

DOI: 10.20103/j.stxb.202305030917

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.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. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1303-1314.

珠三角城市群净碳排放与经济发展脱钩效应及其驱动力

王永阳,蔡宴朋*,张盼

广东工业大学生态环境与资源学院,广州 510006

摘要:经济增长伴随着碳排放的不断增加,加剧了全球变暖和气候变化的严重程度。分析净碳排放量时空演变特征和鉴别其与经济发展之间的脱钩效应及影响因素对促进区域发展低碳化绿色可持续战略有着重要的实践意义。以珠三角城市群为例,对市级尺度的碳排放量,碳汇能力的时空演变特征进行分析,并用生态承载指数表征其净碳排放程度。同时采用 Tapio 脱钩模型评价该区域的净碳排放和经济效应的脱钩指数进行探讨,结合迪氏指数分解法(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)识别和分析净碳排放的脱钩指数的影响因素。结果表明:(1)珠三角地区生产视角碳排放总量处于先快速增长后缓慢增长的趋势。碳排放总量由 2000 年的 1.75×10^8 t 增长到 2020 年的 4.87×10^8 t,增长率为 178.29%。(2)2000—2020 年,珠三角地区碳吸收量由 1.84×10^8 t 增长到 2.06×10^8 t,增长率为 11.9%。林地和耕地是城市吸收二氧化碳的主要贡献者,其碳吸收量占总碳吸收量的 97% 以上。(3)珠三角地区碳生态承载指数空间差异明显,呈现中间低两边高的趋势,地区周边的肇庆、惠州和江门生态承载指数高,与之相反,佛山和东莞的生态承载指数低。(4)碳排放强度因素、能源消耗因素、效率因素和人口因素对净碳排放量和经济发展的脱钩效应有着显著的作用。提高生态服务和增加绿地管理有助于增强碳汇能力,进而促进碳排放与经济增长的脱钩。因此,基于这些发现,研究建议珠三角地区应在未来的发展中重点加强碳汇能力的提升。同时,调整产业结构和能源结构,逐步减少对高碳排放行业的依赖,推动经济发展与碳排放的脱钩,促进区域内低碳、绿色、协同的可持续发展。这对于该地区应对全球气候变化以及实现碳中和目标具有重要的战略意义。

关键词:净碳排放量;脱钩效应;脱钩指数;LMDI;珠三角城市群

Decoupling effect and driving factors of net carbon emissions and economic development in the Pearl River Delta urban agglomeration

WANG Yongyang, CAI Yanpeng*, ZHANG Pan

School of Ecology, Environment and Resources, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

Abstract: Economic growth is accompanied by the continuous increase in carbon emissions, exacerbates the severity of global warming and climate change. Analyzing the spatiotemporal characteristics of net carbon emissions and identifying their decoupling effects from economic development, along with the influencing factors, is of great practical significance for promoting regional development strategies towards low-carbon, green, and sustainable practices. Taking the Pearl River Delta Urban Agglomeration as an example, this study analyzes the carbon emissions at the municipal level and the spatiotemporal evolution of carbon sink capacity, representing the extent of net carbon emissions using the Ecological Carrying Capacity Index. Simultaneously, the Tapio decoupling model is employed to assess the decoupling index between net carbon emissions and economic effects, supplemented by the Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) to identify and

基金项目:国家自然科学基金(U20A20117)

收稿日期:2023-05-03; 网络出版日期:2024-10-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanpeng.cai@gdut.edu.cn

analyze the influencing factors of the decoupling index for net carbon emissions. The results show that: (1) From 2000 to 2020, the total carbon emissions in the Pearl River Delta region exhibited a trend of rapid growth followed by a slower increase, with the emissions increasing from 1.75×10^8 tons in 2000 to 4.87×10^8 tons in 2020, representing a growth rate of 178.29%. (2) During the same period, the carbon absorption capacity in the Pearl River Delta region increased from 1.84×10^8 tons to 2.06×10^8 tons, with forests and cultivated land being the main contributors, accounting for over 97% of the total carbon absorption. (3) The carbon ecological carrying capacity index in the Pearl River Delta region exhibits significant spatial differences, showing a trend of being lower in the central areas and higher on the periphery. The peripheral areas, such as Zhaoqing, Huizhou, and Jiangmen, have a high ecological carrying capacity index. In contrast, cities like Foshan and Dongguan display a lower ecological carrying capacity index. (4) Factors such as carbon emission intensity, energy consumption, efficiency, and population have significant effects on the decoupling effect between net carbon emissions and economic development. Enhancing ecological services and increasing green space management contribute to strengthening carbon sequestration capacity, thereby promoting the decoupling of carbon emissions from economic growth. Based on these findings, the study suggests that the Pearl River Delta region should prioritize strengthening carbon sequestration capacity in its future development. Additionally, the region should adjust its industrial structure and energy mix, gradually reducing reliance on high-carbon emission industries, and promoting the decoupling of economic growth from carbon emissions. This approach is crucial for the region to address global climate change and achieve carbon neutrality goals, playing a significant strategic role in this endeavor.

Key Words: net carbon emissions; decoupling effects; decoupling index; LMDI; Pearl River Delta Urban Agglomeration

CO₂是最主要的温室气体,其所造成的全球变暖已经对地球自然生态造成了显著的影响并引起了广泛的关注^[1]。我国作为世界碳排放量最大的国家,在全球低碳减排行动中有着不可推卸的责任。尤其是中国在七十五届联合国大会上提出“双碳”目标,这必使中国面临巨大的减排压力。一直以来,经济发展过程中的碳排放问题受到社会各界的广泛关注。经济快速发展的同时,城市也面临着自然生态环境恶化等问题^[2]。如何加快经济建设的同时兼顾环境生态健康已经成为学者们所面临的挑战^[3]。因此,深入探究城市发展的碳排放时空特征,与经济的关系及其驱动力因素,对判断城市低碳发展情况和未来政策制定具有重要的参考价值。

在探究经济增长与碳排放的研究上,脱钩理论已经被广泛的应用^[4-5]。近些年来,学者从不同视角围绕碳排放和经济增长的脱钩关系进行一系列研究。从空间尺度上,部分研究对不同空间尺度地区的碳排放和经济增长的脱钩效应特征进行研究分析,包括,国家^[6]、省级^[7]、地级市^[8]以及县级^[9],也有部分研究将研究的重点聚焦于城市群,认为其经济快速发展是我国碳排放的主要来源,目前针对城市群的研究主要包括:长三角地区^[10]、京津冀地区^[11]、关中平原城市群等^[12]。一些学者则是关注不同行业的碳排放与经济增长的脱钩效应。例如,电力行业^[13],旅游业^[14],物流业^[15],服务业^[16]以及其他^[17]。但仍存在一些不足:首先从一个区域尺度进行分析,大多数研究只关注于区域经济增长过程中的碳排放总量,而忽视区域所拥有的碳吸收能力。经济增长的同时也会对区域碳汇能力带来一定程度的影响,仅仅考虑碳排放因素是无法更加准确地表明城市经济发展和碳排放之间的关系^[18]。其二,多数学者关注影响碳排放的驱动力因素^[19],并没有进一步探讨区域经济发展和碳排放的脱钩效应的影响因素。在区域碳排放和经济发展的关系研究中,区域内各地级市的能源结构,人口因素,土地因素都存在明显的空间差异,这也导致不同地区碳排放于经济发展的脱钩差异也各有差异。因此,深入研究区域各地市碳排放量和碳汇能力,分析净碳排放量的时空演变特征,探究净碳排放量与经济增长的脱钩关系及其影响因素对于区域内各地市的低碳经济发展具有重要的实用价值。

