



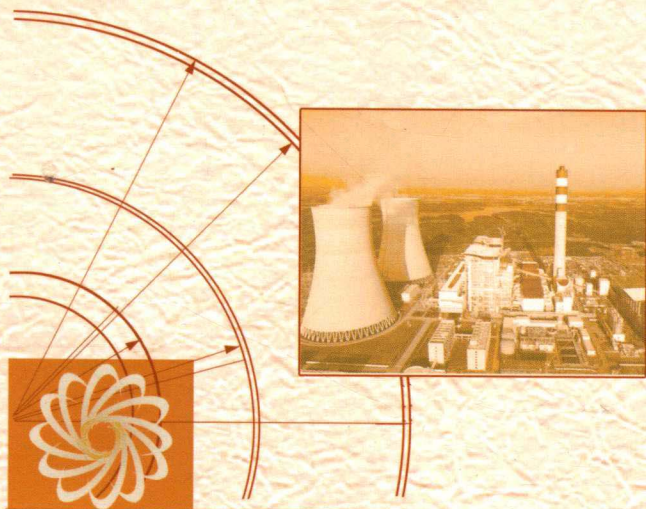
清华大学能源环境经济研究所  
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY  
TSINGHUA UNIVERSITY

# 重大能源行动的降碳减排协同效益 分析方法及中国案例研究

METHODOLOGY DEVELOPMENT AND CASE STUDY FOR CHINA OF  
GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND AIR POLLUTANTS EMISSIONS REDUCTION  
CO-BENEFIT ANALYSIS OF MAJOR ENERGY ACTIONS

欧训民 袁杰辉 彭天铎◎著

OUXUNMIN YUANJIEHUI PENGTIANDUO



经济管理出版社  
ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE



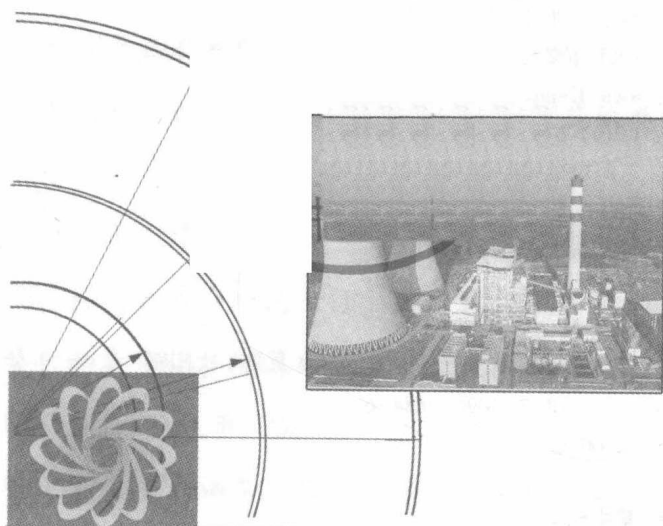
清华大学能源环境经济研究所  
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY  
TSINGHUA UNIVERSITY

# 重大能源行动的降碳减排协同效益 分析方法及中国案例研究

METHODOLOGY DEVELOPMENT AND CASE STUDY FOR CHINA OF  
GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND AIR POLLUTANTS EMISSIONS REDUCTION  
CO-BENEFIT ANALYSIS OF MAJOR ENERGY ACTIONS

欧训民 袁杰辉 彭天铎◎著

OUXUNMIN YUANJIEHUI PENGTIANDUO



 经济管理出版社  
ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE

图书在版编目 (CIP) 数据

重大能源行动的降碳减排协同效益分析方法及中国案例研究/欧训民, 袁杰辉, 彭天铎著. —北京: 经济管理出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-5096-5684-6

I. ①重… II. ①欧… ②袁… ③彭… III. ①节能减排—研究—中国 IV. ①F424. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 043047 号

组稿编辑: 郭丽娟

责任编辑: 范美琴

责任印制: 司东翔

责任校对: 董杉珊

出版发行: 经济管理出版社

(北京市海淀区北蜂窝 8 号中雅大厦 A 座 11 层 100038)

网 址: [www.E-mp.com.cn](http://www.E-mp.com.cn)

电 话: (010) 51915602

印 刷: 三河市延风印装有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 720mm×1000mm/16

