



全面减排 迈向净零排放目标 ——中国非二氧化碳温室气体减排潜力研究

OPPORTUNITIES TO ENHANCE NON-CARBON DIOXIDE GREENHOUSE GAS MITIGATION IN CHINA

姚波, KATHERINE ROSS, 朱晶晶, KRISTIN IGUSKY, 宋然平, THOMAS DAMASSA 著

执行摘要

近年来，中国已制定并实施了一系列政策，以应对气候变化、减少温室气体（GHG）排放，完成以低碳、气候韧性为导向的社会转型。这些政策不仅呼应了减缓全球气候变化的努力，还满足中国国内的需求，例如促进可持续发展和清洁生产，治理空气污染和其他环境污染，以及保障国家能源安全。

二氧化碳（CO₂）减排在中国获得越来越多的关注，如近期公布的国内政策以及《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》（以下简称《国家自主贡献》，英文简称为INDC）都提到了CO₂减排的重要性、目标和措施。然而，中国对于《京都议定书》包含的其他温室气体关注相对较少。这些温室气体统称为非CO₂温室气体，包括：甲烷（CH₄）、氧化亚氮（N₂O）、氢氟碳化物（HFCs）、全氟化碳（PFCs）、六氟化硫（SF₆）和三氟化氮（NF₃）。非CO₂温室气体的排放量不可忽视。2012年中国的非CO₂温室气体排放量约为16.6亿吨CO₂当量（CAIT 2016），高于日本、德国、加拿大、墨西哥等国各自的温室气体总排放量。此外，本研究表明，在现有的政策框架下，到2030年，中国的非CO₂温室气体排放量将比2005年翻一番，如图E1所示。

目录

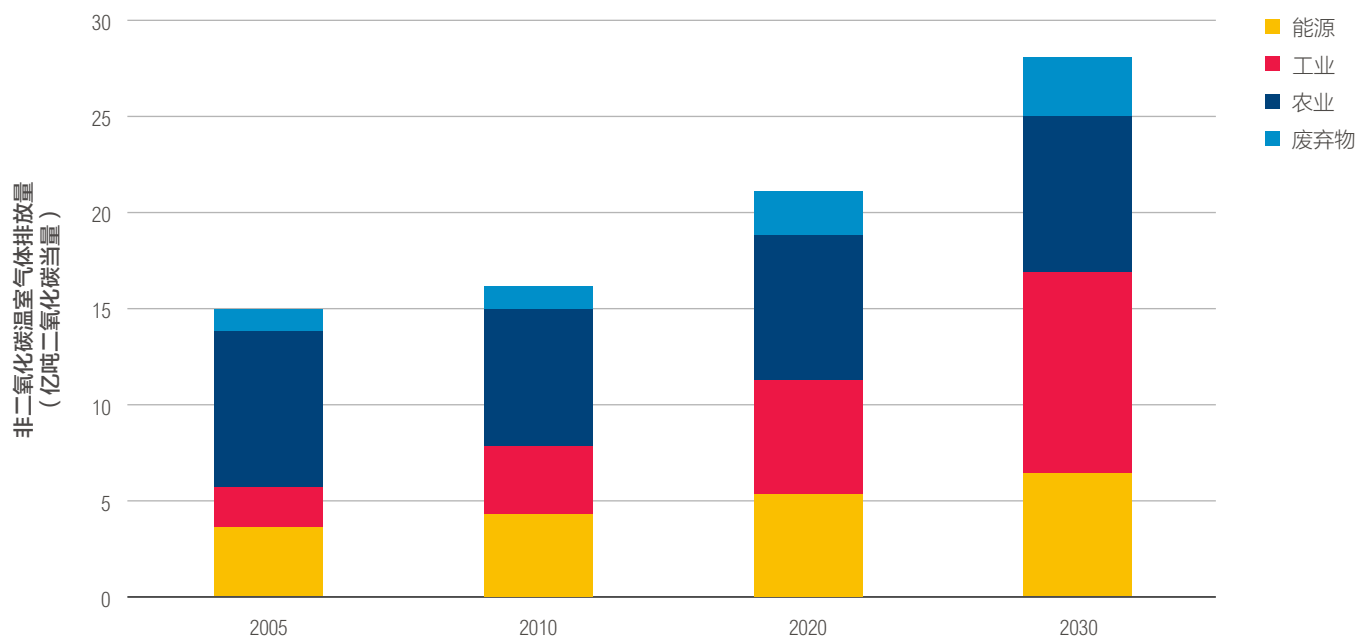
执行摘要	1
引言	3
中国非二氧化碳温室气体排放量及预测	5
中国非二氧化碳温室气体减排的政策环境	11
支持达成中国《国家自主贡献》的非二氧化碳 温室气体减排机遇	13
中国非二氧化碳温室气体减排面临的挑战	19
讨论和政策建议	20
技术附录：中国非二氧化碳温室气体排放量预测的数据 来源	25
参考文献	30
缩略语	34
注释	35
致谢	38
作者信息	39

