杨 屹,苏 越.关中平原城市群碳收支时空分异特征及碳平衡驱动因素 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):4034-4051.
Yang Y, Su Y. Spatial and temporal variability of carbon budget in Guanzhong Plain urban agglomeration and the driving factors of carbon balance [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):4034-4051.

关中平原城市群碳收支时空分异特征及碳平衡驱动因素

杨 屹*,苏 越 (西安理工大学经济与管理学院,陕西 西安 710054)

摘要：以关中平原城市群为研究样本,在分析 2007~2022 年碳排放量和碳汇量时空分异特征的基础上,探讨了城市群内各城市的碳平衡类型,采用碳生态承载系数、标准差椭圆和重心迁移模型描述了碳平衡能力时空动态变化的特点,并运用时空地理加权模型探讨了驱动因素的时空异质性.结果显示:碳排放量变化呈波动增加的特点,由 2007 年的 12881.57 万 t 增加至 2022 年的 38570.76 万 t,年均增长率为 7.59%.碳汇量变化幅度较小,由 2007 年的 1885.78 万 t 增加至 2022 年的 2176.11 万 t,年均增长率为 0.10%.耕地和林地分别贡献了碳汇量的 82.56%和 17.01%,是影响碳汇水平的主要土地类型.碳平衡能力空间差异明显,呈西北高、东部低的特征,标准差椭圆呈西北-东南的分布格局,重心整体向东迁移.碳平衡能力的驱动因素存在显著差异,能源强度、产业结构、地区生产总值、城镇化水平、人口密度等社会经济因素的影响最为显著,降水和气温等气候条件的影响次之,而环境规制、绿色创新等治理因素的影响并不显著.研究强调从生产减碳和生态固碳的视角制定差异化策略.

关键词：碳收支；碳平衡；时空分异；驱动因素；城市群
中图分类号：X321 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)07-4034-18

Spatial and temporal variability of carbon budget in Guanzhong Plain urban agglomeration and the driving factors of carbon balance. YANG Yi*, SU Yue (School of Economics and Management, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：4034~4051

Abstract：This study investigated the spatial and temporal characteristics of carbon emissions and carbon sinks in the Guanzhong Plain urban agglomeration from 2007 to 2022. In addition, it examined the types of carbon balance across cities within this urban agglomeration. The characteristics of the spatial and temporal dynamics of the carbon balance capacity were described using the ecological support coefficient of carbon emissions, the standard deviation ellipse, and the center of the gravity migration model. The spatial and temporal heterogeneity of the driving factors was explored using a spatial and temporal geographic weighting model. The findings were as follows. Carbon emissions fluctuated and increased from 128,815,700 tons in 2007 to 385,707,600 tons in 2022, with an average annual growth rate of 7.59%. The change in the carbon sink was smaller, increasing from 18,857,800 tons in 2007 to 21,761,100 tons in 2022, with an average annual growth rate of 0.10%. Cultivated land and forestland accounted for 82.56% and 17.01%, respectively, of the carbon sink, which was the main land type affecting the carbon sink level. The spatial difference in the carbon balance capacity was obvious, characterized by high values in the northwest and low values in the east. The standard deviation ellipse revealed a northwest southeast distribution pattern, with the center of gravity shifting eastward. There were significant differences in the driving factors of the carbon balance capacity. The influence of socioeconomic factors such as energy intensity, industrial structure, gross regional product, urbanization level and population density were the most significant, followed by the influence of climatic conditions such as precipitation and temperature. The influence of governance factors such as environmental regulation and green innovation were not significant. This study underscored the importance of developing differentiated strategies from the perspectives of carbon reduction in production and carbon sequestration in ecology.

Key words：carbon budget；carbon balance；spatio-temporal variation；drivers；urban agglomeration

作为地理空间上高度集聚的城市组织形态,城市群在推动社会经济发展的过程中,形成的侵占生态用地、景观破碎、生物量减少等复杂的生态系统功能退化问题日益严峻[1],进一步削弱了陆地生态系统碳汇能力[2].在此背景下,建立城市群绿色发展协调机制是中国推动城乡建设、实现“双碳”目标的基本策略之一.但由于城市土地存量有限,土地利用之间的频繁转换,使得城市更新难度日益加大,有限的生态恢复空间与快速增长的生态需求导致用于维护城市群碳平衡的土地资源愈加紧张.仅仅依靠增量扩张城市规模的路径将会加剧城市和农村之

收稿日期：2024-12-19
基金项目：国家社会科学基金西部项目(23XGL023)
* 责任作者, 教授, yangyi_nwpu@xaut.edn.cn

间的碳汇资源供需矛盾与碳减排风险[3].城市群快速发展与维护生态系统稳定性之间的矛盾成为制约碳减排的难点[4],暴露出提高碳减排能力、有效平衡碳源与碳汇关系与城市群发展之间的胁迫问题.关中平原城市群是中国西部重要的城市群之一,也是丝绸之路经济带建设、黄河流域生态保护和高质量发展等国家战略实施的核心区域.城市群内城乡地区的发展阶段、资源禀赋、治理水平等方面存在差异,使得碳收支在时空上表现出不平衡的特点,增大了区域碳减排的难度和复杂性.

碳平衡能力是指区域平衡碳排放和碳汇水平的能力,碳汇量越大而碳排放水平越低表示碳平衡能力越强[5].碳排放和碳汇的量化分析是评估区域碳平衡能力的关键,测算方法根据区域适用情况的不同呈现多样性.估算国家和省域碳排放量的碳排放因子法已成为常用方法[6].随着遥感技术的发展,夜间灯光数据被证明与碳排放水平具有高度相关性.在能源数据缺失的市域、县域以及更精细尺度区域常采用DMSP/OLS或NPP/VIIRS数据进行估算[7].估算碳汇量的方法主要有净生态系统生产力(NEP)模型模拟[8]以及碳吸收系数法[9].由于陆地生态系统的年际碳汇量波动弱.稳定性高,且不同固碳类型的土地在长时期内变化不大[10-11],碳吸收系数法被广泛使用.在不同核算方法基础上,碳源、碳汇及碳平衡能力的时空演化、区域差异、空间集聚特征以及驱动机制等成果不断涌现.研究发现全国大多数省份处于碳亏损状态,且碳亏损量逐年增加.西北地区与中部地区省份向碳亏损状态的演变趋势更为明显[12].陕西省的碳排放量呈显著的空间正相关性,并表现出非均衡发展的集聚特征[13].经济增长、人口规模、能源消费等是碳排放量增长的重要驱动因素[14-15].使用清洁生产技术、优化能源消费结构、建立碳交易市场是遏制碳排放量增长的有效措施[16-17].城镇化通过能源消耗、人口迁移、改变土地利用结构等方式直接或间接影响碳源或碳汇的分布格局[18-19].随着人类活动对碳汇的干扰逐渐增强,生态修复、研发碳捕获和碳封存技术、环境治理投资等环境治理行动正在成为提高碳承载力的有力措施[20-21].但由于城市之间碳收支时空动态变化的复杂性,碳平衡能力的驱动因素并未达成共识.而LMDI分解法[22]、STIRPAT模型[23]、空间计量模型[24]以及地理探测器[25]等分析方法局限于全局空间尺度,忽视了地理特征、技术水平或政策因素导致的空间异质性.时空地理加权回归(GTWR)模型是地理加权回归(GWR)模型的拓展形式,在定量分析驱动因素空间差异的同时,兼顾了时间非平稳性,被广泛用于能源使用[26]、碳足迹[27]、交通碳排放[28]等的分析中.现有研究主要采用碳盈亏和碳压力指标衡量区域的碳平衡能力,虽然比单一的碳排放量和碳汇量更全面地反映了碳中和水平,但却忽视了区域内不同研究单元之间的差异影响以及对区域整体的贡献程度.而碳生态承载系数则弥补了这一缺陷,不仅能够有效表征区域碳汇对碳排放的消纳能力,而且能够反映碳排放的公平性[29].但现有针对碳生态承载系数的研究主要集中在空间关联特征[30]、碳平衡分区[31]以及同城镇化等单一要素之间的互动关系上[5],缺乏对影响其变化的驱动因素的综合考虑,且忽略了时空异质性,限制了碳治理政策的灵活性.

为此,本文以关中平原城市群为研究样本,在估算碳排放量和碳汇量的基础上描述了2007~2022年碳收支和碳平衡能力的时空分异特征,并采用GTWR模型探讨影响碳平衡能力变化的驱动因素.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

关中平原城市群地处黄河流域中下游,位于33.35°N~36.72°N,104.57°E~112.22E.区域横跨陕西、甘肃、山西三省,涵盖西安1个中心城市和铜川、咸阳、宝鸡、渭南、商洛、天水、平凉、庆阳、运城、临汾等10个节点城市.城市群北接黄土高原,南依秦岭山脉,中部为渭河下游河谷平原,东部横跨黄河,国土面积为10.71万km^2.平原、丘陵、山地、盆地是主要地形,气候属于温带半湿润大陆性季风气候.2018年《关中平原城市群发展规划》正式批复以来,城市群人口、资本和科技要素加速集聚,形成引领西部发展的重要增长极.区域地势平坦,土壤肥沃,是全国重要的农业生产基地.耕地和林地是主要的用地类型,占比分别为39.64%和34.23%.城市群矿产资源丰富,资源型城市多,依赖化石能源消耗的城市发展模式在短期内难以改变,低碳转型面临着路径依赖的困境.同时,大气污染严重、水资源短缺和水环境污染等问题进一步加剧了生态系统的脆弱

性和敏感性.城市边界的不断扩张造成耕地、林地和草地面积萎缩,碳汇储量不断下降.发展不平衡的特点进一步制约了城市群在碳减排和碳汇增加方面的协同增效作用,凸显了以城市碳源和碳汇的空间差异特点为依据制定协同策略的重要性.

1.2 数据来源

第一,土地利用原始数据源于 Yang 等[32]的空间分辨率为 30m 的年度土地覆被数据集 (https://zenodo.org/records/5816591).依据国家质量监督检疫总局和国家标准化管理委员会 2017 年颁布的《土地利用现状分类》(GB/T 21010−2017),按照耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地等土地利用类型进行二次处理.第二,市级能源碳排放量估算采用的夜间灯光指数数据源于 Wu 等[33]通过整合 DMSP−OLS 和 SNPP−VIIRS 数据得到的矫正后的国内长时间序列类 DMSP−OLS 数据.该数据解决了 DMSP−OLS 和 SNPP−VIIRS 数据集不连续的问题,并且经过了校准和数据修复,准确度较高.能源消费数据源于《中国能源统计年鉴》,农作物产量以及农业生产投入数据源于《陕西省统计年鉴》《甘肃省发展年鉴》《甘肃农村统计年鉴》《山西省统计年鉴》以及各城市统计年鉴.第三,气温数据源于国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/home).降水量数据源于各城市《水资源公报》.第四,绿色创新数据源于 CNRDS 中国研究数据服务平台(https://www.cnrds.com).第五,各市的人口总数、GDP、第二产业占 GDP 比重、工业污染排放量等数据源于各省市统计年鉴、统计公报及《中国城市统计年鉴》.第六,缺失数据采用相邻年份平均值法及线性插值法补全.

1.3 研究方法

第一,由于耕地兼具碳源和碳汇的属性,分别核算碳排放量和碳汇量.第二,建设用地的碳排放主要体现在生产活动中的间接能源消耗.利用能源消费量与夜间灯光数据进行估算.第三,将林地、草地、水域和未利用地视为碳汇,采用直接碳吸收系数法测算.第四,碳生态承载系数能够量化碳汇能力的贡献程度及碳排放量和碳汇量之间的平衡状态,表示区域的碳平衡能力.碳排放总量和碳汇总量的计算公式见式(1)、(2).

$$CE = CE_a + CE_e \tag{1}$$

$$CA = CA_a + CA_s \tag{2}$$

式中:CE 表示碳排放总量;CE_a 表示耕地碳排放量;CE_e 表示建设用地碳排放量;CA 表示碳汇总量;CA_a 表示耕地碳汇量;CA_s 表示林地、草地、水域和未利用地的碳汇量.

