

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2024.02.012

昆明市土地利用碳排放的脱钩分析及其影响因素研究

杨 忆, 王文楷*

(西昌学院资源与环境学院, 四川 西昌 615000)

摘要:从土地利用方面分析云南昆明市碳排放与经济增长的关系,并探讨其影响因素,为昆明市制定碳减排任务,优化土地资源布局等提供依据。在昆明市 2000—2020 年土地利用遥感数据的基础上,使用碳排放系数法对昆明市碳排放的特征与强度进行分析,并使用 Tapio 脱钩模型与 LMDI 分解模型分析土地利用碳排放与经济增长的关系及其影响因素。结果表明:(1)2000—2020 年,昆明市土地利用碳排在空间上北部低而南部高,在时间上呈倒 U 型的趋势,即先上升后下降,于 2010 年达到最大,净碳排放量达 1 232.07 万 t。(2)昆明市近 20 年脱钩指数呈下降趋势,经历了从扩张性连结到弱脱钩再到强脱钩 3 个阶段,脱钩状况表现较好;经济发展水平、建设用地规模和能源碳排放强度对土地利用碳排放起促进作用,在促进因素中经济发展水平的推动作用最明显;对土地利用碳排放起抑制作用的因素有能源消费强度和土地利用效率。昆明市发展态势较好,碳减排工作显著,但能源结构还有待进一步的改善。

关键词:土地利用;碳排放;脱钩分析;LMDI 模型;昆明市

中图分类号:F301.2;X321 文献标志码:A 文章编号:1673-1891(2024)02-0083-10

Decoupling Analysis of Land Use Carbon Emission and Its Influencing Factors in Kunming City

YANG Yi, WANG Wenkai*

(College of Resources and Environment, Xichang University, Xichang 615000, Sichuan, China)

Abstract:This paper analyzes the relationship between carbon emission and economic growth in Kunming City of Yunnan from the perspective of land use and explores its influencing factors, so as to provide a reference for formulating carbon emission reduction tasks and optimizing land resource layout in Kunming City. Based on remote sensing data of land use in Kunming from 2000 to 2020, the characteristics and intensity of carbon emissions in Kunming were analyzed by carbon emission coefficient method and other methods, and the relationship between carbon emissions of land use and economic growth and its influencing factors were analyzed by Tapio decoupling model and LMDI decomposition model. The results show that: (1) In 2000–2020, the land use carbon emission figure in Kunming City was lower in the north and higher in the south and showed an inverted U-shaped trend (rising first and falling next) in time and reached a peak in 2010 of 12 320 700 tons. (2) The decoupling index of Kunming City has shown a downward trend in the past 20 years, going through three stages from expansionary link to weak decoupling and then to strong decoupling. The decoupling proved to be satisfactory. (3) Economic development level, construction land scale and energy carbon emission intensity played an important role in promoting land use carbon emission in which economic development level imposed the biggest

收稿日期:2023-09-04

基金项目:四川省 2022 年大学生创新创业训练项目(S202210628048)。

作者简介:杨忆(2001—),男,四川泸州人,学士,研究方向:土地利用与碳减排, e-mail: 1023174206@qq.com。

*通信作者:王文楷(1986—),男,四川会理人,讲师,博士,研究方向:土地利用与碳减排, e-mail: xcc20210175@xcc.edu.cn。

effect. Energy consumption intensity and land use efficiency were the factors that inhibited carbon emission in land use. Kunming city witnesses a positive developing momentum. Its carbon emission reduction performance is noticeable, but the energy structure needs to be further improved.

Keywords: land use; carbon emissions; decoupling analysis; LMDI model; Kunming City

0 引言

近年来,全球变暖持续加剧,温室效应愈演愈烈,全球面临气候变化的严峻挑战。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中指出“加快发展方式绿色转型”,这有助于中国提出“力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和”的发展目标的实现。土地利用所产生的碳排放已成为继化石能源燃烧的第二大碳排放源。土地的利用方式、强度的变化会影响到能源消耗结构的走势、区域碳循环的速度,而经济增长会引发土地利用方式发生改变,从而对碳循环产生一定的影响,因此研究土地利用碳排放与经济增长的关系逐渐成为国内外学者关注的热点。

针对土地利用碳排放与经济增长的关系,国内外学者主要从宏观(国家^[1-2])、中观(经济带^[3-4]、省^[5]、城市群^[6])、微观(城市^[7]、县域^[8])等不同尺度展开研究,通过脱钩、碳足迹^[9]、VECM (vector error correction model)^[10]等模型,分析二者之间的关系,并使用 LMDI 分解法、灰色关联模型^[11]等方法探讨其影响因素,给出相应的改善措施。总结前人的研究成果,发现脱钩理论在土地利用碳排放与经济增长的研究中已十分成熟。脱钩理论常用的模型有 2 种,即 OECD 脱钩模型与 Tapio 脱钩模型,相较于 OECD 脱钩模型, Tapio 脱钩模型对研究期长度的选择依赖性小,相应对数据的敏感性低,因此计算结果的准确性更高^[12]。LMDI 分解模型是 Ang 基于扩展的 Kaya 恒等式提出的对数平均迪氏指数分解法,相较于其他分解模型来说,具有技术成熟、形式多样、计算方便、分解无残差等优势;LMDI 分解模型