免责声明：“工作论文”包括初步的研究、分析、结果和意见。“工作论文”用于促进讨论，征求反馈，对新事物的争论施加影响。工作论文最终可能以其他形式进行发表，内容可能会修改。

引用建议：姚波, Katherine Ross, 朱晶晶, Kristin Igusky, 宋然平, Thomas Damassa. 2016. 全面减排 迈向净零排放目标——中国非二氧化碳温室气体减排潜力研究. 工作报告, 华盛顿特区: 世界资源研究所. <http://www.wri.org/publication/greenhouse-gas-mitigation-in-china>.



图 E1 | 中国各领域非CO₂温室气体的历史及预测排放量



来源：作者根据文献数据汇总计算

中国目前公布的具体国家政策或减排目标尚不包括这些非CO₂温室气体，这与非CO₂温室气体排放量级和气候影响不符。然而值得肯定的是，中国已为设定非CO₂温室气体相关政策和目标打下基础。我们的分析显示：

目前中国国家发展的重点领域已经支持了很多非CO₂温室气体减排行动，提供了足够的资金资源。2008年颁布的《中华人民共和国循环经济促进法》（简称《循环经济促进法》）、2012年颁布的《中华人民共和国清洁生产促进法》（简称《清洁生产促进法》）以及2013年提出的《大气污染防治行动计划》推广了一系列举措，消除浪费，提高资源利用率，促进清洁生产工艺的发展和应用。以上措施都与减少非CO₂温室气体排放紧密相关。此外，《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》（简称《“十三五”规划》）的重点理念之一就是绿色发展，强调资源利用效率，减少废弃物，并明确指出“控制非二氧化碳温室气体排放”。

中国的《国家自主贡献》（简称INDC）也提到减少非CO₂温室气体排放的政策和措施。虽然中国INDC的四个具体目标主要针对CO₂减排，但其中也概括了实现“强化应对气候变化行动”的大政方针，这些宏观政策涵盖了一系列主题，包括改进气候战略、促进低碳生活方式、加大资金支持等。INDC描述了中国将

在主要经济部门减少碳排放的关键措施，这些部门包括能源、工业、农业和废弃物。这些措施尽管只是定性描述，但将对中国所有温室气体的排放——包括非CO₂温室气体的排放产生影响。

中国已经试验了一系列减少非CO₂温室气体排放的技术。中国已经在各经济部门发展、试点和实施了一批非CO₂温室气体减排技术（尽管方式有限）。这些技术常常具有协同效应，如增加生产安全性，提高资源利用率，以及促进可替代能源的利用。此外，在某些情况下，中国通过财政补贴和税收优惠政策积极推动这些技术的应用。

中国具有显著的非CO₂温室气体减排潜力。我们的分析显示，根据技术可行性而暂不考虑任何政策、法律和经济上的障碍，只需在所有经济部门推广使用现有技术，到2030年中国每年可以减少约8亿吨CO₂当量的非CO₂温室气体排放，这几乎占当年中国非CO₂温室气体排放量的1/3。

然而，在非CO₂温室气体减排方面，中国仍面临各种困难，因此需做进一步的努力。我们的研究表明，为了继续推动非CO₂温室气体减排，中国将需要：

1. 制定并及时更新完整的国家温室气体清单¹。正如谚语所说，“无法量化的事物就无法管理”。中国公布的最新国家温室

气体清单反映2005年的情况。一些机构公布了关于中国最近几年温室气体排放量的估算结果，但这些研究的假设和范围各不相同，导致结果具有不同程度的不确定性。及时、可靠、可信、细致（按物种分类或按行业分类）的温室气体排放量数据，是识别非CO₂温室气体排放源、评估温室气体排放量随时间的变化、确定优先减排行动等的重要数据基础，也将是评估政策实施情况和效果的关键指标。

2. 进一步制定针对具体来源的非CO₂温室气体减排指标，在此基础上设置温室气体整体减排目标。 尽管中国政府已承诺“二氧化碳排放2030年左右达到峰值并争取尽早达峰”（中华人民共和国国务院 2015a），但还没有宣布涵盖所有温室气体的指标。涵盖所有经济部门的温室气体整体减排目标将有效地推动非CO₂温室气体减排。整体减排目标还可以在以下方面发挥催化剂的作用：

