宋 梅,王子莎,陈 晨,等.“双碳”目标下黄河流域资源型城市碳足迹时空特征及组态路径 [J]. 中国环境科学, 2025,45(8):4677-4687.
Song M, Wang Z S, Chen C, et al. Spatiotemporal characteristics and configuration paths of carbon footprint in resource-based cities of the Yellow River Basin under the “dual-carbon” goal [J]. China Environmental Science, 2025,45(8):4677-4687.

“双碳”目标下黄河流域资源型城市碳足迹时空特征及组态路径

宋 梅,王子莎*,陈 晨,张 加 (中国矿业大学(北京)管理学院,北京 100083)

摘要：通过三维碳足迹模型、TOE 框架及模糊集定性比较分析方法对黄河流域资源型城市三维碳足迹进行测算并明确其未来减排降迹组态路径.研究发现:研究期内黄河流域资源型城市平均碳足迹呈波动下降趋势,具体表现出“持续下降-略有回弹-波动下降”的特征;高碳足迹城市数量明显减少,上、中、下游资源型城市碳足迹存在显著差异且呈“上游<下游<中游”的顺序排列;黄河流域资源型城市减排降迹路径可归结为覆盖 44%城市的“技术-结构主导型”路径、覆盖 50%城市的“组织主导型”路径、覆盖 37%城市的“环境主导型”路径.基于上述结论,未来应基于全局视角持续关注黄河流域碳生态系统,实时监测资源型城市碳足迹值,结合组态效应多策并举降低资源型城市碳足迹.

关键词：黄河流域；资源型城市；三维碳足迹模型；TOE 框架；模糊集定性比较分析(fsQCA)
中图分类号：X171.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)08-4677-11

Spatiotemporal characteristics and configuration paths of carbon footprint in resource-based cities of the Yellow River Basin under the “dual-carbon” goal. SONG Mei, WANG Zi-sha*, CHEN Chen, ZHANG Jia (School of Management, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China). *China Environmental Science*, 2025,45(8)：4677~4687

Abstract：The three-dimensional carbon footprint of resource-based cities in the Yellow River Basin was measured, and their configuration paths of carbon reduction and footprint minimization were clarified through the three-dimensional carbon footprint model, the TOE framework, and fuzzy-set qualitative comparative analysis. It was found that during the study period, the average carbon footprint of resource-based cities in the Yellow River Basin exhibited a fluctuating downward trend, characterized by "continuous decline-slight rebound-fluctuating decline". The number of high-carbon footprint cities significantly decreased, and there were significant differences in the carbon footprint of resource-based cities in the upper, middle, and lower reaches, which were arranged in the order of "upper reaches < lower reaches < middle reaches". The carbon reduction and footprint minimization paths of resource-based cities in the Yellow River Basin could be summarized into three types: the "technology-structure dominant" path covering 44% of the cities, the "organization dominant" path covering 50% of the cities, and the "environment dominant" path covering 37% of the cities. Based on the above conclusions, it was suggested that a global perspective should be maintained to continuously monitor the carbon footprint values of resource-based cities in the Yellow River Basin, and a combination of measures should be taken to reduce the carbon footprint of these cities based on the configuration effects.

Key words：the Yellow River Basin；resource-based cities；three-dimensional carbon footprint model；TOE framework；fuzzy set qualitative comparative analysis

气候变化是一个关键的环境问题,碳排放的增加被视为温室气体排放和气候变化的主要驱动力[1].目前,中国作为世界第一大碳排放国[2],70%以上的碳排放来自城市[3].资源型城市,作为社会经济发展所需 90%的煤炭和石油资源、70%的天然气及各类矿产资源的主要承担者[4],正面临着高碳排放、高污染的环境挑战.如何在履行自身使命的基础上破除“资源诅咒”,已成为这些城市亟需突破的瓶颈[5].在此背景下,资源型城市的碳排放核算[6]、效率评价[7]、预测[8]及低碳转型路径等成为研究的重点.碳排放核算覆盖了城市、行业、部门等多个尺度,常用的方法包括质量平衡法等“自下而上”模型及排放因子等“自上而下”模型.然而,由于市级能源消费数据统计口径不一致等问题,排放因子法的应用受到了一定限制.夜间灯光数据与碳监测卫星则能通过高精度的碳排放监测为城市碳排放估算提供全新的解决方案[9].但上述研究未将碳吸收考虑在内,可参考性有限.碳足迹从碳排放和碳吸收两方面对碳系统展开分析[10],三维碳足迹进一步拓展了足迹维度,不仅

收稿日期：2025-01-13
基金项目：国家社会科学基金项目(23BGL311)
* 责任作者, 博士, wangzisha1997@163.com

能表征人类活动对资源流量的消耗,还能分析存量资本的占用情况[11],为衡量城市的生态本底提供了更全面的视角.随着短期经济增长与长期生态效益矛盾的日益加剧,环境绩效评估愈发重要.SBM-DEA 模型[12]、三阶段 DEA 模型[13]常用来表征碳排放效率,与社会网络模型[14]的结合则进一步厘清了效率的空间效应.灰色模型 GM(1.1)是碳排放预测中的典型方法,随着研究的深入,系统动力学、BP 神经网络[15-16]、长短期记忆网络[17]等机器学习方法也被纳入其中. LMDI 模型能够分析低碳转型的影响因素,进而提出转型路径[18-19],空间计量模型[20]、地理探测器[21]等方法上升至空间层面,更能表现出不同城市影响因子间的交互作用.然而,上述方法均局限于单一要素,忽视了多种因素的交互作用[22].资源型城市低碳转型是多因素互相作用产生的结果,应从系统出发厘清各要素组合关系,探索减排路径.基于组态视角的模糊集定性分析方法能够从集合角度探究前因条件及条件组合与结果的关系,为低碳转型路径提供了新的思考.

黄河流域作为举足轻重的“能源流域”,富含煤炭、天然气等多种矿产资源[23],流域内分布着约 50%的资源型城市[24],不同城市产业结构特点不同,下游城市多以钢铁、化工等传统制造业为主,如濮阳、东营等城市的石油化工;中游地区聚集着陕北煤炭开采、临汾焦化等重化工产业集群;上游则呈现白银市有色金属、宁东能源化工等资源加工与特色农业并存的产业形态.这些城市长期依赖资源型产业,形成的路径依赖型发展模式导致三大矛盾凸显:第一、较高的资源依赖程度和偏重的产业结构使黄河流域资源型城市长期面临着高耗能、高碳排的现实困境;第二、传统产业盛行而数字经济等新兴产业发展缓慢,使城市经济发展缺乏多样性和韧性;第三、绿色技术创新能力薄弱,加之政府在绿色投入和环境规制方面的不足,进一步阻碍了流域的降碳进程.在“双碳”目标与黄河流域生态保护国家战略的双重驱动下,破解黄河流域资源型城市“高碳锁定”和“路径依赖”困境已成为区域高质量发展的关键命题.因此,本文以黄河流域资源型城市为研究对象,利用改进的三维碳足迹模型探究不同城市的碳足迹,并利用 TOE 框架及 fsQCA 方法分析不同城市的组态减碳路径.研究问题具有重要的现实意义和代表性,研究结论旨在为“十四五”资源型地区转型发展及黄河流域高质量发展提供决策依据.研究的边际贡献在于:(1)改进的三维碳足迹模型中考虑了耕地的碳源和碳汇双重作用,并将土地产量因子、均衡因子及生物多样性专用生态面积纳入碳汇的核算.(2)基于更全面的视角将 TOE 框架嵌入碳足迹情境,从技术-组织-环境三个维度构建三维碳足迹的影响因素.(3)基于系统思维借用 fsQCA 方法探究黄河流域资源型城市的组态减碳路径,关注驱动因子间的适配联系.

