



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202303038 中图分类号 X51 文献标识码 A

李思航, 马文林, 郝汉, 等. 县域能源消费 CO<sub>2</sub> 排放特征及减排措施: 以河北省怀来县为例[J]. 环境工程学报, 2023, 17(7): 2277-2285. [Li Sihang, MA Wenlin, HAO Han, et al. CO<sub>2</sub> emission characteristics and emission reduction measures of country energy consumption: A case study of Huailai County, Hebei Province[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(7): 2277-2285.]

# 县域能源消费 CO<sub>2</sub> 排放特征及减排措施: 以河北省怀来县为例

李思航<sup>1,2</sup>, 马文林<sup>1,2,✉</sup>, 郝汉<sup>1,2</sup>, 赵嘉莉<sup>1,2</sup>

1. 北京建筑大学, 北京应对气候变化研究和人才培养基地, 北京 100044; 2. 北京建筑大学, 环境与能源工程学院, 北京 100044

**摘要** 为明晰怀来县能源消费二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 排放特征并制定科学合理的减排措施, 以怀来县 2010—2019 年间能源消费为对象, 开展 CO<sub>2</sub> 排放清单研究。结果表明, 怀来县能源消费已实现“碳达峰”, CO<sub>2</sub> 排放总量呈波动上升-下降-保持平衡的变化趋势。单位 GDP 排放强度总体呈逐年下降趋势, 于 2014 年起下降速度首次超过 GDP 增速, 并逐渐开始抵消 GDP 增长带来的碳排放增量。自 2013 年起, 怀来县工业与农林牧渔业相继实现“碳达峰”, 但交通运输部门与居民生活部门的 CO<sub>2</sub> 排放量一直维持在较高水平。在充分结合怀来县能源消费 CO<sub>2</sub> 排放现状研究与发展方向后, 提出了针对交通运输部门和居民生活部门这 2 个重点排放源的减排措施。本研究结果可为县域管理部门的能源消费低碳发展策略的制订提供参考。

**关键词** 怀来县; 能源消费; 碳达峰; 碳排放清单; 减排措施

人类活动导致大量二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 逸散到大气中, 使得全球 CO<sub>2</sub> 排放量不断增加。我国是世界上最大的 CO<sub>2</sub> 排放国<sup>[1]</sup>。出于可持续发展的内在要求和作为负责任大国的国际责任, 我国于 2020 年 9 月提出了“碳中和, 碳达峰”发展目标<sup>[2]</sup>, 并在“十四五”规划纲要中明确“支持有条件的地方和重点行业、重点企业率先达到碳排放峰值”等相关内容。河北省怀来县是我国较早进行 CO<sub>2</sub> 减排的地区, 早在 2010 年就提出了“零碳经济与城市可持续”发展战略, 由此把 CO<sub>2</sub> 减排作为重点工作积极推进<sup>[3]</sup>。2017 年, 张家口市因其北京生态屏障的地理位置, 被赋予了北京水源涵养功能区和生态环境支撑区的建设任务<sup>[4]</sup>。怀来县则因其上风上水的地理位置与拥有官厅水库 74% 的面积成为了国家重点生态功能区<sup>[5]</sup>。生态文明建设的实现路径之一是发展低碳经济<sup>[6-7]</sup>, 而发展低碳经济则需要以推进 CO<sub>2</sub> 减排作为基础<sup>[8]</sup>。综合来看, “零碳经济与城市可持续”的发展战略和生态功能区的建设都要求怀来县把降低 CO<sub>2</sub> 排放水平作为重点工作。

在我国, 由能源消费引起的 CO<sub>2</sub> 占 CO<sub>2</sub> 排放总量的 85% 以上<sup>[9]</sup>, 控制能源消费 CO<sub>2</sub> 排放对于 CO<sub>2</sub> 减排具有积极作用。因此, 能源消费 CO<sub>2</sub> 排放相关研究成为了研究者的聚焦热点, 成果中不乏对省级、市级等中大尺度区域的相关研究<sup>[10-14]</sup>, 但却罕有小尺度区域 (区级、县级) 能源消费的研究成果。本研究以怀来县能源消费 CO<sub>2</sub> 排放清单为研究目标, 对近 10 年怀来县能源消费 CO<sub>2</sub> 排

收稿日期: 2023-03-06; 录用日期: 2023-05-11

基金项目: 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项 (X19009)

第一作者: 李思航 (1999—), 男, 硕士研究生, 1217954764@qq.com; ✉通信作者: 马文林 (1968—), 女, 博士, 教授, mawenlin@bucea.edu.cn

放特征及其变化趋势进行分析。旨在为怀来县减排策略的制定提供数据基础与理论支持。此外，怀来县所处地理位置决定其将要注重自然生态保护和修复、积极开发利用可再生能源、控制发展高排放的传统工业产业，并将先于国家“双碳”目标计划实现碳达峰和碳中和，以期为其他类似城市或地区提供参考。

