

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2025.03.002

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:汪哲宇,曹萍,韩力,汪向楠.县域尺度的土地利用碳排放时空变化特征及影响因素研究——以陕西省为例[J].西安理工大学学报,2025,41(3):314-323,389.

WANG Zheyu, CAO Ping, HAN Li, WANG Xiangnan. Study on the characteristics of spatial and temporal changes of land use carbon emission and influencing factors at the county scale: taking Shaanxi Province as an example[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2025, 41(3): 314-323, 389.

县域尺度的土地利用碳排放时空变化特征 及影响因素研究 ——以陕西省为例

汪哲宇, 曹萍, 韩力, 汪向楠

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 县域层级的土地利用碳排放研究对于实现“双碳”目标至关重要,有助于分解减碳目标,从而实现精细管控,并提高减排措施的精准性和有效性。本研究以陕西省为对象,利用夜间灯光、土地利用、能源消费等数据估算 2000—2020 年陕西省县域土地利用碳排放,分析其时空变化特征,并采用地理探测器对其影响因素进行分析。结果表明:2000—2020 年陕西省土地利用时空变化显著,建设用地增加了 113.19%,耕地减少了 9 692.751 6 km²;碳排放总量在 20 年间增长了 8.66 倍,建设用地是主要的碳排放来源,林地在碳汇中贡献显著,空间上呈现陕北>关中>陕南的格局;财务状况、经济发展水平、区域投资水平、土地利用结构及城市发展水平是陕西省土地利用碳排放的关键因素,且双因素的交互作用强于单因素。

关键词: 土地利用碳排放; 县域尺度; 影响因素; 地理探测器; 陕西省

中图分类号: X24

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2025)03-0314-10

Study on the characteristics of spatial and temporal changes of land use carbon emission and influencing factors at the county scale: taking Shaanxi Province as an example

WANG Zheyu, CAO Ping, HAN Li, WANG Xiangnan

(College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The study of land-use carbon emissions at the county level is crucial to the realization of the “double-carbon” goal, which helps to decompose the national carbon reduction target, thus realizing a fine control and improving the precision and effectiveness of emission reduction measures at the county level. This study takes Shaanxi Province as an object, and uses nighttime lighting, land use, energy consumption and other data to estimate county land use carbon emissions in Shaanxi Province from 2000 to 2020, analyzes its spatial and temporal change characteristics, and explores its influencing factors by using Geo Detector. The results show that: the spatial and temporal changes of land use in Shaanxi Province from 2000 to 2020 are of significance, the construction land increased by 113.19%, and the arable land decreased by 9 692.751 6 km²; the total carbon emission increased by 8.66 times in 20 years, the construction land is the main source of carbon emission, and the forest land contributes significantly to carbon sinks, and spa-

收稿日期: 2024-10-17; 网络首发日期: 2025-01-27

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20250126.1711.002>

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2023MD744242); 陕西省关键核心技术攻关项目(2024SF2-GJHX-10)

第一作者: 汪哲宇,男,硕士生,研究方向为低碳城市规划。E-mail: 23204110052@stu.xust.edu.cn

通信作者: 曹萍,女,博士,教授,研究方向为零碳建造、智能建造、碳中和园区。E-mail: caoping@xust.edu.cn

tially presents the pattern of Northern Shaanxi > Guanzhong > Southern Shaanxi; the financial status, economic development level, regional investment level, land use structure and urban development level are the key factors for land use carbon emission in Shaanxi Province, and the interaction of dual-influence factors is higher than that of single-influence factors.

Key words: land use carbon emissions; county scale; influencing factors; GeoDetector; Shaanxi Province

近年来,温室气体排放增多所引发的全球变暖已成为当今世界面临的重要问题之一。气温上升引发的生物多样性减少、灾害性气候频发等生态问题,已经威胁到人类的可持续发展。土地利用深刻影响着生态系统内的物质循环和能量流动,它改变了生态系统的结构、过程和功能,并影响其碳排放。此外,能源使用和工业过程带来的碳排放中有很大部分与土地利用模式密切相关。因此,土地利用碳排放研究对减缓全球变暖和实现“双碳”目标至关重要。

国内外学者对土地利用碳排放的研究主要集中在碳排放核算、时空特征和尺度以及影响因素方面。碳排放核算方面,主要采用簿记模型^[1]、样地清查法^[2]和排放清单法^[3]等进行核算。排放清单法因简单、实用且适用范围广,得到了广泛应用。碳排放时空特征方面,主要调查不同时期、不同土地利用类型的碳排放,包括草地^[4]、水域^[5]、建设用地^[6]和工业用地^[7],不同类型的土地利用之间存在显著的碳排放差异。草地、林地和水域被认为是主要的碳汇,建设用地和耕地被认为是主要的碳源。研究尺度方面,现有研究通常都是在全球^[8]和国家^[9]尺度上进行的,国内学者的研究则主要集中在国家和省域尺度^[10]。受统计数据所限,县域尺度的土地利用碳排放研究难以开展。遥感技术的进步揭示了夜间灯光亮度与能源消费碳排放之间存在较强的正相关关系^[11],利用夜间光数据可以将能源消费碳排放数据转换为更小尺度的数据,这为县域尺度的土地利用碳排放研究提供了思路。碳排放影响因素方面,常用的方法包括对数平均迪氏指数(LMDI)模型^[12]、IPAT模型^[13]、STIRPAT模型^[14]和地理加权回归模型(GWR)^[15],这些方法多以单一因素为视角来探讨各因素对土地利用碳排放的独立影响,而较少考虑不同因素间的交互作用对土地利用碳排放的综合影响。地理探测器考虑了空间效应,可以探究不同影响因素对土地利用碳排放的交互作用,对探究土地利用碳排放的影响机理具有重要意义^[16]。

综上所述,本研究将利用夜间灯光、土地利用、能源消费等数据来估算陕西省县域土地利用碳排放,从县域尺度上分析其时空变化特征,并利用地理探测器对其影响因素进行分析,最后根据空间异质