1 研究方法与数据来源

1.1 三维碳足迹模型

经典的二维生态足迹模型通过足迹和承载力的比较评估生态资源的利用情况,方恺引入足迹广度和足迹深度指标区分自然资本的流量和存量,以存量资本减少与否作为判断可持续性的基本依据,不仅将二维生态足迹模型扩展至三维,更进一步丰富了生态足迹理论的经济学内涵[25].碳足迹作为生态足迹的衍生概念,常用来表征人类活动产生碳排放对自然系统的压力程度[26].三维碳足迹模型在核算碳排放和碳吸收的基础上将足迹、承载力相结合,并引入碳足迹广度、深度两项指标表征区域自然资本的流量和存量占用,使碳足迹的研究向纵深扩展[27].

1.1.1 碳源账户核算 本文将碳排放划分为直接碳排放和间接碳排放,间接碳排放指作用于建设用地产生的碳排放,多以能源消耗碳排放量表示.直接碳排放是指土地利用所产生的碳排量,除耕地外其他土地类型均承担“碳汇”角色,而耕地所承载的农田生态系统是一个复杂的过程,既为碳源、又为碳汇.据此,本文构建以能源消耗和耕地消耗为主的碳源账户,如表 1 所示.

表 1 碳源账户

Table 1 Carbon source accounts

账户	地类	指标类型
间接碳源	建设用地	原煤、洗精煤、焦炭、焦炉煤气、原油、汽油、燃油、柴油、燃料油、液化石油气、天然气、炼厂干气
直接碳源	耕地	化肥、农药、农作物、农业机械、农业灌溉、农膜等

(1)间接碳源

$$\mathrm{CE_c}=\sum E_i\times K_i=\sum E_i\times C_i\times H_i \tag{1}$$

式中:$\mathrm{CE_c}$为建设用地碳排放量,E_i为能源消耗量,H_i、C_i、K_i含义、单位及具体取值如表 2 所示.

表 2　能源碳排放系数

Table 2　Energy carbon emission factors

能源类型	低位发热量(H_i) (MJ/t 或万 m^3)	碳排放量(C_i) (g/MJ)	碳排放系数(K_i) (tC/t 或万 m^3)
原煤	20908.42	26.37	0.5514
洗精煤	26344.08	25.41	0.6694
焦炭	28434.04	29.50	0.8388
焦炉煤气	1179812.98	13.58	16.0219
原油	41816.84	20.10	0.8405
汽油	43069.64	18.90	0.8140
煤油	43069.64	19.60	0.8441
柴油	42651.07	20.20	0.8616
燃料油	41816.84	21.10	0.8823
液化石油气油	50179.62	17.20	0.8631
天然气	389306.96	15.30	5.9564
炼厂干气	45996.76	18.20	0.8371

鉴于城市化石能源消耗量无法直接获取数据,且城市能源消耗量与省级能源消耗量具有密不可分的关系,景侨楠等[28]构建了一套自上而下的城市能源消耗及碳排放估算方法,对比估算结果与城市实际 CO_2 排放量,误差均在 10%以内(误差可能来自于活动数据和排放因子的不确定性),相比夜间灯光数据法具有更高的精度.因此,本文利用可分解的能源平衡表法对城市能源消耗量进行折算,具体如式(2):

$$\mathrm{E}_i=\sum \mathrm{AD}_{i,j}^{p}\times a_j=\sum \mathrm{AD}_{i,j}^{p}\times\frac{I_j^c}{I_j^p} \tag{2}$$

式中:j 表示能源消耗种类(即为省级能源平衡表中的行);$\mathrm{AD}_{i,j}^{p}$分别表示为资源型城市所在省份第 j 类化石燃料 i 的消耗量;a_j为 j 行的分配系数;I_j^c、I_j^p表示资源型城市及其所在省份第 j 行的分配指标值.

(2)直接碳源

耕地作为碳源,主要体现在不同作物对土壤表层的破坏,耕地过程中使用的化肥、农膜等材料均会产生碳排放,模型如公式(3).

$$\mathrm{CE}_t=GM+TN+(SO+PQ)+FR+AU \tag{3}$$

式中:CE_t表示耕地碳排放量,G、T、S、P、F、A 分别表示为资源型城市在耕地过程中化肥、农药的使用量及农作物的种植面积、机械使用动力、灌溉面积、农膜使用量;M、N、O、Q、R、U 为转换系数,具体取值分别为:0.8956kg/kg、4.9341kg/kg、16.47kg/hm^2、0.18kg/kW、266.48kg/hm^2、5.18kg/hm^2,其中 M、N 来源于 ORNL,其他转换系数来源于 IREEA.

1.1.2　碳汇账户核算　根据 IPCC 报告结果显示,草地和森林能够吸收 93%的碳排放量,参照中国科学院土地分类体系和最新版《土地利用现状分析》(GB/T 21010−2017)文件,本文参考康韵捷等做法[29],以林地代替森林面积.同时 IPCC 研究指出:在未来 50~100 年内我国耕地估碳减排潜力显著,通过作物的光合作用固碳与土壤有机质积累,可有效降低 CO_2 等温室气体的排放[30],因此应将耕地的碳汇功能考虑在内.具体计算公式如(4).

$$\mathrm{CS}=\sum S_i\times\alpha_i \tag{4}$$

式中:CS 表示碳吸收量;S_i表示为第 i 种土地利用面积;α_i为不同土地类型的碳吸收系数[31-32].

1.1.3　三维碳足迹模型构建　传统的三维碳足迹模型仅将不同土地类型的碳吸收比例和净生态系统生产力考虑在内,但土地的均衡因子和产量因子作为评估土地承载能力的重要参数,能够更准确地反映土地的生态状况.因此,本文借鉴熊鹰[33]等对三维生态足迹改进的研究成果,将土地的均衡因子和产量因子纳入三维碳足迹模型,更加准确地表征碳足迹,公式如(5)~(9).

$$\mathrm{CEF}=(\mathrm{CE}_c+\mathrm{CE}_t)\times\left(\frac{p_f}{\mathrm{NEP}_f}\times r_f\times y_f+\frac{p_g}{\mathrm{NEP}_g}\times r_g\times y_g+\frac{p_c}{\mathrm{NEP}_c}\times r_c\times y_c\right) \tag{5}$$

$$\mathrm{CEC}=CS\times\left(\frac{p_f}{\mathrm{NEP}_f}\times r_f\times y_f+\frac{p_g}{\mathrm{NEP}_g}\times r_g\times y_g+\frac{p_c}{\mathrm{NEP}_c}\times r_c\times y_c\right)\times 0.88 \tag{6}$$

$$\mathrm{CEF_{size}}=\min\left[\mathrm{CEF},\mathrm{CEC}\right] \tag{7}$$

$$\mathrm{CEF_{depth}}=1+\frac{\max(\mathrm{CEF}-\mathrm{CEC},0)}{\mathrm{CEC}} \tag{8}$$

$$\mathrm{CEF}_{3D}=\mathrm{CEF_{size}}\times\mathrm{CEF_{depth}} \tag{9}$$

式中:CEF、CEC 分别表示黄河流域各资源型城市工、农等活动消耗的碳足迹、碳生态承载力,p_i、NEP_i、NEP_i、y_i分别代表各植被类型碳吸收比例、净生态系统生产力、均衡因子和产量因子,不同省份因地理位置有所差异,土地均衡因子与产量因子也有所不同,具体见表 3.值得注意的是,在计算生态

承载力时应当扣除 12%的生态面积用于生物多样性保护[34].CEF_{size}、CEF_{depth} 为碳足迹广度、深度,分别表征资源流量、存量的占用,CEF_{3D} 为三维碳足迹值.

