

2010 - 2030 年中国重点部门 CO₂ 排放趋势预测及减缓措施选择

温宗国 张 绚 陈吉宁 谭琦璐 张雪莹

(清华大学环境学院 北京 100084)

摘 要 本文应用自底向上模型分析了能源、工业及消费三大部门中的七个重点行业的技术现状。本文以 2010 年为基准年,预测了在 2 个宏观经济情景和 3 个技术政策情境下,三部门 2015、2020 和 2030 年的 CO₂ 直接排放量变化趋势、拐点、减排潜力与成本。情景分析结果表明主要工业部门可在 2015 - 2020 年之间达到排放峰值,消费部门 CO₂ 排放量呈持续上升趋势,在 2030 年之前不会出现拐点。在社会低发展情景及中减排情景下,工业部门及消费部门 2020 年的 CO₂ 技术减排潜力约为 8.4 亿吨二氧化碳当量,其中工业、交通和建筑部门分别贡献 13%、48% 及 39%;2030 年减排潜力约为 16 亿吨二氧化碳当量,其中工业、交通以及建筑部门分别贡献 8%、44% 及 48%。在中国碳排放交易的制度设计过程中,政府应当更关注低碳型消费模式,而非当前以工业领域 CO₂ 控制为主的政策措施。

关键词 排放峰值 减排潜力 成本效益分析 自底向上模型

1 引言

2012 年 COP18 于多哈召开^[1],确定了自 2013 年开始实施《京都议定书》第二承诺期^[2]。中国作为世界第二大经济体,对内要为“十三五”规划做准备,对外要应对 2015 年巴黎气候大会谈判。因此,研究 2010 - 2030 年中国 CO₂ 排放的峰值、部门差异以及成本较优的减排技术路线图,是推进低碳发展和应对气候变化的重要问题。

2005 年欧盟启动的碳排放交易系统 (ETS)^[3]是最重要的国际减排措施之一。2007 年《巴厘行动计划》^[4]也明确提出了国际行业减排方法,而国际能源署 (IEA)^[5]推动了实现排放贸易的具体途径。美国清洁大气政策研究中心 (CCAP)^[6]开展了行业数据收集、行业减排方法的环境影响分析及配套能源政策的设计。2008 年后中国在北京等多地建立环境能源交易所,开展清洁发展机制 (CDM)^[7]和碳排放权交易等。如何选择减排成本较优的、对行业长期竞争力影响适当的领域,是影响 ETS 长远运行效率的关键因素之一。因此,核算未来部门排放趋势及减排潜力,寻找减排空间比较大的领域和技术措施是十分必要的。

2015 - 2030 年的能源、工业及消费三大主要部门 CO₂ 排放总量变化趋势和排放峰值是亟需分析的。工业部门的能源相关的 CO₂ 减排策略主要有三个方面:减缓产量增长速度;将能效提高到接近国际先进水平;调整能源结构,增加低碳能源的供应。^[8]中国政府需要制定政策来实现这些目标。分析电力、石油、钢铁、水泥、电解铝、汽车交通、建筑使用这七个重点行业的减排潜力和成本也很重要。

2 现状分析

2.1 行业 CO₂ 排放总体现状

本文将七个重点行业进一步划分为三大部门:能源部门(电力、石油)、工业部门(钢铁、水泥、电解铝)和消费部门(汽车交通、建筑使用)。扣除重复计算之后,本文得到,2010 年七

个重点行业 CO₂ 的直接排放总量为 61.1 亿吨二氧化碳当量，与 2005 年的 39.9 亿吨相比年均增长率达 8.9%（见图 1）。如图 2 所示，能源、工业、消费部门排放量占比分别为 47%、32%、21%。