性提出差异化的低碳发展路径。

1 研究区及方法

1.1 研究区概况

陕西省地处我国地理中心,位于黄河中游,面积 205 624.30 km²,是西北地区的中心省份。陕西省地形类型丰富,包括平原、山地、高原和盆地,南部和北部海拔较高,中部海拔较低。截至 2023 年底,陕西省常住人口 3 952 万,GDP 总量 33 786.07 亿元。由于地形、气候和经济水平差异显著,陕西省被划分为陕北、关中和陕南三个区域,陕北黄土高原包括延安市和榆林市,关中平原包括西安市、宝鸡市、渭南市、铜川市、咸阳市,陕南山区包括商洛市、安康市和汉中市。陕西省下辖 10 个地级市与 1 个示范区(杨凌农业高新技术产业示范区),共 107 个县(区)。研究区的地理位置如图 1 所示。

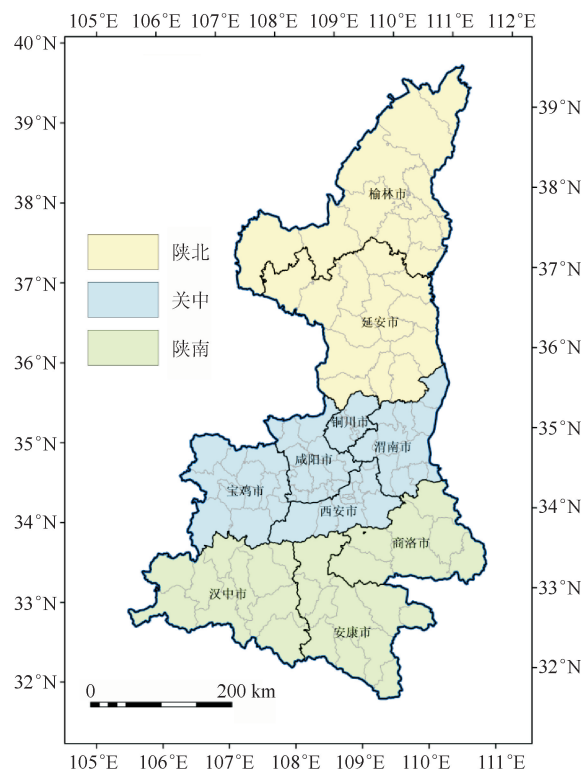


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview map of the study area

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2024)0650 的标准地图制作,底图无修改。

1.2 数据来源

本研究所采用的数据包括:土地利用数据、夜间灯光数据、社会经济数据、归一化植被指数(NDVI)数据和能源消费数据。土地利用数据来源于 1985—2022 年 30m 中国土地覆盖数据集(CLCD)^[17]。夜间灯光数据来源于全球 500m 分辨率的“类 NPP-VIIRS”夜间灯光数据集^[18]。社会经济数据来源于 2001—2021 年《陕西省统计年鉴》《中国县域统计年鉴》、陕西省各地级市统计年鉴、各地级市国民经济和社会发展统计公报。能源消费数据来源于《中国能源统计年鉴》。归一化植被指数(NDVI)数据来源于 2000—2022 年中国 30m 年最大 NDVI 数据集^[19]。

1.3 研究方法

1.3.1 碳排放核算方法

土地利用碳排放包括直接排放和间接排放。直接排放是指土地利用自身结构变化所引起的碳排放,间接排放是指土地利用活动中产生的人为碳排放。耕地、林地、草地、水域和未利用地的碳排放使用直接碳排放系数进行估算,建设用地碳排放则通过夜间灯光数据和建设用地能源消费碳排放量进行估算。

1) 直接碳排放量估算方法

耕地、林地、草地、水域和未利用地的碳排放量估算公式为:

$$E_d = \sum E_i = \sum L_i \times \delta_i \quad (1)$$

式中: E_d 为直接碳排放量; E_i 为第 i 种土地利用类型的碳排放量; L_i 为土地利用类型 i 的面积; δ_i 为土地利用类型 i 的碳排放(吸收)系数,系数为正值表示该地类为碳源,反之为碳汇。

参考已有研究成果^[20-21],并结合陕西省的气候和区位状况,综合确定各土地利用类型的碳排放系数。

耕地碳排放系数。由于不同作物与地区碳通量之间存在显著差异,使得耕地碳排放既可以是碳源也可以是碳汇。本研究旨在为土地利用的低碳化政策提供思路和参考,而耕地利用的低碳化主要表现为耕地利用过程中减少高碳物资的投入及土壤的破坏。因此,本研究认为耕地的碳排放主要表现为种植行为或农户行为直接或间接导致的温室气体排放。陕西省耕地以旱地为主,约 80% 的耕地分布在陕北高原和关中平原。本研究采用 0.422 (t/hm²) 作为耕地碳排放系数。

林地碳排放系数。陕西省林地以乔木林地为主,主要集中在延安市、汉中市、安康市三地,约占全

省林地的 50%。本研究采用 0.644 (t/hm²) 作为林地碳排放系数。

草地碳排放系数。陕西省草地以天然牧草地为主,主要分布在榆林市、延安市两地,约占全省草地的 90%。本研究采用 0.022 (t/hm²) 作为草地碳排放系数。

水域碳排放系数。陕西省水域以河流为主,榆林市、汉中市、安康市、渭南市 4 市的水域面积较大,约占全省水域的 60%。一般积水条件下,河流和湖泊水面为碳汇,但当河流和湖泊等被排干围垦后,土壤中有有机物的分解速率增大,加之水利设施等的建设施工,此时碳排放速率快于吸收速率。本研究采用 0.218 (t/hm²) 作为水域碳排放系数。

未利用地碳排放系数。陕西省未利用地多为荒山沙地、风沙草滩和其他用地,其碳排放和吸收能力较弱。本研究采用 0.005 (t/hm²) 作为未利用地碳排放系数。

2) 间接碳排放量估算方法

由于陕西省县域能源消费数据难以获得,能源消费碳排放只能估算到省域层面。基于《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》的能源消耗碳排放系数估算陕西省能源消费碳排放量,能源消费碳排放的折算系数如表 1 所示。所选能源包括原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、天然气和电力等。

