DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.07.013

京津冀协同推进碳达峰碳中和路径研究

黄昱杰[1,2]，刘贵贤[1,2]，薄宇[3]，王洁[1,2]，曹明悦[4]，鲁玺[1,2,5,6]，贺克斌[1,2,5,6]

（1. 清华大学环境学院，北京 100084；2. 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室，北京 100084；3. 中国科学院大气物理研究所，北京 100029；4. 中国农业大学国际学院，北京 100083；5. 清华大学碳中和研究院，北京 100084；6. 环境前沿技术北京实验室，北京 100084）

摘要：京津冀地区是我国能源消耗、碳排放的集聚区，研究区域内碳达峰、碳中和的推进举措，对实现高质量的区域协同发展至关重要。本文构建了考虑京津冀地区特征的长期能源替代规划系统模型（LEAP-BTH），设置了基准情景、低碳情景、协同情景等主要情景以及8个子情景，完成了2021—2060年京津冀地区相应发展路径的预测分析。结果表明：在基准情景下，京津冀地区能源需求将持续增长，2060年北京市、天津市、河北省的碳排放量分别下降为2020年的41%、40%、53%，实现碳中和目标面临较大挑战；在低碳情景下，2060年北京市、天津市、河北省的碳排放量分别下降为2020年的20%、26%、46%，相比碳中和目标仍有一定差距；在协同情景下，2060年北京市、天津市、河北省的碳排放量分别下降为2020年的13%、15%、21%，能够基本实现碳中和目标。研究建议，京津冀三省市需针对各自的重点减排部门和路径，提出更明确、更严格的应对措施，如北京市重点推动交通、建筑部门的低碳转型，天津市、河北省着力开展可再生能源替代与工业绿色升级；优化顶层设计，挖掘区域内工业、能源、交通等部门的协同发展潜力，重点推动产业协同升级和能源协同发展，据此支撑京津冀地区的“双碳”工作和高质量发展。

关键词：京津冀协同发展；LEAP-BTH模型；能源需求；“双碳”目标

中图分类号：X321　　**文献标识码：**A

Beijing–Tianjin–Hebei Coordinated Development toward the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals

Huang Yujie[1,2], Liu Guixian[1,2], Bo Yu[3], Wang Jie[1,2], Cao Mingyue[4], Lu Xi[1,2,5,6], He Kebin[1,2,5,6]

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Beijing 100084, China; 3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. International College Beijing, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 5. Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 6. Beijing Laboratory of Environmental Frontier Technologies, Beijing 100084, China)

Abstract: The Beijing–Tianjin–Hebei (BTH) region is intensive in energy consumption and carbon emission. Under the constraint of the carbon peaking and carbon neutrality goals, it is significant to analyze the coordinated development policies that synergistically

收稿日期：2022-11-21；**修回日期：**2023-01-05

通讯作者：鲁玺，清华大学环境学院教授，研究方向为碳中和能源系统、温室气体与大气污染物排放；E-mail: xilu@tsinghua.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“环境领域工程科技未来20年发展战略研究”(2021-XBZD-13)；国家社会科学基金项目(22AZD094)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

promote low-carbon economic and social transformation in the BTH region. A long-range energy alternatives planning system (LEAP)-BTH model is constructed considering the characteristics of the BTH region, to analyze the energy demand and carbon emission of the region from 2021 to 2060. Three scenarios are considered, namely baseline scenario, low-carbon scenario, and coordinated scenario, and eight sub-scenarios are taken into account. The results indicate that: (1) In the baseline scenario, the energy demand in the BTH region will continue to grow, and the carbon emissions of Beijing, Tianjin, and Hebei in 2060 will decrease to 41%, 40%, and 53% of that in 2020, respectively, facing great challenges for achieving carbon neutrality. (2) In the low-carbon scenario, the carbon emissions of Beijing, Tianjin, and Hebei in 2060 will decrease to 20%, 26%, and 46% of that in 2020, respectively, and the BTH region will still not be carbon neutral. (3) In the coordinated scenario, the carbon emissions of Beijing, Tianjin, and Hebei in 2060 will decrease to 13%, 15%, and 21% of that in 2020, respectively, thus achieving carbon neutrality. Several suggestions were further proposed. Beijing, Tianjin, and Hebei should adopt clearer and stricter policies for their key emission reduction sectors and measures. For example, Beijing should promote low-carbon transition in its transportation and construction sectors, while Tianjin and Hebei should promote renewable energy alternatives and low-carbon industrial upgrading. Top-level design should be optimized to fully tap the potentials for coordinated development of industry, energy, transportation, and other sectors, with the focus on promoting coordinated industrial upgrading and coordinated energy development.

Keywords: Beijing–Tianjin–Hebei coordinated development; LEAP-BTH model; energy demand; carbon peaking and carbon neutrality

一、前言

2020 年，我国正式提出了碳达峰、碳中和（“双碳”）战略目标，以积极应对气候变化并着力化解资源环境约束。京津冀地区作为我国三大城市群之一，是能源消耗密集区[1]，碳排放量约占全国的11%[2]，碳排放强度高出全国平均水平约40%。在推进“双碳”目标的进程中，京津冀地区“分量”较重。然而，京津冀三省市所处发展阶段有差异，面临的低碳转型挑战也有区别[3]：北京市已完成工业化，碳达峰目标容易实现[4]，但受限于风光资源短缺、绿电供应不足等约束，能源、建筑、交通等部门的电气化转型面临挑战，碳减排进展相对缓慢[5]；天津市以制造业为支柱（第二产业占比为34.1%且保持较快增长[6]），能耗和碳排放强度较高，产业低碳转型以及结构性调整面临挑战；河北省仍处于工业化阶段（第一、二产业占比分别为10.1%、37.6%[7]），钢铁等重工业占比较高，在淘汰落后产能、推动产业转型升级、提升能效方面压力较大。

作为国家战略，京津冀协同发展以产业协同、交通一体化等为重点领域，构成推进区域内“双碳”工作的有力依托：产业协同有利于三省市发挥各自比较优势，共同形成京津冀地区的产业链和创新链，协同开展产业转型升级和能效优化；能源协同可同步解决河北省绿电消纳、北京市绿电短缺等问题；交通一体化在优化运输结构、提高交通效率、助力交通部门减排方面潜力突出[8]。在“双碳”背景下，全面把握京津冀协同发展的新内涵，辨识并提出有利于推动“双碳”工作的协同措施，对京津冀地区的更高质量协同发展具有重要意义。

目前，学术层面的京津冀协同发展以定性研究居多，而定量研究不显充分；现有的京津冀地区协同减碳路径定量研究主要包括三类。① 针对京津冀地区的单一或多个城市进行建模，如北京市[9,10]、张家口市[11]、京津冀及周边“2+26”城市[12]；多针对道路交通、钢铁等单一部门 / 行业，所采用的模型结构精细度不高、适应性一般。② 将京津冀地区当作整体，开展单一部门的建模研究，如交通[13,14]、钢铁[15]、电力[16]、能源[17,18]等，而未考虑区域协同效应；将三省市的数据直接加总并整体性构建模型，未考虑三省市在经济结构、能源结构、发展政策等方面的不同，没有反映京津冀协同中的差异性定位。③ 定量分析单一协同措施对京津冀地区的影响作用，如产业转移[19]、能源协同[20,21]、污染治理协同[22]。

