碳排放转变,这与 Yu Qianyu 等<sup>[34]</sup>的研究结果基本一致。碳减排情景比自然情景和碳汇情景更有利于土地利用的低碳发展,这与武爱彬等人<sup>[13]</sup>的研究结论相吻合。

研究提出了在粮食安全和双碳目标指导下成都

平原土地利用低碳发展的建议:①成都平原耕地面积主要向成都平原中部建设用地和龙门山、龙泉山、乐山市林地转移,强化该地区耕地的保护尤为关键。②小麦作为主要的粮食作物,其播种面积占总播种面积的比例已下降了约 34%,降幅显著。今后要加大对小麦的科学研究力度,以提高其品质和种植收入,进而增加小麦种植面积。③针对成都平原未实现耕地由碳源向碳汇转化的县域,应重点推广节能农具,积极采用有机肥和绿色农药代替传统农药化肥,逐步提高农田规模经营质量和农膜回收率。④成都非市辖区、德阳市、绵阳市、乐山市、眉山市应加速推进低碳能源消费结构,提高清洁能源消费比重,并加快东部等新区的建设。

本研究计算了成都平原土地利用碳排放,探讨了土地利用中心转移与碳排放的关系,模拟了成都平原 3 种情景下的土地利用格局,但仍有一些不足之处需要进一步探索。土地利用碳排放核算的准确性可通过结合更精度的图像信息和更定量的统计数据来提升。此外,虽然设计了 3 个仿真场景,但其他可能的场景也需要进一步研究和完善。为了更精细地反映数据变化的连续性,未来应采用多周期时间节点数据,并加强数据分析的精细度。

## 参考文献 (References)

- [1] 吴凯,顾晋怡,何宏谋,等.基于重心模型的丘陵山地区耕地利用转换时空特征研究[J].农业工程学报,2019,35(7):247-254.  
Wu Kai, Gu Jinyi, He Hongmou, et al. Spatiotemporal characteristics of cultivated land use transition in hilly and mountainous regions based on barycenter model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(7):247-254.
- [2] 阎仲康,曹银贵,李志涛,等.内蒙古东部草原区矿山生态修复研究:关键技术与减碳路径[J].农业资源与环境学报,2023,40(3):570-582.  
Yan Zhongkang, Cao Yingui, Li Zhitao, et al. Ecological restoration of mines in eastern grassland area of Inner Mongolia, China: Key technologies and carbon reduction paths [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023,40(3):570-582.
- [3] 冯薇,赵荣钦,谢志祥,等.碳中和目标下土地利用碳排放效率及其时空格局:以黄河流域 72 个地级市为例[J].中国土地科学,2023,37(1):102-113.  
Feng Wei, Zhao Rongqin, Xie Zhixiang, et al. Land use carbon emission efficiency and its spatial-temporal pattern under carbon neutral target: A case study of 72 cities in the Yellow River basin [J]. China Land Science,

