云南省土地利用碳排放时空演变特征及影响因素

李志英，朱晓珊，杨 丽，王晓云，田 涵
（云南大学 建筑与规划学院，云南 昆明 650091）

摘　要：［目的］研究云南省土地利用碳排放的时空变化规律及其影响因素，为云南省优化土地利用结构，实现低碳发展目标提供理论依据。［方法］基于云南省 2005，2010，2015，2020 年 4 期土地利用和化石能源消费数据，对全省碳排放效应进行测算，运用空间可视化和空间自相关研究云南省 2005—2020 年的碳排放时空变化规律和空间集聚特征，利用地理探测器对其影响因素进行分析。［结果］①2005—2020 年云南省建设用地增幅最大，动态变化度达 7.90%。②区域净碳排放快速增加，年增长 6.5%；碳排放空间特征为“中间高、四周低”；碳足迹在研究期内增长明显，碳生态承载力较为稳定，导致碳生态赤字日益升高。③人口规模、经济水平、产业结构、土地利用等促进了云南省各地州市碳排放的增加。［结论］应保护或合理增加云南省林地等碳汇地类的面积并加强其动态监测；控制建设用地面积和能源消费总量；探索碳补偿机制并发挥碳汇地区的辐射效应。

关键词：碳排放；时空特征；土地利用；云南省

文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2023)05-0297-07　　**中图分类号：**F301.2，X32

文献参数：李志英，朱晓珊，杨丽，等.云南省土地利用碳排放时空演变特征及影响因素[J].水土保持通报，2023，43(5)：297-303.DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.035；Li Zhiying，Zhu Xiaoshan，Yang Li，et al. Spatial-temporal evolution characteristics and influencing factors of carbon emissions in Yunnan Province based on land use changes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2023，43(5)：297-303.

Spatial-temporal Evolution Characteristics and Influencing Factors of Carbon Emissions in Yunnan Province Based on Land Use Changes

Li Zhiying，Zhu Xiaoshan，Yang Li，Wang Xiaoyun，Tian Han
（*School of Architecture and Urban Planning*，*Yunnan University*，*Kunming*，*Yunnan* 650091，*China*）

Abstract：［Objective］The temporal and spatial variation of carbon emissions due to land use changes and the factors influencing carbon emissions in Yunnan Province were analyzed in order to provide a theoretical basis for optimizing land use structure and achieving the low-carbon development goal in Yunnan Province. ［Methods］Carbon emissions for Yunnan Province were calculated based on land use and fossil energy consumption data in Yunnan Province in 2005，2010，2015，and 2020. Spatial visualization and spatial autocorrelation were used to study the temporal and spatial variation and spatial agglomeration characteristics of carbon emissions from 2005 to 2020. The influencing factors were analyzed by geographical detectors. ［Results］① From 2005 to 2020，the area of construction land in Yunnan Province increased the most，with a dynamic change of 7.90%. ② Regional net carbon emissions increased rapidly，with an annual increase of 6.5%. The spatial pattern of carbon emissions was characterized as “higher in the central region and lower in the surrounding area”. The carbon footprint increased significantly during the study period，and the carbon ecological carrying capacity was relatively stable，resulting in an increasing carbon ecological deficit. ③ Population size，economic level，industrial structure，land use，etc. promoted the increase in carbon emissions for cities and counties in Yunnan Province. ［Conclusion］In Yunnan Province，measures should be taken in the future to protect or reasonably increase the area of carbon sinks（such as forest land）and to strengthen dynamic

收稿日期：2023-01-13　　**修回日期：**2023-03-31
资助项目：国家自然科学基金项目“滇中高原湖区国土空间生态安全格局及规划协同机制研究”（52368008）；云南省哲学社会科学规划项目“高原淡水湖区景观生态安全及国土空间协同治理实现路径研究”（YB2022044）；云南大学第十四届研究生科研创新项目（KC-22223156）
第一作者：李志英（1975—），女（汉族），贵州省都匀市人，博士，教授，主要从事城市生态安全格局及评价研究。Email：kmlizhiying@126.com。

monitoring, control the area of construction land and total energy consumption, explore the carbon compensation mechanism, and employ the radiation effect of carbon sink areas.