## 1 研究方法和数据来源

### 1.1 核算范围与对象

研究的时间范围是2010—2019年。核算对象为怀来县第一产业(农、林、牧、渔业)、第二产业(工业、建筑业)、第三产业(交通运输业、以服务业为主的未被第一、第二产业包含的其他行业)和居民生活部门。

### 1.2 数据来源

1) 能源数据。怀来县第一产业、第二产业、第三产业(除交通运输中客运交通)和居民生活部门(除私家车)的能源消费数据来自《河北省怀来县国民经济统计年鉴》(2010—2019年)中能源平衡表。客运交通(公交车,出租车)活动数据来自于客运站、运管所实地调研。私家车活动数据来自于交管部门与调研。本研究中客运交通与私家车的能源消耗数据,能满足“自下而上”法的计算要求,其余交通方式的能源消耗数据采用“自上而下”的方法从统计年鉴中获取。

2) 经济与人口数据。怀来县2010—2019年地区生产总值(GDP)和人口数均取自怀来县统计局发布的《河北省怀来县国民经济统计年鉴》(2010—2019年)。

### 1.3 核算方法

#### 1.3.1 方法依据

怀来县能源消费CO<sub>2</sub>排放清单优先采用我国《省级温室气体清单编制指南(试行)》(以下简称“省级清单”)中提供的核算方法。若“省级清单”中未提供适宜方法,则参考IPCC《国家温室气体清单指南(2006)》(以下简称“国家清单”)进行核算。

#### 1.3.2 化石能源消费排放计算方法

能源消费CO<sub>2</sub>排放通常通过化石能源消费进行核算<sup>[4]</sup>。本研究中化石燃料燃烧CO<sub>2</sub>排放采用“省级清单”中层级2方法(公式1)估算,即通过活动数据和燃料的排放因子计算CO<sub>2</sub>排放量。

$$E_{\text{化石能源}} = \sum_{i=1}^n (AD_i \times EF_i) \quad (1)$$

式中:  $E_{\text{化石能源}}$  为核算期内化石燃料燃烧产生的CO<sub>2</sub>排放量, t;  $AD_i$  为核算期内第*i*种燃料的活动数据, GJ;  $EF_i$  为第*i*种燃料CO<sub>2</sub>排放因子, t·GJ<sup>-1</sup>。

燃料燃烧的活动数据是核算期内各种燃料的消耗量与平均低位发热量的乘积,按照公式(2)计算。

$$AD_i = NCV_i \times FC_i \quad (2)$$

式中:  $AD_i$  为核算期内第*i*种化石燃料的活动数据, GJ;  $NCV_i$  为核算期内第*i*种化石燃料的平均低位发热量,对于固体或液体燃料, GJ·t<sup>-1</sup>;对于气体燃料, GJ·(10<sup>4</sup> Nm<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>。  $FC_i$  为核算和报告期内第*i*种化石燃料的消耗量,对于固体或液体燃料, t;对于气体燃料, 10<sup>4</sup> Nm<sup>3</sup>。

根据“省级清单”方法,二氧化碳排放因子采用国家特定排放因子,计算方法按照公式(3)进行。

$$EF_i = CC_i \times OF_i \times \frac{44}{12} \quad (3)$$

式中:  $EF_i$  为第*i*种燃料的CO<sub>2</sub>排放因子, t·GJ<sup>-1</sup>;  $CC_i$  为第*i*种燃料的单位热值含碳量, t·GJ<sup>-1</sup>;

OF<sub>i</sub>为第*i*种燃料的碳氧化率，无量纲； $\frac{44}{12}$ 为二氧化碳与碳的相对分子量之比。

### 1.3.3 交通能源消耗排放量计算

对于交通能源消耗产生的CO<sub>2</sub>排放量，“国家清单”提供了“自上而下”和“自下而上”两种核算方法。“自上而下”法是根据统计年鉴中不同交通方式的燃料消耗数据计算排放量，“自下而上”法则是根据从交通部门或实际调研获得的各类交通车辆的行驶总里程乘以单位行驶距离燃料消耗量而得出燃料消耗数据去计算排放量。在数据可获取情况下，交通排放优先考虑“自下而上”法。

### 1.3.4 电力排放计算

在进行能源结构分析时，电力CO<sub>2</sub>排放通过公式(4)进行核算。

$$E_{\text{电力}} = AD_{\text{电力}} \times EF_{\text{电力}} \quad (4)$$

式中： $E_{\text{电力}}$ 为电力消耗CO<sub>2</sub>排放量； $AD_{\text{电力}}$ 为核算期内电力消耗量，MW·h； $EF_{\text{电力}}$ 为电力生产排放因子，t·(MW·h)<sup>-1</sup>。

## 1.4 排放因子获取方法

化石燃料燃烧活动数据中燃料的低位热值含碳量，不同燃料单位热值含碳量、碳氧化率取值来自于“省级清单”。在进行部门内能源结构分析与计算时，为使不同年间电能消耗的CO<sub>2</sub>排放量具有可对比性，电力排放因子均选取国家发改委气候司发布的2012年华北电网排放因子。