能消除残差项,满足因素可逆,使实证结果更具说服力^[13]。因此,多数学者将 Tapio 脱钩模型与 LMDI 分解模型应用于土地利用碳排放与经济增长关系的研究中。

虽然国内外相关研究丰富且各具特色,但研究区域大多集中在中、东部发达地区,相对缺乏对西南内陆城市的研究。昆明市处于中国西南,于 2012 年被批准为国家第二批低碳试点城市,不仅是云南省的省会城市、滇中城市群的核心,而且也是云南省经济发展的领跑者。从土地利用方面总结昆明市近年来低碳城市建设成果,将为今后制定碳减排任务、优化土地资源布局等提供科学依据,也将为周边其他城市的碳减排工作提供参考。而在昆明市土地利用碳排放的相关研究中,多数学者只基于土地利用变化数据对碳排放进行分析、预测,未能结合昆明市的经济增长情况进行定量分析。如帕茹克·吾斯曼江等^[14]使用 InVEST 模型分析昆明市碳储量的时空特征;李俊等^[15]根据土地利用动态模拟结果对昆明市碳储量进行评价。因此,本文以昆明市为研究区,基于昆明市 2000—2020 年土地利用碳排放数据,从经济增长的角度运用 Tapio 脱钩模型对昆明市土地利用碳排放进行分析,并结合 LMDI 分解法探究其变化的影响因素,将在一定程度上填补土地利用碳排放相关研究的空白,并为昆明市制定碳减排任务、优化土地资源布局等提供依据。

1 研究区域概况

昆明市位于 102°10'E~103°40'E, 24°23'N~26°22'N,北与四川省、云南昭通市接壤,西与云南楚雄彝族自治州毗邻,东与云南曲靖市相望,南与云南

玉溪市、云南红河哈尼族彝族自治州相连。从整体上看,昆明市北高南低,海拔从东西两侧向中部逐渐升高。截至2020年,昆明市地区生产总值6 733.79亿元,占全省的27.46%;常住人口846.3万人;第一、二、三产业构成比为4.6:31.2:64.1。

2 数据来源

土地利用数据来源于徐新良等^[16]建立的中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC),对其中的2000、2005、2010、2015和2020年共5期全国土地利用数据进行分析。参照CNLUCC数据分类体系中的一级分类,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6类,使用Arc GIS 10.4.1软件进行裁剪等操作得到上述5年的昆明市土地利用现状图。社会经济数据、能源消费数据主要来源于《云南统计年鉴(2000—2021年)》《昆明市统计年鉴(2000—2021年)》及昆明市国民经济和社会发展统计公报。

3 研究方法

3.1 碳排放系数法

使用已有研究成果的方法^[17]对耕地、林地、草地、水域和未利用地进行直接碳排放测算,并通过化石能源消耗量对建设用地进行间接碳排放测算(其中耕地、建设用地为碳源,林地、草地、水域、未利用地为碳汇)。

1)直接碳排放量。直接碳排放量计算公式如式(1)所示:

$$C_n = S_n \times K_n \quad (1)$$

式中: C_n 表示第 n 类土地的直接碳排放量,t; S_n 表示第 n 类土地的面积, hm^2 ; K_n 表示第 n 类土地对应的碳排放系数, $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

参考前人的研究成果^[18-23]并结合研究区域的实际情况,确定不同土地类型的碳排放系数(表1)。

2)间接碳排放量。考虑到数据的可获取性与

表1 不同土地类型碳排放系数

土地类型	碳排放系数/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	参考文献
耕地	0.422	孙赫等 ^[18] ,张中秋等 ^[22]
林地	-0.644	方精云等 ^[19]
草地	-0.210	石洪昕等 ^[20] ,肖红艳等 ^[21]
水域	-0.252	张中秋等 ^[22]
未利用地	-0.050	赖力 ^[23]

模型的可操作性,选用的能源类型如表2所示,其中不同能源的碳排放系数与标准煤换算系数参考IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)清单。间接碳排放量计算公式如式(2)所示:

$$C_{\text{int}} = \sum_{m=1}^{13} F_m \times \alpha_m \times \beta_m \quad (2)$$

式中: C_{int} 为土地利用间接碳排放量,万t; F_m 表示各类能源的消耗量; α_m 为化石能源转化为标准煤的系数; β_m 为各种能源碳排放系数。本文选用的能源共13种(表2),故 $m=1,2,\dots,13$ 。