Keywords: carbon emissions; spatial-temporal evolution characteristics; land use; Yunnan Province

工业革命以来,温室气体排放产生极端天气问题,自然灾害风险增高,对区域生态系统造成不良影响,甚至直接威胁人类生存[1]。相关研究表明,土地利用碳排放数量占人类活动碳排放总量的三分之一,成为区域碳排放的重要碳源[2]。气候变化形势严峻,低碳发展成为全球共同追求的目标。2015 年,《巴黎协定》为全球应对气候变化行动做出统一安排[3-4]。2018 年,IPCC 发布报告强调了土地在气候系统中起着重要作用。2021 年,中国提出"碳达峰、碳中和"目标,明确了碳减排任务。

区域碳收支核算,努力实现低碳发展是极端天气频发背景下学界研究的重要内容。全国尺度上,葛全胜等[5]探讨了中国 300 a 间土地利用对碳循环产生的影响;赖力[6]在构建碳排放清单的同时考虑了陆地生态系统碳排放(碳吸收)和人为源碳排放;Su Meirong 等[7]测算了 28 个欧洲国家 20 a 间的温室气体碳排放量;Sohl T.L.等[8]为缓解美国温室气体排放构建了土地利用变化模拟框架。区域尺度上,张秀梅等[9]、严志翰等[10]、魏艳茹等[11]、舒心等[12]、夏四友等[13]分别对江苏省、浙江省、福建省、长三角城市群、京津冀城市群等的碳排放和碳补偿分区进行了研究;Marchi M.等[14]以意大利 Siena 省为例,提出碳循环模拟预测;Liu Jinxun 等[15]测算了加利福尼亚以森林为代表的生态系统所产生的碳变化。城市尺度上,蓝家程等[16]研究了重庆市的碳排放效应;国外学者则以韩国 Jo H.K.等[17]为例分析了城市绿地生态系统的碳汇作用。总的来说,土地利用碳排放的定量估算、低碳优化方法是碳排放研究的重要内容,为区域可持续发展提供理论依据,但现有土地利用低碳优化多从规模结构视角出发,对土地利用空间布局关注不够[18],同时国内研究区域多为中部和东部经济发达省份,西南部的研究集中于川渝地区,对生态脆弱且为低碳试点省份的云南省土地利用碳排放研究相对较少。

土地利用变化对碳排放具有显著影响已成学界共识,但各地区社会经济发展情况的不同导致区域碳排放效应存在差异,碳减排政策的制定需因地制宜。2010 年云南省被确定为全国低碳省份试点,随着城市发展,人类活动与环境保护之间的矛盾受到广泛关注。已有研究多集中于探讨云南省碳排放影响机制[19]及各影响因素与经济增长的脱钩关系[20],尚未进一步分析区域内各城市碳排放的时间变化和空间差异性特征。鉴于此,本研究试图探索 2005—2020 年云南省土地利用导致的碳排放效应变化,以期为各城市在碳减排任务中的定位和低碳目标下的国土空间规划开发及区域发展提供依据。

1 研究区概况

云南省地处中国西南部,位于 21°08′—29°15′N,97°03′—106°11′E 之间,南北长 960 km,面积为 3.94 km^2,占中国总面积的 4.1%。地势北高南低,北邻四川,东接贵州、广西,西邻缅甸,南与老挝、越南毗邻,地理位置较为特殊,属于高原山地气候,光照强度大,昼夜温差明显,动植物等自然资源丰富。研究期内,云南省经历了"十五"到"十三五"的发展,土地利用结构发生较大变化,区域内能源消耗以原煤、焦炭和石油制品为主,2020 年全省能源消费总量达 1.30×10^8 t(《云南省统计年鉴 2021》),对建设用地碳排放量产生重要影响。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究所采用的土地利用数据,下载于中国科学院资源环境科学数据中心网站,精度为 30 m,参考中国科学院土地利用现状一级分类,将研究区的土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。云南省社会经济数据及能源数据来源于 2006—2021 年的《云南省统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国城市统计年鉴》以及云南省各地州市统计年鉴等。

2.2 研究方法

2.2.1 *土地利用动态度分析* 土地利用动态度(K)常用于反映研究期内各土地利用类型的变化情况,其计算公式为:

$$K=\frac{S_b-S_a}{S_a}\cdot\frac{1}{T}\cdot100\% \tag{1}$$

式中:K 为土地利用变化动态度(%);T 为研究时间间隔(a);S_a 为某地类在研究初期的面积(hm^2);S_b 为某地类在研究末期的面积(hm^2)。

2.2.2 *碳排放量估算* 国内外普遍采用 IPCC 清单法来研究土地利用碳排放。土地利用碳排放包括直接碳排放和间接碳排放,前者指土地直接参与生产而导致的碳排放,如耕地、林地、草地、水域、未利用地的碳排放;后者指人类活动作用于土地而引起的碳排放,建设用地承载着人们的生产生活,属于间接碳排放。

