

2000—2020年青岛市区域碳排放 时空演变特征及影响因素

单孟文, 李婷, 王映然, 季民

(山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590)

摘要: [目的] 分析山东省青岛市区域碳排放时空演变及影响因素, 为推动低碳发展和碳减排工作提供理论基础。[方法] 基于青岛市 2000—2020 年的土地利用数据、夜间灯光数据、社会经济数据等, 对青岛市土地利用碳排放进行核算, 通过构建碳排放与夜间灯光值的拟合模型, 揭示青岛市不同用地类型的碳排放空间分布差异和变化趋势, 通过 Tapio 脱钩模型分析青岛市碳排放与经济发展之间的脱钩状态, 并利用 LMDI 模型分析土地利用碳排放各影响因素的贡献程度。[结果] ① 2000—2020 年青岛市土地利用净碳排放量总体呈增长态势, 从 2000 年 1.31×10^7 t 增长到 2020 年 3.65×10^7 t, 增长了近 1.79 倍。② 青岛市碳排放总量整体呈现“中间高, 四周低”的空间分布格局, 工业能耗是建设用地最主要的碳排放来源, 高碳排放区域主要集中在胶州湾区域。③ 青岛市经济发展和碳排放的关系经历了从“扩张连结—弱脱钩—强脱钩”状态的转变。④ 促进青岛市碳排放增长的因素为人口规模和经济效应, 抑制青岛市碳排放增长的因素为能源结构和能源强度。[结论] 未来需要进一步调整产业结构, 加快发展低碳经济, 通过创新技术、调整能源结构等措施, 从源头上减少碳排放。

关键词: 碳排放; 时空演变; 脱钩分析; 山东省青岛市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)03-0367-12

中图分类号: F301.2, X32

文献参数: 单孟文, 李婷, 王映然, 等. 2000—2020 年青岛市区域碳排放时空演变特征及影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 367-378. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240607.003; Shan Mengwen, Li Ting, Wang Yingran, et al. Temporal and spatial evolution characteristics and influencing factors of regional carbon emission in Qingdao City during 2000—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 367-378.

Temporal and Spatial Evolution Characteristics and Influencing Factors of Regional Carbon Emission in Qingdao City During 2000—2020

Shan Mengwen, Li Ting, Wang Yingran, Ji Min

(College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial evolution and influencing factors of regional carbon emission in Qingdao City, Shandong Province were analyzed in order to provide a theoretical basis for promoting low-carbon development and carbon emission reduction. [Methods] Based on land use data, nighttime light data, and social and economic data of Qingdao City from 2000 to 2020, carbon emissions from land use were calculated. By constructing a fitting model between carbon emissions and nighttime light values, the spatial distribution difference and trend of carbon emissions of different land use types in Qingdao City were revealed. The decoupling status between carbon emissions and economic development in Qingdao City was analyzed using the Tapio decoupling model. The contribution degree of various influencing factors of land use carbon emissions was analyzed by using LMDI models. [Results] ① The net carbon emissions from land use in Qingdao City generally showed an increasing trend from 1.31×10^7 t in 2000 to 3.65×10^7 t in 2020, amounting to an increase of nearly 1.79 times. ② The overall carbon emissions in Qingdao City presented a spatial distribution pattern of “higher in the middle and lower in the surrounding areas”. Industrial energy consumption was the main source of carbon emissions from construction land, with high carbon emission

收稿日期: 2023-11-16

修回日期: 2024-01-27

资助项目: 青岛西海岸新区 2021 年度科技攻关“揭榜制”专项“海洋地理空间智能核心技术与软件系统”(2021-28)

第一作者: 单孟文(1999—), 女(汉族), 河南省濮阳市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用碳储量。Email: smw990614@163.com。

通信作者: 李婷(1982—), 女(汉族), 山东省冠县人, 博士, 实验师, 主要从事地图制图学与地理信息工程研究。Email: liting_sdust@126.com。

areas mainly concentrated in the Jiaozhou Bay area. ③ The relationship between economic development and carbon emissions in Qingdao City had undergone a transition from “expanding connections” to “weak decoupling”, then “strong decoupling”. ④ The factors that promoted growth of carbon emissions in Qingdao City were population size and economic effect, and the factors that inhibited growth of carbon emissions in Qingdao City were energy structure and energy intensity. [Conclusion] In the future, it will be necessary to further adjust the industrial structure, accelerate the development of a low-carbon economy, and reduce carbon emissions from sources through measures such as technological innovation and energy structure adjustment.

Keywords: carbon emissions; spatiotemporal evolution; decoupling analysis; Qingdao City, Shandong Province

全球气候变暖是当前全社会面临的严峻挑战。根据联合国气候变化框架公约 (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 的数据,全球平均温度在过去一个世纪里上升了 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中大多数变暖发生在 20 世纪下半叶。这种气候变化的主要原因是人类活动导致的二氧化碳等温室气体排放,这些气体会吸收太阳辐射并留在大气中,导致地球表面温度上升^[1]。二氧化碳的排放主要来源于化石燃料的燃烧,其次是人类对土地的开发利用,已有研究表明土地利用变化导致的碳排放量占人类活动碳排放总量的三分之一^[2-3],不合理的土地利用方式和结构会直接导致大量碳排放。近年来,随着全球气候变暖问题的日益突出,控制碳排放已经成为国际社会关注的焦点。中国作为世界上最大的碳排放国之一,一直在不断努力控制自身的碳排放水平,以减缓气候变化。

目前关于碳排放研究主要集中在碳排放核算^[4]、碳足迹核算^[5]、碳排放时空分异及影响因素研究^[6-7]、低碳发展策略及预测等^[8]方面。从现有碳排放核算方法看,学者主要应用生物量清单法^[9]、模型估算法^[10]、遥感估算法^[11]、排放因子法等^[12]方法对碳排放进行估算。例如,赵江燕等^[13]采用省级温室气体清单核算方法,计算了山西省 2005—2019 年的能源消费碳排放量,结果表明山西省碳排放量整体呈波动上升的趋势。刘晓蝶^[12]基于 IPCC 方法分析了中国 2004—2019 年 30 个省份的碳排放情况。朱海等^[14]基于能源碳排放系数法,以省域为尺度,对中国旅游业碳排放量进行了估算。此外从碳排放影响因素研究方法看,学者主要利用 Kaya 恒等式^[15]、加权回归模型^[2]、STIRPAT 模型^[16]、指数分解等^[17]模型分析碳排放影响因素。例如,滕王滕菲等^[15]研究发现西北地区 2011—2019 年碳总量、碳排放强度与经济增长都有向强脱钩转变的趋势。陈书强等^[6]研究了全球 4 类经济体国家碳排放与经济发展之间的依赖程度,结果表明经济发展对碳排放的依赖逐渐减少,工业和农业增值对碳排放量有正的显著影响。孙蒙

等^[18]采用空间杜宾模型分析了中国 2003—2019 年各省的碳排放效应,发现能源结构对碳排放的影响最大。总的来说,碳排放核算及影响因素分析是碳排放研究的重要内容,为区域可持续发展和推进区域碳减排工作提供理论依据,但是目前关于碳排放的研究多集中在国家^[9]、省市^[2, 16]层面,对拥有区域性中心地位且为低碳试点城市的青岛市碳排放研究相对较少。

随着经济的快速发展,青岛的工业化和城市化进程加速,但同时也伴随碳排放增长的问题。面对碳减排的压力,青岛需要发展低碳经济,减缓碳排放的增长速度。因此,本文以低碳试点城市(青岛)为研究对象,基于青岛市 2000—2020 年的土地利用数据和社会经济数据,提出一种土地利用碳排放清单核算方法,从不同土地利用类型碳排放角度出发,探究青岛市区域碳排放的时空演变特征,以及科学评估碳排放量的影响因素,为推动青岛市低碳发展和碳减排工作提供理论基础。