表 1 能源消费碳排放的折算系数

Tab. 1 Conversion factors for carbon emissions from energy consumption

能源种类	折标准煤系数	碳排放系数
原煤	0.714	0.756
焦炭	0.971	0.855
原油	1.429	0.586
汽油	1.471	0.554
煤油	1.471	0.571
柴油	1.457	0.592
燃料油	1.429	0.619
天然气	1.330	0.448
热力	0.034	0.670
电力	0.345	0.272
洗精煤	0.900	0.756
焦炉煤气	6.143	0.355
液化石油	1.714	0.504
炼厂干气	1.571	0.460

陕西省能源消费碳排放量估算公式为:

$$E_e = \sum E_{ei} = \sum e_i \times \eta_i \times \theta_i \quad (2)$$

式中: E_e 为陕西省能源消费碳排放量; E_{ei} 为 i 类能源消费碳排放量; e_i 为 i 类能源的消耗量; η_i 为 i 类

能源的折标准煤系数; θ_i 为 i 类能源的碳排放系数。

已有研究表明^[11], 各省的夜间灯光数据与能源消费碳排放量之间存在真实的正相关性, 可用于估算能源消费碳排放量。建设用地承载了人类生产活动及主要的能源消费, 故其碳排放量主要来源于能源消费。因此, 本研究利用陕西省夜间灯光数据来估算陕西省 107 个县(区)的建设用地碳排放。陕西省县域建设用地碳排放量估算公式为:

$$E_{ej} = E_c \times \frac{D_{ij}}{\sum_{j=1}^n D_{ij}} \quad (3)$$

式中: E_{ej} 为第 j 个县(区)的建设用地碳排放量; D_{ij} 为第 j 个县(区)夜间灯光数字的总值。

1.3.2 标准差椭圆

标准差椭圆是一种衡量地理要素分布格局的空间统计方法。本文将通过标准差椭圆的重心位置、椭圆面积、椭圆半轴、椭圆方位角等参数来分析陕西省县域土地利用碳排放的时空特征。地理要素分布的主要方向趋势和聚集(分散)程度分别用椭圆的方位角和面积来表征^[22]。公式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{x_w} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \\ \overline{y_w} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中: $\overline{x_w}$ 、 $\overline{y_w}$ 分别为空间位置(x_i , y_i)距分布重心

距离的相对坐标; w_i 为权重。

1.3.3 地理探测器

地理探测器是一种较为新颖的统计方法, 已被应用于研究空间分异特征及其影响因素^[16]。地理探测器不仅可以测量单个影响因素对区域碳排放空间分异的驱动作用, 还可以测量不同影响因素两两交互时对区域碳排放空间分异的影响。故本研究将采用地理探测器中的因子探测器和交互探测器对区域碳排放的空间分异特征进行分析。

因子探测器用于评估不同影响因素对土地利用碳排放的解释力, 其公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{S_{sw}}{S_{st}} \quad (5)$$

式中: q 为影响因素对土地利用碳排放空间分异特征的解释力; $h=1, 2, \dots, L$ 为土地利用碳排放影响因素中的分类; N_h 和 N 分别为 h 层和研究区的样本数; σ_h^2 和 σ^2 分别为 h 层和整个区域的方差; S_{sw} 和 S_{st} 分别为研究区的层内平方和和总平方和。

交互探测器用于识别各影响因素之间的交互作用, 并评估其对土地利用碳排放的解释力。

影响土地利用碳排放的因素通常较为复杂, 根据研究区的实际情况, 并考虑到县级尺度数据的可获取性, 本研究从土地利用结构、土地利用效率、财务状况、经济发展水平、产业结构、区域投资水平、人口规模、城市发展水平、绿化水平多个角度对影响土地利用碳排放的因素进行分析。选取 11 个影响因素(见表 2), 利用地理探测器分析其对陕西省县域土地利用碳排放的影响。

表 2 土地利用碳排放影响因素

Tab. 2 Influencing factors of carbon emissions from land use

影响角度	影响因素	变量
土地利用结构	建设用地面积占总面积的比例	X_1
土地利用效率	单位土地使用面积经济产出/(万元·m ⁻²)	X_2
财务状况	地方一般公共预算收入/(万元)	X_3
	地方一般公共预算支出/(万元)	X_4
经济发展水平	人均 GDP/(万元·人 ⁻¹)	X_5
	GDP/(万元)	X_6
产业结构	第一产业产值比重	X_7
区域投资水平	固定资产投资/(万元)	X_8
人口规模	常住人口/(万人)	X_9
城市发展水平	城镇化率	X_{10}
绿化水平	归一化植被指数(NDVI)	X_{11}

2 结果与分析

2.1 陕西省土地利用时空变化特征

2000—2020 年陕西省土地利用变化及土地利用转移桑基图如图 2、图 3 所示。由图 2 可知, 2000—2020 年耕地和未利用地面积减少, 林地和建设用地面积增加, 水域、草地面积基本保持不变。耕地、未利用地面积分别减少 9 692. 751 6 km²、2 319. 026 4 km², 减少率分别为 15. 98%、92. 47%。林地、建设用地面积分别增加 9 635. 977 8 km²、48 478. 140 5 km², 增长率分别为 11. 46%、113. 19%。水域、草地面积分别增加 125. 981 1 km²、107. 902 8 km², 增长率分别为 25. 61%、0. 20%。由图 2、3 可知, 2000—2020 年耕地和林地经历了较大的转换, 耕地面积减少, 主要转换为草地、林地和建设用地, 林地面积增加, 主要来源是耕地和草地。

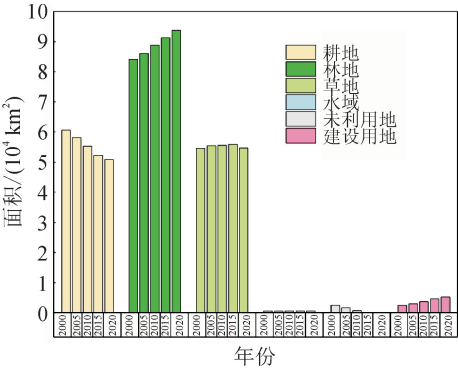


图 2 2000—2020 年陕西省土地利用变化
Fig. 2 Changes in land use in Shaanxi Province
from 2000 to 2020