## 2 怀来县能源消费CO<sub>2</sub>排放特征分析

### 2.1 总体变化趋势

通过核算，怀来县2010—2019年能源消费CO<sub>2</sub>排放量见表1，各产业GDP及增速变化趋势则于图1所示。

表1 怀来县2010—2019年能源消费CO<sub>2</sub>排放量  
Table 1 CO<sub>2</sub> emissions from energy activities in Huailai from 2010 to 2019 万吨

项目	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
总计	411.63	406.57	418.38	424.07	333.66	234.17	241.54	245.56	236.47	227.01
第一产业	9.76	13.05	13.79	18.02	18.25	6.07	6.45	6.52	6.36	6.21
第二产业	208.95	189.17	190.69	184.48	92.04	45.90	47.61	47.22	39.79	33.08
工业	195.48	169.41	169.51	158.82	63.85	36.42	37.55	36.55	28.98	21.77
建筑业	13.47	19.76	21.18	25.66	28.19	9.48	10.06	10.67	10.81	11.31
第三产业	120.75	145.42	151.27	154.22	155.75	107.90	113.06	114.43	112.81	109.43
交通运输	81.82	97.40	101.73	102.70	102.58	76.18	79.72	84.94	83.79	80.84
服务业及其他	38.94	48.02	49.54	51.53	53.17	31.71	33.34	29.50	29.02	28.59
居民生活	72.17	58.94	62.63	67.36	67.63	74.31	74.42	77.39	77.51	78.29
城市居民	22.57	17.55	19.01	22.37	22.45	28.49	28.97	29.27	29.64	30.21
农村居民	49.61	41.38	43.62	44.99	45.18	45.81	47.48	48.12	47.87	48.08

表1说明，怀来县能源消费CO<sub>2</sub>排放量在2013年达到峰值，在经历一个显著下降后，于2015年起保持一个基本稳定趋势。2019年怀来县能源消费CO<sub>2</sub>排放总量为227万吨，相较于2013年424.1万吨的CO<sub>2</sub>排放峰值降低了197.1万吨，降幅达到了46.5%，年均减排率达7.8%，总体减排效果显著。在取得良好减排效果的同时，怀来县GDP由86.5亿元增长到132.0亿元，年均增速达5.3%，GDP增长迅速。在2010—2013年，怀来县能源消费CO<sub>2</sub>排放量处于小幅增长态势，GDP增速也维持在较高水平、年均GDP增速超过10%。2013—2019年，怀来县能源消费

CO<sub>2</sub>排放量出现较大降幅, 年均GDP增速也逐渐放缓, 并呈现波动下降趋势, 年均GDP增速不足2% (图1)。从短期来看, 怀来县能源消费CO<sub>2</sub>减排工作推进确实对经济发展起到了一定的制约作用。

1) 第一产业能源消费CO<sub>2</sub>排放变化趋势。2010—2014年, 怀来县第一产业CO<sub>2</sub>排放量呈上升态势, 并于2014年实现“碳达峰”, 次年排放量出现较大降幅, 降幅达66.7%。在2015—2019年, 第一产业排放量呈现出稳定趋势, 排放量维持在约6万吨。但第一产业的GDP则未随着排放量的明显下降而出现大幅降低。2010—2014年怀来县第一产业的平均GDP为15.3亿元, 而2015—

2019年的平均GDP为13.9亿元, GDP虽然出现小幅下降, 但取得了显著的减排成果。

怀来县第一产业CO<sub>2</sub>排放的下降和第一产业的技术进步与产品调整密不可分。农业产业化龙头企业的引入极大促进了怀来县农业的发展, 先进种养殖技术的应用提高了怀来县第一产业的生产水平, 也降低了CO<sub>2</sub>排放量。与此同时, 企业先进技术使生产效率得到提高的同时也将部分原属于第一产业的农产品加工为第三产业产品, 这将把原属于第一产业GDP转移到第三产业中。此外, 随着2014年怀来被认定为全省休闲农业与乡村旅游示范县, 农村经济的重心逐渐转向第三产业。这也可能是使得第一产业GDP出现下降的原因。

2) 第二产业能源消费CO<sub>2</sub>排放变化趋势。怀来县第二产业能源消费CO<sub>2</sub>排放量在2010—2013年间维持在较高水平, 所引起的CO<sub>2</sub>排放量占全县能源消费排放量的46.6%。在2014—2015年, 第二产业能源消费CO<sub>2</sub>排放量开始下降, 期间CO<sub>2</sub>降幅达138.6万吨, 减排比例达75.1%。在2015年之后, CO<sub>2</sub>排放量维持在较低水平。

怀来县第二产业以工业和建筑业为主。工业是第二产业最大的排放部门, 是怀来县最早进行碳减排的部门, 也是县内最早实现“碳达峰”的部门。在2010—2015年, 怀来县工业部门CO<sub>2</sub>排放量逐年下降, 累计减排量达158.9万吨、降幅超过86%。在2015—2019年, 怀来县工业部门排放量维持在较低水平、并趋于稳定, 减排成果显著。