表2 不同能源的碳排放系数

能源种类	碳排放系数	标准煤换算系数
原煤	0.755 9 kg/kg C	0.714 3 kg C/kg
洗精煤	0.755 9 kg/kg C	0.900 0 kg C/kg
其他洗煤	0.755 9 kg/kg C	0.285 7 kg C/kg
焦炭	0.855 0 kg/kg C	0.971 4 kg C/kg
汽油	0.553 8 kg/kg C	1.471 4 kg C/kg
煤油	0.571 4 kg/kg C	1.471 4 kg C/kg
柴油	0.592 1 kg/kg C	1.457 1 kg C/kg
燃料油	0.618 5 kg/kg C	1.428 6 kg C/kg
其他石油制品	0.585 7 kg/kg C	1.228 0 kg C/m ³
焦炉煤气	0.354 8 kg/kg C	0.571 4 kg C/kg
液化石油气	0.504 2 kg/kg C	1.714 3 kg C/kg
天然气	0.448 3 kg/kg C	1.214 3 kg C/m ³
电力	0.793 5 kg/kWh	0.404 0 kg C·kWh

3)碳排放强度。碳排放强度是指每单位国内生产总值的增长所带来的CO₂排放量,通过测算碳排放强度可以分析经济发展中资源环境所受到的压力^[24]。碳排放强度计算公式如式(3)所示:

$$C = C_{\text{net}}/V_{\text{GDP}} \quad (3)$$

式中: C 表示碳排放强度; C_{net} 表示净碳排放量; V_{GDP} 表示国内生产总值。其中, 净碳排放量=碳源+碳汇。

3.2 Tapio 脱钩模型

Tapio 脱钩模型计算公式如式(4)所示:

$$\varepsilon_t = \frac{(C_t - C_{t-1})}{C_{t-1}} / \frac{(V_{\text{GDP}_t} - V_{\text{GDP}_{t-1}})}{V_{\text{GDP}_{t-1}}} \quad (4)$$

式中: ε_t 为第 t 年的脱钩指数; C_t 为第 t 年土地利用碳排放值; V_{GDP_t} 为第 t 年的实际地区生产总值。

根据 Tapio 等^[25]的研究, 将脱钩状态划分为 8 种类型, 详情如表 3 所示。

表 3 Tapio 脱钩模型的脱钩类型

脱钩类型	$\Delta C/\%$	$\Delta V_{\text{GDP}}/\%$	ε_t
强脱钩	<0	>0	$\varepsilon_t < 0$
脱钩	>0	>0	$0 \leq \varepsilon_t < 0.8$
衰退脱钩	<0	<0	$\varepsilon_t > 1.2$
连结	扩张性连结	>0	$0.8 \leq \varepsilon_t < 1.2$
	衰退性连结	<0	$0.8 \leq \varepsilon_t < 1.2$
弱负脱钩	>0	<0	$\varepsilon_t < 0$
负脱钩	<0	<0	$0 \leq \varepsilon_t < 0.8$
扩张负脱钩	>0	>0	$\varepsilon_t > 1.2$

3.3 LMDI 分解模型

借鉴刘春英等^[26]的研究成果, 将能源碳排放强度、能源消费强度、经济发展水平、土地利用效率和建设用地规模 5 个因素纳入昆明市土地利用碳排放影响因素研究中, 分解模型如式(5)所示:

$$C_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{E_i} \times \frac{E_i}{V_{\text{GDP}_i}} \times \frac{V_{\text{GDP}_i}}{P_i} \times \frac{P_i}{S_i} \times S_i \right) = \sum_{i=1}^n (e_i \times f_i \times g_i \times h_i \times s_i) \quad (5)$$

式中: C_{tot} 表示土地利用净碳排放总量, 万 t; E 表示化石能源消费总量(万 t 标准煤); V_{GDP} 表示地区生产总值, 万元; P 表示常住人口, 万人; S 表示建设用地面积, km^2 ; i 表示期, 本文 $i=1, 2, \dots, 5$, 共 5 期, 即 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年; e 表示能源碳

排放强度, $e = \frac{C}{E}$; f 表示能源消费强度, $f = \frac{E}{V_{\text{GDP}}}$; g 表示经济发展水平, $g = \frac{V_{\text{GDP}}}{P}$; h 表示土地利用效率, $h = \frac{P}{S}$; s 表示建设用地规模。

式(5)可通过加法和乘法分解出各个因素的贡献值与贡献率, 具体公式如式(6)和(7)所示:

$$\Delta C = C_t - C_0 = \sum e_t \times f_t \times g_t \times h_t \times s_t - \sum e_0 \times f_0 \times g_0 \times h_0 \times s_0 = \Delta C_e + \Delta C_f + \Delta C_g + \Delta C_h + \Delta C_s \quad (6)$$

$$D = C_t \div C_0 = D_e \times D_f \times D_g \times D_h \times D_s \quad (7)$$

式(6)~(7)中: C_0 为研究初期的碳排放量; C_t 为研究 t 期的排放量; $\Delta C_e, \Delta C_f, \Delta C_g, \Delta C_h, \Delta C_s$ 为所选指标的贡献值; D_e, D_f, D_g, D_h, D_s 为所选指标的贡献率。

