

The NDC Evaluation of China, the USA, India, Russia and Germany Based on LMDI Method

Mengya Wu, Jiahai Yuan, Changhong Zhao

North China Electric Power University, Beijing
Email: 18810183461@163.com, yuanjh126@126.com

Received: Sep. 11th, 2017; accepted: Sep. 24th, 2017; published: Sep. 27th, 2017

Abstract

Climate change and energy governance are the common challenges facing human society today, and carbon emissions are a key concern. This paper constructs a carbon emission identity based on population, economy, energy intensity and energy structure and employs LMDI decomposition technology to decompose carbon emissions in China, the United States, India, Russia and Germany from 2000 to 2013. According to the NDC submitted by each country, the paper predicts the contribution of the four effects to total carbon emissions during 2014-2030. The results show that the economic scale is the main factor to increase national carbon emissions and energy intensity is the main inhibitory factor, while the effects of population and energy structure effect on carbon emissions vary from country to country. Only Germany's carbon emissions are declining in the study period, and all the rest are on the rise. Our study indicates the importance of more effective efforts of global governments in fighting against global warming.

Keywords

Primary Energy Consumption Carbon Emissions, Kaya Identity, LMDI Model, NDC

基于LMDI分解的中美印俄德五国 NDC评估

吴梦雅, 袁家海, 赵长红

华北电力大学, 北京
Email: 18810183461@163.com, yuanjh126@126.com

收稿日期: 2017年9月11日; 录用日期: 2017年9月24日; 发布日期: 2017年9月27日

摘要

气候变化和能源治理是当今人类社会面临的共同挑战，而碳排放是其中的热点问题。基于碳排放Kaya恒等式，运用LMDI分解技术对中国、美国、印度、俄罗斯和德国2000~2013年的碳排放增量进行因素分解。并根据各国提交的NDC，预测四个效应在2014~2030年对碳排放的贡献。结果表明：经济规模效应对各国碳排放均为主要促进因素，能源强度效应为主要抑制因素，人口规模效应和能源结构效应对各国碳排放的影响因国而异。只有德国的碳排放在各种因素作用下呈下降趋势，其余各国都呈上升趋势。因此，实现全球气候变化目标，需要各国政府更为有效的减排努力。

关键词

一次能源消费碳排放，Kaya恒等式，LMDI模型，国家自主贡献

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

气候变化是当今全球面临的共同挑战。工业革命以来的人类活动，尤其是发达国家消耗大量的化石能源产生的CO₂累积排放，导致大气中温室气体的浓度显著提高，造成全球气候变暖。因此，《联合国气候变化框架公约》各缔约方根据会议要求提出“国家自主贡献(Nationally Determined Contribution, 下文简称NDC)”，它是由各国提出的2020年后应对气候变化行动计划[1]。巴黎气候变化大会上通过全球气候变化新协定，指出各方将加强对气候变化威胁的全球应对，把全球平均气温较工业化前水平升高控制在2摄氏度之内，并为把升温控制在1.5摄氏度之内而努力[2]。目前减少碳排放已经成为国际社会的共识，寻求减少碳排放的途径，首要工作是对影响碳排放的因素进行研究，定量的衡量因素变动对碳排放量的影响，准确地分析出促进和抑制碳排放增加的影响因素，才能对症下药。

在碳排放因素分解研究领域，对数均值迪氏指数分解法(Logrithmic mean Divisia index method, 简称LMDI)由于具有全分解、无残差、易使用以及乘法分解与加法分解的一致性、结果的唯一性、易理解等优点而在众多分解技术中受到重视，目前在许多领域得到广泛应用[3]。徐国泉[4]等采用对数平均权重Divisia分解法定量分析1995~2004年能源结构、能源效率和经济发展等因素的变化对中国人均碳排放的影响。汪艺梅[5]等运用LMDI分解法分析了经济增长、能源强度、能源结构等因素对中国和其他典型国家碳排放的影响。于雪霞[6]运用LMDI分解法研究了1971~2011年金砖国家碳排放的增长因素，结果表明经济发展是促进碳排放增长的决定性因素，尤其对中国和印度。顾阿伦[7]等利用LMDI分解法研究了经济总量、产业结构、能源强度和能源结构这四个因素对碳排放的影响，发现产业结构变化对碳排放量和碳排放强度作用尤为明显。