自“十一五”经济和社会发展规划的提出及“零碳经济与城市可持续”发展战略的确立, 怀来县将温室气体减排列入刚性指标, 工业部门因其较高的排放水平成为了怀来县低碳建设的重点治理目标。在2010—2019年, 怀来县工业部门煤炭消费量降幅已超过90%, 能源的利用效率也因技术和设备的更新而不断提升。同时, 一些高能耗、高污染、生产水平落后的产业(造纸、钢铁, 煤矿)被逐渐淘汰, 优势产业和“三低”创新型产业则因政策推进得到了进一步发展, 这些举措使得工业部门碳排放量取得下降显著。

3) 第三产业能源消费CO<sub>2</sub>排放变化趋势。第三产业的排放量变化趋势与怀来县能源消耗CO<sub>2</sub>排放量总体变化趋势一致。不能忽视的是, 第三产业能源CO<sub>2</sub>排放在全市能源CO<sub>2</sub>总排放中的占比逐年升高, 从2010年的29.3%提高到2019年的48.2%, 并于2014年起超过了第二产业成为了CO<sub>2</sub>排放量最高的产业。

第三产业中最大的排放部门是交通运输部门, 10年间CO<sub>2</sub>的平均排放量占本产业的68.1%、且有继续扩大趋势, 而以服务业及其他仅占31.9%。怀来县的交通构成分为公路交通和轨道交通,

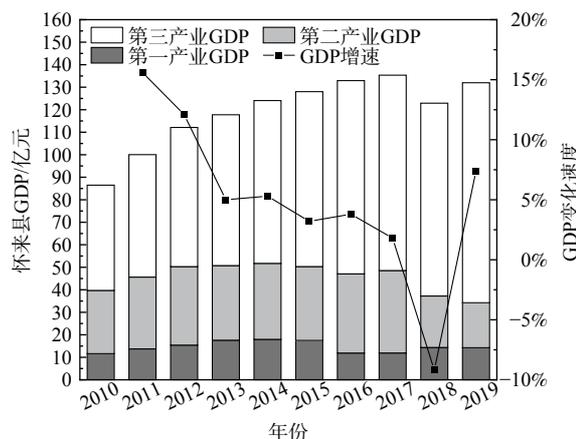


图1 2010—2019 怀来县 GDP 及 GDP 增速变化趋势  
Fig. 1 Trends in GDP and GDP growth rate in Huailai from 2010 to 2019

其中公路交通由客运车辆和物流车辆组成。客运车辆中，在怀来城区内通勤往返的公交车全部为新能源车辆，跨区、农村班线公交车大部分为柴油车，出租车均为汽油车，而物流、仓储及邮政相关运输车辆则主要以柴油车为主，部分小型运输车辆为汽油车。公路交通是交通运输部门的重点排放源，在2017年，由公路交通产生CO<sub>2</sub>排放量占交通运输部门排放总量的83.4%，为70.8万吨，而轨道交通仅占16.6%，排放量为14.1万吨。

为降低道路交通CO<sub>2</sub>排放水平，怀来县采取提高车辆排放标准、“以油换电”等治理措施。自政策实施至2015年，怀来县新能源公交车占比已超过85%，各类新能源车辆的保有量稳步上升。但结果表明，在2010-2019年间，交通运输部门CO<sub>2</sub>排放量仅在2014、2015、2019年有所降低，在其他年份均处于升高趋势。造成这种现象主要的原因是交通运输部门仍在持续发展，由此产生的CO<sub>2</sub>排放增量超过治理措施的减排量。

4) 居民生活部门能源消费CO<sub>2</sub>排放变化趋势。居民生活部门CO<sub>2</sub>排放量为58.94~78.29万吨，总体排放量较大且呈增加趋势。但因第二、三产业减排工作的不断推进，居民生活用能的CO<sub>2</sub>排放占比快速增长，已从2010年的17.5%变为了2019年的34.5%。居民日益丰富的生活需求和人口增长是居民生活碳排放量增加的重要原因。怀来县的不断发展吸引着人的不断涌入，截至2019年，怀来县常住人口较2010年同比上长了16.8%，已达41.1万人。

从居民生活部门的能源结构分析，2019年居民生活部门只因电能消费引起CO<sub>2</sub>排放为23.6万吨、占比约30%。相对地，由化石能源消费CO<sub>2</sub>排放为54.7万吨、占比约70%，其中私家车使用引起的CO<sub>2</sub>排放量约为19.7万吨。从居民生活部门CO<sub>2</sub>排放组成来看，怀来县农村居民用能和城市居民用能间的CO<sub>2</sub>排放量之比约为7:3，而怀来县农村人口和城市人口的比例约为6:4。农村居民用能具有CO<sub>2</sub>排放量大，能源利用效率较低的特点。根据调研资料(279个有村委会的村落)，怀来县农村居民消耗的化石燃料主要为煤炭和煤气。