1 研究区概况

青岛市位于中国东部,胶东半岛南端,处于东经 $119^{\circ}30'$ 至 $121^{\circ}00'$,北纬 $35^{\circ}35'$ 至 $37^{\circ}09'$,地处渤海湾畔、黄海之滨。截至 2019 年,建成区面积 758.16 km^2 ,区域总面积 $11\,293\text{ km}^2$ 。地势东高西低,南北两侧隆起,中间低凹,自然状况以海洋和丘陵为主,其中城市南部以低丘、平原和河流为主,而城市北部则以山脉为主,平均海拔为 37 m 。地处北温带季风区域,属温带季风气候,温度适中,雨量充沛,多年年均气温 $12.8\sim 13.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量在 $450.5\sim 1\,093.8\text{ mm}$ 之间,夏季相对湿度较高,冬季相对湿度较低。根据第七次人口普查数据,截至 2020 年 11 月,青岛市常住人口为 $10\,071\,722$ 人。2021 年,青岛地区生产总值为 1.41×10^{12} 元,以第二、三产业结构为主,其中第三产业占比现居首位。青岛市能源消费主要以原油和原煤为主要能源来源,原油消耗量呈大幅增长的趋势,截至 2020 年原油消费比重仍占总能源消费比重的一半,成为建设用地的主要碳排放。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 土地利用数据 本研究使用的土地利用数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所(<http://www.resdc.cn>),该所使用美国陆地卫星 Landsat-TM/ETM 和 Landsat 8 遥感影像数据,并通过人机交互式目视判读的方式生成影像,影像空间分辨率为 1 km,包括 2000,2005,2010,2015,2018,2020 年 6 期遥感影像。

2.1.2 社会经济数据

(1) 能源消耗数据及经济社会统计数据。能源消费数据及各类能源测算碳排放量所需数据都来源于 2001—2021 年《中国能源统计年鉴》^[19]《山东统计年鉴》^[20]《青岛统计年鉴》^[21]、各县区国民经济与社会发展统计公报以及 IPCC 报告。人口、城镇化率、GDP 数据均来源于 2001—2021 年《山东统计年鉴》^[20]《青岛市统计年鉴》^[21]。

(2) 农业资本投入数据。化肥用量、农药用量、农膜使用量、灌溉面积、翻耕面积、农业柴油使用量等农业资本投入数据用于计算耕地碳排放中农业资本投入所引起的直接和间接碳排放。上述农业资本投入数据均来源于 2001—2021 年《山东统计年鉴》^[20]和《青岛统计年鉴》^[21]。

2.1.3 夜间灯光数据 DMSP/OLS 夜间灯光数据的年份是 1992—2013 年,NPP/VIIRS 夜间灯光数据的年份是 2012—2020 年,本文数据来源于 Wu Yizhen 等^[22]整理的数,该数据处理方式利用“伪不变像素”方法对 DMSP-OLS 数据进行校准,并且考

虑 DMSP-OLS 数据与 NPP-VIIRS 数据时间分辨率的一致性,在合成年度 SNPP-VIIRS 数据之前实现 NPP-VIIRS 原始月度数据中缺失数据的修复。

此外,进一步结合校准 DMSP-OLS 数据(1992—2013 年)和由 NPP-VIIRS 数据转换的类 DMSP-OLS 数据(2013—2020 年),计算得到改进的类 DMSP-OLS 数据集(1992—2020 年)。数据格式为 TIF,数据空间分辨率为 1 km,数据坐标系是 WGS_1984_Albers。

本文通过构建不同用地类型的灯光值与对应地类碳排放的关系模型,得到工矿用地、城镇用地、居住用地碳排放与夜间值拟合 R^2 分别为:0.667 3,0.808 1,0.976 3。拟合效果较好,可以用于模拟青岛市碳排放的空间分布。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用碳排放估算方法 土地利用碳排放估算包括土地利用碳源估算和土地利用碳汇估算。前者为耕地、城乡建设用地的碳排放估算,后者为林地、草地、水域用地及未利用地的碳排放估算。本文根据青岛市的实际情况,建立碳排放与土地利用的对应关系,估算了青岛市各地类的碳源、碳汇量。

(1) 土地利用碳汇总量测算。碳汇采用固定经验系数法,碳汇总量具体计算公式为:

$$C_o = \sum_{i=1}^4 C_{oi} = \sum_{i=1}^4 (\alpha_i \times \delta_i) \quad (1)$$

式中: C_o 表示土地利用碳汇总量; C_{oi} 表示各地类型的碳汇量; i 为土地利用类型; α_i 为不同土地利用方式的面积; δ_i 为不同土地利用类型的碳吸收系数,各地类碳吸收系数见表 1。

表 1 不同土地类型的碳吸收系数

Table 1 Carbon absorption coefficient of different land use types

土地类型	碳吸收系数/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)(以 C 计)	数据来源
林地	-0.064 4	方精云 ^[4]
草地	-0.002 1	方精云 ^[4]
水域	-0.032 4	段晓男等 ^[23] ,赖力 ^[24] ,Walsh J.J. ^[25] ,Meybeck M. ^[26]
未利用地	-0.000 5	赖力 ^[24]

(2) 耕地碳排放量测算。耕地所产生的碳排放量主要来自农业生产活动中的多种因素,其中包括农用化学品、化肥施用、农业机械柴油等的使用,耕地具体的农资消耗碳排放测算公式为:

$$C_A = \sum_{i=1}^6 (h_i \times \theta_i) \quad (2)$$

式中: C_A 为农资消耗总碳排放量; h_i 为第 i 类农业生产活动资源消耗量或者劳动量; θ_i 为第 i 类农业生

产活动的碳排放系数。农业生产活动碳排放系数依据相关研究机构和已有的研究成果(见表 2)。

(3) 建设用地碳排放量测算。本文对青岛市建设用地碳排放核算主要基于工业能源消耗碳排放、工业生产过程以及居民生活能源消耗碳排放及呼吸作用碳排放等进行测算。在对建设用地碳排放进行测算时,先将不同种类的能源消费量与标准煤折算系数相乘得到标准煤,再乘以各能源对应的碳排放系数并

累加得到建设用地总碳排放量。其中标准煤折算系数来自《综合能耗计算通则》(GB/T2589-2020)^[28],

碳排放系数参考《IPCC2019 年国家温室气体清单指南》^[29] 和王利君^[30]、夏楚瑜^[31]的研究成果(见表 3)。

表 2 农业生产活动碳排放系数与数据来源

Table 2 Carbon emission coefficient and data sources of agricultural production activities

农业生产活动	碳排放系数(以 C 计)	数据来源
化肥	0.895 6 kg/kg	美国橡树岭国家实验室(ORNL)
农业柴油	0.592 7 kg/kg	政府间气候变化专门委员会(IPCC)
翻耕	312.60 kg/km ²	中国农业大学生物与技术学院
灌溉	266.48 kg/hm ²	段华平等 ^[27]
农药	4.934 1 kg/kg	美国橡树岭国家实验室(ORNL)
农膜	5.180 0 kg/kg	南京农业大学农业资源与生态环境研究所(IREEA)

表 3 能源消费碳排放系数

Table 3 Carbon emission coefficient of energy consumption

能源种类	标准煤折算系数/(kg·kg ⁻¹)(以标准煤计)	碳排放系数/(kg·kg ⁻¹)(以 C/标准煤计)	能源种类	标准煤折算系数(以标准煤计)	碳排放系数/(kg·kg ⁻¹)(以标准煤计)
原煤	0.714 3	0.755 9	燃料油	1.428 6 (kg/kg)	0.618 5
焦炭	0.971 4	0.855 0	液化石油气	1.714 3(kg/kg)	0.504 2
原油	1.428 6	0.585 7	炼厂干气	1.571 4 kg/kg	0.460 2
汽油	1.471 4	0.553 8	热力	0.034 12(kg/MJ)	0.260 0
煤油	1.471 4	0.571 4	电力	0.122 9[kg/(kW·h)]	2.525 5
柴油	1.457 1	0.592 1			

(1) 工业能源消耗选取原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、炼厂干气、热力、电力 11 种能源作为碳排放测算的基础数据,测算公式为:

$$C_E = \sum_{i=1}^{11} (E_i \times k_i \times n_i) \quad (3)$$

式中: C_E 为工业用地能源消耗碳排放总量; E_i 表示第 i 类化石能源消耗量; k_i 表示第 i 类化石能源标准煤折算系数; n_i 表示第 i 类化石能源的碳排放系数。