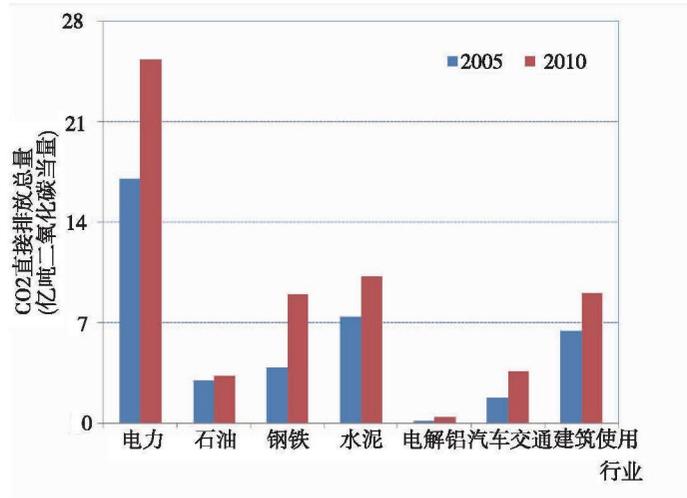


图 1 2005 和 2010 年七个重点行业 CO₂ 直接排放总量

注：化石燃料燃烧和生产过程含碳原料分解为行业直接排放量，生产过程中的电力使用带来的排放为间接排放量。两者之和为总排放量。为避免重复计算，本文分析直接排放总量。

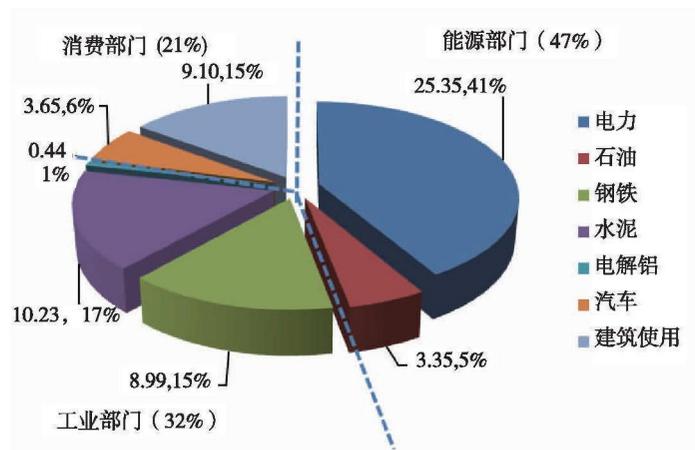


图 2 2010 年三大部门 CO₂ 直接排放总量比例

2.2 部门 CO₂ 排放现状

我国行业产品的单位能耗和碳排放强度正在逐年下降，已有部分大型企业工艺水平达到国际先进水平。但是大部分行业平均技术水平与国际先进水平仍存在较大差距，重点行业的能耗强度和 CO₂ 排放强度比国际先进水平高 20% 左右，尤其是在工业部门（见表 2）。在电力和石油行业，尽管单位碳排放已经降低，但由于生产和消费规模的扩大，总排放量仍在持续增加，如表 1 所示。

消费部门的减排在很大程度上与城镇化速度、模式和用能消费模式相关。这表明社会因素是减排的主要瓶颈，如表 3 所示。

表1 中国能源部门 CO₂ 排放现状

能源部门	排放现状	与国际水平比较
电力	1. 排放总量: 2010年 CO ₂ 排放量达 25.35 亿吨, 并且正在快速增长。 2. 排放强度: 燃煤发电单位供电煤耗 320g/kWh 3. 主要排放环节: 发电环节	1. 燃煤发电强度 (g/kWh): 已达国际先进水平 2. 电力发电强度 (g/kWh): 高于国际平均水平
石油	1. 排放总量: 2010年 CO ₂ 排放量 3.77 亿吨, 其中油气开采环节 1.1 - 1.2 亿吨, 炼油环节 2.16 亿吨。原油加工量增长迅速。 2. 排放强度: 58.25kgeo [*] /t 3. 主要排放环节: 油气开采和炼油环节超过 90%, 但是储运环节占比在稳步增长。	1. 油气生成强度 (g/kWh): 高于国际平均水平

* kgeo: 千克石油当量

表2 中国工业部门 CO₂ 排放现状

工业部门	排放现状	与国际水平比较
钢铁	1. 排放总量: 产量世界第一; 2010年 CO ₂ 排放量 11.24 亿吨。 2. 排放强度: 吨粗钢能耗量降至 604.6 kg/t。 3. 主要排放环节: 粗钢冶炼、燃料燃烧。	1. 吨钢综合能耗 (tce/t): 高于国际平均水平 2. 电炉钢占比: 低于国际平均水平
水泥	1. 排放总量: 产量世界第一, 2010年 CO ₂ 排放量 11.37 亿吨。 2. 排放强度: 吨熟料排放强度 851kgCO ₂ /t, 吨水泥排放强度 548kg CO ₂ /t。 3. 主要排放环节: 熟料生产、燃料燃烧。	1. 单位产品综合能耗 (tce/t 水泥): 高于国际平均水平 2. 新型干法水泥工业线综合能耗: 高于国际平均水平
电解铝	1. 排放总量: 2010年 CO ₂ 排放量 4.4 亿吨, 其中间接排放量占 90%。随着产量的增加, 排放量将继续增加 2. 排放强度: 能耗 14000 kWh/t 铝。单位产品 PFC 排放量逐年下降。 3. 主要排放环节: 阳极效应、电耗。	铝锭平均综合交流电耗 (kWh): 高于国际平均水平