梳理现有文献可见，有关京津冀协同减碳研究存在一些不足之处：① 政策背景考虑不充分，如京津冀“双碳”路径研究的情景设定没有及时全面地引入“十四五”规划内容，导致情景设置与最新规划脱节（“十四五”时期是低碳转型、碳达峰的窗口期[23]，对京津冀“双碳”发展路径有着重要影响）；② 未能整体性考虑协同措施，有关定量研究基本没有将交通一体化、产业转移与协同升级、能源协同发展等跨领域协同措施纳入统一分析框架；③ 模型结构不够精细，应用于钢铁等重要部门时难以充分体现行业能效提高、产量控制等对减碳工作的影响。

针对于此，本文尝试在以下方面开展探索：尽量全面考虑京津冀协同发展、“十四五”规划等政策，基于情景分析法评估现有政策对京津冀地区的碳减排效应；自下而上地构建考虑京津冀地区特征的长期能源替代规划系统（LEAP-BTH）模型，将交通一体化、产业协同升级、能源协同发展等跨领域协同措施纳入统一框架，力求系统分析京津冀协同发展的碳减排潜力；合理提高模型精细度，体现高能耗部门的能效提高、产量控制等对碳减排的影响，改善模型结果的准确性。

二、研究方法和基础数据

（一）基于LEAP模型的能源需求与碳排放核算方法

1. 模型框架

LEAP模型[24]支持基于情景分析的能源需求预测，加总各部门的能源需求，比较并分析本地资源产出能否满足需求；若不满足需求则计算由此引起的资源进出口量，实现资源、能源需求量、产量、进出口的平衡。在LEAP模型中，根据各经济部门的历史数据和政策措施，输入各个情景的具体设置，据此计算给定情景下未来年的能源需求，进而计算能源结构和温室气体排放量；具有较高的建模灵活性、较强的情景分析能力，在区域经济、能源、碳排放的情景分析研究方面获得较多应用[9~15]。本文基于LEAP模型框架，结合京津冀地区的能源结构、产业结构等特征，构建了LEAP-BTH模型（见图1）；包含了关键假设、终端能源需求、能源加工转换等主要模块，将各部门的活动简化为能源、物质的消耗与产出。LEAP-BTH模型以2020年为基准年，预测期为2021—2060年，时间步长为1年，区域范围是北京市、天津市、河北省。

2. 关键假设

常住人口及城镇化率。2020年北京市、天津市的城镇化率约为85%，处于较高水平；北京市人口趋于稳定，天津市、河北省近5年平均变化幅度均小于0.3%，没有出现明显的增/减趋势。因此，假设京津冀地区在预测期内的常住人口保持不变。受数据可得性的限制，将北京市、天津市的城市和农村居民生活部门的能源消耗合并计算。2020年，河北省城镇化率为60.1%，据历史趋势预测2030年城镇化率上升至75%，之后保持不变。

地区生产总值及三次产业结构。根据京津冀协同的整体布局、三省市各自的功能定位及其“十四五”规划，参照实际发展趋势及相关文献预测结果，结合对相关管理部门的访谈内容，开展京津冀

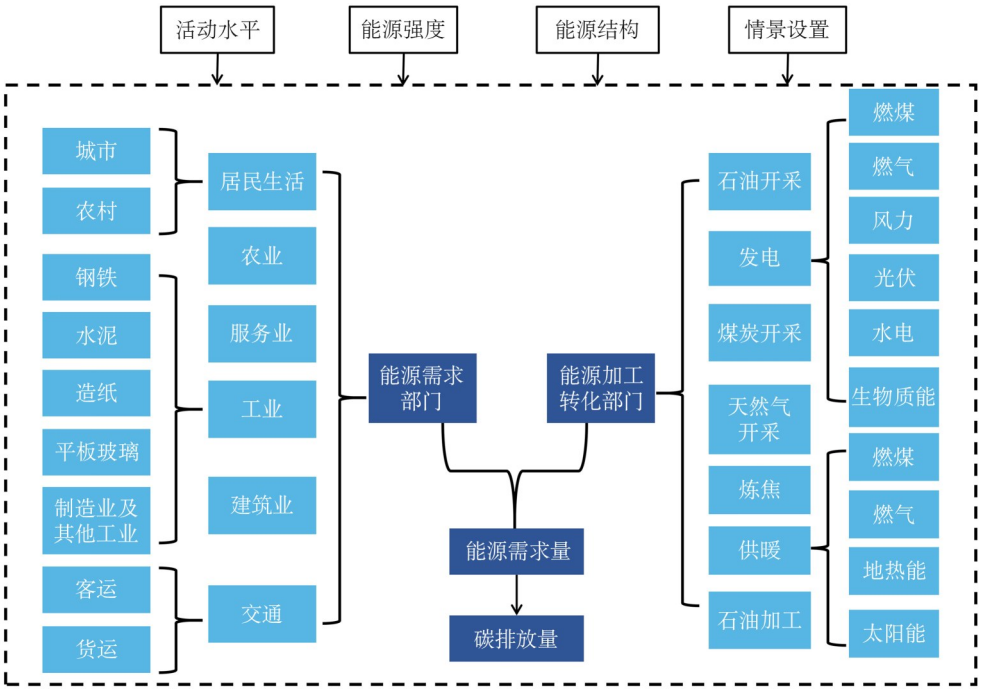

图1　LEAP－BTH模型结构

地区年均经济增速、三次产业结构等参数的评估和假定（见表1、表2）。例如，预测天津市第二产业占比提高的主要原因是政策层面高度重视工业发展，近5年的占比有逐渐提高趋势[6]；预测北京市经济增速的主要依据是有关文献测算的中长期经济增长率（0.2%[25]至4%[10]）以及当前发展政策、管理部门调研内容等；其余参数设置的考虑类似，为凝练表达而不赘述。研究期内北京市、天津市、河北省的第三产业占比分别于2035年、2025年、2035年之后保持不变。

3. 能源加工转化

能源加工转化模块包括天然气、煤炭、石油等一次能源开采，石油加工、焦化等一次能源加工，电力、热力生产与供应等过程；主要应用LEAP模型的缺省峰值负荷曲线、各发电类型的最大可利用率。

4. 能源需求

能源需求模块涵盖居民生活、交通运输、工业、服务业、农业、建筑业等主要用能部门。工业部门下各产业的能耗计算方法有两种：针对钢铁、水泥、平板玻璃、造纸等高能耗部门，采用产品产量代表活动水平、单位产品能耗代表能源强度；对于其他工业部门，采用增加值代表活动水平、单位增加值能耗代表能源强度。

交通运输分为客运和货运，其中客运包括私人汽车、公交车、出租车、轨道交通，活动水平以行驶里程衡量。2020年北京市交通部门中各类交通方式的活动水平与能源结构如表3所示，天津市、河北省的数据结构与北京市相似，而行驶里程、能耗类型占比等参数依据地区特征而设置。

5. 碳排放

碳排放的核算范围是与能源生产、转换、消耗相关的各种经济活动及其产生的直接碳排放，不考

表1　京津冀地区年均经济增速预测

省市	经济增速/%		
	2021—2025年	2026—2035年	2036—2060年
北京市	5.0	4.6	2.0
天津市	6.0	5.0	3.0
河北省	6.0	5.0	4.0