珠三角城市群位于广东省中南部,是亚太地区最具活力的经济区之一,它以广东 70%的人口,创造着全省 85%的 GDP。是有全球影响力的先进制造业基地和现代服务业基地。近年来,珠三角地区经济高速发展,2020 年,珠三角 9 市的 GDP 高达 8.94 万亿,超过山东、浙江等 29 省份。经济高速发展的同时也需注重生态

环境建设,探究其经济增长与生态环境的关系是十分紧要的。目前,对于珠三角地区净碳排放和经济发展的脱钩效应尚未深入讨论,未能具体的反映某个市域净碳排放量特征及其经济发展的关系。因此,揭示珠三角区域各地市的碳排放量和碳汇能力,分析各地市净碳排放的时空特征及其于经济发展的脱钩效应分析,之后进一步探讨影响其脱钩效应的驱动力因素是十分重要的。这对珠三角地区开展低碳化经济发展战略有着重要的参考意义。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究的数据主要来自于《广东省统计年鉴》(2001、2011、2021年)及珠三角城市群各地级市统计年鉴(2001、2011、2021年)。土地利用数据来源于珠三角地区土地覆被遥感监测数据集。能源消费数据来自《中国能源统计年鉴》(2001、2011、2021年)及各地级市统计年鉴(2001、2011、2021年)。

1.2 研究方法

1.2.1 城市碳排放量核算

研究主要是针对城市边界内生产端碳排放核算,包括行业部门化石燃料燃烧和工业生产过程的CO₂排放,不包括进口电力、城市边界外的热量消耗和城际交通能源消耗。避免重复计算,城市范围内产生的电和热排放是根据原煤等一次能源的使用情况计算的。根据Shan等^[20],CO₂排放量由7个部门和7个加工转换过程以及损失量计算。基于《IPCC国家温室气体清单指南》,CO₂排放量的计算公式具体如下:

(1) 能源消耗碳排放核算

$$CE_{energy} = \sum_i \sum_j CE_{ij} = \sum_i \sum_j AD_{ij} \times NCV_i \times EF_i \times Q_{ij} \quad i = 1, \dots, 16; j = 1, \dots, 5 \quad (1)$$

式中, i 和 j 分别表示的是化石能源消耗种类和能源消耗部门或过程; CE_{energy} 为各类能源消耗产生的CO₂排放量; CE_{ij} 为第 i 种化石燃料在第 j 个过程或部门; AD_{ij} 为化石能源消耗; NCV_i 为净热值; EF_i 为CO₂排放系数; Q_{ij} 为氧化因子。本研究采用Liu等所用的碳排放估算系数^[21],详情见表1。

表1 化石燃料燃烧排放参数

Table 1 Emission parameters of fossil fuel combustion

能源类型 Energy types	净热值 Net caloric value /(10 ¹⁵ J/10 ⁴ t)	排放因子 Emission factor/ (t CO ₂ /TJ)	能源类型 Energy types	净热值 Net caloric value /(10 ¹⁵ J/10 ⁴ t)	排放因子 Emission factor/ (t CO ₂ /TJ)
原煤 Raw coal	0.21	96.51	汽油 Gasoline	0.44	69.3
洗精煤 Cleaned coal	0.26	96.51	煤油 Kerosene	0.44	71.87
其他洗煤 Other washed coal	0.15	96.51	柴油 Diesel	0.43	74.07
型煤 Briquettes	0.18	96.51	燃料油 Fuel	0.43	77.37
焦炭 Coke	0.28	115.07	液化石油气 Liquefied petroleum gas	0.51	63.07
焦炉煤气 Coke oven gas	1.61	78.8	炼厂干气 Refinery gas	0.47	73.33
其他焦化产品 Other coking products	0.28	100.64	天然气 Natural gas	3.89	56.17
原油 Crude oil	0.43	73.63			

(2) 工业活动碳排放核算

工业过程的碳排放主要来自产品生产过程中的CO₂排放,本研究只考虑水泥生产过程中的CO₂排放,具体计算公式如下:

$$CE_{cement} = E_{cement} \times K_{cement} \quad (2)$$

式中, CE_{cement} 表示水泥碳排放; E_{cement} 表示水泥生产量; K_{cement} 表示水泥生产过程中的碳排放因子^[22]。

1.2.2 城市碳吸收量核算

城市碳吸收量主要来自不同土地利用对 CO₂ 的吸收能力,土地利用主要涉及耕地、林地、草地、水域以及未利用地,耕地碳汇能力主要是农作物全生育期光合作用碳吸收量,林地和草地的碳汇能力来自于植被光合作用对 CO₂ 的吸收能力,同时水域和未利用地也存在一定的碳吸收能力。具体计算公式如下:

(1) 耕地碳吸收核算

$$C_a = \sum_i C_{ij} \times Y_{ij} \times (1 - W_{ij}) \times (1 + R_{ij}) / H_{ij} \quad i = 1, \dots, 7; j = 1, \dots, 9 \quad (3)$$

式中, i 和 j 分别表示为农作物种类和珠三角城市; C_a 为全生育期农作物碳吸收量; C_{ij} 为不同作物的碳吸收率; Y_{ij} 为农作物经济产量; W_{ij} 为不同作物的含水率; R_{ij} 为不同作物的根冠比; H_{ij} 为不同经济系数;具体参数见表 2^[23]。

表 2 主要农作物碳吸收率、含水率、经济系数和根冠比

Table 2 Carbon absorption rate, water content, economic coefficient and root shoot ratio of main crops

作物类型 Crop types	粮食作物(平均值) Cereal crops (average value)	大豆 Bean	糖蔗 Sugarcane	花生 Peanut	烟叶 Tobacco	薯类 Potato	蔬菜 Vegetable
碳吸收率 Carbon absorption	0.457	0.45	0.45	0.45	0.45	0.423	0.45
含水率 Moisture content	0.123	0.13	0.5	0.1	0.17	0.7	0.9
经济系数 Economic coefficient	0.417	0.35	0.5	0.43	0.55	0.7	0.65
根冠比 Root shoot ratio	0.533	0.13	0.26	0.2	0.32	0.18	0