在 LMDI 加法模式下:

$$\Delta C_e = \sum W_i \times \ln \frac{e_t}{e_0}, \Delta C_f = \sum W_i \times \ln \frac{f_t}{f_0}, \Delta C_g = \sum W_i \times \ln \frac{g_t}{g_0}, \Delta C_h = \sum W_i \times \ln \frac{h_t}{h_0}, \Delta C_s = \sum W_i \times \ln \frac{s_t}{s_0}, W_i = \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \circ$$

在 LMDI 乘法模式下:

$$D_e = \exp(W \Delta C_e), D_f = \exp(W \Delta C_f), D_g = \exp(W \Delta C_g), D_h = \exp(W \Delta C_h), D_s = \exp(W \Delta C_s), W = \frac{\ln D}{\Delta C} \circ$$

4 结果与分析

4.1 土地利用变化分析

对土地利用数据处理, 得到昆明市 2000—2020 年土地利用结构(表 4)。由表 4 可知, 在 2020 年昆明市的土地利用结构中, 林地面积占比最大, 已超过 45%; 其次为草地, 占比约 27%; 再次为耕地, 占比约 19%, 三者共占昆明市 91% 左右的面积。草地面积从 2000 年的 6 116.71 km^2 降至 2020 年的 5 794.23 km^2 , 耕地面积从 2000 年的 4 259.74 km^2 降至 2020 年的 3 979.74 km^2 , 林地面积从 2000 年 9 616.88 km^2 降至 2020 年的 9 477.42 km^2 , 三者分别减少了 332.48、280.00、139.46 km^2 ; 而建设用地和水域面积分别增加了 707.44 和 32.07 km^2 , 其中建设用地面积

增长速度最快,相较于2000年增长了1.45倍,未利用地占比较小,未超过0.35%。据本文研究,发现昆明市林地、草地、耕地面积较大,最大的水域分布于滇池区域,建设用地主要集中于滇池东北部且扩张显著,未利用地大部分分布于昆明市北部。

4.2 土地利用碳排放分析

4.2.1 土地利用碳排放时间特征

根据公式(1)和公式(2),计算出昆明市2000、

2005、2010、2015、2020年土地利用碳排放量(表5)。由表5可知,2000—2020年昆明市的碳吸收量总体上呈缓慢下降趋势,从2000年的76.01万t降至2020年的74.51万t,而昆明市2005年的碳源排放量相比于2000年的碳源排放量增长了1.67倍,2010年的碳排放量为5年最高,达到1 307.63万t,此后昆明市的碳排放量呈下降趋势,2020年下降至1 008.10万t,总体上呈先上升后下降的趋势。

表4 昆明市2000、2005、2010、2015、2020年土地利用结构

年份	耕地		林地		草地		水域		建设用地		未利用地	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
2000	4 259.74	20.26	9 616.88	45.75	6 116.71	29.10	474.49	2.26	484.92	2.31	67.64	0.32
2005	4 238.07	20.16	9 608.89	45.71	6 114.05	29.09	474.23	2.26	517.88	2.46	67.51	0.32
2010	4 225.37	20.10	9 596.38	45.65	5 949.62	28.30	489.42	2.33	688.79	3.28	71.11	0.34
2015	4 199.19	19.98	9 581.80	45.58	5 932.37	28.22	471.65	2.24	764.46	3.64	71.10	0.34
2020	3 979.74	18.93	9 477.42	45.09	5 794.23	27.56	506.55	2.41	1 192.36	5.67	70.34	0.33

表5 昆明市2000、2005、2010、2015、2020年土地利用碳排放量

万t

年份	碳源			碳汇					净碳排放量
	耕地	建设用地	合计	林地	草地	水域	未利用地	合计	
2010	17.98	523.78	541.76	-61.93	-12.85	-1.2	-0.03	-76.01	465.75
2005	17.88	890.88	908.77	-61.88	-12.84	-1.2	-0.03	-75.95	832.82
2010	17.83	1 289.80	1 307.63	-61.8	-12.49	-1.23	-0.04	-75.56	1 232.07
2015	17.72	1 161.23	1 178.95	-61.71	-12.46	-1.19	-0.04	-75.39	1 103.57
2020	16.79	991.31	1 008.10	-61.03	-12.17	-1.28	-0.04	-74.51	933.59

注:碳源代表碳排放量,碳汇代表碳吸收量。

因为受建设用地化石能源消耗量的影响,昆明市2000—2020年净碳排放量变化波动较大,昆明市的净碳排放量由2000年的465.75万t增加至2010年的1 232.07万t后减少到2020年的933.59万t,表明昆明市已开始优化产业结构、调整能源结构。

4.2.2 土地利用碳排放空间特征

由于各区县化石能源数据较难获取,本文通过各区县地区生产总值占比换算出建设用地碳排放量,并根据碳排放量的大小,在自然间断点方法的基础上,遵循清晰直观原则将碳排放量低于5万t的