表3 中国消费部门 CO₂ 排放现状

消费部门	排放特点	与国际水平比较
汽车交通	1. 排放总量: 2010年 CO ₂ 排放总量为 3.65 亿吨, 其中 51.5% 来自货车, 24.4% 来自客车, 24.1% 来自轿车。 2. 排放强度: 2010年乘用车单车 CO ₂ 排放强度 175g/km 3. 主要排放环节: 使用行为	1. 单位里程 CO ₂ 排放强度 (g/km): 达到国际平均水平 2. 燃料经济性 (L/100km): 达到国际平均水平
建筑能耗	1. 排放总量: 2010年 CO ₂ 排放总量为 16.7 亿吨。 2. 排放强度: 5 ~ 17 kgce/(m ² ·a), 随季节有所不同, 单位碳排放水平比发达国家低, 但增长速度快。 3. 主要排放环节: 使用行为	1. 北方采暖耗热量 (W/m ²): 高于国际平均水平。 2. 单位建筑面积碳排放量: 低于国际平均水平。

3 研究方法

本文采用自顶向下和自底向上相结合的模拟方法，设置 5 个模块（见图 3）。

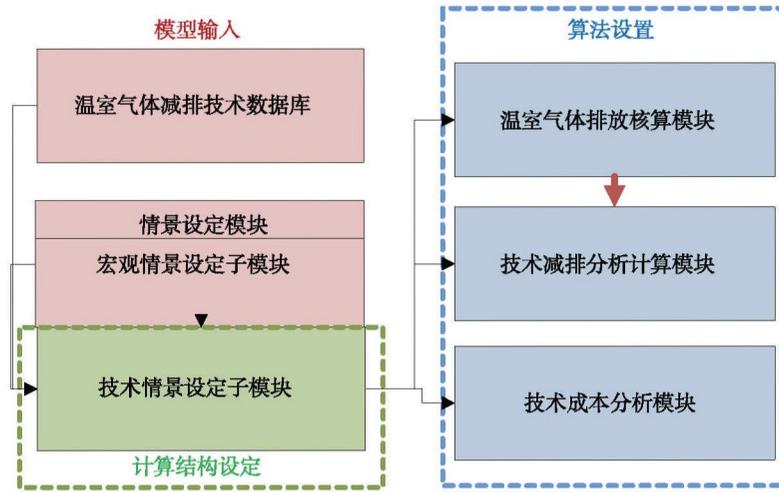


图 3 模型结构

3.1 温室气体减排技术数据库

能源部门和工业部门各种燃料的 CO₂ 排放因子统一采用 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南^[9] 及中国能源统计年鉴^[10] 中的默认值进行换算。电力行业 CO₂ 排放因子统一采用发改委公布的《2009 年中国区域电网基准线排放因子》中各区域电网电量边际排放因子的加权平均值。

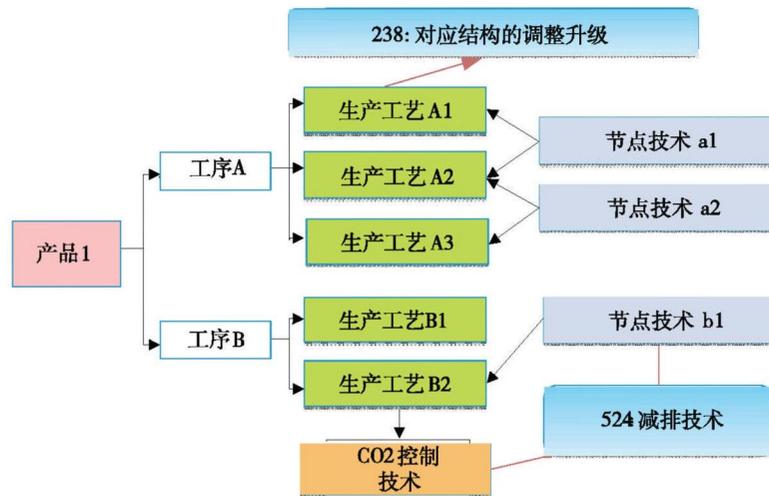


图 4 温室气体减排技术数据库结构

3.2 情景设置

(1) 宏观经济情景

表 4 宏观经济情景

情景	变量	2015	2020	2030
社会低发展 (SL)	GDP 增长率 (%)	7	5	4
	城镇化率 (%)	51.5	56	60
	人口 (十亿)	1.37	1.41	1.48
社会高发展 (SH)	GDP 增长率 (%)	8	7	6
	城镇化率 (%)	55	60	65
	人口 (十亿)	1.37	1.41	1.48

(2) 技术政策情景

表 5 技术政策情景设定

技术政策情景	技术政策设定
基准情景 (BAU)	1. 延续 2010 年前相关节能减排政策。 2. 技术普及率适当增加。
弱减排情景 (CW)	2011 - 2015 年间的行业技术发展情景考虑行业“十二五”发展规划, 充分考虑 2010 年后的各项节能减排措施。
中减排情景 (CM)	1. 在弱减排情景 (CPW) 基础上, 工艺结构进一步优化, 节能减排力度强化, 对低碳发展投入较大, 基本形成节约型的生产和消费方式。 2. 中国承诺的 2020 年减排目标作为重要参考条件。
强减排情景 (CS)	1. 假定启动全球减排行动和国内自愿减排, 中国强力推动低碳发展模式转型, 在低碳技术的研发和应用上增加资金和力度, 加强国际间合作。 2. 技术普及率基本达到该技术预期的最大普及率。

