

低碳视角下云南省国土空间利用效率测度及综合分区

陶俊逸¹, 叶显民¹, 汪小宝¹, 周玉琴¹, 冉玉菊², 熊波³, 董雯雯², 赵筱青¹

(1. 云南大学 地球科学学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650500; 3. 云南省国土资源规划设计研究院, 云南 昆明 650500)

摘要: [目的] 在碳中和背景下进行云南省国土空间利用效率测度及空间综合分区, 为提出差异化国土空间低碳、高效发展策略提供科学参考。[方法] 利用 2020 年云南省 16 个州市单元面板数据, 基于非期望超效率 SBM 模型测度低碳视角下的国土空间利用效率, 并结合碳效益指数划分综合分区, 提出各区优化建议。[结果] ①2020 年云南省碳排放量为 1.23×10^8 t, 其中生产空间碳排放远大于生活空间, 前者几乎是后者的 31 倍, 碳吸收量为 1.40×10^7 t, 仅为碳排放量的 1/10。②2020 年云南省国土空间利用效率仅为 0.628, 呈现出滇中和滇西北较高, 滇东、滇西南较低的空间分布格局; 具体到各州市, 仅西双版纳、迪庆和玉溪达到高效利用, 效率最大值为 1.430, 而昭通市利用效率最低, 仅为 0.490。③基于国土空间利用效率与碳效益指数, 最终形成低碳保持—高效率、碳汇功能—高效率、碳汇功能—中等效率、碳汇功能—低效率、碳强度控制—高效率、碳强度控制—中等效率和低碳优化—低效率 7 个综合分区, 并提出各区差异化管治策略。[结论] 当前云南省碳吸收远不足以抵消碳排放, 整体表现为碳源, 国土空间利用仍较为粗放, 利用效率还有很大提升潜力, 国土空间利用效率分布具有明显的区域非均衡性, 在制定国土空间低碳发展与高效利用策略时应予以重视。

关键词: 碳中和; 国土空间利用效率; 非期望超效率 SBM 模型; 国土空间综合分区; 云南省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0347-11

中图分类号: K901

文献参数: 陶俊逸, 叶显民, 汪小宝, 等. 低碳视角下云南省国土空间利用效率测度及综合分区[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 347-357. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.037; Tao Junyi, Ye Xianmin, Wang Xiaobao, et al. Measurement and comprehensive zoning of land space utilization efficiency in Yunnan Province from low carbon perspective [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 347-357.

Measurement and Comprehensive Zoning of Land Space Utilization Efficiency in Yunnan Province from Low Carbon Perspective

Tao Junyi¹, Ye Xianmin¹, Wang Xiaobao¹,

Zhou Yuqin¹, Ran Yuju², Xiong Bo³, Dong Wenwen², Zhao Xiaoqing¹

(1. School of Geosciences, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China;

2. Institute of International Rivers and Ecological Security, Yunnan University, Kunming, Yunnan

650500, China; 3. Yunnan Institute of Land Resources Planning and Design, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: [Objective] The measurement of land space use efficiency and comprehensive spatial zoning in Yunnan Province were studied, considering carbon neutrality, provide a reference for proposing differentiated low-carbon and high-efficiency land space development strategies. [Methods] Using 2020 panel data of 16 municipal units in Yunnan Province, the spatial utilization efficiency of the national territory under the low-carbon perspective were measured based on the non-expected output super-efficiency SBM model, and comprehensive zoning were performed considering the carbon efficiency index; subsequently, optimization

收稿日期: 2023-11-15

修回日期: 2024-05-26

资助项目: 云南省西南联合研究生院科技专项(基础研究和应用基础研究重大项目)“滇中城市群国土空间多目标优化与高质量发展提升路径研究”(202302AO370007); 云南省产教融合研究生联合培养基地项目(CZ22622203-2022-29); 国家自然科学基金项目“滇池流域资源—环境演变及国土空间冲突调控研究”(42471320)

第一作者: 陶俊逸(1999—), 女(汉族), 云南省玉溪市人, 硕士研究生, 主要研究方向为低碳发展与土地利用规划。Email: taojy0899@163.com。

通信作者: 赵筱青(1969—), 女(白族), 云南省大理州人, 博士, 教授, 主要从事土地利用安全格局及国土空间开发保护研究。Email: xqzhao@ynu.edu.cn。

suggestions for each zone are put forward. [Results] ① The carbon emission in Yunnan Province in 2020 was 1.23×10^8 tonnes, with production-space-related emissions accounting for a much larger proportion than living-space-related emissions; the former was almost 31 times as much as the latter. Further, carbon absorption was 1.40×10^7 tonnes, which is only one-tenth of the carbon emission. ② In 2020, the land space utilization efficiency of Yunnan Province was only 0.628, showing a spatial distribution pattern that is higher in central and northwestern Yunnan, and lower in eastern and southwestern Yunnan. Specifically, only Xishuangbanna, Diqing and Yuxi reached high efficiency utilization, with the maximum efficiency of 1.43, while Zhaotong had the lowest utilization efficiency of 0.49. ③ Based on the land space utilization efficiency and the carbon efficiency index, 7 comprehensive zones-Low carbon retention-High efficiency, Carbon sink function-High efficiency, Carbon sink function-Moderate efficiency, Carbon sink function-Low efficiency, Carbon intensity control-High efficiency, Carbon intensity control-Moderate efficiency, and High carbon optimization-Low efficiency-are derived, and a differentiated governance strategy for each zone is put forward. [Conclusion] At present, carbon absorption in Yunnan Province is far from enough to offset carbon emissions, and the overall performance is carbon source. The utilization of territorial space is still relatively extensive, and there is great potential to improve utilization efficiency. The distribution of territorial space utilization efficiency has obvious regional imbalance, and attention should be paid to the formulation of low-carbon development and efficient utilization strategies for territorial space.

Keywords: carbon neutrality; territorial space utilization efficiency; undesirable super-efficiency SBM model; territorial space comprehensive zone; Yunnan Province

全球变暖已成为威胁人类生存条件最重要的问题之一,世界各国都应采取措施减少温室气体排放,以减缓气候变化。因此,中国相继提出了力争碳排放 2030 年前达到峰值、2060 年前实现碳中和的总体目标。其中,土地利用过程中产生的 CO_2 被视为继化石燃料之后的又一大排放源,不合理和低效的土地利用会带来资源浪费、生态绿地缩小和巨大碳排放等一系列危害,并且碳排放是最严重的后果之一。可见,实现国土空间高效利用,是实现碳减排,应对全球变暖的关键举措之一,对按期实现“双碳”目标具有重要的现实意义。