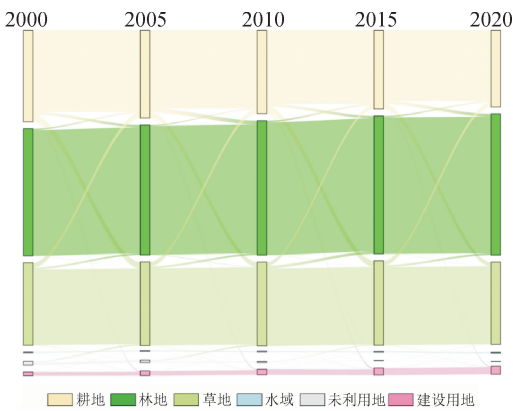


图 3 2000—2020 年陕西省土地利用转移桑基图
Fig. 3 Land use transfer Sankey map of Shaanxi
Province from 2000 to 2020

2.2 陕西省土地利用碳排放时空变化特征

2.2.1 时间变化特征

如表 3 所示, 2000—2020 年陕西省总体土地利用碳排放呈持续增长趋势, 从 2000 年的 2 234. 312 3 万吨增加到 2020 年的 21 575. 319 9 万吨, 增长了 8. 66 倍。从碳源来看, 耕地的比例从 2000 年的 9. 18% 下降到 2020 年的 0. 97%; 建设用地比例从 2000 年的 90. 82% 增加到 2020 年的 99. 03%, 对土地利用的总碳排放贡献显著。从碳汇来看, 林地是主要的碳汇来源, 2020 年贡献了超过 97% 的碳汇量, 在区域碳吸收中发挥了关键作用。

表 3 2000—2020 年陕西省土地利用碳排放

Tab. 3 Carbon emissions from land use in Shaanxi Province from 2000 to 2020 (单位: 万 t)

年份	碳源		碳汇				碳排放量
	耕地	建设用地	林地	草地	水域	未利用地	
2000	255.985 5	2 532.774 0	−541.608 1	−11.469 3	−1.244 3	−0.125 4	2 234.312 3
2005	245.354 9	5 478.994 3	−554.143 0	−11.636 0	−1.386 6	−0.082 4	5 157.101 2
2010	233.401 3	10 958.066 6	−572.854 4	−11.676 4	−1.460 4	−0.033 6	10 605.443 2
2015	220.234 5	18 537.610 4	−587.540 7	−11.756 9	−1.493 7	−0.010 4	18 157.043 2
2020	215.082 0	21 976.966 2	−603.663 8	−11.492 0	−1.563 1	−0.009 4	21 575.319 9

2.2.2 空间变化特征

2000—2020 年陕西省县域土地利用碳排放的空间分布如图 4 所示, 县域碳排放总量的空间异质性突出, 总体呈现陕北>关中>陕南的格局。这与陕西省的自然和区位条件紧密相关: 陕北地区因丰富的煤炭资源和高比重的能源化工产业, 成为土地利用碳排放量较高的区域; 关中地区人口密集且经济发达, 由于

其产业结构多样化, 并非单纯依赖高耗能产业, 故其土地利用碳排放量相对陕北较低; 陕南地区凭借优越的自然条件, 以农业经济为主导, 佛坪县和石泉县内存在多个国家级自然保护区, 植被覆盖率高, 固碳能力显著, 使其成为土地利用碳排放量最低的区域。基于标准差椭圆分析陕西省土地利用碳排放的重心转移路径(见图 5)。

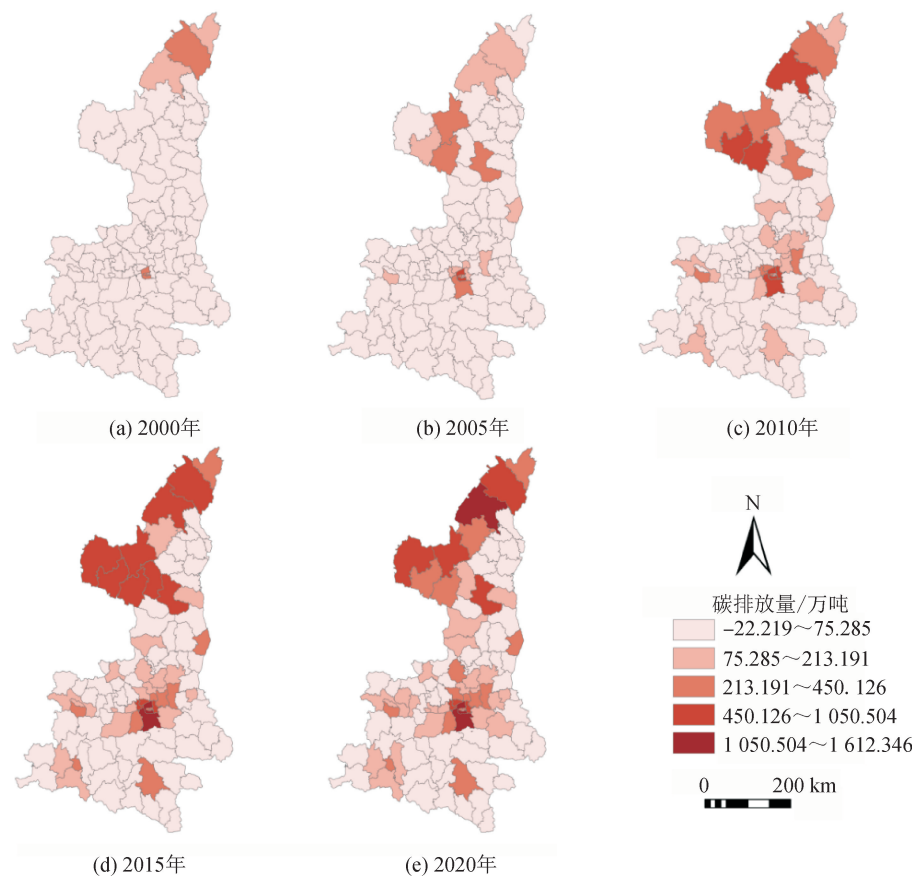


图 4 2000—2020 年陕西省县域土地利用碳排放空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of carbon emissions from county land use in Shaanxi Province from 2000 to 2020
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2024)0650 的标准地图制作,底图无修改。

