控制能源消费的降碳减污协同效应

姜 楠 张彩云 夏 勇

摘 要 控制能源消费是实现“双碳”目标的关键突破口，协同推进降碳、减污、扩绿、增长是新时期绿色发展的重大理论和实践问题。本研究基于 2000—2019 年省级面板数据，通过构建 Kaya 分解模型分析能源消费对碳减排及降碳减污协同的影响和内在机理。结果不仅证实了能源消费对碳排放具有显著的影响，其机理主要为规模效应和结构效应，受区域产业结构和经济发展水平影响存在区域异质性特征；同时，还表明碳排放和污染物排放存在显著的协同效应，创新性地指出控制能源消费有助于发挥协同效应、促进降碳减污一体化。因此，为协同推进降碳、减污、扩绿、增长，应以能源领域为突破口，降低能源碳排放密度和化石能源比重，加快形成战略性降碳减污协同规划，在此基础上，不同地区应根据自身经济发展水平和产业结构选择针对性的降碳减污政策。

关键词 能源消费 降碳减污 协同效应 Kaya 分解

一、引言

控制能源消费是中国实现碳达峰、碳中和的关键突破口，党的二十大报告针对性提出“立足我国能源资源禀赋，坚持先立后破，有计划分步骤实施碳达峰行动，深入推进能源革命，加强煤炭清洁高效利用”。能源相关碳排放始终是碳排放的最重要来源，国际能源署统计显示能源相关碳排放占碳排放总量超过 88%，2022 年全球能源相关碳排放量创下超 368 亿吨的新高。中国 2022 年碳排放量累计 110 亿吨，其中电力行业和工业排放占比 84.55%[①]，相应，全国能源消费总量 54.1 亿吨标准煤，煤炭消费量占比 56.2%[②]。虽然单位产值能耗和单位产值碳排放分别同比下降了 0.1% 和 0.8%，但能源消费总量仍同比增长了 2.9%，而煤炭消费量同比增长高达 4.3%。可见，减少能源消费尤其是控制煤炭消费仍是降低能耗强度和碳排放强度的关键因素。与此同时，能源领域也是污染物减排的关键领域，虽然中国已经在污染物减排方面取

姜楠，辽宁大学经济学院讲师；张彩云，中国社会科学院经济研究所副研究员、中国社会科学院大学副教授；夏勇，南京财经大学国际经贸学院讲师。基金项目：辽宁省 2022 年度教育厅基本科研项目“辽宁省碳市场建设、产业低碳转型与政策协同路径”（LJKQR20222546）；辽宁省社会科学规划基金项目“辽宁省碳排放权交易市场建设与低碳发展路径研究”（L21CJY011）；中国南方电网“中国经济绿色低碳转型路径、结构与治理研究”。

① 国际能源署（IEA）.2022年二氧化碳排放报告[EB/OL].https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022. 中国碳核算数据库[DB/OL].https://www.ceads.net/.

② 2022年我国能源生产和消费相关数据[EB/OL].https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjyzy/jnhnx/202303/t20230302_1350587_ext.html.

得显著成效，“十三五”期间，二氧化硫、氮氧化物、化学需氧量、氨氮排放总量分别下降25.5%、19.7%、13.8%、15.0%，超额完成规划目标[①]。但对全国污染源普查显示，电力、热力生产及石油、煤炭等能源相关产业仍是主要污染物来源[②]。“十四五”期间，中国进一步调整主要污染物总量控制指标，将氮氧化物、挥发性有机物、化学需氧量、氨氮共四项污染物作为约束性指标进行考核，并且转为以重点工程减排量形式下达。

尤其需要重视且易被大部分文献所忽视的问题是，碳排放与污染物排放存在明显的关联性，这就意味着降碳与减污要纳入统一环境治理体系加以考虑。随着一系列环境政策的纵深推进和环境治理体系的逐步完善，我国环境治理的目标也逐步提高，逐渐由部分重点污染物的减排过渡到整体环境质量的改善，对各类污染物的减排要求也越来越高，且减排任务越来越明确。“十四五”规划和2035年远景目标纲要提出实施以碳强度控制为主、碳排放总量控制为辅的原则，促进主要污染物排放总量持续减少。这也意味着落实减排任务不可再走“各个击破”的路线，而要系统思考、整体推进。正如党的二十大报告提出的，“协同推进降碳、减污、扩绿、增长，推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展”。此后，加强碳排放与多种污染物的协同控制、发挥降碳减污的协同效应也成为“十四五”时期科学治污的重难点。2022年6月，生态环境部等七个部门联合印发《减污降碳协同增效实施方案》，指出要强化源头防控，在环境污染物和碳排放主要领域、重点行业、关键环节，强化资源能源节约和高效利用。