目前关于国土空间利用效率的研究刚刚逐步开展,从研究框架上看,学术界对于国土空间利用效率的研究主要集中于某一类型如城镇建设土地利用效率^[1]、农业生产空间利用效率^[2]及生态空间利用效率等,但随着我国生态文明建设、高质量协同发展战略的不断深入,单一类型的利用效率研究不再满足新时代国土空间协同发展的需要,需多方面综合考虑;在效率测度指标体系方面,学者们从一开始采用单投入单产出比例测度指标法^[3],后来更多基于多项要素投入多项要素产出思维构建指标体系进行效率测度^[4-5],前者只能反映土地利用过程中产生的经济效益而忽略了社会效益和环境效益,后者则逐渐将土地利用产生的“三废”等环境污染要素纳入到指标体系中,但单独考虑碳排放的研究少之又少,并且尚未形

成统一的指标体系;在研究尺度上,国内外现有文献主要集中于对国家级^[6]、发达地区省级层面、城市群、流域^[7]的利用效率进行研究,而对生态环境较为脆弱、土地利用较为粗放的高原山地地区的研究还较为缺乏;在效率评价方法方面,首先是单指标评价法,主要基于单一投入产出进行测度^[8],该方法操作简单、快捷,实用性较强;其次是多指标综合评价法,该方法基于效率指标体系,确定各指标的权重从而加权得到综合效率值,但是该法存在指标权重主观性较强、经典值或理想值确定模糊等问题从而影响评价结果的准确性;常被学者采用的是基于参数的生产函数测度法,以随机前沿模型(Stochastic frontier analysis, SFA)为代表,该类型测度方法具有能解释随机误差的优点,但仍存在一定局限性,其侧重的是多要素投入和单一产出的关系,也就是说难以在模型中同时包含土地利用的经济效益、社会效益等期望产出和生态效益等非期望产出^[9];最后是以数据包络分析(Data envelopment analysis, DEA)为代表的非参数效率测度方法,该法具有不要求设定特定生产函数、能够对多要素投入多要素产出进行客观评价的优点,因此在国土空间利用效率测度中得到广泛的应用;在研究内容上,随着研究的不断深入,学者们对其基础理论、指标体系、测度方法、影响因素以及提升路径已有大量研究成果,但大多是基于经济或管理单一视角的现象描述和机理解释,基于利用效率进行分区管治的研究

并不多见。在逐步推进“双碳”目标过程中,各省区已将碳中和作为国土空间优化的目标,但是有关低碳视角下国土空间分区管治的研究刚逐渐开展,将低碳发展目标纳入国土空间分区考量的研究还较为缺乏^[10],在分区依据上,碳分区方面主要依据碳排放经济贡献系数、碳吸收生态承载系数及二者的耦合协调关系^[11]、土地利用碳排放总量和碳补偿率^[12]、土地利用碳收支空间分异^[13]等进行国土空间分区研究,分区依据较为单一;国土空间利用效率是衡量当前社会经济系统运行质量的重要参数,国土空间的有序、持续利用始终是区域可持续发展进程中的核心问题,同时,各类国土空间利用、生产和转换等资源效率对未来国土空间的发展方式、规模结构、布局体系和发展路径具有重要影响,在“双碳”目标和生态文明建设背景下,将低碳排和利用效率同时纳入考虑范畴进行以低碳绿色与高效利用为目标的国土空间综合分区,有助于区别各分区的发展导向,对于促进国土空间有序运行和低碳高效发展具有一定的理论和现实意义。

因此,本研究以全国第一批低碳试点省份之一的云南省为研究区,以该省 16 个州市为评价单元,基于“三生”空间核算 2020 年云南省各州市的碳排放/吸收量,构建一套低碳视角下的国土空间利用效率测度指标体系,借助非期望超效率 SBM 模型对“三生”空间利用效率分别进行测度,进一步得到 2020 年云南省各州市的国土空间利用效率,并结合碳效益指数进行低碳视角下国土空间综合分区,为提出差异化国土空间低碳、高效发展策略提供科学参考。

1 研究方法数据来源

1.1 研究区概况

云南省位于中国西南部(97°31′—106°11′E, 21°8′—29°15′N),总面积 $3.94 \times 10^5 \text{ km}^2$,东西间距 864.9 km,南北长达 990 km,省内地形地貌状况复杂,西北面是山谷纵横交错的横断山区,东面和南面是云贵高原,城市的开发、生产活动主要依托于国土空间 6% 的坝区。2020 年云南省地区生产总值为 2.45×10^{12} 元,第一产业产值为 3.60×10^{11} 元,第二产业产值为 8.30×10^{11} 元,第三产业产值为 1.26×10^{12} 元,三次产业结构为 14.7 : 33.8 : 51.5,第三产业占比高达 1/2,成为经济增长的主要动力。作为中国的能源和矿产大省,2020 年云南省能源消费中化石能源消费占 57.8%,能源消费结构依旧以化石能源为主,其丰富的能源和发展阶段决定了省内能源消耗和碳排放量巨大;同时,近年来随着人类活动不断增强和城镇化进程的快速推进,不合理及低效的土地利用方式带

来了严重污染^[14],在双碳目标及生态文明建设背景下,亟须探索省内国土空间低碳、高效的利用方式。

1.2 数据来源

研究所需的土地利用数据来源于中国科学院资源环境与数据中心,分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,土地利用现状一级类型综合评价精度达到 93% 以上,二级类型分类综合精度达 90% 以上;地图底图来源于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1822 号的标准地图;“三生”空间碳排放/吸收量核算及国土空间利用效率测度指标体系中涉及到的社会经济数据来源于《云南省统计年鉴(2021 年)》及各州市国民经济和社会发展统计公报,碳效益测算及国土空间利用效率测度指标体系中的碳排放/吸收量是对原始数据进行核算后得到的派生数据。

1.3 研究方法

1.3.1 “三生”空间碳排放/吸收量核算及其碳效益测算

(1) “三生”空间碳排放/吸收量核算。将《土地利用现状分类标准(GB/T21010-2007)》与云南省国土功能分类进行衔接,本文界定耕地、其他农用地和工业用地为生产空间;城镇用地、农村居民点和其他建设用为生活空间;林地、草地、水域、未利用地为生态空间,2020 年云南省“三生”空间分布如图 1 所示。其中,生产、生活空间主要表现为碳排放,生态空间主要表现为碳吸收。

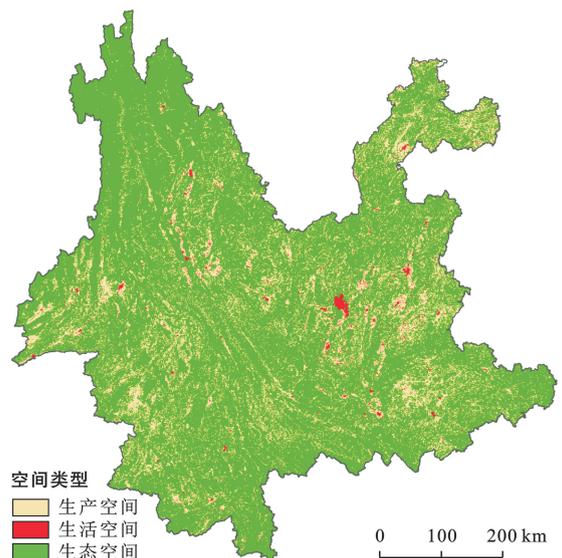


图 1 2020 年云南省“三生”空间分布

Fig.1 Spatial distribution of productive-living-ecological spaces in Yunnan Province in 2020