(2) 工业生产过程碳排放选取水泥、钢铁/钢材、玻璃、合成氨作为测算数据,公式为:

$$C_I = \sum_{i=1}^4 (V_i \times N_i) \times \frac{12}{44} \quad (4)$$

式中: C_I 为工业生产碳排放量; V_i 为第 i 种工业产品量; N_i 为第 i 种工业产品二氧化碳排放因子,12/44 为二氧化碳含碳量转化系数,水泥、钢铁/钢材、玻璃、合成氨的碳排放系数(t/t,以 CO₂ 计)参考赵荣钦等^[32]的相关研究成果,分别取:0.136,1.060,0.210,3.273。

(3) 城镇用地对应核算第二产业中的建筑业和第三产业,具体计算公式为:

$$C_R = \text{GDP}_j \% \times \sum_{i=1}^n (E_i \times k_i \times n_i) + \text{GDP}_p \% \times \sum_{i=1}^n (E_i \times k_i \times n_i) \quad (5)$$

式中: C_R 表示城镇用地能源消耗碳排放总量; $\text{GDP}_j \%$ 表示建筑业 GDP 所占比例; $\text{GDP}_p \%$ 表示第三产业的 GDP 所占比例。其中第三产业各个部门能源消耗数据的分配参考夏楚瑜^[31]、田启明等^[33]的研究成果。

(4) 居住用地碳排放量包括生活能源消耗碳排放量和呼吸作用碳排放量,具体计算公式:

$$C_R = C_f + C_b = \text{POP} \% \times \sum_{i=1}^4 (E_i \times k_i \times n_i) + \sum_{y=1}^5 N_y \times V_y \quad (6)$$

式中: C_R 为居住用地碳排放总量; C_f 为生活能源消耗碳排放量; C_b 为呼吸作用碳排放总量; $\text{POP} \%$ 为人口所占比例; E_i 为居民生活能耗; N_y 为第 y 种动物量; V_y 为第 y 种动物呼吸系数。其中生活能源消耗碳排放估算参考田启明等^[33]的研究成果,呼吸作用产生的碳排放主要来源于动物和人类呼吸、排泄等过程,碳排放系数参考黎孔清^[34]、匡耀求等^[35]的研究成果,本文人、牛、猪、羊、小体型家禽的碳排放系数(t/a,以 C 计)分别取:0.079,0.796,0.082,0.075,0.003 95。

2.2.2 Tapio 脱钩模型 脱钩最初是一个物理学概念,它描述了两个物体之间的分离或断开连接。随后这个概念被引入到经济学领域,用来描述经济增长和环境压力之间的关系。Tapio 脱钩模型被广泛用于描述两个对象的脱钩状态。本文基于净碳排放弹性指数和经济增长弹性指数,构建碳排放与经济增长的脱钩关系模型,并根据脱钩指数值将脱钩状态划分为 8 种类型(表 4),具体计算公式为:

$$\epsilon = \frac{\% \Delta C}{\% \Delta \text{GDP}} = \frac{(C_t - C_{t-1})/C_{t-1}}{(\text{GDP}_t - \text{GDP}_{t-1})/\text{GDP}_{t-1}} \quad (7)$$

式中: ϵ 为脱钩弹性; $\% \Delta C$ 为净碳排放的弹性;

$\% \Delta \text{GDP}$ 为实际 GDP 的弹性; $C_t - C_{t-1}$ 为第 t 到第 $t-1$ 年的净碳排放总量的变化量; $\text{GDP}_t - \text{GDP}_{t-1}$ 为第 t 到 $t-1$ 年的经济总量的变化量; C_{t-1} 为初期的碳排放总量; GDP_{t-1} 为初期的 GDP 值。

表 4 脱钩状态划分标准
Table 4 Division of decoupling states

脱钩分类	脱钩状态	$\% \Delta C$	$\% \Delta \text{GDP}$	脱钩弹性 ϵ	含义
脱钩	强脱钩	负	正	$\epsilon < 0$	经济增长, 碳排放下降
	弱脱钩	正	正	$0 \leq \epsilon < 0.8$	经济增长的速度高于碳排放增长速度
	衰退脱钩	负	负	$\epsilon > 1.2$	经济衰退速度低于碳排放降低速度
负脱钩	强负脱钩	正	负	$\epsilon < 0$	经济衰退, 碳排放量增加
	弱负脱钩	负	负	$0 \leq \epsilon < 0.8$	经济衰退速度高于碳排放降低速度
	增长负脱钩	正	正	$\epsilon > 1.2$	碳排放的增长速度高于经济增长速度
连结	增长连结	正	正	$0.8 \leq \epsilon \leq 1.2$	经济增长, 碳排放量增加
	衰退连结	负	负	$0.8 \leq \epsilon \leq 1.2$	经济衰退, 碳排放量下降

2.2.3 LMDI 模型分解 为分析各因素对青岛市碳排放变化的贡献, 引入 LMDI 因素分解法。LMDI 方法在传统迪氏分解法中引入对数平均技术, 将碳排放变化量分解为各个因素对碳排放变化的贡献, 并保持各个分解指标之间的高度一致性, 提高了算法的效率和可扩展性, 具有快速、高效、可扩展的优点。因此, 首先根据 Kaya 恒等式选取能源结构、能源强度、经济发展水平和人口规模 4 个驱动因素构建青岛市碳排放模型, 公式为:

$$C = \text{POP} \times \frac{\text{GDP}}{\text{POP}} \times \frac{E}{\text{GDP}} \times \frac{C}{E} \\ = P \times G \times A \times T \quad (8)$$

式中: POP 为青岛市人口总数; GDP 为青岛市生产总值; E 为区域能源消耗总量; C 为不同土地类型的碳排放总量; P 为人口规模因素; G 为经济发展因素; A 为能源强度; T 为能源结构。

对两个比较年份的碳排放的变化量进行分解, 定义研究期 t 期的碳排放量为 C_t , 研究期基期的碳排放量为 C_0 , 则报告期与基期的碳排放量的差异公式为:

$$\Delta C = C_t - C_0 = P^t \times G^t \times A^t \times T^t - P^0 \times G^0 \times A^0 \times T^0 = \Delta P + \Delta G + \Delta A + \Delta T \quad (9)$$

在加法分解模式下, 不同的影响因素指标的分解模式具体为:

$$\Delta P = \sum_i \frac{C_{i,t} - C_{i,0}}{\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0}} \times \ln \frac{P_{i,t}}{P_{i,0}} \\ \Delta G = \sum_i \frac{C_{i,t} - C_{i,0}}{\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0}} \times \ln \frac{G_{i,t}}{G_{i,0}} \\ \Delta A = \sum_i \frac{C_{i,t} - C_{i,0}}{\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0}} \times \ln \frac{A_{i,t}}{A_{i,0}} \\ \Delta T = \sum_i \frac{C_{i,t} - C_{i,0}}{\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0}} \times \ln \frac{T_{i,t}}{T_{i,0}} \quad (10)$$

式中: P^t, G^t, A^t, T^t 分别为 t 期的人口规模、经济发

展水平、能源强度和能源结构; P^0, G^0, A^0, T^0 分别为基期的人口规模、经济发展水平、能源强度和能源结构; $\Delta P, \Delta G, \Delta A, \Delta T$ 分别为人口规模效应、经济发展、能源强度以及能源结构 t 期与基期碳排放的变化量。

3 结果与分析

3.1 青岛市土地利用碳排放时序变化分析

3.1.1 耕地碳排放量变化分析 基于构建的耕地碳排放核算清单, 对青岛市耕地碳排放总量变化趋势 (图 1) 进行具体分析。从图 1 可以看出, 2000—2007 年青岛市整体耕地利用碳排放呈增加趋势, 而 2007—2020 年青岛市整体耕地利用碳排放呈减少趋势。从近 21 a 的平均水平看, 青岛市化肥施用导致的碳排放和农业机械柴油导致的碳排放量最多, 分别占比 46.37%, 22.52%, 其次是农膜、灌溉、翻耕、农药, 分别占 16.26%, 14.45%, 0.37%, 0.03%。其中化肥施用碳排放量和农业机械柴油导致的碳排放量整体都呈减少的趋势, 这一趋势的背后, 可能是由于政府对于农业生产的支持和投入, 推广了一系列的生态农业措施。农业机械柴油使用碳排放量的变化趋势与耕地碳排放量变化趋势基本一致, 是引起耕地碳排放量变化的主要原因。