既有研究对中国降碳减污展开了大量分析[③]，但仍然存在不足。一是虽将能源消费作为碳排放的重要影响因素，但未深入考虑能源消费影响碳排放的内在机理，例如，规模效应和结构效应以何种形式存在，协同效应在当中起到了什么作用；二是较少有研究关注如何充分运用协同效应来加速碳减排，其本质在于现有文献对降碳和减污的兼容性研究不够系统，大多局限于碳排放或单一污染物排放的趋势与影响因素研究，难以为通过协同效应促减排提供逻辑一贯的学理阐释和政策指引。为此，本文采用Kaya分解方法，考察能源消费对碳排放的影响机制及协同效应的作用，并分析不同地区的异质性特征，不仅有助于在理论上厘清能源消费及降碳减污协同效应的理论基础及降碳减污的路径，而且有助于在实践中为优化能源结构、发挥降碳减污的协同效应提供有益的政策启示。本文的创新点包括：第一，研

① 8项指标已提前完成：“十三五”期间我国生态环境质量总体改善[EB/OL].https://www.gov.cn/xinwen/2020-10/21/content_5553053.htm。

② 生态环境部,国家统计局,农业农村部.第二次全国污染源普查公报[EB/OL].https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html。

③ 文献综述，见增强出版，中国知网—《金融市场研究》。

究视角，根植于降碳减污一体化治理的典型事实，从能源消费及其内外部成因视角出发，考察能源消费总量控制与结构调整所产生的降碳效果，以及降碳减污协同效应在这过程中的作用；第二，研究方法，借助 Kaya 分解模型，考察能源因素、经济发展因素等对碳排放量的影响以及降碳减污协同效应的作用，并基于不同区域异质性特征进行检验，据此提出针对性政策启示。

二、研究设计

（一）能源消费对碳排放基准模型

Kaya 恒等式作为碳排放量因素分解经典方法，被广泛用于分析不同国家及部门温室气体减排的影响因素（Yang et al.，2009；林伯强和孙传旺，2011；张伟 等，2016）。碳排放总量作为碳达峰、碳中和的核心控制指标，可进一步分解为能源碳排放密度、能源消费结构、能源自给程度、能源工业投资效率、产业结构以及经济发展水平等因素的共同影响结果：

$$co2_{it}=\frac{co2_{it}}{fcon_{it}}\times\frac{fcon_{it}}{tcon_{it}}\times\frac{tcon_{it}}{tpro_{it}}\times\frac{tpro_{it}}{inv_{it}}\times\frac{inv_{it}}{second_{it}}\times\frac{second_{it}}{gdp_{it}}\times gdp_{it} \qquad (1)$$

进一步整理为：

$$co2_{it}=co2unit_{it}\times fossil_{it}\times endow_{it}\times effi_{it}\times invest_{it}\times indus_{it}\times gdp_{it} \qquad (2)$$

据此，将碳排放作为被解释变量，能源因素作为核心解释变量，涵盖产业结构和经济发展水平等多方影响因素，构建计量模型，如公式（3）所示：

$$lnco2_{it}=\beta_0+\beta_1 lnco2unit_{it}+\beta_2 lnfossil_{it}+\beta_3 lnendow_{it}+\beta_4 lneffi_{it}+\beta_5 lninvest_{it}+\beta_6 lnindus_{it}+\beta_7 lngdp_{it}+\beta_8 lngdp2_{it}+\mu_i+v_t+\varepsilon_{it} \qquad (3)$$

第一，被解释变量。$co2_{it}$ 为 t 时期地区碳排放总量，是双碳目标的最核心指标，也是降碳减污协同效应关注的重点。根据理论分析，其影响因素可以分为能源因素、产业因素和经济发展因素三类。