目前位居全球碳排放总量前列的是中国、美国、印度、俄罗斯和德国。中国伴随着经济的快速发展已成为世界最大的能源消费国，在2006年超越美国成为世界上最大的CO₂排放国。美国作为发达国家，从工业革命以来其历史累积碳排放量远高于其他国家。印度为后发型发展中国家，工业化程度低，但其排放总量增速较快。俄罗斯近几年虽然碳排放量呈下降趋势，但目前仍处于全球第四的位置。德国虽然近年来注重风能、太阳能等新能源的发展，但工业化水平仍较高。本文选取这五个国家为研究对象，并

运用 LMDI 分解法将这五个国家能源消费碳排放分解为人口、经济增长、能源强度和能源结构四个因素进行综合定量分析, 比较各因素对各国碳排放的贡献程度, 并根据各国提出的 NDC 目标预测未来四个影响因素对本国碳排放的贡献程度。

2. LMDI 模型

2.1. Kaya 恒等式

有关 CO₂ 排放的恒等式有很多, 其中 Kaya 恒等式是由日本学者 Kaya 在 IPCC 研讨会上提出的, 它结合社会、经济、能源将 CO₂ 排放总量进行驱动因素分解。其具体公式为

$$C = \text{POP} \times \text{GDP} / \text{POP} \times \text{TPES} / \text{GDP} \times C / \text{TPES} \quad (1)$$

其中, C 表示 CO₂ 排放量, GDP 表示国民生产总值, POP 表示人口, TPES 表示一次能源消费量。

令 $p = \text{POP}$, $g = \text{GDP} / \text{POP}$, $e = \text{TPES} / \text{GDP}$, $f = C / \text{TPES}$ 。

则 Kaya 模型可以表示为

$$C = p \times g \times e \times f \quad (2)$$

Kaya 恒等式揭示 CO₂ 排放量的四个驱动因子, 其中 p 为称为人口规模效应; g 即人均 GDP, 称为经济规模效应; e 即单位 GDP 的能源消耗, 称为能源强度效应(也称能源利用效率); f 为能源碳强度, 即消耗单位一次能源的碳排放量, 称为能源结构效应。

2.2. LMDI 分解模型

目前, 常用的分解方法有两种, 指数分解法(Index Decomposition Analysis, 简称 IDA)和结构分解法(Structural Decomposition Analysis, 简称 SDA) [8]。LMDI 分解法就是 Divisia IDA 的一个分支, Ang [9] 曾对其用法做过详细的介绍, 在将不同的指数分解方法与实际应用做了对比分析后, 总结出 LMDI 方法是所有方法中最好的。LMDI 分解法包括“加法分解”(LMDI-I)和“乘法分解”(LMDI-II), 这两种方法结果一致。本文采用 LMDI “加法分解”对上述 Kaya 模型进行碳排放驱动因素分解, 定义第 t 期和基期的能源消费碳排放量为 C_t 和 C₀, 第 t 期和基期的碳排放增量 ΔC 可以表示为

$$\Delta C = C_t - C_0 = \Delta C_p + \Delta C_g + \Delta C_e + \Delta C_f \quad (3)$$

其中, ΔC_p 表示人口变化引起的 CO₂ 排放变化量, 即人口规模效应; ΔC_g 表示人均 GDP 变化引起的 CO₂ 排放变化量, 即经济规模效应; ΔC_e 表示为能源强度变化引起的 CO₂ 排放变化量, 即能源强度效应; ΔC_f 表示一次能源消费碳强度变化引起的 CO₂ 排放变化量, 即能源结构效应。各种效应的计算公式如下:

$$\Delta C_p = \frac{C_t - C_0}{\text{Ln } C_t - \text{Ln } C_0} \text{Ln} \left(\frac{p^t}{p^0} \right) \quad (4)$$

$$\Delta C_g = \frac{C_t - C_0}{\text{Ln } C_t - \text{Ln } C_0} \text{Ln} \left(\frac{g^t}{g^0} \right) \quad (5)$$

$$\Delta C_e = \frac{C_t - C_0}{\text{Ln } C_t - \text{Ln } C_0} \text{Ln} \left(\frac{e^t}{e^0} \right) \quad (6)$$

$$\Delta C_f = \frac{C_t - C_0}{\text{Ln } C_t - \text{Ln } C_0} \text{Ln} \left(\frac{f^t}{f^0} \right) \quad (7)$$