(1) 直接碳排放。本研究依据 IPCC 清单的直接估算法,采用碳排放系数来计算各土地利用类型的直接碳排放,各地类碳排放(吸收)系数参考已有研究(表 1),测算公式为:

$$C = S_I \cdot E_I \tag{2}$$

式中:C 为碳排放量(t);S_I 为各个地类面积(hm^2);E_I 为各地类的碳排放(吸收)系数(hm^2/a)。

(2) 间接碳排放。建设用地产生的间接碳排放,参考 IPCC 能源碳排放系数法,其公式如下:

$$C_e = \sum_{i=1}^{N} B_i \cdot D_i \cdot E_i \tag{3}$$

式中:C_e 为建设用地碳排放量(t);B_i 为某化石能源的消耗量(t);D_i 为化石能源折煤系数(kg/kg,以标准煤计);E_i 为化石能源的碳排放系数(t/t,以 C 计),折标准煤系数、碳排放系数参考《中国能源统计年鉴》和 IPCC 公布的数据(表 2)。

表 1　各类土地利用类型的碳排放系数和主要生物生产性土地碳吸收系数

Table 1　Carbon emission coefficient of various land use types and carbon absorption coefficient of main bio-productive land

用地类型	碳排放系数/($hm^{-2} \cdot a^{-1}$)	主要生物生产性土地碳吸收系数				
		净生态系统生产量 NEP/(t/hm^2)	消纳 1 t 碳用地面积/hm^2	平均碳吸收量 10^5 t/hm^2	碳吸收比例/%	吸收 1 t CO_2 用地面积/hm^2
耕 地	0.461[6,16]	—	—	—	—	—
林 地	−0.581[21-22]	3.81	0.26	101	96.63	0.07
草 地	−0.021[21-22]	0.95	1.05	3.54	3.37	0.01
水 域	−0.253[6,16]	—	—	—	—	—
未利用地	−0.005[6]	—	—	—	—	—

表 2　各类能源标准煤换算系数及碳排放系数

Table 2　Conversion coefficient and carbon emission coefficient of various energy standard coals

能源类型	折标准煤系数/($kg \cdot kg^{-1}$)(以标准煤计)	碳排放系数/($t \cdot t^{-1}$)(以 C 计)
焦 炭	0.971 4	0.85 5
洗精煤	0.900 0	0.755 9
其他洗煤	0.285 7	0.755 9
原 煤	0.714 3	0.755 9
汽 油	1.471 4	0.553 8
煤 油	1.471 4	0.571 4
柴 油	1.457 1	0.592 1
燃料油	1.428 6	0.618 5

2.2.3　碳排放效应评估　本研究主要从碳足迹、碳生态承载力和碳赤字 3 个方面进行碳排放效应评估[23]。

(1) 碳足迹。多数学者将碳足迹定义为吸收人类活动产生的二氧化碳所需要的生物生产性面积[24]。林地、草地、水域、未利用地都具有碳吸收功能,但水域和未利用地的作用较小,可忽略不计。计算公式为:

$$C_z = (\sum a_j \cdot b_j \cdot c_j)\left(\frac{P_f}{EP_f} + \frac{P_g}{EP_g}\right) \tag{4}$$

式中:C_Z 为碳足迹(hm^2);a_j 为化石能源消费量(t);b_j 为标准煤换算系数(kg/kg,以标准煤计);c_j 为碳排放系数(t/t,以 C 计);P_f 和 P_g 分别表示云南省森林和草地生态系统的碳吸收比例,EP_f 和 EP_g 则表示全球森林和草地生态系统的碳吸收能力(表 1),主要生物生产性土地碳吸收系数参考已有研究[23]。

(2) 碳生态承载力。生态承载力常常被看作是对种群承载力、资源承载力与环境承载力的集成表达[25],碳生态承载力是指研究区内现有的能吸收人类活动排放的二氧化碳所需的生物生产性土地面积。计算公式为:

$$C_S = C_a \cdot \left(\frac{P_f}{EP_f} + \frac{P_g}{EP_g}\right) \tag{5}$$

式中:C_S 为碳生态承载力(hm^2);C_a 为不同土地利用方式的碳吸收量(t)。

(3) 碳赤字。碳赤字指碳足迹和碳生态承载力的差值,当碳足迹大于碳生态承载力时,即出现碳生态赤字。计算公式为:

$$E_c = C_z - C_s \quad (C_z > C_s) \tag{6}$$

2.2.4　空间自相关　全局空间自相关可用于衡量云南省不同地州市之间碳排放的空间关联性,常用 Moran's I(莫兰)指数表示,取值 −1 到 1。若 Moran's I 为正,则各地区在空间上明显集聚,Moran's I 为负,则具有明显分散现象。局部空间自相关常用于解释相邻地区的空间关联程度[26]。

2.2.5　地理探测器　现主要使用因子探测和交互探测功能来分析云南省碳排放的影响因素,其公式表达为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{L} N_i \partial_i^2}{N_i \partial_i^2} \tag{7}$$