3.1.2 建设用地碳排放变化分析 根据构建的建设用地碳排放核算清单, 对青岛市能源消耗碳排放结构以及建设用地各地类碳排放结果 (图 2) 进行分析。

从图 2a 工业能源消耗碳排放结构可以看出, 青岛市工业能源消费碳排放呈两个阶段, 2000—2010 年呈现近似线性的快速增长趋势, 从 8.85×10^6 t 增长到 2.48×10^7 t, 2010 年较 2000 年增长了 4 倍。2010—2020 年呈现波动下降的趋势, 从能源消费结

构看,其中原油和原煤是工业能源消费的重要构成部分,2006年原煤碳排放量为 8.04×10^6 t,占比最高达到44.97%,平均年占比为28.73%。2018年原油碳排放量为 1.29×10^7 t,占比最高达到48.34%,平均年占比为33.88%。从2009年开始,原油超过原煤,成为工业能源消耗的主要碳排放。

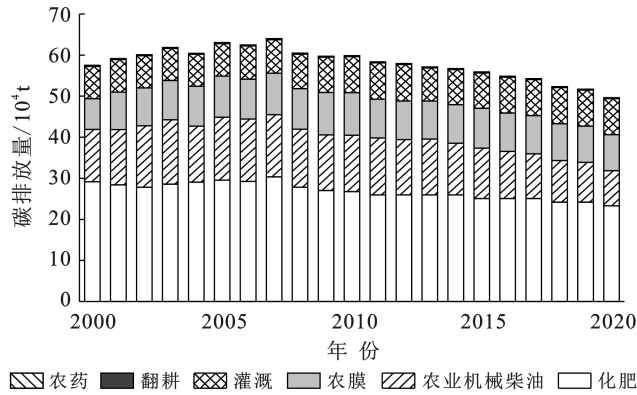


图1 2000—2020年青岛市耕地碳排放总量变化趋势
Fig.1 Trends in carbon emission total for cultivated land in Qingdao City during 2000—2020

从图2b可以看出,工业碳排放是城镇工矿用地最主要的碳排放源,2000—2010年期间,工业碳排放和第三产业碳排放都呈上升趋势,其中,工业碳排放量从2000年的 8.85×10^6 t增长到2010年的 3.01×10^7 t,第三产业碳排放量从2000年的 9.36×10^5 t增长到2010年的 5.84×10^6 t。从2010年之后,工业生产碳排放呈现缓慢的下降趋势,工业碳排放从2011年的 2.90×10^7 t下降到2020年的 2.48×10^7 t,第三产业碳排放量2011—2014年出现短暂下降,2014年之后逐渐上升,2020年有所下降。工业生产碳排放量最少,且变化趋势不大。

从图2c可以看出,2000—2009年,青岛市居住用地碳排放增加幅度较小。其中,呼吸碳排放占据了主要的比重,原因可能是城市化进程尚未明显加速,生活消耗碳排放量较少。2010—2020年,青岛市居住用地碳排放增长加速,其中生活能源消耗碳排放与居住用地碳排放增长趋势相同,主要原因是这一时期城市快速发展。呼吸作用碳排放呈下降趋势,逐渐趋于稳定,2006年之后呼吸碳排放显著下降主要是青岛市畜牧业养殖数量减少。

3.1.3 净碳排放量变化特征分析 2000—2020年青岛市土地利用净碳排放量总体上呈增长态势(表5),在2000年,净碳排放量为 1.31×10^7 t,到2020年,净碳排放量增加到了 3.65×10^7 t,增长了近1.79倍,而2010—2020年则相对稳定。从建设用地的角度来看,其碳排放总量也呈现出逐年增加的趋势,2000年

建设用地的碳排放量为 1.26×10^7 t,到2020年增加到了 3.60×10^7 t,增长了近1.87倍。相反耕地碳排放量总体上呈现下降趋势,2000—2007年,耕地碳排放量波动上升,而2007—2020年则减少了约22.51%。2000—2005年,碳汇量相对稳定,波动较小,而2005—2020年则有小幅度下降。从各类碳排放量结果可以看出,净碳排放量的结果与建设用地碳排放量密切相关,青岛市城市化进程加快是净碳排放量增长的主要驱动因素。

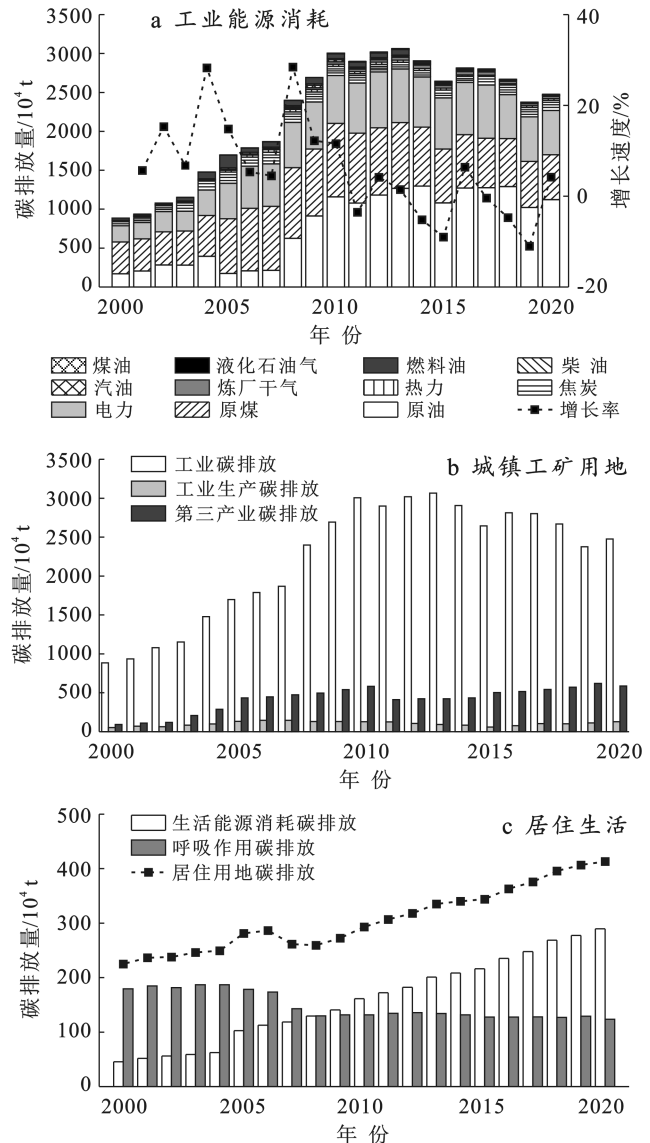


图2 2000—2020年青岛市建设用地各地类碳排放量趋势
Fig.2 Trends in carbon emissions for construction land across different regions in Qingdao City during 2000—2020

3.2 青岛市土地利用碳排放空间演变分析

3.2.1 工矿用地碳排放空间分布 基于夜间灯光值计算每个栅格对应的碳排放量,栅格的夜光数据值越大,分配的碳排放量也会越多。为了消除模拟碳排放总量和统计碳排放总量之间的差值,利用计算的碳排

放总量对单位栅格初始拟合值进行纠正,由此可以得出青岛市工矿用地、城镇用地、居住用地碳排放的空间分布(图 3,图 4)。考虑到工业用地碳排放水平远高于其他用地类型碳排放水平,因此针对工业用地进

行单独的分析(图 3)。本文对估算结果进行了分级处理,分为 4 个级别:低碳排放($0\sim 3.00\times 10^4$ t),中碳排放($3.00\times 10^4\sim 7.00\times 10^4$ t),较高碳排放($7.00\times 10^4\sim 14.0\times 10^5$ t),高碳排放($>1.40\times 10^5$ t)。

表 5 2000—2020 年青岛市不同土地利用类型碳排放量测算结果

Table 5 Measurement results of carbon emissions of different land use type in Qingdao City during 2000—2020 10^4 t

年份	碳排放量						碳源	碳汇	净碳排放量
	建设用地	耕地	林地	草地	水域	未利用地			
2000	1 257.95	57.51	4.439	0.205	1.174	0.002	1 315.46	5.82	1 309.64
2005	2 546.44	63.04	4.421	0.200	1.289	0.002	2 609.48	5.91	2 603.57
2010	4 009.84	59.86	3.652	0.070	1.812	0.001	4 069.70	5.54	4 064.16
2015	3 550.46	55.89	3.651	0.070	1.800	0.001	3 606.35	5.52	3 600.83
2018	3 740.69	52.32	3.749	0.086	1.741	0.001	3 793.01	5.58	3 787.43
2020	3 604.21	49.60	3.650	0.070	1.894	0.001	3 653.81	5.61	3 648.20