表 3 不同地区土地类型的参数因子[35]

Table 3 Parameter factors for land types in different regions

省份	产量因子			均衡因子		
	林地	草地	耕地	林地	草地	耕地
全国	0.86	0.51	1.74	1.41	0.44	1.74
山西	0.56	1.40	0.48	0.81	0.63	0.85
山东	1.13	1.93	1.13	1.20	0.65	1.49
内蒙古	0.68	1.07	0.52	1.59	0.79	1.50
宁夏	0.77	0.76	0.55	2.01	0.62	1.78
河南	0.98	1.87	1.36	1.05	0.64	1.81
陕西	0.83	2.16	0.51	0.94	0.77	0.72
甘肃	0.67	1.26	0.36	1.58	0.94	1.05

1.2 TOE 模型框架

TOE 框架(技术-组织-环境)最初于 1990 年由 Tornatizky 和 Fleischer 提出[36],作为一种综合性分析方法,该框架将影响因素聚焦于技术、组织和环境 3 个层面,能够用于解释组织的技术整合和采纳行为[37].经过不断演化发展,TOE 框架所属内涵和应用情景逐渐丰富,与碳足迹的结合应用能够更好地分析低碳发展情景下城市的减排路径.因此,本文从技术、组织和环境层面选取相关指标并嵌入黄河流域资源型城市碳足迹情境.

技术层面包含绿色技术创新和数字经济发展水平两个二级条件.绿色专利申请量主要致力于统计降低能源消耗、改善生态环境的专利,能够过滤与碳减排目标偏离较远的专利,绿色专利申请量与专利申请总量的比值越大,说明城市产业绿色技术创新能力越强[38].同时,研究表明数字经济具有显著的降碳效应[39],鼓励数字创新对抑制碳排放具有重要作用.互联网发展水平和数字普惠金融是影响数字经济发展水平的两个主要因素[40],本文以互联网普及率、从业人员数量、产出情况及移动电话普及率表征互联网发展水平,以北京大学数字金融研究中心编制的数字普惠金融指数表征数字普惠金融水平[41],利用熵值法和主成分分析法将上述 5 个指标进行处理得到数字经济发展水平.

组织层面通过资源依赖程度和政府绿色投入来体现.资源依赖对资源型城市绿色转型具有显著抑制作用[42],降低资源依赖程度,有助于实现经济绿色转型[43].从业人数能够直观反映行业的发展状况,本文以采矿业从业人数占第二产业从业人员的比重表征资源依赖程度,比值越小,说明资源依赖程度越低.政府作为碳减排的核心组织条件,能够通过资金支持、行政命令等多种渠道干预减排进程.以科学技术支出占比表征的政府绿色投入对经济发展和能源转型具有正向门槛效应且具有更稳定的效果[44],比值越大,说明政府绿色投入水平越高.同时,二者之间复杂的交互机制在降低碳排放方面也具有显著作用,政府通过增加绿色投入,可以有效降低资源型城市的资源依赖程度,从而减少碳排放.资源依赖程度的降低也能增强政府绿色投入,推动产业升级和环境改善,以此形成良性循环,共同促进资源型城市的绿色可持续发展.

环境层面考虑环境规制和产业结构两个二级条件.第一、环境规制是化解能源消费与环境保护间的重要途径,通过整顿或关停环境污染严重型企业,倒逼其改进绿色低碳技术[45].政策文本中环保词频数占比能够反映政府对环境保护的重视程度,比值越大说明环境规制力度越大.第二、产业结构转型升级能够优化能源消费结构,对碳减排具有显著的积极影响[46].第二产业增加值与第三产业增加值比值能够反映产业结构水平,比值越小,说明产业结构越合理.

1.3 fsQCA 分析法

fsQCA 方法借助架构理论及布尔代数运算,从集合角度探究前因条件及条件组合与结果的关系,从而解释现象的复杂因果,实现了定性和定量分析的有效联结.既能规避单个案例分析不具普适性的不足,也可以解决多个案例实证分析无法兼顾定性分析的问题[47],其因果关系的判定通过一致性及覆盖率两个指标来确定,具体公式如(10)~(11):

$$\text{Consistency}(S_i \leqslant T_i) = \frac{\sum(\min(S_i, T_i))}{\sum(S_i)} \tag{10}$$

$$\text{Coverage}(S_i \leqslant T_i) = \frac{\sum(\min(S_i, T_i))}{\sum(T_i)} \tag{11}$$

式中:S_i 为第 i 个案例影响因素对于前因组合的隶属度;T_i 为影响因素对结果变量的隶属度,Consistency($S_i \leqslant T_i$)、Coverage($S_i \leqslant T_i$)分别表示组态的可解释程度及隶属程度.

研究证明各省份的碳减排可能存在多条导向同一结果的“等效”因果关系链[48],碳足迹作为碳排放的延伸算法,能够沿袭组态视角对足迹的前因组合进行分析.本文以黄河流域 40 个资源型城市作为研究对象,以 6 个前因条件构建模型,既符合 fsQCA 方法的小样本限制,也避免了过多条件变量可能带来的有限多样性问题.以上两点因素充分印证了 fsQCA 方法在本文中的适用性.

1.4　数据来源

根据国务院印发的《资源型城市可持续发展规划(2013−2020)》,黄河流域共有 42 个资源型城市,但因海西蒙古族藏族自治州属于碳排放轻型区域、莱芜市 2019 年撤市并区等原因,本文最终以 40 个黄河流域资源型城市作为研究对象,时间范围为 2013~2021 年.研究所用数据说明及来源见表 4,为保证数据量纲的一致性,部分数据做标准化处理.

