



环境科学研究
Research of Environmental Sciences
ISSN 1001-6929, CN 11-1827/X

《环境科学研究》网络首发论文

题目： 我国碳排放驱动因素分解及脱钩努力效应研究
作者： 郭文强，于忠萍，雷明，张雯莘，高雅琪
DOI： 10.13198/j.issn.1001-6929.2024.10.02
收稿日期： 2024-06-23
网络首发日期： 2024-10-15
引用格式： 郭文强，于忠萍，雷明，张雯莘，高雅琪. 我国碳排放驱动因素分解及脱钩努力效应研究[J/OL]. 环境科学研究.
<https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2024.10.02>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

我国碳排放驱动因素分解及脱钩努力效应研究

郭文强¹, 于忠萍¹, 雷明^{1,2}, 张雯莘¹, 高雅琪³

1.新疆财经大学信息管理学院, 新疆 乌鲁木齐 830012

2.北京大学乡村振兴研究院, 北京 100871

3.新疆财经大学公共管理学院, 新疆 乌鲁木齐 830012

摘要: 准确把控我国整体碳排放发展现状, 分析碳排放的驱动因素并探究碳排放脱钩的内在机制演变, 对我国节能减排政策的制定具有重要的指导意义。通过运用 GDIM 分解模型对我国2000—2022年的整体碳排放进行因素分解, 并在此基础上, 结合 Tapio 脱钩模型构建脱钩努力模型测度各驱动因素的脱钩努力效应, 以评估我国减排政策的有效性。结果表明: ①2000—2022年, 我国整体碳排放总量逐年上升, 由 30.03×10^8 t 增至 105.77×10^8 t, 累计增加了 75.74×10^8 t, 碳减排工作面临较大挑战; 空间上, 碳排放分布不均, 呈现出东多西少、北多南少的特征, 且东西差距逐渐缩小。②技术规模是碳排放增加的最大驱动力, 同时经济规模、能源规模及人均碳排放因素也有明显贡献, 而技术碳强度是降碳的关键因素, 其次是经济碳强度、能源消费碳强度。③2012年起, 经济增长与碳排放脱钩指数始终保持在-0.3~0.8的范围, 以弱脱钩状态为主。④经济碳强度、技术碳强度、能源碳强度及能源强度均可促进碳排放脱钩, 其中, 尤其显著的是技术碳强度, 其脱钩努力指数大于1的频率高达63.64%。但是, 在大多数年份下总脱钩努力指数仍为负值, 表明总体脱钩努力还尚不足以抵消经济效应带来的碳排放增长。因此, 为加强我国碳排放治理及脱钩努力效应, 应重点关注碳排放控制、绿色低碳技术创新以及碳减排政策的完善与落实。

关键词: 碳排放; 因素分解; GDIM; Tapio 脱钩模型; 脱钩努力模型

中图分类号: X24; F205

文章编号: 1001-6929(2024)00-00-00

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2024.10.02

Decomposition of Carbon Emission Drivers and Decoupling Effort Effects in China

GUO Wenqiang¹, YU Zhongping¹, LEI Ming^{1, 2}, ZHANG Wenping¹, GAO Yaqi³

1.College of Information Management, Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi 830012, China

2.Peking University, Rural Revitalization Research Institute, Beijing 100871, China

3.College of Public Management, Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi 830012, China

Abstract: Accurately assessing the current state of China's overall carbon emissions, analyzing the driving factors behind these emissions, and investigating the evolving mechanisms of carbon emission decoupling are crucial for guiding the formulation of energy conservation and emission reduction policies in China. By applying the GDIM decomposition model to factor China's total carbon emissions from 2000 to 2022 and integrating the Tapio decoupling model, a decoupling effort model was constructed to measure the decoupling effort effect of each driving factor, evaluating the effectiveness of China's emission reduction policies. The results indicate that: (1) From 2000 to 2022, China's total carbon emissions increased annually, increasing from 30.03×10^8 tons to 105.77×10^8 tons, resulting in a cumulative increase of 75.74×10^8 tons, which presents significant challenges for carbon reduction efforts; spatially, carbon emissions were unevenly distributed, exhibiting higher levels in the east compared to the west and greater concentrations in the north relative to the south, with the east-west gap gradually narrowing. (2) Technical scale was the largest driving force for the increase in carbon emissions, while economic scale, energy scale, and per capita carbon emission factors also contributed significantly. Technical carbon intensity was the key factor in reducing carbon emissions, followed by economic carbon intensity and energy consumption carbon intensity. (3) Since 2012, the decoupling index between economic growth and carbon emissions has consistently from -0.3 to 0.8, primarily in a weak decoupling state. (4) Economic carbon intensity, technological

carbon intensity, energy carbon intensity, as well as energy intensity, can all promote carbon emission decoupling. Technological carbon intensity is particularly significant, with the decoupling effort index greater than 1, reaching 63.64%. However, in most years, the total decoupling effort index remains negative, indicating that the overall decoupling effort is still insufficient to offset the carbon emission growth brought about by the economic effect. Therefore, to strengthen China's carbon emission governance and decoupling effort effects, focus should be placed on controlling carbon emissions, promoting green and low-carbon technological innovation, and improving and implementing carbon emission reduction policies.

Keywords: carbon emissions; factorization; GDIM; Tapio; decoupling effort model

收稿日期: 2024-06-23 修订日期: 2024-09-24

作者简介: 郭文强(1975-), 男(锡伯族), 吉林安图人, 教授, 博士, 博导, 主要从事乡村振兴与区域发展管理研究, gwq600@163.com

基金项目: 国家社会科学基金项目(No.23XMZ060); 新疆财经大学研究生科研创新项目(No.XJUFE2024K041)

Supported by National Social Science Foundation of China (No.23XMZ060); Xinjiang University of Finance and Economics Research and Innovation Program (No.XJUFE2024K041)

当今, 全球正在面临着主要由 CO₂引起的气候变暖所带来的巨大挑战, 暴雨、干旱、海平面上升等极端自然灾害频发, 对人类的生存造成威胁。为应对气候变化, 世界各国于1992年签订了《联合国气候变化框架公约》, 后在2016年又签订了《巴黎协定》, 从而进一步明确与制定了全球变暖目标与国家自主贡献(NDC)。控制 CO₂排放, 减缓全球变暖进程, 已成为基本共识^[1]。我国幅员辽阔, 作为碳排放(以 CO₂计)大国, 正在积极承担起重要贡献国的责任。2020年, 国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布, 中国将提高国家自主贡献力度, 采取更有力的政策和措施, 力争在2030年前达到碳排放峰值, 努力在2060年前实现碳中和, 并强调要坚决落实。为实现这一目标, 我国将应对气候变化作为国家战略, 纳入生态文明建设整体布局 and 经济社会发展全局^[2]。同时, 我国正处于新发展阶段, 推动双碳是实现可持续发展的必然需要。党的二十大报告也明确指出“推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现高质量发展的关键环节”。为此, 我国制定了一系列的节能减排政策, 旨在经济发展过程中促进绿色转型, 并在这一转型中实现更大的发展平衡。

英国石油公司发布的《世界能源统计年鉴-2023》数据显示, 2022年中国碳排放占全球碳排放的30.3%, 较2021年下降了0.8%。这表明中国正在积极采取行动减少碳排放并使得碳排放增速有所减缓, 包括提高清洁能源技术的进步和应用、推进经济和产业结构的转型升级以及加强居民的节能减排意识等。然而, 需要注意的是, 2022年因能源产生的碳排放占中国总碳排放的88.88%, 其中煤炭能源消费占能源消费总量的55.3%, 以煤炭为主的能源消费结构尚未得到根本性转变。此外, 第28届联合国气候变化大会 COP28约定各国将在《巴黎协定》下以“自主贡献+”的模式开展气候行动, 中国在气候多边、双边进程中将持续面临更新 NDC 的压力^[3]。在此背景下, 准确识别我国碳排放驱动因素, 并有效量化政府政策在碳排放脱钩方面的努力, 对于厘清我国碳排放增长机制, 有的放矢地制定与评估碳减排政策尤为重要。