(2) 其他土地类型碳吸收量核算

其他土地利用包括林地、草地、水域以及未利用地,计算公式如下:

$$C_o = \sum_i A_{ij} \times CA_{ij} \quad i = 1, \dots, 4; j = 1, \dots, 9 \quad (4)$$

式中, i 表示不同土地利用类型; j 为珠三角城市; C_o 为林地、草地、水域和未利用地碳吸收量; A_{ij} 为林地、草地、水域和未利用地面积; CA_{ij} 为林地、草地、水域和未利用地碳吸收系数,详细系数见表 3^[24]。

表 3 不同土地类型的碳吸收率

Table 3 Carbon absorption rate of different land types

类型 Types	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Aquatorium	未利用地 unutilized land
碳吸收率 Carbon absorption rate/(kg/m ²)	0.6125	0.0205	0.0245	0.005

1.3 碳生态承载指数

碳生态承载系数(Ecological Support Coefficient, ESC)是指某一地区碳吸收量占全区比例与该地域碳排放量占全区比例的商,反映了该区域碳汇能力的大小^[25]。计算公式如下:

$$ESC = \frac{C_{Ai}}{C_A} / \frac{C_i}{C} \quad (5)$$

式中, C_{Ai} 和 C_A 分别表示 i 城市及珠三角地区的碳吸收量, C_i 和 C 分别表示 i 城市及全省的碳排放量。当 $ESC > 1$ 时,说明着该地区碳吸收比率大于碳排放的比率,意味着该区域有较强的碳汇能力; $ESC < 1$, 则说明碳汇能力较弱。

1.4 脱钩分析

脱钩理论源于物理学领域,后被逐渐用于探究资源环境与经济发展的相互关系^[26]。净碳排放脱钩分析指的是城市经济增长与净碳排放量之间关系不断弱化直至消失的理想化过程^[27]。本研究采用 Tapio 脱钩模型, Tapio 脱钩指数可以消除基期选择上的误差问题,是常用的脱钩方法之一^[21]。在 Tapio 基础上,将脱钩指

数划分为 8 种类型,分别为弱脱钩、强脱钩、衰退型脱钩、弱负脱钩、强负脱钩、扩张型负脱钩、增长连结和衰退连,如图 1 所示。城市净碳排放量和经济增长的脱钩指数为 D ,计算方法如下所示:

$$D' = \frac{((C^t - C^{(t-1)}) / C^{(t-1)})}{((G^t - G^{(t-1)}) / G^{(t-1)})} \quad (6)$$

式中, D 为脱钩指数; t 和 $t-1$ 表示的是起始年和终止年; C 表示净碳排放量; G 表示 GDP。

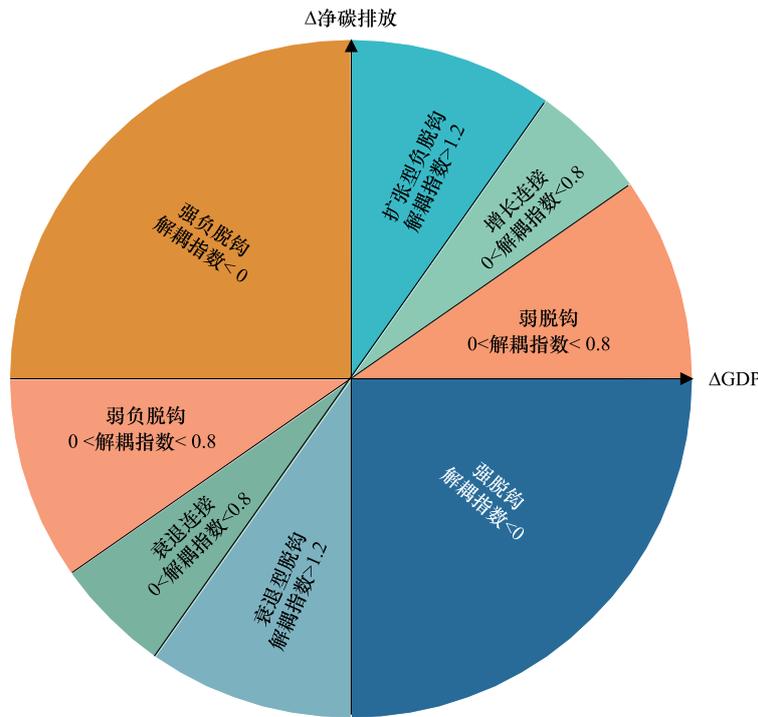


图 1 解耦指数和解耦类型

Fig.1 Decoupling indices and decoupling types

1.5 LMDI 对数分解法

LMDI 方法是由 Ang 等在 20 世纪 90 年代提出的一种因素分解方法^[28]。由于 LMDI 方法在分解过程中不存在残差项而被广泛的用于碳经济研究领域。本研究采用 LMDI 方法对脱钩指数进行分解,探究影响碳排放和经济增长脱钩效应的驱动力因素,公式如下:

$$D' = \frac{((C^t - C^{(t-1)}) / C^{(t-1)})}{((G^t - G^{(t-1)}) / G^{(t-1)})} = \frac{G^{(t-1)}}{(C^{(t-1)} \times (G^t - G^{(t-1)}))} \times (C^t - C^{(t-1)}) \quad (7)$$

将公式(7)中 $(C^t - C^{(t-1)})$ 进行因式分解:

$$\Delta C = (C^t - C^{(t-1)}) = \frac{C}{GDP} \times \frac{E}{P} \times \frac{GDP}{E} \times \frac{P}{A_E} \times \frac{A_E}{A} \times A \quad (8)$$

式中, C 表示的是净排放量, GDP 表示国内生产总值, E 表示为能源消费量, P 表示为人口, A_E 表示区域内生态用地的面积, A 表示区域总面积。

下面分别定义: $C_{EI} = \frac{C}{GDP}$,表示为净碳排放强度因素, $C_{EC} = \frac{E}{P}$,表示为能源消耗因素, $C_{EE} = \frac{GDP}{E}$,表示的是

能源效率因素, $C_P = \frac{P}{A_E}$,表示的是人口因素, $C_{EL} = \frac{A_E}{A}$,表示为生态水平因素, $C_C = A$,表示土地因素。因此,

$$\Delta C = (C^t - C^{(t-1)}) = (C_{EI}^t \times C_{EC}^t \times C_{EE}^t \times C_P^t \times C_{EL}^t \times C_C^t) - (C_{EI}^{t-1} \times C_{EC}^{t-1} \times C_{EE}^{t-1} \times C_P^{t-1} \times C_{EL}^{t-1} \times C_C^{t-1}) = \Delta C_{EI} + \Delta C_{EC} + \Delta C_{EE} + \Delta C_P + \Delta C_{EL} + \Delta C_C \quad (9)$$

