

基于能源结构的甘肃省 CO₂ 排放现状及碳达峰情景研究

陈恒蕤, 周恒左, 孔祥如, 廖 鹏, 潘 峰, 杨 宏
(兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

摘要: 在力争实现“双碳”目标的大背景下, 如何制定合适的减排路径才能较好地实现甘肃省“碳达峰”目标, 成为当前亟须考虑的问题。基于 2008—2017 年的 MEIC 清单, 考虑不同能源的利用效率及排放特征, 对 IPAT 等式进行本地化修正, 计算了 2005—2020 年甘肃省的 CO₂ 排放量, 并设计 3 种情景, 研究了不同发展路径下甘肃省 CO₂ 的排放情况。研究发现, 2005—2020 年甘肃省 CO₂ 排放量呈现波动上升趋势, 且煤炭对于 CO₂ 排放的贡献最大、天然气贡献最小, 石油和电力的 CO₂ 排放贡献则在逐年升高; 甘肃省 CO₂ 排放最大的市(州)依次是兰州、嘉峪关、白银, 在现有发展空间布局下嘉峪关、白银、平凉碳减排的潜力更大; 在 3 种发展情景中, 清洁发展情景是较为适合经济欠发达的甘肃省的发展路径, 此情景下全省可在 2028 年左右实现达峰, 峰值排放量 1.87 亿吨, 2060 年 CO₂ 排放量为峰值的 50.5%。

关键词: 甘肃省; 能源结构; 修正的 IPAT 等式; 达峰情景研究

中图分类号: X22

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022070043

The status quo of CO₂ emissions and carbon peaking scenarios in Gansu Province based on energy structure

CHEN Hengrui, ZHOU Hengzuo, KONG Xiangru, LIAO Peng, PAN Feng, YANG Hong
(College of Atmosphere Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In the context of striving to achieve the “carbon neutrality” and “emission peak” goals, formulating a suitable emission reduction path to effectively achieve the goal of “carbon peak” in Gansu Province has become an urgent issue to be considered. Based on the MEIC inventory from 2008 to 2017 and considering the utilization efficiency and emission characteristics of different energy sources, the IPAT equation was localized and modified. The CO₂ emissions of Gansu Province from 2005 to 2020 were calculated, and 3 scenarios were designed to study the CO₂ emissions under different development paths in Gansu Province. The results showed that from 2005 to 2020, the CO₂ emissions in Gansu Province showed a fluctuating upward trend, with the coal contributing the most of CO₂ emissions and the natural gas contributing the least, and the CO₂ emissions of oil and electricity increased year by year. The cities with the highest CO₂ emissions in Gansu Province were Lanzhou, Jiayuguan, and Baiyin. Under the existing development space layout, Jiayuguan, Baiyin, and Pingliang had a greater potential for carbon emission reduction. Among the 3 development scenarios, the clean development scenario was more suitable as a development path for the economically less-developed Gansu Province. Under this scenario, Gansu province could achieve its “carbon peak” around 2028, with a peak emission of 187 million tons, and CO₂ emissions in 2060 would be 50.5% of the peak.

Keywords: Gansu Province; energy structure; modified IPAT equation; emission peak scenario study

CLC number: X22

二氧化碳(CO₂)的排放改变了大气的辐射收支平衡, 导致对流层近极地地区和极圈温度大幅度上升^[1-3]。自《京都议定书》签订以来, 关注气候变化成为全球重点议题^[4-5], 减少温室气体排放以积极

应对全球变暖成为各国共识^[6-7]。中国力争在 2030 年前后实现“碳达峰”、在 2060 年实现“碳中和”^[8]。作为中国“一带一路”政策参与的重要省份^[9], 为在“一带一路”政策扶持下实现“碳达峰”^[10], 《甘肃省

收稿日期: 2022-07-25

录用日期: 2022-08-29

基金项目: 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2017-65)

作者简介: 陈恒蕤(1997—), 女, 硕士研究生。研究方向: 环境影响评价与污染气象学。E-mail: chenhr20@126.com

通信作者: 杨 宏(1981—), 女, 博士研究生、工程师。研究方向: 环境影响评价、规划与管理。E-mail: yanghongyh@lzu.edu.cn

引用格式: 陈恒蕤, 周恒左, 孔祥如, 等. 基于能源结构的甘肃省 CO₂ 排放现状及碳达峰情景研究[J]. 环境保护科学, 2023, 49(3): 81-88.