3.3 CO₂ 排放及减排潜力核算模块

本文应用 CO₂ 排放核算模块 (自顶向下模型) 及技术减排潜力分析模块 (自底向上模型) 两个模块相结合的方法核算排放总量及减排潜力。在减排潜力核算部分应用了三个集成的自底向上模型来计算行业 CO₂ 排放: LEAP 模型^{[11][12]}、AIM end - use 模型^[13] 以及清华大学建立的 APAMGRT 模型。CO₂ 排放核算模块公式如下:

(1) 燃料燃烧排放:

$$FCE = \sum_i F_i \times iEF_i \times 10^{-3} \quad (1)$$

设行业消耗 i 种燃料。其中, FCE 为燃料燃烧排放量 (吨二氧化碳当量), F 为燃料消耗量 (吨或立方米); iEF 为燃料的二氧化碳排放因子 (千克二氧化碳/吨燃料或千克二氧化碳/立方米燃料)。

(2) 含碳原料分解排放:

$$MCE = \sum_j M_j \times MC_j \times mEF_j \quad (2)$$

或

$$MCE = \sum_j M_j \times MCC_j \times \frac{44}{12} \quad (3)$$

设行业消耗 j 种原料。其中, MCE 为含碳原料分解产生的二氧化碳量 (吨二氧化碳当量), M 为原料消耗量 (吨); MC 为含碳原料品味 (%; 即有效成分的质量比); mEF 为含碳原料二氧化碳排放因子 (千克二氧化碳/千克原料), MCC 为原料中碳元素的质量分数 (%)。

(3) 电力消耗间接排放:

$$ECE = E_{Lec} \times elecEF \tag{4}$$

其中：ECE 为外购电力间接排放的二氧化碳量（吨），Elec 为行业外购电力（千瓦时）；elecEF 为电力生产的排放因子（吨二氧化碳/千瓦时）。

4 结果与讨论

4.1 CO₂ 排放总量趋势

在社会低发展情景与高发展情景下，不论中减排情景或强减排情景下，七个重点行业的 CO₂ 直接排放总量都会在 2015 - 2020 年间达到峰值（见图 5）。

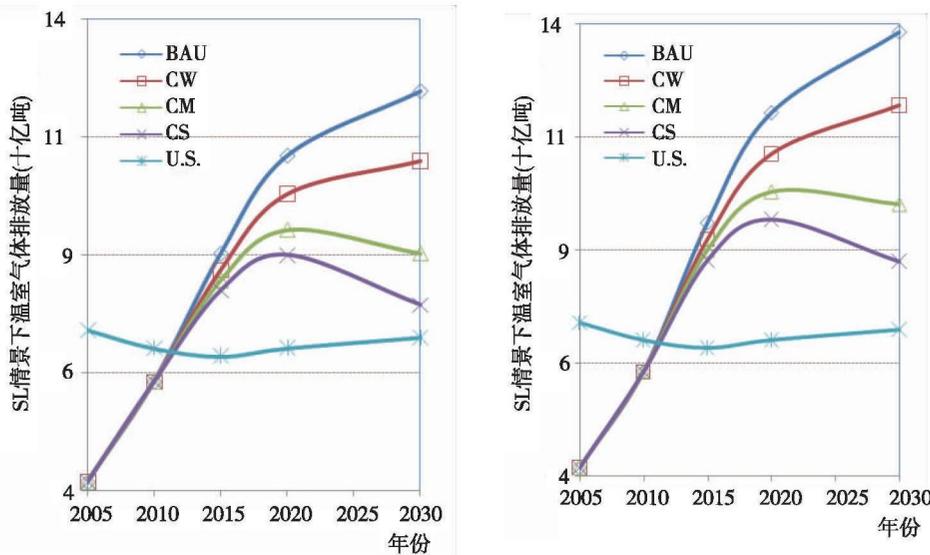


图 5 两个宏观经济情景、四个技术政策情景

及与美国政策情景相比较下温室气体直接排放总量预测分析

在 SL - BAU 情景下，CO₂ 直接排放总量至 2020 年将增加 78%，至 2030 年将增加 100%。在 SL - CW - 2030 情景下，CO₂ 直接排放总量将于 2030 年达到相对于基准年增长 76% 的水平，这比基准情景下达到相同水平的的时间推迟了 10 年。在中等强度的 SL - CM - 2020 情景下，CO₂ 直接排放总量将增加至 93.3 亿吨 CO₂ - eq，比 SL - BAU - 2010 情景下的水平高近 50%。在强度最高的 SL - CS - 2030 情景下，CO₂ 直接排放总量将下降至 77.5 亿吨 CO₂ - eq。SL 情景比 SH 情景更接近真实情况，因此本文基于 SL 宏观经济情景进行 4 种技术政策情景下的 CO₂ 减排潜力分析和成本分析。