- 2023,37(1):102-113.
- [4] 韩方红,高凡,何兵,等.1990—2020年阿克苏河流域土地利用碳排放时空轨迹与影响因素[J].环境科学,2024,45(6):3297-3307.  
Han Fanghong, Gao Fan, He Bing, et al. Exploring the spatial and temporal trajectories of land use carbon emissions and influencing factors in the Aksu River Basin from 1990 to 2020 [J]. Environmental Science, 2024,45(6):3297-3307.
- [5] 游和远,张津榕,夏舒怡.面向碳排放效率的多目标土地利用结构与布局优化研究:以杭州市萧山区为例[J].中国土地科学,2023,37(6):74-83.  
You Heyuan, Zhang Jinrong, Xia Shuyi. Structure and layout optimization of multi-objective land use based on carbon emission efficiency: A case study of Xiaoshan District in Hangzhou City [J]. China Land Science, 2023,37(6):74-83.
- [6] 赵荣钦,陈志刚,黄贤金,等.南京大学土地利用碳排放研究进展[J].地理科学,2012,32(12):1473-1480.  
Zhao Rongqin, Chen Zhigang, Huang Xianjin, et al. Research progresses of land use carbon emission in Nanjing University [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012,32(12):1473-1480.
- [7] 张帅帅,崔耀平,傅声雷,等.中国森林面积变化及其温室气体储量模拟研究[J].生态学报,2020,40(4):1140-1149.  
Zhang Shuaishuai, Cui Yaoping, Fu Shenglei, et al. Modeling greenhouse gas sequestration potential of forest change in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(4):1140-1149.
- [8] 郑博福,梁涵,万炜,等.江西省县域农业碳排放时空格局及影响因素分析[J].农业工程学报,2022,38(23):70-80.  
Zheng Bofu, Liang Han, Wan Wei, et al. Spatial-temporal pattern and influencing factors of agricultural carbon emissions at the county level in Jiangxi Province of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(23):70-80.
- [9] 苏越,朱峻琿,朱从谋,等.浙北平原地区耕地非粮化时空演变特征及碳排放效应分析[J].农业工程学报,2023,39(24):278-286.  
Su Yue, Zhu Junhui, Zhu Congmou, et al. Spatiotemporal evolution and carbon emission on non-grain production of cultivated land in the Northern Plains of Zhejiang Province, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(24):278-286.
- [10] 韩骥,周翔,象伟宁.土地利用碳排放效应及其低碳管理研究进展[J].生态学报,2016,36(4):1152-1161.  
Han Ji, Zhou Xiang, Xiang Weining. Progress in research on land use effects on carbon emissions and low carbon management [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(4):1152-1161.
- [11] 刘艳秋,秦凯,Jason C B,等.基于涡动及走航观测的晋东南煤矿区甲烷分布特征[J].煤炭学报,2022,47(12):4395-4402.  
Liu Yanqiu, Qin Kai, Jason C, et al. Analysis of the characteristics of methane in the coal mining area of southeastern Shanxi with eddy and mobile observation [J]. Journal of China Coal Society, 2022,47(12):4395-4402.
- [12] 王俊博,李鑫,田继军,等.煤炭开发利用产业碳足迹计算方法及减排措施综述[J].煤炭学报,2023,48(S1):263-274.  
Wang Junbo, Li Xin, Tian Jijun, et al. Summary of carbon footprint calculation method and emission reduction measures of coal development and utilization industry [J]. Journal of China Coal Society, 2023,48(S1):263-274.
- [13] 武爱彬,赵艳霞,郭小平,等.碳中和目标下河北省土地利用碳排放格局演变与多情景模拟[J].农业工程学报,2023,39(14):261-270.  
Wu Aibin, Zhao Yanxia, Guo Xiaoping, et al. Evolution and multi scenario simulation of land use carbon emission pattern in Hebei Province under carbon neutral target [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(14):261-270.
- [14] 杨庆媛.土地利用变化与碳循环[J].中国土地科学,2010,24(10):7-12.  
Yang Qingyuan. Land use changes and the carbon cycling [J]. China Land Science, 2010,24(10):7-12.
- [15] 李在军,尹上岗,姜友雪,等.长三角经济增长与碳排放异速关系及形成机制[J].自然资源学报,2022,37(6):1507-1523.  
Li Zaijun, Yin Shanggang, Jiang Youxue, et al. Analysis of allometric relationship and formation mechanism between economic growth and carbon emissions in the Yangtze River delta [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(6):1507-1523.
- [16] Sang Lingling, Zhang Chao, Yang Jianyu, et al. Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011,54(3/4):938-943.
- [17] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model [J]. Environmental Management, 2002,30(3):391-405.
- [18] Liang Xun, Guan Qingfeng, 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.
- [19] Yang Jianxin, Gong Jian, Tang Wenwu, et al. Patch-based cellular automata model of urban growth simulation: Integrating feedback between quantitative composition and spatial configuration [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2020,79:101402.
- [20] Luo Yuchuan, Zhang Zhao, Chen Yi, et al. ChinaCrop-Phen1km: A high-resolution crop phenological dataset for three staple crops in China during 2000—2015 based on leaf area index (LAI) products [J]. *Earth System Science Data*, 2020,12(1):197-214.
- [21] Chen Yi, Zhang Zhao, Tao Fulu. Improving regional winter wheat yield estimation through assimilation of phenology and leaf area index from remote sensing data [J]. *European Journal of Agronomy*, 2018,101:163-173.
- [22] 樊杰,陶岸君,吕晨.中国经济与人口重心的耦合态势及其对区域发展的影响[J].*地理科学进展*,2010,29(1):87-95.  
Fan Jie, Tao Anjun, Lv Chen. The coupling mechanism of the centroids of economic gravity and population gravity and its effect on the regional gap in China [J]. *Progress in Geography*, 2010,29(1):87-95.
- [23] 于卓卉,毛世平.中国农业净碳排放与经济增长的脱钩分析[J].*中国人口·资源与环境*,2022,32(11):30-42.  
Yu Zhuohui, Mao Shiping. Analysis of the decoupling of China's agricultural net carbon emissions from its economic growth [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022,32(11):30-42.
- [24] Bashmakov I, Bogner J. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change technical summary [J]. *World Meteorological Organization*, 2007,52:1-43.
- [25] 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[J].*经济地理*,2019,39(2):190-198.  
Yuan Shaofeng, Tang Yiyu. Spatial differentiation of land use carbon emission in the Yangtze River economic belt based on low carbon perspective [J]. *Economic Geography*, 2019,39(2):190-198.
- [26] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002,91(1/2/3):217-232.
- [27] 李波,张俊飏,李海鹏.中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J].*中国人口·资源与环境*,2011,21(8):80-86.
- Li Bo, Zhang Junbiao, Li Haipeng. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011,21(8):80-86.
- [28] IPCC C. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [J]. *Computational Geometry*, 2007,18(2):95~123.
- [29] 伍芬琳,李琳,张海林,等.保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J].*生态学杂志*,2007,26(12):2035-2039.  
Wu Fenlin, Li Lin, Zhang Hailin, et al. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12):2035-2039.
- [30] 耿亮,彭灵通,魏玻,等.城镇化对长江经济带农业碳排放的影响及其耦合关系研究[J].*生态经济*,2024,40(3):128-138.  
Geng Liang, Peng Lingtong, Wei Bo, et al. Impact of urbanization on agricultural carbon emission and its coupling relationship in the Yangtze River economic belt [J]. *Ecological Economy*, 2024,40(03):128-138.
- [31] 崔盼盼,张艳平,张丽君,等.中国省域隐含碳排放及其驱动机理时空演变分析[J].*自然资源学报*,2018,33(5):879-892.  
Cui Panpan, Zhang Yanping, Zhang Lijun, et al. Analysis on the spatial and temporal evolution of indirect carbon emissions and its driving mechanism in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018,33(5):879-892.
- [32] Guo Zhangdong, Zhang Xiaoning. Carbon reduction effect of agricultural green production technology: A new evidence from China [J]. *Science of the Total Environment*, 2023,874:162483.
- [33] Zheng Jiali, Mi Zhifu, Coffman D, et al. The slowdown in China's carbon emissions growth in the new phase of economic development [J]. *One Earth*, 2019,1(2):240-253.
- [34] Yu Qianyu, Li Meng, Li Qiao, et al. Economic agglomeration and emissions reduction: Does high agglomeration in China's urban clusters lead to higher carbon intensity [J]. *Urban Climate*, 2022, 43: 101174.