1.3.1 碳排放量估算 第一,耕地碳排放量主要源于农业生产过程中农作物的光合作用以及种植过程中农用物资的投入和使用.根据关中平原城市群农业生产实际,选取化肥、农药、农膜、柴油、农机、灌溉和翻耕等 7 个方面,参考王梦成等[34]的方法,耕地碳排放量计算公式见式(3).

$$CE_a = \sum S_i \cdot \theta_i \tag{3}$$

式中:CE_a 表示耕地碳排放量;S_i 表示第 i 种农业生产资料的使用量;θ_i 表示第 i 种农业生产资料的碳排放系数.

第二,由于缺乏地级市的能源消费数据,利用各省份的能源碳排放量和夜间灯光数据估算建设用地碳排放量.根据《IPCC 国家温室气体清单指南》,选取 9 种类型的能源核算城市群内涉及省份的能源碳排放量.参考 Liu 等[35]的方法,计算公式见式(4).

$$CE_e = \sum K_i \cdot M_i \cdot N_i \tag{4}$$

式中:CE_e 表示建设用地碳排放量;K_i 为第 i 种能源的消费量;M_i 为第 i 种能源的标准煤换算系数;N_i 是第 i 种能源的碳排放系数(表 1).

表 1 不同类型能源的标准煤折算系数与碳排放系数

Table 1 Standard coal conversion factors and carbon emission factors for different energy sources

项目	原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气	电力
标准煤折算系数	0.7143	0.9714	1.4286	1.4714	1.4714	1.457	1.4286	1.33	0.345
碳排放系数	0.7559	0.855	0.5857	0.5538	0.5714	0.5921	0.6185	0.4483	0.272

采用校正过的地级市夜间灯光数据总亮度值(TDN) 与能源碳排放量统计值进行拟合.考虑到统一回归分析的估算精度,参考赵强等[36]的方法,分别采用线性、对数、二次、指数等形式进行拟合 (表

2).结果显示,二次函数方程的拟合度最高,陕西省、甘肃省、山西省的 R^2 分别为 0.975、0.987、0.962,均高于线性、对数和指数方程.因此,采用二次函数方程进行地级市的能源碳排放量模拟.式中,y 为各城市碳排放量的模拟值,x 是各城市的 TDN 值.

表 2　关中平原城市群总体和城市群内城市所在省份碳排放量与 TDN 值拟合结果

Table 2　Carbon emissions fitting results and TDN values for the Guanzhong Plain urban agglomeration and the provinces containing its cities

区域	公式	R^2
关中平原城市群	$y=0.037x$	0.770
	$y=1705.79\ln x$	0.610
	$y=0.041x-3.722\times10^{-9}x^2$	0.772
	$y=e^{0.0000\,1298x}$	0.836
陕西省	$y=0.22x$	0.941
	$y=1208.72\ln x$	0.922
	$y=0.33x-1.14\times10^{-8}x^2$	0.975
	$y=e^{0.0000\,1241x}$	0.893
甘肃省	$y=0.014x$	0.807
	$y=519.78\ln x$	0.984
	$y=0.026x-1.57\times10^{-8}x^2$	0.987
	$y=e^{0.0000\,172x}$	0.724
山西省	$y=0.055x$	0.953
	$y=3241.509\ln x$	0.886
	$y=0.069x-1.304\times10^{-8}x^2$	0.962
	$y=e^{0.0000\,1226x}$	0.900

1.3.2　碳汇量估算　第一,依据主要农作物的种植特征与生长周期核算其在生长周期中进行光合作用吸收并固定的有机碳量[37].耕地碳汇量计算公式见式(5).

$$CA_a=\sum_i Y_i\cdot C_i\cdot(1-W_i)/E_i \tag{5}$$

式中:CA_a 表示耕地碳汇量;Y_i 表示第 i 种作物的经济产量;C_i 表示第 i 种作物的碳吸收率;W_i 表示第 i 种作物的含水率;E_i 表示第 i 种作物的经济系数.

第二,采用碳吸收系数法,即,通过不同土地利用类型的面积乘以相应的碳吸收系数估算其他土地利用类型的碳汇量[38].计算公式见式(6).

$$CA_s=\sum_{k=1}^{n}T_k\cdot\delta_k \tag{6}$$

式中:CA_s 表示区域碳汇总量;T_k 为第 k 种土地利用类型面积;δ_k 为第 k 种土地利用类型的碳汇系数.参考 Wang 等[39]的成果,林地、草地、水域和未利用地的碳汇系数分别为 0.644,0.021,0.253,0.005 ($t/hm^2\cdot a$).

1.3.3　碳平衡能力测算　碳生态承载系数表示单座城市的碳汇量占区域整体碳汇量的比例与该地区碳排放量占比的比值,反映了区域碳平衡能力的强弱[30].计算公式见式(7).

$$ESC=\frac{CA_i/CA}{CE_i/CE} \tag{7}$$

式中:ESC 为碳生态承载系数;CA_i 和 CA 分别为 i 城市和城市群的碳汇量;CE_i 和 CE 分别为 i 城市和城市群的碳排放量.若 ESC>1,则该城市的碳汇贡献程度高,碳平衡能力强,反之,则碳平衡能力弱.

表 3　碳平衡能力变化的驱动因素指标体系

Table 3　Indicator system for drivers of changes in carbon balance capacity

维度	指标	指标内涵	选取依据
经济社会	能源强度	单位 GDP 能耗(−)	能源强度是降低碳排放量的重要因素[40]
	产业结构	第二产业占 GDP 比重(%)	第二产业的能源依赖性明显,会增加碳排放量[41]
	地区生产总值	GDP(万元)	GDP 越高,工业生产能源消耗量增加越快[42];但也会促进清洁生产技术创新,提高能源利用效率,减少碳排放量[43]
	城镇化水平	城镇人口/常住人口(%)	城镇化水平通过能源结构和能源消费总量对碳排放产生显著的正向影响[44].推进城镇化将促进清洁技术的研发和应用,降低碳排放水平[45]
	人口密度	人口数量/土地面积(%)	人口密度对人均碳排放量呈非线性影响,抑制作用随着人口密度的增加而减弱[46]
	对外开放水平	实际利用外资(万美元)	对外开放存在“污染天堂”或“污染光环”效应[47]
环境治理	环境规制	环境规制强度综合指数(−)	环境规制不但能够干预碳排放水平,而且可以引导企业进行绿色技术创新,提高环境绩效[48]
	绿色创新	当年申请的绿色发明专利数量(个/件)	绿色创新对碳排放的影响呈倒 U 型关系.在初期会增加碳排放量,但随着低碳技术水平不断提升,成果转化率增强,将提升能源利用效率[49]
气候条件	气温	年平均气温(℃)	适宜的温度有利于植被生长,温度过高会导致植物水分的蒸发,抑制植物生长[50]
	降水	年平均降水量(mm)	充沛的降水有利于植被生长,增加碳汇量[51]

1.3.4 标准差椭圆 标准差椭圆方法通过椭圆重心、长短轴标准差和方位角等参数表示要素分布的空间位置、在主次要方向上的离散和集聚程度及发展趋势方向,能够定量描述要素在区域空间的分布特征和变化轨迹.计算公式参照刘贤赵等[52].

1.3.5 驱动因素的选取及时空地理加权回归模型的构建 根据城市群内城市发展特征及数据的可得性与规范性,从经济社会、环境治理、气候条件等维度选取能源强度、GDP、产业结构、人口密度、对外开放水平、城镇化水平、环境规制、绿色创新、气温、降水等 10 个变量探究不同驱动因素对碳平衡能力变化的影响(表 3).

采用 GTWR 模型描述驱动因素的时空异质性影响[53].计算公式见式(8).

$$Y_i = \beta_0(\mu_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^{p} \beta_k(\mu_i, v_i, t_i) X_{ik} + \varepsilon_i \qquad (8)$$

式中:Y 和 X 分别表示碳平衡能力及其驱动因素;i 为样本城市的数量;k 为驱动因素的数量;u 和 v 表示城市的经纬度坐标;t 为时间序列. $\beta_0(\mu_i, v_i, t_i)$ 和 $\beta_k(\mu_i, v_i, t_i)$ 分别表示模型常数项和第 i 个样本城市第 k 个驱动因素的回归系数.ε_i 为模型误差项.

2 结果与讨论

2.1 关中平原城市群碳收支时空分异特征

2.1.1 碳排放量时空演变特征 2007~2022 年关中平原城市群碳排放量以年均 7.59%的增长率波动增加(图 1).其中,2007~2009 年碳排放量变化较为平稳.2010 年受国家四万亿投资计划、城镇化进程加速及承接东部产业转移等影响,碳排放量较 2009 年增加 23.13%.2011~2013 年碳排放量不断增加,年平均增长率为 5.26%.其原因可能是,该阶段城镇化进程快速推进,基础设施、城市交通以及能源化工等产业得到迅速发展,化石能源的消耗增加了碳排放量.《大气污染防治行动计划》的实施以及国际能源市场波动使得 2014 年的碳排放量较 2013 年下降 6.38%.2014~2016 年碳排放量以年均−5.61%的水平下降,2016 年降至 13085.80 万 t,为近 10 年最低值.这主要源于城市群对国家“双控”行动的积极响应和国家环保督察的严格监管.在节能降耗政策措施的影响下,能源消费增长速度不断下降.2017 年碳排放量开始快速反弹,较上年增加了 49.69%.主要由于煤炭产能出现增长,工业产值不断增加,且城市群对交通、能源等重大项目的建设需求不断增长,而以化石能源消费为主的能源结构未发生根本性变化,建设用地承载的能源消费碳排放量占总量的 98.83%,是主要的碳源.受新冠疫情影响,工业生产和交通出行等活动强度和频率降低,使得 2020~2021 年碳排放量增速有所下降.2022 年,城市群生产和生活活动逐渐恢复,重大产业项目投资不断增长.此外,作为重要的能源基地,为保障全国各地的能源供给,煤炭产量不断增加,由此导致碳排放量的显著提升.