当前, 学者们已在不同空间尺度对碳排放开展研究^[4-7], 其中结构分解法(SDA)和指数分解法(IDA)是用来评估碳排放驱动因素的两种常用方法, 其现有文献的研究尺度涵盖了国家、区域、省域及行业^[8-10]。通常, 结构分解法是基于计量经济学中的投入产出模型构建, 使用投入产出表中的最终需求和投入产出系数信息, 对数据的要求较高^[11]。而指数分解法对数据的需求较低, 并且更具灵活性, 因此被广泛应用, 其

典型代表为 LMDI 模型。例如，宋敏等^[12]基于 LMDI 模型综合考量了能源强度、能源结构、人口规模及经济规模等因素对能源消费碳足迹的影响，得出能源强度提高和能源结构变化能够减缓陕西省的碳排放增长，且能源强度的抑制作用明显。王喜莲等^[13]以黄河流域9省区为研究对象，分析得出9省区工业碳排放因素影响效应存在空间差异性，能源结构强度、经济及人口均对碳排放有正向促进作用。随着分解方法研究的深入，2014年，Vaninsky^[14]提出 GDIM 分解模型，该模型可弥补 LMDI 的不足，将多个相对及绝对因素同时纳入研究框架，衡量各个因素对碳排放的贡献，从而有效克服因素之间的相互依赖。自 GDIM 分解模型提出以来，在行业层面得到了有效验证。工业分析中，刘晨曦等^[15]和 Wen 等^[16]都曾采用 GDIM 分解模型对能源、投资和产值等碳排放驱动因素进行分解，得出产出规模、能源规模有明显的碳排放促增效应，而投资效率对碳排放有较强的抑制作用。制造业分析中，邵帅等^[17]使用 GDIM 分解模型考察了1995—2014年我国制造业碳排放演变的驱动因素，得出投资规模是导致制造业碳排放增加的主要因素，而投资碳强度和产出碳强度是推动碳排放降低的关键因素。至于区域层面的碳排放驱动因素分解研究，仍有待补充。

此外，通过碳排放驱动因素的分解分析，大量研究表明经济增长是碳排放的主要推动力，进而引起了基于 Tapio 模型的碳排放与经济增长的脱钩关系讨论^[18-20]。脱钩概念最初是由经济合作和发展组织(OECD)针对农业领域提出，后逐渐扩展到资源与环境等领域，用以描述环境资源压力与经济增长之间的非同步变化关系，表现为在经济增长的过程中减少对资源及产生污染的消耗和依赖，以实现经济效益和生态效益的双重目标^[21]。2000年，Zhang^[22]利用脱钩概念分析了经济增长对中国碳排放的历史贡献；2002年，OECD 划分了绝对脱钩与相对脱钩两个脱钩指标；2005年，Tapio^[23]提出了 Tapio 脱钩模型，并根据脱钩数值进一步细分出8种脱钩类型。随后，脱钩理论的应用日益成熟^[24]。但是，研究碳排放与经济增长之间的不同步变化关系，用来判断脱钩与否，仍面临着难以深入探究脱钩关系变化原因和识别脱钩贡献因素^[25]的困难。研究^[26-28]表明，为完善对脱钩内在机制变化的研究，有必要进一步扩展和改进脱钩方法。

综上，尽管学术界有关碳排放因素分解与脱钩效应的研究不断丰富，可见仍有一定的局限性。因此，相较于已有研究，本文的边际贡献包括：第一，研究立足国家层面，在考虑驱动因素对碳排放的贡献时，采用 GDIM 分解模型，考虑多个绝对指标和相对指标的影响，并增加技术因素对碳排放的影响，既丰富了该模型在区域层面的应用，又能够充分拓展碳排放的因素分解视角以便更加全面地揭示我国碳排放的来源及变化趋势。第二，利用 Tapio 脱钩模型，分析我国经济增长与碳排放的长期脱钩演变趋势，以找到经济增长与环境保护的平衡点，推动可持续发展的路径。第三，深化了脱钩模型的应用，将 GDIM 分解模型与 Tapio 脱钩模型相结合，构建脱钩努力模型，通过量化各驱动因素的脱钩努力效应，深入探讨我国碳排放的脱钩内在机制，并准确评估我国节能减排政策的有效性，以期政府制定碳减排策略提供有效的科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

借鉴已有文献，该研究在选择与碳排放密切相关的绝对因素时，考虑到经济总量、能源消费总量、人口总量和技术水平的影响，并结合碳排放总量构建了6个相对因素。其中，由于技术水平当前尚无统一标准，通常采用专利作为指标。然而，专利从申请到授权需要一定时间，专利授权数量往往不能完全反映当前的技术创新水平^[29-30]。因此，该研究选择了专利申请数作为衡量技术水平的指标。时间范围选取

2000—2022年，相关因素数据来源于国家统计局、《中国统计年鉴》及《中国科技统计年鉴》，其中，经济数据以2000年为基期调整为不变价。

1.2 碳排放数据

2000—2021年碳排放数据来自中国碳核算数据库^[31-34]（CEADs，<https://www.ceads.net.cn><https://www.ceads.net/user/index.php?id=284&lang=en>），该数据库由中国国家自然科学基金委员会、中国科学技术部、英国研究委员会共同资助，是国内较为权威与科学的碳核算数据来源。其中，碳排放数据基于地域核算，主要考虑了两种来源，即与能源相关的排放以及与加工相关的排放。其中，与能源相关的碳排放是指由化石燃料燃烧产生的碳排放，通过排放因子法进行核算，排放清单中涵盖了原煤、焦炭、天然气等17种化石燃料和47个社会经济部门。

$$CE_{ij} = AD_{ij} \times NCV_i \times CC_i \times O_{ij} \quad (1)$$

式中： CE_{ij} 代表 j 部门燃烧 i 燃料产生的碳排放量（以 CO_2 计）， t ； AD_{ij} 代表 j 部门消耗的第 i 种化石燃料的活动水平， $10^9 J$ ； NCV_i 是净热值，对于固体和液体燃料，取 $10^9 J/t$ ，对于气体燃料，取 $10^9 J/(10^4 Nm^3)$ ； CC_i 是碳含量， $t/10^9 J$ ； O_{ij} 是氧化率，%，表示燃料被氧化的部分。

而与加工相关的碳排放主要是指水泥生产过程中的碳排放，是活动数据和排放因子的乘积。

$$C_{cement} = AD_{cement} \times EF_{cement} \quad (2)$$

式中： C_{cement} 代表水泥生产过程中产生的碳排放量（以 CO_2 计）， t ； AD_{cement} 代表水泥生产过程中消耗化石燃料的活动水平， $10^9 J$ ； EF_{cement} 是排放因子， $t/10^9 J$ 。

同时，由于我国2022年碳排放数据尚未正式公布，因此依据《2022年中国生态环境状况公报》中全国万元国内生产总值碳排放比2021年下降0.8%进行估算补充。

1.3 研究方法

1.3.1 GDIM 分解模型

基于Kaya恒等式，我国整体碳排放因素分解表达式为

$$\begin{aligned} C &= \frac{C}{GDP} \times GDP = \frac{C}{E} \times E = \frac{C}{P} \times P = \frac{C}{T} \times T \\ &= X_2 \times X_1 = X_4 \times X_3 = X_6 \times X_5 = X_8 \times X_7 \end{aligned} \quad (3)$$

$$X_9 = \frac{GDP}{P} = \frac{C}{P} \bigg/ \frac{C}{GDP} = X_1 / X_5 \quad (4)$$

$$X_{10} = \frac{E}{GDP} = \frac{C}{GDP} \bigg/ \frac{C}{E} = X_3 / X_1 \quad (5)$$