表 4　模型数据说明

Table 4　Description of model data

变量		赋值说明	简称	来源
技术条件(Technology)	绿色技术创新	绿色专利申请量/专利申请总量	GIT	中国城市统计年鉴,中国能源统计年鉴,中国统计年鉴,各城市统计年鉴,各城市发展公报等
	数字经济发展水平	数字经济水平综合测度	DED	
组织条件(Organization)	资源依赖程度	采矿业从业人数/第二产业就业人数	RD	
	政府绿色投入	科学技术支出/地方一般公共预算支出	GGI	
环境条件(Environment)	环境规制	政策文件环保词频数/总词频数	ER	
	产业结构	第二产业增加值/第三产业增加值	IS	
三维碳足迹	直接碳源	省级能源平衡表	3D CF	
		农林牧渔总产值		
		工业增加值		
		交通运输、仓储和邮政业从业人数		
		批发、零售业和住宿、餐饮业人数		
		居民服务从业人员		
	间接碳源	化肥使用量		
		农药使用量		
		农作物种植面积		
		农业机械总动力		
		灌溉面积		
		农膜使用量		
	碳汇	耕地面积		
		林地面积		
		草地面积		

2　黄河流域资源型城市碳足迹时空差异分析

2.1　时间差异

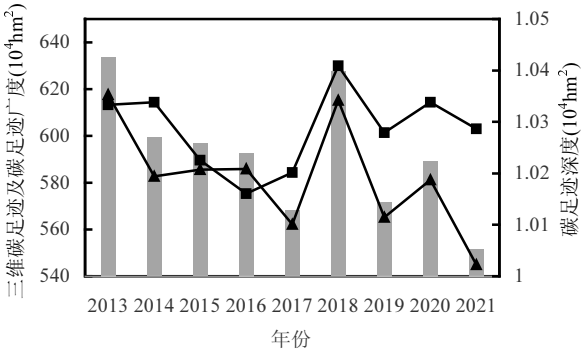


图 1　黄河流域资源型城市碳足迹时间变化趋势

Fig.1　Temporal trend of carbon footprint of resource−based cities in the Yellow River Basin

2013~2017 年,黄河流域资源型城市三维碳足迹值呈持续下降趋势(图 1),这可能是政策的带动效应.一方面,《全国资源型城市可持续发展规划(2013~2020)》等政策文件能够结合城市资源特点准确把握新发展阶段资源型城市转型发展面临的新形势及新问题,合理谋划转型发展下的经济增长点,为资源型城市高质量发展提供了有效指引,同时经济发展方式的集约化转变也能有效促进三维碳足迹值的下降[49].另一方面,创新驱动发展战略的实施能够赋予资源型城市新的发展动力,技术进步作为应对气候变化及减少碳排放值的重要手段,低碳创新技术的应用推广不仅能够促进产业结构转型升级,还可以使传统的能源发展方式向以知识、技术为核心驱动力的新型发展方式转变.2018 年三维碳足迹值及足迹广度、深度值均有所上升,此时资源存量消耗为观察期最高值,存在碳减排和碳降迹回弹效应,原因在于受美国制裁等国际形势影响,全球能源格局及经济发展均受到不同程度的影响.进一步分析可知,我国能源消费呈反弹态势,能源消耗碳排放同比增长约 11%,耕地碳排放值虽有所下降但幅度较小.相比之下,农业生产活动所产生的碳足迹总量不及能源消费总量的 1/10,对总体碳足迹值产生的影响较小.2019 年至观察期结束,3 个观测值均呈波动下降趋势,并于 2021 年达到最低值,减排降迹颇有成效.将三维碳足迹值拆分为碳足迹广度、深度值可以更

好地了解流域生态现状.足迹广度与深度变化趋势大体一致,均呈波动下降趋势,说明黄河流域资源型城市区域流量、存量资源消耗不断减少,生态持续向好.但平均碳足迹深度值均高于自然原长值,流域生态生产性土地面积不能完全吸收由能源消费及农业生产活动所产生的碳足迹,需要提前消费少量存量资源.未来仍需实时监测三维碳足迹值变动,进一步明确资源型城市的发展方向,严格落实生态保护红线及环境质量底线.

2.2 空间差异

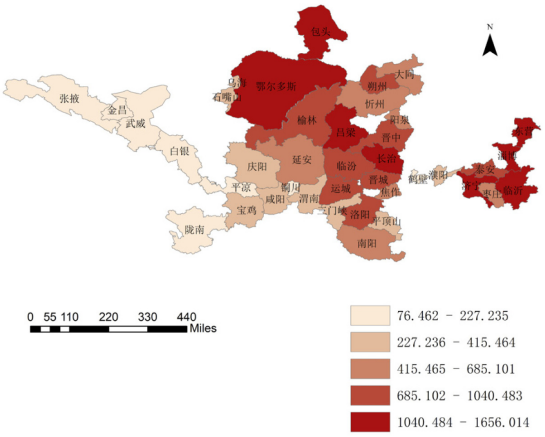


图 2 黄河流域资源型城市 2013 年碳足迹空间分布

Fig.2 Spatial distribution of carbon footprint of resource-based cities in the Yellow River Basin in 2013

该底图基于自然资源部地图技术审查中心标准地图(审图号为GS(2019)1822 号)制作

对比图 2、图 3,黄河流域资源型城市三维碳足迹值明显下降,整体由“中高碳足迹值为主”改善为“中低碳足迹值为主”.高碳足迹城市数量由 7 个减少至 2 个,低碳足迹城市数量由 8 个增加至 11 个,主要体现在山西省、山东省及河南省部分城市的足迹下降.进一步分析可知(图 4),黄河流域资源型城市碳足迹整体呈“上游<下游<中游”的顺序排列,主要受地理环境、资源禀赋、产业结构及政策导向等多重因素的综合影响.具体来看,地处中游的资源型城市处于工业化中后期发展阶段[50],煤炭等化石能源及高耗能矿产资源富集,完整的高碳产业链及以重工业为主的产业结构使得城市能源碳排放压力较大、资源流量占用水平较高.相比之下,地处中原的下游资源型城市受政策驱动不断推动结构性降碳,降低化石能源比重,发展以传统产业与新兴产业并存的多元产业形态,实施更为严格的环境政策,这些举措均使碳足迹相对较低.下游城市间的差异较为明显,乌海市和东营市的碳足迹深度均高于自然原长值,在承担更大碳减排责任的同时也“提前掠夺”了生态资本存量.

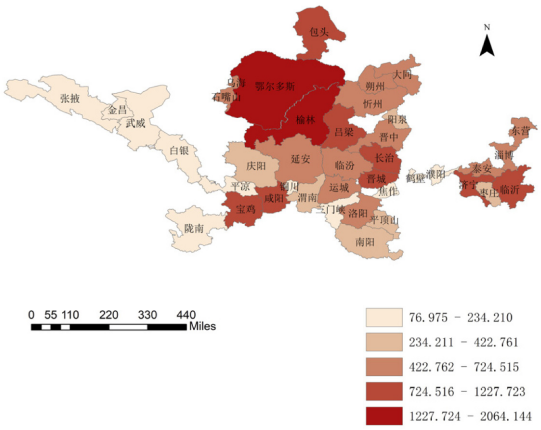
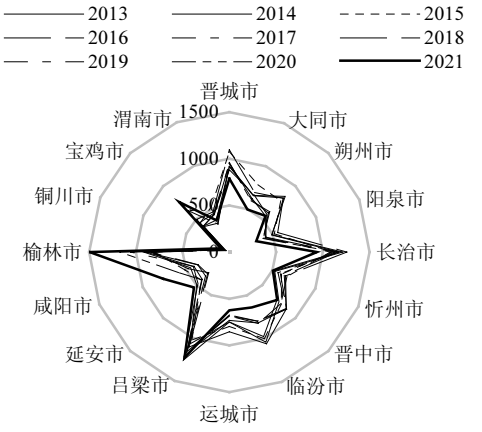