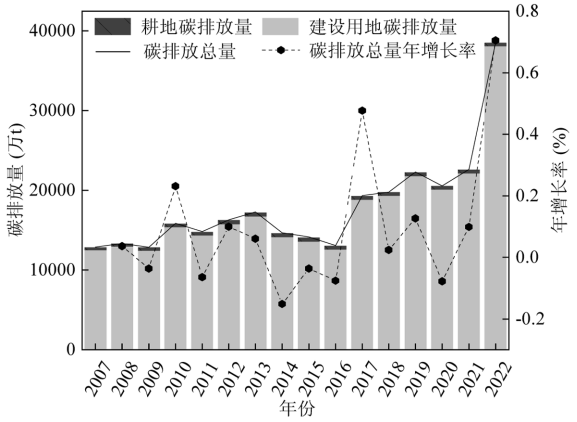


图 1 2007~2022 年关中平原城市群碳排放量的动态变化

Fig.1 Temporal dynamics of carbon emissions in the Guanzhong Plain urban agglomeration from 2007 to 2022

采用自然断点法将城市群碳排放量划分为高值区、中值区和低值区.图 2 显示,2007~2022 年的碳排放量空间上呈东高西低的分布特征.平凉、天水、铜川、商洛和宝鸡始终为低值区,临汾和运城在 2012 年由中值区转变为高值区,西安在 2012 年,咸阳、渭南和庆阳在 2022 年由低值区转变为高值区.2022 年,临汾的碳排放量达到 9561.18 万 t,铜川仅有 758.26 万 t,相差达 12.6 倍,表明碳排放量的区域差异大.临汾和运城的产业发展依赖钢铁、煤炭、焦化等能源密集型产业,产生了较多的碳排放量,并已与相关主体形成紧密的利益链条,减排难度较大.西安以打造核心都市圈为目标,在城市建设过程中追求城市规模扩张而忽视了功能布局的重要性,也忽略了城市结构中缓冲区的建设,人口和产业过度集聚导致“大城市病”的问题凸显.城市密度过高、土地利用低效是能源需求量和消耗量增加的主要因素,使得碳排

放水平不断提升.咸阳新型城镇化建设速度偏慢,人口规模较大,但碳减排的规模效应未发生作用.渭南和宝鸡致力于打造先进制造业聚集区,但现代绿色产业支撑不足,产业结构中化石能源依赖型工业比重大,导致碳减排行动面临较大压力.庆阳是重要的石油和天然气化工基地,石油加工和炼焦等生产过程消耗了较多的化石能源,碳排放量由 2007 年的 210.22 万 t 增至 2022 年的 2739.14 万 t,增加了近 12 倍,成为城市群内碳排放量增幅最大的城市.天水的历史文化资源优势明显,使得旅游产业正在成为城市的主导产业,能源消耗相对较少.平凉的工业经济薄弱,碳排放水平相应较低.铜川的碳排放水平较低同资源型城市低碳转型、延伸循环经济产业链、持续实施节能减排行动相关.商洛作为重要生态安全屏障区,工业开发程度较低,且依托生态资源优势,已经形成了生态农业、健康旅游业等化石能源消耗较少的产业.

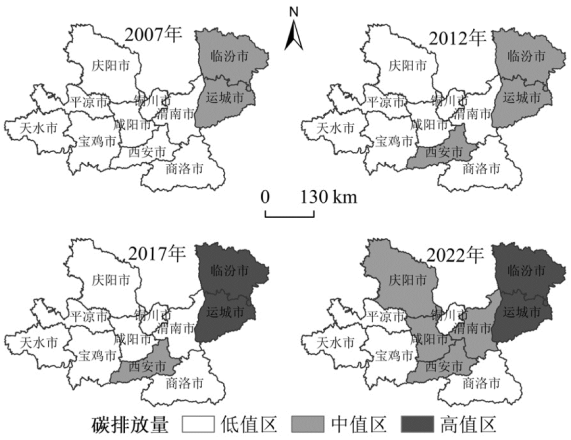


图 2　2007、2012、2017 和 2022 年关中平原城市群碳排放量的空间分异特点

Fig.2　Characteristics of the spatial differences in carbon emissions in the Guanzhong Plain urban agglomeration in 2007, 2012, 2017 and 2022

审图号:GS(2019)1822 号

2.1.2　碳汇量时空演变特征　由于城市群内各类土地面积的变化幅度较小,碳汇量以年均 0.10%的增长率缓慢增加(图 3(a)).相比碳排放量,碳汇量的变化较为平稳.其中,耕地碳汇量最高,占总量的 82.56%,是碳汇的主要来源.城市群种植条件优越,是全国重要的农业生产基地和商品粮基地.自 2007 年以来,全面落实耕地保护、高标准农田建设等中央各项强农惠农政策,耕地碳汇能力不断增强,碳汇量由 2007 年的 1533.78 万 t 增至 2022 年的 1796.53 万 t,增加了 262.75 万 t(图 3(b)).

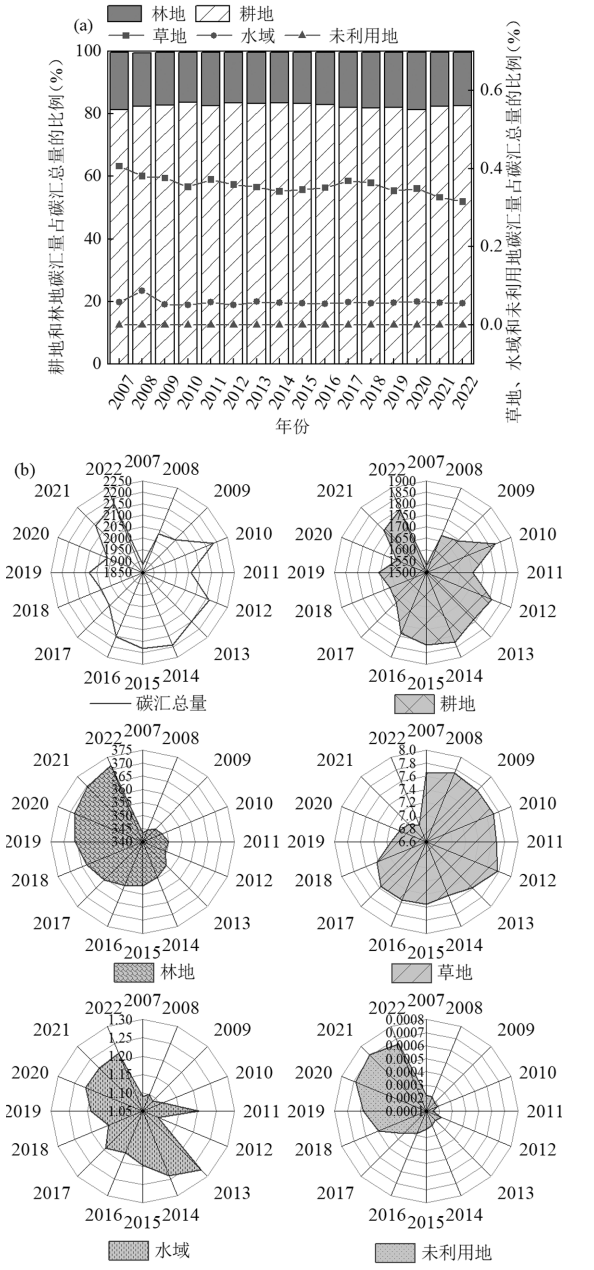


图 3　2007~2022 年关中平原城市群各土地利用类型碳汇相对占比(a)与碳汇量(b)的变化

Fig.3　Changes in the relative proportions (a) and carbon sinks (b) of land use types in the Guanzhong Plain urban agglomeration from 2007 to 2022

林地碳汇量占比为 17.01%,是第二大贡献来源.得益于实施退耕还林、天然林保护、三北防护林等重点生态工程,城市群的森林覆盖率由 2007 年 33.00%提升至 2022 年的 35.71%,林地碳汇功能逐渐

增强.林地碳汇量由 2007 年的 343.25 万 t 增至 2022 年的 371.49 万 t,增加了 8.23%.草地、水域和未利用地对碳汇量的贡献相对较小,平均占比不足 1%.关中水系修复、湖泊湿地生态修复和国家公园建设等项目在水资源管理和湿地保护方面成效显著,生态碳汇功能不断稳固.

图 4 显示,2007~2022 年的碳汇量空间上呈由西向东递增的特点.临汾、渭南和运城始终为高值区,商洛始终为中值区,平凉和铜川始终为低值区.西安在 2012 年由高值区转变为中值区.宝鸡和咸阳在 2012 年由中值区转变为高值区,在 2017 年又转变为中值区.庆阳和天水在 2012 年由低值区转变为中值区.除西安外,其余城市的碳汇量均有不同程度的增加,主要得益于严格落实耕地保护红线、实施退耕还林、修复城市湿地和水域等措施.临汾、运城、渭南、宝鸡和咸阳等城市因平原和盆地为主的地形地貌特征和良好的气候条件而具有农业发展优势,丰富的耕地资源推动了碳汇水平的提升.商洛森林蓄积量较高,林地碳汇占比达 65.98%,弥补了耕地碳汇的不足.铜川和平凉的耕地和林地面积分别仅占城市群的2.54%和2.58%,碳汇能力明显不足.西安的碳汇量由 2007 年的 231.21 万 t 降至 2022 年的 178.97 万 t,下降了 22.60%.尽管西安实施了秦岭生态治理、湿地修复、“八水绕长安”等一系列生态恢复工程,但国家中心城市的虹吸效应使得人口、资源、产业等发展要素不断集聚,城市建设用地快速扩张,加大了对生态用地的侵占,导致碳汇量不断下降.

2.1.3 城市碳平衡类型的划分 为评估碳排放量和碳汇量的平衡状态,以 X 轴表示碳汇量,Y 轴表示碳排放量,二者的平均值为坐标轴中点,按照 4 个象限依次分类为高碳汇−高碳排(HH)、低碳汇−低碳排(LL)、高碳汇−低碳排 (HL)、低碳汇−高碳排(LH). HH 与 LL 表示碳源碳汇处于相对平衡状态.HL 与 LH 分别表示“相对碳汇”和“相对碳源”.

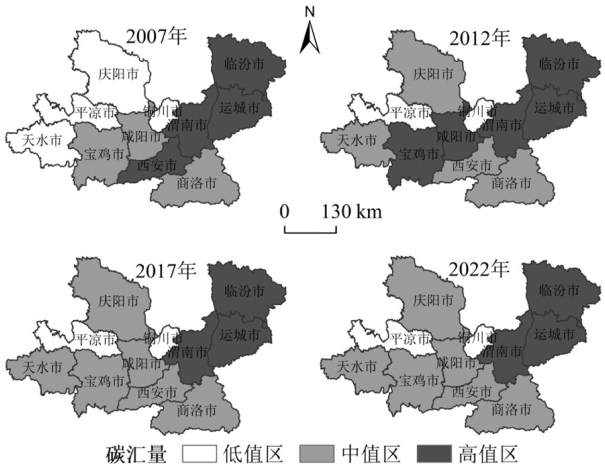


图 4 2007、2012、2017 和 2022 年关中平原城市群碳汇量的空间分异特点

Fig.4 Characteristics of the spatial differences in the carbon sinks in the Guanzhong Plain urban agglomeration in 2007, 2012, 2017 and 2022

审图号:GS(2019)1822 号

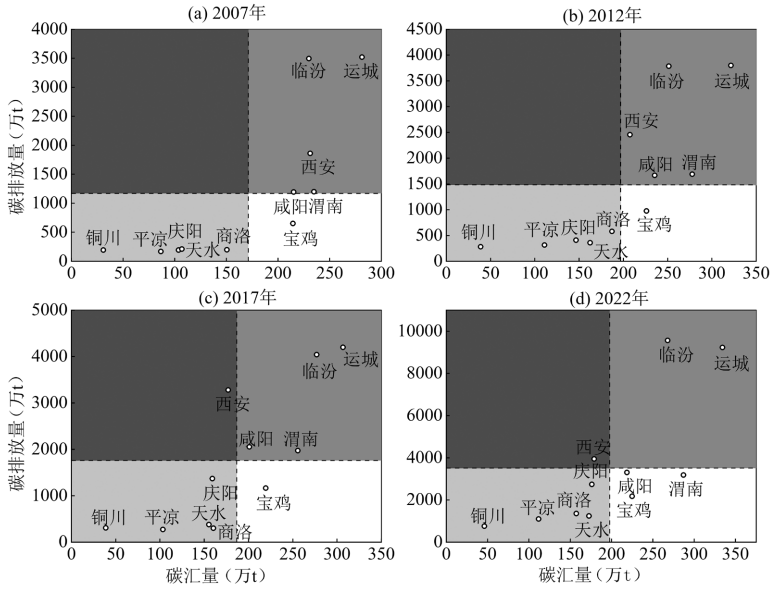


图 5 2007~2022 年关中平原城市群内城市碳平衡类型划分及变化

Fig.5 Carbon balance type classification and changes in cities within the Guanzhong Plain urban agglomeration from 2007 to 2022

图 5 显示,2007~2022 年,城市群内 8 座城市的类型未发生变化. 其中,临汾和运城属于 HH 类型城市,碳排放量和碳汇量均高于平均水平,能耗量大,但具有丰富的耕地资源,碳汇基础良好,应在释放碳汇潜力的基础上加大能源结构和产业结构的调整力度.宝鸡属于 HL 类型,碳排放量始终低于平均水平,碳汇量高于平均水平,处于减排增汇的可持续状态.天水、平凉、庆阳、铜川和商洛等 5 座城市属于 LL 类型,碳排放量和碳汇量均低于平均水平,应依托优势资源,促进新能源、生态旅游、现代服务业等环境友好型产业发展,协同提升城市发展品质与生态环境质量.2017 年,西安由 HH 类型转变为 LH 类型,碳排放问题相对突出.这是由于不断推进“强基增容”工程,这些工业生产、基础设施建设以及建设用地开发等活动,导致能源碳排放量持续增加.应推进研发低碳技术的应用并通过建设秦岭国家公园、城市湿地公园等方式增加城市碳汇量.2022 年,咸阳和渭南由 HH 类型转变为 HL 类型,碳汇的相对占比不断提升,这主要得益于严格保护耕地、建设现代农业产业园等行动.