各个效应的贡献率分别为 $\frac{\Delta C_p}{\Delta C}$ 、 $\frac{\Delta C_g}{\Delta C}$ 、 $\frac{\Delta C_e}{\Delta C}$ 和 $\frac{\Delta C_f}{\Delta C}$ 。

3. 数据来源与处理

3.1. 数据来源

本文首先测算的时段是 2000~2013 年，中国、美国、印度、俄罗斯和德国碳排放分解所需要 CO₂ 排放量、人口总量(POP)、国内生产总值(GDP)、一次能源消费量(TPES)数据均来自于 IEA 数据库(2016)。其中 GDP 按购买力平价计算，统一折成 2005 年美元不变价。

3.2. 数据处理结果及分析

通过计算基础数据得到人口、人均 GDP、能源强度(e = TPES/GDP)、能源碳强度(f = C/TPES)，根据公式(3)~(7)分别对中国、美国、印度、俄罗斯和德国进行 LMDI 分解，计算出 ΔC_p 、 ΔC_g 、 ΔC_e 和 ΔC_f (表 1)。

为了进一步观察，以 2000 年为基期运用 LMDI 加法模型对中国碳排放进行逐年分解。从图 1 可以看出中国人口规模效应贡献较为稳定，能源强度效应是主要抑制因素，经济规模是拉动碳排放增长的主要驱动因素，由于粗放式的经济增长，大量的能源消费导致我国成为 CO₂ 最大排放国[10]。中国未来要考虑发展低碳经济，控制因经济快速增长而导致的碳排放增加。目前，中国的能源结构效应还表现为正效应，这与中国以煤炭为主的能源消费结构有关，因此未来要考虑改变中国的能源消费结构，降低煤炭的消费占比，提升水电等新能源的消费比重。

美国(如图 2(A))的碳排放增量近年来呈现下降的趋势，受 2008 年金融危机的影响，经济下行导致化石能源需求放缓，碳排放的贡献度也出现下滑，随着经济的回升开始缓慢上升；能源强度效应为主要的抑制因素，这种负效应很大程度的抵消了因人口和经济增长导致的碳排放增长；美国能源结构效应抑制碳排放的增长，这与美国从煤炭为主的能源消费模式转变为天然气为主、风力和太阳能为辅的能源结构有关[11]。

印度(如图 2(B))的经济增长是主要的促进因素，印度经济发展起步较晚，尚未完成工业化阶段。虽然总量大但人均水平较低，随着经济的高速增长和能源消费量的增加，碳排放量也迅速提升。印度的能源结构与中国类似，都以煤炭为主，这与两国的能源储量呈“多煤少油少气”结构有关。能源强度效应是主要抑制因素，但不能抵消其他三种效应导致的 CO₂ 排放增量。

俄罗斯(如图 2(C))和德国(如图 2(D))的经济规模效应都为主要的促进因素，受金融危机的影响，碳排放增量有所下降后又逐渐回升；两国人口规模导致的碳排放增量都围绕 0 值出现小幅度的波动；两国能源强度效应都表现出很强的抑制作用，通过结构调整和降低能耗使能源强度下降，抑制 CO₂ 的排放；两国能源结构效应对碳排放增量的贡献较小，表现为微弱的负效应。俄罗斯作为能源大国，减少了对石油、煤炭的使用，向碳含量较低的天然气过渡。而德国能源紧张，主要依赖进口，因此能源结构从“以煤为主”到“以油为主”，而且鼓励开发水能、风能等可再生能源，减轻对化石能源进口的依赖。

Table 1. Carbon emissions incremental effect factor decomposition of five countries during 2000-2013