国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》提出, 甘肃省“经济结构、能源结构、产业结构加快向绿色低碳转型”, “大力推动非化石能源持续快速增长, 加快调整优化产业结构、能源结构”, “推动能源清洁低碳安全高效利用, 进一步提升非化石能源消费比重”。

国内已有学者用不同方法就不同省份的“碳达峰”进行了预测并提出了相应的实现路径^[11-20], 对甘肃省目前开展的研究主要有: 焦文献等^[21]基于 IPAT 等式研究了甘肃省能源消费的碳排放特征, 提出通过调整能源结构可以促进甘肃省低碳经济的发展^[22]; 唐雯等^[9]基于向量自回归 (VAR) 模型研究了甘肃省能源利用现状; 钱娇^[23]就甘肃省服务业的碳排放因素进行了分析。上述研究对甘肃省目前的 CO₂ 排放现状, 甘肃省实现“碳达峰”的最优路径, 以及不同发展情景下甘肃省不同市 (州) 的 CO₂ 排放量等的研究较少。本研究采用最新的“MEIC (Multi-resolution Emission Inventory for China) 清单”(2017)、《甘肃发展年鉴 2021》提供的甘肃省能源消费数据等, 通过对 IPAT 等式进行本地化修正, 计算甘肃省不同市 (州) 的 CO₂ 排放量, 并研究不同发展情景下甘肃省的“碳达峰”情况, 以期对甘肃省制定减排路径、实现“双碳”目标提供参考。

1 数据与方法

利用 IPAT 等式进行不同政策、情景下 CO₂ 的排放研究是一种较为经典的方法^[24-27]。经典 IPAT 等式把环境影响 (I) 归结为人口 (P)、富裕 (A , 指人均生产或消费) 和技术 (T , 指单位生产或消费的环境影响) 3 个关键驱动力乘积的结果^[28]。其数学形式见式(1):

$$I = P \times A \times T \quad (1)$$

焦文献等^[21]根据经典 IPAT 提出一种基于能源结构计算碳排放的方法, 见式(2):

$$I = E \times \sum_{i=1}^4 \alpha_i \times \lambda_i \quad (2)$$

式中: I 表示碳排放量, t; E 表示能源消费总量, tce; α_i 表示第 i 种能源的结构份额; λ_i 表示第 i 种能源的碳排放系数; i 的取值为 1~4, 分别表示煤炭、石油、天然气和电力 4 种能源。

由于式 (2) 是基于能源结构计算碳排放, 对于同一种能源, 仅用一个通用的碳排放系数表征不同行业的碳排放, 忽略了不同行业对于能源不同的利用效率及排放特征, 这种矛盾在电力行业尤为突出。为了对简单归一的碳排放系数所造成的误差加以订正, 本次研究引入 2008—2017 年的“MEIC 清单”^[29-30](<http://meicmodel.org>) 对式 (2) 进行修正, 见式(3~5):

$$C = E \times \sum_{i=1}^4 \alpha_i \times \lambda_i \times \beta \times \frac{44}{12} - R \quad (3)$$

$$\beta = \text{average}(\beta_j) \quad (4)$$

$$\beta_j = \frac{M_j}{I_j} \quad (5)$$

式中: C 为利用 MEIC 清单修正后的甘肃省 CO₂ 排放总量, t; $\frac{44}{12}$ 为 CO₂ 与碳的相对分子质量之比。 β 为基于 MEIC 清单的修正因子; M_j 表示 j 年的 MEIC 清单中甘肃省 CO₂ 排放总量, t; I_j 表示式 (3) 中 $\beta=1$ 时基于能源计算的甘肃省 CO₂ 排放总量, j 的取值为 2008~2017; R 为采取不同降碳措施引起的 CO₂ 减排量, 在不采取任何降碳措施时 $R=0$ 。

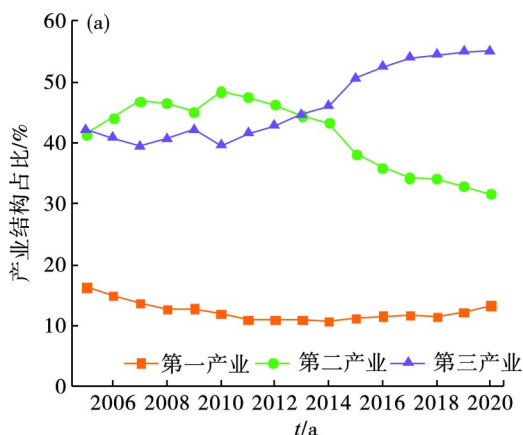
煤炭、石油和天然气的碳排放系数分别取 0.747 6、0.582 5 和 0.447 9 tC/tce^[21,29-33]。根据《省级温室气体清单编制指南》《2010 年中国区域及省级电网平均二氧化碳排放因子》《2011 年和 2012 年中国区域电网平均二氧化碳排放因子》, 以及《综合能耗计算通则: GB/T 2589—2020》提供的电力折标系数, 电力 CO₂ 排放系数在 2005—2009 年取 0.291 5 tC/tce, 在 2010 年取 0.182 7 tC/tce, 在 2011—2020 年取 0.180 1 tC/tce。经式 (4~5) 计算, β_j 的平均值为 1.116 1、方差为 0.002 6, β_j 变化幅度较小, 因此可以采用平均值 β 作为修正因子, 修正因子 $\beta=1.116 1$ 。

甘肃省空间分配因子计算公式, 见式 (6), 表征甘肃省现有能源布局、产业布局下甘肃省各市 (州) 的 CO₂ 排放情况。

$$\mu_m = \frac{M_m}{M} \quad (6)$$

式中: m 代表甘肃省不同的市 (州); μ_m 为 m 市 (州) 的空间分配因子; M 为 MEIC 清单 2017 甘肃省 CO₂ 排放总量, t; M_m 为 MEIC 清单 2017 甘肃省 m 市 (州) CO₂ 排放总量, t。