2.2　关中平原城市群碳平衡能力时空演变分析

碳平衡能力以年均−2.93%的变化率波动递减,变化率从 2007~2013 年的−5.13%升至 2014~2015 年的 3.52%,再降至 2016~2022 年的−5.95%,呈下降−上升−波动下降的变化特点(图 6).其中,铜川的碳平衡能力在 1.10 附近波动,较为稳定.渭南、临汾和运城的碳平衡能力分别从 2007 年的 1.34、0.45、0.55 增至 2022 年的 1.60、0.50、0.64,一方面归因于各城市持续推进落后产能的淘汰,加大新能源产业投资力度,并不断提升风能、光伏等清洁能源的应用比重,能耗显著下降.另一方面归因于削减工业燃煤、植树造林、防治土壤污染等生态治理行动,碳汇容量不断增加.西安、咸阳、宝鸡、商洛、天水、平凉和庆阳的碳平衡能力出现不同程度的下降,主要是由于能源和建设用地总量和强度的增加对生态资源产生了显著影响,尤其是城市周边耕地面积的急剧减少,破坏了生态系统的碳平衡.

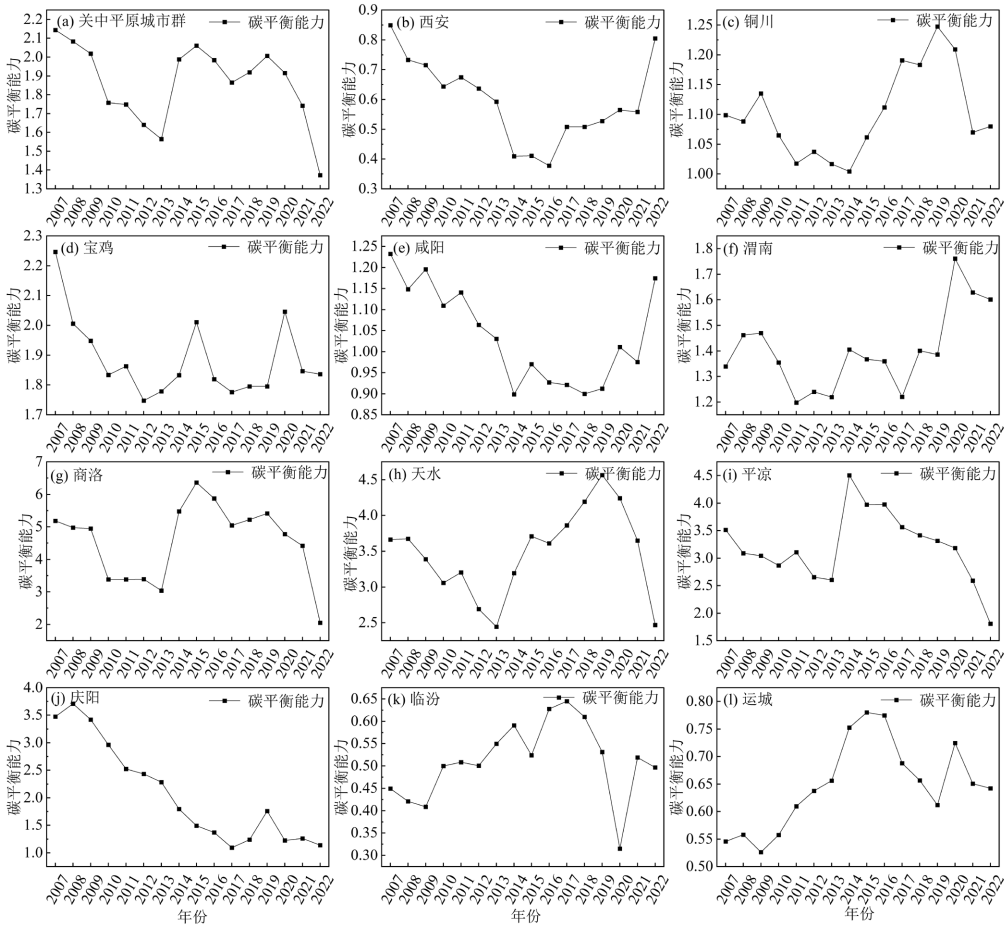


图 6　2007~2022 年关中平原城市群及各城市碳平衡能力的动态变化

Fig.6　Dynamics of the carbon balance capacity of the Guanzhong Plain urban agglomeration and its cities from 2007 to 2022

2007 年以来,城市群碳平衡能力的均值始终大于 1.铜川、宝鸡、咸阳、渭南、商洛、天水、平凉、庆阳等城市的均值大于 1,而西安、临汾、运城的均值小于 1,碳承载能力明显不足.其中,碳平衡能力最高的商洛为 4.52,是最低值临汾的 8.86 倍,说明不同城市之间的差异显著.图 7 显示,2007~2022 年的碳平衡能力在空间上呈西北和东南高、中部和东北低的特点.天水和宝鸡分别始终为高值区和中值区,西安、咸阳、铜川、临汾和运城始终为低值区.庆阳和平凉分别在 2017 年和 2022 年由高值区转变为低值区和中值区,渭南在 2022 年由低值区转变为高值区,商洛在 2022 年由高值区转变为中值区. 天水、平凉、庆阳的城市发展水平相对较低,能源消耗也相对较少.商洛、渭南和宝鸡的林草资源丰富,是城市群内重要的碳库.2022 年,西安 GDP 和常住人口数分别占城市群的 30.00%与 41.52%,是生产生活活动最频繁的区域.临汾和运城的碳汇量难以满足高能耗产业释放的碳排放量.复杂的碳平衡格局使得城市群内各城市难以协同实现“双碳”目标.

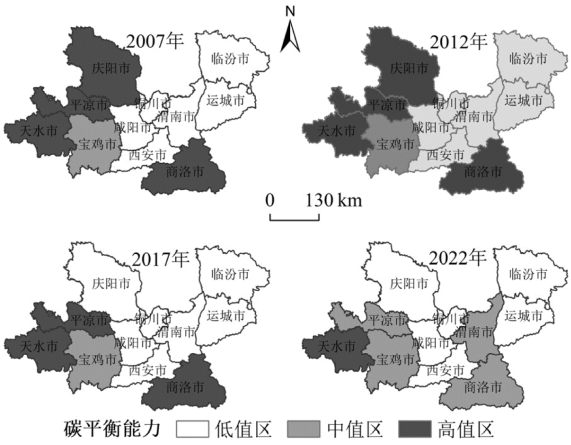


图 7 2007、2012、2017 和 2022 年关中平原城市群碳平衡能力的空间分异特点

Fig.7 Characteristics of spatial differences in the carbon balance capacity in the Guanzhong Plain urban agglomeration in 2007, 2012, 2017 and 2022

审图号:GS(2019)1822 号

2.3 关中平原城市群碳平衡能力空间演变动态分析

表 4 关中平原城市群碳平衡能力标准差椭圆参数

Table 4 Standard deviation ellipse parameters of carbon balance capacity in the Guanzhong Plain urban agglomeration

年份	重心经度(°E)	重心纬度(°N)	长半轴(km)	短半轴(km)	旋转角(°)	椭圆周长(km)	椭圆面积(km²)	重心地理位置
2007	108.066	34.806	217.397	119.152	106.988	1079.918	81371.318	陕西省咸阳市
2012	108.128	34.848	217.835	120.752	101.626	1085.648	82629.598	陕西省咸阳市
2017	108.131	34.694	233.799	112.391	100.625	1121.251	82543.382	陕西省咸阳市
2022	108.182	34.809	218.923	109.422	93.146	1060.373	75249.398	陕西省咸阳市

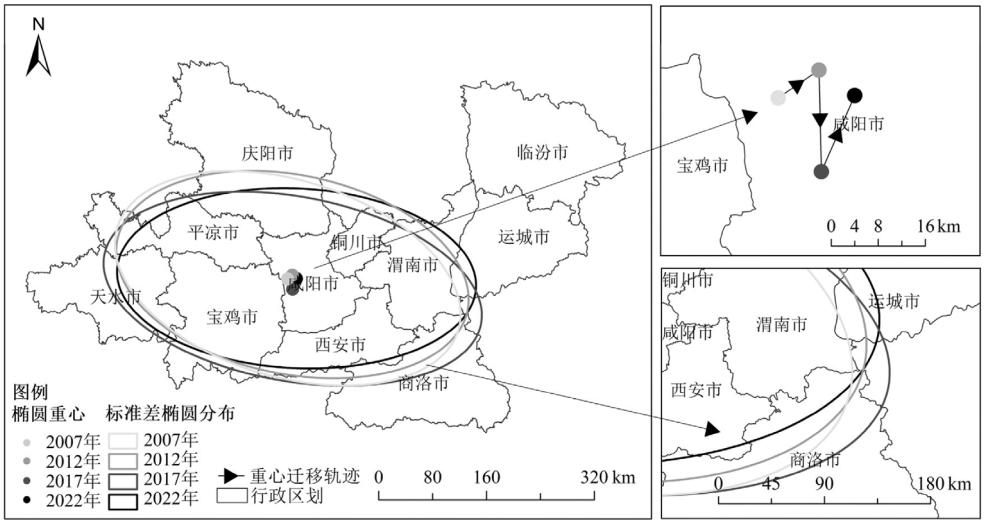


图 8 2007~2022 年关中平原城市群碳平衡能力的标准差椭圆分布及重心迁移路径

Fig.8 Standard deviation ellipse distributions of the carbon balance capacity and center of gravity migration path in the Guanzhong Plain urban agglomeration from 2007 to 2022

审图号:GS(2019)1822 号

表 4 和图 8 显示,标准差椭圆面积由 2007 年的 81371.318km^2 上升至 2012 年的 82629.598km^2,再持续收缩至 2022 年的 75249.398km^2,缩减了 7.36%,表现出碳平衡能力先扩张、再收敛的变化特点.椭圆短半轴由 2007 年的 119.152km 下降至 2022 年的 109.422km,长半轴变化幅度较小,由 2007 年的 217.397km 波动增加至 2022 年的 218.923km,表示碳平衡能力在南北方向逐渐收敛,而在东西方向呈微弱扩散状态.长半轴标准差始终大于短半轴标准差,说明碳平衡能力的空间分布以东西方向为主,南北的影响较弱.方位角上,椭圆转角由 2007 年的 106.988°逆时针降至2022年的93.146°,表现出西北−东南的分布特点,说明城市群的西北和东南部的碳平衡状况较好.城市群东南部涵盖秦岭自然保护区,生态资源丰富,森林覆盖率高,具有较高的生态固碳能力.城市群西北部通过发展清洁能源、生态农业及低碳文化旅游产业,降低了碳排放水平,加之是重要的防风固沙屏障和水土保持区,实施了防沙治沙、国土绿化、海绵城市建设等生态工程项目,生态碳汇功能不断提升.重心分布及迁移轨迹上,重心位置在 108.066°E~108.182°E,34.806°N~34.809°N 范围内经历了东北−南−东北的不规则变化过程,整体向东迁移.