表 1. 2000~2013 年五国碳排放增量效应因素分解

国家	效应(百万吨)	ΔC_p	ΔC_g	ΔC_e	ΔC_f	ΔC
中国		402.67	6351.02	-1376.94	522.58	5899.34
美国		617.77	540.25	-1376.75	-320.75	-539.47
印度		255.25	933.28	-446.22	219.71	962.02
俄罗斯		-32.05	874.65	-597.58	-184.60	60.42
德国		-7.8836	112.4116	-149.994	-3.0719	-48.54

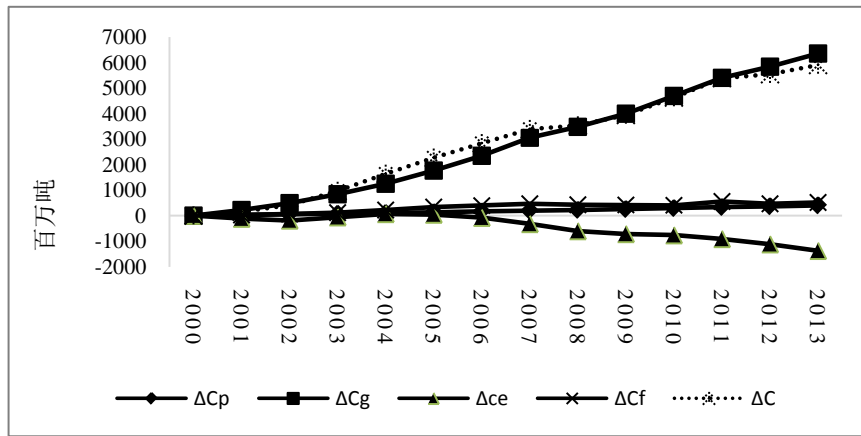


Figure 1. Annual energy consumption carbon emission factor contribution change of China

图 1. 中国逐年能源消费碳排放因素贡献变化

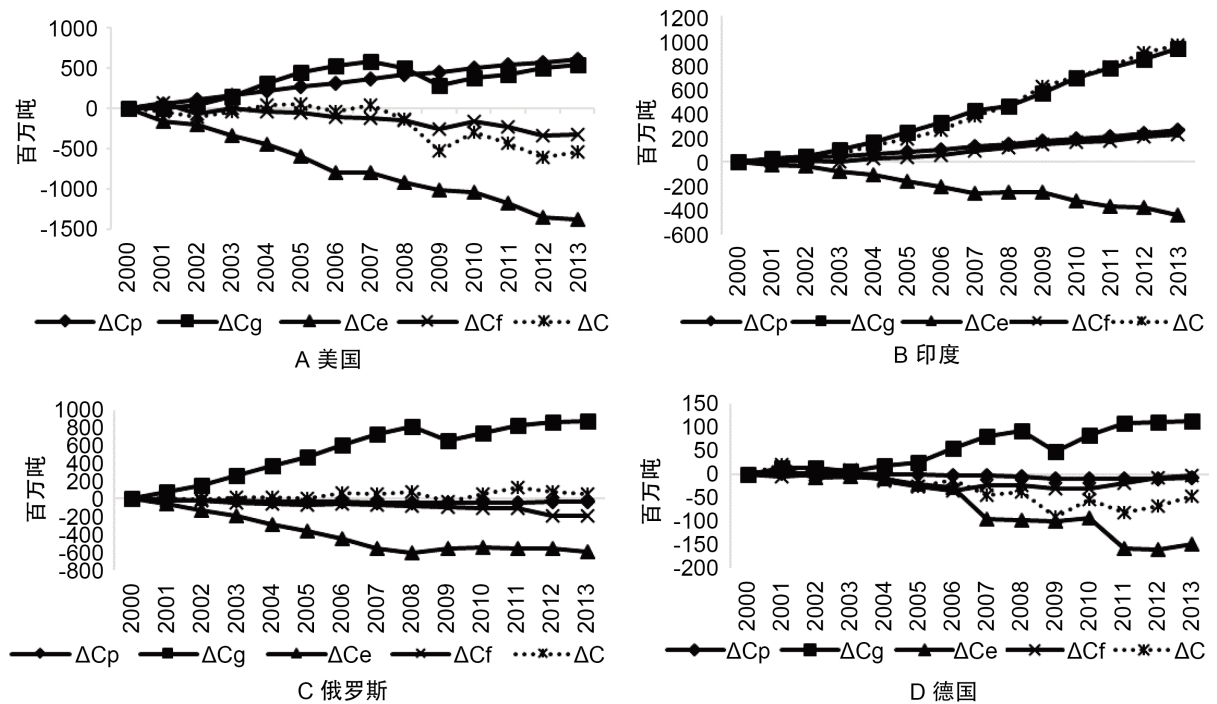


Figure 2. Annual energy consumption carbon emission factor contribution change of typical countries