## 2.2 碳排放强度

### 2.2.1 单位GDP碳排放强度

在2010—2019年，怀来县GDP总体上升，但GDP增速表现出波动减缓(图2)。通过计算，2010—2019年怀来县单位GDP排放强度从每万元4.82t降至1.72t，年均下降速度超过了6.4%(图3)。其中，2014年和2015年下降速度最为明显，分别达到了25.3%和32.0%。在2014年，怀来县单位GDP碳排放强度下降速度首次超过了GDP增速(图3)，并在之后几年里出现超越趋势。这表明怀

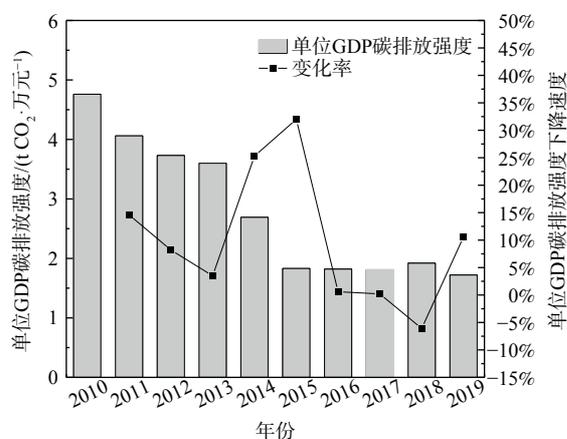


图2 2010—2019年怀来县单位GDP排放强度及其下降速度

Fig. 2 Emission intensity per unit of GDP and its rate of decline in Huailai from 2010 to 2019

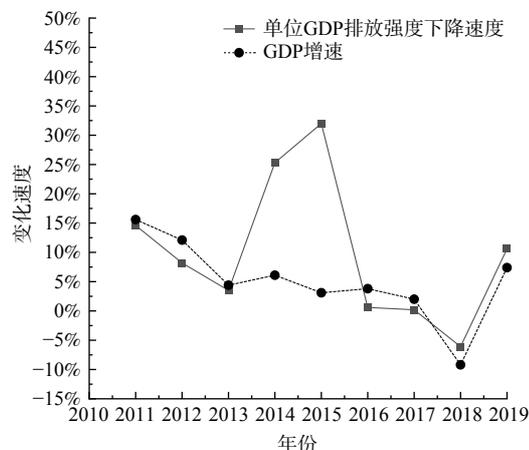


图3 怀来县GDP增速与单位GDP排放强度下降速度相对趋势

Fig. 3 Relative trend of GDP growth rate and rate of decrease in emission intensity per unit of GDP in Huailai County

来县逐渐能够抵消 GDP 增长带来的 CO<sub>2</sub> 排放增量, 开始具备控制 CO<sub>2</sub> 排放量不再增长的能力, 这对怀来县今后的低碳发展具有积极影响。

以上结果与怀来县产业调整和能源结构优化密不可分。近年来, 怀来县严把新上项目环评关、出台并强化节能减排政策, 推进县内高能耗、高排放产业逐渐转型。通过不断提升产业层次、淘汰落后生产工艺和装备, 逐渐解决结构性矛盾带来的耗能高、污染重问题。积极推广先进节能技术替代传统低效率模式, 推进工业、交通、建筑等部门低碳发展。同时正逐步调整能源结构, 通过提高电力、天然气, 液化石油气等能源的使用比例, 借以减少燃煤、传统油品等统高碳燃料的使用。

### 2.2.2 人均碳排放强度

在 2010—2019 年, 怀来县人均碳排放强度总体呈下降趋势 (图 4)。其中, 以 2014 年和 2015 年下降最为显著。人均碳排放强度由 CO<sub>2</sub> 排放量与人口因素共同决定, 排放量的降低与人口的增加都会促使人均碳排放强度下降。值得一提的是, 怀来县人均碳排放强度变化趋势与能源消费 CO<sub>2</sub> 排放量变化趋势一致。这表明由能源消费 CO<sub>2</sub> 排放量变化起主导作用, 而人口因素起次要作用: 2010—2019 年, 怀来县常住人口已从 35.2 万增加 41.1 万, 同比上长 16.7%, 但 CO<sub>2</sub> 排放量从 424.1 万吨下降为 227 万吨, 降幅明显。从结果上看, 怀来县人均碳排放强度已从 2010 年的 11.69 t 下降到 2019 年的 5.52 t, 降幅达到了 52.8%。

### 2.3 怀来县碳排放强度降低潜力分析

为探究怀来县碳排放强度降低潜力, 将怀来县与北京市延庆区和通州区进行比较 (表 2)。延庆区毗邻怀来县, 2019 年 GDP 为 195.3 亿元, 常住人口 35.7 万, 占地面积约 1 994 km<sup>2</sup>, 各项数据与怀来县均较为相似。通州区位于北京市东南部, 占地 906 km<sup>2</sup>, 在 2015 年初被定为北京市副中心, 城市较为发达。2019 年通州区 GDP 达 1 059.2 亿元, 常住人口 167.5 万人<sup>[15]</sup>。