第二，解释变量。能源因素，$co2unit_{it}=\frac{E_{it}}{fcon_{it}}$为单位化石能源排放量，即能源碳排放密度；$fossil_{it}=\frac{fcon_{it}}{tcon_{it}}$，为化石能源消费占总能源消费比重，即能源消费结构；$endow_{it}=\frac{tcon_{it}}{tpro_{it}}$，为能源自给程度，即能源消费总量与能源生产总量之比（折算为标准煤），反映能源消费与能源生产关系以及能源输入输出类型，若该比值大于 1，说明能源需求超过自身供给，为能源输入型地区，若比值小于 1 则说明本地需求小于自身供给，为能源输出型地区，同时也反映了能源自给程度，数值越高则能源自给程度越低；$effi=\frac{tpro_{it}}{inv_{it}}$为能源生产总量与能源工业总投资之比，即能源工业投资效率。

第三，控制变量。一是产业因素，$invest_{it}=\frac{inv_{it}}{second_{it}}$ 为能源工业投资与第二产业增加值之比，其倒数反映了能源工业投资对第二产业增长的拉动情况；$indus_{it}=\frac{second_{it}}{gdp_{it}}$为第二产业增加值占地区生产总值的比重，即产业结构。二是经济发展因素，gdp_{it} 为地区生产总值。考虑到经济发展水平对碳排放的非线性关系，以及既

有研究广泛证实中国碳排放与经济发展呈现环境库兹涅茨曲线（EKC）倒“U”型关系（王勇，2016；李瑞达 等，2019），在回归模型中进一步引入 gdp_{it} 的二次项形式，同时加入不同地区的个体效应（μ_i）和时间效应（v_t）以控制地区层面因素和时间因素的影响，ε_{it} 为残差项。

（二）涵盖降碳减污协同效应模型

为了进一步验证协同效应在碳减排中的作用，在分解中引入碳排放量与不同污染物排放量的比值，其他能源因素、产业因素和经济发展因素保持不变，以 SO_2 为例，得到分解式（4）：

$$co2_{it}=\frac{co2_{it}}{so2_{it}}\times\frac{so2_{it}}{fcon_{it}}\times\frac{fcon_{it}}{tcon_{it}}\times\frac{tcon_{it}}{tpro_{it}}\times\frac{tpro_{it}}{inv_{it}}\times\frac{inv_{it}}{second_{it}}\times\frac{second_{it}}{gdp_{it}}\times gdp_{it} \tag{4}$$

则回归模型变为公式（5）：

$$\begin{aligned}lnco2_{it}=&\beta_0+\gamma lnjointso2+\beta_1 lnso2unit_{it}+\beta_2 lnfossil_{it}\\&+\beta_3 lnendow_{it}+\beta_4 lneffi_{it}+\beta_5 lninvest_{it}\\&+\beta_6 lnindus_{it}+\beta_7 lngdp_{it}+\beta_8 lngdp2_{it}\\&+\mu_i+v_t+\varepsilon_{it}\end{aligned} \tag{5}$$

其中，$lnjointso2$ 为碳排放与二氧化硫排放比值对数，γ 为不同污染物排放对碳排放影响程度的估计系数，可视为降碳减污的协同系数，γ 越高意味着污染物排放对碳排放影响程度越高，则相应的协同减排潜力越大。为检验和对比不同污染物对碳减排的协同效应，对烟粉尘和固体废弃物进行相同处理和分析。

（三）数据说明

根据理论分析和数据可得性，本文选取 30 个省级行政单位 2000—2019 年面板数据，主要数据来自历年《中国统计年鉴》《能源统计年鉴》及各省区统计年鉴，各地区碳排放量根据 IPCC 分部门排放核算方法计算，数据来源于中国碳核算数据库（CEADs）。能源生产总量根据国家统计局各类能源折标煤系数进行折算，对部分年份煤炭生产量数据缺失采用插值法加以补充，地区生产总值等以 2000 年为基期进行平减。主要变量描述性统计如表 1 所示。