图 2. 典型国家逐年能源消费碳排放因素贡献变化

4. NDC 约束下的 LMDI 分解结果

巴黎气候大会之前五国提交的 NDC 文件，确定各自 2020 年后应对气候变化行动的目标。但作为碳排放第二大的美国 2017 年 6 月 2 日宣布退出《巴黎协定》，对世界其他国家而言将带来更大的减排压力。下面根据其他三国(除德国)提交的 NDC 预测 2030 碳排放量，另外，2030 年人口参考世界人口预测 (WPP)数据，经济参考普华永道(PwC) 2030 年 GDP 预测数据，一次能源消费量参考国际能源署 IEA (2016) 数据，并用 LMDI 分解 2014~2030 年 CO₂ 排放增量，得出四种效应对碳排放增量的贡献值。

中国根据自身国情确定自主行动目标：2030 年左右 CO₂ 排放达到峰值并争取尽早达峰；单位国内生

产总值 CO₂ 排放比 2005 年下降 60%~65% [12]。图 3 为中国 2000~2013 年与根据 NDC 文件得出 2014~2030 年两个阶段 CO₂ 排放增量 LMDI 分解对比情况，根据计算结果两个阶段 CO₂ 排放增量分别为 58.99 亿吨和 17.88 亿吨。针对 2014~2030 这一阶段，经济规模效应仍为主要促进因素；能源强度效应为主要的抑制因素，并且抑制强度大幅度增高，很大程度上抵消了因经济规模效应和人口规模效应对碳排放的影响，说明我国未来大力提高能源利用水平；能源结构效应第一阶段为正效应，第二阶段转变为负效应，虽然贡献率仅为 8.51%，但说明我国正在面临能源结构转型，调整从以煤为主的能源消费结构，积极推进清洁能源替代。

印度 NDC 目标是承诺在 2030 年把单位 GDP 排放强度在 2005 年的基础上降低 33% 到 35%。图 4 为印度 2000~2013 年与根据 NDC 文件得出 2014~2030 年两个阶段 CO₂ 排放增量 LMDI 分解对比情况，印度两个阶段 CO₂ 排放增量分别为 9.02 亿吨和 19.2 亿吨。针对 2014~2030 这一阶段，人口规模效应对碳排放增量的贡献率不大；印度目前大力发展经济，经济规模效应仍为主要促进因素；随着经济的发展和水平的提高，能源强度效应对印度碳排放抑制作用增强；在印度的能源结构中，长期占据主导地位的煤电正在降温，能源结构效应对碳排放增长的促进作用也逐渐减弱。

俄罗斯的 NDC 的目标是到 2030 年将俄罗斯的人为温室气体限制在 1990 年的 70%~75%。图 5 为俄罗斯 2000~2013 年与根据 NDC 文件得出 2014~2030 年两个阶段 CO₂ 排放增量 LMDI 分解对比情况，俄罗斯两个阶段 CO₂ 排放增量分别为 0.6 亿吨和 1.41 亿吨。针对 2014~2030 这一阶段，经济规模和能源强度效应分别为主要的促进因素和抑制因素；俄罗斯是世界上主要的能源大国，在《2035 年前俄罗斯能源战略草案》中强调调整能源生产结构，寻求能源发展平衡。能源结构效应由上一阶段的负效应转变为正效应，由能源结构效应导致的 CO₂ 排放增量为 0.79 亿吨。