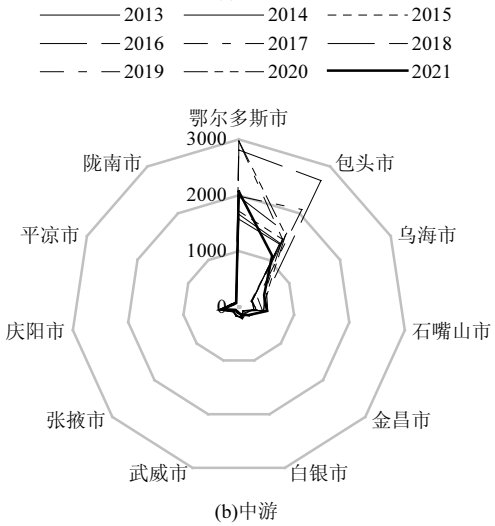
图 3 黄河流域资源型城市 2021 年碳足迹空间分布

Fig.3 Spatial distribution of carbon footprint of resource-based cities in the Yellow River Basin in 2021

该底图基于自然资源部地图技术审查中心标准地图(审图号为GS(2019)1822 号)制作



(a)上游



(b)中游

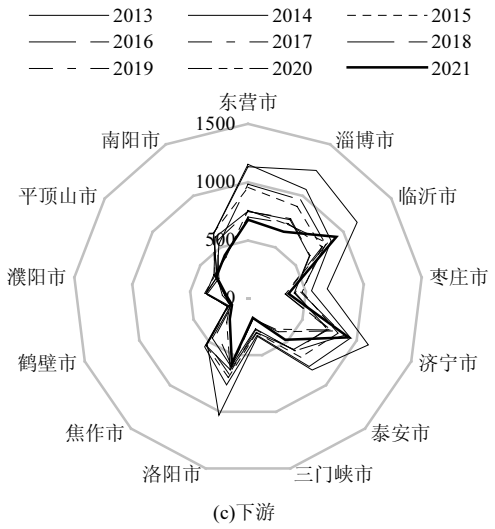


图 4　黄河流域资源型城市碳足迹异质性分析

Fig.4　Heterogeneity analysis of carbon footprints of resource-based cities in the Yellow River Basin

但自 2019 年开始,东营市不断扩大林地、草地面积,增大生态承载力效用,降低了碳足迹深度.上游海拔高,生态环境脆弱,经济发展相对滞后,在“生态安全优先”的刚性约束下,传统能源开发水平较低,多以特色产业及新兴旅游产业为主,对资源的消耗较少.但上游城市中“两极分化”现象较为明显, 素有“煤都”之称的鄂尔多斯和包头均是我国重要的能源供应基地,碳足迹值占比高达 69%,而张掖、武威等城市的碳足迹处于较低水平.

3　黄河流域资源型城市减碳降迹组态路径分析

3.1　变量校准

表 5　变量校准锚点

Table 5　Variable calibration anchors

变量	校准		
	完全隶属	交叉点	完全不隶属
3DCF	0.356	0.195	0.098
GIT	0.372	0.321	0.257
DED	0.951	0.541	0.501
RD	0.672	0.430	0.089
GGI	0.434	0.184	0.100
ER	0.409	0.282	0.141
IS	0.659	0.401	0.297

变量校准是进行组态分析的基础,只有将原始案例数据校准为集合隶属分数后,才能进一步分析.本文基于 fsQCA 的布尔逻辑要求,对结果变量及条件变量实施系统校准,将完全隶属-交叉点-完全不隶属的锚点分别设置为案例数据的上四分位数(75%)、中位数(50%)及下四分位数(25%)[51].根据分位数标准将原始变量均转化为[0,1]的模糊数据(表 5).此外,为符合 fsQCA 软件的数据要求,将 0.5 值均处理为 0.501.

3.2　必要性分析

“必要条件”表示为条件总在结果存在时出现,即没有该条件,结果便无法生成.为保证结果的有效性,首先对各个条件变量进行必要性分析,通常认定必要条件的一致性水平需达到 0.9 且具备较高的覆盖度,由表 6 可以看出,各个条件变量及其非高值的一致性水平均低于 0.9 且未出现负值,即条件变量中不存在三维碳足迹的必要条件.由此说明,黄河流域资源型城市在减排降迹过程中存在多重并发因果关系,需要技术、组织及环境条件联动发力.

表 6　fsQCA 必要性分析结果

Table 6　Results of fsQCA necessity analysis

条件变量	3DCF		~3DCF	
	一致性水平	覆盖度	一致性水平	覆盖度
GIT	0.650	0.640	0.510	0.472
~GIT	0.464	0.501	0.611	0.622
DED	0.423	0.443	0.641	0.633
~DED	0.650	0.658	0.437	0.416
RD	0.642	0.612	0.530	0.476
~RD	0.450	0.505	0.568	0.599
GGI	0.556	0.608	0.484	0.498
~GGI	0.542	0.527	0.620	0.568
ER	0.482	0.482	0.622	0.585
~ER	0.585	0.621	0.449	0.450
IS	0.484	0.512	0.573	0.571
~IS	0.594	0.596	0.510	0.482

注:~表示核心变量的非高值.

3.3　条件变量组态分析

条件组态分析能够验证不同前因条件变量形成的组态对结果的充分性,本文将频数、原始一致性阈值及 PRI 一致性阈值分别设置为 1、0.80、0.70,最终得出 8 条组态(表 7),整体一致性解及 8 条组态一致性结果均高于 0.8,整体覆盖度为 0.731(高于 0.6),说明本组态分析结果解释力度较强,也验证了不同组态因素嵌入碳足迹情境的合理性.

因结果变量为三维碳足迹值(负向变量),所以本文在分析组态路径时主要考虑核心变量的非高.根据组态结果,将未来黄河流域减排降迹的路径归结为“技术-结构主导型”路径、“组织主导型”路径、“环

境主导型”路径,具体如下:

路径一:“技术-结构主导型”路径.组态 2、组态 5 和组态 6 的核心条件非高一致,为高度相似的条件组合.数字经济发展水平与产业结构合理化水平缺失是城市三维碳足迹居高不下的主要阻力,即使有政府绿色投入及环境规制作为补充条件,也难以弥补核心条件的缺失.这一路径大约覆盖 44%的城市,其中以山西省部分城市最为典型,主要原因在于山西省地处内陆,技术条件欠佳、产业结构合理化程度较低,大多以煤炭作为核心产业,如:长治市煤焦冶电四大支柱产业占全市工业比重约 86%,数字经济等新兴产业占比较低;阳泉市传统产业占比也高达 85%,这将直接制约城市能源效率的提升,使得降碳的核心驱动力受限,延缓减排降迹进程.在这一路径驱使下的城市,未来应重点发展数字信息化、优化调整产业结构.