表 2 2019 年不同地区间 CO<sub>2</sub> 排放指标情况

Table 2 CO<sub>2</sub> emission targets in different regions in 2019

区县名	第一产业单位GDP 碳排放强度/(t·万元 <sup>-1</sup> )	第二产业单位GDP 碳排放强度/(t·万元 <sup>-1</sup> )	第三产业单位GDP 碳排放强度/(t·万元 <sup>-1</sup> )	人均碳排放强度/ (t·人 <sup>-1</sup> )	单位面积碳 排放强度/(t·km <sup>-2</sup> )
怀来县	0.44	1.66	1.12	5.52	1260.42
通州区	1.76	0.42	0.45	5.15	9532.12
延庆区	0.91	0.61	0.41	5.17	925.54

注: 延庆区、通州区能源数据、GDP、人口等数据分别来自当地统计年鉴。

怀来县第一产业是优势产业, GDP 碳排放强度处于较低水平, 远低于延庆区与通州区。但第二、三产业 GDP 碳排放强度均处于较高水平, 远高于延庆区与通州区。这与怀来县产业类型与产业结构有关, 随着先进技术的引入及第二、三产业的调整优化与发展, 第二、三产业具有较大的降低空间。相较之下, 怀来县人均碳排放强度则与延庆区和通州区相差不大, 但仍存在降低空

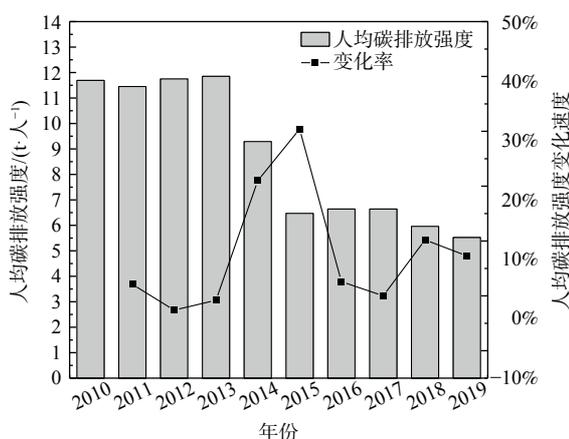


图 4 怀来县人均碳排放强度

Fig. 4 Carbon emissions intensity per capita in Huailai County

间。怀来县单位面积碳排放强度较低，仅略高于延庆区，但远低于通州区，处于优良水平。如减排工作持续深入，将会引领该指标继续下降。

### 3 怀来县减排措施研究

#### 3.1 重点领域 CO<sub>2</sub> 减排措施研究

随着怀来县不断推进减排工作，工业部门能源消费引起的碳排放已达到峰值，CO<sub>2</sub>排放量显著下降。怀来县重点排放源已经发生改变，交通运输成为最大的排放源，居民生活部门成为第二大排放源，工业则退居为第三位。交通运输和居民生活部门的排放量始终保持在较高水平，且在10年间排放量表现出总体上升趋势。

1) 交通运输部门的措施。怀来县交通运输部门具有良好的发展前景，县内公路铁路系统正处于完善中，多项有利于交通运输业的规划也已经制定。2017年，怀来县公路交通总里程已达到1 257 km；其中高速路段里程位列张家口全市第二，达104 km。北京至沙城的S2铁路通车增加了铁路系统竞争力。在今后的发展规划中，怀来县多条高速公路将逐步实施改建工作，京张高铁也于2019年通车。因此，怀来县交通运输部门仍会在近期保持发展趋势。

合理的减排措施对交通运输部门的低碳发展和“碳达峰”实现具有重要意义。针对怀来县交通运输部门的排放特点与发展趋向，怀来县应从以下角度进行交通运输部门的优化。A) 逐步推进交通运输公转轨：把能效较低的公路交通运输逐步分流到高效的轨道交通上，并通过加大轨道交通班次等方式分担运输压力，由此降低道路交通产生的CO<sub>2</sub>排放。B) 推动公路交通运输领域广泛采用可再生能源，实行交通运输绿色发展。目前怀来县内公路交通车辆仍以传统燃油车为主，且部分车辆仍存在排放高问题；应进一步提高新能源车的占有比例，开发并应用氢能车辆。目前为止，低温、长距离运输、重载运输等电动车辆应用方面还存在一些短板，这些问题短时间内可能难以解决，需要其他动力的辅助，一个重要选择是氢能源的研发与应用<sup>[16]</sup>，怀来县可充分利用张家口市发展氢能的契机，大力推动氢能车辆的研发和利用。C) 进一步提高交通运输的能源效率与运输工具的能效。这需要提高运输管理水平，并逐渐提高交通运输工具的技术水平<sup>[17]</sup>。D) 增加公交出行吸引力，倡导民众选择公共交通。公共交通系统具有人均占地少、能耗低、客运量大等优点，而且在节能环保、缓解交通拥堵等具有显著优势<sup>[18]</sup>。优化县内公交车发车时间表及公交线路，有利于提高公交系统运营效率、增加公交出行吸引力，还可以减少私家车使用量，降低CO<sub>2</sub>排放量<sup>[19]</sup>。