2.4　关中平原城市群碳平衡能力变化的驱动因素分析

2.4.1　数据检验与模型选择　在模型拟合之前,为避免多重共线性对回归结果的干扰,对各变量进行方差膨胀因子(VIF)检验.方差膨胀因子均小于 4,平均方差膨胀因子为 2.28,表明各变量之间相互独立,可以进行回归分析.为消除异方差对结果的影响,对除能源强度、环境规制和绿色创新之外的 7 个变量进行取对数处理.最小二乘法(OLS)、GWR 模型和 GTWR 模型回归的相关参数结果显示,GTWR 模型的 R^2 为 0.98,高于 OLS 模型和 GWR 模型的 0.76 和 0.96,模型的拟合效果更优.因此,采用 GTWR 模型分析碳平衡能力驱动因素的时空异质性.

2.4.2　动态变化特征　采用 GTWR 模型对碳平衡能力的驱动因素进行回归分析,描述 2007~2022 年驱动因素的回归系数动态变化的状况(图 9).

能源强度的回归系数均值为负值,介于 −1.429~−0.398 的范围,呈 U 型变化特点.2007~2016 年的影响程度逐渐增强,说明城市发展对能源消耗的依赖性较强,尚未形成有利于碳减排的能源结构和消费方式.2017 年国家提出能源消耗总量和强度“双控”目标以来,削减燃煤、淘汰落后产能和清洁用能等措施的实施使得城市群非化石能源比例不断增加,正在向清洁高效的能源利用方式转型,对碳平衡能力的抑制作用逐渐减弱.

产业结构的回归系数均值为负值,介于−1.158~−0.643 的范围,说明第二产业发展不利于碳平衡的实现.关中平原城市群仍处于工业化发展阶段,能源消耗与碳排放存在着强耦合关系.依托煤炭、石油、天然气等能源资源优势,城市群形成了化石能源依赖的煤炭、钢铁、制造业等为主导的产业.虽然绿色产业在产业结构中的比重不断增加,但高耗能、高碳排放企业占比高等问题在短期内难以解决,传统产业改造升级速度较慢,新能源产业集群规模较小,碳排放量仍然不断增加,阻碍了碳平衡能力的提升.

GDP 的回归系数均值介于−0.394~0.107 的范围,2007~2017 年,GDP 对碳平衡能力起抑制作用,这是由于关中平原城市群的经济增长主要源于化石能源依赖型产业,工业能源消耗不断增加.此外,居民生活水平的提升、私家车保有量的不断增加等也导致化石能源的需求越来越高,进一步提升了碳排放量[54].2018~2020 年,GDP 促进碳平衡能力提升.随着 GDP 水平的提升,公众对绿色宜居的生活空间需求不断增加,城市群积极响应《关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战》政策,针对大气污染问题实施“联防联控”,并启动“绿盾 2018”自然保护区监督行动,生态环境得到改善,碳排放量增速明显下降.2021~2022 年,GDP 转为抑制作用.这是由于城市群“碳锁定”的关系持续存在[55],GDP 与碳排放在短期内难以实现脱钩,特别是受新冠疫情的影响,为保障生活生产的能源供应,城市群能源消耗仍在不断增加. 城镇化水平的回归系数均值变化分两个阶段.2007~2015 年的回归系数在−0.856~−1.243 范围内波动.在西部大开发、“一带一路”和城市群发展战略的影响下,城市规模的扩张增速,各城市不断加强交通、电力、电网等基础设施的建设,能源消耗和建设用地需求显著增加,绿地面积不断减少,削弱了碳平衡能力.2016~2022 年的回归系数由−2.186 降至−5.089,这是由于人口城镇化率由 52.62%提升至 60.63%,城市集聚人口的功能持续增强,城镇基础设

施建设、居民生活方式的转变增加了能源需求,导致碳排放水平的提升.

人口密度对碳平衡能力起到先抑制、后促进的作用.2007~2020 年的回归系数介于−1.337~−0.180 的范围,抑制强度表现出先增强、后减弱的特点.2021~2022 年的回归系数介于 0.097~0.290 的范围,正向作用显著增强,说明人口密集的促进效果显著.人口密度增加会促进工业增长和城市扩张,通过影响能源使用和交通运输增加碳排放量.当人口密度超过一定水平时会产生规模效应,有助于碳减排成本的降低,减少碳排放量.

对外开放水平的回归系数均值在−0.112~0.046 范围内波动变化.这同外资利用规模不稳定有关.对外开放水平的提升有利于先进管理经验和技术的交流,促进生产模式向绿色清洁转变,降低碳排放量.但当外资利用更多集中在能源密集型产业时,伴随更多的是环境污染和能源消耗,使得一些城市有成为“污染避难所”的可能.

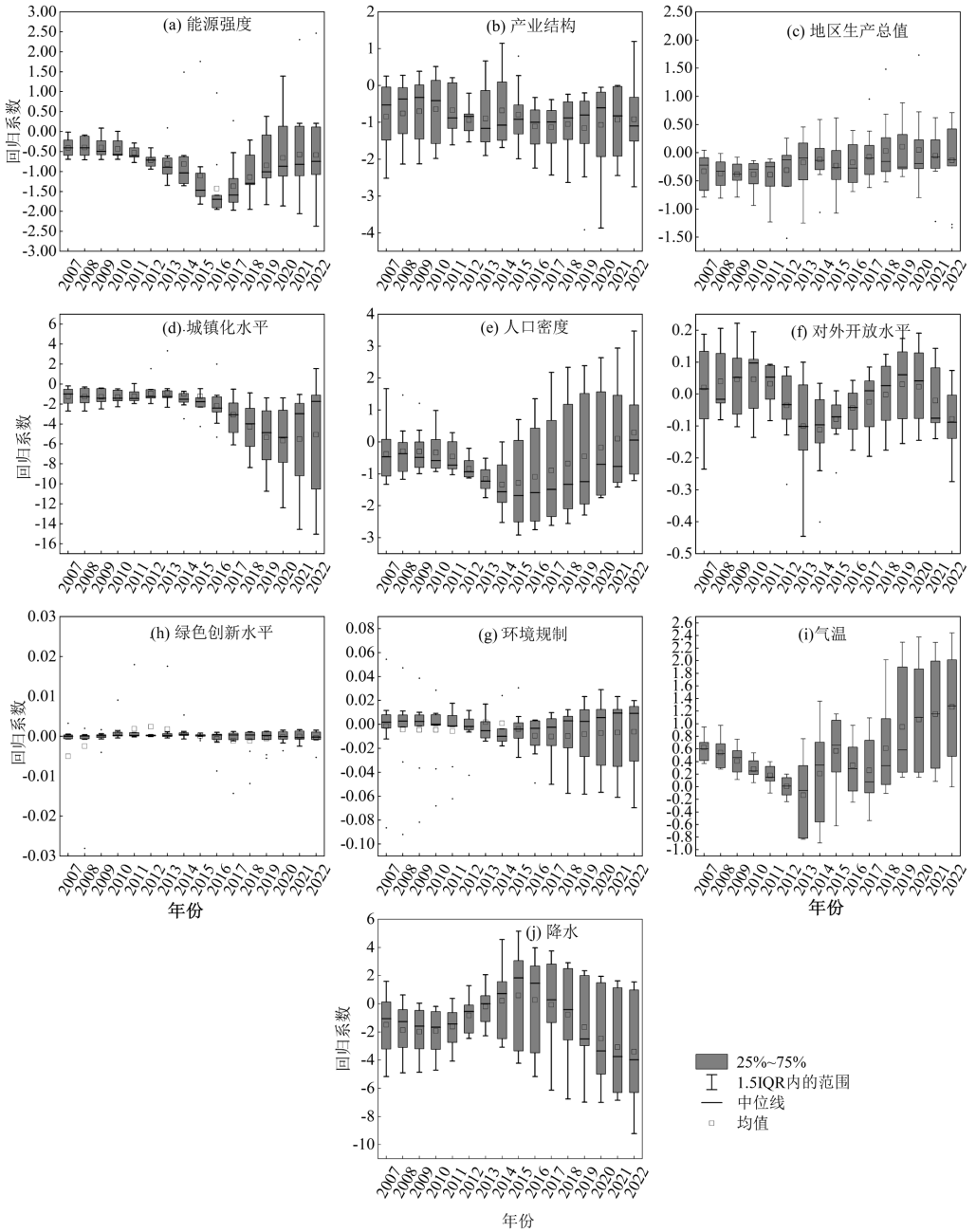


图 9 2007~2022 年关中平原城市群碳平衡能力驱动因素回归系数的动态变化

Fig.9 Dynamics of the regression coefficients of the drivers of the carbon balance capacity in the Guanzhong Plain urban agglomeration from 2007 to 2022

环境规制的回归系数均值介于−0.010~0.002 的范围,以微弱的负向作用为主,但在 2013~2014 年呈现的是强度较小的正向作用.环境规制能够促使高碳排和高污染企业转变生产方式,研发清洁生产技术,提高能源利用效率.但是当环境规制力度过于严苛时,出于对生产成本的考虑,企业会选择接受环境罚款并维持原有的生产模式,造成碳排放量的增加.

绿色创新的回归系数均值介于−0.005~0.002 的范围,在 0 值附近波动,说明绿色创新对碳平衡能力的影响程度较小.在大部分年份,绿色创新对碳平衡能力表现出促进作用.说明绿色创新能够提升能源利用效率,降低碳排放量.但回归系数均值较小,可能是由于城市群协同创新机制不健全、创新优势发挥不足和绿色创新成果与产业对接不畅等有关,尤其是绿色创新成果转化水平低较低,难以有效支撑能源和产业体系的迭代与升级,对碳平衡能力提升的促进作用较弱.

气温的回归系数变动较大,2007~2013 年的回归系数均值在−1.983~−0.201 范围内波动上升,在 2014~2016 年转为正值,介于 0.212~0.577 之间,但在 2017~2022 年转变为负值,且不断下降,对碳平衡能力的抑制作用不断增强.这是由于适宜的气温会加快植物水分的蒸发,影响植被光合作用,进而导致碳汇能力的下降.同时,过高的气温会增加公众空调制冷的需求,影响城市的能源供应,导致碳排放量增加.

降水的回归系数均值介于−0.135~1.265 之间,呈先下降、后上升的特点.除 2013 年外,其余年份的降水对碳平衡能力表现出促进作用,这是由于充沛的降水是植物生长的有利条件,能够增加土壤中的有机物和养分含量,对碳汇量增加具有积极作用.2013 年由于降水量出现异常,尤其是天水、平凉、庆阳、临汾、运城等城市的降水量较多年平均偏丰 20%,降水对碳平衡能力呈抑制作用,这是由于降水过多易引起水土流失和土壤中有机质和养分含量的下降[56],不利于植被生长和碳汇量的增加.

2.4.3　空间异质性　采用自然断点法将各驱动因素的回归系数年均值划分为 5 个等级,探讨驱动碳平衡能力变化不同因素的空间异质性特点(图 10).

能源强度对碳平衡能力的影响以负向作用为主,影响程度呈西北低、东北高的特点.其中,城市发展依赖能源密集型行业、煤炭在能源结构中占比突出的临汾和运城的负面影响最大.能源强度每增加 1%,碳平衡能力降低 1.085%.其次是西安、咸阳、铜川和渭南.能源强度对天水的碳平衡能力起到促进作用,能源强度每增加 1%,碳平衡能力将提升 0.574%.这同天水结合新能源优势资源,增加清洁能源消费比重、采用光伏发电代替火力发电等措施相关.特别是“十三五”期间,新能源电力建设成效显著,新能源消纳和存储能力不断提升.