文中所采用的产业结构数据、地区生产总值GRP(Gross Regional Product)数据和不同能源消费总量数据等均来自《甘肃发展年鉴2021》，用于修正因子计算的数据来源于“MEIC清单”(2008—2017)，用于进行甘肃省空间分配因子计算的数据来源于“MEIC清单”(2017)。



2 研究结果

2.1 甘肃省产业结构特征

甘肃省2005—2020年产业结构变化趋势见图1(a)，2020年不同市(州)的产业结构占比及地区生产总值变化见图1(b)。

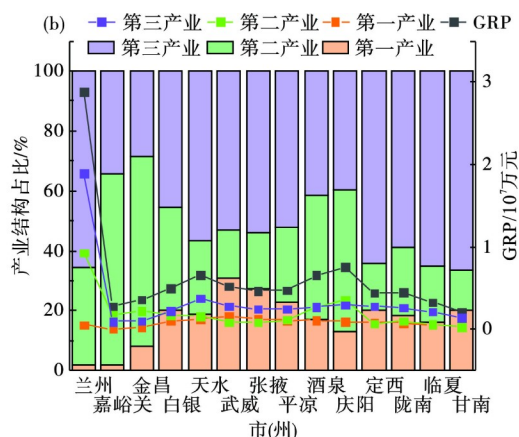


图1 2005—2020年甘肃省产业结构变化趋势(a)和2020年甘肃省不同市(州)的产业结构占比及GRP对比(b)

Fig. 1 (a) shows the change trend of industrial structure in Gansu Province from 2005 to 2020, (b) shows the industrial structure proportion and GRP comparison of different cities in Gansu Province in 2020

图1(a)可知，甘肃省2003—2018年第一产业产值比重较低且呈下降趋势，而2019年和2020年第一产业产值比重有所上升但仍处于较低水平。在2005—2020年甘肃省第二产业产值虽有所波动但仍呈现下降趋势。与此相反，第三产业在2005—2020年呈现波动上升趋势，在2013年第三产业产值超过第二产业占据主导地位，且第三产业与第二产业产值差距进一步扩大。甘肃省产业结构调整基本符合产业结构演变规律，全省经济增长主要由第二产业带动为主转换为主要由第三产业带动，呈现“三二一”的特点，未来甘肃省产业结构将不断优化升级，并向高质量方向发展^[9]。

图1(b)可知，甘肃省经济发展严重不平衡，除省会兰州以外，其余各市(州)地区生产总值均较低。嘉峪关、金昌、酒泉和庆阳产业结构中第二产业占比超过40%，其中嘉峪关、金昌的产业结构中第二产业占比更是超过了50%，这些城市的经济发展十分依赖第二产业。

2.2 甘肃省2005—2020年CO₂排放量

根据2005—2020年的不同能源类型的消耗量及占比，利用修正的IPAT等式(公式3，其中修正因子 $\beta=1.1161$)计算修正后甘肃省2005—2020年CO₂排放量，见图2。

图2可知，2005—2020年天然气、电力的消费量呈逐年上升趋势。其中，天然气消费量增长速度较慢，而电力消费量上升最快，在2014—2016年上升放缓后又呈现迅速上升的趋势。煤炭和石油的消费量呈现出波动上升的趋势，煤炭消费量波动幅度较大，石油消费量波动幅度不明显。

2005—2020年甘肃省CO₂排放量呈现波动上升趋势，且煤炭对于CO₂排放的贡献最大，天然气贡献最小，石油和电力的CO₂排放贡献逐年升高。在2005—2015年，甘肃省CO₂排放量与煤炭消费量有较好的一致性，之后随着煤炭消费量下降和电力消费量的升高，煤炭消费产生的CO₂排放对于甘肃省CO₂总排放的影响有所降低。

2005—2020年甘肃省的地区生产总值(GRP)呈现稳步上升态势，GRP增长速率显著高于甘肃省CO₂排放总量的增长速率，说明随着科学技术进步、产业结构和能源结构的轻微调整^[9,34]，单位GRP的CO₂排放逐年降低(黑色点线)。甘肃省2020年单位GRP CO₂排放与2005年相比降低了66.8%，远超《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》要求的48.4%。