式中, ΔC 为末期与基期净碳排放差值, ΔC_{EI} 表示为净碳排放强度因素, ΔC_{Ec} 表示能源消耗因素, ΔC_{EE} 表示为能源效率因素, ΔC_p 表示为人口因素, ΔC_{EL} 表示为生态水平因素, ΔC_c 表示土地因素。各因素的脱钩效应计算如下:

$$DEI = \frac{G^{t-1}}{C^{t-1} \times (G^t - G^{t-1})} \times (C^t - C^{t-1}) \times \ln \frac{EI_t}{EI_{t-1}} \quad (10)$$

$$DEC = \frac{G^{t-1}}{C^{t-1} \times (G^t - G^{t-1})} \times (C^t - C^{t-1}) \times \ln \frac{EC_t}{EC_{t-1}} \quad (11)$$

$$DEE = \frac{G^{t-1}}{C^{t-1} \times (G^t - G^{t-1})} \times (C^t - C^{t-1}) \times \ln \frac{EE_t}{EE_{t-1}} \quad (12)$$

$$DP = \frac{G^{t-1}}{C^{t-1} \times (G^t - G^{t-1})} \times (C^t - C^{t-1}) \times \ln \frac{P_t}{P_{t-1}} \quad (13)$$

$$DEL = \frac{G^{t-1}}{C^{t-1} \times (G^t - G^{t-1})} \times (C^t - C^{t-1}) \times \ln \frac{EL_t}{EL_{t-1}} \quad (14)$$

$$DC = \frac{G^{t-1}}{C^{t-1} \times (G^t - G^{t-1})} \times (C^t - C^{t-1}) \times \ln \frac{C_t}{C_{t-1}} \quad (15)$$

式中, DEI 为碳排放强度的脱钩指数, DEC 为能源消耗的脱钩指数, DEE 为能源效率的脱钩指数, DP 为人口因素的脱钩指数, DEL 为生态水平的脱钩指数, DC 为土地因素的脱钩指数。

2 结果与分析

2.1 碳排放时空特征分析

由图 2 可知, 珠三角地区在 2000 年、2010 年和 2019 年的生产端碳排放总量分别为 1.75×10^8 t、 4.00×10^8 t 和 4.87×10^8 t, 增长率分别为 128.57% 和 21.75%。主要原因是珠三角地区在 2000—2010 年间得益于相关政策

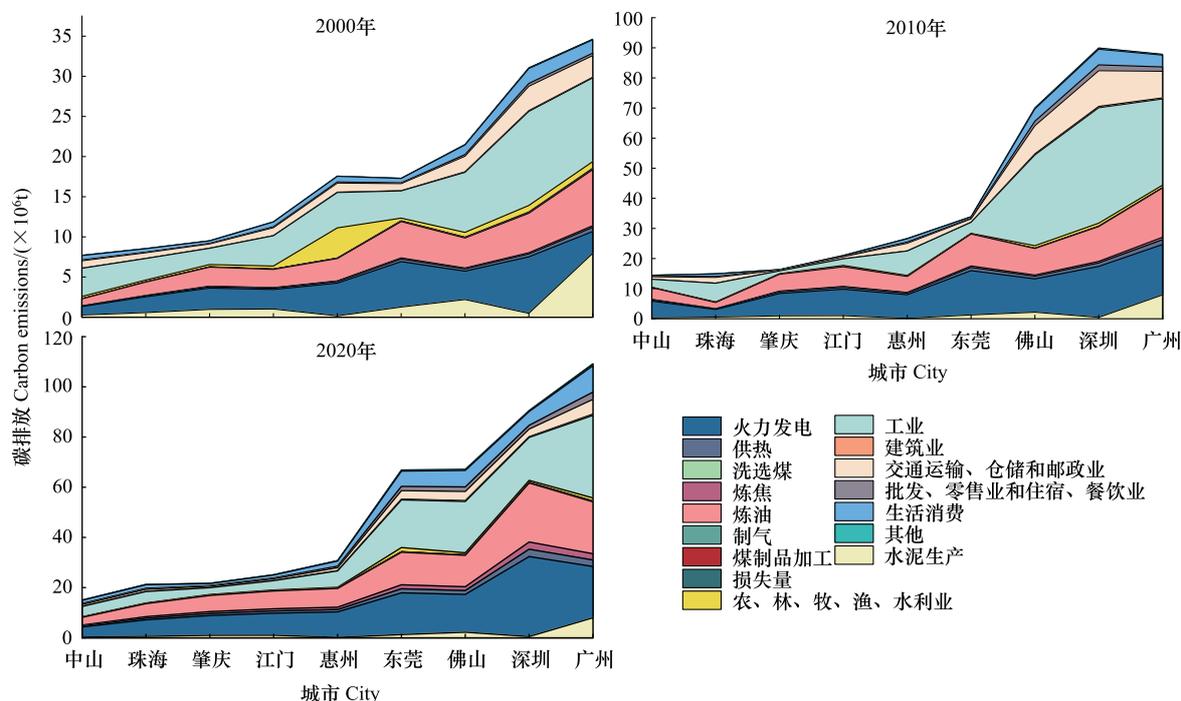


图 2 珠三角地区分行业碳排放特征

Fig.2 Carbon emission characteristics by industry in the Pearl River Delta region

的扶持,经济处于高速发展阶段,需要大量的资源投入,这过程使得产生大量的二氧化碳排放。在 2010—2020 阶段,地区发展处于一种缓慢增长的阶段,碳排放增长率相较于前一个阶段大幅度的下降。其中,火力发电和工业部门在 2000 年、2010 年和 2020 年产生的碳排放量超过 20%,火力发电碳排放量由 2000 年的 4.59×10^7 t 到 2020 年的 1.36×10^8 t,增长率为 195.6%。这说明火力发电依旧是珠三角地区主要的能源消耗的主要部门。工业部门碳排放量则呈现先上升后下降的趋势,由 2000 年的 4.94×10^7 t 增长到 1.21×10^8 t 在下降到 1.11×10^8 t,其中在第一阶段(2000—2010 年)中工业部分的各项能源消费总量增加,以焦炭和天然气等增长最为迅速,天然气涨幅为 50 倍以上,而第二阶段(2010—2020 年)珠三角地区的工业由传统的先进制造业逐步转向高技术制造业,这种工业转型使得珠三角地区工业碳排放量的减少。2000 和 2010 年珠三角地区碳排放量最高的城市为广州,分别为 4.26×10^7 t 和 9.90×10^7 t。而在 2020 年,深圳替代广州成为珠三角地区碳排放量最高的城市,碳排放量分别为 1.01×10^8 t,深圳作为直辖市,由于自然资源有限,其产业结构更多的倾向于高能耗的二三产业,致使 GDP 快速增长的同时带来更多的二氧化碳排放。在 2000 年和 2019 年珠海市碳排放最低的省份,分别为 7.97×10^6 t 和 1.54×10^7 t。中山在 2010 年则是碳排放量最低的省份,其值为 1.52×10^7 t。中山市在 2010 年,其能源消费总量相较于 2000 年下降 21.79%。尤其是生产部门的终端消费量,能耗的下降使得碳排放量的减少。