表2　京津冀地区三次产业结构现状及预测

省市	第一产业			第二产业			第三产业		
	2020年	2025年	2035年	2020年	2025年	2035年	2020年	2025年	2035年
北京市	0.3	0.1	0.1	15.0	12.2	9.9	84.7	88.7	90.0
天津市	1.5	1.5	—	34.1	38.5	—	64.4	60.0	—
河北省	10.7	10.0	10.0	37.6	35.0	30.0	51.7	55.0	60.0

表3　北京市交通部门活动水平与能源结构（2020年）

部门		交通方式	数量/$\times10^4$辆	行驶里程	能耗类型	占比/%	能源强度
客运	公共交通	公交车	2.4	44 586 km	柴油	12.6	9.93 MJ/vkm
					天然气	42.4	9.43 MJ/vkm
					电	45.0	3.3 kW·h/vkm
		轨道交通	—	6.736×10^8 vkm	电力	100.0	10.3 kW·h/vkm
	私人交通	私人汽车	507.9	10 382 km	汽油	92.3	2.8 MJ/vkm
					电	7.7	0.5 MJ/vkm
		出租车	7.49	32 758 km	汽油	88.4	2.8 MJ/vkm
					电	11.6	0.5 MJ/vkm
货运		公路	52.4	2.656×10^{10} tkm	汽油	58.2	0.17 MJ/tkm
					柴油	37.4	0.21 MJ/tkm
					电	4.4	0.04 MJ/tkm
		铁路	—	2.443×10^{10} tkm	柴油	25.0	0.004 1 kgce/tkm
					电	75.0	0.001 4 kgce/tkm

注：vkm表示车千米；tkm表示吨千米。

虑电力等二次能源调入产生的间接碳排放以及农业、畜牧业、林业、土地利用等方面的碳排放变化，甲烷等非CO_2温室气体排放等。采用联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC，2006）方法计算碳排放量。

（二）基础数据与情景设置

研究采用的数据来自公开资料、课题组对管理部门的调研访谈。京津冀三省市的社会经济、能源生产及使用等历史数据主要源于2020年和2021年《北京统计年鉴》[26]、《天津统计年鉴》[27]、《河北统计年鉴》[28]；更详细的现状数据来自对管理部门调研访谈（见表4）。此外，能源的碳排放因子源于LEAP模型中的技术和环境数据库。研究设置的京津冀地区发展情景主要有基准情景、低碳情景、协同情景（见表5）。

1. 基准情景

2021—2060年京津冀三省市各部门的活动水平、能源强度等参数，主要依据国家和区域“十四五”规划、现行的区域协同发展战略等政策文件及相关文献等进行设置。

对于交通部门，客运交通出行结构不断优化，绿色出行占比持续增加；轨道交通出行量年增长率在“十四五”时期为10%，随后降为3%；主要参数有公共交通、轨道交通的出行占比，机动车保有量，新能源私人汽车、公交车、出租车、货车的保有量[34]等。

对于工业部门，用能结构调整、生产技术提高对工业的影响等是考虑因素，主要参数有“十四五”时期能源强度、终端用能单位电气化率等；有关具体工业产品的产量预测，主要参照当前产量的变化趋势以及有关产能控制的政策。需要说明的

表4　研究采用的核心指标及数据来源

部门	核心指标	数据来源
居民生活	常住人口 人均居住面积 能源强度与结构	京津冀三省市统计年鉴、《中国城市统计年鉴》[29]
工业	产量 单位产量能耗	管理部门调研、京津冀三省市统计年鉴、《中国工业统计年鉴》[30]
交通	机动车保有量 行驶里程 能源强度	管理部门调研、京津冀三省市统计年鉴、《城市轨道交通年度统计和分析报告》[31]、《中国城市统计年鉴》《北京市交通发展年度报告》[32]、研究论文[33]
电力	装机容量 发电量	管理部门调研、京津冀三省市统计年鉴、《中国电力统计年鉴》《中国能源统计年鉴》
其他	增加值 能源强度与结构	京津冀三省市统计年鉴

表5　3类情景的主要内涵及子情景

情景设置	情景内涵	子情景
基准情景	按照当前趋势发展，体现现行政策措施的实施效果与目标约束	—
低碳情景	在基准情景的基础上，强化能源消费、社会发展的碳排放约束，提高碳减排措施的实施力度	低碳交通 可再生能源替代 工业绿色升级 低碳建筑
协同情景	在低碳情景的基础上，考虑京津冀协同发展政策及规划，深挖减排潜力，进一步提出有利于降低碳排放的区域协同发展措施	交通一体化 产业协同 低碳技术共享 能源协同

是，针对主要工业部门，采用产品产量（如钢铁产量）表示活动水平，由单位产品能耗（如吨钢生产能耗）表示能源强度；课题组还调研访谈了相关管理部门，以更好把握相关数据的后续变化趋势。例如，在推行钢铁行业“去产能”政策后，河北省的钢铁产量在2021—2023年每年下降8%，之后每年下降1%；2025年之前吨钢生产能耗每年下降0.4%，之后每年下降1%。

对于居民生活、建筑业与服务业部门，推广装配式建筑等低碳绿色的建筑方式、对现有建筑进行节能改造等措施是考虑因素，主要参数有建筑业、服务业的能源强度，居民生活的能源消耗强度，居民终端用能电气化率等。“十四五”时期，建筑业、服务业的能源强度每年下降3%，之后每年下降1%；2035年居民终端用能电气化率达到90%，完全淘汰煤炭消耗。

对于能源部门，煤电、气电、光伏发电、风电的装机容量和发电量，供暖能源消耗总量、供暖方式、供暖能源种类[35]等是考虑因素。

2. 低碳情景

挖掘现行政策的碳减排潜力，结合文献资料，预测各子情景下相关经济部门的变化情况。以北京市为例，低碳情景的4个子情景及其包含的关键措施如表6所示。

低碳交通包括交通电气化、运输方式转变：对于前者，在“十四五”规划的基础上加快电动汽车推广并在2050年完全取代汽油车，公交车、出租车分别在2030年、2035年完成电气化替代[10]；对于后者，提高公共交通对私人交通的替代水平，实现轨道交通客运量、公交车数量的稳定增长。

对于可再生能源替代，在基准情景的基础上，加快煤电退役进度，推广可再生能源发电和供暖模式[36]；北京市挖掘分布式光伏和地热供暖的潜力，河北省发展风电和光伏发电，天津市提早煤电退役时间。

对于工业绿色升级，在基准情景的基础上，推广应用低碳节能技术，促进能源强度持续下降，提高用能终端的电气化替代水平；吨钢生产能耗在“十四五”时期每年下降0.6%，之后每年下降1.5%。

对于低碳建筑，加快用能终端的电气化替代，2030年居民生活部门的煤炭被完全取代，电气化率为90%；提高建筑的能源效率，居民生活的能源强度在2035年之后不再增长，建筑业、服务业在2035年之后能源强度每年下降1.5%。