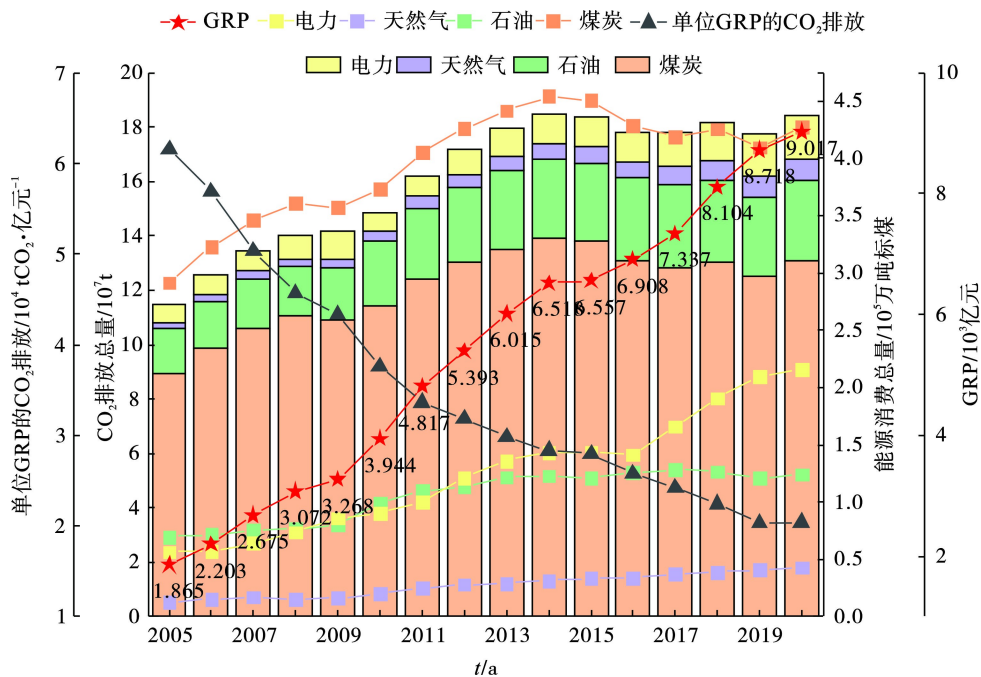


图 2 2005—2020 年基于修正的 IPAT 等式计算的甘肃省 CO₂ 排放总量、不同能源消费总量、GRP 变化及单位 GRP 的 CO₂ 排放量

Fig. 2 the total CO₂ emissions, total consumption of different energy sources, GRP changes and CO₂ emissions per unit of GRP in Gansu Province calculated based on the revised IPAT equation from 2005 to 2020

2.3 不同情景下甘肃省“碳达峰”预测分析

通过能源结构调整、产业结构调整、电力结构调整和能源效率提升设计基准情景、节能发展情景、清洁发展情景和绿色发展情景,见表 1,并利用修正的 IPAT 等式,计算不同情景下甘肃省“碳达峰”的情况,见图 3。

2.3.1 基准情景 基准情景是以 2020 年作为基准,将能源结构、产业结构和电力结构比例冻结在 2020 年,并用 2015—2020 年能源消费总量平均增加值作为未来甘肃省能源消费总量年均增长比例来进行甘肃省 CO₂ 计算的情景。

2.3.2 节能发展情景 节能发展情景是依据王陆新等^[35]对中国“碳达峰”“碳中和”实现路径的研究,通过在发展的不同阶段对整体化石能源增长幅度进行调整,通过能源消费总量的角度来进行 CO₂ 减排的情景。在此过程中,甘肃省能源结构、产业结构、电力结构与基准情景相同,冻结在 2020 年。

2.3.3 清洁发展情景 清洁发展情景是在节能发展情景的基础上,依据王陆新等^[35]的研究,进一步对煤炭、石油和天然气在不同发展阶段的增长水平进行约束,并在 2020 年原有电力结构的基础上新增了风力发电和光伏发电的情景,通过对能源结构和电力结构进行优化调整,是一种较为清洁的发展

路径。

2.3.4 绿色发展情景 绿色发展情景是在清洁发展情景的基础上,用更为严格的增长水平对不同发展阶段的煤炭、石油和天然气进行约束,同时进一步提高风力发电和光伏发电的比例,并通过提升能源利用效率、间接减少火力发电发电量实现能源结构方面的 CO₂ 减排。此外,还考虑了技术进步、电网输送损失降低引起的间接 CO₂ 减排^[13],并在燃煤电厂服务年限临近时逐步进行全省的碳捕集与封存技术改造^[36]。宋鹏等^[13]研究指出,服务业年均就业率提高可以降低 CO₂ 排放,因此通过对产业结构进行调整、提高服务业年均就业率降低 CO₂ 排放^[37]。

绿色发展情景是通过对能源结构、产业结构和电力结构多方面进行调整,从而降低 CO₂ 排放的一种更加高效、强力降碳的情景。

图 3 可知,在基准情景下,甘肃省 CO₂ 排放不会出现峰值,无法实现“碳达峰”。在节能发展情景下,通过阶段性降低化石燃料占比,甘肃省能够在 2033 年前后实现“碳达峰”,CO₂ 排放量峰值为 2.15×10^8 t。在清洁发展情景下,通过在节能发展情景的基础上阶段性调整不同能源结构配比,并逐年提高光伏发电、风力发电等清洁能源的比例,甘肃省能够在 2028 年前后实现“碳达峰”,CO₂ 排放量