2014 气候变化报告^[15]显示，2010 年美国 CO₂ 排放总量为 68 亿吨 CO₂ - eq。该报告分以下部门来进行预测：能源、工业生产过程、运输、农业和废弃物。这些部门与美国 CO₂ 排放清单所采用的 IPCC 部门定义相契合，只是在清单中运输部门包含在能源部门里^[16]。

在考虑了 2012 年 9 月开始实施的政策的美国政策情景下，2005 - 2020 年间，能源部门排放总量将降低 6.5%。2010 - 2015 年间，中国的预期排放量在 4 种技术政策情景下都超过美国，所以“十二五”计划和“十三五”计划是 CO₂ 减排的关键。

4.2 不同部门 CO₂ 排放趋势

在 CM 和 CS 情景下，能源部门的排放量将会于 2015 - 2020 年间达到峰值。工业部门在所有情景下排放量都会下降。消费部门的排放量将持续增长，2030 年前不会出现拐点（见表 6）。在美国政策情景下，2005 - 2020 年间，电力和建筑部门与能源相关的 CO₂ 排放量将下降 10%，而工业部门的将会上升。

表 6 中国各部门 CO₂ 排放峰值情景

部门	峰值情景
总体	CM&CS (2015 - 2020)
能源 (电力 + 石油)	CM&CS (2015 - 2020)
工业 (其他)	BAU, CW, CM&CS (2020)
消费 (建筑 + 交通)	2030 年之前不会达到

4.2.1 能源部门

如图 6 所示, 2015 - 2020 年间, 在 SL - CM 和 SL - CS 情景下, 能源部门排放量将分别达到峰值 50 亿吨和 48 亿吨 CO₂ - eq, 其中电力行业将分别达到峰值 47 亿吨和 44 亿吨 CO₂ - eq。石油行业的排放量将持续增长, 2030 年前不会出现拐点。在美国政策情景下, 与能源相关的 CO₂ 排放量约 40 亿吨 CO₂ - eq, 2020 年比 2005 年下降了 6.5%。

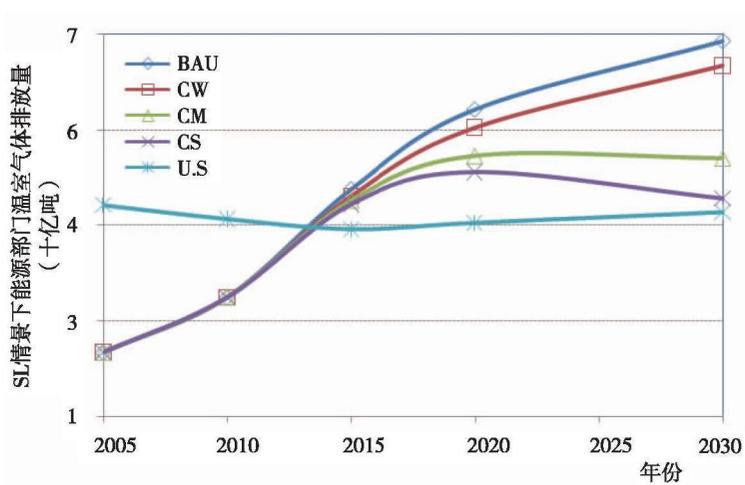


图 6 SL 情景下能源部门温室气体排放量预测分析

4.2.2 工业部门

2015 - 2020 年间, 在 SL - CW、SL - CM 和 SL - CS 情景下, 工业部门排放量将分别达到峰值 26.7 亿吨、26 亿吨和 25.5 亿吨 CO₂ - eq (见图 7)。

2015 - 2020 年间, 钢铁行业排放量将达到峰值 12 ~ 13 亿吨 CO₂ - eq, 水泥行业排放量将达到峰值 12.6 ~ 13.3 亿吨 CO₂ - eq, 电解铝行业的直接排放量将达到峰值 0.4 ~ 0.53 亿吨 CO₂ - eq。在美国政策情景下, 2005 - 2020 年间, 工业相关的 CO₂ 排放量将由 3.4 亿吨增长到 4.4 亿吨 CO₂ - eq^[17], 增长率为 29%。美国工业部门能源强度的持续下降部分是因为消费增长由能源密集型制造工业转向低能耗的工业部门。