印 张: 6.5

字 数: 69 千字

版 次: 2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5096-5684-6

定 价: 45.00 元

· 版权所有 翻印必究 ·

凡购本社图书, 如有印装错误, 由本社读者服务部负责调换。

联系地址: 北京阜外月坛北小街 2 号

电话: (010) 68022974 邮编: 100836

# 前 言

在现代化进程中，中国将长期面临保障能源安全、减缓气候变化和治理大气污染所带来的挑战。着力于消费结构、利用方式和使用过程的调整和优化的重大能源行动，极可能带来温室气体减排和大气污染物减排的协同效益，但目前采用科学的分析框架、可信的数据基础得出全面系统测算结果的研究成果还比较少。我们努力从国际视野，致力于开发分析框架和评估方法以研究应对气候变化和大气污染的重大能源行动的实际效果，为中国及其他类似国家提供决策参考。

过去几年，我们建立起针对重大能源行动的温室气体减排和大气污染物减排协同效益分析的方法。其中对能源行动的分析视角包括升级、替代和集中化，测算的温室气体主要包括  $\text{CO}_2$ ，测算的大气污染物包括  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{PM}_{2.5}$ 。

本书对中国近年来涵盖煤炭、油品和农村能源的 7 项重大能源行动的上述减排协同效益进行了全面的案例分析，并且对中国发展天然气汽车这一重大能源行动进行了细致的案例分析。

本书研究工作主要由袁杰辉和欧训民合作完成，彭天铎参与了



部分数据调研、整理和分析工作。第一、第二和第六章由袁杰辉、欧训民执笔；第三、第四章由欧训民、袁杰辉执笔；第五章由袁杰辉、彭天铎和欧训民执笔；全书由欧训民和袁杰辉负责统稿。清华大学能源环境经济研究所的老师、同学们在本课题研究和本书写作过程中提供了多方面的指导和支持。

本书研究工作得到国家自然科学基金委员会、国家能源局、工信部、科技部和中国国际经济交流中心的大力支持和帮助。经济管理出版社郭丽娟编辑为本书的出版做了大量细致的工作。在此一并表示感谢。

相关研究同时得到了国家自然科学基金项目（71690244、71774095）、教育部人文社会科学重点研究基地重大项目（17JJD630005）和科技部国际科技合作计划项目（2016YFE0102200）的经费支持。

由于笔者水平所限，书中不足之处在所难免，恳请专家和读者给予批评指正。

欧训民 袁杰辉 彭天铎

2018年2月于清华园



## 摘 要

高碳、高污染化石能源的使用造成大量温室气体 (GHG) 和大气污染物的排放, 产生日益严重的气候变化和大气污染 (特别是雾霾灾害) 问题。气候变化与大气污染同根同源, 即都属于能源系统, 在应对中应把能源的合理开发利用作为突破点, 进行协同治理。本书在归纳分析中国的能源消费、能源相关 GHG 和主要大气污染物排放特点的基础上, 针对性地建立了基于多重维度与多重视角的、可实操的、可测度的分析框架和评估方法, 测度中国应对气候变化和大气污染能源行动的减排效果, 并提升到国际视角, 为那些与中国类似的其他国家进行下一步行动的思路梳理、行动制定与实施提供决策参考。

结果显示, 针对中国提出的关键能源行动在 2016 年约减少 600 万吨主要大气污染物和 5.8 亿吨 GHG 的排放。到 2020 年和 2030 年, 中国这些能源行动将分别贡献总计 1200 万吨的主要大气污染物、10.9 亿吨的 GHG 以及 2100 千万吨的主要大气污染物、19.8 亿吨 GHG 的减排。对于加快发展天然气汽车 (NGV) 的能源行动, 到 2020 年和 2030 年, 中国 NGV 将分别减排大气污染物约



312 万吨和 560 万吨，减排 GHG 约 2796 万吨和 5049 万吨。

本书的创新之处主要体现在：①从能源特别是能源结构的视角探讨合适的行动以协同应对气候变化和大气污染；②建立简单、实用的量化评估应对气候变化和大气污染能源行动实施效果的分析思路框架和计算方法；③提升到国际视角，为所有和中国类似的国家提供决策参考。