2.2 碳吸收时空特征分析

图 3 表明珠三角地区城市碳吸收能力,结果表示,珠三角地区的碳吸收量由 2000 年的 1.84×10^8 t 增长到 2020 年的 2.06×10^8 t,增长率为 11.9%。林地和耕地是城市吸收二氧化碳的主要贡献者,其碳吸收量占总碳吸收量的 97%以上。其中,肇庆是珠三角地区碳汇能力最高的城市,在 2000、2010 和 2020 年的碳吸收量分别是 2.1×10^7 t、 2.04×10^7 t 和 2.02×10^7 t。但是其碳吸收量逐渐下降,主要原因是城市化的加快导致林地面积的减少,肇庆城市化率由 2000 年的 24.1%增长到 2020 年的 38.2%。中山则是碳吸收量最低的省份,在 2000、

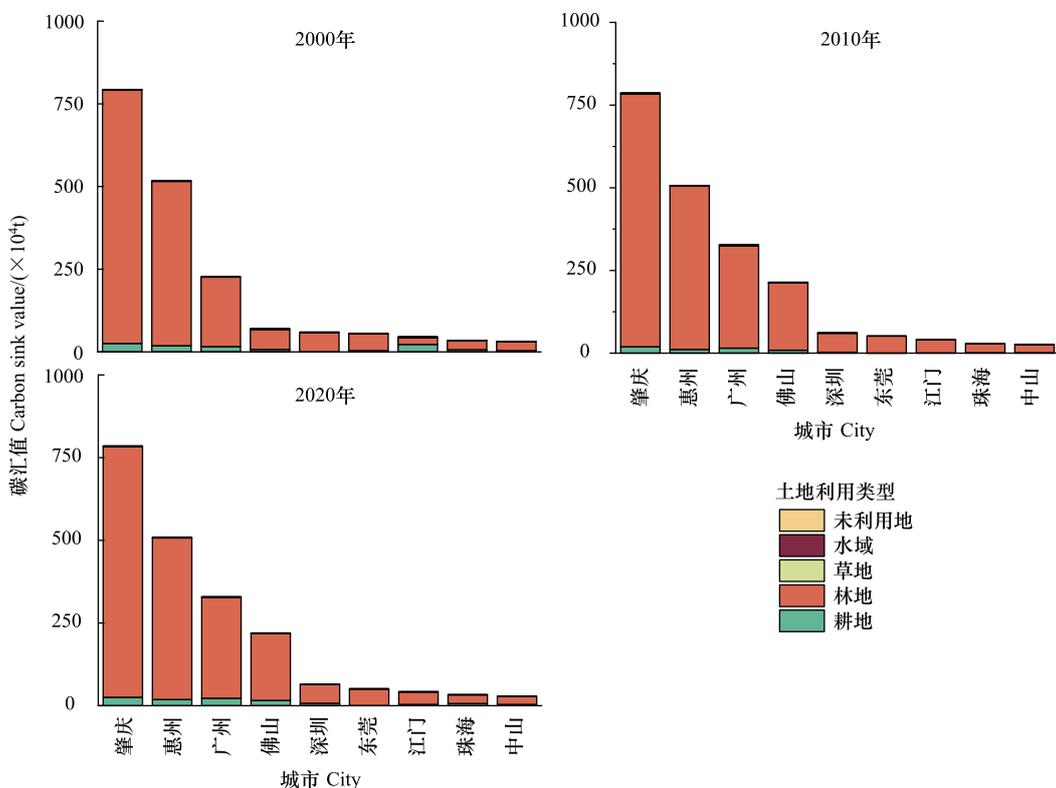


图 3 珠三角地区不同土地利用的碳汇时空特征

Fig.3 Spatio-temporal characteristics of carbon sink in different land types in the Pearl River Delta region

2010 和 2020 年的碳吸收量分别为 3.21×10^6 t、 2.60×10^7 t 和 2.85×10^7 t, 呈现先下降后增长的趋势。经济高速发达的城市, 例如广州、深圳和珠海, 过多的经济需求使得城市土地更多用来经济发展, 而忽视其碳排放量。需进一步优化各产业间用地结构, 保有一定数量的碳汇, 未来规划用地应适当控制建设用地或者大力发展高新技术产业来带动经济发展, 防止碳汇用地大面积向碳源用地转变。

2.3 碳生态承载指数空间特征分析

珠三角地区碳生态承载指数空间差异明显, 呈现中间低两边高的趋势。根据碳排放生态承载系数的大小, 采用自然断点法, 将珠三角地区城市分为 5 类(图 4)。总体空间特征为: 珠三角地区周边的肇庆、惠州和江门的生态承载系数较高, 且其数值均高于 1, 这表明这些区域的林地具有较高的碳汇能力和相对较低的碳排放强度, 其中江门市在 2000 年生态承载系数较低, 但在 2010 年和 2020 年, 其生态承载指数得到了大幅度提升, 这得益于江门市将更多的未利用地进行开发, 未利用地由 2000 年的 5013 hm^2 下降到 2020 年的 538 hm^2 , 减少近 90% 未利用地面积, 大大增加了具有较强碳汇能力的林地、草地等种植面积。中部区域城市在研究区间内均小于 1 且均有下降的趋势, 其中东莞市和佛山市在研究区间内变化最为明显, 这两个城市从生态承载指数中值区降为生态承载指数低值区, 说明东莞市和佛山市碳排放比例明显超过了碳吸收比例, 并有进一步强化的趋势, 需要加强碳汇能力, 缓解生态压力。