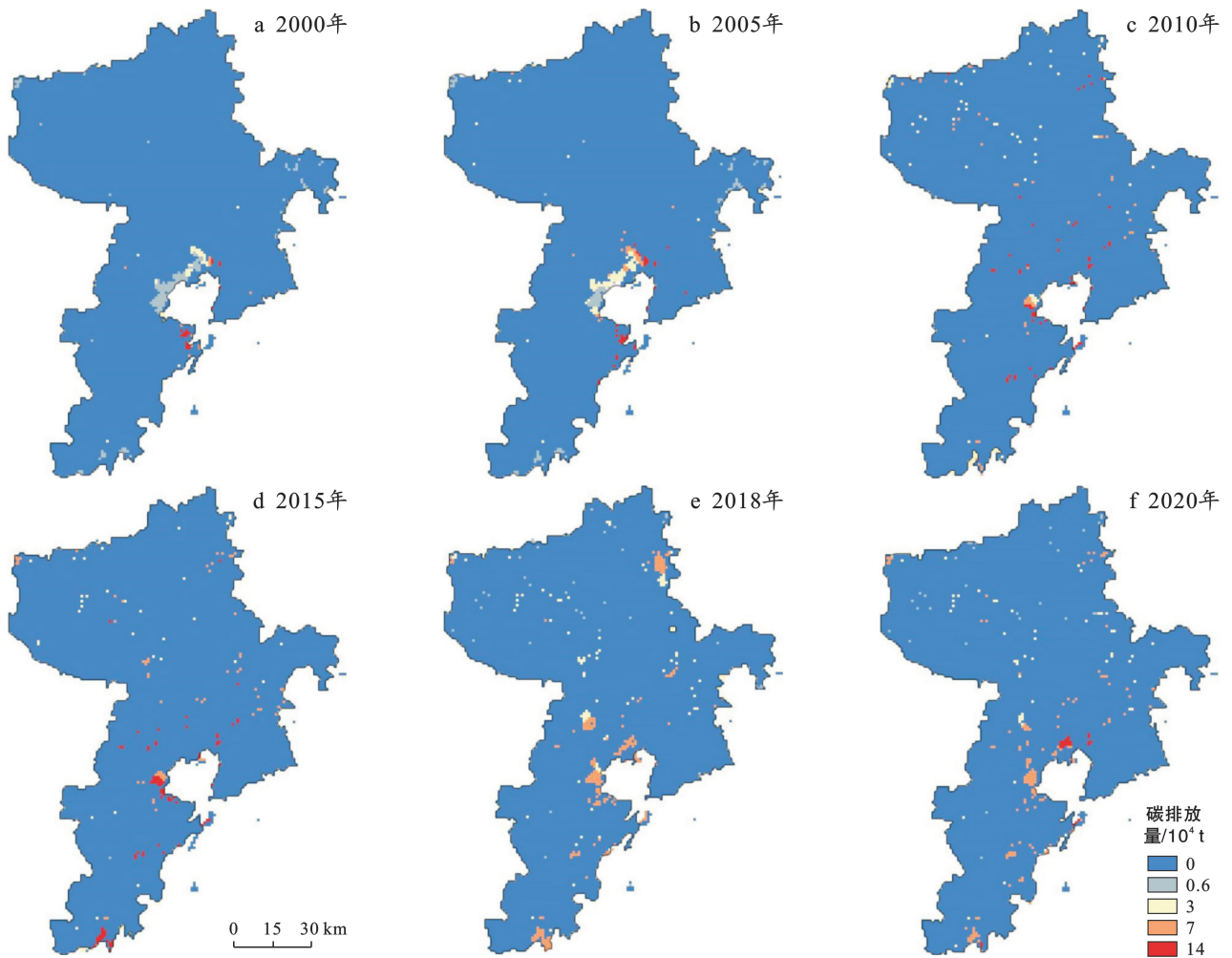


图 3 2000—2020 年青岛市工矿用地碳排放空间分布

Fig.3 Spatial distribution diagram of carbon emission in industrial and mining land in Qingdao City during 2000—2020

如图 3 所示,2000—2005 年期间,工矿碳排放区的分布格局存在着明显的集中化现象,胶州湾地区是青岛市工业碳排放的主要分布区域。随着城市工业的发展,2005 年城阳区的中碳排放区、较高碳排放

区、高碳排放区明显扩大,尤其向东北和西南两个方向扩散得明显。相比于 2000—2005 年这段时间,2010—2015 年胶州湾地区工业碳排放的总体趋势是减少的,胶州湾的高碳排放区主要集中在胶州市和黄

岛,青岛北部城区出现许多中碳排放水平区域,呈现出比较分散的空间分布格局。在 2018—2020 年期间,原本的高碳排放水平区域都下降到较高碳排放水平,然而工业碳排放区域却呈现出一种点状向外扩散的空间分布模式,其面积逐渐扩大,这种现象在莱西市东岸和胶州市北部尤为明显。这是由于在过去几年中,一些高碳排放企业采取一些减排措施以减少碳排放量。但是,由于经济发展的压力以及人口增长等因素的影响,减排措施并没有完全抵消碳排放的增长。

3.2.2 城镇用地和农村居民地碳排放空间分布 为了利于后续城镇和农村居民点碳排放空间分布格局分析,本文对估算结果进行了分级处理,分为 4 个级别:低碳排放(0~2 000 t),中碳排放(2 000~5 000 t),较高碳排放(5 000~9 000 t),高碳排放(>9 000 t)。

由图 4 可知,2000 年市南区、市北区、李沧区和即墨区南边、胶州市中心、平度市中心、黄岛区、城阳

区等地处于中碳排放区,这些地区拥有大量的城镇用地和居住用地,而胶州市中心、黄岛区、城阳区出现高碳排放区。可能的原因是这些地区与工业用地相邻,受到工业用地和交通用地的影响,所处区域的经济活动较为集中,存在着较高的碳排放风险。

2005 年,随着城市发展的不断推进,高碳排放水平区域碳排放进一步增加特别是市中心和人口密集的区域。2010—2015 年期间,青岛市城镇和居住用地的碳排放量虽然有所降低,但仍处于较高的碳排放水平,在中心城区向外扩张的过程中,碳排放区域也随之扩张,由于工业用地的存在,一些高碳排放区域仍然位于城市的边缘或郊区。2015 年和 2018 年,在城市化和人口增长的过程中,城市和居住区域的建筑能耗和交通能耗减少的速度相对较慢,因此碳排放量并未得到很大程度的降低。总的来说,青岛市城镇和农村居民点的碳排放区域分布较为集中,主要分布在市南区、市北区、李沧区以及各城区的中心位置。