2) 居民生活部门的减排措施。怀来各产业持续向好发展在创造经济效益的同时也吸引着人口的不断涌入。至2019年，怀来常住人口已从2010年的35.2万人升至41.1万人，人均GDP也由2010年的2.46万元增至3.21万元。这也是能源需求不断上涨的重要驱动因素。伴随怀来县的不断发展，居民生活部门能源消费一定程度上仍会呈现上升态势。

怀来县可以从以下3个方面推进居民生活部门的减排。A) 逐步对低能效家具电器、用能装置等进行节能改造，并在农村推进“煤改电”、“煤改气”进程。提高能效可使用能设备在达到相同使用效果时消耗更少的能源，进而达到降低CO<sub>2</sub>排放的效果。怀来县农村居民对煤碳的需求较大，且大量用煤普遍集中在冬季采暖过程中。因此推进“煤改电”、“煤改气”进程有助于降低农村居民的CO<sub>2</sub>排放。B) 对农村建筑维护结构进行节能改造。根据调查，中国农村人均建筑面积高于城市人均建筑面积<sup>[20]</sup>。但建筑维护结构的热工性能普遍达不到节能设计标准的要求<sup>[21]</sup>，建筑节能水平低；农户对夏季空调制冷，冬季供热的需求高。有资料显示，提高农村建筑维护结构性能可降低66%的冬季采暖能耗<sup>[22]</sup>，故对农村建筑进行节能改造具有减排意义。C) 加强居民的节能意识、减少无效能耗，倡导低碳绿色的生活方式，减少私家车的使用频次。通过加大宣传力度，举办绿

色活动等方式增加居民参与感、责任感,让低碳生活意识不断深入人心。

### 3.2 怀来县深度减排措施研究

尽管怀来县能源消费 CO<sub>2</sub> 排放量已取得显著缩减,但从碳排放强度及能源优化层面看,仍有进步空间。结合怀来县发展前景,建议怀来从产业低碳健康发展和能源清洁化着手深度减排工作。

1) 怀来应继续推进产业结构调整,并践行高质量发展。只有逐步提高技术进步水平,推动创新引领高质量发展,才能在经济发展新常态下促进碳排放强度的稳步下降,提高能源碳排放效率<sup>[23]</sup>。怀来县 2019 年第二、第三产业单位 GDP 排放强度分别为每万元 1.66 t 和每万元 1.12 t,存在很大降低空间。提升第二、三产业的竞争力也将是怀来县今后发展的重点,怀来应推动第三产业中以服务业为首的高产值低排放产业发展,并促进工业、物流等传统产业协同大数据、科技部门等新兴产业共同发展,以打造优势部门。

2) 充分利用自然资源优势,进一步提升可再生能源发电能力,从而推动电力清洁化发展。怀来县拥有庞大的风能、太阳能等自然资源:怀来全境处于蒙古高原向华北平原的过渡带内,百米风速达 5.0~9.5 m·s<sup>-1</sup>,风力资源有效时数在 4 000~5 000 h,风能资源较为丰沛;县内年平均日照数为 3 000 h,日照率为 68%,全县太阳能辐射等级均为 II 类地区,太阳能资源处于较好水平。截至 2021 年,怀来县光伏、风电装机总规模接近 500 MW,光伏、风电装机比例约为 1:3,上网电量已达到 990 186 MW·h,如参与能源领域核算,可抵消 85.9 万吨的 CO<sub>2</sub> 排放。怀来应充分利用张家口是国家清洁能源示范区的政策优势,接续扩大风电、光伏发电能力。

## 4 结论

怀来县作为我国落实 CO<sub>2</sub> 减排工作较早的地区,早于我国提出“双碳”目标前就已完成了县域层面能源消费领域的“碳达峰”工作,其减排方法和路径值得我国其他地区借鉴及应用。从总体排放特征看,怀来县于 2013 年已达到 CO<sub>2</sub> 排放峰值,且排放量在达峰后呈现出显著下降趋势。从行业排放特征看,工业部门是怀来最早达到排放峰值的行业,在 2012 就已出现排放峰值,农林牧渔业在 2014 年达到排放峰值。随着减排的不断进行,怀来的 CO<sub>2</sub> 排放重心已转移到交通运输部门和居民生活部门上,这两个部门在 2019 年能源消费 CO<sub>2</sub> 排放占到了排放总量的 70.1%,将会是今后进行减排的重点领域。从排放强度看,怀来县单位 GDP 排放强度总体呈逐年降低趋势,而人均碳排放强度呈先增长后降低趋势。