**关键词：**气候变化；大气污染；协同治理；能源行动；中国；效果评价；天然气汽车

## Abstract

Due to the large-scale utilization of high-carbon and high-pollution fossil energy, considerable amounts of critical air pollutants (CAPs) and greenhouse gas (GHG) have been emitted, which has led to increasingly serious global climate change and local air pollution problems. Given that climate change and air pollution have the same source, energy systems, the rational development and use of energy for collaborative governance should be emphasized to solve these problems in parallel. Based on a summary of the characteristics of energy consumption, related GHG and CAP emissions in China, this study presents a multi-dimensional, multi-perspective, practical and achievable analysis framework and related evaluation methods to quantitatively evaluate the emission reduction effects of energy actions aimed at tackling climate change and governing air pollution in support of sustainable development. From an international perspective, this study can help countries similar to China make decisions on the thinking combing of next-step actions, the formulation and implementation of actions to ad-





dress climate change and improve air quality.

The results indicate that the key energy actions proposed for China would result in emission reductions of approximately 6 million tons (Mt) of CAPs and 580 Mt of GHG in 2016. By 2020 and 2030, emission reductions of 12 Mt of CAPs with 1094 Mt of GHG and of 21 Mt of CAPs with 1980 Mt of GHG, respectively, will be achieved. Regarding the energy action of promoting the development of natural gas vehicles (NGVs), by 2020 and 2030, the NGV fleet will increase the CAP and GHG emission reduction benefits by approximately 3.1 Mt of CAPs with 28.0 Mt of GHG and 5.6 Mt of CAPs with 50.5 Mt of GHG, respectively.

The most important innovations of this book are mainly reflected in:

- ① from an energy perspective, especially an energy structure perspective, to explore appropriate actions for tackling climate change and air pollution;
- ② establishing a simple and practical analytical framework and related evaluation methods focusing on quantitatively evaluating the emission reduction effect of specific energy actions aimed at tackling climate change and air pollution;
- ③ from an international perspective to help countries similar to China make decisions on implementing energy actions aimed at tackling climate change and air pollution.

**Key Words:** Climate Change; Air Pollution; Collaborative Governance; Energy Action; China; Effect Evaluation; NGV

# 目 录

第一章 绪论.....	1
第二章 中国能源消费、GHG 排放与大气污染物排放特点 .....	7
第一节 中国能源消费的特点.....	7
第二节 中国能源相关 GHG 排放的特点 .....	8
第三节 中国能源相关大气污染物排放的特点.....	9
第四节 本章小结 .....	12
第三章 概念框架的开发 .....	13
第一节 减排效果评估的分析框架介绍 .....	13
一、促进煤炭的清洁利用 .....	14
二、增加低碳燃料使用以替代煤炭 .....	15
三、提高油品标准 .....	17
四、增加低碳燃料使用以替代油品 .....	18
五、农村能源利用集中化 .....	19



第二节	减排效果评估的方法	20
一、“促进煤炭清洁利用”能源行动的减排效果的评估方法	21	
二、“增加低碳燃料使用以替代煤炭”能源行动的减排效果的评估方法	21	
三、“提高油品标准”能源行动的减排效果的评估方法	22	
四、“增加低碳燃料使用以替代油品”能源行动的减排效果的评估方法	22	
五、“农村能源利用集中化”能源行动的减排效果的评估方法	23	
第三节	本章小结	24
第四章	中国案例及对他国的借鉴	27
第一节	中国能源行动的 GHG 和大气污染物减排效果评估	27
一、中国各能源行动的 GHG 和大气污染物减排效果	28	
二、中国能源行动的 GHG 和大气污染物整体减排效果	36	
第二节	对他国的借鉴	40
一、建立分析框架	40	
二、应用建立的框架分析能源行动的减排效果	41	
三、在效果分析的基础上确定关键的能源行动	41	
四、出台辅助措施以保障相应能源行动的实施	42	
第三节	本章小结	43

<b>第五章 中国发展天然气汽车的大气污染物与 GHG 减排</b>	
<b>效益</b> .....	45
<b>第一节 引言</b> .....	45
<b>第二节 研究方法</b> .....	47
一、边界 .....	47
二、方法学 .....	49
<b>第三节 数据与假设</b> .....	52
<b>第四节 结果与讨论</b> .....	55
一、中国 NGV 的燃料消耗 .....	55
二、中国 NGV 的主要大气污染物减排 .....	57
三、中国 NGV 的全生命周期能耗 .....	59
四、中国 NGV 的全生命周期 GHG 减排 .....	61
五、提高中国 NGV 的石油替代、大气污染物与 GHG 减排 作用 .....	63
<b>第五节 本章小结</b> .....	65
<b>第六章 研究总结与主要结论</b> .....	67
<b>第一节 研究总结</b> .....	67
一、归纳分析中国的能源消费特点、能源相关 GHG 和主要 大气污染物排放特点 .....	68
二、构建评估大气污染物和 GHG 减排能源行动实施效果的 分析框架和计算方法 .....	68
三、分析中国案例经验及指出对他国的借鉴 .....	68