3. 协同情景

在低碳情景的基础上，强化京津冀协同发展的

表6　北京市低碳情景的子情景及关键措施

子情景	关键措施	主要内涵
低碳交通	推广新能源出租车	2035年完成电气化替代
	推广新能源公交车	2030年完成电气化替代
	推广电动私人汽车	2050年完成电气化替代
	推广公交车出行	2025年之后公交车数量年增长率提高到2.5%
	推广轨道交通出行	2025年之后客运量年增长率提高到3.5%
	降低私人汽车行驶里程	2025年之后不再增长
	控制私人汽车总量	2030年之后不再增长
可再生能源替代	推广分布式光伏发电	2060年装机容量为1.2×10^7 kW
	推广生物质能发电	2060年装机容量为2×10^6 kW
	推广风力发电	2060年装机容量为1.5×10^6 kW
	推广太阳能供暖	2060年占热力生产的35%
	推广地热供暖	2060年占热力生产的35%
工业绿色升级	提高用能终端电气化水平	2050年电气化率为95%
	推广节能低碳技术	2025年之后能源强度每年下降1.5%
低碳建筑	居民建筑绿色更新	2035年之后能源强度不再增长
	居民建筑用能终端电气化	2030年煤被完全取代，电气化为90%
	公共建筑绿色更新	2035年之后能源强度每年下降1.5%
	公共建筑用能终端电气化	2050年电气化率为77%

政策力度，进一步提出有利于区域低碳发展的协同措施，同时体现一定的政策前瞻性。协同情景的4个子情景及其包含的关键措施如表7所示。

对于交通一体化，结合“京津冀交通一体化”远景规划，2035年基本实现“轨道上的京津冀”，轨道交通成为出行的主要方式，而私人汽车的年行驶里程稳步减少；发展氢能产业链，“十四五”时期推广1×10^4辆氢能源车，2035年氢能源车占私人汽车的比例为5%；共建共享全域路网的电动车配套基础设施，电动车占比进一步提高；铁路网基础设施建设稳步实施，加速货运部门“公转铁”并发展“港铁联运”，提高铁路货运占比及其电气化率。

对于产业协同发展，北京市转移出一般性的工业和制造业，发展智能和高端制造业，优化工业结构，发挥科技引领作用；天津市、河北省承接产业转移和对口产业帮扶，整合产业资源，推动产业链协同升级，进一步提高综合能效[37]，2060年吨钢生产能耗下降53%[38]。

对于低碳技术共享，将新建城区（如北京城市副中心、河北雄安新区）的低碳建筑技术扩散到整个区域，推广低能耗建筑[38]；北京市建筑业能源强度进一步降低，2060年天津市和河北省的建筑业、服务业、城市居民生活的能源强度下降至北京市低碳情景水平。

对于能源协同，京津冀地区统筹构建高效、智能电力系统，支撑更高比例的可再生能源上网，提高可再生能源消纳率，促进风光资源的充分开发利用[39]；2050年煤电、气电机组基本退役并转为调峰与储备能源，电力完全由可再生能源提供。

三、京津冀地区能源需求与碳排放模拟结果

（一）基准情景的能源需求与碳排放预测

对于基准情景，京津冀三省市的能源需求、碳排放预测结果如图2所示。本研究获得的模拟结果具有合理性，与两方面数据基本吻合：中国碳核算数据库（CEADs）的省级碳排放清单显示[40]，1997—2019年期间，北京市、天津市、河北省分别在2010年、2011年、2013年达到CO_2排放量的最大值，之后CO_2排放量略有波动，整体呈下降趋势；京津冀地区CO_2排放量测算表明[41]，2002—2016年期间，北京市、天津市、河北省分别在2009年、2014年、2012年达到峰值。

1. 北京市的预测结果

在预测期内，北京市的能源需求量持续上升，未能达到峰值。2035年前，能源需求仍以较快速度增长，“十四五”时期的终端能源消费量从6.29×10^7 tce增长到7.12×10^7 tce，对应增速为13.2%，低于“十四五”规划中的增长率（19%）。到2035年，终端能源消费量继续增加到8.97×10^7 tce。由于未考虑航空和管道运输，基准年的能源需求估算略小于实际值，因而2035年北京市的实际能源需求会超过“十四五”规划提出的9.0×10^7 tce控制目标，也不能实现“十四五”规划要求的2035年能源需求达峰目标。在

表7　协同情景的子情景及关键措施

子情景	关键措施	主要内涵
交通一体化	市郊轨道交通	2025年前客运量年增长15%，之后年增长4%
	货运“公转铁”	铁路货运占比年增长0.5%
	推广氢能汽车	2035年氢能源车占比为5%
	提高货运电气化率	2050年完成电气化替代
	推广电动车	2035年电动车占比为60%
产业协同发展	工业结构优化	北京市2025年之后能源强度年下降2%
	能源结构优化	2045年基本完成工业电气化
	协同创新	河北省2060年工业能源强度下降75%
低碳技术共享	推广节能建筑技术	建筑业能源强度年下降3.5%
	共享节能技术	建筑业、服务业、居民生活能源强度相同
能源协同	“风光荷储”一体化	河北省2060年光伏装机容量为3×10^8 kW
	提高电网效率	2050年电网输电损耗率下降为1%
	推广清洁取暖	2060年90%的热力由可再生能源提供