表 7 黄河流域资源型城市降碳组态路径分析

Table 7 Grouping analysis of carbon reduction pathways in resource-based cities in the Yellow River Basin

组态	1	2	3	4
GIT	●	⊗	⊗	⊗
DED	⊗	⊗	●	●
RD	●	⊗		⊗
GGI	⊗		●	●
ER		⊗	⊗	⊗
IS		⊗	⊗	
一致性	0.917	0.913	0.905	0.827
原始覆盖率	0.311	0.097	0.116	0.141
唯一覆盖度	0.120	0.064	0.031	0.055
组态	5	6	7	8
GIT			●	•
DED	⊗	⊗		●
RD	•	⊗	●	•
GGI	⊗	•	⊗	●
ER	•	•	•	⊗
IS	⊗	⊗	⊗	•
一致性	0.882	0.885	0.834	0.996
原始覆盖率	0.242	0.097	0.195	0.118
唯一覆盖度	0.062	0.059	0.005	0.068
整体一致性			0.881	
整体覆盖率			0.731	

注:●表示核心条件较高,•表示边缘条件较高,⊗表示核心条件非高,⊗表示边缘条件非高,空白表示条件变量无关紧要.

路径二:“组织主导型”路径.在此路径下,组态 1 和组态 7 具有较高相似度,均呈现出政府主导型特征,碳足迹的降低主要依靠于政府的政策导向驱动.在能源效率低下、资源依赖程度较高的背景下,政府绿色投入缺失,无法提供充足的环保资金,即便加大绿色创新技术,辅以环境规制约束也将于事无补.该路径能够解释 50%的城市案例,例如:近年来鄂尔多斯科技创新支出占一般财政支出的比重平均为 0.6%,绿色创新投入相对不足,对绿色低碳技术的研发和应用支持还需进一步加大;又如铜川市平均科技创新支出占比仅为 0.2%,在绿色技术研发、设备更新改造等方面投入有限,同时缺乏科技创新投入也导致新兴产业发展缓慢,难以带动全市产业结构升级,阻碍减排进程.对于此类资源型城市,政府应健全技术创新体制机制和政策体系,提高科技创新治理能力;进一步加大科技投入力度并提高投入的有效性和针对性;同时探索多主体多元化的财政技术投入方式,引导社会各界参与创新投入与布局.

路径三:“环境主导型”路径.组态 3、组态 4 和组态 8 均呈现以“环境主导”的发展路径.数字经济发展水平及政府绿色投入作为核心条件,而环境规制(环境)缺失,说明当数字化水平较高且政府高度重视绿色资本水平时,缺乏必要的环境规制措施也将使得技术和组织条件事倍功半.37%的案例城市可以通过该路径解释,其中大多数城市位于山东省.泰安市平均环保词频占比仅为 0.28%,枣庄市、东营市分别是煤炭和石油产业的重要基地,由于缺乏必要的环境规制手段和监管压力,企业在节能减排方面的投入和创新不足,低碳技术和设备发展缓慢,导致碳减排进程受阻.未来地方政府应不断丰富和完善环境规制治理手段,促使企业减少环境污染及资源浪费,倒逼其改进绿色低碳技术,同时提高公众对环境问题的重视程度,实现城市可持续发展.

3.4 稳健性检验

fsQCA 方法的稳健性检验一般可以通过调整原始一致性阈值、频数及 PRI 一致性阈值的方法来进行检验.已有研究认证一致性阈值可接受的最低标准为 0.750[52],因此本文将其调整为最低标准,最终得出的组态路径一致,证明研究结果具有较强的稳健性.

4 结论

4.1 在研究期内,黄河流域资源型城市三维碳足迹值呈波动下降趋势,具体表现为“持续下降-略有回

弹-波动下降”的特征.2013~2017 年受政策效应影响,碳生态系统持续向好,2018 年因国际形势变动产生“回弹”现象,2021 年三维碳足迹值下降至最低点,但现有生态生产性土地仍不能完全吸收由能源消费及农业生产活动所产生的碳排放,需要占用少量存量资源.

4.2　黄河流域资源型城市中高碳足迹城市数量明显减少,整体分布由“以中高碳足迹值为主”改善为“以中低碳足迹值为主”.受地理位置、资源禀赋等多因素影响,黄河流域资源型城市碳足迹呈“上游<下游<中游”排列.其中上游“两极分化”现象最为明显,中游城市碳足迹相差较小,下游城市差异较大,乌海市和东营市在承担更大碳减排、碳降迹责任的同时也“提前掠夺”了生态资本存量.

4.3　通过组态分析,将黄河流域资源型城市减排降迹组态路径归结为三条:以数字经济发展水平与产业结构合理化水平为主要影响的“技术-结构主导型”路径,以政府绿色投资为主的“组织主导型”路径,以环境规制为主的“环境主导型”路径,分别覆盖了44%、50%、37%的案例城市.

5　政策建议

5.1　加强统筹规划,基于全局视角持续关注黄河流域碳生态系统,实时跟踪资源型城市三维碳足迹变动.进一步明确流域内资源型城市发展方向,结合城市资源禀赋确定新的经济增长点.同时持续推进流域生态治理工作,推动资源型城市向绿色低碳、可持续发展,严格落实资源开采的相关生态保护措施,划定生态保护红线及环境质量底线,创新第三方治理模式,明确主体责任,开展综合治理.

5.2　实施区域差异化战略,黄河流域上、中、下游资源型城市各显其能.上游资源型城市应当注意“两极分化”现象,保持低碳足迹城市的同时兼顾高碳足迹城市的治理工作;下游资源型城市应尽量减少农业生产过程中产生的碳排放,并着力提升三大土地类型的碳汇能力;针对山西、陕西等地处中游的资源型城市,应着力减少能源消耗、调整能源结构、提高能源利用效率;同时,未来应重点关注“提前掠夺型”城市,“开碳汇源”且“节碳源流”,有效避免存量资源提前消纳的现象.

5.3　多策并举,通过组态效应降低黄河流域资源型城市三维碳足迹.针对长治市等 “技术-结构主导型”路径城市,未来应着力提升数字化水平、优化调整产业结构;像鄂尔多斯等“组织主导型”城市,未来应从政府层面入手,探索多主体、多元化的财政技术投入方式,同时提高投入的有效性和针对性;以泰安市为例的“环境主导型”城市,地方政府应注重污染防治工作,丰富环境规制治理手段,提高企业和公众的环保意识.

参考文献:

[1] Xu G, Li S, Gong Y. Study on stochastic convergence of China’s carbon emission efficiency [J]. Climate and Development, 2024,17(5): 407-419.

[2] 陈红梅,李建豹.长三角城市群高质量发展对碳排放强度的空间溢出效应 [J]. 生态经济, 2024,40(4):77-86.
Chen H M, Li J B. Spatial spillover effect of high-quality development on carbon emission intensity in the Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. Ecological Economy, 2024,40(4):77-86.

[3] 徐可西,詹冰倩,姜　春,等.碳排放约束下的城市空间格局优化:理论框架、指标体系与实践路径 [J]. 自然资源学报, 2024,39(3):682-696.
Xu K X, Zhan B Q, Jiang C, et al. Optimization of urban spatial pattern under carbon emission constraints: Theoretical framework, index system and practical paths [J]. Journal of Natural Resources, 2024,39(3):682-696.

[4] 李晓静,郝建花,蔡音飞,等.黄河流域资源型城市城镇化和产业协同集聚对土地利用效率的影响 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2023, 59(4):681-694.
Li X J, Hao J H, Cai Y F, et al. Impact of urbanization and industrial collaborative agglomeration on land use efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin, China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2023,59(4):681-694.

[5] 白　玮.韧性城市建设的实践与启示 [J]. 宏观经济管理, 2020, (12):77-84.
Bai W. Practices and enlightenments of the construction of resilient city [J]. Macroeconomic Management, 2020,(12):77-84.