式中： C 表示碳排放量（以 CO_2 计）， $10^4 t$ ； GDP 和 X_1 都表示经济规模， 10^8 元； X_2 表示经济碳强度， $10^4 t$ 元； E 和 X_3 都表示能源消费规模（以标煤计）， $10^4 t$ ； X_4 表示能源消费碳强度， t/t ； P 和 X_5 都表示人口规模， 10^4 人； X_6 表示人均碳排放， t/t ； T 和 X_7 都表示技术规模， 10^4 件； X_8 表示技术碳强度， $t/件$ ； X_9 表示人均GDP， 10^4 元/人； X_{10} 表示能源强度， $t/(10^4$ 元)。

考虑各变量之间的相关性，增加约束条件，对式（5）进一步变形为

$$\begin{aligned}
C &= X_1 X_2 \\
X_1 X_2 - X_3 X_4 &= 0 \\
X_1 X_2 - X_5 X_6 &= 0 \\
X_1 X_2 - X_7 X_8 &= 0 \\
X_1 - X_9 X_5 &= 0 \\
X_3 - X_{10} X_1 &= 0
\end{aligned} \tag{6}$$

函数 $C(X)$ 表示因素 X 对碳排放的驱动贡献。根据式 (6) 求一阶偏导，构造雅可比矩阵 $\Phi(X)$ ，表示各因素对碳排放的影响：

$$\Phi(X) = \begin{bmatrix} X_2 & X_1 & -X_4 & -X_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_2 & X_1 & 0 & 0 & -X_6 & -X_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_2 & X_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_8 & -X_7 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -X_9 & 0 & 0 & 0 & -X_5 & 0 \\ -X_{10} & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_1 \end{bmatrix}^T \tag{7}$$

依据 GDIM 分解原理，对上述各因素贡献加总以表示我国整体碳排放变化量 (ΔC)：

$$\Delta C = [X | \Phi] = \int_t \nabla C^T (I - \Phi \Phi^+) dX \tag{8}$$

式中， t 表示时间跨度， $\Delta C = (X_2 \ X_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ ， I 表示单位矩阵。若矩阵 $\Phi(X)$ 中的列线性无关，则 $\Phi^+ = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T$ 。

根据式 (8)，碳排放变化量可以分解为 10 种效应 ($\Delta D'_{X_1}$ 、 $\Delta D'_{X_2}$ 、 \dots 、 $\Delta D'_{X_{10}}$) 之和， $10^4 t$ 。

$$\Delta C^t = C^t - C^0 = \Delta C'_{X_1} + \Delta C'_{X_2} + \dots + \Delta C'_{X_{10}} \tag{9}$$

式中， $\Delta C'_{X_1}$ 、 $\Delta C'_{X_3}$ 、 $\Delta C'_{X_5}$ 、 $\Delta C'_{X_7}$ 分别反映绝对量因素经济规模、能源消费规模、人口规模与技术规模对碳排放变化的影响， $\Delta C'_{X_2}$ 、 $\Delta C'_{X_4}$ 、 $\Delta C'_{X_6}$ 、 $\Delta C'_{X_8}$ 分别反映相对量因素经济、能源、人口及技术的低碳化水平对碳排放变化的影响， $\Delta C'_{X_9}$ 、 $\Delta C'_{X_{10}}$ 分别表示人均 GDP 和能源强度对碳排放变化的影响。

1.3.2 脱钩努力模型

Tapio 脱钩模型通常用来衡量基期与末期间碳排放量增长率与 GDP 增长率之比，根据其大小判断经济增长与碳排放是否发生解耦，并细分成 8 种脱钩状态，即强脱钩、弱脱钩、扩张连结、衰退脱钩、扩张负脱钩、强负脱钩、弱负脱钩、衰退连结。但是，该方法只评估了经济活动与碳排放的脱钩状态变化，并没有充分考虑到其他因素对脱钩状态的影响，这种影响被称为脱钩努力，是指在不损害经济发展的基础上，任何一种直接或间接导致碳排放减少的行动^[35-36]。因此，研究排除了经济规模效应所产生的碳排放，以评估其余因素脱钩努力的有效性，检验我国经济发展过程中节能减排政策的实际效果，在 GDIM 分解模型与脱钩理论的基础上，构建脱钩努力模型。

$$\Delta F^t = \Delta C^t - \Delta C'_{X_1} = \Delta C'_{X_2} + \Delta C'_{X_3} + \dots + \Delta C'_{X_{10}} \tag{10}$$

式中， ΔF 表示除经济规模效应外，其余 9 个效应共同做出的碳排放脱钩努力。

$$D' = \begin{cases} -\frac{\Delta F^t}{\Delta C_{X_1}^t} = D'_{X_2} + D'_{X_3} + \dots + D'_{X_{10}}, \Delta C_{X_1}^t > 0 \\ \frac{\Delta F^t - \Delta C_{X_1}^t}{\Delta C_{X_1}^t}, \Delta C_{X_1}^t < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中： D' 为总脱钩努力指数； D'_{X_2} 、 D'_{X_3} 、 D'_{X_4} 、 D'_{X_5} 、 D'_{X_6} 、 D'_{X_7} 、 D'_{X_8} 、 D'_{X_9} 、 $D'_{X_{10}}$ 分别代表经济碳强度、能源消费规模、能源消费碳强度、人口规模、人均碳排放、技术规模、技术碳强度、人均 GDP 和能源强度因素对脱钩进程的影响。当 $D' \geq 1$ 时，表示为强脱钩，意味着经济增长，各因素的努力总贡献促使碳排放总量下降；当 $0 < D' < 1$ 时，表示为弱脱钩，意味着经济增长，各因素的努力总贡献促使碳排放总量轻微下降；当 $D' \leq 0$ 时，表示未脱钩，表明各因素的碳减排效应之和为正，表现为促进增排。若 D'_{X_2} 、 $D'_{X_3} \dots D'_{X_{10}}$ 均大于0，则表明这些因素促进了经济增长与碳排放之间的脱钩；若 D'_{X_2} 、 $D'_{X_3} \dots D'_{X_{10}}$ 均小于0，则表明这些因素会促进经济及碳排放不协调增长，不利于碳排放脱钩；若 D'_{X_2} 、 $D'_{X_3} \dots D'_{X_{10}}$ 有正值有负值，则表明这些因素的脱钩努力效应存在方向差异，可根据绝对值比较贡献大小。

2 结果与分析

2.1 碳排放时空演变特征

2000—2022年，我国整体碳排放量呈现上升态势，由2000年的 30.03×10^8 t 增至2022年的 105.77×10^8 t，累计增长 75.74×10^8 t，增幅为252.21%（见图1）。其中，2000—2013年为快速增长阶段，年均增长9.37%。在这期间，我国采用粗放式发展模式，高速的经济增长推动了能源需求的增加，煤炭消费及占比居高不下，造成了碳排放的持续上升。2014—2015年，我国碳排放量首次出现了小幅下降，伴随着经济增速放缓、产业转型与技术升级，我国化石能源需求下降，天然气、电力等清洁能源比重上升。但是这种下降只是暂时现象^[37]。2016—2022年，碳排放增速进入平稳缓慢增长阶段，年均增幅1.94%，说明我国的生态文明意识提高，节能减排行动成效较好；但碳排放总量依旧在逐年增加，以煤为主的能源消费模式难以在短时间内改变，我国碳减排工作依然面临巨大挑战。