三、实证结果分析

（一）能源消费对碳排放影响

能源消费等因素对碳排放的影响总体估计结果如表 2 所示①，其中列 1~2 为基准模型，列 3~8 为将 CO_2 替换为 SO_2、烟粉尘和固体废弃物等不同工业污染物的回归结果。可以发现：能源因素、产业因素和经济发展因素均对碳排放具有显著影响。具体能源因素方面，与碳排放直接相关的能源碳排放密度越高、能源消费结构越不合理，碳排放量也相应越高，存在能源消费对碳排放的规模效应和结构效应。同时，能源自给程度越低、能源工业投资效率越高，碳排放量也越高，说明地区投资结构越偏向能源工业投资，会更加拉动区域能源消费，实际造成能源消费增速超过能源生产增速，加重地区碳排放。此外，产业

① 表2至6见增强出版，中国知网—《金融市场研究》。

和经济发展因素方面，地区产业结构越重，碳排放量越高，且总体上碳排放与经济发展水平呈倒“U 型”关系。工业污染物估计结果显示，单位化石能源排放、地区能源消费结构、地区能源禀赋、单位能源工业投资效率、能源投资结构以及地区产业结构和经济发展等因素对 SO_2、烟粉尘和固体废弃物也具有显著影响，与对碳排放的影响基本一致，在一定程度说明能源对降碳减污存在潜在协同效应。

（二）发挥降碳减污协同效应对碳排放影响

发挥降碳减污协同效应对碳排放影响总体估计结果如表 3 所示。通过引入碳排放与不同污染物排放协同系数后发现，碳排放与 SO_2 和烟粉尘的协同系数均显著为正，说明不同污染物排放均对碳排放具有显著的正向影响，相应的污染物减排通过协同效应有助于促进碳减排，二者具有降碳减污的协同治理基础。但碳排放与不同污染物排放的协同系数也存在差异，呈现为烟粉尘小于 SO_2，说明 SO_2 减排带来的碳减排协同效应相较烟粉尘更高。引入碳减排与不同污染物协同系数后，能源碳排放密度、能源消费结构、能源自给程度和能源工业投资效率对碳排放的影响均保持显著，且能源碳排放密度的系数普遍降低，说明协同效应吸收了能源对碳排放的部分影响，通过能源消费推动碳减排，必须重视碳减排与污染物减排间的协同效应。通过调整控制变量，重点分析工业增加值对碳排放的影响进行稳健性检验（列 4~6），估计结果保持稳健。

（三）四大区域异质性分析

我国碳排放具有显著的产业与空间集中性，减污政策、降碳政策、经济增长、产业结构、人口规模、城镇化水平以及技术投入均会影响排放量和协同效果（夏勇和钟茂初，2016；胡安俊和孙久文，2022；张为师 等，2023）。因此，考虑到区域异质性特征，分别对中国东部地区（北京、天津、河北、山东、江苏、上海、浙江、福建、广东和海南共 10 个省区）、中部（山西、河南、安徽、江西、湖北和湖南共 6 个省区）、西部（内蒙古、重庆、四川、广西、贵州、云南、陕西、甘肃、宁夏、青海和新疆共 11 个省区）以及东北地区（辽宁、吉林和黑龙江共 3 个省区）四大区域分别加以验证，回归结果如表 4 所示。可以发现，虽然地区能源碳排放密度、能源自给程度、能源工业投资效率及产业结构等因素对区域碳排放仍具有显著影响，与总体结果保持一致，即规模效应和结构效应是能源消费影响碳排放的重要机制，但东部地区能源消费结构、东北地区的经济发展水平等变量已不再显著，且区域间系数存在差异，主要表现为东北地区碳排放量与 GDP 之间并不存在显著的倒“U”型关系，且能源消费结构影响显著高于其他地区，反映了东北地区化石能源消费比重较高仍是碳排放增加的主要因素。

引入减污降碳协同系数的地区异质性分析结果如表 5 和表 6 所示，可以发现：所有地区不同污染物对碳排放的协同系数均显著，通过污染物减排协同效应有助于促进碳减排，但不同地区、不同污染物存