峰值为 1.87×10⁸ t。在绿色发展情景下,通过在清洁发展情景的基础上进行产业结构调整、提高能源利用效率、提高清洁能源占比、降低电网损耗,并从

2040 年起对火力发电进行碳捕集与封存改造后,甘肃省能够在 2022 年前后实现“碳达峰”,CO₂ 排放量峰值为 1.75×10⁸ t。

表 1 甘肃省“碳达峰”不同情景设计

Table 1 Different scenarios designs of “emission peak” in Gansu Province

一级情景	二级情景	情景描述	情景支撑
基准情景	未采取任何节能减排措施	甘肃省能源结构、产业结构、电力结构均冻结在2020年	2015—2020年能源消费总量平均每年增加
		甘肃省能源消费总量年均增长1.63%	
节能发展	能源结构调整	甘肃省能源结构、产业结构、电力结构均冻结在2020年	[35]
		2021—2025年化石能源年均增长1.63%	
		2026—2030年化石能源年均增长1.45%	
		2031—2050年化石能源年均降低0.5%	
清洁发展	能源结构调整	2021—2025年化石能源年均增长1.63%	[35]
		2026—2030年化石能源年均增长1.45%	
		2031—2050年化石能源年均降低0.5%	
		2051—2060年化石能源年均降低0.8%	
电力结构低碳化		2021—2030年：煤炭消费量年均下降2.1%，石油、天然气消费年均增长0.8%、4%	[35]
		2031—2050年：煤炭、石油消费量年均下降0.22%、0.17%，天然气消费量在2031—2040年年均增长10.44%，之后年均降低10.58%	
绿色发展	能源结构调整	2051—2060年：煤炭、石油、天然气消费量年均下降6.37%、7.20%、10.58%	[35]
		2021—2025年化石能源年均增长1.63%	
		2026—2030年化石能源年均增长1.45%	
		2031—2050年化石能源年均降低0.5%	
产业结构调整		2021—2030年：煤炭消费量年均下降3%，石油、天然气消费年均增长0.4%、2%	[35]
		2031—2050年：煤炭、石油消费量年均下降0.25%、0.2%，天然气消费量在2031—2040年年均增长5.22%，之后年均降低12%	
能源效率提升		2051—2060年：煤炭、石油、天然气消费量年均下降6.37%、7.20%、10.58%	[13,36]
		服务业年均就业率提高3%	
电力结构低碳化		能源利用效率提升1%	[13]
		风电、光电等清洁能源年均使用率提高1.5%	
		电网输送损失降低1%	[13]
		从2040年起燃煤电厂逐步实行碳捕集与封存改造，年均改造率增加10%	

2.4 不同情景下甘肃省不同市(州)CO₂ 排放情况预测

利用“MEIC 清单”(2017)和式(6)计算甘肃省 CO₂ 在不同市(州)排放的空间分配系数,并计算不改变甘肃省现有能源布局、产业布局的前提下,不同情景 2025 年、2030 年和 2060 年甘肃省各市(州)的 CO₂ 排放量,见表 2 和图 4。

在不改变甘肃省现有能源布局、产业布局的前

提下,CO₂ 排放最大的市(州)依次是兰州、嘉峪关、白银、平凉、酒泉和庆阳,其中兰州的 CO₂ 排放量远远超过其他市(州)占据了甘肃省 CO₂ 排放总量的 20%。这些城市 2020 年的第二产业占比均超过了 28%,其中嘉峪关、酒泉和庆阳的第二产业占比超过了 40%,嘉峪关的第二产业占比更是超过了 50%。虽然兰州市 CO₂ 排放量较高,但从图 1(b)可知,其 GRP 远超其他市(州),2020 年单位 GRP CO₂

排放 (1.49 tCO₂/万元) 远低于嘉峪关 (7.78 tCO₂/万元)、白银 (5.65 tCO₂/万元)、平凉 (3.81 tCO₂/万元)、酒泉 (2.12 tCO₂/万元) 和庆阳 (2.45 tCO₂/万元), 与兰州市相比, 这些城市碳减排的潜力更大。

在节能发展情景即只调整能源消费总量的情景下, 甘肃省不同市(州)CO₂也可以实现在 2033 年左右达峰, 但此情景对 CO₂ 的减排效果有限, 2060 年 CO₂ 排放量为 CO₂ 排放峰值的 84.0%; 而在清洁发展情景即在调整能源消费总量的基础上调整能源消费结构, 在 2030 年左右即可产生一定的碳减排效果, 到 2060 年这种减碳效果更加明显, 2060 年 CO₂ 排放量可以达到 CO₂ 排放峰值的 50.5%; 绿色发展情景对于减碳的效果最为显著, 2060 年 CO₂ 排放量可以达到 CO₂ 排放峰值的 44.4%, 2060 年甘肃省人为 CO₂ 排放量仅为基准年 2020 年的 55.6% 左右, 但这种情景需要依赖科学技术的发展和落后生产工艺的淘汰改造, 可能会在一定程度上影响甘肃省各市(州)的经济发展。因此, 综合上述分析, 本次研究认为, 在这 3 种发展情景中, 清洁发展情景是较为适合经济欠发达的甘肃省的发展路径。

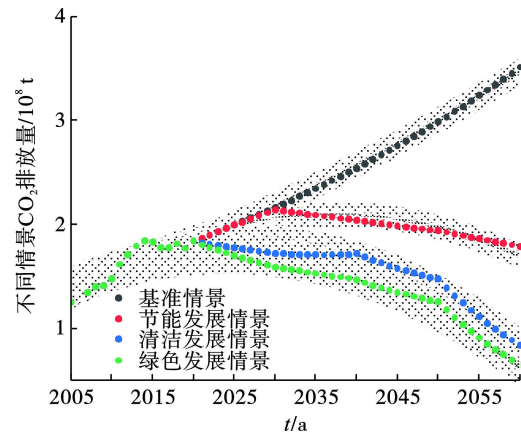


图 3 基于修正的 IPAT 公式在不同情景下甘肃省的“碳达峰”情况预测

Fig. 3 Forecasting of “emission peak” in Gansu Province under different scenarios based on the modified IPAT equation