[6] 穆佳音,王金满,刘　彪,等.资源型城市碳排放演变及影响因素研究进展 [J]. 煤炭学报, 2024,49(S2):1130-1142.
Mu J Y, Wang J M, Liu B, et al. Research progress on the evolution and influencing factors of carbon emissions in resource-based cities [J]. Journal of China Coal Society, 2024,49(S2):1130-1142.

[7] Wang S J, Gao S, Huang Y Y, et al. Spatio-temporal evolution and trend prediction of urban carbon emission performance in China based on super-efficiency SBM model [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(6):1316-1330.

[8] 孔潇扬,李　琦.能源碳排放的空间估算研究进展 [J]. 测绘科学, 2022,47(8):146-156,185.
Kong X Y, Li Q. Research progress of spatial estimation of energy carbon emissions [J]. Science of Surveying and Mapping, 2022,47 (8):146-156,185.

[9] Doll C N H, Muller J P, Elvidge C D. Night-time imagery as a tool for global mapping of socioeconomic parameters and greenhouse gas emissions [J]. AMBIO: a Journal of the Human Environment, 2000, 29(3):157-162.

[10] 杨 屹,张园园.呼包鄂榆资源型城市群“水-能-碳”耦合变化及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2023,43(11):6212-6224.
Yang Y, Zhang Y Y. Analysis of the coupling process and the influencing factors of the “water-energy-carbon” relationship in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin resource-based urban agglomeration [J]. China Environmental Science, 2023,43(11):6212-6224.

[11] 朱向梅,王子莎.黄河流域碳水足迹评价及时空格局研究 [J]. 环境科学与技术, 2020,43(10):200-211.
Zhu X M, Wang Z S. Study on the assessment of carbon and water footprint and its spatial-temporal pattern in the Yellow River Basin [J]. Environmental Science & Technology, 2020,43(10):200-211.

[12] Cui Y, Li L, Lei Y, et al. The performance and influencing factors of high-quality development of resource-based cities in the Yellow River basin under reducing pollution and carbon emissions constraints [J]. Resources Policy, 2024,88:104488.

[13] 胡剑波,闫 烁,韩 君.中国产业部门隐含碳排放效率研究——基于三阶段DEA模型与非竞争型I-O模型的实证分析 [J]. 统计研究, 2021,38(6):30-43.
Hu J B, Yan S, Han J. Study on the carbon emissions efficiency embodied in China’s industrial sector——Empirical analysis based on three-stage DEA model and non-competitive I-O model [J]. Statistical Research, 2021,38(6):30-43.

[14] 王 凯,张淑文,甘 畅,等.中国旅游业碳排放效率的空间网络结构及其效应研究 [J]. 地理科学, 2020,40(3):344-353.
Wang K, Zhang S W, Gan C, et al. Spatial network structure of carbon emission efficiency of tourism industry and its effects in China [J]. Geographical Science, 2020,40(3):344-353.

[15] 崔艳芳,张国兴.黄河流域资源型城市碳排放影响因素与达峰预测研究 [J]. 人民黄河, 2023,45(2):9-14.
Cui Y F, Zhang G X. Research on the influencing factors and peak prediction of carbon emission of resources-based cities in the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2023,45(2):9-14.

[16] 潘思羽,张美玲.基于 BP 神经网络的甘肃省二氧化碳排放预测及影响因素研究 [J]. 环境工程, 2023,41(7):61-68,85.
Pan S Y, Zhang M L. Prediction of carbon dioxide emission in Gansu Province based on BP neural network and its influencing factors [J]. Environmental Engineering, 2023,41(7):61-68,85.

[17] 常建波,付兴涛,郑美君,等.能源消耗碳排放的时空演变与预测:基于山西省夜间灯光数据 [J]. 环境科学与技术, 2023,46(3):81-89.
Chang J B, Fu X T, Zheng M J, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of energy consumption carbon emissions based on night light data in Shanxi Province [J]. Environmental Science & Technology, 2023,46(3):81-89.

[18] Köne A Ç, Büke T. Factor analysis of projected carbon dioxide emissions according to the IPCC based sustainable emission scenario in Turkey [J]. Renewable Energy, 2019,133:914-918.

[19] 陈 锋,张 晶,任 娇,等.基于 LMDI 模型的黄河流域碳排放时空差异及影响因素研究 [J]. 地球环境学报, 2022,13(4):418-427.
Chen F, Zhang J, Ren J, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of carbon emissions in the Yellow River Basin based on LMDI model [J]. Journal of Earth Environment, 2022,13(4): 418-427.

[20] Espoir D K, Sunge R. CO_2 emissions and economic development in Africa: Evidence from a dynamic spatial panel model [J]. Journal of environmental management, 2021,300:113617.

[21] 李在军,尹上岗,姜友雪,等.长三角经济增长与碳排放异速关系及形成机制 [J]. 自然资源学报, 2022,37(6):1507-1523.
Li Z J, Yin S G, Jiang Y X, et al. Analysis of allometric relationship and formation mechanism between economic growth and carbon emissions in the Yangtze River Delta [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(6):1507-1523.

[22] 孙秀梅,闫 肃.TOE 框架下资源型城市低碳转型驱动路径——基于我国 108 个资源型城市的 fsQCA 研究 [J]. 科技进步与对策, 2023,40(23):72-81.
Sun X M, Yan S. The driving path for low-carbon transformation of resource-dependent cities under the TOE framework: An fsQCA research based on 108 resource-dependent cities in China [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2023,40(23):72-81.

[23] 冯相昭,蔡博峰,王 敏,等.中国资源型城市 CO_2 排放比较研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2017,27(2):5-9.
Feng X Z, Cai B F, Wang M, et al. A comparative study on CO_2 emission of resource-based cities in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2017,27(2):5-9.

[24] 张明斗,席胜杰.资源型城市碳排放效率评价及其政策启示 [J]. 自然资源学报, 2023,38(1):220-237.
Zhang M D, Xi S J. Evaluation of carbon emission efficiency of resource-based cities and its policy enlightenment [J]. Journal of Natural Resources, 2023,38(1):220-237.

[25] 方 恺.生态足迹深度和广度:构建三维模型的新指标 [J]. 生态学报, 2013,33(1):267-274.
Fang K. Ecological footprint depth and size: new indicators for a 3D model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(1):267-274.

[26] Wackernagel M, Rees W. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth [M]. Philadelphia: New society publishers, 1998.

[27] 郑德凤,刘晓星,王燕燕,等.中国省际碳足迹广度、深度评价及时空格局 [J]. 生态学报, 2020,40(2):447-458.
Zheng D F, Liu X X, Wang Y Y, et al. Assessment of carbon footprint size, depth and its spatial-temporal pattern at the provincial level in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(2):447-458.

[28] 景侨楠,侯慧敏,白宏涛,等.自上而下的城市能源消耗碳排放估算方法 [J]. 中国环境科学, 2019,39(1):420-427.
Jing Q N, Hou H M, Bai H T, et al. A top-bottom estimation method for city-level energy-related CO_2 emissions [J]. China Environmental Science, 2019,39(1):420-427.