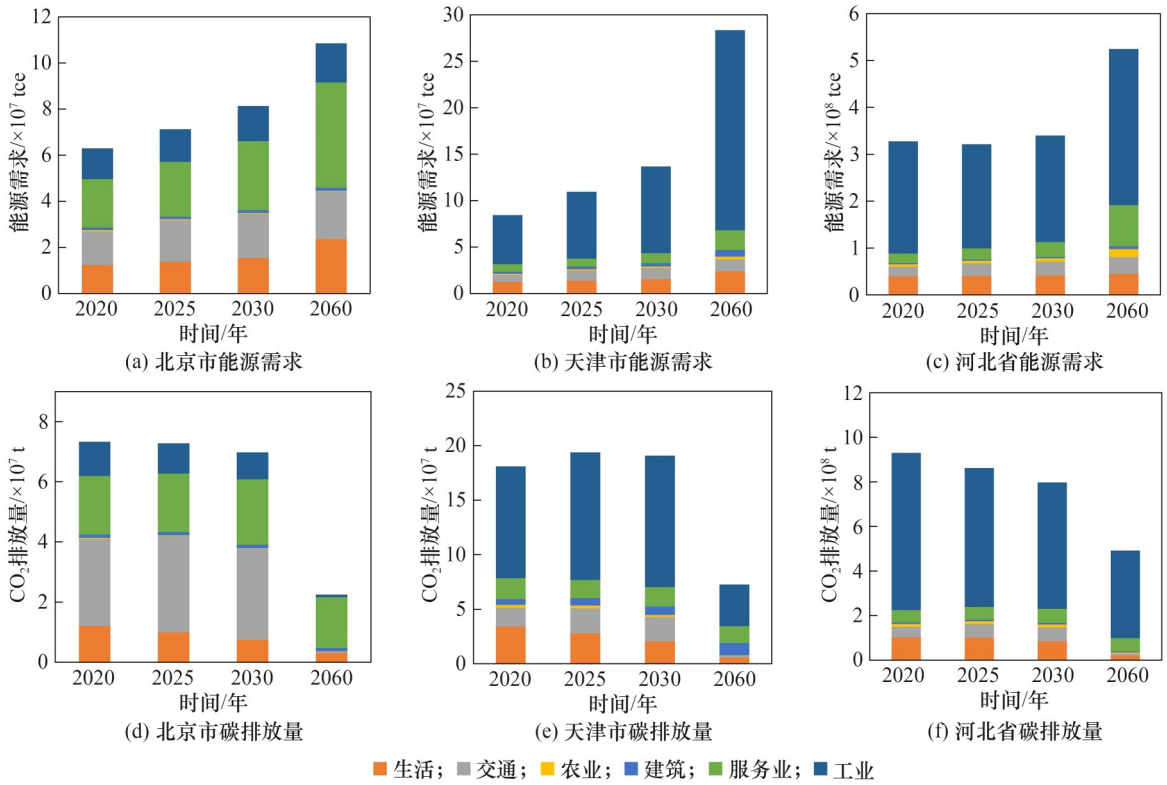

图2　基准情景下的京津冀地区能源需求与碳排放情况

2035年之后，能源需求的增长速度放缓，但增长量依然较大。到2060年，能源需求为1.085×10^8 tce，较基准年增长72.4%。

根据预测，北京市2060年碳排放量下降为2.255×10^7 t，较2020年下降59.3%，不能实现碳中和目标（相关研究表明[42,43]，2060年我国将通过碳捕集利用与封存、碳移除等技术捕集约2.3×10^9 t CO_2，约占2020年CO_2排放量的20%；本研究判断区域能否实现碳中和目标，标准定为2060年该区域的碳排放量下降为2020年的20%以下）。受新型冠状病毒肺炎（COVID-19）疫情对行业开工率、交通活动水平的影响，基准年的碳排放低于正常情况；2021—2023年的碳排放量比基准年略有上升（约为7.34×10^8 t CO_2），合理推测北京市可以实现“十四五”规划要求的碳排放“稳中有降”目标。2025年之后，碳排放的下降速度有所加快，能效提高、结构转型带来的减排效果逐步显现。2030年、2035年碳排放量分别下降为6.98×10^7 t CO_2、6.29×10^7 t CO_2，较2020年降低4.8%、14.2%。尽管2060年碳排放降幅接近60%，但相较碳中和目标还有一定差距。

2. 天津市的预测结果

在预测期内，天津市的终端能源需求快速增长，未能达到峰值（2060年为2.834×10^8 tce，约为基准年的3.4倍），相应增长主要由工业部门驱动。“十四五”时期，天津市制定的经济增长目标为6%，主要依赖制造业等工业部门拉动经济增长，第二产业增加值的占比进一步提高，导致能源需求保持高位。

根据预测，天津市2060年的碳排放量下降为7.26×10^7 t CO_2，较2020年下降59.9%，不能实现碳中和目标。究其原因，煤电存在碳锁定效应，而天津市的煤电机组难以在2060年完全退役；天津市作为我国北方的制造业中心和航运中心，工业和服务业在较长时期内都将保持一定的增速，而基准情景下的能效提高不足以抵消经济增长对能源的增量需求。

3. 河北省的预测结果

河北省的终端能源需求在2020—2023年随着工业压减产能而有所下降，2024年之后将恢复增长，在预测期内未能达到峰值。河北省的能耗集中在工业部门，受“十四五”前期的产能控制政策影响，

钢铁等高能耗工业产品的产能出现下降，导致短期内能耗降低；在长期视角下，随着政策压力减轻、经济增长恢复，相应的能源需求重新出现增长趋势。

根据预测，河北省的碳排放保持下降趋势，但不能如期实现碳中和目标。相对基准年的碳排放量（9.299×10^8 t CO_2），河北省碳排放一直下降的原因有三方面。① 钢铁减产。钢铁工业是河北省最主要的能耗和碳排放来源[2]，2021年河北省发布了严格控制钢铁新增产能及产量的政策，钢铁产量同比下降9.9%，可以预期仍将持续压减钢铁产量[44]。② 工业限产。受COVID-19疫情防控、举办北京冬季奥运会的影响，河北省采取了短期内限制其他高排放工业开工的措施[45]。③ 政策引导。河北省“十四五”规划提出了一系列推动产业低碳转型的任务举措，如淘汰落后产能、推动电能替代、提高综合能效等。

（二）碳排放总量方面的情景模拟分析

2060年，预计基准情景、低碳情景、协同情景下的京津冀地区碳排放量分别为5.87×10^8 t CO_2、4.88×10^8 t CO_2、2.32×10^8 t CO_2（见图3）。在基准情景、低碳情景下，京津冀地区的碳排放量都将保持下降趋势；北京市、河北省、天津市先后达峰，但都不能实现碳中和目标。仅在协同情景下，2060年京津冀地区的碳排放量比2020年下降80.4%，能够实现碳中和目标。

对于北京市，在低碳情景、协同情景下，2060年的碳排放量分别为1.46×10^7 t CO_2、9.3×10^6 t CO_2，分别为基准年的19.9%、12.7%，即在低碳情景下2060年可以实现碳中和目标，在协同情景下可以提前实现碳中和目标。

对于天津市，在低碳情景下，2060年碳排放量为4.76×10^7 t CO_2，为基准年的73.7%；在协同情景下，2060年碳排放量为下2.76×10^7 t CO_2，比基准年下降84.7%，即协同情景下可以提前实现碳中和目标。

对于河北省，3类情景下2020年后的碳排放量均呈下降趋势。在基准情景下，碳排放量下降幅度不足以实现2060年碳中和目标；在低碳情景下，2060年碳排放量为4.259×10^8 t CO_2；在协同情景下，2060年碳排放量为1.954×10^8 t CO_2，为基准年的79%，能够实现碳中和目标。