欧盟以整体的形式提交了自主贡献目标，本文对德国 2014~2030 年碳排放预测参考德国联邦政府发布的《能源规划纲要》[13]。纲要中预计到 2030 年德国温室气体排放量比 1990 年水平降低 55%。图 6 为德国 2000~2013 年与根据纲要得出 2014~2030 年两个阶段 CO₂ 排放增量 LMDI 分解对比情况，德国两个阶段 CO₂ 排放增量分别为 -0.49 亿吨和 -3.43 亿吨，碳排放呈负增长趋势。针对第二阶段，经济规模仍为主要促进因素，人口效应、能源强度效应和能源结构效应对碳排放影响都呈现为抑制作用。德国国内能源资源有限，能源供应很大程度上依赖于进口。为了摆脱对能源进口的依赖，德国通过发展可再生能源和提高能效，建立高度灵活的电力系统等方式，向低碳能源结构的转型取得了显著的成效[14]。

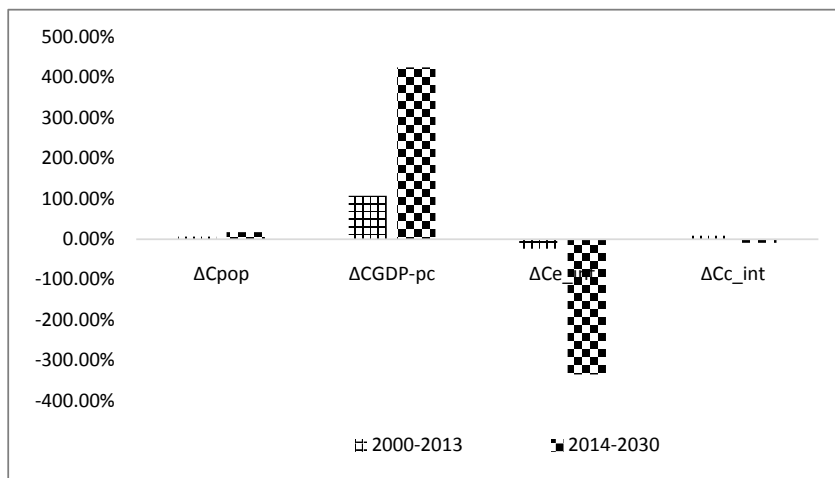


Figure 3. Two stages of CO₂ emissions increment LMDI decompose results of China
图 3. 中国两个阶段 CO₂ 排放增量 LMDI 分解结果

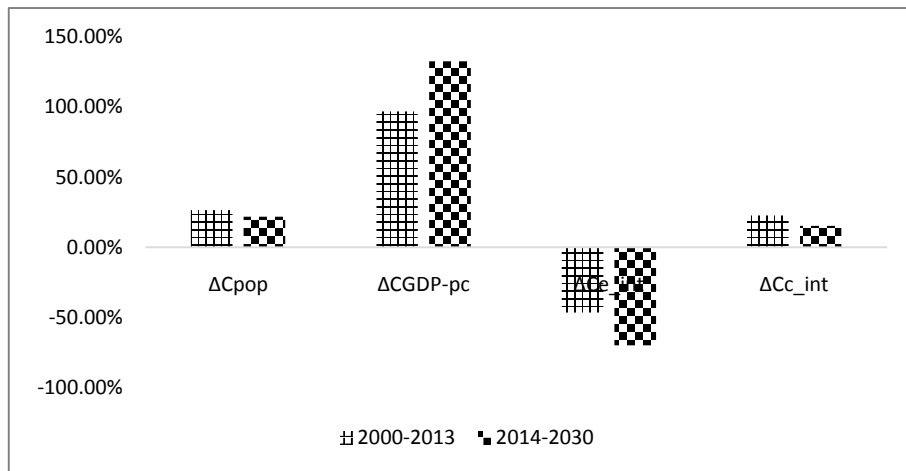


Figure 4. Two stages of CO₂ emissions increment LMDI decompose results of India
图 4. 印度两个阶段 CO₂ 排放增量 LMDI 分解结果