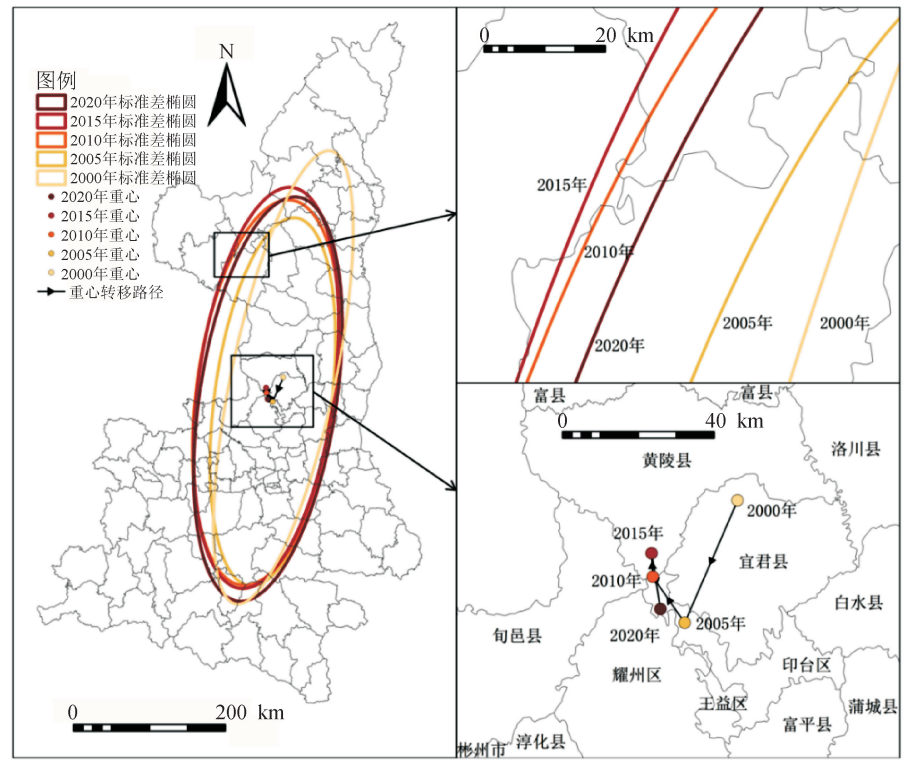


图 5 2000—2020 年陕西省县域土地利用碳排放标准差椭圆

Fig. 5 Standard deviation ellipse of carbon emissions from county land use in Shaanxi Province from 2000 to 2020
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2024)0650 的标准地图制作,底图无修改。

由图 5 可知,2000—2005 年,重心向南移动;2005—2015 年,即“煤炭黄金十年”,陕北地区煤炭工业迅猛发展,伴随着大量的能源消耗,碳排放量急剧增加,故重心向西北方向移动;2015—2020 年,陕北地区通过优化煤炭开采、淘汰落后产能和发展新兴产业调整了产业结构,同时大力发展风电、光电及多元储能系统,推进清洁能源消纳与电力系统优化,并结合严格执行项目准入标准、强化节能管理和支持科技创新等政策导向,使碳排放增速放缓,故重心有向南移动的趋势。如表 4 所示,椭圆方位角从 2000 年的 12.44°减少到 2005 年的 7.66°,表明这期间西南地区对全省土地利用碳排放的影响加强;2005—2020 年椭圆方位角的变化相对较小,表明这期间陕西省各县土地利用碳排放的分布方向较为稳定。此外,长半轴由 2000 年的 300.58 km 缩短至 2020 年的 264.64 km,短半轴由 69.54 km 延长至 91.49 km,表明研究期间陕西省县域土地利用碳排放在东北-西南方向呈现聚集趋势,在西北-东南方向呈现分散趋势。

表 4 2000—2020 年陕西省县域土地利用碳排放标准差椭圆计算结果
Tab. 4 Calculation results by standard deviation ellipse of carbon emissions from county land use in Shaanxi Province from 2000 to 2020

年份	短半轴/km	长半轴/km	椭圆方位角/(°)
2000	69.54	300.58	12.44
2005	78.69	240.53	7.66
2010	93.87	251.68	7.88
2015	91.54	262.02	7.92
2020	91.49	264.64	9.05

2.3 土地利用碳排放的影响因素分析

2.3.1 单因素分析

采用 GeoDetector 软件,对 2000 年、2010 年和 2020 年各影响因素对陕西省县域土地利用碳排放的 q 值进行计算,其 q 值的排序如表 5 所示。 q 值表示影响因素对陕西省土地利用碳排放空间分异特征的解释力大小,所有 q 值均通过了 5% 的显著性检验。影响力平均值排名前五的是地方一般公共预算收入、GDP、固定资产投资、建设用地面积占总面积的比例和城镇化率。

表 5 陕西省土地利用碳排放影响因素的影响力排名变化
Tab. 5 Changes in the influence ranking of factors influencing carbon emissions from land use in Shaanxi Province

影响因素	2000 年	2010 年	2020 年	平均
地方一般公共预算收入(X_3)	2	1	2	1
	(0.841)	(0.791)	(0.798)	(0.810)
GDP(X_6)	4	2	1	2
	(0.696)	(0.790)	(0.899)	(0.795)
固定资产投资(X_8)	1	7	4	3
	(0.853)	(0.452)	(0.773)	(0.693)
建设用地面积占总面积的比例(X_1)	3	3	8	4
	(0.738)	(0.754)	(0.464)	(0.652)
城镇化率(X_{10})	5	10	5	5
	(0.673)	(0.285)	(0.604)	(0.521)
归一化植被指数(X_{11})	9	6	6	6
	(0.406)	(0.518)	(0.594)	(0.506)
地方一般公共预算支出(X_4)	7	4	11	7
	(0.482)	(0.696)	(0.167)	(0.449)
常住人口(X_9)	10	8	3	8
	(0.118)	(0.419)	(0.783)	(0.440)
第一产业产值比重(X_7)	8	9	7	9
	(0.447)	(0.317)	(0.547)	(0.437)
人均 GDP(X_5)	6	11	9	10
	(0.574)	(0.277)	(0.255)	(0.369)
单位土地使用面积经济产出(X_2)	11	5	10	11
	(0.043)	(0.574)	(0.233)	(0.283)