生产空间碳排放来源于耕地、其他农用地上的农业生产活动和工业用地上的生产建设活动。其中,农业生产活动的碳排放以农业施肥、农用塑料薄膜、农药使用过程中引起的直接或间接碳排放以及农业机

械使用、灌溉、翻耕过程中消耗电能及化石燃料引起的碳排放为主,参考前人研究^[15-16],涉及到的参数取值详见表 1,农业生产活动碳排放量计算公式为:

$$E_i = \sum_{i=1}^n S_i \cdot \epsilon_i \quad (1)$$

式中: E_i 为农业生产碳排放量; n 为农业生产碳源因子序号; S_i 为农业生产的碳源因子使用量; ϵ_i 为农业生产的碳源因子转换系数。

表 1 农业生产活动各碳源的碳排放转化系数

Table 1 Carbon emission conversion coefficients of different carbon source of agricultural production activities

碳源	取值
农业施肥 CO ₂ 排放/(kg·kg ⁻¹)	0.896
农药使用 CO ₂ 排放/(kg·kg ⁻¹)	4.934
地膜使用 CO ₂ 排放/(kg·kg ⁻¹)	5.170
农作物种植 CO ₂ 排放/(kg·hm ⁻²)	16.470
农用机械使用 CO ₂ 排放/(kg·kW ⁻¹)	0.190
翻耕 CO ₂ 排放/(kg·km ⁻²)	16.470
灌溉 CO ₂ 排放/(kg·hm ⁻²)	266.480

工业用地上生产建设活动的碳排放依据单位 GDP 能耗,采用碳排放系数法进行核算,结合实际情况及参考相关文献中云南省碳排放系数推荐值,最终将碳排放系数确定为 0.717 2^[17],计算公式为:

$$C_i = E_{\text{GDP}} \times \text{GDP}_i \times 0.717 2 \quad (2)$$

式中: C_i 为第 i 个州市的生产建设活动碳排放量; E_{GDP} 为单位 GDP 能源消耗量(吨标准煤/万元),其中单位 GDP 标准能耗数据是根据《综合能耗计算通则(GB/T 2589-2008)》中各种能源折标准煤换算而来; GDP_i 为第 i 个州市的 GDP 数据。

生活空间碳排放主要来自城镇用地、农村居民点。前者的碳排放以居民呼吸碳排放为主,后者的碳排放以农村居民生活能源为主,主要有煤炭、秸秆燃烧和呼吸碳排放 3 类。其中,煤炭燃烧碳排放由煤炭消耗量、折标煤系数及碳排放系数相乘得到,折标煤系数参考《中国能源统计年鉴》为 0.714 3(kg/kg),碳排放系数参考《2006 年 IPCC 国家温室气体排放清单指南》为 0.755 9(kg/kg);呼吸碳排放由城镇/农村人口数与人体呼吸碳排放系数相乘得到,人体呼吸碳排放系数为 79 kg/(人·a)^[18];依据前人研究,秸秆资源可 100% 收集^[19],秸秆燃烧碳排放的计算公式为:

$$C_s = \sum_{i=1}^k P_i \cdot S_i \cdot \theta_i \cdot m \cdot n \quad (3)$$

式中: C_s 为秸秆燃烧碳排放量; k 为农作物种类序号; P_i 为第 i 种作物产量; S_i 为第 i 种作物谷草比; θ_i 为第 i 种作物秸秆燃烧碳排放系数(t/t); m 和 n 为秸秆露天燃烧比和秸秆燃烧效率,参考相关文献分

别取值 0.165 和 0.8^[20]。

生态空间主要表现为碳吸收,通过不同用地类型的碳吸收系数及面积核算其碳吸收量。碳吸收系数结合云南省实际,并参考以往研究结果^[21] 确定林地、草地、未利用土地和水域的系数分别为 0.604 6, 0.020 6, 0.002 8 和 0.253 kg/(hm²·a),各地类用地面积源于云南省 2020 年土地利用数据。计算公式为:

$$E_k = \sum T_i \cdot \delta_i \quad (4)$$

式中: E_k 为生态空间碳吸收量; T_i 为生态空间不同地类面积; δ_i 为不同地类碳吸收系数。

(2) 碳效益测算。碳排放经济贡献系数(economy contributive coefficient of carbon emission, ECC)和碳吸收生态承载系数(ecological support coefficient of carbon absorption, ESC)均可用于评估区域碳源对经济发展的影响及反映碳汇能力的大小,二者是碳分区的核心内容。

碳排放经济贡献系数(ECC)能够从经济利益的角度衡量不同地区之间碳排放量的差异,计算公式为:

$$\text{ECC} = \frac{G_L/G}{E_L/E} \quad (5)$$

式中: G_L , G 为省内 L 市和全省的 GDP,元; E_L , E 为省内 L 市和全省的碳排放总量(t)。系数大于 1,表示该市土地利用碳排放贡献率小于经济贡献率,即碳排放的经济效率较高。

碳吸收生态承载系数(ESC)能够反映区域碳汇能力的大小,计算公式为:

$$\text{ESC} = \frac{\text{CA}_L/\text{CA}}{E_L/E} \quad (6)$$

式中: CA_L , CA 为省内 L 市和全省的碳吸收量; E_L , E 为省内 L 市和全省的碳排放量。系数大于 1 表示该区域生态系统固碳能力强,反之则较弱。

1.3.2 低碳视角下云南省国土空间利用效率测度

基于上一小节的核算,将得到的碳排放/吸收量纳入投入—产出指标中构建一套低碳视角下的国土空间利用效率测度指标体系(表 2),应用非期望超效率 SBM 模型,并借助 Maxdea 软件和熵值法得到国土空间利用效率。

传统 DEA 模型对投入或产出的松弛性问题考虑不充分,并且难以对效率值均为 1 的单元加以区分,超效率 SBM 模型对此进行了改进和完善,它在考虑非期望产出的同时能对决策单元分解排序,从而提高了效率评价的准确性和实用性,计算公式为:

$$\min \rho = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\bar{x}/x_{ik})}{\frac{1}{r_1 + r_2} \left[\sum_{s=1}^{r_1} \bar{y}^d / y_{sk}^d + \sum_{q=1}^{r_2} \bar{y}^u / y_{qk}^u \right]} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \bar{x} &\geq \sum_{j=1, \neq k}^n x_{ij} \lambda_j; & \bar{y}^d &\leq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{sj}^d \lambda_j; \\ \bar{y}^d &\geq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{aj}^d \lambda_j; & \bar{x} &\geq x_k; \\ \bar{y}^d &\leq y_k^d; & \bar{y}^u &\geq y_k^u; \\ \lambda_j &\geq 0 \end{aligned}$$

($i=1, 2 \dots m; j=1, 2 \dots n; s=1, 2 \dots r_1; q=1, 2 \dots r_2$)