四、京津冀协同推进碳达峰碳中和路径分析

（一）重点减排部门

获得了预测期内、协同情景下的京津冀地区各部门累计碳减排潜力占比（见图4），对比各经济部门的累计减排量可以发现，北京市的重点减排部

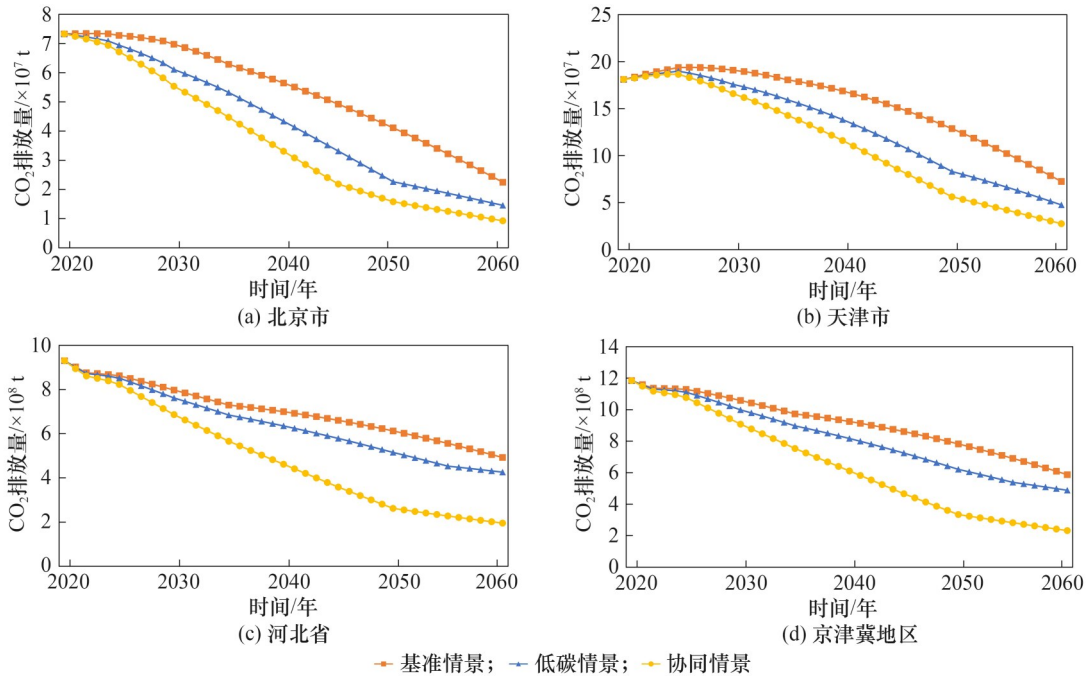

图3　3类情景下的京津冀地区碳排放量

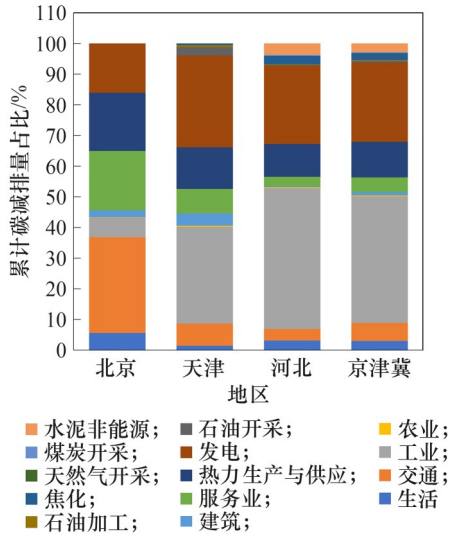

图4　协同情景下的各部门累计碳减排潜力占比

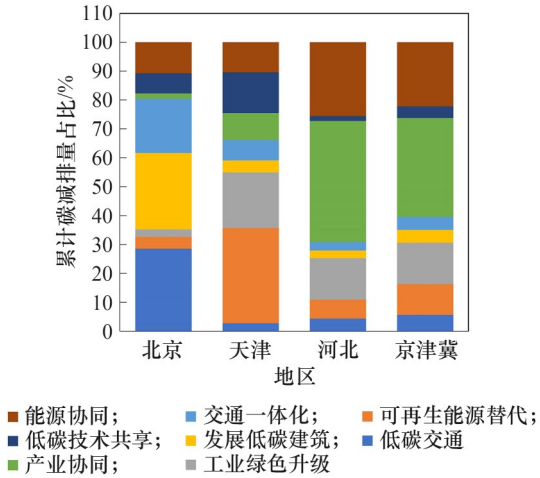

图5　各项措施的累计碳减排潜力占比

门是交通运输，河北省、天津市的重点减排部门是工业和发电。具体而言，北京市碳减排的显著贡献部门是交通部门（占31.2%），其次是服务业（占19.4%）、供热（占19%）、发电（占16.1%）；天津市碳减排的显著贡献部门是工业（占31.5%）和发电（占30%），其次是供热（占13.5%）、服务业（占8%）；河北省碳减排的显著贡献部门是工业（占41.3%）和发电(占25.8%)，其次是供热（占9.6%）、交通（占6.8%）。

由此可见，京津冀三省市的重点减排领域有所不同。北京市的能源结构以天然气为主、依赖外调电，发电部门的碳减排潜力不大；而在终端排放中交通部门碳排放量的占比最高，加之服务业发达，因而减少碳排放依赖交通、服务业等部门。天津市、河北省的能源结构都是以煤炭为主且产业结构中的工业占比较高，因而重点减排部门都是工业和发电。此外，河北省的碳排放量相当于京津两市的数倍，因而京津冀地区的整体碳排放情况主要由河北省决定，故京津冀地区的重点减排部门主要是工业、发电、热力生产。

（二）关键减排路径

分析各项措施累计减排的潜力占比（见图5），据此辨识京津冀三省市及整个地区的关键性减排路径。

北京市的关键减排措施是低碳交通、低碳建筑，减排潜力占比分别为28.6%、26.4%；随后是交通一体化、能源协同发展，减排潜力占比分别为18.8%、10.7%。具体而言，加快推广新能源汽车，力争2035年电动车占私家车的比例为60%，氢能源车占比为5%；推动轨道交通等绿色交通基础设施的共建共享，使轨道交通成为出行的主要方式。也要注意到，低碳情景下北京市各项措施的累计减排潜力占比为61.7%，较协同情景下减排措施的效果更明显，这是因为北京市的交通部门电气化、运输模式转变、低碳建筑推广等措施依赖当地政策的推动，而受京津冀协同的影响相对不大。

天津市的关键减排措施是可再生能源替代、工业绿色升级，减排潜力占比分别为33%、19.2%；随后是低碳技术共享、能源协同发展，减排潜力占比分别为14.1%、10.4%。具体而言，煤电和气电机组到2050年基本完成退役，转为调峰和储备能源，电力完全由可再生能源提供；推动工业绿色升级，更好维持天津市的制造业中心地位。低碳情景下天津市各项措施的累计减排潜力占比为59.1%，也较协同情景下减排措施的效果更明显。究其原因，天津市的发电结构以煤炭为主且能源需求部门耗电量大，故煤电退役、可再生能源替代对当地碳减排的影响更为直接，而受京津冀协同的影响相对不大。

河北省的关键减排措施是产业协同、能源协同，减排潜力占比分别为34.1%、22.2%；随后是工业绿色升级、可再生能源替代。河北省钢铁产量极高，超过40%的碳排放源于钢铁生产的能源消耗过程，因而压减钢铁产能、应用节能技术进行产业升级在碳减排工作中起着关键作用。河北省拥有较

为丰富的风、光自然资源，通过京津冀能源协同发展，可以运用区域内的资金和技术优势，更好将自然资源优势转化为低碳发展优势；京津冀地区包括包括“风光荷储”一体化建设在内的能源基础设施协同，有利于促进河北省的可再生能源就近消纳，对河北省的碳减排工作也有积极作用。

对于整个京津冀地区而言，协同措施的碳减排潜力占比超过50%，又以产业协同、能源协为主要贡献类别。具体而言，河北省在承接北京市制造业转移的基础上，推动产业链协同创新，整合优质产业资源，进一步提高能效；2060年工业能源强度相比基准年下降75%，吨钢生产能耗下降53%。

五、研究结论与发展建议

（一）研究结论

按照现有政策实施后的发展趋势（即基准情景），北京市、河北省、天津市依次实现碳达峰，但三省市在2060年均不能实现碳中和目标。在低碳情景下，北京市可在2060年实现碳中和目标，天津市、河北省的碳排放量将进一步降低，但仍不能实现碳中和目标。对于经济体量大、增长速度较快、工业和城市密集的京津冀地区，碳中和对经济社会转型提出了更高的要求。