产业结构对各城市的碳平衡能力产生负向影响,说明第二产业占比越高,越不利于碳平衡能力的提升.回归系数介于−0.485~−1.334 的范围,其中,西安、咸阳、铜川、天水、临汾等城市的驱动作用较强,产业结构每提升 1%,碳平衡能力将下降 1.114%~1.333%.宝鸡、商洛、庆阳、平凉等城市的新能源产业不断发展,绿色农业、健康医药、文化旅游、生态环保等低碳产业占比较高,产业结构的驱动作用相对较弱,每提升 1%,碳平衡能力将下降 0.485%~0.583%.

GDP 对碳平衡能力的影响以负向作用为主,影响程度呈由西向东递增的特点.其中,宝鸡和平凉的影响程度最高,GDP 每增加 1%,碳平衡能力将分别降低 0.386%和 0.488%.西安、咸阳、庆阳、商洛、天水的影响次之.GDP 每增加 1%,碳平衡能力将分别降低 0.164%~0.274%.渭南、铜川和运城的影响程度最弱.GDP 每增加 1%,碳平衡能力将降低 0.061%~0.115%.临汾则表现出正向影响,GDP 每增加 1%,碳平衡能力将提升 0.119%.这是由于临汾通过资源型产业改造升级、降低重污染和高碳排放企业比例,减少了对能源消耗的依赖性.

城镇化水平对各城市的碳平衡能力产生负向影响,回归系数介于−0.857~−5.074 的范围.对临汾、运城和商洛的抑制作用远大于其他城市,城镇化水平每提升 1%,碳平衡能力将降低 4.659%~5.074%,这与资源禀赋和发展特点有关.传统产业在支撑临汾和运城城镇化建设的同时,进一步增加了能源碳排放量.而商洛依托生态资源优势,建设山水园林城市,使得碳汇对生产和生活活动更加敏感.由于城镇化率在 2007~2022 年快速增加了 313%,产业园区建设、城市改造、垃圾处理等活动对碳汇功能的干扰加剧,削弱了碳平衡能力.

人口密度对碳平衡能力的回归系数介于

−1.560~1.358 的范围,影响作用呈东高西低的空间特点.其中,负向影响的城市占比为 72.73%,说明在大部分城市中,人口集聚不利于碳平衡能力的提高.这是由于人口集聚会增加能源、电力、交通和废弃物处理等的需求,并产生碳减排成本规模不经济的效应,造成人均碳排放量的增加.而庆阳、天水、平凉的回归系数为正,人口密度每增加 1%,碳平衡能力将提升 0.366%~1.358%.原因在于城市公共基础设施尚未形成规模效益,人口进一步集聚将促使公共服务能力形成正外部性,减缓碳减排压力.

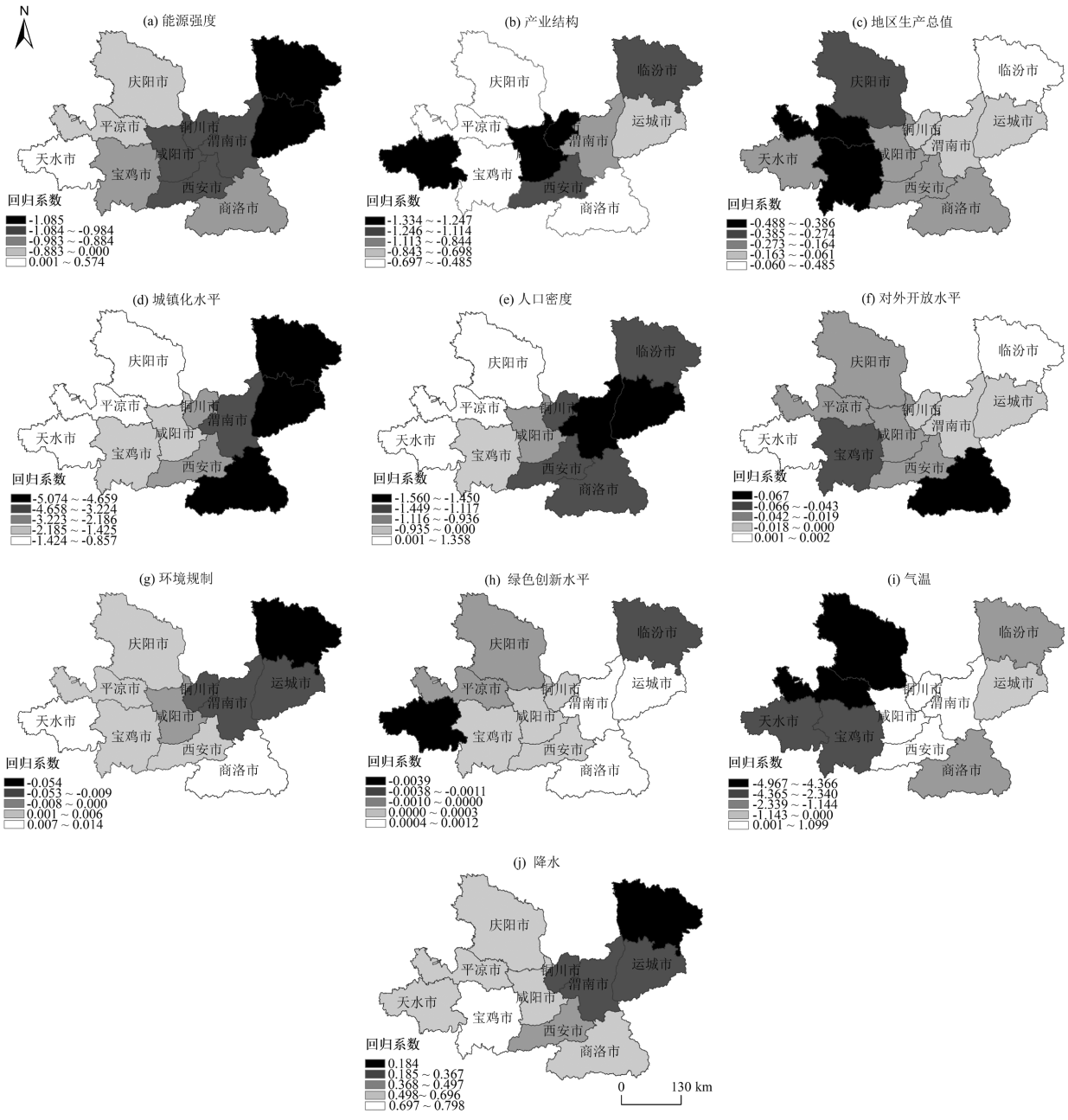


图 10 关中平原城市群碳平衡能力驱动因素的空间异质性

Fig.10 Spatial heterogeneity in drivers of carbon balance capacity in the Guanzhong Plain urban agglomeration

审图号:GS(2019)1822 号

对外开放水平对碳平衡能力影响的回归系数介于−0.043~0.022 的范围.由于外资利用集中于水泥、制造等行业,增加了能源消耗和碳排放量,低碳产业份额不足,导致对外开放水平对西安、渭南、铜川、运城等的碳平衡能力表现出较强的负向影响.而在天水和临汾表现出正向的促进作用,对外开放

水平每提高 1%,碳平衡能力将提升 0.012%和 0.022%.这可能与当地创新外商投资企业合作模式有关,表现在吸引具备先进技术的外资企业参与新能源产业链发展、矿山生态修复等项目上.

环境规制对碳平衡能力影响的回归系数介于−0.054~0.014 的范围.其中,环境规制有利于西安、宝鸡、商洛、平凉、庆阳和天水的碳平衡能力提升.这些城市不但推进重点能耗企业节能减排和清洁生产,而且加强了生态保护执法和环境监管力度,积极采取了碳减排行动、整治违法开采等措施.而临汾、运城、铜川和渭南的环境规制每增强 1%,碳平衡能力将下降 0.001%~0.054%.这可能是由于高污染和高碳排放的企业比重过大,污染排放的末端治理成本比较高,由此导致 ER 对这些城市的影响不利于碳平衡能力提升绿色创新在各城市的回归系数介于−0.004~0.001 的范围,对碳平衡能力的影响效果并不明显,表现出绿色创新技术的应用或转化能力有限.绿色创新对宝鸡、铜川、渭南、西安、商洛、咸阳和运城的碳平衡能力有一定的促进作用,而对平凉、庆阳、天水有负向抑制作用,对临汾则无显著影响.

气温的回归系数介于−4.967~1.099 的范围,呈中间低、两侧高的分布特点.对处于关中平原的铜川、渭南、西安、咸阳等城市呈正向影响.关中平原气候适宜,是国内重要的粮食主产区.气温对其余的 7 座城市表现出负向影响,可能是由于较高的温度导致蒸散量增加,土壤水分含量的降低增加了土壤侵蚀的风险,抑制了植被生产力的提升.

降水的回归系数介于 0.184~0.798 的范围.高值区分布在西安、咸阳、宝鸡、商洛、天水、平凉、庆阳等 7 座城市,这些城市处于半干旱、半湿润的季风气候区域,降水量相对较少,土壤含水量低,植被生长对降水更加敏感.低值区主要分布在临汾、运城、渭南和铜川等城市.

2.5　讨论

以往研究仅考虑了单一碳排放或碳汇的演变特征,本研究在碳排放量和碳汇量核算的基础上借助碳生态承载系数综合评价了城市群的碳平衡能力,探讨了城市群内各城市的碳平衡类型.结果显示,城市群碳排放量呈波动增长特点.得益于生态修复工程在提升植被覆盖度、土壤质量等方面的积极作用,碳汇量平稳增长.不同于京津冀、珠三角和长江三角洲等发达城市群因财政支出和低碳技术的应用优势,碳源系统和碳汇系统愈发协调的特征[57],关中平原城市群高耗能产业带动城市发展的特征明显,在创新能力和绿色基础设施相对落后的情形下,碳排放量的增加幅度远大于碳汇量,说明碳汇量对碳排放量的消纳能力还远远不足,这在甘肃[58]、新疆[59]、天山北坡城市群[60]等地区表现出相同的特点.有研究表明,土地利用变化是造成碳汇损失的主要原因,尤其是耕地、森林、草地等生态用地逐渐转变为建设用地[61].结果显示,耕地是城市群碳汇的主要来源,占比高达 82.56%,其次是林地,占比为 17.01%,意味着维护生态系统碳汇功能的关键是保护耕地资源和林地资源不被占用.一方面,在严守耕地保护红线的基础上,优化农业种植结构,注重农业绿色技术、现代灌溉技术等的改进与推广,减少化肥农药等的使用,通过政府补贴引导农业生产向低碳化转型.另一方面,加强森林治理和修复,通过植树造林、森林公园、生态廊道等措施增强森林碳汇功能.