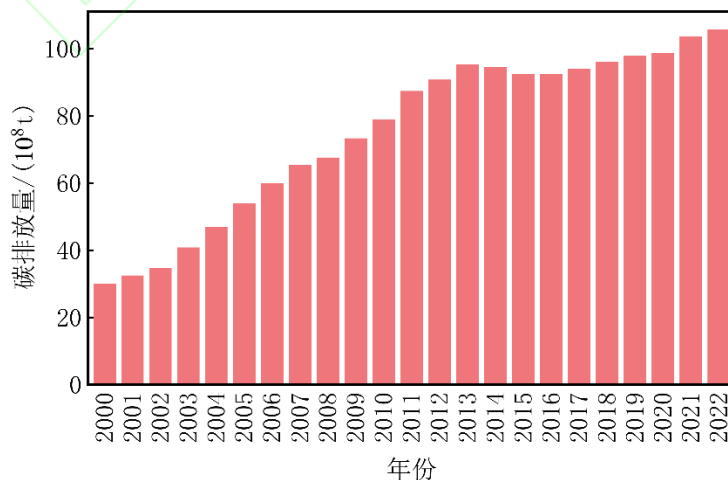


图1 2000—2022年我国整体碳排放量变化

Fig.1 Changes in China's overall carbon emissions from 2000 to 2022

2000年和2021年我国碳排放量的空间分布趋势如图2所示，根据其趋势线可以看出，我国碳排放空间分布呈现明显的地区不均衡特征，主要表现为东多西少、北多南少，并且近年来东西部差距逐渐缩小。2000年，我国东部和北部地区的碳排放量明显高于西部和南部。这是因为东部、北部地区（如辽中南、京津冀等）分布着众多的传统重工业基地和能源密集型产业，工业基础雄厚，依靠丰富的劳动力、开放的地理位置等优势，这些地区在改革开放的浪潮中蓬勃发展了大量的经济活动，进而造成了碳排放的增加。相比之下，中西部地区多为欠发达地区，地域广阔而人口稀少，由于工业化程度较低和资源利用较少，碳排放水平相对较低。2021年，我国碳排放自西向东增势平缓，且差距较2000年明显缩小，南北方向上呈现显著的倒U型分布曲线，表现为自中部逐渐向北、向南递减。随着西部大开发、中部崛起和“一带一路”等政策的提出，我国加大了对中西部地区的支持，其中包括促进当地产业基础和资源优势的开发，以及因地制宜地承接东部地区的产业转移，从而推动了中西部地区的工业化进程，碳排放有所增加。而东部地区由于高耗能产业的转移促进了产业结构转型和升级，高新技术产业和战略性新兴产业发展态势良好，为经济的可持续发展注入了活力。

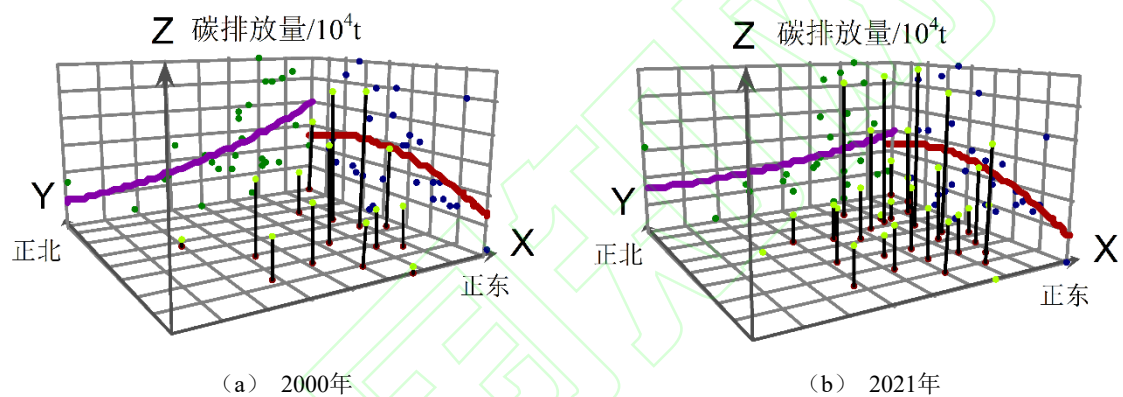


图2 2000年和2021年我国碳排放量空间分布趋势

Fig.2 Trends in the spatial distribution of China's carbon emissions in 2000 and 2021

2.2 碳排放驱动因素分解分析

为全面分析各驱动因素对我国整体碳排放变化的动态影响，采用 GDIM 分解模型得到各驱动因素的逐年碳排放贡献率与贡献值。结果（见图3）显示，各驱动因素的碳排放贡献并不稳定，个别因素存在影响方向的转变。

从规模效应来看，研究期内，经济规模、能源消费规模、人口规模与技术规模均表现出不同程度的碳排放促进作用。2001—2022年间技术规模是碳排放增长的最大驱动力。其中，碳排放贡献值在2010年达到 688.47×10^4 t，占当年碳排放变化的82.25%，表明技术进步所减少的 CO_2 并不足以抵消技术进步所产生的 CO_2 ^[38]。作为经济增长的动力之一，技术规模会对碳排放产生双重影响。一方面，随着科研机构、企业和高校加大对技术研发的投入与引进，产业生产效率得以提高，进而增加了能源消费，导致碳排放上升；另一方面，低碳技术的发展促进了能源利用效率的提高，同时在政府规制下，清洁能源的消费比重也同步增加，从而抑制了碳排放的增长。值得注意的是，2014年由于经济下行和政策补助调整等原因，我国专利数量大幅下滑，极大地降低了技术规模的碳排放贡献；其次是经济规模和能源消费规模，二者的影响趋势相似，存在一定的联动关系。这是由于我国能源结构并未得到实质性转变，经济增长对化石能源依赖性较强。2001—2011年间，经济规模的碳排放贡献率始终维持在2.02%~3.44%，该时期我国经济年均增长15.55%，

产业结构仍处于失衡状态，经济增长以能源的过度使用为代价，导致碳排放问题日益突出。2012年起，这一因素的碳排放贡献率呈现递减趋势，表明经济增长对碳排放的促进作用减弱。继“十二五”规划中国家提高对节能减排工作的执行力度以及生态文明建设被纳入国家“五位一体”总体布局的战略位置后，我国坚定走绿色低碳发展道路，采取了优化调整能源结构、减污降碳协同治理、积极增加森林碳汇等一系列政策措施来推动经济社会绿色低碳转型发展，使得绿色发展方式、生活方式以及消费模式正在成为经济高质量发展不可或缺的重要组成部分。

从碳强度效应来看，经济碳强度、能源消费碳强度与技术碳强度对碳排放变化起着双重作用。通常情况下，这三个相对因素主要抑制碳排放的增长。其中，以技术碳强度的碳排放促降效应最为显著，累计贡献率为-61.68%，说明低碳技术的提升发挥了积极的减碳作用；经济碳强度次之，累计贡献率为-11.78%；然后是能源消费碳强度，累计贡献率为-0.03%。2001—2021年，相比于前两个因素，能源消费碳强度的贡献最小，并且经历了由碳排放促进向碳排放抑制的效应转变，这主要得益于我国能源结构的优化调整。随着“十二五”和“十三五”规划的先后顺利完成，我国非化石能源消费比重在15%以上，天然气消费年均增速超过10%，清洁低碳转型步伐加快。2022年，经济碳强度、能源消费碳强度与技术碳强度均表现为碳排放抑制效应，且能源消费碳强度抑制效果略优于技术碳强度，这说明我国在技术创新与能源转型方面已取得了一定进展，但是仍需进一步完善，正如党的二十大提出，要立足我国能源资源禀赋，坚持先立后破，科学有序推进碳达峰碳中和。