注:括号内数值为 q 值;括号外数值为 q 值的排序。

地方一般公共预算收入的影响力保持在前二,而第二产业税收构成一般公共预算收入的关键部分,故合理的一般公共预算支出对吸引人才和推动区域经济发展至关重要。高碳排放区域,如陕北地区的北部和西部以及关中部分地区,其第二产业发展较好,导致一般公共预算的收支水平较高,同时也伴随着相对较高的碳排放量。GDP的影响力从第4位上升至第1位。GDP总量在一定程度上反映了区域的经济发展水平,而城镇化进程也是陕西省经济发展的重点之一。在此过程中,固定资产的投入依然起着相当重要的经济拉升作用,城镇化水平的不断提高势必会带来建设用地的扩张,基础设施建设速度的不断加快以及人才、技术的集聚,进而引起土地利用碳排放的快速增长。尽管固定资产投资、建设用地面积占总面积的比例和城镇化率的影响力波动较大,但其平均影响力仍排在前列。值得注意的是,虽然常住人口的影响力平均值较低,但其排名从第10位上升至第3位。人口的增加所带来的直

接影响就是生活碳排放量的增长和对化石燃料需求的不断增加,近年来随着陕西省人口的不断增长,人口规模的影响力也逐渐显现。其他因素的影响力略有波动,但变化不大。

2.3.2 交互因素分析

图6为2000年、2010年、2020年的交互因素检测结果。由图可知,11个影响因素之间的交互作用比任何单一影响因素对陕西省土地利用碳排放的影响更为显著。三个时段 q 值最高的交互因素组合分别为 $X_{11} \cap X_8$ 、 $X_6 \cap X_5$ 、 $X_9 \cap X_7$ 。平均影响力较高的交互因素组合分别为 $X_8 \cap X_7$ 、 $X_{10} \cap X_3$ 、 $X_{11} \cap X_6$ 、 $X_3 \cap X_1$ 、 $X_8 \cap X_3$ 、 $X_8 \cap X_5$,其中大部分组合均包含 X_3 和 X_8 。这表明财务状况和区域投资水平对陕西省土地利用碳排放具有显著的综合效应,在陕西省持续推进能源绿色转型的政策引领下,投资的主要导向从高度集中于煤炭、炼焦等高耗能产业开始转向装备制造、医药等高新技术产业,投资导向和财务状况得到显著优化,第二产业占比过高的局面得到改善。