表 1　变量描述性统计

变量	含义	均值	标准差	最小值	中位数	最大值	样本量
lnco2	二氧化碳排放量（百万吨）的对数	5.199	0.938	−0.205	5.291	6.843	600
lnso2	二氧化硫排放量（万吨）的对数	3.749	1.031	−0.236	3.964	5.299	600
lnsmoke	烟粉尘排放量（万吨）的对数	3.452	0.994	0.268	3.590	5.192	600
lnsolid	一般工业固废产生量（万吨）的对数	8.452	1.108	4.317	8.592	10.74	600
lnco2unit	能源碳排放密度，二氧化碳排放量（百万吨）与能源消费总量（万吨标准煤）之比的对数	−3.731	0.326	−7.150	−3.697	−3.198	600
lnso2unit	能源二氧化硫排放密度，二氧化硫排放量与能源消费总量之比的对数	−5.182	0.864	−9.210	−5.039	−3.346	600
lnsmokeunit	能源烟粉尘排放密度，烟粉尘排放量与能源消费总量之比取对数	−5.478	0.888	−8.419	−5.427	−2.976	600
lnfossil	能源消费结构，化石能源消费占总能源消费比重的对数	−0.152	0.047	−0.299	−0.144	0.188	600
lnendow	能源自给程度，能源消费总量与能源生产总量之比的对数	0.528	0.878	−1.487	0.525	3.556	600
lneffi	能源工业投资效率，能源生产总量（万吨标准煤）与能源工业总投资（亿元）之比的对数	2.583	0.865	−0.928	2.621	5.041	600
lninvest	能源工业投资与第二产业增加值之比的对数	−2.285	0.759	−4.228	−2.395	−0.182	600
lnindus	产业结构，第二产业增加值占地区生产总值比重的对数	−0.807	0.213	−1.823	−0.759	−0.486	600
lngdp	经济发展水平，地区经济生产总值（亿元）的对数	8.778	1.089	5.574	9.197	11.03	600

在差异。总体上，西部地区的 SO_2 和烟粉尘与碳排放协同系数最高，东部地区次之，中部地区和东北地区较低。同时，东部地区 SO_2 的协同系数大于烟粉尘的协同系数，中部、西部和东北地区烟粉尘协同系数大于 SO_2 的协同系数。引入碳减排与不同污染物协同系数后，各地区能源因素对碳排放的影响均保持稳健，东部地区能源消费结构对碳排放仍不显著、能源自给程度和能源工业投资效率均保持显著且影响系数略有提高，中部地区产业结构和经济水平的影响系数显著提高，西部地区的能源消费结构影响系数显著提高，而东北地区经济发展对碳排放仍不显著，能源自给程度的系数显著提高。这说明不同地区协同效应通过差异化路径调节了能源对碳排放的影响，各地区应针对能源关键性环节发挥碳减排与污染物减排间的协同效应。综合区域碳排放趋势和全国总体碳排放情况，西部地区还处于排放总量增加阶段，产业结构对能源依赖度更高，应注重降低能源碳排放密度和化石能源比重，加快推进煤

炭的清洁生产；东部地区主要污染和碳排放总量增长相对得到控制，产业结构对能源依赖度更低，应积极推动能源生产消费全产业的低碳化体系建设。中部和东北地区在工业污染物控制方面已经取得显著成效，总量排放已经出现下降或增速放缓，但碳排放总量增长尚未得到有效控制，应深化产业结构绿色低碳转型，提高碳减排效率。

四、结论与启示

面对双碳目标和新时期降碳减污一体化治理要求，针对既有研究降碳减污相兼容研究不够系统等问题，本文立足于能源这一关键领域，通过理论分析并构建 Kaya 模型，基于 2000—2019 年中国省域面板数据验证能源消费对碳排放的影响和机制，并引入降碳减污协同系数，为降碳减污整体规划和提高区域政策的针对性提供有益启示。

（一）主要结论

第一，能源因素、产业因素和经济发展因素均对碳排放具有显著影响，能源消费对碳排放具有显著的规模效应和结构效应。总体上，能源碳排放密度越高、能源消费结构越重，碳排放量也相应越大，即存在能源消费对碳排放的规模效应和结构效应，同时，能源自给程度越低、能源工业投资效率越高，碳排放量也越高。不同区域存在差异化特征，受地区资源禀赋和产业发展等因素影响，能源和相关产业作为能源其支柱产业，面临严峻的减排压力。