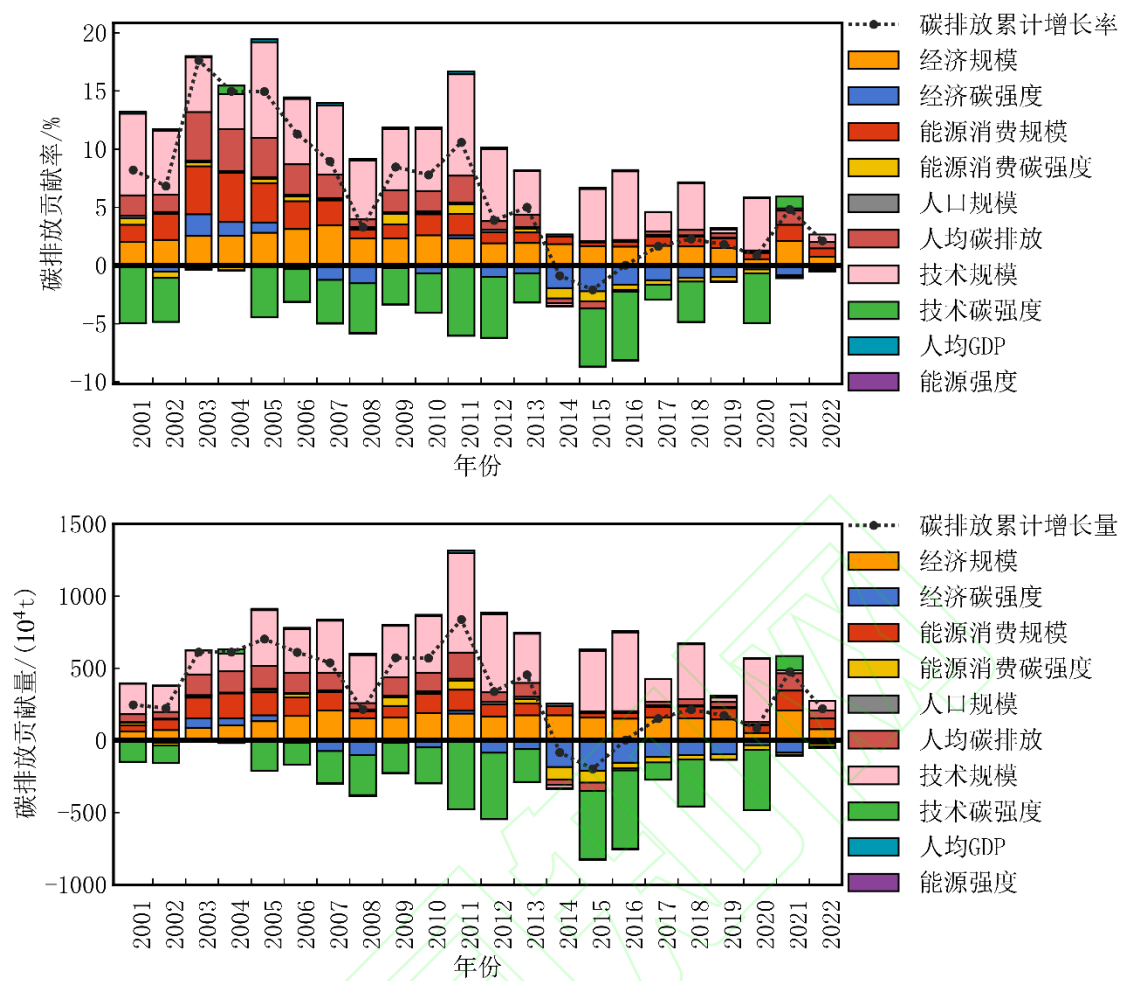


图3 2001—2022年间各驱动因素的碳排放贡献率与贡献值

Fig.3 Carbon emission contribution and contribution value of each driver from 2001 to 2022

而在其余相对因素中，人均碳排放的促进驱动效果最为明显，尤其是在2001—2011年，碳排放贡献量由 $52.96 \times 10^4 \text{ t}$ 增至 $181.95 \times 10^4 \text{ t}$ ，年均增幅22.14%。通常情况下，人口规模的扩大能够带动城市化水平的提高。截至2011年，我国城镇化率为51.83%，较2001年上升了14.17个百分点，由于人口聚集产生的交通、住房、就业、消费等需求不断增加，推动了城市的工业化进程，促进了人均碳排放的增长。2012—2020年间人均碳排放的碳贡献量较前10年大幅减少，这与人们低碳意识水平的提升有着密切关系。党的十八大以来，我国把绿色低碳和节能减排在突出位置，坚持把绿色低碳发展作为解决生态环境问题的治本之策。“降碳、减污、扩绿、增长”的理念得到实践，推动经济社会全面绿色转型以及生态环境质量持续改善。在此过程中，湖北省的“管道直饮水”项目通过减少桶装水使用，有效降低了塑料水桶生产和运输过程中的碳排放；浙江省衢州市引入碳账户体系改革，涵盖工业、农业、能源、建筑、交通、居民生活和林业七大领域，形成了政府治碳、企业减碳、个人低碳的多层次应用体系；四川省大力发展绿色贸易，持续拓展外贸的“新三样”规模；而广西壮族自治区则突出重点，专注加强节能降碳领域的关键技术研究和应用。2021—2022年由于我国人口规模变动较小，该因素主要受经济回升影响与碳排放总量保持一致的变动趋势，其碳排放贡献量再次出现小幅增长。至于人均GDP因素，在前期主要促进了碳排放的增长，但在后期，其影响逐渐从促进转变为轻微抑制，这种转变从理论上来说并不合常规。因此，Vaninsky曾对这种现象作出过解释：人均GDP同时受到人口及GDP两个绝对因素影响，并与其他因素相互关联，其变化通过公式(6)分布于各

个因素，因此在计算其碳排放贡献影响时，只有自身变化的部分影响被计入^[14]。此外，能源强度对碳排放始终发挥负向驱动作用，但其影响相较于其他抑制因素最弱。2006—2018年，该因素减碳贡献量最高达 5.2×10^4 t，这是由于我国在“十一五”规划中推行能耗“双控”政策，并首次明确将能源强度作为约束性指标。该政策旨在五年内将单位 GDP 能耗比2005年下降20%，并合理控制能源消费总量。随后，我国又连续发布了《中国能源发展报告》《中国低碳发展报告》和《中国工业节能减排发展蓝皮书》等政策文件，逐步完善这一目标。在“十二五”和“十三五”规划期间，能耗“双控”政策取得了显著成效。

2.3 碳排放脱钩状态分析

我国整体脱钩指数及脱钩状态的逐年变化趋势如图4所示。整体来看，研究期内，我国碳排放脱钩状态逐渐改善，主要经历了由扩张负脱钩—扩张连结—弱脱钩—强脱钩—弱脱钩的时序演变。尤其是2012年后，脱钩指数数值始终维持在1.2以下，主要呈现为弱脱钩状态，且其出现频率高达76.5%，表现为碳排放增速低于经济增速。

具体来看，2003—2008年，我国脱钩指数由1.76降至0.34，降幅明显，经济增长与碳排放脱钩程度提高。这一时期，加入世界贸易组织（WTO）为我国带来了发展红利，经济总量年均增长13.5%，对外开放进入了新发展阶段。与此同时，进出口贸易的增长导致工业制成品与高科技产品比重不断扩大，推动了我国工业、制造业等行业的蓬勃发展，碳排放呈现高速增长趋势。直至2006年，由于我国节能减排行动的实施和全球金融危机等因素的影响，碳排放增速开始逐渐下降。2009—2013年，碳排放脱钩指数呈现“W”型波动，脱钩状态在扩张连接与弱脱钩之间变化，这意味着我国正在努力调整碳排放增速与经济增速间的协调关系。经历了长期的高速发展后，为进一步促进经济结构转型调整，由速度追求转向质量追求，我国在“十二五”规划纲要中提出要淡化 GDP 增长速度，并设定经济增速目标为7%。2014—2017年，由于碳排放与经济增速均出现减缓，我国碳脱钩取得积极进展，脱钩指数持续下降至小于等于0，表现为理想脱钩状态。2018—2020年，相较前一阶段，脱钩指数呈现小幅度上升趋势，数值介于0~0.8之间，脱钩状态稳定为弱脱钩。在这期间，我国经济进入新常态发展，增长方式向低碳经济型、环境友好型方向转变，不但超额完成了2020年全国碳排放强度比2005年下降40%~45%的目标，而且碳排放快速增长局面得到基本扭转，使得碳脱钩状态表现的比较理想。2020—2022年，脱钩状态依旧保持为弱脱钩，但是脱钩指数增速提升，经济发展受国内外多重超预期因素冲击，增速持续下降至3%左右，而能源需求仍在持续增加推动碳排放的增长，在经济、干旱天气、煤炭价格上涨等因素的影响下，煤炭消费比上年增长0.3个百分点，尤其在电力行业表现突出，致使我国经济发展与碳排放间的脱钩指数数值提高。