仅在协同情景下，京津冀三省市才能都在2060年（基本）实现碳中和目标。这就说明京津冀协同发展具有极大的碳减排潜力，是三省市完成碳中和目标的有效途径。

京津冀三省市的重点减排部门和关键路径存在明显差异：北京市重在低碳交通、低碳建筑、交通一体化、能源协同发展，天津市重在可再生能源替代、工业绿色升级、低碳技术共享、能源协同发展，河北省重在产业协同、能源协同。

着眼碳中和目标，京津冀协同发展对河北省的碳减排贡献将最为突出，也高于河北省加强自身减碳措施执行力度（低碳情景）的效果。河北省实现碳中和目标最为重要的产业协同和能源协同措施，将依赖北京市、天津市溢出的资金和技术优势。对于北京市，交通部门电气化、运输模式转变、低碳建筑推广等措施更多依赖于本地政策的推动，故京津冀协同的收益作用相对较小。对于天津市，可再生能源替代和工业绿色升级等关键减排措施对碳减排的影响更为直接，而受京津冀协同的影响相对不大。

（二）发展建议

北京市增强交通、建筑部门的碳减排政策力度。对于交通部门，倾向公共交通、自行车和行人基础设施建设，将城市副中心的步行友好示范社区建设经验逐步推广到全市，改善公共交通与自行车、步行等的连接便利性；优化市郊轨道交通布局，使城区与周边县区及外部城市的连接更为高效便捷。对于建筑部门，参照国际先进的建筑标准，提高被动式建筑、绿色屋顶等低碳建筑技术的应用水平，进一步降低建筑的能耗；加快实施现存建筑的节能化改造，因地制宜应用分布式光伏资源。北京市加强与河北省的可再生能源合作开发，支持绿电入京，合理降低碳中和技术成本；运用科技优势，与河北省承德市、张家口市等风光资源丰富的地区协同开发风光资源，为外地绿电入京提供优先保障；在构建京津冀氢能产业链过程中发挥引领作用，发挥技术和市场优势，建设并完善氢能基础设施，推广应用氢能汽车。

天津市侧重煤电和工业部门碳减排、京津冀能源协同及交通一体化。严控新增煤电，尽快明确现役煤电的退役进度，发展分布式光伏等可再生能源，积极引入绿电。对于工业部门，以科技创新引领制造业低碳发展，尽量控制制造业带来的碳排放增量。对于在交通部门，深度参与京津冀交通一体化建设，发挥区域“海上门户”的交通枢纽作用；增强货运“公转铁”水平，提高交通电气化、智能化程度。

河北省把握京津冀能源协同、产业协同的发展机遇。实施京津冀地区的能源基础设施协同建设，发挥西部和北部的风光资源优势。与北京市、天津市合作，解决可再生能源开发、储存、消纳相关的资金与技术难题，增强可再生能源的外送能力，扩大可再生能源当地消纳范围。推动京津冀产业协同发展，发挥北京市、天津市技术转化基地作用，促进工业部门的能源结构转型与低碳发展，降低化石能源占比并提高能源效率。

参考文献

[1] Yu X H, Liang Z F, Fan J J, et al. Spatial decomposition of city-level CO_2 emission changes in Beijing–Tianjin–Hebei [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 296: 126613.

[2] Guan Y, Shan Y, Huang Q, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts [J]. Earth's Future, 2021, 9(11): e2021EF002241.

[3] Tian W, Li W H, Song H F, et al. Analysis on the difference of regional high-quality development in Beijing–Tianjin–Hebei city cluster [J]. Procedia Computer Science, 2022, 199: 1184–1191.

[4] Jia M Y, Zhang H R, Yang Z. Compactness or sprawl: Multi-dimensional approach to understanding the urban growth patterns in Beijing–Tianjin–Hebei region, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108816.

[5] Liu L N, Lei Y L, Zhuang M H, et al. The impact of climate change on urban resilience in the Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. Science of the Total Environment, 2022, 827: 154157.

[6] 天津市统计局. 2020 年天津市国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2021-03-12)[2023-01-03]. http://stats. tj. gov. cn/nianjian/2021nj/zk/html/gb01.pdf.
Tianjin Municipal Bureau of Statistics. Tianjin national economic and social development statistical communique in 2020 [EB/OL]. (2021-03-12)[2023-01-03]. http://stats. tj. gov. cn/nianjian/2021nj/zk/html/gb01.pdf.

[7] 河北省统计局. 河北省 2020 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2021-05-25)[2023-01-03]. http://www.hetj.gov.cn/hetj/app/tjgb/101611739068563.html.
Hebei Provincial Bureau of Statistics. Hebei national economic and social development statistical communique in 2020 [EB/OL]. (2021-05-25) [2023-01-03]. http://www. hetj. gov. cn/hetj/app/tjgb/101611739068563.html.

[8] 北京市交通委员会, 天津市交通运输委员会, 河北省交通运输厅. 京津冀交通一体化发展白皮书(2014—2020 年) [EB/OL]. (2021-12-05)[2023-01-03]. http://zjb.henan.gov.cn/2021/12-31/2375076.html.
Beijing Municipal Commission of Transport, Tianjin Municipal Transportation Commission, Department of Transportation of Hebei Province. White paper on integrated transport development of Beijing-Tianjin-Hebei(2014—2020) [EB/OL]. (2021-12-05) [2023-01-03]. http://zjb.henan.gov.cn/2021/12-31/2375076.html.

[9] 李云燕, 宋伊迪. 碳中和目标下的北京城市道路移动源 CO_2 和大气污染物协同减排效应研究 [J]. 中国环境管理, 2021, 13(3): 113–120.
Li Y Y, Song Y D. Study on the synergetic emission reduction effect of CO_2 and air pollutants from the mobile source of urban roads in Beijing under the target of carbon neutralization [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(3): 113–120.

[10] Zhang D Y, Liu G Y, Chen C C, et al. Medium-to-long-term coupled strategies for energy efficiency and greenhouse gas emissions reduction in Beijing(China) [J]. Energy Policy, 2019, 127: 350–360.

[11] Yang D W, Liu D D, Huang A M, et al. Critical transformation pathways and socio-environmental benefits of energy substitution using a LEAP scenario modeling [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135: 110116.

[12] Liu Y Y, Chen S, Jiang K J, et al. The gaps and pathways to carbon neutrality for different type cities in China [J]. Energy, 2022, 244: 122596.

[13] 郭秀锐, 刘芳熙, 符立伟, 等. 基于 LEAP 模型的京津冀地区道路交通节能减排情景预测 [J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(11): 1743–1749.
Guo X R, Liu F X, Fu L W, et al. Scenarios prediction of energy saving and emission reduction in the road transport sector of Beijing–Tianjin–Heibei region [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(11): 1743–1749.

[14] Ma H T, Sun W, Wang S J, et al. Structural contribution and scenario simulation of highway passenger transit carbon emissions in the Beijing–Tianjin–Hebei metropolitan region, China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 140: 209–215.

[15] 李新, 路路, 穆献中, 等. 基于 LEAP 模型的京津冀地区钢铁行业中长期减排潜力分析 [J]. 环境科学研究, 2019, 32(3): 365–371.
Li X, Lu L, Mu X Z, et al. Emission reduction potential of pollutants emissions from iron and steel industry over Beijing–Tianjin–Hebei region based on LEAP [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(3): 365–371.