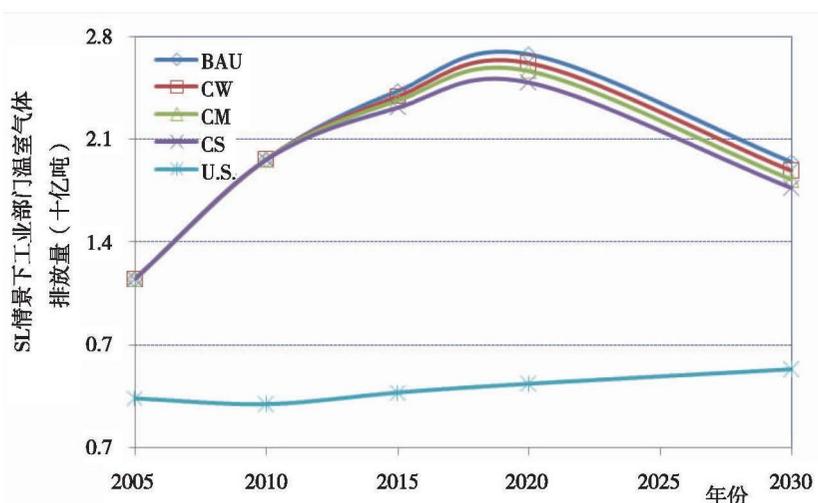


图7 SL情景下工业部门温室气体排放量预测分析

4.2.3 消费部门

2030年之前，消费部门排放量持续增长，不会达到拐点。2005年，中国消费部门CO₂排放量只有美国的37%。然而在基准情景下，到2020年中国的排放量将比美国高19%，到2030年将高78%。在SL-CW情景下，中美消费部门排放曲线将于2020-2025年间相交，在SL-CM情景下，将延缓至2030年相交。

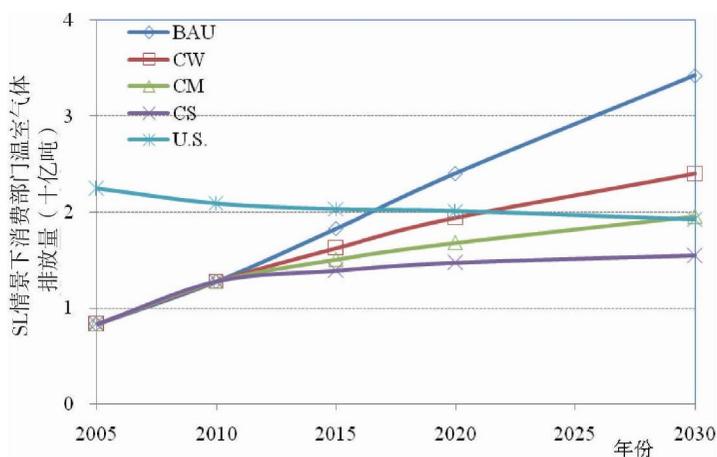


图8 SL情景下消费部门温室气体排放量预测分析

4.3 减排潜力分析

4.3.1 与2010年相比

与2010年相比，3种减排技术政策情景下的总量减排潜力都为负值。2030年之前，即便应用大量碳减排技术，排放总量仍无法回到2010年的水平。分部门来看，2025-2030年，只有工业部门的排放量可以回到2010年的水平。2030年之后，在CM和CS情景下，能源部门的CO₂排放量有机会降至2010年水平。但是，在现有减排措施下，消费部门的增排趋势无法扭转（见图9）。