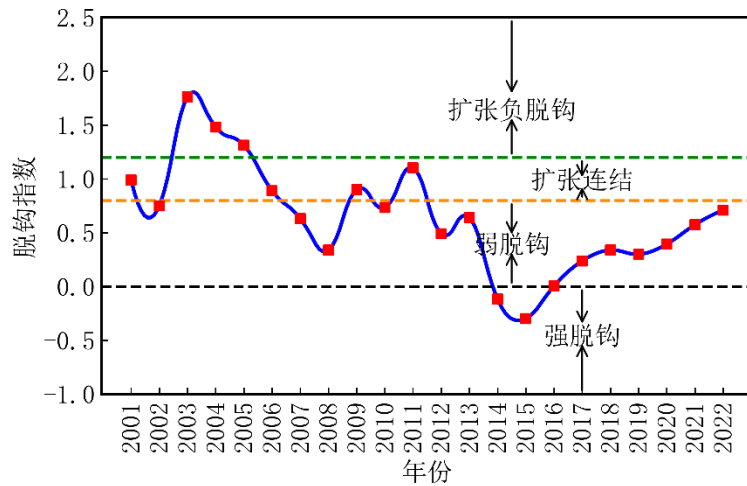


图4 2001—2022年我国整体脱钩指数及状态变化

Fig.4 Overall decoupling index and state change in China from 2001 to 2022

2.4 碳排放驱动因素脱钩努力分析

为有效衡量政府节能减排政策的有效性，量化各驱动因素的脱钩努力效应，该研究利用脱钩努力模型分别测算了总脱钩努力指数及各个因素的脱钩努力指数，结果如图5和图6所示。从总脱钩努力指数来看，2001—2022年我国的碳排放脱钩努力效应经历了由未脱钩——强脱钩——弱脱钩——未脱钩的阶段性演变，这期间只有2014—2017年间的总脱钩努力指数为正，表现出了较好的脱钩努力，这说明该时段政府政策的减排力度高于经济效益的增长。从各个因素的脱钩努力指数来看，碳强度及能源强度对我国碳排放实现脱钩主要起拉动作用，能源消费规模、技术规模、人口规模及人口相对指标则主要起到阻碍作用。综合来看，只有人均碳排放的脱钩努力指数与总脱钩努力指数的变化趋势是一致的，这是因为人均碳排放的增加会推动整体碳排放的增长，从而阻碍脱钩进程。因此，鼓励公众共同参与减排也是当前实现碳排放脱钩的重要举措之一。

具体而言，研究期内总脱钩努力指数呈现不规则变动，多数年份均未表现出脱钩效应，说明各驱动因素的脱钩努力总效应尚不足以抵消经济效益带来的碳排放增长。2001—2013年，总脱钩努力指数始终小于-1，未脱钩效应不断地发生着先减弱再增强的现象，这主要是由于规模效应对脱钩的阻碍作用大于碳强度等因素做出的脱钩努力，其中以技术规模的抑制效果最强。该阶段我国处于经济全球化的重要战略机遇期，由于产业结构发展不协调，高速的经济增长多依靠工业带动，被称为“制造业的世界工厂”；同时，由于原始创新能力较为薄弱，企业技术创新及动力亟待加强等原因致使我国创新驱动不明显，高耗能、高污染产业的碳排放持续增长。2014—2017年，经济碳强度、能源碳强度及技术碳强度的脱钩努力指数增加，显著拉动了碳排放脱钩进程。这一时期，我国经济逐步进入中高速增长，可持续性与均衡性持续提升，产业结构进一步优化，形成了“三二一”的合理布局，在高端装备制造、新能源、节能环保等新兴行业高速增长以及天然气、水电、核电、风电等清洁能源占比提升的推动下，能源消费得到有效控制。此外，在响应加快落实创新驱动发展战略的基础上，通过改进工艺技术、更新改造用能设备、淘汰落后产能和加快技术进步等，单位产品能耗明显降低，截至2017年，单位GDP能耗下降3.7%，其中工业的节能减排贡献尤为突出。2018—2022年，脱钩状态发生倒退，再次表现为未脱钩。根据第七次全国人口普查数据显示，我国人口发展出现重要转折性变化，人口总量惯性增长，但增速逐渐放缓，甚至在2022年实现人口负增长，这一

现象使得人口增长与经济短缺间的矛盾淡化，有效缓解了人口增长所带来的环境压力，并表现为人口增长与人均 GDP 因素在碳排放脱钩进程中的影响由前期的抑制转为2021—2022年的促进。然而，尽管碳强度、人均 GDP、人口规模及能源强度都对碳排放脱钩发挥着积极的促进作用，但因为总贡献相对较小，又受到人均碳排放、能源规模及技术规模的较强阻碍作用影响，导致脱钩成效并不明显，这意味着我国要想实现稳定的强脱钩仍任重道远，应该制定更为完善且严格的减排政策，最大限度地发挥出碳强度、人口规模及能源强度等因素的脱钩潜力。

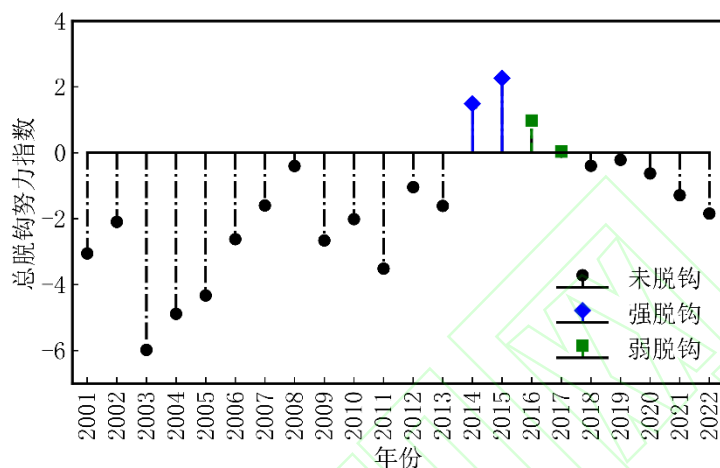


图5 2001—2022年我国碳排放驱动因素总脱钩努力指数

Fig.5 Total decoupling effort index of carbon emission drivers in China from 2001 to 2022

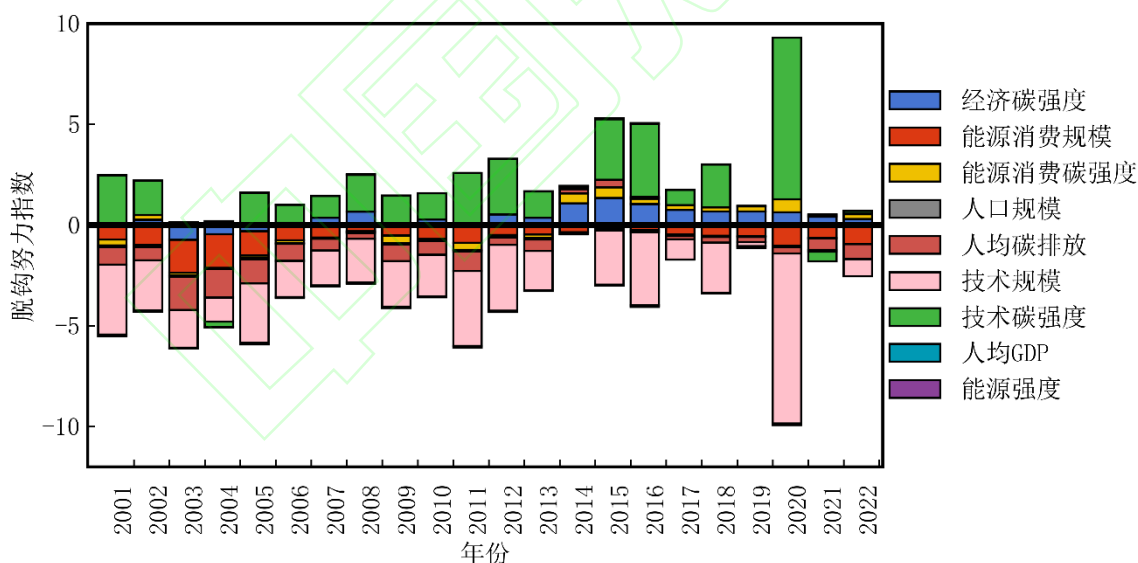


图6 2001—2022年我国碳排放驱动因素脱钩努力指数

Fig.6 Decoupling effort index of China's carbon emission drivers from 2001 to 2022