区域归为微度排放区;5万~30万t归为低度排放区;30万~100万t归为中度排放区;100万~200万t归为高度排放区;超过200万t的区域归为重度排放区,由此得到空间分布情况。从整体上看,在2000—2020年,微度排放区、低度排放区主要分布于昆明市北部;中度排放区、高度排放区、重度排放区主要分布于昆明市南部,其中禄劝彝族苗族自治县等以林地为主的区县碳排放情况较好,而五华区、官渡区等临滇池以建设用地为主的区县碳排放较为严重。

4.2.3 碳排放强度分析

根据公式(3)计算土地利用碳排放强度,结果如表6所示。

由表6可以看出,昆明市碳排放强度从2000年的0.732 t/万元上升至2005年的0.771 t/万元,随后呈下降趋势,直至2020年的0.139 t/万元。在此过程中,2010—2015年碳排放强度下降速度最快,整个过程表明昆明市的经济发展日趋合理,但2015—2020年碳排放强度下降速度放缓,说明昆明市碳减排政策所起作用有所减弱。

4.3 土地利用碳排放脱钩分析

根据公式(4)计算碳排放脱钩指数,结果如表7所示。2000、2005、2010、2015、2020年昆明市碳排放和GDP增长如图1所示。

由表7可知,昆明市2000—2020年的脱钩类型

表6 昆明市碳排放强度

年份	$V_{GDP}/\text{亿元}$	净碳排放量/万 t	碳排放强度/($\text{t}\cdot\text{万元}^{-1}$)
2000	636.13	465.75	0.732
2005	1 080.13	832.82	0.771
2010	2 165.91	1 232.07	0.569
2015	4 342.38	1 103.57	0.254
2020	6 733.79	933.59	0.139

表7 昆明市土地利用碳排放与经济增长的脱钩指标结果

起止年	$\Delta C/\%$	$\Delta V_{GDP}/\%$	ϵ_t	脱钩类型
2000—2005	0.79	0.70	1.13	扩张性连结
2005—2010	0.48	1.01	0.48	弱脱钩
2010—2015	-0.10	1.00	-0.10	强脱钩
2015—2020	-0.15	0.55	-0.28	强脱钩

可分为3类,即扩张性连结、弱脱钩和强脱钩,下面结合图1与昆明市的实际发展情况,依次对各阶段进行分析。

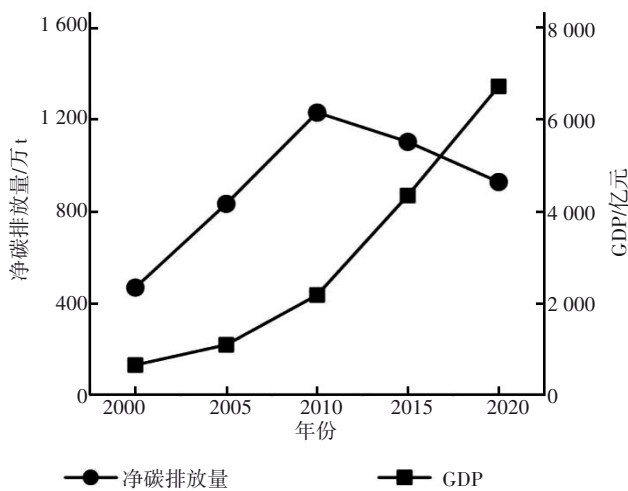


图1 2000—2020年昆明市碳排放和GDP增长图

1)2000—2005年,昆明市土地利用碳排放量与经济增长处于扩张性连结状态,这是负脱钩与脱钩之间的过渡状态,在这5年昆明市地区生产总值平均年增长11.17%,土地利用净碳排放平均年增长12.33%,这是一般理想状态,即碳排放量上升幅度约等于经济增长幅度。查阅相关数据,这段时期昆明市第二产业GDP增长了1.72倍,增长的动力主要来自工业的快速发展,所以在这一时间段昆明市对

能源的需求量和消费量快速上升,致使该年段昆明市土地利用碳排放量快速增加的情况。

2)2005—2010年,昆明市土地利用碳排放量与经济增长处于弱脱钩状态,在这5年昆明市地区生产总值平均年增长14.93%,土地利用净碳排放量平均年增长8.15%,这是较理想状态,即碳排放量上升幅度小于经济增长幅度。表明政府正采取有效措施逐步节能减排,大批高污染高耗能的企业开始重