式中:N 为样本数;L 为因素 A 的分类;σ_i^2 为指标方

差[27]。q 值越大，说明该因子作用于云南省碳排放的效果越明显。

探讨各因素对云南省碳排放量的影响可借助地理探测器中的因子探测功能。随着经济发展，人口规模的扩大会增加碳排放；不同产业对化石能源的需求量有所不同，如工业消耗大量能源使得建设用地上的碳排放显著增加；不同地类中碳排放的排放量和吸收量存在明显差异；经济增长与碳排放之间也存在密切关系[28]。因此本研究中，主要从人口规模、产业结构、土地利用、经济水平这四个角度进行考虑，具体指标分别为年末总人口（万人）、第二产业产值比例（%）、建设用地面积（hm^2）、GDP（亿元）。地理探测器处理的自变量应为类型量，分析前在 ArcGIS 中基于自然断点法对数据进行了离散化处理。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

云南省林地分布面积最大，超过全省总面积的 50%，耕地、草地次之，建设用地比例相对较小（表 3）。因高原山地地貌，地形相对闭塞，土地难以开发利用，限制了城镇、交通等的建设与发展。

2005—2020 年，云南省建设用地、林地和水域面积明显增加，建设用地增幅最大，动态度变化达到 7.90%，其他地类普遍减少。主要原因是云南省的城市化进程逐步加快，城市住宅用地面积增多，区域间经济联系频繁，人类活动对环境的改造能力增强，同时交通条件不断完善，腾冲、泸水、晋宁、江川等行政区划调整均推动着建设用地面积不断扩张。

表 3 2005—2020 年云南省土地利用变化

Table 3 Land use change in Yunnan Province from 2005 to 2020

用地类型	面积/10^4 hm^2				土地利用动态度/%			
	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2020 年	2005—2020 年
耕 地	686.953 9	685.875 5	683.262 3	674.998 4	−0.03	−0.08	−0.24	−0.12
林 地	2 186.283 3	2 203.329 0	2 200.631 7	2 196.140 7	0.16	−0.02	−0.04	0.03
草 地	887.130 8	866.870 8	865.453 6	858.919 3	−0.46	−0.03	−0.15	−0.21
水 域	28.074 3	28.785 7	31.791 1	38.187 0	0.51	2.09	4.02	2.40
建设用地	21.744 3	30.903 7	34.190 7	47.511 3	8.42	2.13	7.79	7.90
未利用地	21.218 8	15.660 2	15.645 4	15.519 8	−5.24	−0.02	−0.16	−1.79

云南省土地利用变化呈现出“一转多”的整体特征（表 4）。建设用地的流出总量最少，林地则成为草地和耕地的主要接受者，原因在于保障科学发展的建设用地以及国家退耕还林等政策的实施。建设用地扩张占用大量的耕地和草地，林地和草地之间交换面积较大。

表 4 2005—2020 年云南省土地利用变化转移矩阵

Table 4 Transfer matrix of land use change in Yunnan Province from 2005 to 2020 km^2

土地利用类型		2020 年面积					
		草 地	耕 地	建设用地	林 地	水 域	未利用土地
2005 年面积	草 地	75 397.65	3 139.11	698.79	10 282.81	670.53	47.56
	耕 地	2 459.73	54 280.23	1 479.37	5 837.68	403.11	14.97
	建设用地	140.73	109.51	1 557.78	66.42	99.80	40.29
	林 地	8 931.84	5 553.25	472.55	205 819.28	624.77	16.54
	水 域	251.23	117.17	153.56	124.68	2 286.93	23.81
	未利用土地	548.58	21.46	38.86	34.10	40.36	1 312.52

3.2 碳排放时空变化特征分析

3.2.1 碳排放时间变化 2005—2020 年云南省净碳排放量不断增加，从 2005 年的 1.72×10^7 t 增加到 2020 年的 3.40×10^7 t，净碳排放量总体增长率达 97.91%，年均增长率 6.53%（表 5）。2013 年中国提出丝绸之路经济带建设，云南省作为丝绸之路上的重要节点，拥有新的发展机遇和政策扶持力度，西部大开发战略的提出，使得云南省经济和社会不断发展，所以 2005—2020 净碳排放增加。

碳足迹持续增加，年平均增加 3.08×10^5 hm^2，与建设用地碳排放的增长趋势吻合（表 5）；碳生态承载力趋于稳定，在 3.55×10^6 hm^2 上下浮动，与林地为主的碳汇变化保持一致；碳生态赤字呈指数上升，从 2005 年的 3.84×10^6 hm^2 增至 2020 年的 8.45×10^6 hm^2，说明云南省碳吸收与碳排放无法收支相抵，碳减排压力逐年加大。