判断影响碳平衡能力变化的驱动因素是提升碳治理能力的关键.结果表明,社会经济因素中,能源强度、GDP、产业结构和城镇化水平对碳平衡能力的提升有抑制作用,这与 Tian 等[62]、韦彦汀等[63]的研究结果相似.由于外资利用规模变化的不确定性,对外开放水平对碳平衡能力并未形成稳定的影响.不同于 Liu 等[64]的观点,人口密度的影响作用空间异质性明显,尤其是,人口密度的增加在天水、平凉和庆阳表现出对碳平衡能力提升的促进作用.值得注意的是,人口密度的影响存在阈值效应[65],人口聚集度过高或过低均会对城市碳平衡能力产生不利影响.因此,应着力提高城市基础设施的共建共享水平,促进公共服务资源的优化配置.气候条件因素中,降水能够增加土壤水分,刺激植物生长,有利于植被生产力的提高.降水的年际变化是碳汇量增加的重要因素.气温通过土壤水分和有机物的含量直接或间接影响植被生长,气温过高或过低均不利于植被碳汇能力的增强.与魏猛等[66]的研究不同,环境治理因素的影响效果不明显,可能是环境监管政策与碳减排之间脱节问题所致[67].绿色创新的影响程度弱可能是由于研发投资更加侧重于生产端的污染排放问题,而在生态要素的开发以及修复领域的投入

较少,绿色创新成果的转化和应用受限,难以有效抵消长期累积的碳排放量.此外,城市群建设过程中经济和产业集聚、生态恢复项目和协同治理政策等的实施使国土空间形态由分散转变为集中,城市产业与人口也更加高度融合,碳减排绩效得到提高,为区域碳平衡的实现奠定了坚实基础[68-69].《关中平原城市群建设“十四五”实施方案》要求发挥西安国家中心城市的辐射带动作用,探索低碳发展模式,减轻节点城市的碳排放压力.明晰城市群内城市产业结构、能源利用和减排技术等领域的优势,通过陕西省、山西省和甘肃省的省际互动,优化土地利用结构和空间布局,促进城市群碳源要素和碳汇资源的优化配置,形成减排增汇的分工体系.在西安、渭南、咸阳和临汾等城市的大气污染治理行动中,充分发挥大气污染治理的协同减排效果[70],持续优化能源结构和产业结构,促进交通、建筑和公共事业等领域的低碳经济发展.

本研究也存在一定的局限性.第一,以市域地理单元估算的结果并不一定适用于区、县尺度的碳平衡研究.第二,估算能源碳排放量、农业碳排放量、农业碳汇量等采用的系数均源于参考文献而非实际调研而来,可能会影响结果精度.第三,城市群的碳平衡能力受多种因素影响,但由于数据缺失,仅考虑了环境规制和绿色创新,未将更多的环境治理因素纳入对碳平衡能力的影响研究中.第四,由于地理和时间加权回归模型以线性假设为基础,无法清晰地呈现解释变量和被解释变量之间的非线性影响关系,难以有效验证 GDP 和绿色创新等驱动因素对碳平衡能力可能存在的非线性作用.

3 结论

3.1 城市群碳排放量呈波动增加的特点,由2007年的 12881.57 万 t 增加至 2022 年的 38570.76 万 t,年均增长率为 7.59%.碳排放量呈现东高西低的空间格局,临汾、运城、西安、咸阳、渭南为碳排放高值区,平凉、庆阳、铜川、商洛属于碳排放低值区.其中,庆阳是碳排放量增幅最大的城市.

3.2 碳汇量稳定增长了 290.33 万 t,年均增长率为 0.10%.碳汇量的年均增速不到碳排放量的 20%,碳排放量和碳汇量差距过大是造成碳失衡的主要原因.耕地和林地是碳汇的主要贡献来源,分别占碳汇量的 82.56%和 17.01%,草地、水域和未利用地的贡献较弱,占比不足 1%.碳汇量在空间上呈由西向东递增的分布特点.除西安市外,其余城市的碳汇量均有不同程度的增长.

3.3 碳平衡能力由 2007 年的 2.14 下降至 2022 年的 1.37,年均增长率为−2.93%.最高的是商洛市,值为 4.52,是最低值临汾市的 8.86 倍,不同城市之间的碳平衡能力差异显著.碳平衡能力的标准差椭圆呈西北−东南分布格局,椭圆重心整体向东迁移.

3.4 驱动碳平衡能力变化的因素存在明显的时空差异.能源强度、GDP、产业结构和城镇化水平是抑制碳平衡能力的主要因素,对外开放水平并未对碳平衡能力形成稳定影响.降水、气温等气候条件因素对碳平衡能力的影响程度不断增强.而环境规制、绿色创新等治理因素的影响并不显著.人口密度对碳平衡能力影响的空间异质性明显.这一结果揭示了碳平衡能力与不同驱动因素之间存在复杂的作用关系,为制定差异化的生产减碳和生态固碳的策略提供了有益参考.

参考文献:

[1] Han J, Meng X, Zhou X, et al. A long-term analysis of urbanization process, landscape change, and carbon sources and sinks: A case study in China’s Yangtze River Delta region [J]. Journal of Cleaner Production, 2017,141:1040−1050.

[2] Wang Z, Liang C, Liu J, et al. How urbanization shapes the ecosystem carbon sink of vegetation in China: A spatiotemporal analysis of direct and indirect effects [J]. Urban Climate, 2024,55:101896.

[3] 张 赫,张宇童,王 睿,等.多维度城市蔓延对碳排放影响的时空异质性研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(6): 3496−3507.
Zhang H, Zhang Y T, Wang R, et al. The spatiotemporal heterogeneity of the impact of multidimensional urban sprawl on carbon emission [J]. China Environmental Science, 2025,45(6): 3496−3507.

[4] Zhao Y, Tan Y, Feng S. Does reducing air pollution improve the progress of sustainable development in China? [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,272:122759.

[5] 李 竹,王兆峰,吴 卫,等.碳中和目标下中国省域碳平衡能力与城镇化的关系 [J]. 自然资源学报, 2022,37(12):3136−3152.
Li Z, Wang Z F, Wu W, et al. The relationship between China’s provincial carbon balance capacity and urbanization under carbon neutrality target [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(12):3136−3152.

[6] Liang X, Fan M, Huang X, et al. Spatial distributed characteristics of carbon dioxide emissions based on fossil energy consumption and their driving factors at provincial scale in China [J]. Energy, 2024, 309:133062.

[7] Zheng Y, Fan M, Cai Y, et al. Spatio-temporal pattern evolution of

carbon emissions at the city-county-town scale in Fujian Province based on DMSP/OLS and NPP/VIIRS nighttime light data [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,442:140958.

[8] 杨顺富,赵宇鸾,李秀彬,等.中南半岛喀斯特山区植被 NEP 的时空变化及驱动因素 [J]. 生态学报, 2024,44(22):1−16.
Yang S F, Zhao Y L, Li X B, et al. Spatio-temporal variations and driving factors of vegetation NEP in karst mountainous areas of the Indochina Peninsula [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(22):1−16.

[9] 王永阳,蔡宴朋,张　盼.珠三角城市群净碳排放与经济发展脱钩效应及其驱动力 [J]. 生态学报, 2025,45(3):1303−1314.
Wang Y Y, Cai Y P, Zhang P. Decoupling effect and driving factors of net carbon emissions and economic development in the Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(3):1303−1314.

[10] 王　锴,朴世龙,何　悦,等.中国陆地生态系统碳汇稳定性的空间分布特征及驱动机制 [J]. 中国科学:地球科学, 2023,53(2):216−226.
Wang K, Piao S, He Y, et al. Spatial variations and mechanisms for the stability of terrestrial carbon sink in China [J]. Science China: Earth Sciences, 2023,66(2):227−236.

[11] 刘耀彬,邓伟凤,李硕硕,等.基于碳汇潜力的碳排放空间关联网络结构特征及影响因素——以长江中游城市群为例 [J]. 中国人口・资源与环境, 2024,34(3):1−15.
Liu Y B, Deng W F, Li S S, et al. Structural characteristics and influencing factors of carbon emission spatial association networks based on carbon sink potential: a case study of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River [J]. China population, resources and environment, 2024,34(3):1−15.

[12] 陈帝伯,魏　伟,周俊菊,等.中国省域碳源/碳汇强度及碳盈亏的空间演变 [J]. 经济地理, 2023,43(1):159−168.
Chen D B, Wei W, Zhou J J, et al. Spatial evolution of China's provincial carbon source/sink intensity and carbon surplus and deficit [J]. Economic Geography, 2023,43(1):159−168.

[13] 陈　怡,凌　莉,古圳威,等.陕西省碳排放时空格局演变及其影响因素 [J]. 中国环境科学, 2024,44(4):1826−1839.
Chen Y, Ling L, Gu Z W, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of carbon emissions in Shaanxi Province [J]. China Environmental Science, 2024,44(4):1826−1839.

[14] Tu W, Rao C, Xiao X, et al. Interactive geographical and temporal weighted regression to explore spatio-temporal characteristics and drivers of carbon emissions [J]. Environmental Technology & Innovation, 2024,36:103836.

[15] 陈靖松,张建军,李金龙,等.京津冀地区碳排放时空格局变化及其驱动因子 [J]. 生态学报, 2024,44(6):2270−2283.
Chen J S, Chen J J, Li J L, et al. Spatio-temporal pattern of carbon emissions and its driving factors in the Beijin-Tianjin-Hebei region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(6):2270−2283.

[16] Cheng Y, Geng X, Tian W. Achieving low-carbon production: Impacts of land misallocation and industrial structure in urban China [J]. Applied Energy, 2025,378:124791.

[17] 陈操操,于凤菊,张　悦,等.碳交易试点政策减排效应实证评估及机制分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(3):1674−1685.
Chen C C, Yu F J, Zhang Y, et al. Empirical evaluation and mechanism analysis of domestic carbon trading pilot policies on emission reduction [J]. China Environmental Science, 2025,45(3):1674−1685.

[18] Wu B, Zhang Y, Wang Y, et al. Urbanization promotes carbon storage or not? The evidence during the rapid process of China [J]. Journal of Environmental Management, 2024,359:121061.

[19] Xiang W, Lan Y, Gan L, et al. How does new urbanization affect urban carbon emissions? Evidence based on spatial spillover effects and mechanism tests [J]. Urban Climate, 2024,56:102060.

[20] Shi Y, Zhang B, Liang L, et al. Unfolding the effectiveness of ecological restoration programs in enhancing vegetation carbon sinks across different climate zones in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2025,212:107974.

[21] 刘文利,姜亮亮,刘　冰,等.中国植被碳源/汇时空演变特征及其驱动因素 [J]. 生态学报, 2024,44(4):1456−1467.
Liu W L, Jiang L L, Liu B, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and driving factors analysis of vegetation carbon sources/sinks in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(4):1456−1467.

[22] Wang J, Shan Y, Cui C, et al. Investigating the fast energy-related carbon emissions growth in African countries and its drivers [J]. Applied Energy, 2024,357:122494.

[23] Yu S, Zhang Q, Hao J L, et al. Development of an extended STIRPAT model to assess the driving factors of household carbon dioxide emissions in China [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 325:116502.

[24] Jin W, Wang S, Zhao W. Urban-rural carbon emission differences in China's urbanization: Spatial effects and influencing factors [J]. Environmental Pollution, 2025,366:125423.

[25] Xu L, Du H, Zhang X. Driving forces of carbon dioxide emissions in China's cities: An empirical analysis based on the geodetector method [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,287:125169.

[26] Zhang Y, Teoh BK, Zhang L. Exploring driving force factors of building energy use and GHG emission using a spatio-temporal regression method [J]. Energy, 2023,269:126747.

[27] 刘　康,张　寒,王　玲.黄土高原作物种植碳足迹时空演化驱动因素及趋势预测 [J]. 环境科学, 2025,46(5):3148−3160.
Liu K, Zhang H, Wang L. Spatial and temporal evolution of crop cultivation carbon footprint in the Loess Plateau: driving force and trend prediction [J]. Environmental Science, 2025,46(5):3148−3160.

[28] 翁大维,谢郑一,温晓娟,等.福建省城市群道路交通碳排放时空异质性 [J/OL]. 环境科学, 2024:1−19.https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202408058.
Weng D W, Xie Z Y, Wen X J, et al. Spatial and temporal heterogeneity of road transportation carbon emissions in urban agglomerations of Fujian Province [J/OL]. Environmental Science, 2024,1−19. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202408058.