式中: ρ 为生产空间(生活空间、生态空间)利用效率值; n 为决策单元数; m 为投入; r_1 为期望产出; r_2 为非期望产出; x, y^d, y^u 为对应的投入矩阵、期望产出矩阵和非期望产出矩阵中的元素; λ_j 为权重系数; s, q, k, u 为决策单元。

表 2 国土空间利用效率测度指标体系
Table 2 Index system for measuring efficiency of land space utilization

目标层	准则层	系统层	指标层
国土空间利用效率	生产空间利用效率	投入	生产空间用地面积/km ²
			第一、二产业从业人数/(10 ⁴ 人)
			农用薄膜使用量/10 ⁴ t
			化肥施用量/10 ⁴ t
			第一、二产总产值/(10 ⁸ 元)
	生活空间利用效率	产出	农民人均可支配收入/元
			碳排放量/10 ⁴ t
			生活空间用地面积/km ²
			投入
			第三产业从业人口数/(10 ⁴ 人)
生态空间利用效率	投入	一般公共预算支出/(10 ⁸ 元)	
		第三产业 GDP/(10 ⁸ 元)	
		产出	
		居民人均可支配收入/元	
		碳排放量/10 ⁴ t	
生态空间利用效率	投入	生态空间用地面积/km ²	
		造林面积/hm ²	
		林业产值/(10 ⁸ 元)	
生态空间利用效率	产出	生态系统服务价值/(10 ⁸ 元)	
		碳吸收量/10 ⁴ t	

在各子系统利用效率的基础上得出云南省国土空间利用效率,计算公式为:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \cdot v_i \quad (9)$$

式中: E 为国土空间利用效率; E_i 分别为生产、生活、生态空间利用效率; v_i 为权重值,通过熵值法,最终确定生产、生活、生态空间利用效率对应的权重分别为 0.20, 0.25, 0.55。

2 结果与分析

2.1 云南省国土空间碳排放/吸收量及其碳效益特征分析

2.1.1 碳排放/吸收量特征分析 根据公式(1)~(3)

可得 2020 年云南省各州市“三生”空间的碳排放/吸收量(图 2),云南省 2020 年碳排放量为 1.23×10^8 t,其中生产空间碳排放量 1.19×10^8 t,生活空间碳排放量 3.75×10^6 t,生产空间对碳排放的贡献远远多于生活空间。从各州市来看,碳排放量最大的地区为昆明市,为 3.30×10^7 t,占全省碳排放量的 1/4,其次是曲靖市和红河州,分别为 1.50×10^7 t 和 1.20×10^7 t,究其原因,昆明市作为省会城市,是云南省经济活动和能源消费的中心,故其碳排放量位于 16 州市之首,曲靖、红河是云南省经济发展的核心区域,除此之外碳排放总量位居前列或许也与该地的煤化工基地建设、能源消耗巨大有关;碳排放量较小的地区为怒江州、迪庆州,分别为 1.06×10^6 t 和 1.32×10^6 t,仅占全省碳排放量的 0.86% 和 1.07%,这些地区地处三江并流区,生态环境极其脆弱,高污染的工厂企业较少,故而碳排放量较少。

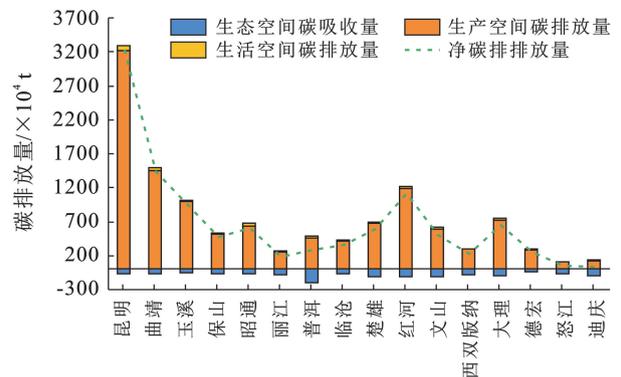


图 2 2020 年云南省各州市国土空间碳排放/吸收量
Fig.2 Carbon emissions and absorption amounts in territorial space of each prefecture and city in Yunnan Province in 2020

从碳吸收量来看,云南省 2020 年碳吸收量为 1.40×10^7 t,约为碳排放量的 1/10。省内碳吸收量较大地区主要分布于南部、西北部,这是因为南部与西北部山脉林地众多,碳汇资源良好。从各州市看,碳吸收量最大的地区为普洱市,为 1.95×10^6 t,德宏州碳吸收量最低,碳吸收量仅有 4.15×10^5 t。

净碳排放量是指碳排放量与碳吸收量之间的差值。2020 年云南省净碳排放量为 1.09×10^8 t,各州市均为正值。可见,云南省碳吸收量不足以抵消碳排放量,省内不能维持碳平衡,今后应将控制碳排放作为工作重心并采取相应措施促进碳吸收量的增加。

2.1.2 碳效益特征分析 依据碳效益核算公式,得到 2020 年云南省各州市的碳排放经济贡献系数(ECC)和碳吸收生态承载系数(ESC),结果如表 3 所示。云南省各州市的碳排放经济贡献系数(ECC)相差不大,最高值为昆明市的 1.03,最低值为临沧市的

0.95,这与昆明市严格的环境规制以及产业转型升级带来的能源利用效率提升有关,该省只有 6 个州市的

经济贡献系数在 1 及 1 以上,说明当前大部分州市的碳生产能力较低,碳排放对经济发展的贡献也较小。

表 3 2020 年云南省各州市碳效益核算及国土空间利用效率测算结果
Table 3 Calculation results of carbon benefit and measurement results of utilization efficiency of territorial space in each prefecture and city of Yunnan Province in 2020

州市名称	碳效益核算结果		国土空间利用效率测算结果			
	碳排放经济贡献系数(ECC)	碳吸收生态承载系数(ESC)	生产空间利用效率	生活空间利用效率	生态空间利用效率	国土空间利用效率
昆明市	1.03	0.16	1.27	1.23	0.74	0.97
曲靖市	0.99	0.38	1.04	0.65	0.54	0.67
玉溪市	1.02	0.49	1.44	1.07	1.00	1.11
保山市	0.98	1.06	1.18	0.57	0.64	0.73
昭通市	0.96	0.85	0.62	0.40	0.49	0.49
丽江市	0.97	2.89	0.52	0.70	0.82	0.73
普洱市	0.98	3.66	0.60	0.81	1.01	0.88
临沧市	0.95	1.52	0.59	0.85	0.61	0.66
楚雄州	1.00	1.39	1.05	0.75	0.76	0.81
红河州	1.00	0.80	0.73	0.71	0.68	0.70
文山州	0.97	1.64	0.56	0.73	0.56	0.60
西双版纳州	0.99	2.57	1.32	1.12	1.61	1.43
大理州	0.99	1.19	1.10	0.60	0.87	0.85
德宏州	0.98	1.28	0.55	0.75	1.06	0.88
怒江州	1.00	5.21	1.22	1.42	0.75	1.01
迪庆州	1.02	6.16	1.23	1.31	1.16	1.21