## 参考文献

- [1] OLIVIER J G J, PETERS J A H W. Trends in global CO<sub>2</sub> and total greenhouse gas emissions: 2017 report[M]. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2017.
- [2] 魏保军,李迅,张中秀.城市碳达峰规划技术策略体系研究[J].城市发展规划研究,2021,28(10): 1-9.
- [3] 乔钰刚,朱昊.怀来零碳城:未来城市发展实验区[N].张家口日报,2010-01-20(002).
- [4] 卢晓光.建设好首都水源涵养功能区和生态环境支撑区[J].中国政协,2018(8): 35.
- [5] 张志国.贾海文努力当好怀来旅游业发展的带头人[J].绿色中国,2019,516(2): 24-27.
- [6] 孔翔,郑汝楠.低碳经济发展与区域生态文明建设关系初探[J].经济问题探索,2011(2): 44-48.
- [7] 姜绍华.我国经济社会全面绿色转型的现实挑战与应对策略[J].乡村论丛,2022(3): 18-23.
- [8] 苏静.“双碳”背景下绿色金融发展的现状、挑战及路径[J].技术经济与管理研究,2022(9): 79-82.
- [9] 王利兵,张赞.中国能源碳排放因素分解与情景预测[J].电力建设,2021,42(9): 1-9.
- [10] 刘蕊.北京市温室气体排放清单研究[D].北京:北京建筑大学,2016.
- [11] 马晓君,董碧滢,于渊博,等.东北三省能源消费碳排放测度及影响因素[J].中国环境科学,2018,38(8): 3170-3179.
- [12] 谢鹏程,王文军,廖翠萍,等.基于能源活动的碳排放清单及减排措施研究—以广州市为例[J].环境污染与防治,2021,43(5): 5.659-663.
- [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.

- [14] 陈亮, 张楠, 王一帆, 等. 京津冀地区碳排放强度变化的驱动因素及其归因分析—基于细分行业与五年规划的视角[J/OL]. 中国环境科学: 1-17 [2023-02-27]. DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230220.014.
- [15] 编辑委员会(北京市通州区统计年鉴2020). 北京市通州区统计年鉴2020[M/OL]. 2020 [20-12-06]. <http://www.bjtz.gov.cn/bjtz/xxfb/202012/1328359/files/2367072386d44ed9aec39d7f4f684824.pdf>.
- [16] 毛保华, 卢霞, 黄俊生, 等. 碳中和目标下氢能源在我国运输业中的发展路径[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(6): 234-243.
- [17] Ministerstwo Infrastruktury, Poland. Sustainable Transport Development Strategy until 2030[EB/OL]. 2019. <https://www.iea.org/policies/12226-sustainable-transport-development-strategy-until-2030?q=Sustainable%20Transport%20Development%20Strategy%20until%202030&s=1>.
- [18] 冯树民, 廖嘉雯, 赵璇. 基于乘客换乘需求的重叠线路公交调度优化[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(3): 41-47.
- [19] SHI Q, ZHANG K, WENG J, et al. Evaluation model of bus routes optimization scheme based on multi-source bus data[J]. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2021, 10(1): 100342.
- [20] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [21] 李芳德, 张伟捷, 王艳, 等. 夏热冬暖地区农村建筑节能改造与装配式建筑应用分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 1059-1065.
- [22] 王晓波, 李鹏, 张学勇, 马振楠, 陈卫武. 北方地区农村建筑节能减碳潜力分析[J]. 节能, 2022, 41(4): 4-7.
- [23] 张友国. 经济发展方式变化对中国碳排放强度的影响[J]. 经济研究, 2010, 45(4): 120-133.

(责任编辑: 靳炜)

## CO<sub>2</sub> emission characteristics and emission reduction measures of country energy consumption: A case study of Huailai County, Hebei Province

Li Sihang<sup>1,2</sup>, MA Wenlin<sup>1,2,\*</sup>, HAO Han<sup>1,2</sup>, ZHAO Jiali<sup>1,2</sup>

1. Beijing Climate Change Response Research and Education Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044 China; 2. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, School of Environment and Energy Engineering, Beijing 100044 China

\*Corresponding author, E-mail: mawenlin@bucea.edu.cn

**Abstract** In order to study the characteristics of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from energy activities in Huailai County and to formulate scientific and reasonable emission reduction measures, a carbon emission inventory study was carried out for energy activities in Huailai County during 2010-2019. The results showed that the energy activities in Huailai County had reached the carbon peak, and the total CO<sub>2</sub> emissions showed a fluctuating trend of rising, decreasing and maintaining a balance. The overall emission intensity per unit of GDP had been declining year by year, and the decline rate had exceeded the growth rate of GDP for the first time since 2014, and gradually began to offset the increase in carbon emissions brought about GDP growth. Since 2013, the industry and agriculture, forestry, animal husbandry and fishery had successively achieved “carbon peak”, but the CO<sub>2</sub> emissions from the transportation sector and residential sector had been maintained at a high level. Based on the research and future directions of emissions from energy activities in Huailai County, emission reduction measures were proposed for the transport sector and the residential sector. The results of this study can provide reference for county management departments to formulate low-carbon development strategies for energy consumption.

**Keywords** Huailai Town; energy consumption; carbon peak; carbon emission inventory; emission reduction measures