3 结论及建议

3.1 结论

a) 2000—2022年，我国整体碳排放量呈现上升态势，累计增加了 75.74×10^8 t，以煤为主的能源消费模式难以在短时间内改变，碳减排工作仍然面临巨大挑战。空间上，碳排放分布显著不均衡，呈现出东多西少、北多南少的特征，且东西差距逐渐缩小。考虑到碳排放分布格局及地区差异的变化趋势，为了促进地

区间的协同降碳，应当立足于各地区的资源禀赋差异，进一步加强东西部及南北部地区间的交流与合作。

b)我国碳排放受多种因素共同影响，其中以技术规模的正向驱动力最强，同时经济规模、能源规模及人均碳排放因素也可促进碳排放的增长。在降碳方面，技术碳强度的影响效果最为显著，其次是经济碳强度、能源消费碳强度。相比之下，人口规模、人均 GDP 与能源强度因素的驱动效果较弱。这表明随着我国技术规模的不断扩大，传统依赖高碳能源的方式亟需改变，通过降低技术碳强度可以在一定程度上抵消技术规模带来的增碳效果，从而实现更有效的碳减排。

c)2001—2022年，我国碳排放脱钩状态逐渐改善。自2012年起，脱钩状态先后经历了弱脱钩—强脱钩—弱脱钩的交替演变，并在后期稳定为弱脱钩状态，这说明我国已初步实现了经济增长与碳排放的脱钩。然而，近几年随着脱钩数值的波动式上升，脱钩力度也出现减弱。长期发展来看，我国需要坚持建立更为协同和长效的机制，以促进经济增长与碳排放的协调发展。

d)整体来看，我国的碳排放总脱钩努力指数多为负值，脱钩努力效应多以未脱钩为主，各驱动因素的脱钩努力总效应尚不足以抵消经济效益带来的碳排放增长。其中，只有2014—2017年间，我国的碳排放治理做出了明显的脱钩努力。对比各个因素的脱钩努力指数，碳强度及能源强度对我国碳排放实现脱钩主要起拉动作用，因此降低经济碳强度、技术碳强度、能源碳强度及能源强度是推动我国早日实现强脱钩的重要举措；而能源消费规模、技术规模、人口规模及人口相对指标则主要起到阻碍作用，这意味着我国必须继续深入推进能源消费结构转型，积极推动低碳技术创新，以及加强居民的节能减排意识，从而充分发挥出碳减排相关政策的脱钩潜力。

3.2 政策建议

a) 严格控制碳排放总量。继续推进能耗双控逐步转向碳排放双控，从而实现我国整体减排的目标。同时，为应对空间碳排放分布不均的挑战，还需加强区域间的交流与合作。对于聚集在中西部的欠发达地区，可发挥其资源禀赋推动产业聚集，提高可再生能源的利用效益；而对于东部及北部的发达地区，可通过资源互补、产业配合等方式与欠发达地区建立协作帮扶机制，从而优化能源消费结构，为绿色产业发展创造机遇。

b) 加强绿色低碳技术创新，进一步激发其减排潜力。研究表明，技术因素在我国整体碳排放中扮演着重要的双面角色，因此要想充分发挥绿色技术在绿色低碳发展中的关键支撑作用，必须持续降低技术碳强度，强化低碳技术的碳排放效率。具体可包括：以节能减排为明确导向，增加政府、企业等对绿色低碳技术创新研发的投入；把握新一轮科技革命和产业变革的机遇，积极推动绿色低碳技术“引进来”与“走出去”，实现生产设备与工艺流程的升级优化。

c) 完善与落实节能减排相关政策，提高政策的实施效果。研究结果显示，当前我国经济、能源、技术等要素与碳排放增长之间尚未达到理想的平衡发展状态，与各因素相关的碳减排政策应进一步完善。首先，拓展碳减排政策的适用范围，既要覆盖工业、建筑和交通等关键领域，又要根据不同地区的发展实际情况制定具体针对性政策。其次，可以通过持续优化调整产业结构、支持与鼓励低碳节能技术的研发和投入使用、建立公众监督机制等措施，加强碳减排政策的实施力度。

参考文献 (Reference) :

[1] WANG L K,ZHANG M,SONG Y.Research on the spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of the spatial

- connection network of carbon emissions in China:new evidence from 260 cities[J].Energy,2024,291:130448.
- [2] 蒋金荷.全球碳治理体系新特征及完善中国碳治理的策略展望[J].价格理论与实践,2024(1):29-36.
- JIANG J H.New characteristics of global carbon governance system and prospects for improving China's carbon governance strategies[J].Price (Theory & Practice),2024(1):29-36.
- [3] 樊星,李路,高翔,等.COP28全球盘点成果解读及全球气候治理形势展望[J].气候变化研究进展,2024,20(2):253-260.
- FAN X,LI L,GAO X,et al.The analysis of COP28 Global Stocktake outcome and global climate governance prospects[J].Climate Change Research,2024,20(2):253-260.
- [4] 吴晓慧,余亚东,梁赛.广东省 CO₂排放变化的社会经济影响因素[J].环境科学研究,2021,34(3):772-782.
- WU X H,YU Y D,LIANG S.Socioeconomic factors influencing CO₂ emissions in Guangdong Province[J].Research of Environmental Sciences,2021,34(3):772-782.
- [5] 刘浩东,邱微,陈爽.黑龙江省能源碳排放核算及驱动因素分析[J].中国环境科学,2024,44(7):4117-4126.
- LIU H D,QU W,CHEN S.Accounting and driving factors analysis of energy carbon emissions in Heilongjiang Province[J].China Environmental Science,2024,44(7):4117-4126.
- [6] LUO X C,LIU C K,ZHAO H H.Driving factors and emission reduction scenarios analysis of CO₂ emissions in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and surrounding cities based on LMDI and system dynamics[J].Science of the Total Environment,2023,870:161966.
- [7] 陈敏,李振亮,段林丰,等.成渝地区工业大气污染物排放的时空演化格局及关键驱动因素[J].环境科学研究,2022,35(4):1072-1081.
- CHEN M,LI Z L,DUAN L F,et al.Spatiotemporal patterns and key driving forces of industrial air pollutant discharge in Chengdu-Chongqing Region[J].Research of Environmental Sciences,2022,35(4):1072-1081.
- [8] LIU Y,GAN L,CAI W G,et al.Decomposition and decoupling analysis of carbon emissions in China's construction industry using the generalized Divisia index method[J].Environmental Impact Assessment Review,2024,104:107321.
- [9] 王火根,汪钰婷,肖丽香.基于 IO-SDA 法的 2020—2060 年中国行业 CO₂排放预测与分析[J].中国环境科学,2024,44(3):1743-1755.
- WANG H G,WANG Y T,XIAO L X.Forecast and analysis of China's industrial CO₂ emissions from 2020 to 2060 based on the IO-SDA method[J].China Environmental Science,2024,44(3):1743-1755.
- [10] 彭宸,贾俊松,余清项,等.中国农业碳排放异质性的时空演化及影响因素分析[J].环境科学研究,2024.doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2024.04.18.
- PENG C,JIA J S,YU Q X,et al.Analysis of spatio-temporal evolution and influencing factors of agricultural carbon emission heterogeneity in China[J].Research of Environmental Sciences,2024.doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2024.04.18.
- [11] 安庆贤,邹雨晴,熊贝贝.基于 PDA-IDA 分解法的碳强度影响因素研究[J].运筹与管理,2023,32(4):140-146.
- AN Q X,ZOU Y Q,XIONG B B.Research on influencing factors of carbon intensity based on PDA-IDA decomposition method[J].Operations Research and Management Science,2023,32(04):140-146.
- [12] 宋敏,郭清卉.基于 LMDI 方法的陕西省能源消费碳足迹因素分解研究[J].统计与信息论坛,2015,30(4):60-64.
- SONG M,GUO Q H.Research of the energy consumption carbon footprint's factors decomposition of Shaanxi Province based on the LMDI method[J].Statistics & Information Forum,2015,30(4):60-64.
- [13] 王喜莲,屈丽航.黄河流域工业碳排放时空演化特征及影响因素[J].环境科学,2024.doi:10.13227/j.hjcx.202308258.
- WANG X L,QU L H.Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of industrial carbon emissions in the Yellow River Basin[J].Environmental Science,2024.doi:10.13227/j.hjcx.202308258.
- [14] VANINSKY A.Factorial decomposition of CO₂ emissions:a generalized Divisia index approach[J].Energy Economics,2014,45:389-400.
- [15] 刘晨曦,支小军,孙雪英.新疆工业碳排放因素分解:基于 GDIM 模型的实证研究[J].地域研究与开发,2023,42(4):125-129.
- LIU C X,ZHI X J,SUN X Y.Decomposition of industrial carbon emission factors in Xinjiang:a case study based on generalized dirichlet index method[J].Areal Research and Development,2023,42(4):125-129.