第二，总体上，污染物减排对碳排放存在显著协同效应，且受区域产业结构和能源自给程度等影响具有显著异质性，控制能源消费有助于发挥协同效应。西部地区污染物排放与碳排放协同系数最高，中东部次之，东北地区最低，西部地区产业结构对能源依赖度更高，协同减排空间高于其他地区，东部地区和东北地区产业结构对能源依赖度更低，碳排放量增长也相对得到控制，应注重提高协同减排的政策创新和效率。

（二）政策启示

第一，控制能源消费总量和优化能源消费结构是促进碳减排的关键，应加快推进能源领域形成统一的战略性减排规划。必须在能源消费、生产、使用结构和区域协同等各方面形成全面的能源减排政策体系，统筹全能源链条的低碳化转型，促进能源使用、能源清洁技术、能源投资等各环节实现有效低碳化替代转型，并推进有助于降碳减污的产业结构优化和经济体系建设。

第二，推进降碳减污协同治理，不同地区根据自身能源自给程度、产业结构和能源产业链位置等提高政策针对性，发挥降碳减污协同效应。中西部地区着力降低能源碳排放密度和化石能源比重，加快推进煤炭的清洁生产，投资发展可再生能源；东北地区能源规制逐渐转向低碳化为重点，在既有污染防治技术和设施基础上，提高碳减排效率，带动工业污染物的防治深化实施；东部地区应积极与能源输出地区协同治理，通过合作投资、生态补偿、碳排放权交易、全国能源统一市场建设等

促进形成跨区域能源产业链，实现清洁能源远距离、大规模、低损耗运输，不仅保障本地能源的供应稳定，推动能源生产消费全产业的低碳化体系建设，协同促进降碳减污。N

学术编辑：陈俊君

参考文献

[1] 郭玲玲,武春友.中国节能减排潜力测度与优化路径[J].技术经济,2014,33(11):60-67.

[2] 胡安俊,孙久文.碳排放的产业空间版图,省际转移与中国碳达峰[J].经济纵横,2022(5):73-82.

[3] 李瑞达,马爽,缪东玲.清洁技术与治污技术对废气排放影响的实证研究——基于中国EKC[J].资源与产业,2019,21(06):60-68.

[4] 李昕,肖思瑶,周俊涛.我国碳排放数据整合与应用的国际比较[J].金融市场研究,2022,(01).

[5] 林伯强,孙传旺.如何在保障中国经济增长前提下完成碳减排目标[J].中国社会科学,2011(01):64-76+221.

[6] 林伯强.中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析[J].管理世界,2009(4):27-36

[7] 刘杰,刘紫薇,焦珊珊,等.中国城市减碳降霾的协同效应分析[J].城市与环境研究,2019(04):80-97.

[8] 刘胜强,毛显强,胡涛,等.中国钢铁行业大气污染与温室气体协同控制路径研究[J].环境科学与技术, 2012,35(7):168-174.

[9] 毛显强,邢有凯,胡涛,等.中国电力行业硫、氮、碳协同减排的环境经济路径分析[J].中国环境科学,2012,32(04):748-756.

[10] 宋瑞波,耿子扬,赵广志."双碳"目标下我国碳资产债券的创新研究[J].金融市场研究,2022,(11).

[11] 孙晶琪,周奕全,王愿,等.市场型环境规制交互下减污降碳协同增效的效应分析[J].中国环境管理, 2023,15(02):48-57.

[12] 孙雪妍,白雨鑫,王灿.减污降碳协同增效：政策困境与完善路径[J].中国环境管理,2023,15(02):16-23.

[13] 王灿,邓红梅,郭凯迪,等.温室气体和空气污染物协同治理研究展望[J].中国环境管理,2020,12(04):5-12.

[14] 王勇,俞海,张永亮,等.中国环境质量拐点:基于EKC的实证判断[J].中国人口·资源与环境,2016,26(10):1-7.

[15] 夏勇,钟茂初.经济发展与环境污染脱钩理论及EKC假说的关系——兼论中国地级城市的脱钩划分[J].中国人口·资源与环境,2016,26(10):8-16.

[16] 肖涛,张宗益,汪锋.我国区域能源消耗与经济增长关系——基于能源输入省与输出省面板数据的实证分析[J].管理工程学报,2012,26(03):74-79.

[17] 薛婕,罗宏,吕连宏,等.中国主要大气污染物和温室气体的排放特征与关联性[J].资源科学,2012, 34(08): 1452-1460.