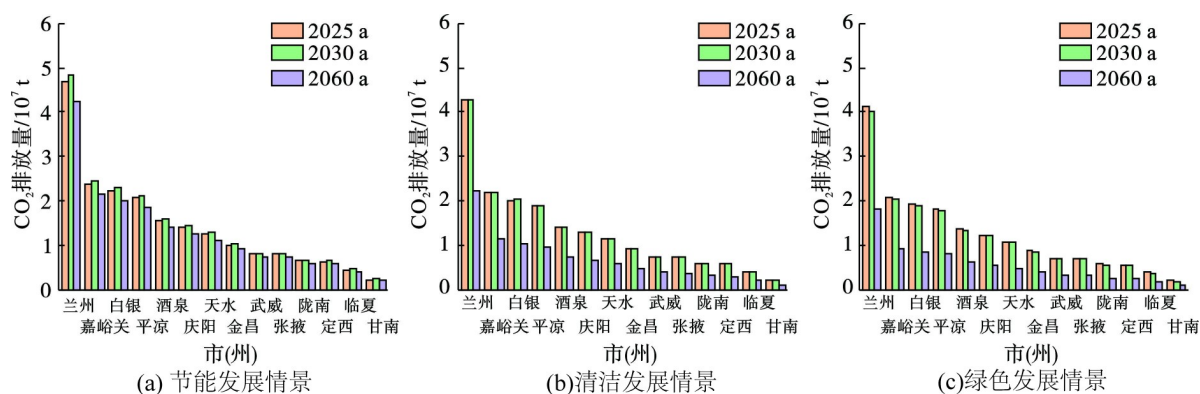
3 政策建议

(1) 能源结构调整。甘肃省现有的能源结构仍然以化石燃料, 尤其是煤炭为主, 通过逐步提高非化石燃料占比, 采用煤改气等措施优化现有的能源结构配比, 能显著降低甘肃省未来 CO₂ 排放。

表 2 不同情景下甘肃省各市(州)CO₂ 排放量预测

Table 2 CO₂ emissions forecasting of cities in Gansu Province under different scenarios 10⁷ tCO₂

市(州)	分配系数	节能发展			清洁发展			绿色发展		
		2025 a	2030 a	2060 a	2025 a	2030 a	2060 a	2025 a	2030 a	2060 a
兰州	0.234	4.696	4.838	4.229	4.272	4.287	2.211	4.117	4.019	1.819
嘉峪关	0.119	2.383	2.454	2.146	2.167	2.175	1.122	2.089	2.039	0.923
白银	0.110	2.216	2.283	1.995	2.015	2.022	1.043	1.942	1.896	0.858
平凉	0.103	2.060	2.122	1.855	1.874	1.881	0.970	1.806	1.763	0.798
酒泉	0.077	1.549	1.596	1.395	1.409	1.414	0.729	1.358	1.326	0.600
庆阳	0.070	1.399	1.441	1.260	1.272	1.277	0.659	1.226	1.197	0.542
天水	0.062	1.236	1.273	1.113	1.124	1.128	0.582	1.083	1.057	0.479
金昌	0.050	0.999	1.029	0.900	0.909	0.912	0.470	0.876	0.855	0.387
武威	0.040	0.797	0.821	0.718	0.725	0.728	0.375	0.699	0.682	0.309
张掖	0.039	0.790	0.814	0.711	0.718	0.721	0.372	0.693	0.676	0.306
陇南	0.032	0.646	0.665	0.582	0.587	0.589	0.304	0.566	0.553	0.250
定西	0.031	0.631	0.650	0.568	0.574	0.576	0.297	0.553	0.540	0.244
临夏	0.022	0.437	0.450	0.394	0.398	0.399	0.206	0.383	0.374	0.169
甘南	0.011	0.219	0.226	0.197	0.199	0.200	0.103	0.192	0.188	0.085
合计	1	20.057	20.663	18.063	18.244	18.308	9.444	17.584	17.164	7.770

图4 不同情景下甘肃省各市(州)CO₂ 排放量预测

(2)可再生能源利用。甘肃省拥有丰富的风电和光电资源,在“碳中和”目标导向下,大力开发风电、光电资源,大力推进河西走廊清洁能源基地建设,提高新能源普及率,降低弃风、弃光率,通过实施降低绿电上网电价等措施倒逼新能源自身绿色发展,并提高可再生能源利用效率、建立风光电经济高效利用机制,促进甘肃省“碳达峰”“碳中和”目标实现。

(3)产业结构调整。甘肃省部分市(州)现有产业结构中第二产业仍占有较高比重,降低第二产业比重、提高第三产业占比,能够在能源结构调整的基础上进一步降低甘肃省 CO₂ 排放,但此举会在一定程度上降低甘肃省经济发展速度。