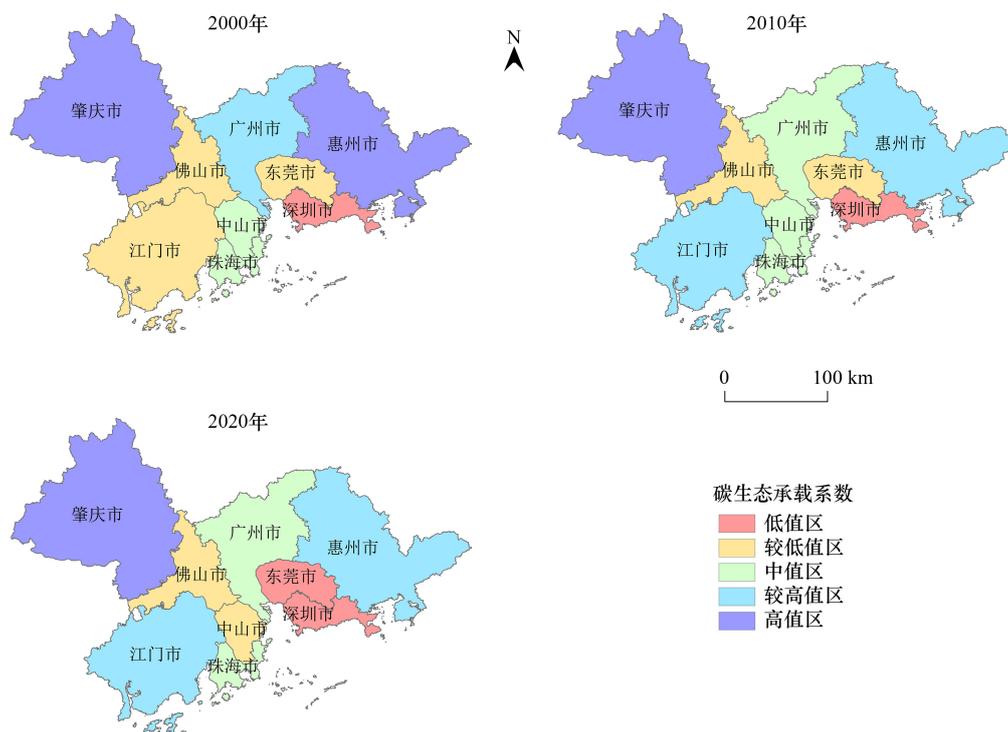


图 4 珠三角地区生态承载系数空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of Ecological Support Coefficient in the Pearl River Delta region

2.4 净碳排放量与经济增长之间的脱钩分析

根据珠三角地区各地级市净碳排放量的变化趋势, 计算 2000—2010 年和 2010—2020 年两个时段的净碳排放量和 GDP 的变化量, 并根据公式(6) 计算两个时段珠三角地区净碳排放量和 GDP 之间的脱钩关系。如表 4 所示可知, 2000—2010 年阶段珠三角地区经济增长和净碳排放量之间呈现扩张型脱钩状态, 这说明经济增长的同时净碳排量也在快速的增加, 且净碳排量的幅度高于经济增长幅度。珠三角地在这研究区间经济高速增长, 但同时其产业更多的以低产值高能耗为主, 致使其碳排放增长幅度远高于其经济增长量。而在后一阶段(2010—2020 年), 珠三角地区净碳排放量和经济增长呈现弱脱钩状态, 这是因为在近几年来珠三角地区

相应国家号召,对高能耗高污染企业进行管控,同时产业结构升级,更多的倾向于高新技术产业,能源利用效率也随着技术的进步得到了提升。在各地级市中,2000—2010年阶段中,除了广州市和江门市外,其余所有城市均呈现弱脱钩状态。净碳排放量与经济增长的脱钩弹性最小的市肇庆(0.04),脱钩状态最为理想。脱钩弹性最大的是佛山市(0.90)。脱钩状况较差。在2010—2020阶段,佛山市和珠海市的脱钩状态有2000—2010年的弱脱钩状态转为强脱钩状态,主要原因是这两个城市产业技术升级,逐步向产业的低碳化和和现代化发展。江门市则是由强脱钩状态(-0.79)转变到弱脱钩状态(0.32),其净碳排放量远高于其经济增长速度。东莞市则是由弱脱钩状态转换成增长连接状态,说明经济增长的同时净碳排放量水平也提高。应采取相应的措施采用低碳化技术,减少碳排放量,同时加快经济发展,提升经济发展水平,逐步向强脱钩转变。

表4 2000—2019年珠三角地区净碳排放量与GDP的脱钩状况

Table 4 Decoupling situation between net carbon emissions and GDP in the Pearl River Delta region from 2000 to 2019

地区 Region	2000—2010年		2010—2019年	
	脱钩指数 Decoupling index	状态 Status	脱钩指数 Decoupling index	状态 Status
全地区	2.33	扩张型负脱钩	0.32	弱脱钩
广州市	0.90	扩张型负脱钩	0.11	弱脱钩
佛山市	0.67	弱脱钩	-0.02	强脱钩
肇庆市	0.04	弱脱钩	0.10	弱脱钩
深圳市	0.67	弱脱钩	0.13	弱脱钩
东莞市	0.32	弱脱钩	0.94	增长连接
惠州市	0.17	弱脱钩	0.19	弱脱钩
珠海市	0.65	弱脱钩	-0.01	强脱钩
中山市	0.27	弱脱钩	0.75	弱脱钩
江门市	-0.79	强脱钩	0.32	弱脱钩

2.5 净碳排放量脱钩影响因素分析

除2000—2010年间的广州外,净碳排放强度因素在第一阶段(2000—2010年)和第二阶段(2010—2020年)的珠三角地区净碳排放脱钩有着抑制作用,各地市中碳排放强度因素脱钩指数均小于0,不利于碳排放脱钩(图5)。说明多数城市更多的追求经济层次的发展忽略其发展所带来的环境效应。中山、江门地市在第二阶段净碳排放强度因素对净碳排放与经济发展脱钩效应的抑制作用减少。这是因为在这一时间段,相应国家政策,产业技术升级,工业朝着低碳化经济的方向发展。能源消耗因素在第一阶段对净碳排放脱钩有着促进作用,而在第二阶段,除了江门市外,其余城市都是由促进作用转变成抑制作用,主要原因是珠三角地区的人均能源消耗处于逐年上升阶段,这一现象并不有益于城市低碳化的发展,这也是珠三角地区向低碳、高效的经济发展所需要关注的方向。能源效率因素也是促进珠三角地区净碳排放脱钩的主要因素之一能源效率因素相对第一阶段,在第二阶段各地市的碳排放脱钩效应的贡献率都起到促进的作用。这也说明近些年来珠三角地区传统工业逐渐转型不断向低能耗、高水平迈进。能源效率逐步走向高效化。第一阶段,人口因素对珠三角各地市的碳排放脱钩有着微弱地促进作用,而在第二阶段,该因素地促进作用得到了明显地提升。随着经济快速提升,珠三角地区吸引更多人才涌入,人口由2000年的4287万人增长到了2020年6446万人。尤其是经济高度发展的地区,比如深圳,人口增加91.7%,使得人口因素对城市碳排放脱钩的促进作用快速增加。碳生态水平因素和土地因素对珠三角城市群的碳排放脱钩起到微弱的作用,对净碳排放量的贡献较小,这也说明这些因素对在城市净碳排放脱钩具有巨大的潜力。珠三角城市规划过程中更应该考虑城市碳汇因素,留有足够的空间来维持或增加城市碳汇能力,实现社会-生态-经济共同和谐的发展。

2.6 敏感性分析

在本研究中,某些参数的值存在不确定性,可能导致不同的结果。因此,从灵敏度分析的角度探讨了不确定变量对输出结果的影响。研究主要考虑了三个因素,包括农药和化肥保留率、碳吸收比例和作物经