各州市碳吸收生态承载系数(ESC)相差较大,最高值为迪庆州的 6.16,最低值是昆明市,为 0.16,前者几乎是后者的 40 倍,说明云南省内部碳汇能力差异明显。生态承载系数大于等于 1 的区域比经济贡献系数大于等于 1 的区域多,这些区域碳排放强度较低,但具备较高的碳汇能力,在云南省的碳减排工作中发挥着不可替代的作用。

总的来说,目前云南省碳排放量远远超过碳吸收量,各州市碳排放、碳吸收效益差异明显,全省除迪庆州满足 ECC 和 ESC 均大于 1,其他地区都存在经济贡献率或生态承载力过低的现象,说明当前云南省仍处于快速排碳、经济发展与生态保护较为严峻的发展阶段。碳排放/吸收量的核算是后续构建低碳视角下国土空间利用效率评价指标体系的基础,各州市的碳效益差异是进行低碳视角下国土空间综合分区的依据之一,可以为提出差异化的减排增汇措施提供参考。

2.2 云南省国土空间利用效率分析

将国土空间 3 个子系统的投入—产出指标分别代入非期望超效率 SBM 模型,并借助 Maxdea 软件得到 2020 年云南省 16 个州市的生产、生活和生态空间利用效率,并进一步应用熵值法得到国土空间利用效率(图 3)。

从国土空间单项利用效率来看,2020 年云南省生产空间利用效率为 0.642。具体到各州市,为便于对各州市进行比较,借助自然断点法将效率值从高到低分为 3 类:高效率(1.179~1.44)、中等效率(0.735~1.178)、低效率(0.519~0.734)。生产空间利用高效率主要分布在滇中和滇西北地区,包括昆明、玉溪、西双版纳、怒江和迪庆 5 个地州市。其中,昆明市和玉溪市自身有优厚的经济条件和较为完善的基础设施建设,市内分布有多个产业园区和基地,且当地对资源的节约集约利用等,是生产空间高效利用的重要原因;对于经济发展水平较低但利用效率较高的西双版纳、怒江和迪庆,虽然其生产空间用地面积狭小,第一、二产业从业人数较少,但产出与投入相匹配并且所产生的碳排放量也为省内最少。生产空间利用低效率的有丽江、德宏、临沧、普洱、红河、文山、昭通 7 个州市,低效利用的原因在于辖区内生产空间资源配置较差,生产过程中的第一、二产业产值产出不足加之非期望产出碳排放量过大。其余 4 个州市包括保山、大理、楚雄和曲靖均属于生产空间利用效率中等水平,尚有提升空间。

2020 年云南省生活空间利用效率为 0.629。同理,为便于比较,借助自然断点法将效率值分为 3 类:

高效率(0.852~1.41)、中等效率(0.599~0.851)、低效率(0.401~0.598)。具体来看,2020年,云南省各州市生活空间利用高效率的有迪庆、怒江、昆明、玉溪和西双版纳。迪庆和怒江位于省内山谷纵横交错的地带,生活空间用地面积狭小,虽然各项评价指标基数都不大,但是得益于国家财政和省内政策的扶持,这些地区产出率较高,并且碳排放量较低,因此为生活空间利用高效率。而昆明和玉溪,究其原因,在于这两个地区在资金投入,居住和社会公共服务等方面具有得天独厚的优势,居民人均可支配收入位于全省前列;生活空间利用中等效率的有德宏、临沧、普洱、楚雄、丽江、曲靖和红河7个州市,所占数量接近省内地级市的1/2,是后续开发过程中仍需优化改善的地区;生活空间利用低效率的有昭通、保山、大理,其中,昭通和保山是省内人地矛盾较为突出的地区,地区经济欠发达,居民可支配收入较少且碳排放量高,投入与产出不匹配,因此利用效率较低。

2020年云南省生态空间利用效率为0.622。同理,为便于比较,借助自然断点法将效率值分为3类:高效率(0.874~1.61)、中等效率(0.678~0.873)、低效率(0.49~0.677)。具体来看,省内有超过1/2的州市生态空间利用效率水平在中等及以上,这与省内较高的生态环境质量和高植被覆盖率有密切关系。高效率地区分布于西北部和南部地区,包括德宏、迪庆、普洱、西双版纳和玉溪市,相对于省内其他城市,这些地区城市规模相对较小同时主导产业污染较小,林地面积大,森林覆盖率在全省名列前茅,生态资源本底丰富;低效率地区分布于人类活动强度大、石漠化严重的滇东和滇西地区,包括保山市、临沧市、红河州、文山市、曲靖市和昭通市,可见,改善以上地区的生态环境、提高其生态空间利用效率对促进区域可持续发展具有重要意义。

从国土空间利用效率来看(图3),2020年云南省国土空间利用效率为0.628。同理,为便于比较,借助自然断点法将效率值分为3类:高效率(1.02~1.44)、中等效率(0.734~1.01)、低效率(0.494~0.733)。综合来看,省内仅迪庆、玉溪和西双版纳3个州市达到国土空间利用高效率,最高效率值为1.43,3个州市中玉溪市地处滇中城市群,在发展经济的同时注重生态保护,净碳排放量相对较少,因此处于国土空间利用高效率水平;迪庆和西双版纳地区虽经济发展不如玉溪市,但是其国土空间利用过程中投入与产出相匹配,加之主导产业污染不严重,生态资源本底较好,因此也达到了高效率水平,由此可以看出国土空间利用效率与地区的经济发展水平及其规模大小并无必然

联系。省内国土空间利用低效率州市主要分布在滇东和滇西、滇西南地区,包括丽江、保山、临沧、昭通、曲靖、文山、红河地区,最低为昭通地区,仅为0.49,超过4/5的地级市利用效率为中等及低效率水平,表明当前云南省国土空间利用仍较为粗放,利用效率还有很大提升潜力。这些州市国土空间利用低效率一方面在于所处地区多为山区,地形起伏度大,较差的自然地理条件下不利于国土空间开发利用,另一方面是在快速发展的机遇背景下,相比生态建设这些地区更加注重经济发展,同时现代化工业、农业建设基础较差,碳排放污染严重,在一定程度上影响了国土空间利用效率。

总的来说,云南省16个州市生产、生活和生态的投入与产出之间存在差距,造成了国土空间各子系统利用效率的区域差异,当前省内国土空间利用效率较低,投入产出的不匹配导致了国土资源的浪费,国土空间利用还有很大的提升潜力,这种利用效率的区域差异也为后续国土空间综合分区提供了重要分区依据。