四、以中国案例中发展 NGV 的能源行动为实例进行深入 分析·····	69
第二节 主要结论 ·····	70
一、针对中国提出的能源行动产生巨大的 GHG 和主要大气 污染物减排效益 ·····	71
二、促进 NGV 发展的能源行动具有显著的 GHG 和主要大气 污染物减排效果 ·····	71
第三节 研究展望 ·····	72
一、丰富、完善当前构建的分析框架和评估方法及中国案例的 分析·····	72
二、对发展 NGV 能源行动进行深入分析 ·····	72
参考文献 ·····	75
附录 ·····	89

# 第一章 绪论

随着全球人口的增长和经济的发展，特别是发展中国家的进步，世界总的能源需求增长显著。1971~2016年，世界总的能源消费增长十分明显，增幅约为160%<sup>[1,2]</sup>。尽管高碳、高污染的煤炭、石油等化石能源所占的份额在逐渐降低，其他相对低碳、低污染的能源的份额显著增加，但是现在的世界一次能源消费结构依然以煤炭、石油等高碳、高污染的化石能源为主，2016年其占一次能源消费结构比例约为61.4%<sup>[2-4]</sup>（见图1-1）。此外，由于效率的低下，通常伴随着更多的能源资源被消耗或浪费。

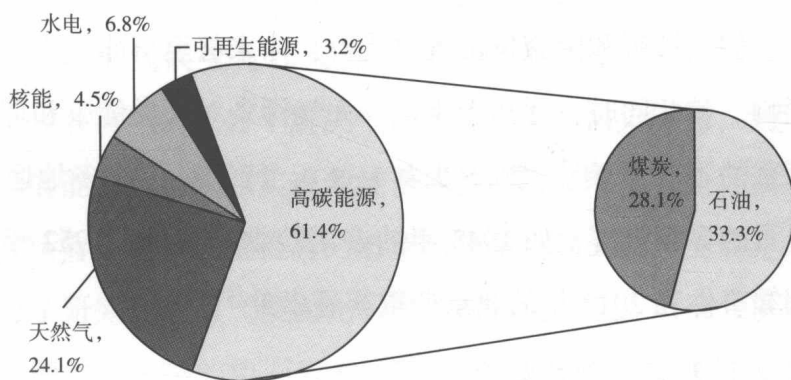


图 1-1 2016 年世界一次能源消费结构





随着这些化石能源的大量使用，大量大气污染物和温室气体（Greenhouse Gases, GHG）被释放出来。能源相关的 GHG 排放占全球人类排放的 GHG 的比例最大，约为 68%<sup>[4,5]</sup>，对气候变化贡献巨大。以煤炭为例，2016 年煤炭仅占世界一次能源消费的 28.1%，但由于煤炭单位能源使用释放的碳含量高，2016 年其燃烧排放的二氧化碳（Carbon Dioxide, CO<sub>2</sub>）量却占到全球 CO<sub>2</sub> 排放总量的 45%<sup>[5-7]</sup>，而 CO<sub>2</sub> 又是 GHG 最主要的组成部分。能源的使用也是大量大气污染物排放的重要来源，这些主要大气污染物（Critical Air Pollutants, CAPs）包括颗粒物（Particulate Matter, PM，特别是 PM<sub>2.5</sub>）、二氧化硫（Sulfur Dioxide, SO<sub>2</sub>）等。2016 年这些由于能源的利用而产生的污染物对全球相应的污染物的排放贡献巨大，分别贡献了约 85% 的 PM<sub>2.5</sub> 和 99% 的 SO<sub>2</sub><sup>[7,8]</sup>。