表 5　2005—2020 云南省土地利用碳排放

Table 5　Carbon emissions from land use in Yunnan Province from 2005 to 2020

年份	土地利用碳排放/10^4 t							碳排放效应/10^4 hm^2		
	耕 地	林 地	草 地	水 域	建设用地	未利用地	净碳排放	碳足迹	碳生态承载力	碳生态赤字
2005	316.69	−1 270.23	−18.63	−7.10	2 697.71	−0.106 1	1 718.33	738.87	354.98	383.89
2010	316.19	−1 280.13	−18.20	−7.28	3 492.99	−0.078 3	2 503.48	955.49	357.17	598.33
2015	314.98	−1 278.57	−18.17	−8.04	3 622.87	−0.078 2	2 632.99	991.01	356.93	634.07
2020	311.17	−1 275.96	−18.04	−9.66	4 393.39	−0.077 6	3 400.83	1201.51	356.55	844.96

3.2.2　碳排放空间变化与空间集聚特征　2005—2020 年云南省土地利用碳排放区域差异明显,具有“中间高、四周低”特征(图 1)。就具体地区而言,碳排放主要分布在以滇中城市群为代表的经济相对发达地区,昆明最为显著,昆明市和曲靖市 2020 年碳排放总量均在 $4.00\times10^6\sim9.50\times10^6$ t,此区域位于滇中城市群核心,城市化水平高,互相之间经济、交通等往来较为密切,使得碳排放较为集中,昆明最高,达到 9.00×10^6 t以上。大理、玉溪、红河等地的碳排放总量稳定在 $2.30\times10^6\sim4.00\times10^6$ t,且呈逐年上升趋势。中部平坝地区近年来经济发展迅速,对建设用地的需求旺盛,碳排放能力日渐增强。因此成为云南省主要的碳源区。碳汇主要分布于云南省西北部和西南部高原山地地区,且集中于迪庆、怒江和普洱部分地区,该区域地广人稀,人类活动产生的碳排放量相对较少,同时其森林覆被率较高,有较强的碳吸收能力,因而碳排放表现为负值,可以通过发挥对周围城市的辐射效应,促进区域碳排放量的降低。