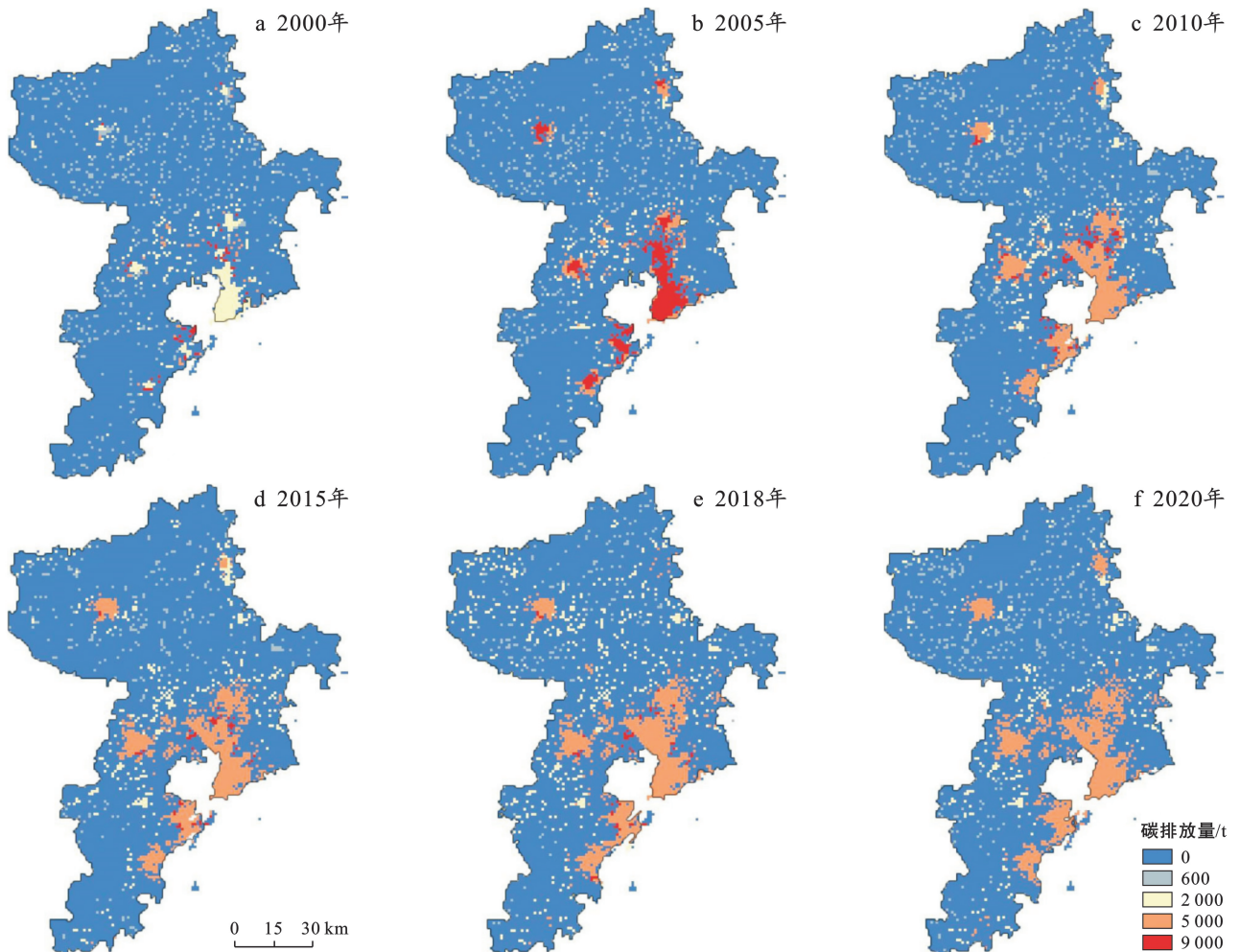


图 4 2000—2020 年青岛市商业居住用地碳排放空间分布

Fig.4 Spatial distribution diagram of carbon emissions in commercial and residential land in Qingdao City during 2000—2020

3.3 青岛市区域碳排放影响因素

3.3.1 经济发展和碳排放脱钩状态 本文基于 Tapio 脱钩模型,对青岛市的碳排放量数据和国内生产总值数据进行了 4 个时间段的研究,分别为 2000—2005, 2005—2010, 2010—2015, 2015—2020 年,计算了碳排放总量与经济增长之间的脱钩弹性指数,具体见表 6。通过表 6 的研究结果可知,在整个 2000—2020 年的时间段内,青岛市的碳排放量和经济发展的关系经历了由扩张连结到脱钩的转变。

表 6 2000—2020 年青岛市经济增长与碳排放脱钩弹性指数值

Table 6 Flexible index values of decoupling between economic growth and carbon emissions in Qingdao City during 2000—2020

时段	% ΔC	% ΔGDP	ϵ	状态
2000—2005 年	0.99	1.18	0.84	增长连结
2005—2010 年	0.56	1.08	0.52	弱脱钩
2010—2015 年	-0.11	0.62	-0.18	强脱钩
2015—2020 年	-0.04	0.43	-0.28	强脱钩

2000—2005 年表现为增长连结,表明此段时间内,碳排放量与经济增长呈显著的正相关关系,两者分别增长了 99% 和 118%,增长幅度几乎一致,该状态表明碳排放的增长速度与经济发展呈现出同比增长的较强依赖状态,经济增长带动了能耗的增加。此时青岛市处于经济快速发展、工业化和城市化的阶段,主要是粗放型发展为主,生产力低下,难以实现减排。

2005—2010 年碳排放与经济增长之间呈现弱脱钩状态,表明此段时间内碳排放量与经济均在增长,两者分别增长了 56% 和 108%,经济增长的速度高于碳排放增长速度。该状态表明碳排放量有所控制,随着科技进步和管理水平的提升,青岛市能源的使用效率会有所提升。

2010—2020 年为碳排放与经济增长之间呈现强脱钩状态,表明此段时间内,碳排放量随着经济增长而降低。具体表现为:2010—2015 年期间,青岛市的经济增长幅度非常显著,增加了 62%,碳排放量减少了 11%;在 2015—2020 年期间,青岛市的经济增长幅度较 2010—2015 年有所降低,增长了 43%,碳排放减少了 4%。这种情况的出现说明了青岛市在经济增长与环境保护之间实现了良性互动,表明青岛市已经开始实现了“绿色增长”的目标,即在经济发展的同时,通过创新技术、调整能源结构等措施,减少对环境的负面影响,以实现可持续发展。

3.3.2 不同时段的影响因素 将青岛市土地利用碳排放分解成能源结构、能源强度、经济发展水平和人

口规模 4 个因素,各个部分视为 LMDI 因素分解法的解释变量,使用回归模型估计每个因素对碳排放变化的影响程度(表 7)。

从表 7 可以看出,青岛市在不同时段其碳排放量增减程度各不相同,而且各影响因素对青岛市土地利用净排放量在影响程度和影响方向上均有差异。因此,需要对各因素在不同时段对碳排放量的影响程度进行系统分析。

表 7 2000—2020 年青岛市土地利用碳排放因素分解结果

Table 7 Decomposition results of carbon emission factors in land use in Qingdao City during 2000—2020 $10^4 t$

时段	ΔP	ΔG	ΔA	ΔT	ΔC
2000—2005 年	279.12	1186.75	-298.33	126.40	1293.93
2005—2010 年	201.62	2194.70	-135.60	-800.13	1460.59
2010—2015 年	308.27	1534.15	-2433.96	128.21	-463.33
2015—2020 年	244.68	1057.20	-1466.69	212.18	47.37
累积贡献率	44.20%	255.40%	-185.35%	-14.25%	100%

2000—2005 年期间,对碳排量有抑制作用的只有能源强度,其贡献值为 $2.98 \times 10^6 t$,贡献率为 23.06%。有正向拉动作用的是人口效应、经济效应、能源结构效应,其累计贡献值为 $1.59 \times 10^7 t$,其中经济效应贡献值最大,其值为 $1.19 \times 10^7 t$,贡献率为 91.72%。

2005—2010 年期间,碳排放总量增加最大,其值达到了 $1.46 \times 10^7 t$,对碳排放量有拉动作用的影响因素是人口效应、经济发展效应,其中,经济发展效应贡献值最大,其值为 $2.19 \times 10^7 t$ 。对碳排放量有抑制作用的是能源结构和能源强度,且能源结构因素从促进碳排放增长转变为了抑制碳排放增长的因素,整体表现为碳排放量升高。

2010—2015 年期间,碳排放量减少 $4.63 \times 10^6 t$ 。对碳排放量有抑制作用的是能源强度,贡献值达到 $2.43 \times 10^7 t$,正向因素总计贡献 $1.97 \times 10^7 t$,其中经济因素贡献值最高,为 $1.53 \times 10^7 t$,抑制因素贡献值高于正向拉动作用,所以碳排量出现了下降。

2015—2020 年期间,碳排放量增加了 $4.74 \times 10^5 t$ 。对碳排放量有抑制作用的是能源强度,贡献值达到 $1.47 \times 10^7 t$,因能源效率的提高使得碳排放减排 $1.47 \times 10^7 t$,较上一时期有所降低,正向拉动因素有经济因素和人口因素,累计贡献值为 $1.51 \times 10^7 t$ 。整体上,负向因素总体小于正向因素总和,导致土地利用碳排放量增加。