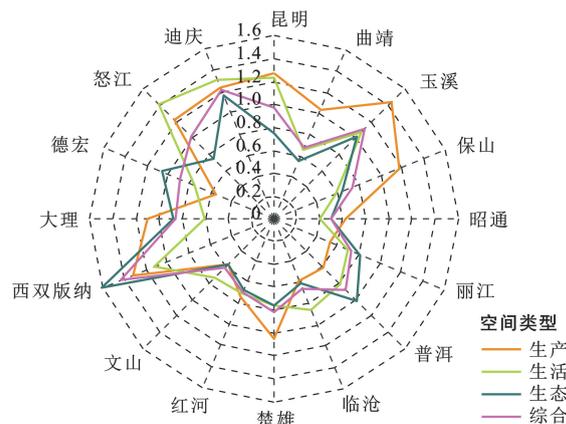


图3 基于“三生”空间的云南省各州市国土空间利用效率测度
Fig.3 Measurement of territory spatial utilization efficiency in prefectures and cities of Yunnan Province based on productive-livelihood-ecology space

2.3 低碳视角下云南省国土空间综合利用分区与优化建议

以碳排放经济贡献系数(ECC)、碳吸收生态承载系数(ESC)和国土空间利用效率为依据,进行低碳视角下的云南省国土空间综合分区。

首先将碳排放经济贡献系数(ECC)和碳吸收生态承载系数(ESC)以1为划分标准,将云南省分为低碳保持区、碳汇功能区、碳强度控制区和高碳优化区4个碳中和分区(表4),在此基础上叠加各州市国土空间利用效率等级划分国土空间综合分区(图4),并从“低碳”+“高效”两个角度对各个分区提出差异化优化策略。

当 $ECC > 1$, $ESC > 1$ 且国土空间利用效率值 > 1.02 时为低碳保持—高效率区, 该区社会经济发展与生态保护相对均衡, 仅有迪庆州一个地州市。迪庆是省内碳排放量较少但碳吸收量相对较多的城市, 立足于自然资源条件, 形成了“农—旅”结合发展新态势, 实现了国土空间的高效利用。该类地区应在保持当

前经济发展与环境相对和谐的前提下, 加强生态空间管控, 继续发挥该区域对保障云南省碳汇总量的重要作用, 在区域自然本底特色的基础上大力发展第三产业, 实现碳汇资源优势转变为经济发展优势, 规划提高生产、生活空间利用效率, 促进生态—生产—生活 3 类空间协同高效发展。

表 4 云南省碳中和分区

Table 4 Carbon neutral zoning of Yunnan Province

碳分区	划分依据	区域特征
低碳保持区	$ECC > 1$, $ESC > 1$	ECC 和 ESC 均较大, 即该区域具备良好的绿色发展基础
碳汇功能区	$ECC < 1$, $ESC > 1$	区域碳汇资源丰富、碳汇能力强, 但 ECC 较小
碳强度控制区	$ECC > 1$, $ESC < 1$	ECC 较大而 ESC 较小, 即该区域碳排放量较大, 是潜在碳源区域
高碳优化区	$ECC < 1$, $ESC < 1$	ECC 和 ESC 均较小, 即该区域碳生产能力较小, 碳吸收能力也较小

当 $ECC < 1$, $ESC > 1$ 且国土空间利用效率值 > 1.02 时为碳汇功能—高效率区, 该区域的典型城市为西双版纳, 其森林资源丰富, 固碳能力较强, 主要以第三产业旅游服务业为主, 增固减排潜力大, 但区域碳排放经济效益较低。该类地区应在严格保护现有固碳资源、保障生态功能的情况下, 注重新旧动能转换, 推进产业结构的转型升级, 淘汰高污染和高耗能产业, 加强对存量空间的开发利用, 提高国土空间的利用效率, 提升区域的经济效益并发挥好其在全省的碳汇作用。

当 $ECC < 1$, $ESC > 1$ 且国土空间利用效率值处于 $(0.734 \sim 1.01)$ 时为碳汇功能—中等效率区, 与碳汇功能—高效率区相比, 该区域由于某一子系统利用效率低下导致其国土空间利用效率处于中等水平。这类地区包括怒江、德宏、大理、楚雄和普洱, 其固碳能力较强, 但国土空间利用效率不高, 如怒江植被覆盖率极高, 碳吸收量较高, 但大面积的生态保护区一定程度上限制了区域的经济的发展, 生产、生活空间利用效率较低。该类地区应着重关注“三生”空间的均衡发展, 推进新型环保产业、生态旅游等的落地发展, 科学规划发展用地, 建设特色低碳农业区和特色生态旅游区, 提升碳排放的经济效益。

当 $ECC < 1$, $ESC > 1$ 且国土空间利用效率值 < 0.733 时为碳汇功能—低效率区, 该区域与碳汇功能—高效率区、碳汇功能—中等效率区相比, 国土空间利用效率差距明显, “三生”空间各子系统均存在不同程度的问题, 这类地区包括文山、临沧、保山和丽江。如文山虽然发展了三七种植和以绿色食品为代表的现代农业, 但由于石漠化广泛分布对耕作及基础设施建设等活动的开展造成了较大阻碍。该类因自然条件限制导致国土空间利用效率低下的地区, 应在保障城市基本发展建设需求的同时, 对一些非必要、

非紧急性质的建设项目用地加强管理审批, 避免区域过度开发建设, 降低单位产出的能耗, 提升区域土地集约节约利用水平。

当 $ECC > 1$, $ESC < 1$ 且国土空间利用效率值 > 1.02 时为碳强度控制—高效率区, 该区域经济发展较好同时国土空间利用效率较高, 但碳排放量较大, 是潜在的碳源区域。典型城市为玉溪, 其两大支柱产业为烟草和矿冶, 工业能源碳排放占比相对较大, 烟草行业的发展极大推动了区域经济建设, 带动了社会基础设施建设及相关服务的完善。该类地区应凭借较好的产业基础推动产业结构向低碳化转变, 避免三大产业发展失衡并控制高碳排产业的增长, 严格保护生态资源, 规划增加生态用地以增强区域碳吸收能力, 力求实现区域碳平衡。

当 $ECC > 1$, $ESC < 1$ 且国土空间利用效率值处于 $(0.734 \sim 1.01)$ 时为碳强度控制—中等效率区。该类地区以昆明市为代表, 其产业构成以二、三产业为主, 第一产业发展相对薄弱, 碳排放量较高而碳汇功能有限, 生产空间利用效率较低, 从而导致其国土空间利用效率仅为中等水平。该类地区应着重提升建设用地集约利用水平, 扩大区域绿色空间, 增强区域固碳能力, 引入现代化农业技术提升生产用地利用效率的同时发挥产业集聚效应, 以经济发展带动生态、生活全面发展。

当 $ECC < 1$, $ESC < 1$ 且国土空间利用效率值 < 0.733 时为高碳优化—低效率区。该类地区碳生产、碳吸收能力均较低, 同时国土空间利用效率低下, 包括曲靖、昭通和红河。该类地区在面对双碳及高效发展目标时应当加大对生态环境保护的投入, 限制高碳排与低能源利用率产业的无序发展, 并且在引进其他地区低碳发展的技术经验、适量扩大生产要素投入