[29] 孔凡斌,曹露丹,徐彩瑶.县域碳收支核算与碳综合补偿类型分区——以钱塘江流域为例 [J]. 经济地理, 2023,43(3):150−161.
Kong F B, Cao D L, Xu C Y. Measurement of carbon budget and type partition of carbon comprehensive compensation in the Qiantang River Basin [J]. Economic Geography, 2023,43(3):150−161.

[30] 郭文强,史瑞雪,雷　明,等.中国省际碳排放空间关联网络结构特征及碳平衡分区 [J]. 生态学报, 2024,44(18):8003−8020.

Guo W Q, Shi R X, Lei M, et al. Structural characteristics and carbon-balanced zoning of spatial correlation network of inter-provincial carbon emission in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18):8003−8020.

[31] Zhang Z, Jin G. Spatiotemporal differentiation of carbon budget and balance zoning: Insights from the middle reaches of the Yangtze River Urban Agglomeration, China [J]. Applied Geography, 2024,167: 103293.

[32] Yang J, Huang X. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth Syst. Sci. Data, 2021,13:3907–3925.

[33] Wu Y, Shi K, Chen Z, et al. Developing Improved Time-Series DMSP-OLS-Like Data (1992~2019) in China by Integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2022, 60:1−14.

[34] 王梦成,董又铭,林娜娜,等.双碳背景下耕地利用转型对耕地利用碳排放的影响及其空间溢出效应——以黄淮海平原为例 [J]. 自然资源学报, 2024,39(2):352−371.
Wang M C, Dong Y M, Lin N N, et al. Impact of farmland use transition on farmland use carbon emissions and its spatial spillover effects under the double carbon background: A case study of Huang-Huai-Hai Plain [J]. Journal of Natural Resources, 2024,39(2):352–371.

[35] Liu C, Hu S, Wu S, et al. County-level land use carbon emissions in China: Spatiotemporal patterns and impact factors [J]. Sustainable Cities and Society, 2024,105:105304.

[36] 赵 强,周月凌,方潜生,等.中部地区碳排放时空演变及其影响因素分析 [J]. 环境科学学报, 2023,43(2):354−364.
Zhao Q, Zhou Y L, Fang Q S, et al. Spatial-temporal evolution of carbon emissions and its influencing factors in China central region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(2):354−364.

[37] 贯 君,张少鹏,任 月.等.中国农业净碳汇时空分异与影响因素演进分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(2):1158−1170.
Guan J, Zang S P, Ren Y, et al. Random forest model-assisted evaluation of spatiotemporal differentiation of China's agricultural net carbon sink and evolution of influencing factors [J]. China Environmental Science, 2024,44(2):1158−1170.

[38] 刘耀彬,邓伟凤,李硕硕,等.基于碳汇潜力的碳排放空间关联网络结构特征及影响因素——以长江中游城市群为例 [J]. 中国人口·资源与环境, 2024,34(3):1−15.
Liu Y B, Deng W F, Li S S, et al. Structural characteristics and influencing factors of carbon emission spatial association networks based on carbon sink potential: a case study of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River [J]. China population, resources and environment, 2024,34(3):1−15.

[39] Wang K, Li Z, Xu Z, et al. Evaluating and simulating the impacts of land use patterns on carbon emissions in coal resource-based regions: A case study of shanxi province, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,458:142494.

[40] Duan C, Zhu W, Wang S, et al. Drivers of global carbon emissions 1990~2014 [J]. Journal of Cleaner Production, 2022,371:133371.

[41] Qiao R, Liu X, Gao S, et al. Industrialization, urbanization, and innovation: Nonlinear drivers of carbon emissions in Chinese cities [J]. Applied Energy, 2024,358:122598.

[42] 李姗姗,费 翔,董洪光,等.基于 LMDI 和 LEAP 模型的山西省碳排放影响因素及预测分析 [J/OL]. 中国环境科学, 2025:1−14.https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250114.003.
Li S S, Fei X, Dong H G, et al. Analysis of Carbon Emission Influencing Factors and Forecast in Shanxi Province Based on LMDI and LEAP Model [J/OL]. China Environmental Science, 2025:1−14. https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250114.003.

[43] Li X, Lin C, Lin M, et al. Drivers, scenario prediction and policy simulation of the carbon emission system in Fujian Province (China) [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,434:140375.

[44] Fan J, Wang J, Qiu J, et al. Stage effects of energy consumption and carbon emissions in the process of urbanization: Evidence from 30 provinces in China [J]. Energy, 2023,276:127655.

[45] Khan S, Yuan H P, Wang Y H, et al. Environmental implications of technology-driven energy deficit and urbanization: Insights from the environmental Kuznets and pollution hypothesis [J]. Environmental Technology & Innovation, 2024,34:103554.

[46] Wang Q, Li L. The effects of population aging, life expectancy, unemployment rate, population density, per capita GDP, urbanization on per capita carbon emissions [J]. Sustainable Production and Consumption, 2021,28:760−774.

[47] You J, Dong Z, Jiang H. Research on the spatiotemporal evolution and non-stationarity effect of urban carbon balance: Evidence from representative cities in China [J]. Environmental Research, 2024,252: 118802.

[48] 李雪松,杨 泉,周 敏.市场型环境规制、碳减排与企业环境绩效:来自中国碳市场的证据 [J]. 中国软科学, 2024,(8):200−210.
Li X S, Yang Q, Zhou M. Market based environmental regulation, carbon emissions, and corporate environmental performance: Evidence from China's carbon market [J]. China Soft Science, 2024,(8):200−210.

[49] 吴 康,耿一睿,郭 涛.城市群绿色技术创新对碳排放的影响——基于人力资本的调节效应 [J]. 自然资源学报, 2024,39(9):2121−2139.
Wu K, Geng Y R, Guo T. The impact of green technology innovation on carbon emissions from the perspective of urban agglomeration: The moderating effect of human capitals [J]. Journal of Natural Resources, 2024,39(9):2121−2139.

[50] 刘 健,张泽中,冯 凯,等.内蒙古高原内陆河流域植被净初级生产力时空演变特征及其驱动因素 [J]. 生态学报, 2024,44(22):10055−10067.
Liu J, Zhang Z Z, Feng K, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of net primary productivity of vegetation in the Inland River Basin of the Inner Mongolia Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(22):10055−10067.

[51] Pang B W, Liu Y L, An R, et al. Spatial and temporal divergence and driving mechanisms of carbon sinks in terrestrial ecosystems in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomerations during 2008~2020 [J]. Ecological Indicators, 2024,165:112205.

[52] 刘贤赵,王一笛,肖 海,等.长株潭都市圈碳盈亏时空变化及其驱动因素 [J]. 生态学报, 2025,45(2):669−684.
Liu X Z, Wang Y D, Xiao H, et al. Spatiotemporal changes and

driving factors of carbon surplus and deficit in Chang-Zhu-Tan metropolitan area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(2):669−684.

[53] 许嘉俊,杨晓军,李　睿.中国城市居民生活碳排放特征及影响因素的时空异质性 [J]. 中国环境科学, 2024,44(3):1732−1742.
Xu J J, Yang X J, Li R. Spatial and temporal heterogeneity of urban household carbon emission characteristics and influencing factors in China [J]. China Environmental Science, 2024,44(3):1732−1742.

[54] Tu W, Rao C J, Xiao X P, et al. Interactive geographical and temporal weighted regression to explore spatio-temporal characteristics and drivers of carbon emissions [J]. Environmental Technology & Innovation, 2024,36:103836.

[55] Zhao C, Dong K, Lee C. Carbon lock-in endgame: Can energy trilemma eradication contribute to decarbonization? [J] Energy, 2024, 293:130662.

[56] 田朋飞,闫　丰,王宗超,等.太行山-燕山碳源/碳汇时空变化及驱动因素分析 [J/OL]. 环境科学, 2025:1−21.https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202406227.
Tian P F, Yan F, Wang Z C, et al. Analysis of Driving Factors for Spatiotemporal Changes in Carbon Sources/Sinks in Taihang Mountains and Yanshan Mountains [J/OL]. Environmental Science, 2025:1−21. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202406227.

[57] Cai A Z, Guo R, Zhang Y H, et al. Assessing urban carbon health in China's three largest urban agglomerations: Carbon emissions, energy-carbon emission efficiency and carbon sinks [J]. Applied Energy, 2025,383:125326.

[58] 王丽蓉,石培基,尹君锋,等.碳中和视角下甘肃省县域碳收支时空分异与国土空间分区优化 [J]. 环境科学, 2024,45(7):4101−4111.
Wang L R, Shi P J, Yin J F. Spatio-temporal differentiation of county carbon budget and territorial space optimization zoning strategy in Gansu Province from the perspective of carbon neutrality [J]. Environmental Science, 2024,45(7):4101−4111.

[59] 张茹倩,李鹏辉,徐丽萍.城镇化对新疆土地利用碳排放的影响及其耦合关系 [J]. 生态学报, 2022,42(13):5226−5242.
Zhang R Q, Li P H, Xu L P. Effects of urbanization on carbon emission from land use in Xinjiang and their coupling relationship [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(13):5226−5242.

[60] Han F Q, Kasimu A, Wei B H, et al. Surplus or deficit? Quantification of carbon sources and sinks and analysis of driving mechanisms of typical oasis urban agglomeration ecosystems [J]. Journal of Environmental Management, 2024,371:123058.

[61] Yang H, Huang J, Liu D. Linking climate change and socioeconomic development to urban land use simulation: Analysis of their concurrent effects on carbon storage [J]. Applied Geography, 2020,115:102135.

[62] Tian L, Chai J, Zhang X, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of China's carbon footprint pressure: Based on vegetation carbon sequestration and LMDI decomposition [J]. Energy, 2024,310: 133299.

[63] 韦彦汀,李思佳,张　华.成渝城市群碳排放时空特征及其影响因素 [J]. 中国环境科学, 2022,42(10):4807−4816.
Wei Y T, Li S J, Zhang H. Temporal-spatial evolution of carbon emission and driving factors in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. China Environmental Science, 2022,42(10):4807−4816.

[64] Liu Y, Gao C, Lu Y. The impact of urbanization on GHG emissions in China: The role of population density [J]. Journal of Cleaner Production, 2017,157:299−309.

[65] Kumar S, Sen R. Are larger or denser cities more emission efficient? Exploring the nexus between urban household carbon emission, population size and density [J]. Applied Energy, 2025,377:124500.

[66] 魏　猛,蔡　智,徐建刚,等.中国城市群碳排放特征与影响机制分析 [J]. 环境科学学报, 2024,44(6):414−424.
Wei M, Cai Z, Xu J G, et al. Characteristics and mechanisms of carbon emissions in urban agglomerations: A spatiotemporal analysis of Chinese major regions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024,44(6): 414−424.

[67] Zou Y, Wang M. Does environmental regulation improve energy transition performance in China? [J] Environmental Impact Assessment Review, 2024,104:107335.

[68] 任晓松,刘宇佳,赵国浩.经济集聚对碳排放强度的影响及传导机制 [J]. 中国人口・资源与环境, 2020,30(4):12.
Ren X S, Liu Y J, Zhao G H. The impact and transmission mechanism of economic agglomeration on carbon intensity [J]. China Population, Resources and Environment, 2020,30(4):12.

[69] Fang W, Cao J J, Biswas A, et al. Impacts of coordinated development policies on urban heat islands in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China [J]. Sustainable Cities and Society, 2024,112: 105614.

[70] Ren Z Z, Zheng J L, Jiao L Y, et al. The synergic impacts of air pollution control policies on pollutants and carbon emissions [J]. Journal of Environmental Management, 2024,370:122730.

作者简介：杨　屹(1969−),男,贵州风冈人,教授,博士,主要研究方向为生态环境管理与可持续发展等.发表论文 90 余篇.yangyi_nwpu@xaut.edu.cn.