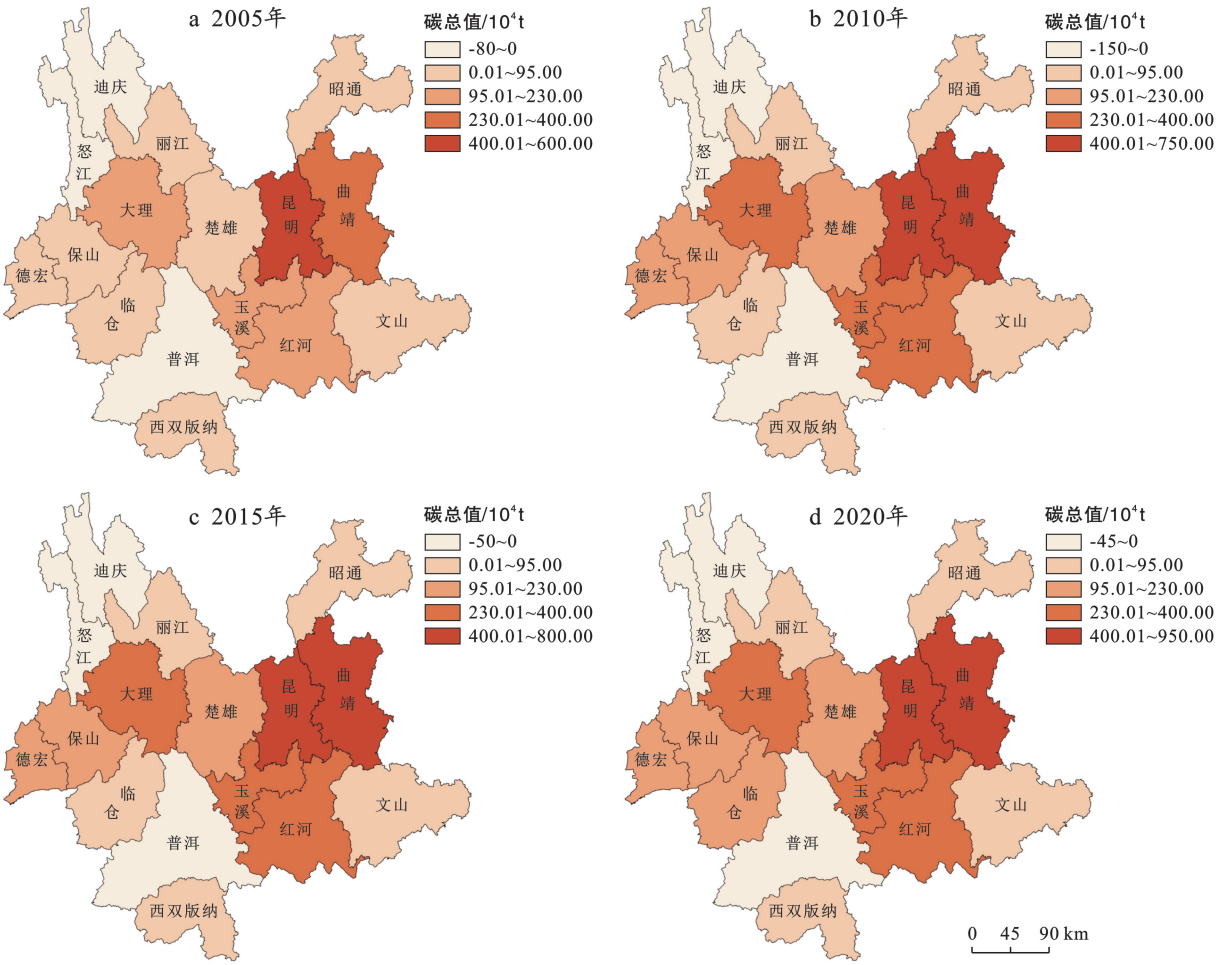

图 1　2005—2020 年云南省土地利用碳排放空间分布特征

Fig.1　Spatial distribution characteristics of carbon emissions of land use in Yunnan Province from 2005 to 2020

2005—2020 年云南省碳排放的莫兰指数保持稳定，且均为正值，但 p 值和 z 值并未通过显著性检验（表 6），可见云南省土地利用碳排放整体的相关性并不显著。

表 6 2005—2020 云南省碳排放 Moran's *I* 指数

Table 6 Moran's *I* index of carbon emissions in Yunnan Province from 2005 to 2020

年份	Moran's *I* 指数	p 值	z 值
2005	0.172	0.082	1.466
2010	0.147	0.107	1.316
2015	0.125	0.123	1.233
2020	0.140	0.116	1.297

2005—2020 年云南省各地州市土地利用碳排放的空间分布具有不显著特征，且在研究期内变化较小（图 2）。2000 年，高—高值区 2 个，分别为昆明市与红河哈尼族彝族自治州；低—低集聚区 1 个，分布在西双版纳自治州；低—高集聚区 1 个，为昭通市；高—低集聚区 1 个，为大理自治州。2020 年西双版纳变为不显著区，其他类型与 2020 年的空间分布相同。

总体来看，高—高集聚区聚集在以昆明为代表的经济较为发达的滇中城市群地区，低—低集聚区分布在生态环境优越的滇南，说明云南省土地利用碳排放在部分地区存在一定集聚性，在研究期内变动幅度呈稳定状态。