规模实现规模经济的同时,加速技术转型,均衡国土空间发展,形成可持续的绿色发展模式。

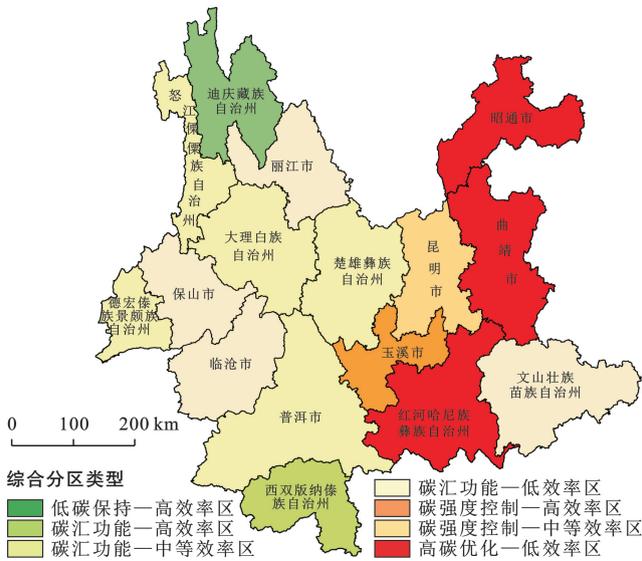


图4 低碳视角下云南省国土空间综合分区

Fig.4 Comprehensive zoning of territorial space in Yunnan Province from a low-carbon perspective

3 结论

(1) 基于“三生”空间对2020年云南省碳排放进行核算,计算得到云南省碳排放量为 1.23×10^8 t,其中生产空间对碳排放的贡献远多于生活空间,前者几乎是后者的31倍,碳吸收量为1400 t,约为碳排放量的1/10,碳吸收不足以抵消碳排放。

(2) 通过分析单项效率可知,2020年云南省16个州市中生产空间利用效率相对较高,为0.642,各地区生活空间利用效率差异较大并且差异背后的原因各不相同,生态空间利用效率为0.622;整体来看,全省国土空间利用效率处于较低水平,为0.628,16个州市中仅西双版纳、迪庆和玉溪达到高效率水平。可见,国土空间利用效率与地区经济发展水平及规模大小并无必然联系,当前云南省国土空间利用仍较为粗放,利用效率还有很大提升潜力。

(3) 依据碳效益划分碳分区,并与国土空间利用效率结合的低碳视角下国土空间综合分区的方法可行,最终将云南省16个州市分为7个国土空间综合分区,分别为:低碳保持—高效率、碳汇功能—高效率、碳汇功能—中等效率、碳汇功能—低效率、碳强度控制—高效率、碳强度控制—中等效率和高碳优化—低效率区,同时提出了差异化碳减排对策,为区域国土空间低碳发展及高效利用提供参考。

4 讨论

在碳排放核算方面,目前已有学者基于“三生”空

间进行碳排放的核算^[22-23],说明该方法具备科学性与合理性,但不同的核算方法和核算角度,其核算的数值存在一定的差异。本研究所得结果,碳排放高值区主要分布在滇中地区,碳吸收高值区主要分布于滇西北和滇南的高原山地地区,这和李志英等^[24]的研究结果一致;就碳吸收核算而言,各研究对于碳吸收核算结果仍有较大歧义和争论^[25],与相关研究相比,本研究的碳吸收核算结果为 1.40×10^7 t,远低于省域尺度的中国生态用地碳汇核算结果(云南省为 1.60×10^8 t)^[26],但与李志英等^[24]的云南省土地利用碳吸收核算结果(约为 1.30×10^7 t)相近,这主要在于前者的碳吸收系数是基于全国尺度确定的,且将湿地碳吸收量单独作为一类进行核算,本研究碳吸收系数结合研究区实际的经纬度及地理状况进行修正,与后者的碳吸收系数相近,核算结果更加贴近云南省的实际情况,本研究核算方法科学、合理。

在国土空间利用效率测度方面,本文将利用过程中产生的碳排放/吸收量纳入指标体系,构建低碳视角下的国土空间利用效率评价指标体系,对2020年云南省16个州市的国土空间利用效率进行测度,这为探索“双碳”目标导向下的利用效率提供了参考,具有一定的理论意义和现实意义,但由于部分数据的获取限制,该套测度指标体系尚有一定的局限性,有关测度指标体系有待进一步完善。具体到本文的测度结果,2020年云南省国土空间利用效率处于较低水平,各州市国土空间利用效率与地区的经济发展水平及其规模大小并无必然联系,经济发展相对落后、规模较小的城市也能达到较高的效率水平,该研究结果与相似年份、相同研究区域的分析^[27]基本一致。

在国土空间综合分区方面,学术界有关低碳视角下国土空间分区管治的研究刚刚逐步开展,主要集中在碳排放强度分区及碳平衡分区上^[28-29],分区依据较为单一,难以体现分区的综合性。在“双碳”目标及生态文明建设背景下,减排增汇和高效利用都是国土空间分区管治中需要纳入的重点。因此,本研究在划分碳中和分区的基础上,结合国土空间利用效率等级构建综合分区方案,有助于区别各分区的发展导向,使分区结果更加科学、合理,进而可以针对各分区的特征,从“低碳”和“高效”两个方面提出差异化、精准化的管治策略,对于打造协同高效的国土空间格局,实现国土空间利用的低碳绿色转型具有重要意义,但本文针对各分区所提的管治策略实施的正确性和合理性仍需要在实践应用中予以证明。

参考文献 (References)