(4)淘汰落后工艺。随着科学技术发展逐步淘汰落后工艺、引进新工艺,能够提高能源利用效率并显著降低 CO₂ 排放。在甘肃省经济发展到一定程度后可逐步实行碳捕集与封存改造,此举可为甘肃省实现“碳中和”目标提供可能。

(5)区域协调发展。甘肃省部分市(州)经济过度依赖第二产业,如嘉峪关、白银、平凉、酒泉和庆阳,建议这些城市加强区域间,尤其是高耗能工业部门之间的协作,通过资金融合、技术共享等措施,提升区域整体节能减排效率、实现区域间协调发展。通过加强植树造林等措施增强甘肃省自然源的固碳、减碳作用,并协同林业部门进行甘肃省自然碳汇核算,更全面地对甘肃省“碳中和”目标加以阐释。

参考文献

[1] IPCC, 2018. Special report on global warming of 1.5°C[R]. UK: Cambridge University Press, 2018.
 [2] 王兆夺, 祝超伟, 于东生. 全球气候变化背景下对“温室效应”的思考[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 2017, 40(3): 407-414.

[3] MIKHAYLOV A, MOISEEV N, ALESHIN K, et al. Global climate change and greenhouse effect[J]. *Entrepreneurship and sustainability issues*, 2020, 7(4): 2897-2913.
 [4] 胡海超.《京都议定书》与应对气候变化的国际博弈研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013.
 [5] 丁治平.《京都议定书》下温室气体减排机制研究[D]. 上海: 华东政法大学, 2008.
 [6] ARROW K. Global climate change: A challenge to policy[J]. *The economists' voice*, 2007, 4(3): 1-5.
 [7] ZHAO Q. A review of pathways to carbon neutrality from renewable energy and carbon capture[J]. *E3S web of conferences*, 2021, 245(1-4): 01018.
 [8] GAO Y. China's response to climate change issues after Paris Climate Change Conference[J]. *Advances in climate change research*, 2016, 7(4): 235-240.
 [9] 唐雯, 柴洪, 谈存峰. 甘肃省产业结构与能源消费关系研究——基于 VAR 模型[J]. *中国能源*, 2021, 43(5): 73-80.
 [10] 卢昌彩. 绿色革命与国际合作的范式: “碳达峰、碳中和”与“一带一路”双赢选择[J]. *决策咨询*, 2022(1): 76-82.
 [11] 闫新杰, 孙慧. 基于 STIRPAT 模型的新疆“碳达峰”预测与实现路径研究[J]. *新疆大学学报(自然科学版)(中英文)*, 2022, 39(2): 206-212.
 [12] 关敏捷, 袁艳红, 冉木希, 等. 基于 STIRPAT 模型的山西省能源碳排放影响因素及峰值预测[J]. *中国煤炭*, 2021, 47(9): 48-55.
 [13] 宋鹏, 张慧敏, 毛显强. 面向碳达峰目标的重庆市碳减排路径[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(3): 1446-1455.
 [14] 席细平, 谢运生, 王贺礼, 等. 基于 IPAT 模型的江西省碳排放峰值预测研究[J]. *江西科学*, 2014, 32(6): 768-772.
 [15] 聂锐, 张涛, 王迪. 基于 IPAT 模型的江苏省能源消费与碳排放情景研究[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(9): 1557-1564.
 [16] 芦颖, 李旭东, 杨正业. 贵州省能源碳排放现状及峰值预测[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(11): 173-180.
 [17] 郑松华. 基于随机前沿模型的中国西部地区碳排放效率评价研究[J]. *柴达木开发研究*, 2014(1): 37-39.
 [18] 董棒棒, 李莉, 唐洪松, 等. 环境规制、FDI 与能源消费碳排放峰值预测——以西北五省为例[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(3): 689-697.
 [19] QIANG L, GU A, FEI T, et al. Peaking China's CO₂ emissions: trends to 2030 and mitigation potential[J]. *Energies*, 2017, 10(2): 209.
 [20] GREEN F, STERN N. China's changing economy: implications for its carbon dioxide emissions[J]. *Climate policy*, 2017, 17(1-