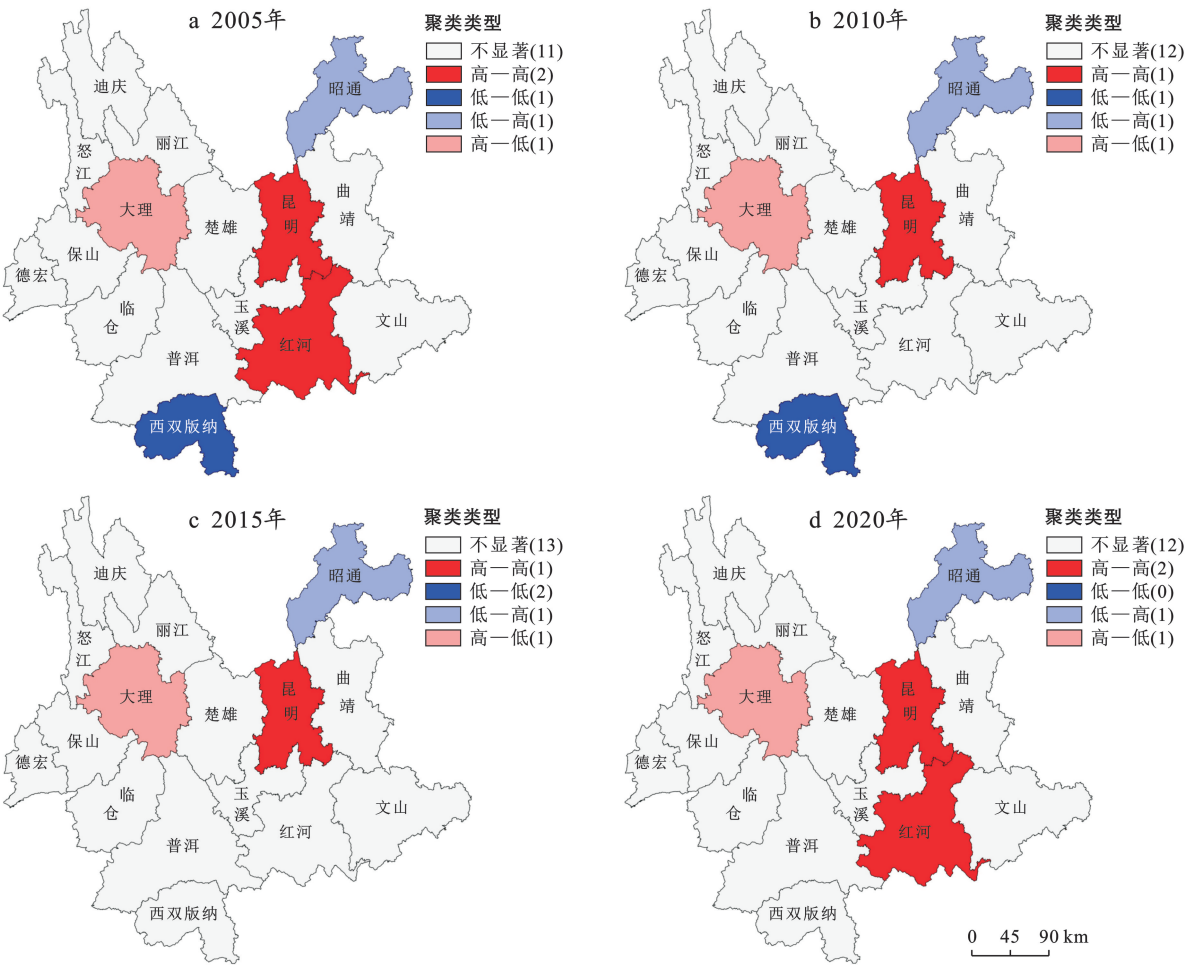

图 2 2005—2020 年云南省碳排放局部莫兰指数空间分布

Fig.2 Partial Moran's indices on spatial carbon emissions in Yunnan Province from 2005 to 2020

3.3 碳排放影响因素分析

从因子探测的结果表明（表 7），经济发展水平对云南省碳排放作用力最为明显，但这一影响因子从 2005 年的 0.750 2 下降到 2020 年的 0.632 3。15 a 内云南省土地利用变化动态度较大，因此土地利用结构的影响力表现为先下降后又急剧上升。人口规模和产业结构对云南省碳排放的影响不如经济发展水平因子和土地利用因子作用强烈。

2005—2020 年，人口规模、经济水平、产业结构和土地利用 4 个影响因子之间交互作用明显（表 8）。2005，2010 年，土地利用与产业结构的交互因子值最大，达到 0.85 以上，但 2015，2020 年土地利用和经济

水平的交互因子驱动值最高,说明土地利用状况对区域碳排放产生重要影响,但并不只是单一因子在影响区域的碳排放量,而是由各因子的交互作用实现。

表 7　2005—2020 年云南省碳排放影响因子探测器结果

Table 7　Results of carbon emission impact factor detector in Yunnan Province from 2005 to 2020

年份	人口规模	经济水平	产业结构	土地利用
2005	0.464 9	0.750 2	0.415 2	0.707 8
2010	0.469 9	0.751 2	0.407 3	0.648 2
2015	0.464 9	0.640 4	0.524 7	0.388 8
2020	0.521 6	0.632 3	0.487 1	0.823 3

表 8　2005—2020 年云南省碳排放影响因子交互探测结果

Table 8　Interaction detection results of factor carbon emission influencing in Yunnan Province from 2005 to 2020

年份	驱动因子	人口规模	经济水平	产业结构	土地利用
2005	人口规模	0.464 9			
	经济水平	0.775 5	0.750 2		
	产业结构	0.723 5	0.781 9	0.415 1	
	土地利用	0.818 0	0.835 2	0.885 5	0.707 8
2010	人口规模	0.469 9			
	经济水平	0.776 4	0.751 2		
	产业结构	0.637 2	0.786 9	0.407 3	
	土地利用	0.706 7	0.783 8	0.859 6	0.648 2
2015	人口规模	0.464 9			
	经济水平	0.754 2	0.640 4		
	产业结构	0.712 1	0.785 4	0.524 7	
	土地利用	0.804 9	0.807 4	0.771 4	0.388 9
2020	人口规模	0.521 6			
	经济水平	0.646 6	0.632 3		
	产业结构	0.648 1	0.737 1	0.487 1	
	土地利用	0.827 3	0.911 7	0.890 3	0.823 3

4　讨论与结论

4.1　讨 论

本研究发现,云南省建设用地扩张侵占了碳汇地类,应该合理增加碳汇地类面积,可鼓励植树造林,发展优质果园等;同时,建议加强对碳汇地类的动态监测,建立监测数据库和信息技术服务平台。

鉴于云南省碳赤字主要集中在滇中平坝地区,但滇西北和滇西南高原山地地区呈现碳盈余。因此,云南省减排政策的制定要以滇中城市群为重点地区,通过实现滇中城市群等碳源地区碳排放和迪庆、怒江、普洱等碳汇地区的碳吸收均衡,实现区域间的生态补偿和可持续发展。在区域内探索碳交易机制,需明确植树造林成本、退耕还林损失,确定固碳价格,估算碳排放的补偿标准。