总之,各影响因素对青岛市土地利用净排放量在影响程度和影响方向上均有差异。其中,能源强度对碳排放量的抑制作用最强,人口规模、经济效应贡献

值都为正,都起到推动碳排放增长的作用,经济发展效应是碳排放增加的最大贡献者,其次是人口效应的拉动效果显著,能源结构贡献值有正有负。

4 讨论

(1) 2000—2020 年青岛市土地利用净碳排放量总体上呈增长态势,与已有的研究结果^[36-37]一致。青岛市作为重要的沿海城市和经济中心之一,随着经济发展水平的提高,城市化进程加速,城市活动强度的增强,高能源消耗导致青岛市碳排放量增加,呈现出“中间高,四周低”的空间分布格局。随着青岛市出台了一系列推动产业升级等政策措施,碳排放空间分布呈现向周边城市扩散的趋势,但由于经济发展的压力以及人口增长等因素,这些减排措施并没有完全抵消碳排放的增长。

(2) 本文在对青岛市碳排放影响因素研究上,发现能源强度对碳排放的影响为负,与张伟等^[38]的研究结果一致,说明能源强度会抑制碳排放增加,因此未来要进一步强化节能减排意识和能源管理能力,提高能源利用效率。能源结构对碳排放的影响有正有负,人口规模对碳排放影响为正,经济发展对碳排放影响程度高于人口规模,说明经济发展会促进青岛市碳排放量增加,该结果与刘冠权等^[39]对青岛市碳排放影响因素的研究结果一致。经济增长促进科技的发展,而科技水平的提高促使了能源消耗水平的提高。但是经济增长到一定阶段会引起技术、制度的变革和产业结构的改变,由此引起的经济发展可能使碳排放量在一定时期内减少。未来需要进一步调整产业结构,推广新能源、节能减排等技术手段,加快发展低碳经济,推动清洁能源、绿色交通、智慧城市等方面的建设^[40]。

(3) 本文基于 LMDI 因素分解模型,从人口规模、经济发展、能源结构、能源强度 4 个方面探究了对青岛市碳排放空间分异的影响,并没有探讨自然因素和政策因素对青岛市碳排放的影响,未来应建立更加全面的影响因素评估体系,以便全面准确地分析青岛市碳排放的驱动因素。

5 结论

(1) 2000—2020 年青岛市土地利用净碳排放量总体上呈增长趋势,建设用地作为主要碳源,其碳排放量增长近 1.87 倍,林地作为主要碳汇,碳吸收能力在逐渐下降。由于碳源排放量远远大于碳汇吸收量,短时间内青岛市土地利用净碳排放量将持续增长。

(2) 从空间演变来看,青岛市建设用地碳排放呈

现“中间高、四周低”的空间分布特征,高碳排放区域集中分布在与工业用地相邻的经济发达地区。

(3) 从脱钩状态来看,青岛市 2000—2020 年碳排放与经济增长总体上经历了“增长连结—弱脱钩—强脱钩”状态的转变,且在 2010—2020 年表现为强脱钩状态,此时的脱钩状态最为理想,青岛市的经济增长和碳排放之间实现了良性互动。

(4) 从影响因素来看,人口规模、经济效应促进了青岛市碳排放的增加,能源强度、能源结构抑制了碳排放的增加。但由于促进作用大于抑制作用,导致青岛市碳排放量仍在增加。因此,未来青岛市政府需要进一步调整产业结构,合理控制人口规模,加快发展低碳经济,通过创新技术、调整能源结构、降低能源强度等措施,从源头上减少碳排放。

参考文献 (References)

- [1] 巴曙松,吴大义.能源消费、二氧化碳排放与经济增长:基于二氧化碳减排成本视角的实证分析[J].经济与管理研究,2010,31(6):5-11.
Ba Shusong, Wu Dayi. Empirical evidence of the relation among energy consumption, carbon dioxide emissions and economic growth based on the abatement costs [J]. Research on Economics and Management, 2010, 31(6): 5-11.
- [2] 曹周亮,张欣蓉,员学锋,等.基于土地利用变化的陕西省县域碳排放时空变化及影响因素研究[J].水土保持通报,2022,42(5):376-385.
Cao Zhouliang, Zhang Xinrong, Yun Xuefeng, et al. Spatio-temporal variation and influencing factors of CO₂ emission at county scale in Shaanxi Province based on land use change [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 376-385.
- [3] 韩骥,周翔,象伟宁.土地利用碳排放效应及其低碳管理研究进展[J].生态学报,2016,36(4):1152-1161.
Han Ji, Zhou Xiang, Xiang Weining. Progress in research on land use effects on carbon emissions and low carbon management [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): 1152-1161.
- [4] 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 Jingyun, Guo Zhao Di, Piao Shilong, et al. Estimation of carbon sinks of terrestrial vegetation in China from 1981 to 2000 [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007, 37(6): 804-812.
- [5] 李世祥,康契瀛.碳中和背景下长江经济带碳足迹测算:基于省际及产业部门的实证分析[J].生态经济,2022,38(9):37-42.

- Li Shixiang, Kang Qiying. Carbon footprint calculation of Yangtze River economic belt under the background of carbon neutrality: An empirical analysis based on provincial and industrial sectors [J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(9): 37-42.
- [6] 陈书强, 邓晓卫, 王泽宇. 基于全球视角的经济发展与碳排放关系研究[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(6): 197-204.
Chen Shuqiang, Deng Xiaowei, Wang Zeyu. Research on the relationship between economic development and carbon emissions based on global perspective [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(6): 197-204.
- [7] 张杰, 陈海, 刘迪, 等. 基于县域尺度土地利用碳排放的时空分异及影响因素研究[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(1): 21-31.
Zhang Jie, Chen Hai, Liu Di, et al. The spatial and temporal variation and influencing factors of land use carbon emissions at county scale [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2022, 52(1): 21-31.
- [8] 杨坤, 胡馨, 石越. 基于RS和GIS的土地利用变化碳排放现状及预测分析[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(7): 137-141.
Yang Kun, Hu Xin, Shi Yue. Current situation and prediction analysis of land use changes in carbon emissions based on RS and GIS [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(7): 137-141.
- [9] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518-522.
Zhou Yurong, Yu Zhenliang, Zhao Shidong. Carbon storage and budget of major Chinese forest types [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 518-522.
- [10] Yang Xin, Wang Mingxing, Huang Yao. The climatic-induced net carbon sink by terrestrial biosphere over 1901—1995 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18(6): 1192-1206.
- [11] 王孟杰, 王艳军, 李少春, 等. 融合多源遥感数据的长株潭城市群碳排放时空差异分析[J]. *测绘通报*, 2023(1): 65-70.
Wang Mengjie, Wang Yanjun, Li Shaochun, et al. Spatio-temporal difference analysis of carbon emissions in Chang-Zhu-Tan urban agglomeration based on multi-source remote sensing data [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2023(1): 65-70.
- [12] 刘晓蝶. 中国省域碳排放情景预测与达峰路径研究[D]. 安徽淮南: 安徽理工大学, 2022.
Liu Xiaodie. Research on provincial carbon emission scenario prediction and carbon peak path in China [D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science and Technology, 2022.
- [13] 赵江燕, 朱宇恩, 马建超, 等. 山西省能源消费碳排放清单和影响因素研究[J]. *太原理工大学学报*, 2022, 53(6): 989-996.
Zhao Jiangyan, Zhu Yuen, Ma Jianchao, et al. Reach on carbon emission inventory based on energy activities and the driving factors in Shanxi [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2022, 53(6): 989-996.
- [14] 朱海, 王立国, 贺焱, 等. 多情景下中国省域旅游业碳达峰的时空特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(1): 169-176.
Zhu Hai, Wang Ligu, He Yan, et al. Spatial and temporal characteristics of carbon peak of provincial tourism in China under multiple scenarios [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(1): 169-176.
- [15] 滕王滕菲, 冯套柱, 郭道燕. 西北地区碳排放的驱动因素与脱钩效应研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 59(2): 260-268.
Teng Wangtengfei, Feng Taozhu, Guo Daoyan. Drivers and decoupling effects of carbon emissions in Northwest China [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2023, 59(2): 260-268.
- [16] 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 Yanfang, Zhang Guoxing. 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.
- [17] 王艳军, 王孟杰, 柳林, 等. DMSP/OLS夜光数据的珠三角碳排放时空差异性分析[J]. *遥感学报*, 2022, 26(9): 1824-1837.
Wang Yanjun, Wang Mengjie, Liu Lin, et al. Analyzing the spatiotemporal differences of carbon emission in the Pearl River delta using DMSP/OLS nighttime light images [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(9): 1824-1837.
- [18] 孙蒙, 李长云, 邢振方, 等. 碳中和目标下中国碳排放关键影响因素分析及情景预测[J]. *高电压技术*, 2023, 49(9): 4011-4022.
Sun Meng, Li Changyun, Xing Zhenfang, et al. Analysis of key influencing factors and scenario prediction of China's carbon emission under carbon neutrality [J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(9): 4011-4022.
- [19] 国家统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
National bureau of statistics. China energy statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2001.
- [20] 姜美芝. 山东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.