[18] 余泳泽.我国节能减排潜力、治理效率与实施路径研究[J].中国工业经济,2011(5):58-68.

[19] 张伟,朱启贵,高辉.产业结构升级,能源结构优化与产业体系低碳化发展[J].经济研究,2016,51(12):62-75.

[20] 张为师,徐颖,惠婧璇.中国城市CO_2排放和空气质量协同变化特征及驱动因素研究[J].中国环境管理, 2023,15(02):38-47.

[21] 郑佳佳,孙星,张牧吟,等.温室气体减排与大气污染控制的协同效应——国内外研究综述[J].生态经济,2015,31(11):133-137.

[22] 郑逸璇,宋晓晖,周佳,等.减污降碳协同增效的关键路径与政策研究[J].中国环境管理,2021,13(05):45-51.

[23] 中国金融学会绿色金融专业委员会课题组.碳中和愿景下机构投资者面临的机遇与挑战[J].金融市场研究,2022(01).

[24] Abel D,Holloway T,Harkey M,et al.Potential air quality benefits from increased solar photovoltaic electricity generation in the eastern United States[J].Atmospheric Environment,2018,175:65-74.

[25] Bollen J,Brink C.Air pollution policy in Europe: Quantifying the interaction with greenhouse gases and climate change policies[J].Energy Economics,2014,46(11):202-215.

[26] He K,Lei Y,Pan X,et al.Co-benefits from energy policies in China[J].Energy,2010,35(11):4265-4272.
[27] Ji Feng L I,Zhong Yu M A,Zhang Y X,et al.Analysis on energy demand and CO2 emissions in China following the Energy Production and Consumption Revolution Strategy and China Dream target[J]. Progress in Climate Change Research: English Version,2018,9(1):11.
[28] Kaneko S,Fujii H,Sawazu N,et al.Financial allocation strategy for the regional pollution abatement cost of reducing sulfur dioxide emissions in the thermal power sector in China[J].Energy Policy,2010,38(5):2131-2141.
[29] Liang D,Dong H,Fujita T,et al.Cost-effectiveness analysis of China's Sulfur dioxide control strategy at the regional level: regional disparity, inequity and future challenges[J].Journal of Cleaner Production, 2015,90(3):345-359.
[30] Wagner F,Amann M,Borken-Kleefeld J,et al.Sectoral marginal abatement cost curves:implications for mitigation pledges and air pollution co-benefits for Annex I countries[J].Sustainability Science, 2012,7(2):169-184.
[31] Swart R,Amann M,Raes F,et al.A Good Climate for Clean Air: Linkages between Climate Change and Air Pollution.An Editorial Essay[J].Climatic Change,2004,66(3),263-269.
[32] Yang C,Mccollum D,Mccarthy R,et al.Meeting an 80% Reduction in Greenhouse Gas Emissions from Transportation by 2050: A Case Study in California[R].Institute of Transportation Studies,Working Paper Series,2009,14(3):147-156.

Analysis of the Impact of Regional Energy Consumption on Pollution and Carbon Reduction

JIANG Nan[1] ZHANG Caiyun[2] XIA Yong[3]
(1.Liaoning University; 2.Chinese Academy of Social Sciences; 3.Nanjing University Of Finance & Economics)

Abstract Controlling energy consumption is critical to achieving the nation's "dual carbon" objective. Collaborative promotion of carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and economic growth is a new theoretical and practical issue for green development. Based on provincial panel data from 2000 to 2019, this paper analyzes the impact of energy consumption on carbon emission reduction and carbon pollution reduction by constructing a Kaya decomposition model. The results demonstrate that energy consumption has a significant impact on carbon emissions through scale effects and structural effects. The results of the study reveal a significant synergistic effect between carbon emissions and pollutant emissions and demonstrate that controlling energy consumption helps to promote the integration of carbon and pollution reduction. In order to synergistically promote carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and growth, the focus should be on reducing the density of energy carbon emissions and the proportion of fossil fuels as well as accelerating strategic carbon and pollution reduction collaborative plans. Different regions should choose targeted carbon and pollution reduction policies based on their own economic development level and industrial structure.

Keywords Pollution and Carbon Reduction, Co-benefit, Energy Consumption, Kaya Decomposition
JEL Classification L52 Q58 O13