视提高生产技术,以提升能源利用效率。在这期间,以滇池为重点的水环境综合治理成效显著,全市森林覆盖率达45%以上,脱钩弹性值由1.13降至0.48。

3)2010—2020年,昆明市土地利用碳排放量与经济增长处于强脱钩状态,在这5年昆明市地区生产总值平均年增长12.01%,土地利用净碳排放量平均年下降2.74%,这是最理想状态,即经济增长,碳排放量显著下降,环境污染逐渐改善。第一、二、三产业占比由2010年的5.7:45.3:49.0调整为2020年的4.6:31.2:64.1,2020年第三产业占比已超过一半,产业结构的优化促进了经济的蓬勃发展与碳排放量的显著下降。这10年分为2个阶段,即2010—2015年为第1阶段,2015—2020年为第2阶段。第1阶段,昆明市地区生产总值继续保持以每年14.93%的速度上升,但相较于2005—2010年,土地利用净碳排放量以每年2.18%的速度下降,此变化是因为“十二五”期间昆明市响应了国家新兴产业发展规划的号召,在低碳城市建设规划编制中加大了第二产业中高新技术产业的比重,并对第三产业进行升级,土地利用碳排放量因此减少。第2阶段,昆明市地区生产总值增长速度降至9.17%,而土地利用净碳排放量年下降速度升至3.29%,说明昆明市低碳城市建设显著,但由于高能耗、高水耗、高污染、资源密集型产业的关闭与转型,昆明市地区生产总值增长速度减慢,而脱钩指数比上一年段表现更好,说明昆明市逐渐摆脱了经济增长对高能耗的依赖,虽然经济发展的速度变慢,但环境压力明显减小,遏制住了碳排放的增长势头,离高原湖泊生态宜居城市之路越来越近。

4.4 土地利用碳排放影响因素分析

将上文土地利用碳排放计算结果、全市规模以上工业综合能源消费量、土地、经济、人口等数据,带入LMDI分解模型进行分解,结果如表8和表9所示。

表8 昆明市碳排放量因素分解(加法分解) 万t

起止年	ΔC_e	ΔC_f	ΔC_g	ΔC_h	ΔC_s
2000—2005	176.84	-144.16	185.73	107.12	41.54
2005—2010	21.38	-331.42	651.73	-233.18	290.74
2010—2015	69.79	-1 009.78	649.69	40.21	121.60
2015—2020	7.20	-623.00	309.04	-314.95	451.73
累计效应	275.21	-2 108.37	1 796.19	-400.79	905.61

注:贡献值大于零,表明该因子对碳排放有促进作用,反之则对碳排放有抑制作用。

4.4.1 对各时期的影响因素作用分析

2000—2005年,能源碳排放强度、经济发展水平、土地利用效率、建设用地规模这4个影响因素对昆明市土地利用净碳排放具有促进作用,其中经济发展水平的促进作用最强,贡献值为185.73万t,贡献率为1.34。而能源消费强度对土地利用净碳排放具有抑制作用,吸收碳排放144.16万t,贡献率0.80。

2005—2010年,土地利用净碳排放量新增399.25万t,在这5年,土地利用效率所起作用从促进作用转变为抑制作用。抑制因素总贡献值564.60万t大于促进因素总贡献值963.85万t,所以碳排放量继续上升。抑制因素中能源消费强度贡献值最高,为331.42万t;促进因素中经济发展水平的推动作用最明显,为651.73万t,贡献率为1.90。

2010—2015年,净碳排放量减少了128.50万t,只有能源消费强度对昆明市土地利用净碳排放量起到抑制作用,贡献值达1009.78万t,贡献率为0.42;经济发展水平对碳排放促进作用最明显,贡献值为649.69万t,贡献率为1.75,较2005—2010年有一定下滑。2013年后昆明市进行了能源消费结构调整,能源消费结构的优化使每单位GDP所消耗的能源量不断下降,从而使能源消费强度不断降低,因此土地利用净碳排放在这一时间段逐渐达到峰值。

2015—2020年,昆明市净碳排放量减少了169.98万t。能源消费强度、土地利用效率因素抑制土地利用净碳排放,其中能源消费强度抑制作用最

明显,贡献值为 623.00 万 t;能源碳排放强度、经济发展水平、建设用地规模均对土地利用净碳排放起推动作用,其中建设用地规模推动作用最明显,贡献值为 451.73 万 t,表明昆明市在这 5 年建设用地扩张迅猛,而经济发展水平转变为第二大促进因素,贡献值为 309.04 万 t,较上个 5 年大幅下降,表明昆明市经济发展已经迈向绿色发展的道路。

4.4.2 各因素对土地利用净碳排放的影响

根据表 8、表 9 与昆明市的实际情况对各因素进行分析。

表 9 昆明市碳排放量因素分解(乘法分解) 万 t

起止年	D_e	D_f	D_g	D_h	D_s
2000—2005	1.32	0.80	1.34	1.18	1.07
2005—2010	1.02	0.72	1.90	0.80	1.33
2010—2015	1.06	0.42	1.75	1.04	1.11
2015—22020	1.01	0.54	1.36	0.73	1.56