[1] Liu Yansui, Zhang Ziwen, Zhou Yang. Efficiency of

- construction land allocation in China: An econometric analysis of panel data [J]. *Land Use Policy*, 2018, 74: 261-272.
- [2] 盖兆雪,孙萍,张景奇.环境约束下的粮食主产区耕地利用效率时空演变特征[J].*经济地理*,2017,37(12):163-171.
Gai Zhaoxue, Sun Ping, Zhang Jingqi. Cultivated land utilization efficiency and its difference with consideration of environmental constraints in major grain producing area [J]. *Economic Geography*, 2017, 37(12):163-171.
- [3] 任宇飞,方创琳.京津冀城市群县域尺度生态效率评价及空间格局分析[J].*地理科学进展*,2017,36(1):87-98.
Ren Yufei, Fang Chuanglin. Spatial pattern and evaluation of eco-efficiency in counties of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration [J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(1):87-98.
- [4] 金贵,邓祥征,赵晓东,等.2005—2014年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J].*地理学报*,2018,73(7):1242-1252.
Jin Gui, Deng Xiangzheng, Zhao Xiaodong, et al. Spatio-temporal patterns of urban land use efficiency in the Yangtze River Economic Zone during 2005—2014 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7):1242-1252.
- [5] 梁流涛,雍雅君,袁晨光.城市土地绿色利用效率测度及其空间分异特征:基于284个地级以上城市的实证研究[J].*中国土地科学*,2019,33(6):80-87.
Liang Liutao, Yong Yajun, Yuan Chengguang. Measurement of urban land green use efficiency and its spatial differentiation characteristics: An empirical study based on 284 cities [J]. *China Land Science*, 2019, 33(6):80-87.
- [6] 侯孟阳,姚顺波.中国城市生态效率测定及其时空动态演变[J].*中国人口·资源与环境*,2018,28(3):13-21.
Hou Mengyang, Yao Shunbo. Measurement and temporal-spatial dynamic evolution of urban eco-efficiency in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(3):13-21.
- [7] 徐维祥,徐志雄,刘程军.黄河流域地级城市土地集约利用效率与生态福利绩效的耦合性分析[J].*自然资源学报*,2021,36(1):114-130.
Xu Weixiang, Xu Zhixiong, Liu Chengjun. Coupling analysis of land intensive use efficiency and ecological well-being performance of cities in the Yellow River basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1):114-130.
- [8] 李永乐,舒帮荣,吴群.中国城市土地利用效率:时空特征、地区差距与影响因素[J].*经济地理*,2014,34(1):133-139.
Li Yongle, Shu Bangrong, Wu Qun. Urban land use efficiency in China: Spatial and temporal characteristics, regional difference and influence factors [J]. *Economic Geography*, 2014, 34(1):133-139.
- [9] 张雯熹,邹金浪,吴群.城市土地利用效率研究进展[J].*长江流域资源与环境*,2019,28(9):2030-2039.
Zhang Wenxi, Zou Jinlang, Wu Qun. A literature study of urban land use efficiency [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(9):2030-2039.
- [10] 王凤娟,魏晓,苏昌贵,等.我国国土空间规划分区研究热点及展望[J].*经济地理*,2022,42(2):84-92.
Wang Fengjuan, Wei Xiao, Su Changgui, et al. Research hotspots and prospect of land spatial planning zoning in China [J]. *Economic Geography*, 2022, 42(2):84-92.
- [11] 李缘缘,魏伟,周俊菊,等.中国土地利用碳排放变化及协调分区[J].*环境科学*,2023,44(3):1267-1276.
Li Yuanyuan, Wei Wei, Zhou Junju, et al. Changes in land use carbon emissions and coordinated zoning in China [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(3):1267-1276.
- [12] 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.
Wei Yanru, Chen Songlin. Spatial correlation and carbon balance zoning of land use carbon emissions in Fujian Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14):5814-5824.
- [13] 李璐,董捷,徐磊,等.功能区土地利用碳收支空间分异及碳补偿分区:以武汉城市圈为例[J].*自然资源学报*,2019,34(5):1003-1015.
Li Lu, Dong Jie, Xu Lei, et al. Spatial variation of land use carbon budget and carbon compensation zoning in functional areas: A case study of Wuhan Urban Agglomeration [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(5):1003-1015.
- [14] 朱明佳.云南省城市土地集约利用水平时空分异特征及影响因素研究[D].云南昆明:云南财经大学,2022.
Zhu Mingjia. Spatial-temporal differentiation and influencing factors of urban land intensive use level in Yunnan Province [D]. Kunming, Yunnan: Yunnan University of Finance and Economics, 2022.
- [15] 田云,张俊飏,李波.中国农业碳排放研究:测算、时空比较及脱钩效应[J].*资源科学*,2012,34(11):2097-2105.
Tian Yun, Zhang Junbiao, Li Bo. Agricultural carbon emissions in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects [J]. *Resources Science*, 2012, 34(11):2097-2105.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 匡耀求,欧阳婷萍,邹毅,等.广东省碳源碳汇现状评估及增加碳汇潜力分析[J].中国人口·资源与环境,2010,20(12):56-61.
- Kuang Yaoqiu, Ouyang Tingping, Zou Yi, et al. Present situation of carbon source and sink and potential for increase of carbon sink in Guangdong Province [J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(12):56-61.
- [19] 刘刚,沈镭.中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J].自然资源学报,2007,22(1):9-19.
- Liu Gang, Shen Lei. Quantitative appraisal of biomass energy and its geographical distribution in China [J]. Journal of Natural Resources, 2007,22(1):9-19.
- [20] 鄂施璇,李琴,张露洋.三峡库区1980—2021年土地利用碳排放格局及碳补偿[J].水土保持通报,2023,43(1):300-306.
- E Shixuan, Li Qin, Zhang Luyang. Land use carbon emission pattern and carbon compensation in Three Gorges Reservoir area during 1980—2021 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(1):300-306.
- [21] 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.
- Sun He, Liang Hongmei, Chang Xueli, et al. Land use patterns on carbon emission and spatial association in China [J]. Economic Geography, 2015,35(3):154-162.
- [22] 郭莉,白丽芳,王超越,等.基于“三生空间”的重庆市碳排放增长机理及趋势预测[J].环境污染与防治,2022,44(6):816-823.
- Guo Li, Bai Lifang, Wang Chaoyue, et al. Growth mechanism and trend prediction of carbon emission in Chongqing based on production-living-ecological space [J]. Environmental Pollution & Control, 2022,44(6): 816-823.
- [23] 范清瑶,夏卫生,莫成鑫,等.基于“三生空间”的土地利用转型时空演变及其碳排放效应研究:以福建省为例[J].生态环境学报,2023,32(12):2183-2193.
- Fan Qingyao, Xia Weisheng, Mo Chengxin, et al. Study on transition of land use function and its carbon emission effect repose based on the conception of “production, living and ecological space”: A case study of Fujian Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023,32(12):2183-2193.
- [24] 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.
- 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.
- [25] 朴世龙,何悦,王旭辉,等.中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望[J].中国科学:地球科学,2022,52(6):1010-1020.
- Piao Shilong, He Yue, Wang Xuhui, et al. Carbon sequestration estimation of terrestrial ecosystem in China: Method, progress and prospect [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022,52(6):1010-1020.
- [26] 高威,李强,蒲雨池,等.中国生态用地碳汇时空演进及综合分区研究[J].生态环境学报,2023,32(9):1537-1551.
- Gao Wei, Li Qiang, Pu Yuchi, et al. Temporal-spatial evolution and comprehensive zoning of carbon absorption of ecological land in China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023,32(9):1537-1551.
- [27] 温婷.云南省城市土地利用效率与土地生态安全耦合协调研究[D].云南昆明:云南财经大学,2023.
- Wen Ting. Research on coupling coordination between urban land use efficiency and land ecological security in Yunnan Province [D]. Kunming, Yunnan: Yunnan University of Finance and Economics, 2023.
- [28] 张正峰,张栋.基于社会网络分析的京津冀地区碳排放空间关联与碳平衡分区[J].中国环境科学,2023,43(4):2057-2068.
- Zhang Zhengfeng, Zhang Dong. Spatial relatedness of CO₂ emission and carbon balance zoning in Beijing Tianjin Hebei Counties [J]. China Environmental Science, 2023,43(4):2057-2068.
- [29] 周嘉,王钰萱,刘学荣,等.基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J].地理科学,2019,39(12):1955-1961.
- Zhou Jia, Wang Yuxuan, Liu Xuerong, et al. Spatial temporal differences of carbon emissions and carbon compensation in China based on land use change [J]. Scientia Geographica Sinica, 2019,39(12):1955-1961.