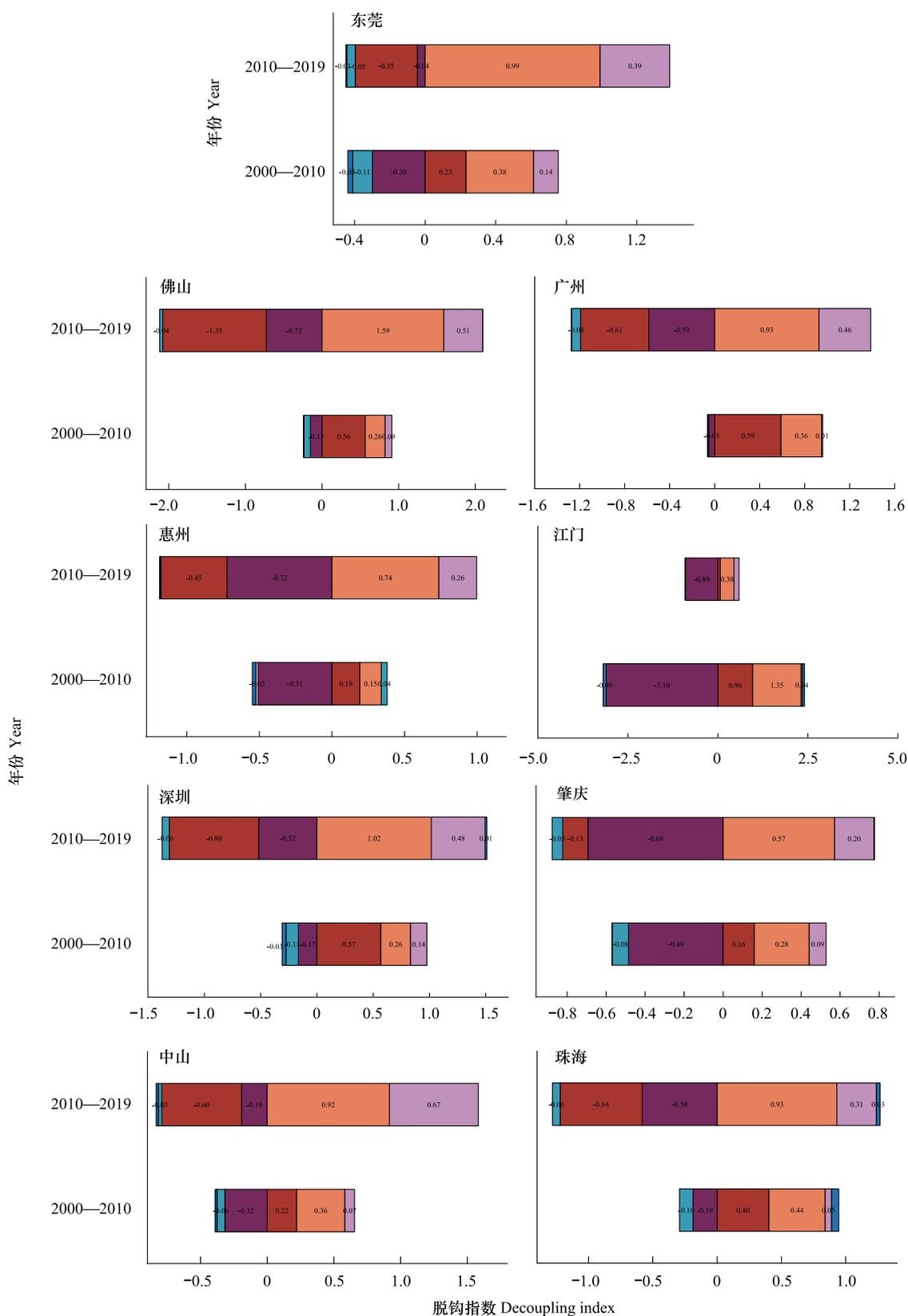


图 5 珠三角地区净碳排放量与经济发展脱钩指数因素分解

Fig.5 Factors decomposition of decoupling index between net carbon emissions and economic development in the Pearl River Delta region
DEI: 碳排放强度的脱钩指数; DEC: 能源消耗的脱钩指数; DEE: 源效率的脱钩指数; DP: 人口因素的脱钩指数; DEL: 生态水平的脱钩指数; DC: 土地因素的脱钩指数

济系数的均值。为了获得更准确的结论,进行了不确定性分析。根据过往的研究^[29],碳排放因子和碳吸收率的设定取值范围,比如林地的碳吸收率为 0.601—0.612,采用多参数敏感性分析(MPSA)来评估模型在数据确定性方面的可靠性。基于蒙特卡洛灵敏度分析进行随机抽样分析参数,计算参数模型得到的目标值,并重复 $N(N=1000000)$ 次。然后,将目标值与 N 次模拟的平均值进行比较,以确保可接受和不可接受的值,并绘制可接受和不可接受条件的累积频率分布曲线,并根据 Kolmogorov-Smirnov 检验评估每个参数的相对敏感性。结果表明,虽然不同参数的变化对模型输出有一定影响,但总体来看,敏感性较低(表 5),这表明我们的研究结果具有较高的可靠性和稳健性。

表 5 净碳排放量多参数敏感性分析结果

Table 5 The multi-parameter global relative sensitivity analysis results of net carbon emission

地区 Region	2000	2010	2020	地区 Region	2000	2010	2020
广州市	0.0013	0.0012	0.0016	惠州市	0.00165	0.00170	0.00275
佛山市	0.00232	0.00161	0.00106	珠海市	0.00144	0.00119	0.00196
肇庆市	0.00135	0.00255	0.00171	中山市	0.00210	0.00144	0.00168
深圳市	0.00137	0.00128	0.00123	江门市	0.00127	0.00104	0.00119
东莞市	0.00203	0.00174	0.00104				

3 结论与讨论

(1) 增强碳汇能力:珠三角地区应根据碳汇能力现有的地理分布,特别是中间地区碳汇能力较低的问题,有针对性地增加绿地面积和绿色基础设施,如在城市屋顶广泛推广绿色屋顶技术。同时,建议通过区域间合作加强整个珠三角的碳汇能力,如共同开展大型植树项目,设立区域碳汇基金,支持碳汇项目的实施与管理^[30]。

(2) 能源结构转型:制定具体时间表和行动计划,逐步减少对煤炭和石油的依赖,积极推动向清洁能源的转型,特别是在粤西地区开展海上风电项目。政府应制定激励措施,如税收优惠和财政补贴,支持清洁能源项目的开发和实施,同时限制高污染、高能耗工业的扩展,确保能源消费的可持续性^[31]。

(3) 技术转移和能效提升:政府应搭建一个区域性的低碳技术交流平台,促进珠三角地区和周边发展中城市的企业间的技术合作与知识共享。通过技术转移和能效提升,支持企业采用先进的低碳技术和管理经验,特别是在能源消费效率方面的提升。同时,在区域碳排放责任的划分中,应充分考虑产业转移过程中碳排放的地理分布,确保公平和效率。