[29] 康韵婕,郑国璋,杨建平.基于碳足迹方法的山西省土地可持续利用研究 [J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2021,35(2):23-28.
Kang Y J, Zheng G Z, Yang J P. Study on sustainable land use in Shanxi Province based on carbon footprint method [J]. Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition), 2021,35(2):23-28.

[30] IPCC. (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press.

[31] 何　勇.中国气候、陆地生态系统碳循环研究 [M]. 北京:气象出版社, 2006.
He Y. Research on China’s climate, Carbon cycle in terrestrial ecosystems [M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 2006.

[32] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981~2000 年中国陆地植被碳汇的估算 [J]. 中国科学(D 辑:地球科学), 2007,37(6):804−812.
Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Estimation of carbon sinks in terrestrial vegetation in China, 1981~2000 [J]. Scientia Sinica (D: Terrae), 2007,37(6):804−812.

[33] 熊　鹰,艾赣雄,周　晨,等.基于改进三维生态足迹模型的洞庭湖区生态可持续时空演化研究 [J]. 生态学报, 2022,42(3):1165−1179.
Xiong Y, Ai G X, Zhou C, et al. Temporal and spatial evolution of ecological sustainability in Dongting Lake area based on the improved three−dimensional ecological footprint model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(3):1165−1179.

[34] 钱凤魁,徐　欢,逄然然,等.基于三维生态足迹模型辽宁省耕地生态补偿额度估算分析 [J]. 中国农业资源与区划, 2023,44(6):97−109.
Qian F K, Xu H, Pang R R, et al. Estimation and analysis of cultivated land ecological compensation in Liaoning Province based on three−dimensional ecological footprint model [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023,44(6):97−109.

[35] 刘某承,李文华,谢高地.基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算 [J]. 生态学杂志, 2010,29(3):592−597.
Liu M C, Li W H, Xie G D. Estimation of China ecological footprint production coefficient based on net primary productivity [J]. Chinese Journal of Ecology, 2010,29(3):592−597.

[36] TORNATZKY L G, FLEISCHER M. The processes of technological innovation [J]. The Journal of Technology Transfer, 1991,(1):45−46.

[37] Chau P Y K, Tam K Y. Factors affecting the adoption of open systems: an exploratory study [J]. MIS quarterly, 1997,21(1):1−20.

[38] 王飞航,本连昌.创新生态系统视角下区域创新绩效提升路径研究 [J]. 中国科技论坛, 2021,38(3):154−163.
Wang F H, Ben L C. Research on the improvement path of regional innovation performance from the perspective of innovation ecosystem [J]. Forum on Science and Technology in China, 2021,38(3):154−163.

[39] 李从欣,刘佳源.“双碳”战略背景下数字经济碳减排效应的实证研究 [J]. 城市问题, 2024,(12):74−85.
Li C X, Liu J Y. Empirical study on the carbon emission reduction effect of digital economy under the background of “Dual−Carbon” strategy [J]. Urban Problems, 2024,(12):74−85.

[40] 赵　涛,张　智,梁上坤.数字经济、创业活跃度与高质量发展——来自中国城市的经验证据 [J]. 管理世界, 2020,36(10):65−76.
Zhao T, Zhang Z, Liang S K. Digital economy, entrepreneurship, and high−quality economic development: Empirical evidence from urban China [J]. Journal of Management World, 2020,36(10):65−76.

[41] 郭　峰,王靖一,王　芳,等.测度中国数字普惠金融发展:指数编制与空间特征 [J]. 经济学(季刊), 2020,19(4):1401−1418.
Guo F, Wang J Y, Wang F, et al. Measuring China’s digital financial inclusion: Index compilation and spatial characteristics [J]. China Economic Quarterly, 2020,19(4):1401−1418.

[42] 张　艳,张　雨,孙哲远.资源依赖、政府治理能力对资源型城市绿色经济转型的影响 [J]. 南京财经大学学报, 2022,40(2):76−85.
Zhang Y, Zhang Y, Sun Z Y. Impact of resource dependence and government governance capacity on transformation of resource−based cities’ green economy [J]. Journal of Nanjing University of Finance and Economics, 2022,40(2):76−85.

[43] Muhamad G M, Heshmati A, Khayyat N T. How to reduce the degree of dependency on natural resources? [J]. Resources Policy, 2021, 72:102047.

[44] Yang X, He L, **a Y, et al. Effect of government subsidies on renewable energy investments: The threshold effect [J]. Energy Policy, 2019,132:156−166.

[45] 于　楠,孙仁金,石红玲,等.环境规制与能源生态足迹——基于绿色技术创新的中介效应 [J]. 调研世界, 2023,(12):27−35.
Yu N, Sun R J, Shi H L, et al. Environmental regulation and energy ecological footprint——Mediating effects based on green technology innovation [J]. The World of Survey and Research, 2023,(12):27−35.

[46] 朱洁西,李俊江.数字经济如何赋能城市绿色发展:基于区域创新产出和要素配置效率的视角 [J]. 兰州学刊, 2023,(1):31−48.
Zhu J X, Li J J. How can digital economy empower urban green development——From the perspective of regional innovation output and factor allocation efficiency [J]. Lanzhou Academic Journal, 2023, (1):31−48.

[47] 曾经纬,李柏洲.组态视角下企业绿色双元创新驱动路径 [J]. 中国人口・资源与环境, 2022,32(2):151−161.
Zeng J W, Li B Z. Driving paths of enterprise green ambidextrous innovation from the configuration perspective [J]. China Population, Resources and Environment, 2022,32(2):151−161.

[48] 闫华飞,牛兰兰,肖　静.TOE 框架下地区碳减排的组态路径研究 [J]. 管理学刊, 2023,36(3):35−48.
Yan H F, Niu L L, Xiao J. Research on the Configuration Path of Regional Carbon Emission Reduction Under the Framework of TOE [J]. Journal of Management, 2023,36(3):35−48.

[49] 张　莹,陈涛峰,陈洪波,等.扶持政策对资源枯竭型城市高质量发展的促进效果 [J]. 中国人口・资源与环境, 2022,(5):46−56.
Zhang Y, Chen T F, Chen H B. Implementation effect of supporting polices on the high−quality development of resource−exhausted cities [J]. China Population, Resources and Environment, 2022,(5):46−56.

[50] 徐英启,程　钰,王晶晶.中国资源型城市碳排放效率时空演变与绿色技术创新影响 [J]. 地理研究, 2023,42(3):878−894.
Xu Q Y, Cheng Y, Wang J J. The impact of green technological innovation on the spatiotemporal evolution of carbon emission efficiency of resource−based cities in China [J]. Geographical Research, 2023,42(3):878−894.

[51] 夏海力,朱诗晗.中国省域创新绩效提升的多元路径选择——基于 TOE 框架的组态分析 [J/OL]. 科技进步与对策, 1−10[2025−04−09].
Xia H L, Zhu S H. Multiple path choice of improving provincial innovation performance in China: A configuration analysis based on TOE framework [J/OL]. Science & Technology Progress and Policy, 1−10[2025−04−09].

[52] Schneider C Q, Wagemann C. Set−theoretic methods for the social sciences: A guide to qualitative comparative analysis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

作者简介：宋　梅(1970−),女,河南安阳人,教授,博士,主要从事低碳发展、资源型地区转型研究.发表论文 40 余篇.songmei6361@163.com.