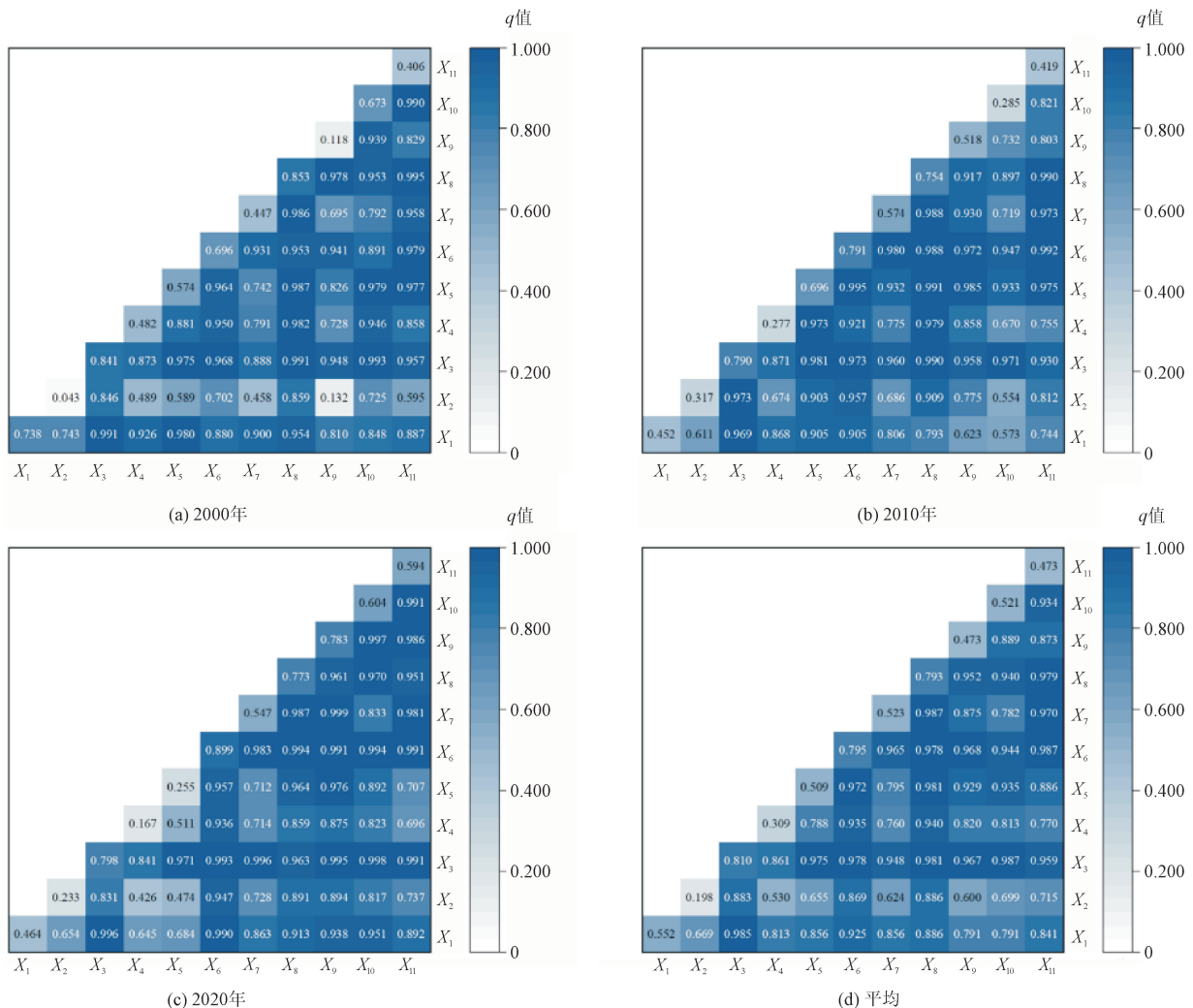


图6 交互因素的检测结果
Fig. 6 Results by interaction factor detection

3 讨论与结论

3.1 讨论

2000—2020年陕西省土地利用发生了显著变化,耕地面积减少,林地和建设用地面积增加,这与严慈^[21]、曹周亮^[22]的研究结果基本一致,但这种变化可能还受政策措施的影响,如退耕还林政策、生态修复工程等。2000—2020年陕西省总体土地利用碳排放持续增长,建设用地是碳排放增加的重要来源;县域碳排放总量的空间异质性突出,高碳排放区域主要集中在关中、陕北的部分县(区),这与严慈^[21]、曹周亮^[22]的研究结论基本一致。经济社会因素($X_3 \sim X_8$)对陕西省土地利用碳排放的影响更为显著,这与卢奕帆^[23]、李秋妍^[24]的研究结果基本一致。针对这一特点,应合理调整公共财政投入,利用公共预算加大对中低能耗和低碳排企业的扶持力度,同时提高待遇和福利以吸引高端技术人才,推动产业升级转型;进一步完善税收政策,适度推行环境税和资源税等环境保护税收,充分发挥税收对绿色经济的促进作用;优化固定资产投资结构,减少高能耗产业的投资比例,增加研发和技术改进的投资比例,以实现可持续发展。

基于陕北、关中、陕南土地利用碳排放的空间异质性,提出差异化的县域低碳发展路径。陕北地区以神木市、米脂县、黄龙县为代表,通过增加风能和太阳能等清洁能源的装机容量、降低煤炭消耗占比及对现有煤电机组进行超低排放改造来推进能源结构转型,建立绿色制造体系,并加强科研投入以促进节能减排技术的创新与应用。关中地区以长安区、雁塔区、兴平市为代表,应充分利用经济优势加速科技创新,支撑低碳环保产业发展,构建低碳技术研发平台;推广绿色建筑标准,控制城市无序扩张,确保建设用地增长与生态承载力相匹配;开展公众教育提高居民环保意识,推行绿色消费理念,通过税收减免或补贴激励低碳行为,倡导公共交通和非机动车出行方式以减少汽车尾气排放。陕南地区以柞水县、商州区为代表,应继续提升森林覆盖率,加大对秦巴山区的保护力度,并维护生物多样性;完善林地管理和生态补偿机制,在保证林农收益的同时,提升区域的固碳效能;探索建立碳汇交易平台,促进碳权交易的市场化运作,使生态保护者获得合理回报;选取条件适宜的县城作为低碳示范点,引领周边市(县)实践绿色低碳发展。

3.2 结论

本研究利用2000—2020年陕西省夜间灯光、土

地利用、能源消费和经济发展等数据,估算并分析了陕西省县域土地利用碳排放的时空格局及其影响因素。基于陕西省土地利用碳排放的空间异质性,提出了差异化的县域低碳发展路径。

1) 2000—2020年陕西省土地利用的时空变化显著,耕地和未利用地面积减少,林地和建设用地面积增加,水域、草地面积基本保持不变。其中建设用地增加了113.19%,耕地经历了最多的转化,建设用地增加的主要来源是耕地。

2) 从时间上看,2000—2020年陕西省土地利用碳排放总量呈持续增长趋势,增长了约8.66倍。林地是主要的碳汇来源,2020年贡献了超过97%的碳汇;建设用地是绝对的碳源,2020年建设用地的碳源占比为99.03%。从空间上看,陕西省土地利用碳排放总体呈现陕北>关中>陕南的分布格局;碳排放重心有南移的趋势,但总体分布比较稳定。

3) 经济社会因素对陕西省土地利用碳排放的影响更为显著(较本文其他因素),财务状况、经济发展水平、区域投资水平、土地利用结构及城市发展水平是关键影响因素,双因素的交互作用强于单因素,财务状况和区域投资水平对碳排放具有显著的综合效应。

参考文献:

- [1] 杨绪红,金晓斌,刘晶,等.土地利用碳排放核算系统设计与实现[J].测绘通报,2019(4):54-59.
YANG Xuhong, JIN Xiaobin, LIU Jing, et al. Design and implementation of system estimating carbon emission induced by land use/cover change[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(4): 54-59.
- [2] FANG Jingyun, CHEN Anping, PENG Changhui, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 2001, 292 (5525): 2320-2322.
- [3] LAI Li, HUANG Xianjin, YANG Hong, et al. Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010 [J]. Science Advances, 2016, 2(11): e1601063.
- [4] SPAWN S A, LARK T J, GIBBS H K. Carbon emissions from cropland expansion in the United States [J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(4): 045009.
- [5] 马海良,丁元卿,庞庆华.武汉市湖泊水域利用转变及其碳排放影响[J].长江流域资源与环境,2020,29(2):369-375.
MA Hailiang, DING Yuanqing, PANG Qinghua. Utilization change of lake and its carbon emission in Wuhan City[J]. Resources and Environment in the Yan-