(4) 提升城市韧性和生态保护:加强城市的社会和生态系统的韧性建设,通过提升城市规划的绿色标准和生态保护要求,加大对生态敏感区和重要绿地的保护力度。推动城市基础设施的绿色升级。

未来需采用机器学习等 1 手段来获取更详细的数据进行城市碳排放和经济发展的脱钩效应分析,提出更合理的政策建议。

参考文献(References):

- [1] 张全斌,周琼芳.“双碳”目标下中国能源 CO₂ 减排路径研究. 中国国土资源经济, 2022, 35(4): 22-30.
- [2] 丁宝根,赵玉,邓俊红. 中国种植业碳排放的测度、脱钩特征及驱动因素研究. 中国农业资源与区划, 2022, 43(5): 1-11.
- [3] 张志新,黄海蓉,林立. 贸易开放、经济增长与碳排放关系分析——基于“一带一路”沿线国家的实证研究. 软科学, 2021, 35(10): 44-48.
- [4] Xu W H, Xie Y L, Xia D H, Ji L, Huang G H. A multi-sectoral decomposition and decoupling analysis of carbon emissions in Guangdong Province, China. Journal of Environmental Management, 2021, 298: 113485.
- [5] Zhang M, Song Y, Su B, Sun X M. Decomposing the decoupling indicator between the economic growth and energy consumption in China. Energy Efficiency, 2015, 8(6): 1231-1239.

- [6] 王奕淇, 黄涵祝. 中国碳排放脱钩效应、时空特征与驱动因素研究. 生态学报, 2024, 44(6): 2228-2243.
- [7] 韩梦瑶, 张泽, 廖茂林. 生产和消费双重视角下中国省域碳排放脱钩演变及贡献解析. 区域经济评论, 2023(5): 120-130.
- [8] 龚惠萍, 管璇, 刘晨明. 武汉市工业经济增长与碳排放脱钩关系的实证分析. 统计与决策, 2013, 29(21): 105-108.
- [9] 张赫, 黄雅哲, 王睿, 张建勋, 彭竞仪. 中国县域碳排放脱钩关系及其时空特征演变. 资源科学, 2022, 44(4): 744-755.
- [10] 段林丰, 卢培利, 蒲寅羽, 胡伟, 陈敏, 邓迪, 李振亮, 翟崇治. 典型城市群碳排放的脱钩效应及驱动机制研究. 环境科学与技术, 2021, 44(11): 55-62.
- [11] 韩冬. 京津冀城市群高质量发展与碳排放的脱钩关系研究——基于综合评价指数的分析. 生态经济, 2023, 39(10): 107-114, 146.
- [12] 陈瑞敏, 马晓君, 李宜良. 黄河流域五大增长极碳排放脱钩效应——基于 GDIM 的因素分解. 中国环境科学, 2024, 44(5): 2853-2866.
- [13] 魏莹, 杨高升. 低碳试点城市工业碳排放脱钩因素分解研究——以镇江市为例. 资源开发与市场, 2018, 34(6): 766-773.
- [14] 郭丽佳, 李畅, 彭红松, 钟士恩, 章锦河, 虞虎. 节能减排约束下中国省域旅游生态效率评估及空间格局研究. 地理科学进展, 2021, 40(8): 1284-1297.
- [15] 马飞, 胡江艳, 孙启鹏, 徐妍, 尚震, 柯浩楠. 中国省际物流业碳排放绩效测度及驱动因素研究. 生态经济, 2021, 37(9): 27-33, 39.
- [16] 汪爱娥, 游梦琪, 王德海. 中国生猪主产区养殖碳排放时空特征与脱钩效应研究. 农业资源与环境学报, 2018, 35(3): 269-275.
- [17] 袁玉娟, 刘清春, 马寒卿. 基于住房价格的通勤碳排放空间分异——以济南市为例. 自然资源学报, 2021, 36(8): 2081-2094.
- [18] 马远, 刘真真. 黄河流域土地利用碳排放的时空演变及影响因素研究. 生态经济, 2021, 37(7): 35-43.
- [19] 唐洪松, 马惠兰, 苏洋, 辛冲冲, 汪晶晶. 新疆不同土地利用类型的碳排放与碳吸收. 干旱区研究, 2016, 33(3): 486-492.
- [20] Shan Y L, Guan D B, Zheng H R, Qu J M, Li Y, Meng J, Mi Z F, Liu Z, Zhang Q. China CO₂ emission accounts 1997—2015. Scientific Data, 2018, 5(1): 1-14.
- [21] Li K J, Zhou Y, Xiao H J, Li Z, Shan Y L. Decoupling of economic growth from CO₂ emissions in Yangtze River Economic Belt cities. Science of the Total Environment, 2021, 775: 145927.
- [22] Liu Z, Guan D B, Wei W, Davis S J, Ciais P, Bai J, Peng S S, Zhang Q, Hubacek K, Marland G, Andres R J, Crawford-Brown D, Lin J T, Zhao H Y, Hong C P, Boden T A, Feng K S, Peters G P, Xi F M, Liu J G, Li Y, Zhao Y, Zeng N, He K B. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China. Nature, 2015, 524(7565): 33-538.
- [23] 郝小雨. 黑龙江省 30 年来农田生态系统碳源/汇强度及碳足迹变化. 黑龙江农业科学, 2021(8): 97-104.
- [24] 周嘉, 王钰萱, 刘学荣, 时小翠, 蔡春苗. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究. 地理科学, 2019, 39(12): 1955-1961.
- [25] 王刚, 张华兵, 薛菲, 甄艳. 成都市县域土地利用碳收支与经济发展关系研究. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1170-1182.
- [26] 王娜, 春喜, 周海军, 张娅璐, 王晓珍. 干旱区水资源利用与经济发展关系研究——以鄂尔多斯市为例. 节水灌溉, 2020(6): 108-113.
- [27] 姜明栋, 刘熙宇, 许静茹, 沈晓梅, 杨晓卉. 京津冀地区经济增长对工业用水的脱钩效应及其驱动因素研究. 干旱区资源与环境, 2019, 33(11): 70-76.
- [28] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide. Energy Policy, 2005, 33(7): 867-871.
- [29] 苑韶峰, 唐奕钰. 低碳视角下长江经济带土地利用碳排放的空间分异. 经济地理, 2019, 39(2): 190-198.
- [30] 冯新惠, 李艳, 余迺, 杨佳钰, 雷凯歌. 江苏省城市土地开发与碳排放绩效耦合关系. 经济地理, 2024, 44(5): 161-171.
- [31] 黄元生, 刘佳婕. 低碳试点城市工业碳排放脱钩状态及驱动因素研究. 生态经济, 2024, 40(04): 13-19+54.