[16] Sun L, Pan B L, Gu A L, et al. Energy-water nexus analysis in the Beijing–Tianjin–Hebei region: Case of electricity sector [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 93: 27–34.

[17] 蔺文亭, 李巍. 基于 LEAP 的京津冀地区能源结构调整战略居民健康收益评价 [J]. 环境与发展, 2017, 29(2): 14–23.
Lin W T, Li W. An evaluation of residents' health benefits resulting from energy restructuring strategy in Beijing–Tianjin–Hebei region by using LEAP model [J]. Environment and Development, 2017, 29(2): 14–23.

[18] 帕丽丹 • 艾尼瓦尔. 基于能源–经济–环境模型的京津冀能源系统优化研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
Palidan A. Research on energy system optimization in Beijing–Tianjin–Hebei based on energy–economy–environment model [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.

[19] Liu T, Pan S, Hou H M, et al. Analyzing the environmental and economic impact of industrial transfer based on an improved CGE model: Taking the Beijing–Tianjin–Hebei region as an example [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2020, 83: 106386.

[20] Yan Q Y, Wang Y X, Li Z Y, et al. Coordinated development of thermal power generation in Beijing–Tianjin–Hebei region: Evidence from decomposition and scenario analysis for carbon dioxide emission [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 232: 1402–1417.

[21] Zhou J K, Chen Q R, Qi P, et al. Study on the supply and demand matching for policies related to the coordinated development of high haze industries such as thermal power industry and economy in the Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. Energy Reports, 2022, 8: 502–512.

[22] Liu X X, Yang M, Niu Q, et al. Cost accounting and sharing of air pollution collaborative emission reduction: A case study of Beijing–Tianjin–Hebei region in China [J]. Urban Climate, 2022, 43: 101166.

[23] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局. "十四五"现代能源体系规划 [EB/OL]. (2022-01-29)[2022-05-20]. http://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The 14th Five-Year Plan for modern energy sys-

tem [EB/OL]. (2022-01-29)[2022-05-20]. http://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf.

[24] Stockholm Environment Institute. Low emissions analysis platform(LEAP) [EB/OL]. [2022-05-20]. https://leap.sei.org/

[25] 李建伟. 我国劳动力供求格局, 技术进步与经济潜在增长率 [J]. 管理世界, 2020, 36(4): 96–113.
Li J W. China's labor supply and demand pattern, technological progress and potential economic growth rate [J]. Management World, 2020, 36(4): 96–112.

[26] 北京市统计局. 北京统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
Beijing Municipal Bureau of Statistics. Beijing statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.

[27] 天津市统计局. 天津统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
Tianjin Municipal Bureau of Statistics. Tianjin statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.

[28] 河北省统计局. 河北统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
Hebei Provincial Bureau of Statistics. Hebei statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.

[29] 国家统计局. 中国城市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
National Bureau of Statistics. China city statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.

[30] 国家统计局. 中国工业统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
National Bureau of Statistics. China industrial statistics yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.

[31] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通年度统计和分析报告 [R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2022.
China Association of Metros. Annual statistics and analysis report of urban rail transit [R]. Beijing: China Association of Metros, 2022.

[32] 北京交通发展研究院. 2021 北京市交通发展年度报告[R]. 北京: 北京交通发展研究院, 2022.
Beijing Transport Institute. Beijing transportation development annual report in 2021 [R]. Beijing: Beijing Transport Institute, 2022.

[33] Liu L, Wang K, Wang S S, et al. Assessing energy consumption, CO_2 and pollutant emissions and health benefits from China's transport sector through 2050 [J]. Energy Policy, 2018, 116: 382–396.

[34] 北京市交通委员会. 北京市"十四五"时期智慧交通发展规划 [EB/OL]. (2022-05-17)[2022-08-15]. http://jtw. beijing. gov. cn/xxgk/tzgg/202209/t20220907_2810313.html.
Beijing Municipal Commission of Transport. Smart transportation development plan of Beijing during the 14th Five-Year Plan [EB/OL]. (2022-05-17)[2022-08-15]. http://jtw. beijing. gov. cn/xxgk/tzgg/202209/t20220907_2810313.html.

[35] 北京市人民政府. 北京市"十四五"时期能源发展规划 [EB/OL]. (2022-02-22)[2022-08-15]. http://www. beijing. gov. cn/zhengce/zhengcefagui/202204/t20220401_2646626.html.
The People's Government of Beijing Municipality. Beijing energy development plan during the 14th Five-Year Plan [EB/OL]. (2022-02-22)[2022-08-15]. http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202204/t20220401_2646626.html.

[36] 严晓辉, 高丹, 李艳杰. 京津冀地区推进能源革命的思考与对策 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 24–31.
Yan X H, Gao D, Li Y J. Thoughts and countermeasures on promoting energy revolution in the Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 24–31.

[37] "生态文明建设若干战略问题研究(三期)"综合组. 新时代我国生态文明区域协同发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(5): 74–79.
The Comprehensive Research Group for *Research on Several Strategic Issues on Ecological Civilization Construction*. Regional coordinated development of China's ecological civilization progress in the new era [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(5): 74–79.

[38] Yue Q, Chai X C, Zhang Y J, et al. Analysis of iron and steel production paths on the energy demand and carbon emission in China's iron and steel industry [J]. Environment, Development and Sustainability, 2022 (3): 1–21.

[39] 叶堂林, 李国梁. 京津冀发展报告(2021) [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2021.
Ye T L, Li G L. Annual report on Beijing–Tianjin–Hebei metropolitan region development (2021) [M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2021.

[40] Guo X R, Shen Y Q, Chen D S, et al. Quantification of reduced disease burden resulting from air quality improvement by clean energy deployment in Hebei Province, China [J]. Energy Policy, 2021, 159: 112584.

[41] 生态环境部环境规划院. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)——中国CCUS路径研究 [R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 2022.
Chinese Academy of Environmental Planning. China carbon dioxide capture, utilization and storage(CCUS) annual report (2021): A study on the CCUS pathway in China [R]. Beijing: Chinese Academy of Environmental Planning, 2022.

[42] 张希良, 黄晓丹, 张达, 等. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究 [J]. 管理世界, 2022, 38(1): 35–51.
Zhang X L, Huang X D, Zhang D, et al. Research on energy economy transition path and policy under the goal of carbon neutrality [J]. Management World, 2022, 38(1): 35–51.

[43] Li Z X, Andersson F N G, Nilsson L J, et al. Steel decarbonization in China: A top–down optimization model for exploring the first steps [J]. Journal of Cleaner Production, 2022: 135550.

[44] Zhou J K, Li Y T. Research on spatial distribution characteristics of high haze pollution industries such as thermal power industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Energies, 2022, 15(18): 6610.

[45] Guan Y R, Shan Y L, Huang Q, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts [J]. Earth's Future, 2021, 9(11): e2021EF002241.

[46] Yu X H, Liang Z F, Fan J J, et al. Spatial decomposition of city-level CO_2 emission changes in Beijing–Tianjin–Hebei [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 296: 126613.