由于数据的有限性,本研究仅考虑化石能源消费和耕地生产对碳排放的影响,未来需将城市人口呼吸、产业和居民,以及农业药剂、化肥使用、秸秆燃烧可能会转化的碳排放纳入研究。此外,云南省碳排放系数的确定还有待进一步研究和深化。

4.2　结 论

2005—2020 年,云南省建设用地面积增加,但以林地为主的碳汇地类面积减少,这导致区域净碳排放快速增加。从空间分布看,云南省土地利用碳排放具有“中间高四周低”的显著特征。人口规模、经济水平、产业结构、土地利用等促进了云南省各地州市碳排放的增加。

[参 考 文 献]

[1] 王少剑,高爽,黄永源,等.基于超效率 SBM 模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测[J].地理学报,2020,75(6):1316-1330.

[2] Watson R T. Land Use, Land-use Change, and Forestry: A Special Report of the IPCC [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

[3] 吕江.应对气候变化与生物多样性保护的国际规则协同:演进、挑战与中国选择[J].北京理工大学学报(社会科学版),2022,24(2):50-60.

[4] 付琳,周泽宇,杨秀.适应气候变化政策机制的国际经验与启示[J].气候变化研究进展,2020,16(5):641-651.

[5] 葛全胜,戴君虎,何凡能,等.过去 300 年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究[J].中国科学(D 辑:地球科学),2008,38(2):197-210.

[6] 赖力.中国土地利用的碳排放效应研究[D].江苏 南京:南京大学,2010.

[7] Su Meirong, Pauleit S, Yin Xuemei, et al. Greenhouse gas emission accounting for EU member states from 1991 to 2012 [J]. Applied Energy, 2016,184:759-768.

[8] Sohl T L, Sleeter B M, Zhu Zhiliang, et al. A land-use and land-cover modeling strategy to support a national assessment of carbon stocks and fluxes [J]. Applied Geography, 2012,34:111-124.

[9] 张秀梅,李升峰,黄贤金,等.江苏省 1996 年至 2007 年碳排放效应及时空格局分析[J].资源科学,2010,32(4):768-775.

[10] 严志翰,任丽燕,刘永强,等.浙江省碳排放时空格局及影响因素研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(9):1427-1435.

[11] 魏燕茹,陈松林.福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区[J].生态学报,2021,41(14):5814-5824.

[12] 舒心,夏楚瑜,李艳,等.长三角城市群碳排放与城市用地增长及形态的关系[J].生态学报,2018,38(17):6302-6313.

[13] 夏四友,杨宇.基于主体功能区的京津冀城市群碳收支

时空分异与碳补偿分区[J].地理学报,2022,77(3):679-696.

[14] Marchi M, Jørgensen S E, Pulselli F M, et al. Modelling the carbon cycle of Siena Province (Tuscany, Central Italy) [J]. Ecological Modelling, 2012,225:40-60.

[15] Liu Jinxun, Vogelmann J E, Zhu Zhiliang, et al. Estimating California ecosystem carbon change using process model and land cover disturbance data: 1951—2000 [J]. Ecological Modelling, 2011,222(14):2333-2341.

[16] 蓝家程,傅瓦利,袁波,等.重庆市不同土地利用碳排放及碳足迹分析[J].水土保持学报,2012,26(1):146-150.

[17] Jo H K. Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for Middle Korea [J]. Journal of Environmental Management, 2002,64(2):115-126.

[18] 易丹,欧名豪,郭杰,等.土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望[J].资源科学,2022,44(8):1545-1559.

[19] 李经路,曾天.基于Kaya方法的云南碳排放因素分析[J].科技管理研究,2016,36(19):260-266.

[20] 李经路,李晓玲.云南碳排放的变动趋势与影响因素研究[J].环境与可持续发展,2015,40(5):172-176.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 李彦旻,沈育生,王世航.基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应[J].水土保持学报,2022,36(1):182-188.

[24] 彭文甫,周介铭,徐新良,等.基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局[J].生态学报,2016,36(22):7244-7259.

[25] 刘畅,祁毅,姚红,等.新时代背景下生态承载力研究要义与优化对策探讨[J].生态经济,2020,36(6):173-180.

[26] 许锋.基于Moran指数和谱图论的空间自相关测度方法优化[J].城市发展研究,2021,28(12):92-101.

[27] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.

[28] 吾买尔艾力·艾买提卡力,阿巴拜克热·艾买提卡力,范昕,等.2000—2018年环鄱阳湖生态城市群碳排放时空分异规律及影响因素分析[J].生态经济,2021,37(6):51-57.