- Lou Meizhi. Shandong Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2001.
- [21] 青岛市统计局. 青岛统计年鉴-2001(总第 22 期)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- Qingdao Bureau of Statistics. Qingdao Statistical Yearbook: 2001(Total issue 22) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2001.
- [22] Wu Yizhen, Shi Kaifang, Chen Zuoqi, et al. Developing improved time-series DMSP-OLS-like data (1992—2019) in China by integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60:4407714.
- [23] 段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2):463-469.
- Duan Xiaonan, Wang Xiaoke, Lu Fei, et al. Carbon sequestration and its potential by wetland ecosystems in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2):463-469.
- [24] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 江苏 南京: 南京大学, 2010.
- Lai Li. Carbon emission effect of land use in China [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing University, 2010.
- [25] Walsh J J. Importance of continental margins in the marine biogeochemical cycling of carbon and nitrogen [J]. Nature, 1991, 350:53-55.
- [26] Meybeck M. Riverine transport of atmospheric carbon: Sources, global typology and budget [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1993, 70(1):443-463.
- [27] 段华平, 张悦, 赵建波, 等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5):203-208.
- Duan Huaping, Zhang Yue, Zhao Jianbo, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5):203-208.
- [28] 陈海红, 李鹏程, 王中航. GB/T 2589-2020《综合能耗计算通则》国家标准解读[J]. 标准科学, 2021(12):107-111.
- Chen Haihong, Li Pengcheng, Wang Zhonghang. Interpretation of National Standard GB/T 2589—2020, General rules for calculation of the comprehensive energy consumption [J]. Standard Science, 2021(12):107-111.
- [29] 蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 等.《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读[J]. 环境工程, 2019, 37(8):1-11.
- Cai Bofeng, Zhu Songli, Yu Shengmin, et al. The interpretation of 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(8):1-11.
- [30] 王利君. 吉林省土地利用碳排放时空演变规律及效率研究[D]. 吉林 长春: 吉林大学, 2021.
- Wang Lijun. Study on the spatio-temporal evolution and its efficiency of land use carbon emissions in Jilin Province [D]. Changchun, Jilin: Jilin University, 2021.
- [31] 夏楚瑜. 基于土地利用视角的多尺度城市碳代谢及“减排”情景模拟研究[D]. 浙江 杭州: 浙江大学, 2019.
- Xia Chuyu. Multi-scale studies on urban carbon metabolism from the perspective of land use and scenario analysis of emission reduction [D]. Hangzhou, Zhejiang: Zhejiang University, 2019.
- [32] 赵荣钦, 黄贤金, 彭补拙. 南京城市系统碳循环与碳平衡分析[J]. 地理学报, 2012, 67(6):758-770.
- Zhao Rongqin, Huang Xianjin, Peng Buzhuo. Research on carbon cycle and carbon balance of Nanjing urban system [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(6):758-770.
- [33] 田启明, 徐炜达, 李梦南, 等. 一种某行政区域内的碳排放计算方法及可视化方法: CN114049052B[P]. 2022-05-06.
- Tian Qiming, Xu Yida, Li Mengnan, et al. A method and visualization approach for carbon emission calculation within a specific administrative region: CN114049052B [P]. 2022-05-06.
- [34] 黎孔清. 低碳经济导向的区域土地利用评价与结构优化研究[D]. 湖北 武汉: 华中农业大学, 2013.
- Li Kongqing. Evaluation and structural optimization of low-carbon economy-oriented regional land-use [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong Agricultural University, 2013.
- [35] 匡耀求, 欧阳婷萍, 邹毅, 等. 广东省碳源碳汇现状评估及增加碳汇潜力分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(12):56-61.
- Kuang Yaoqiu, Ouyang Tingping, Zou Yi, et al. Present situation of carbon source and sink and potential for increase of carbon sink in Guangdong Province [J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(12):56-61.
- [36] Li Chuang, Zhang Zhecong, Wang Liping. Carbon peak forecast and low carbon policy choice of transportation industry in China: Scenario prediction based on STIRPAT model [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(22):63250-63271.
- [37] Li Mengcheng, Liu Haimeng, Yu Shangkun, et al. Estimating the decoupling between net carbon emissions and construction land and its driving factors: Evidence from Shandong Province, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(15):8910.

- Mollisol in central Ohio as affected by tillage and land use [J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 80 (1/2): 201-213.
- [22] Shi Peng, Zhang Yan, Li Peng, et al. Distribution of soil organic carbon impacted by land-use changes in a hilly watershed of the Loess Plateau, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652:505-512.
- [23] 胡春宏, 张晓明. 黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(1):1-11.
Hu Chunhong, Zhang Xiaoming. Loess Plateau soil erosion governance and runoff-sediment variation of Yellow River [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(1):1-11.
- [24] Li Zhongwu, Liu Chun, Dong Yuting, et al. Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the loess hilly-gully region of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 166:1-9.
- [25] Alcántara V, Don A, Well R, et al. Deep ploughing increases agricultural soil organic matter stocks [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(8):2939-2956.
- [26] 李勉, 杨剑锋, 侯建才, 等. 黄土丘陵区小流域淤地坝泥沙沉积过程研究[C]//中国水力发电工程学会水文泥沙专业委员会第七届学术讨论会论文集(下册). 杭州, 2007:114-117.
Li Mian, Yang Jianfeng, Hou Jiancai, et al. Research on sedimentation process of small watershed check-dams in loess hilly areas [C]//Proceedings of the 7th Academic Symposium of the Hydrological and Sediment Professional Committee of the China Society of Hydro-
power Engineering (Vol. 2). Hangzhou, 2007:114-117.
- [27] Soane B D. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects [J]. *Soil and Tillage Research*, 1990, 16(1/2):179-201.
- [28] Wei Wei, Chen Die, Wang Lixin, et al. Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 159: 388-403.
- [29] Xu Lu, Zhang Dan, Proshad R, et al. Effects of soil conservation practices on soil erosion and the size selectivity of eroded sediment on cultivated slopes [J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(5):1222-1234.
- [30] Wu Gaolin, Liu Yifan, Cui Zeng, et al. Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: A Meta-analysis [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(5):875-885.
- [31] 潘占兵, 余峰, 王占军, 等. 宁南黄土丘陵区坡向、坡位对苜蓿地土壤含水量时空变异的影响[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(2):141-144.
Pan Zhanbing, Yu Feng, Wang Zhanjun, et al. Effects of slope aspect and position on temporal and spatial variation of soil water content on alfalfa land in loess hilly region of South Ningxia Hui Autonomous Region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17 (2):141-144.
- [32] Hoylman Z, Jencso K, Hu Jia, et al. Hillslope topography mediates spatial patterns of ecosystem sensitivity to climate [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123:353-371.
- ~~~~~
- (上接第 378 页)
- [38] 张伟, 孙燕玲, 朱萌. 区域性中心城市的碳排放测定及影响因素分析: 以青岛市为例[J]. *经济与管理评论*, 2012, 28(4):150-156.
Zhang Wei, Sun Yanling, Zhu Meng. Determination of carbon emissions in regional central cities and analysis of influencing factors: Taking Qingdao as an example [J]. *Review of Economy and Management*, 2012, 28 (4):150-156.
- [39] 刘冠权, 杨雨霖, 朱文晶. 基于 LMDI 模型和 Tapio 的城市碳排放驱动因素和脱钩状态研究: 以青岛市为例[J].
南宁师范大学学报(自然科学版), 2023, 40(3):87-94.
Liu Guanquan, Yang Yulin, Zhu Wenjing. Driving factors and decoupling state of urban carbon emission based on LMDI model and tapio: A case study of Qingdao City [J]. *Journal of Nanning Normal University (Natural Science Edition)*, 2023, 40(3):87-94.
- [40] Li Xinguang, Lv Tong, Zhan Jun, et al. Carbon emission measurement of urban green passenger transport: A case study of Qingdao [J]. *Sustainability*, 2022, 14 (15):9588.