- gtze Basin, 2020, 29(2): 369-375.
- [6] 蔡苗苗, 吴开亚. 上海市建设用地扩张与土地利用碳排放的关系研究[J]. 资源开发与市场, 2018, 34(4): 499-505.
- CAI Miaomiao, WU Kaiya. Relationship between construction land expansion and carbon emissions of land use in Shanghai City[J]. Resource Development & Market, 2018, 34(4): 499-505.
- [7] 荆肇睿, 梁红梅, 秦伟山, 等. 江苏省工业分行业土地利用碳排放效率与低碳优化——基于工业分行业建设用地控制指标视角[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 266-272, 277.
- JING Zhaorui, LIANG Hongmei, QIN Weishan, et al. Land use carbon emissions efficiency and low carbon optimizations in industrial sector of Jiangsu Province—based on classified industry construction land control indicators [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 266-272, 277.
- [8] ARNETH A, SITCH S, PONGRATZ J, et al. Historical carbon dioxide emissions caused by land-use changes are possibly larger than assumed[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(2), 79-84.
- [9] JONG B D, ANAYA C, MASERA O, et al. Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 260(10), 1689-1701.
- [10] 张苗, 刘璇, 彭山桂, 等. 中国省域土地利用碳排放效率的空间关联网演变特征与形成机制[J]. 中国土地科学, 2023, 37(10): 91-101.
- ZHANG Miao, LIU Xuan, PENG Shangui, et al. Evolution characteristics and formation mechanism of spatial correlation network of provincial land use carbon emission efficiency in China [J]. China Land Science, 2023, 37(10): 91-101.
- [11] SHI Kaifang, CHEN Yun, YU Bailang, et al. Modeling spatiotemporal CO₂ (Carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP-OLS nighttime stable light data using panel data analysis[J]. Applied Energy, 2016, 168: 523-533.
- [12] 谭洁, 刘琴, 唐晓佩, 等. 基于 LMDI 模型的土地利用碳排放时空差异及影响因素研究——以洞庭湖区为例[J]. 地域研究与开发, 2024, 43(1): 160-166.
- TAN Jie, LIU Qin, TANG Xiaopei, et al. Spatial and temporal evolution of carbon emissions from land use and its influencing factors based on LMDI model: a case study of the Dongting Lake area[J]. Areal Research and Development, 2024, 43(1): 160-166.
- [13] 杨蕴琦, 郝晋珉, 张金懿, 等. 曲周县土地利用碳排放测算及情景预测研究[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(2): 160-175.
- YANG Yunqi, HAO Jinmin, ZHANG Jinyi, et al. Carbon emission measurement and prediction of land use in Quzhou County based on carbon neutrality target [J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(2): 160-175.
- [14] 黄怀玉, 唐园清, 龚直文, 等. 基于 STIRPAT-GWR 模型的重庆市土地利用碳排放动态演进及影响因素[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(4): 1195-1205.
- HUANG Huaiyu, TANG Yuanqing, GONG Zhiwen, et al. Dynamic evolution and influencing factors of land use carbon emissions in Chongqing based on STIRPAT-GWR model[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(4): 1195-1205.
- [15] 魏俊超, 梅志雄, 马君杰, 等. 广州市土地利用碳排放时空演变及影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 298-307.
- WEI Junchao, MEI Zhixiong, MA Junjie, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of land-use carbon emissions in Guangzhou[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 298-307.
- [16] 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.
- WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [17] YANG Jie, HUANG Xin. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021, 13 (8): 3907-3925.
- [18] CHEN Zuoqi, YU Bailang, YANG Chengshu, et al. An extended time series (2000-2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration[J]. Earth System Science Data, 2021, 13 (3): 889-906.
- [19] YANG Jilin, DONG Jinwei, XIAO Xiangming, et al. Divergent shifts in peak photosynthesis timing of temperate and alpine grasslands in China [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233: 111395.
- [20] 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.

- crete grey wolf optimizer for equipment maintenance in hydropower station[J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79(4): 4351-4382.
- [14] YANG Ben, ZHANG Xuetao, LI Zhongheng, et al. Efficient multi-view K-means clustering with multiple anchor graphs[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2023, 35(7): 6887-6900.
- [15] CROFT W, SACK J-R, SHI WEI. Differential privacy via a truncated and normalized Laplace mechanism[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2022, 37(2): 369-388.
- [16] MAO Yimin, GAN Dejin, MWAKAPESA D S, et al. A MapReduce-based K-means clustering algorithm[J]. The Journal of Supercomputing, 2022, 78: 5181-5202.
- [17] LUND Brady, MA Jinxuan. A review of cluster analysis techniques and their uses in library and information science research: k -means and k -medoids clustering[J]. Performance Measurement and Metrics, 2021, 22(3): 161-173.
- [18] 赵铮. 大数据差分隐私保护方案设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- ZHAO Zheng. Design and implementation of differential privacy scheme for big data[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [19] 安建昌, 江俊峰, 徐中原, 等. 光纤传感与红外视频的复合入侵监控系统设计[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(5): 170-176.
- AN Jianchang, JIANG Junfeng, XU Zhongyuan, et al. Design of composite intrusion detection system based on optical fiber sensor and infrared video[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(5): 170-176.
- (责任编辑 王绪迪)

(上接第 323 页)

- [21] 严慈, 侯兰功. 基于灰色理论的陕西省土地利用变化及其碳排放研究[J]. 西安理工大学学报, 2021, 37(1): 25-31.
- YAN Ci, HOU Langong. Study on land use change and carbon emission in Shaanxi Province based on grey theory[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2021, 37(1): 25-31.
- [22] 曹周亮, 张欣蓉, 员学锋, 等. 基于土地利用变化的陕西省县域碳排放时空变化及影响因素研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 376-385.
- CAO Zhouliang, ZHANG Xinrong, YUAN Xuefeng, et al. Spatio-temporal variation and influencing factors of CO₂ emission at county scale in Shaanxi Province based on land use change[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 376-385.
- [23] 卢奕帆, 梁颖然, 卢思言, 等. 结合“珞珈一号”夜间灯光与城市功能分区的广州市碳排放空间分布模拟及其影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(6): 1176-1188.
- LU Yifan, LIANG Yingran, LU Siyan, et al. Spatialization of carbon emissions in Guangzhou City by combining LuoJia1-01 nighttime light and urban functional zoning data[J]. Journal of Geo-information Science, 2022, 24(6): 1176-1188.
- [24] 李秋妍, 曹翠. 固定资产投资对二氧化碳排放影响的实证研究——基于省际面板数据模型[J]. 科技管理研究, 2014, 34(14): 221-225.
- LI Qiuyan, CAO Cui. An empirical study on the impact of fixed asset investment on carbon dioxide emission-based on inter-provincial panel data model[J]. Science and Technology Management Research, 2014, 34(14): 221-225.
- (责任编辑 周 蓓)