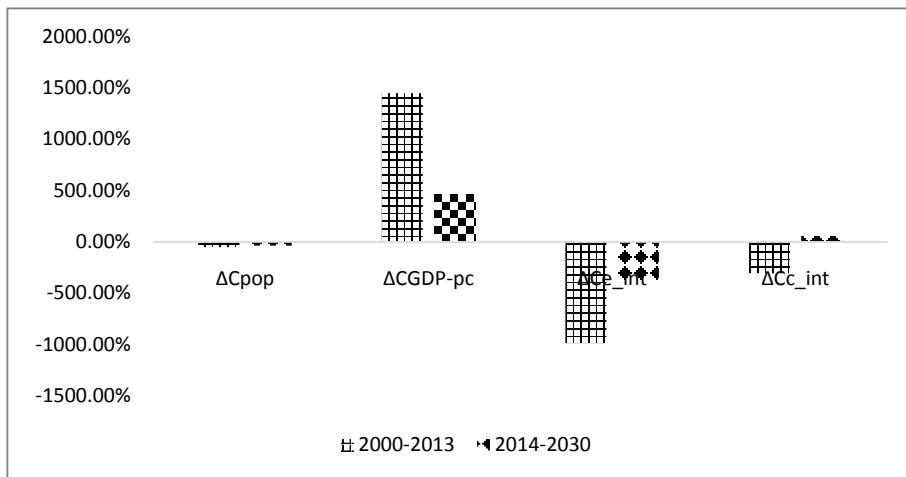


Figure 5. Two stages of CO₂ emissions increment LMDI decompose results of Russia
图 5. 俄罗斯两个阶段 CO₂ 排放增量 LMDI 分解结果

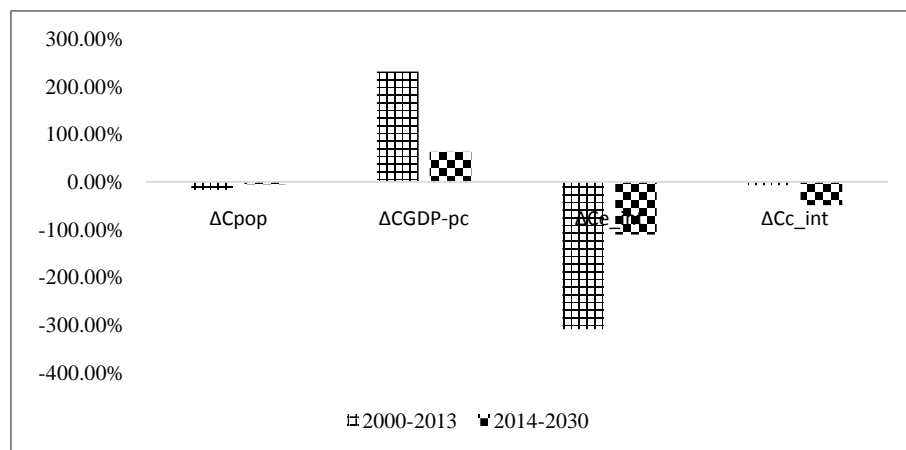


Figure 6. Two stages of CO₂ emissions increment LMDI decompose results of Germany
图 6. 德国两个阶段 CO₂ 排放增量 LMDI 分解结果

5. 结论及对策

本文运用 Kaya 恒等式和 LMDI 分解法将中国、美国、印度、俄罗斯和德国 2000~2013 年能源消费碳排放变动分解为人口规模、经济规模、能源强度和能源结构四个效应，分析量化了这些因素对以上国家逐年能源消费碳排放的影响，并根据 NDC (美国和德国除外)预测 2030 年碳排放总量，分解 2014~2030 年四种效应对碳排放增量贡献程度。结论如下：

1) 对于中、美、印、俄和德国这五个碳排放大国，研究发现经济规模效应促进是碳排放的主导因素，能源强度效应为主要抑制因素，其中，美国和德国的能源强度效应抑制作用较强，抵消了因经济增长引起的碳排放。

2) 人口规模效应和能源结构效应因国而异，人口规模效应对中国、印度和美国表现为正效应，其中印度人口效应略强，而对俄罗斯和德国绝大多数年份表现为负效应。能源结构效应除中国和印度表现为正效应外，美国、俄罗斯和德国均表现为负效应。