- 4): 423 – 442.
- [21] 焦文献, 陈兴鹏. 基于 IPAT 等式的甘肃省能源消费碳排放特征分析及情景预测[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(10): 180 – 184.
- [22] 闫楷若. 甘肃省能源消费结构研究——基于动态偏离份额模型[J]. *甘肃科学学报*, 2015, 27(4): 114 – 117.
- [23] 钱娇. 甘肃省服务业发展碳排放变动及影响因素分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2015.
- [24] DANISH, ZCAN B, ULUCAK R. An empirical investigation of nuclear energy consumption and carbon dioxide (CO₂) emission in India: Bridging IPAT and EKC hypotheses[J]. *Nuclear engineering and technology*, 2020, 53(6): 2056 – 2065.
- [25] CHONTANAWAT J. Decomposition analysis of CO₂ emission in ASEAN: An extended IPAT model[J]. *Energy procedia*, 2018, 153: 186 – 190.
- [26] HWANG Y, UM J, SCHLUTER S. Evaluating the mutual relationship between IPAT/Kaya identity index and ODIAC-based GOSAT fossil-fuel CO₂ flux: Potential and constraints in utilizing decomposed variables[J]. *International journal of environmental research and public health*, 2020, 17(16): 5976.
- [27] KASHEM M, RAHMAN M. CO₂ emissions and development indicators: a causality analysis for Bangladesh[J]. *Environmental processes*, 2019, 6(2): 433 – 455.
- [28] EHRlich P, HOLDREN J. Impact of population growth[J]. *Science*, 1971, 171(3977): 1212 – 1217.
- [29] LI M, LIU H, GENG G, et al. Anthropogenic emission inventories in China: a review[J]. *National science review*, 2017, 4(6): 834 – 866.
- [30] ZHENG B, TONG D, LI M, et al. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J]. *Atmospheric chemistry and physics*, 2018, 18: 14095 – 14111.
- [31] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory [R]. UK: Cambridge University Press, 2006.
- [32] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory [R]. UK: Cambridge University Press, 2019.
- [33] 国家统计局工业交通统计司. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [34] 朱智文, 张娟娟. 甘肃省能源消费、产业结构和经济增长的关系[J]. *开发研究*, 2015(1): 84 – 88.
- [35] 王陆新, 王越, 王永臻. 碳达峰碳中和背景下我国能源发展多情景研究[J]. *石油科技论坛*, 2022, 41(1): 78 – 86.
- [36] 刘飞, 关键, 祁志福, 等. 燃煤电厂碳捕集、利用与封存技术路线选择[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(7): 1 – 13.
- [37] LI R, WANG Q, LIU Y, et al. Per-capita carbon emissions in 147 countries: The effect of economic, energy, social, and trade structural changes[J]. *Sustainable production and consumption*, 2021, 7(27): 1149 – 1164.

(上接第 61 页)

参考文献

- [1] GUO J, LUA A C. Adsorption of sulphur dioxide onto activated carbon prepared from oil-palm shells with and without pre-impregnation[J]. *Separation and purification technology*, 2003, 30(3): 265 – 273.
- [2] 李粟莹. 活性炭吸附技术在水处理中的应用[J]. *化工管理*, 2020(23): 116 – 117.
- [3] 张晓涛. 木质纤维素/层状硅酸盐纳米复合材料的制备及吸附性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [4] NEKOU EI F, NEKOU EI S, TYAGI I, et al. Kinetic thermodynamic and isotherm studies for acid blue 129 removal from liquids using copper oxide nanoparticle-modified activated carbon as a novel adsorbent[J]. *Journal of molecular liquids*, 2015, 201: 124 – 133.
- [5] 左雨欣, 任晓聪. 常用吸附剂及其回收再生技术研究[J]. *当代化工研究*, 2021(6): 41 – 42.
- [6] YE N, CIMETIERE N, HEIM V, et al. Upscaling fixed bed adsorption behaviors towards emerging micropollutants in treated natural waters with aging activated carbon: Model development and validation[J]. *Water research*, 2019, 148: 30 – 40.
- [7] 刘剑, 鄢瑛, 张会平. 甲苯在结构化固定床上的吸附性能研究[J]. *材料导报*, 2014, 28(14): 44 – 47.
- [8] 陈天崖, 张世豪, 王亚茹. 活性炭固定床吸附硝基苯废水性能研究[J]. *湖北农业科学*, 2019, 58(8): 71 – 73.
- [9] WANG R C, CHANG S C. Adsorption/desorption of phenols onto granular activated carbon in a liquid-solid fluidized bed[J]. *Journal of chemical technology and biotechnology*, 1999, 74(7): 647 – 654.
- [10] 唐思. 流化吸附法去除水中苯酚的材料及工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [11] LANGMUIR I. The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass Mica and Platinum[J]. *Journal of the american chemical society*, 1918, 40: 1361 – 1403.
- [12] FREUNDLICH H. Über die Adsorption in Lösungen[J]. *Ztschrift physikalische chemie*, 1906, 57: 385 – 471.
- [13] NAJA G, VOLESKY B. Behavior of the mass transfer zone in a biosorption column[J]. *Environmental science & technology*, 2006, 40(12): 3996 – 4003.
- [14] DOU B L, CHEN B B, GAO J S, et al. HCl removal and chlorine distribution in the mass transfer zone of a fixed-bed reactor at high temperature[J]. *Energy & fuels*, 2006, 20(3): 959 – 963.
- [15] VIEIRA M G A, NETO A F A, GIMENES M L, et al. Removal of nickel on Bofe bentonite calcined clay in porous bed[J]. *Journal of hazardous materials*, 2010, 176(1-3): 109 – 118.
- [16] 高宇翔. VOCs 在活性炭固定床上的吸附动力学[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [17] 周璇, 张均龙, 马彦涛. 浅谈农村污水处理现状及展望[J]. *农业与技术*, 2020, 40(18): 56 – 58.
- [18] 周兵. 活性炭吸附脱硝实验研究和数学模拟[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- [19] Ahmad A A, Hameed B H. Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste[J]. *Journal of hazardous materials*, 2010, 175(1-3): 298 – 303.