- [16] WEN H X, CHEN Z, YANG Q, et al. Driving forces and mitigating strategies of CO₂ emissions in China: a decomposition analysis based on 38 industrial sub-sectors[J]. *Energy*, 2022, 245: 123262.
- [17] 邵帅, 张曦, 赵兴荣. 中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径: 广义迪氏指数分解和动态情景分析[J]. *中国工业经济*, 2017(3): 44-63.
- SHAO S, ZHANG X, ZHAO X R. Empirical decomposition and peaking pathway of carbon dioxide emissions of China's manufacturing sector: generalized Divisia index method and dynamic scenario analysis[J]. *China Industrial Economics*, 2017(3): 44-63.
- [18] 花瑞祥, 蓝艳, 李嘉文, 等. 中国省际碳排放脱钩效应及驱动因素分析[J]. *环境科学研究*, 2023, 36(11): 2159-2168.
- HUA R X, LAN Y, LI J W, et al. Analysis of the decoupling effect and driving factors of inter-provincial carbon emissions in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(11): 2159-2168.
- [19] 仇方道, 刘继斌, 陈然, 等. 淮海经济区工业增长与碳排放异速关系演化及协同机制[J]. *资源科学*, 2024, 46(1): 69-84.
- QIU F D, LIU J B, CHEN R, et al. Evolution of the asynchronous relationship between interprovincial industrial growth and carbon emissions and its coordination mechanism: a case study of the Huaihai Economic Zone[J]. *Resources Science*, 2024, 46(1): 69-84.
- [20] 刘慧, 朱启荣. 中国出口国内增加值增长与碳排放脱钩关系探究[J]. *宏观经济研究*, 2023(9): 115-127.
- LIU H, ZHU Q R. An exploring on the decoupling relationship between China's export domestic value-added growth and carbon emissions[J]. *Macroeconomics*, 2023(9): 115-127.
- [21] 钟妮栖, 夏瑞, 张慧, 等. 黄河流域城市群水资源利用与经济发展脱钩关系研究[J]. *环境科学研究*, 2024, 37(1): 102-113.
- ZHONG N X, XIA R, ZHANG H, et al. Research on the decoupling relationship between water resources utilization and economic development in urban agglomerations of the Yellow River Basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(1): 102-113.
- [22] ZHANG Z X. Decoupling China's carbon emissions increase from economic growth: an economic analysis and policy implications[J]. *World Development*, 2000, 28(4): 739-752.
- [23] TAPIO P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137-151.
- [24] 章恒全, 陈卓然, 张陈俊. 长江经济带工业水环境压力与经济增长脱钩努力研究[J]. *地域研究与开发*, 2019, 38(2): 13-18.
- ZHANG H Q, CHEN Z R, ZHANG C J. Decoupling efforts of environmental pressure of industrial wastewater and economic growth in Yangtze River economic belt[J]. *Areal Research and Development*, 2019, 38(2): 13-18.
- [25] 陈瑞敏, 马晓君, 李宜良. 黄河流域五大增长极碳排放脱钩效应: 基于 GDIM 的因素分解[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(5): 2853-2866.
- CHEN R M, MA X J, LI Y L. Analysis of carbon emission decoupling effects in the five growth poles of the Yellow River Basin based on GDIM decomposition[J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(5): 2853-2866.
- [26] 李咏华, 高欣芸, 姚松, 等. 长三角城市群核心地区碳平衡压力与新型城镇化脱钩关系[J]. *经济地理*, 2022, 42(12): 72-81.
- LI Y H, GAO X Y, YAO S, et al. Decoupling relationship between carbon balance pressure and new urbanization in the core area of the Yangtze River Delta urban agglomeration, China[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(12): 72-81.
- [27] WANG M, ZHANG X M, FENG C, et al. Towards a sustainable construction: a newly proposed Tapio-global meta-frontier DEA framework for decoupling China's construction economy from its carbon emissions[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 929: 172727.
- [28] ZHOU Y, HU D, WANG T, et al. Decoupling effect and spatial-temporal characteristics of carbon emissions from construction industry in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 419: 138243.
- [29] PAN X F, AI B W, LI C Y, et al. Dynamic relationship among environmental regulation, technological innovation and energy efficiency based on large scale provincial panel data in China[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, 144: 428-435.
- [30] 孙兴, 刘熙. 中国城市碳排放效率的时空演变及影响因素: 基于异质性空间随机前沿模型[J]. *地理研究*, 2023, 42(12): 3182-3201.
- SUN X, LIU X. Spatiotemporal evolution and influencing factors of urban carbon emission efficiency in China: based on heterogeneous spatial stochastic frontier model[J]. *Geographical Research*, 2023, 42(12): 3182-3201.

- [31] XU J,GUAN Y,JOANTHAN O,et al.China carbon emission accounts 2020-2021[J]. Applied Energy, 2024, 360:122837.
- [32] 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.
- [33] SHAN Y L,HUANG Q,GUAN D B,et al.China CO₂ emission accounts 2016-2017[J].Scientific Data,2020,7(1):54.
- [34] SHAN Y L,GUAN D B,ZHENG H R,et al.China CO₂ emission accounts 1997-2015[J].Scientific Data,2018,5(1):170201.
- [35] WANG Q,WANG S S.Decoupling economic growth from carbon emissions growth in the United States:the role of research and development[J].Journal of Cleaner Production,2019,234702-713.
- [36] ROCÍO R C,JOSÉ M C,CAMILO B.How far is Colombia from decoupling? two-level decomposition analysis of energy consumption changes[J].Energy,2018,148687-700.
- [37] FENG K,DAVIS S J,SUN L,et al.Drivers of the US CO₂ emissions 1997-2013[J].Nature Communications,2015,6(1):7714.
- [38] 申萌,李凯杰,曲如晓.技术进步、经济增长与 CO₂排放:理论和经验研究[J].世界经济,2012,35(7):83-100.