3) 根据各国提交的 NDC 预测 2030 年碳排放总量，运用 LMDI 分解法分解 2014~2030 年能源消费碳排放，得到各国四个效应分别对应的碳排放增量，发现经济规模效应仍然为主要的促进因素和能源强度效应仍然为主要的抑制因素。

根据所分析的结果，各国要想切实降低 CO₂ 排放量，就需要从影响碳排放的因素入手。提出政策建议如下：

1) 抑制因经济增长方式不合理而导致 CO₂ 排放的过快增长，实现向集约型和低碳型转变。虽然经济增长对能源消费碳排放的促进作用持续增长，但能源强度效应对各国表现出明显的抑制作用，各国应该重视能源领域技术研发工作，大力提高能源利用效率，比如洁净煤炭技术、工艺创新和升级。

2) 优化能源结构，开发利用清洁和可再生能源。从当前全球能源转型的大背景来看，各国应该选择符合本国实际的过渡能源，将能源体系从化石能源体系转向可再生、可持续能源体系。另外，各国应深入分析电力系统可挖掘潜力，对各种技术手段进行成本效益研究，提高电力系统灵活性，保障可再生能源的消纳。

3) 完善社会参与机制。为实现 2030 年应对气候变化的目标，需要全社会积极参与。企业应该探索资源节约型、环境友好型的发展模式，将新技术和新工艺有效的运用到工业生产当中，强化企业低碳发展责任；从全民角度出发，大力倡导低碳生活和绿色消费的发展理念，选择节能低碳的生活方式，走可持续发展道路。

基金项目

国家自然科学基金面上项目“低碳电力转型目标决策、路径优化与政策机制协同设计”(批准号：71673085)；北京市社科基金一般项目“北京市清洁能源价格形成机制及财税政策研究”(批准号：16YJB027)。

参考文献 (References)

- [1] 顾高翔, 王铮. INDC 背景下研发投资驱动的碳减排研究[J]. 中国科技论坛, 2017(5): 158-165.
- [2] 崔学勤, 王克, 邹骥. 2°C 和 1.5°C 目标对中国国家自主贡献和长期排放路径的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(12): 1-7.
- [3] Ang, B.W. (2004) Decomposition Analysis for Policymaking in Energy. *Energy Policy*, **32**, 1131-1139. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00076-4)
- [4] 徐国泉, 刘则渊, 姜照华. 中国碳排放的因素分解模型及实证分析: 1995-2004[J]. 中国人口·资源与环境, 2006,

16(6): 158-161.

- [5] 汪艺梅, 张裕芬, 冯银厂, 高丽洁, 宋晓辉. 中国和世界典型国家能源消费碳排放因素分解研究[J]. 安全与环境学报, 2011(4): 81-86.
- [6] 于雪霞. 金砖国家经济发展与能源消费碳排放因素分解比较分析[J]. 生产力研究, 2015(6): 103-108+161.
- [7] 顾阿伦, 何崇恺, 吕志强. 基于 LMDI 方法分析中国产业结构变动对碳排放的影响[J]. 资源科学, 2016, 38(10): 1861-1870.
- [8] 郭朝先. 中国碳排放因素分解: 基于 LMDI 分解技术[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(12): 4-9.
- [9] Ang, B.W. (2005) The LMDI Approach to Decomposition Analysis: A Practical Guide. *Energy Policy*, **33**, 867-871. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.010>
- [10] 赵爱文. 中国碳排放、能源消费与经济增长关系研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [11] 张抒梦, 董虹. 美国经济增长、二氧化碳排放及能源消耗的动态关系研究[J]. 山西财经大学学报, 2016(S2): 1-7+10.
- [12] 徐华清, 柴麒敏, 李俊峰. 应对气候变化的中国贡献[J]. 决策与信息(中旬刊), 2015(8): 117-117.
- [13] 王志强. 德国联邦政府 2050 年能源规划纲要——致力于实现“环境友好、安全可靠与经济可行”的能源供应[J]. 全球科技经济瞭望, 2011, 26(3): 5-17.
- [14] 郭基伟, 汪晓露. 德国能源转型的经验、挑战及其启示[J]. 全球科技经济瞭望, 2014, 29(1): 72-76.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ccrl@hanspub.org