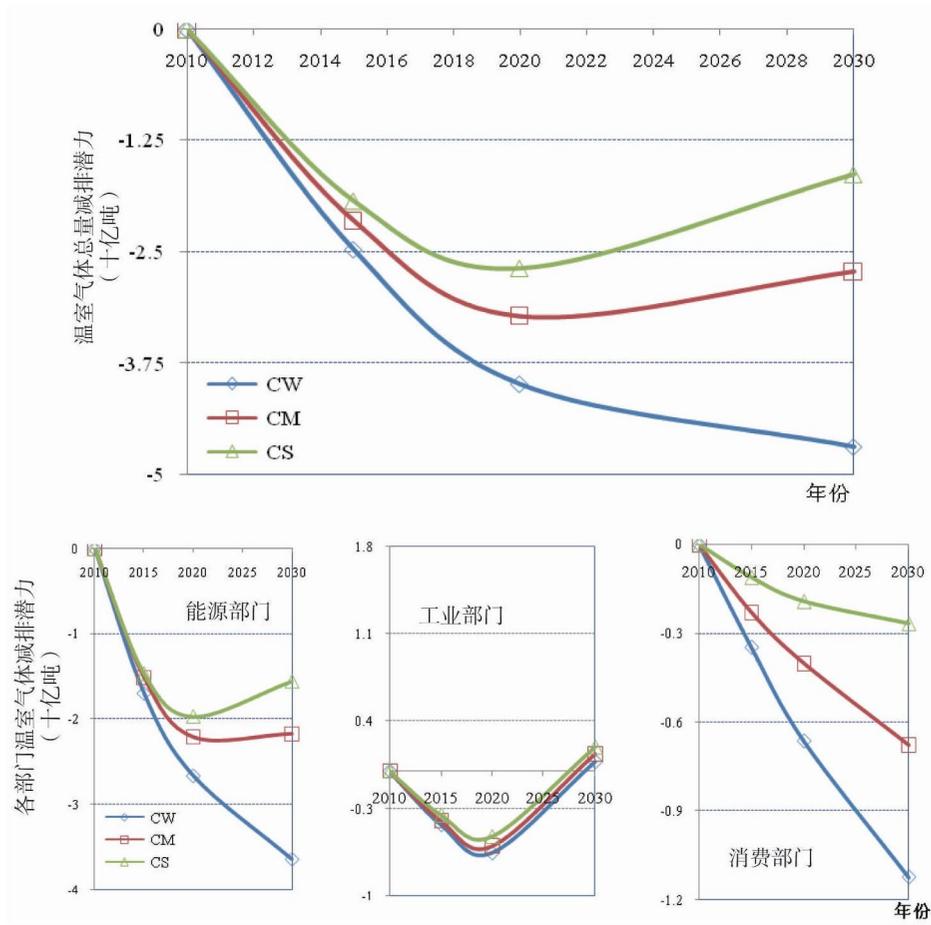


图9 温室气体排放总量及各部门排放量减排潜力

4.3.2 与基准情景相比

在每个目标年将各个技术政策情景与基准情景做比较，可以得到各部门的技术减排潜力。七个重点行业的 CO₂ 直接排放总量如图 10 所示。

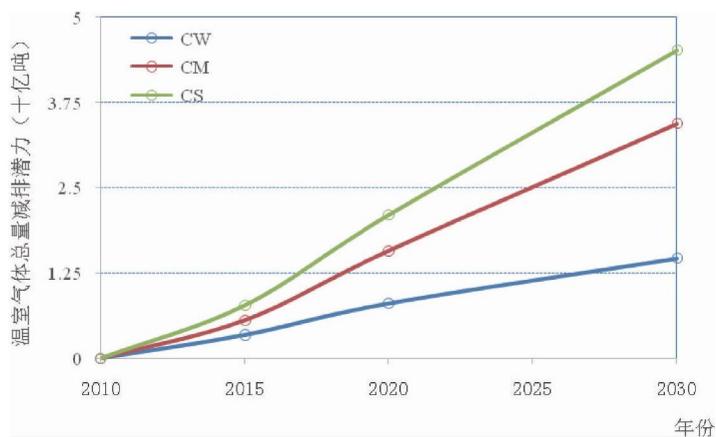


图10 温室气体总量减排潜力

如图 11 所示，消费部门的 CO₂ 减排贡献率居于首位，占 48%；能源部门贡献率位于第二位，占 46%；工业部门贡献率位居第三，仅占 6%。

如图 12 所示，2015 - 2030 年间，7 个行业中减排贡献程度最高的前三位依次为电力、建筑

使用和汽车交通, 这三个行业的减排平均贡献率从 72.6% 涨到 81%, 是未来的重点领域和突破口。

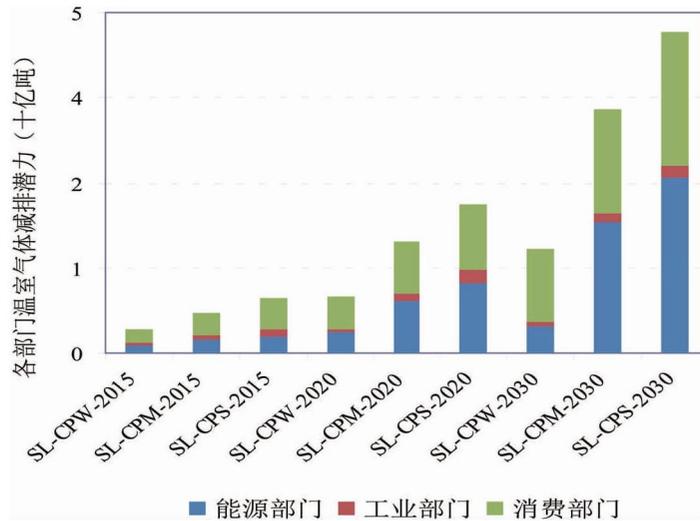


图 11 各部门温室气体减排潜力

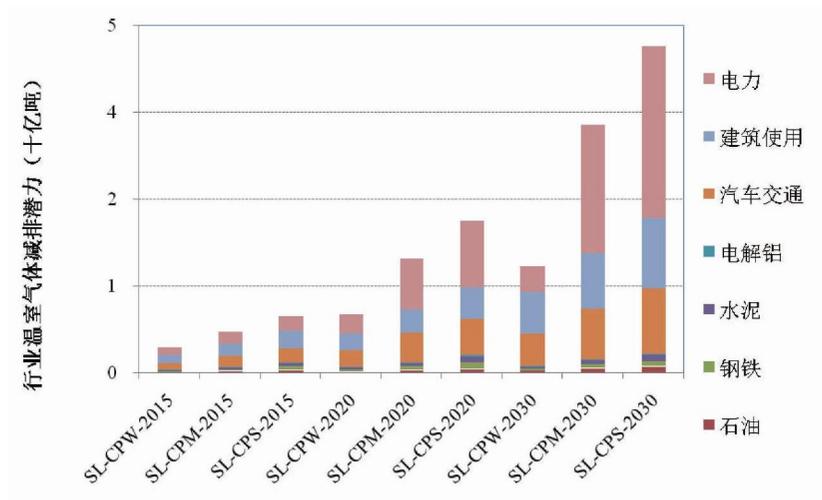


图 12 行业温室气体减排潜力

5 总结

在 CM 和 CS 技术政策情景下, 七个重点行业的 CO₂ 直接排放总量都会于 2015 - 2020 年间达到峰值。在 SL 宏观经济情景下, 能源部门的排放量在 CM 和 CS 情景下将分别达到峰值 50 亿吨和 48 亿吨二氧化碳当量; 工业部门的排放量在 CW、CM、CS 情景下将分别达到峰值 26.7 亿吨、26 亿吨和 25.5 亿吨二氧化碳当量; 消费部门的排放量 2030 年前不会达到峰值, 该部门的减排面临严峻挑战。

与 2010 年相比, 3 种减排技术政策情景下的总量减排潜力都为负值且 2030 年之前无法回到 2010 年的水平。分部门来看, 2025 - 2030 年间, 只有工业部门的排放量可以回到 2010 年的水平。与基准情景做比较, 消费部门 CO₂ 减排贡献率居于首位 (48%); 能源部门贡献率位于第二位, 占 46%; 工业部门贡献率仅占 6%。CO₂ 排放前三位的行业依次为电力、建筑使用和汽车交通。2015 年以后, 中国电力、钢铁、水泥等生产行业的减排空间在减少, 以淘汰落后产能为主

的刚性减排措施潜力愈发有限并且难以实施。2020 - 2030 年间, 中国的消费部门, 例如交通和建筑行业, 是减排的关键突破口。中国未来的减排控制措施应逐步从工业领域转向消费领域。

致谢

本文由 973 项目 (2010CB955903)、科技部“十二五”国家科技支撑计划 (2012BAC20B10) 以及发改委项目 (201307) “中国工业领域低碳发展战略研究”支持。

参考文献

- [1] Yoo, H. M. and Al - Attiyah, H. E. M. , United Nations Framework Convention on Climate Change, 2013.
- [2] Protocol, K. , United Nations framework convention on climate change. Kyoto Protocol, Kyoto, 1997.
- [3] Ellerman, A. D. , Buchner, B. K. , The European Union emissions trading scheme: origins, allocation, and early results. *Review of environmental economics and policy*, 2007, 1 (1): 66 - 87.
- [4] Ott, H. E. , Sterk, W. , Watanabe, R. , The Bali roadmap: new horizons for global climate policy, *Climate Policy*, 2008, 8 (1): 91 - 95.