随着大量的大气污染物和 GHG 被释放到大气中，大气污染（特别是雾霾污染）和气候变化问题变得日益严重。数十年来，气候的变化对几乎所有大陆和海洋的自然和人类系统产生了各种各样的影响<sup>[4,9-11]</sup>。气候变化正在破坏国家经济，影响人们的生活，使现在的人们、社区和国家付出沉重代价，未来甚至可能产生更加严重的影响。与此同时，近几十年来，大气污染对人类健康和环境产生了严重的不利影响<sup>[7-9,12]</sup>（见表 1-1），特别是，许多地区都遭受了严重的雾霾灾害，如 1948 年的多诺拉烟雾事件，1952 年的伦敦大烟雾事件和 2013 年的北京严重雾霾事件<sup>[13-15]</sup>。

表 1-1 2012 年分疾病和地区的大气污染造成的死亡 (1000 人)

疾病种类	西太平洋		欧洲		东地中海		美洲		东南亚	非洲
	中低收入	高收入	中低收入	高收入	中低收入	高收入	中低收入	高收入		
急性下呼吸道疾病	11	1	2	0	28	0	3	0	49	76
慢性阻塞性肺疾病	84	9	7	0	9	0	3	0	126	4
肺癌	225	26	50	18	8	2	11	9	47	5
缺血性心脏病	270	27	157	106	91	1	50	24	304	52
中风	475	20	93	46	64	1	30	7	273	74
总计	1065	83	309	170	200	4	97	40	799	211

资料来源：世界卫生组织 (WHO) (2016) [12]。

考虑到对高品质生活日益强烈的诉求和各国追求经济、社会和环境可持续发展的迫切责任，积极应对气候变化和大气污染是必要的行动<sup>[9,16-18]</sup>。气候变化与雾霾污染同根同源，即都属于能源系统，在应对中应把能源的合理开发利用作为突破点，进行协同治理。协同应对气候变化和大气污染将产生显著的积极效益<sup>[19-21]</sup>。随着世界各国积极致力于解决气候变化和大气污染问题，制定和实施合理的能源行动以在实现环境目标的同时又不损害全球经济的增长和对所有人生活质量提高的愿望越来越受到关注。当前有许多学者致力于研究能源与气候变化、大气污染的关系，以及分析应对气候变化和大气污染的协同效益<sup>[22-24]</sup>。但现有研究多通过长期能源替代规划 (LEAP) 模型、亚太综合模型 (AIM/Enduse 模型) 等

复杂的模拟模型分析协同应对气候变化和大气污染的综合效益，包括环境效益和健康效益等<sup>[25-27]</sup>。

从国际视角看，关于构建简单、实用的分析框架重点研究基于能源结构特点应对气候变化和大气污染的特定能源行动的大气污染物和 GHG 减排效果的量化评估方面的思路框架、方法和工具存在空白。因此，有必要在借鉴国内外相关研究成果的基础上，开展应对大气污染和气候变化能源行动大气污染物和 GHG 减排效果的评估思路框架和方法的研究。

本书旨在构建一个多重维度、多重视角、可实现的分析框架（见图 1-2）及相应的评估方法，量化评估实现减少大气污染物和 GHG 排放量以促进世界各国——特别是面临这些挑战的发展中国家——可持续发展的能源行动的实施效果，以期为设计和实施确保经济和社会可持续发展的同时协同应对气候变化和大气污染的能源相关行动提供支撑。本书剩下部分的主要内容是：第二章归纳分析中国的能源消费特点、能源相关 GHG 和主要大气污染物排放特点；

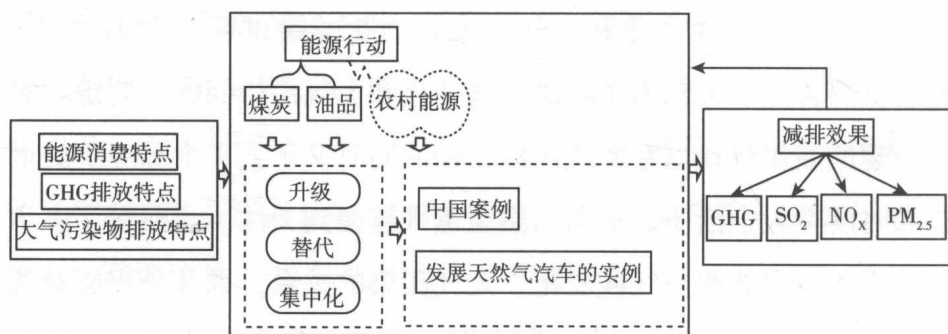


图 1-2 本书总体技术路线