1) 经济发展水平因素。

经济发展水平因素在过去 20 年对昆明市累计贡献土地利用净碳排放 1 796.19 万 t,占昆明市累计碳增量的 57.50%。结合实际分析,由于存在聚集效应,昆明市作为云南省的省会城市,其经济的飞速发展必然会吸引更多的人才、资本等的涌入,最终使人口和产业高度集聚,在这个过程中,土地利用净碳排放量将随着各种产品的不断消耗而逐渐升高,而昆明市过去 20 年 GDP 增长趋势较好,因此经济发展水平因素起促进作用。

2) 建设用地规模因素。

建设用地规模因素是仅次于经济发展水平因素的第二大促进因素。建设用地规模的扩大,其所承担的所有人类社会活动,比如工业、社会生活和能源消耗等,都会变得更加频繁,从而导致土地利用净碳排放量的急剧增长,昆明市的建设用地面积随着经济的高速发展而不断增加,从 2000 年的 484.92 km² 增加到 2020 年的 1 192.36 km²,增幅达 145.88%,年均增长率 4.60%。因此建设用地规模因

素对昆明市的土地利用净碳排放起促进作用。

3) 能源消费强度因素。

在 20 年里,能源消费强度从 1.42 t/万元降至 0.19 t/万元,年均减少率为 9.66%。受此因素影响,在 20 年里昆明市累计碳减排 2 108.37 万 t,占碳排放减少总量的 79.38%,说明能源消费强度是昆明市土地利用净碳排放的首要负向因素。能源消耗会产生碳排放,而能源消费强度越低,意味着每单位 GDP 所需要的能源越少,从而有效减少碳排放,且随着昆明市在发展中不断改进技术,调整产业结构,因此能源消费强度对昆明市的土地利用净碳排放起抑制作用。

4) 土地利用效率因素。

2010—2020 年,土地利用效率因素对昆明市土地利用净碳排放增加既有促进作用又有抑制作用,其中 2000—2005 年与 2010—2015 年起促进作用,2005—2010 年与 2015—2020 年起抑制作用,20 年间累计碳减排为 400.79 万 t。出现这种情况与国家规定的增减挂钩、占补平衡等有关,相关政策会影响到建设用地的扩张速度,进而影响土地利用效率。土地利用效率提升后碳排放量下降,是因为在生产条件不变的情况下,土地利用效率越高,对土地所投入的物资就越少,因此土地利用净碳排放量也将越来越低;且 2010 年昆明市发生旱灾,致使 2005—2010 年昆明市常住人口增长趋势变缓,小于建设用地增长速度,使得每单位土地供养人口减少,土地利用效率提高。而 2015—2020 年,虽然昆明市常住人口增长迅速,但昆明市建设用地飞速增长,城镇化水平显著提高,且随着技术的发展,土地利用集约化、专业化程度很高,因此 2005—2010 年与 2015—2020 年土地利用效率因素对碳排放起抑制因素。

5) 能源碳排放强度因素。

能源碳排放强度因素对昆明市土地利用净碳排放有较小的促进作用,累计贡献 275.21 万 t,占昆

昆明市累计碳增量的8.81%,在研究期内贡献值与贡献率均呈下降趋势,贡献值由2000年的176.84万t下降至2020年的7.20万t,贡献率由2000年的1.32下降至2020年的1.01。单位能源所产生的碳排放量的降低,虽然表明昆明市在优化能源消费结构,但由于技术水平和基础设施的限制,能源碳排放强度因素所起的作用较小,再加上能源结构调整的周期较长,因此昆明市的能源结构还有待进一步的改善。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文以昆明市为例,通过对过去20年昆明市土地利用演变过程的分析,在前人研究成果的基础上,使用碳排放系数法建立昆明市近20年土地利用碳排放估算模型,并基于此模型对昆明市碳排放的特征与强度进行分析,然后结合昆明市的经济 development 情况对昆明市土地利用碳排放的脱钩状况进行研究,最后使用LMDI分解模型,计算能源、经济、土地、人口等要素对昆明市土地利用净碳排放的贡献值与贡献率,并对其作用机制进行了探讨。主要结论如下。

1)2000—2020年,昆明市土地利用碳排放在时间上呈先增加后下降的趋势,在空间上,昆明市北部碳排放较轻,而南部碳排放较严重。在各类用地中,建设用地碳排放量最大。昆明市碳排放强度从2000年的0.732 t/万元降至2020年的0.139 t/万元,表明土地利用对环境的压力正逐渐减小。

2)昆明市2000—2020年的脱钩类型可分为3类,即扩张性连结、弱脱钩和强脱钩。2000—2005年昆明市处于扩张性连结状态,2005—2010年昆明市处于弱脱钩状态,2010—2020年昆明市处于强脱钩状态。

参考文献:

- [1] FATIMA S, HUSSAIN I, MARIA Q. Energy consumption, carbon emission and economic growth at aggregate and disaggregate