- [5] Barten, H. , International Energy Agency, 2005.
- [6] Initiative, U. L. A. , Center for Clean Air Policy, 2009.
- [7] Chopra, H. , and Garg, S. , Clean Development Mechanism, Bocconi School of Law Student - Edited Papers No. 2010 - 14/EN, 2010.
- [8] Sun, W. , Cai, J. , Yu, H. , Dai, L. , Decomposition analysis of energy - related carbon dioxide (CO₂) emissions in the iron and steel industry in China. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2012, 6 (2): 265 - 270
- [9] IPCC, IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, IGES, Japan, 2006.
- [10] National Bureau of Statistics of China, China Statistical Yearbook 2010, China Statistics Press, 2011.
- [11] Lazarus, M. , Heaps, C. , Raskin, P. , LEAP Long - range energy alternatives planning system, Stockholm Environmental Institute, Boston, Massachusetts, 1997.
- [12] Cai, W. , Wang, C. , Wang, K. , et al. , Scenario analysis on CO₂ emissions reduction potential in China's electricity, *Energy Policy*, 2007, 35 (12): 6445 - 6456.
- [13] Wen, Z. , Meng, F. , Chen, M. , Estimates of the potential for energy conservation and CO₂ emissions mitigation based on Asian - Pacific Integrated Model (AIM): the case of the iron and steel industry in China, *Journal of Cleaner Production*, 2013.
- [14] Liu, W. , Wang, C. , Xie, X. , Transition to a low - carbon city: lessons learned from Suzhou in China, *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2012, 6 (3): 373 - 386
- [15] U. S. department of states, Climate Change Report, 2014.
- [16] U. S. department of states, <http://www.state.gov/e/oesclimate/ccreport2014/index.htm>
- [17] U. S. historical emissions and sinks data were from U. S. EPA/OAP 2013a.