3)对昆明市土地利用碳排放的影响因素进行分解,结果显示,促进因素中对碳排

放推动作用最明显的是人均GDP,即经济发展水平因素;抑制因素中对土地利用碳排放抑制作用最明显的是能源消费强度。

5.2 讨论

昆明市作为滇中城市群的核心,对其开展土地利用碳排放与经济增长的研究意义重大。本文虽然在一定程度上探究了土地利用碳排放与经济增长的脱钩状态及其影响因素,但也存在一定的不足之处:首先,本文以昆明市为研究区,在实际操作的过程中,由于各个县(市、区)的驱动因子和影响因素可能存在差异,因此本文将昆明市作为一个整体进行分析,未能以县域尺度开展研究;其次,受制于遥感影像精确性的影响,土地利用面积与昆明市实际土地利用面积存在一定误差;最后,因为目前国内外没有形成统一的碳排放系数标准,所以本文只能采用已有研究成果的碳排放系数,与昆明市实际碳排放系数数据存在差别,并且由于部分统计数据难以获取,测算的建设用地碳排放量小于实际碳排放量,在未来的研究中若能解决上述问题,研究的结果将更符合昆明市的实际发展情况。

5.3 建议

根据本文的研究成果,提出以下建议:昆明市正处于建设区域性国际中心城市的关键时期,虽然推进过程难免会导致二氧化碳的排放,但完善的碳排放政策、合理的产业结构与能源结构能在减少碳排放的同时促进经济发展,因此要发展壮大新兴产业,重塑传统产业,加强绿色发展政策保障,确保“十四五”节能减排目标顺利完成,强化土地利用碳排放与经济增长之间的强脱钩状态,并为实现碳达峰、碳中和奠定坚实基础。

- level: a panel analysis of the top polluted countries[J]. Sustainability, 2023, 15(4): 2935–2935.
- [2] 王志强,蒲春玲. 中国城镇化碳排放核算体系构建与实证[J]. 统计与决策, 2022, 38(7): 57–61.
- [3] 禹康康,王延华,孙恬,等. 太湖流域土地利用碳排放变化及其预测[J]. 土壤, 2022, 54(2): 406–414.
- [4] 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.
- [5] 魏媛,简小玉. 基于碳达峰碳中和的贵州省土地利用碳排放演变及预测研究[J]. 生态经济, 2022, 38(4): 108–114.
- [6] 李健,毛德华,蒋子良,等. 长株潭城市群土地利用碳排放因素分解及脱钩效应研究[J]. 生态经济, 2019, 35(8): 28–34+66.
- [7] 杨一佳,曹天宇. 格网尺度下滨州市土地利用碳排放核算及驱动因素分析[J]. 国土资源科技管理, 2023, 40(3): 1–16.
- [8] 张杰,陈海,刘迪,等. 基于县域尺度土地利用碳排放的时空分异及影响因素研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(1): 21–31.
- [9] 荆肇睿,王金满. 山东省土地利用碳足迹与经济增长脱钩关系分析[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(6): 310–314.
- [10] 薛建春,侯思杰,吴彤. 基于VECM模型的内蒙古土地利用碳排放与经济增长、产业结构的动态关系分析[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2020, 51(2): 129–134.
- [11] 张余,姜博,赵映慧,等. 东北地区城市土地利用碳排放效应研究[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(7): 209–217.
- [12] 刘洋. 广东省土地利用碳排放与经济增长关系及其影响因素研究[D]. 广州:华南理工大学, 2017.
- [13] 檀斯园. 九江市土地利用碳排放风险时空分异及影响因素研究[D]. 南昌:江西财经大学, 2022.
- [14] 帕茹克·吾斯曼江,艾东,方一舒,等. 基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测[J]. 环境科学, 2024, 45(1): 287–299.
- [15] 李俊,杨德宏,吴锋振,等. 基于PLUS与InVEST模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 378–387.
- [16] 徐新良,刘纪远,张树文,等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC) [Z]. 北京:中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统, 2018(<http://www.resdc.cn>).
- [17] 景勇,左玲丽,彭文甫. 四川盆地西北部土地利用碳排放时空变化分析:以绵阳市为例[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(6): 172–185.
- [18] 孙赫,梁红梅,常学礼,等. 中国土地利用碳排放及其空间关联[J]. 经济地理, 2015, 35(3): 154–162.
- [19] 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(6): 804–812.
- [20] 石洪昕,穆兴民,张应龙,等. 四川省广元市不同土地利用类型的碳排放效应研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 101–106.
- [21] 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+115.
- [22] 张中秋,罗洁莲,劳燕玲,等. 云南省“土地利用—碳减排—经济增长”因素间的联动分析——基于LMDI和Tapio模型[J]. 北部湾大学学报, 2022, 37(4): 56–68.
- [23] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京:南京大学, 2010.
- [24] 张若楠,杨瑾. 陕西省土地利用碳排放与碳足迹研究[J]. 农业与技术, 2020, 40(5): 126–130.
- [25] TAPIO P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in finland between 1970 and 2001[J]. Transport Policy, 2005, 12(2): 137–15.
- [26] 刘春英,檀斯园,王骏博,等. 长江中下游典型区域土地利用碳排放风险——以江西省九江市为例[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 341–349.