- 加强政策的执行和效果
- 推动和促进不同措施形成最优组合，并持续贯彻执行
- 实现目标责任制和问责制
- 推进针对减排目标的追踪和报告机制
- 促进减排政治意愿的形成，加强政府部门之间的合作

制定涵盖所有经济部门的温室气体整体减排目标可能需要较长时间，与此同时，中国政府仍可以采取迅速而有效的行动来控制非CO₂温室气体排放。我们的研究对未来排放、减排潜力、现有技术以及中国INDC的目标等进行分析，认为中国可以针对以下五个非CO₂温室气体排放源采取积极行动：

- 煤炭生产行业CH₄排放
- 农田施肥N₂O排放
- 作为臭氧层耗损物质（ODS）替代物的HFCs排放
- HCFC-22生产过程副产物的HFCs排放
- 稻田CH₄排放

作为第一步，中国可以为这些特定排放源设定减排目标，在将来进一步推广到行业层面的减排目标，并最终设定涵盖各个经济部门的温室气体排放目标。

3. 加强非CO₂温室气体减排的政策和行动，提供足够的资金支持，将非CO₂温室气体减排同CO₂减排及空气污染治理相结合。 为了实现非CO₂温室气体排放的大幅削减以及温室气体整体减排目标，加强非CO₂温室气体减排的政策和行动并提供足够的资金支持是十分重要的先决条件。首先，中国可以针对前面所述的五个关键非CO₂温室气体排放源，对现有政策的有效性开展评估，找出差距，并择机改进。例如，我们的研究表明，尽管农田施肥N₂O排放和稻田CH₄排放存在明

显的减排潜力，但目前缺乏政策引导和支持。另一方面，虽然有一系列政策关注HFCs减排，但这些政策受到成本等因素制约，效果有限。最后，将非CO₂温室气体减排同CO₂减排相结合，促进中国制定涵盖所有温室气体的全面的气候变化政策。这也将推动非CO₂温室气体减排项目进入中国核证自愿减排量（CCER）体系和筹划中的国家碳交易市场，促进非CO₂温室气体的减排。中国还可以探索和运用气候变化政策和改善区域环境质量政策间的协同作用。在新修订的《中华人民共和国大气污染防治法》（简称《大气污染防治法》）中已经提及了这一协同作用。虽然气候变化和改善空气质量的目标不完全一致，但旨在提高能效、提高资源利用率或使用清洁能源等的措施将促进这两方面目标的达成。

引言

2015年12月，195个国家表决通过《巴黎协定》。与工业化前的全球平均气温相比，该协定旨在将全球平均气温升高控制在2℃之内，并且朝着不超过1.5℃的目标努力（UNFCCC 2015a），在应对气候变化行动方面具有里程碑意义。要做到这一点，各国应尽快实现温室气体排放达峰，并在本世纪下半叶实现温室气体净零排放（UNFCCC 2015a）²。

作为世界上最大的温室气体排放国，中国将为实现《巴黎协定》所制定目标发挥重要作用。据估算，2012年中国排放了107亿吨³CO₂当量（包括土地利用变化和林业）的温室气体，占全球温室气体排放量的22%（CAIT 2016）。

近年来，中国已制定并实施了一系列政策应对气候变化、减少温室气体排放，实现以低碳、气候友好为导向的社会转型。然而，中国多数气候政策、计划和目标仅仅关注CO₂减排，常常忽略《京都议定书》⁴所涵盖的其余六种温室气体，包括甲烷（CH₄）、氧化亚氮（N₂O）、氢氟碳化物（HFCs）、全氟化碳（PFCs）、六氟化硫（SF₆）和三氟化氮（NF₃），这六种气体统称为“非CO₂温室气体”（更多信息见专栏1）。中国的非CO₂温室气体排放量不容忽视。2012年这些非CO₂温室气体的排放量达到中国国家温室气体清单总排放量（包括土地利用变化和林业）的18%，并超过同年日本、德国、加拿大和墨西哥等国家各自的温室气体总排放量（CAIT 2016）。

本工作论文旨在帮助决策者和专家更好地了解中国非CO₂温室气体的排放情况，以及现有的减排潜力。本文分为五章：第一章介绍中国非CO₂温室气体的历史排放量，以及到2030年的排放量预测；第二章评估了中国当前的政策环境，并分析了具体针对非CO₂温室气体的减排政策，以及可以支持减排的其他国家宏观政策；第三章详细阐述了中国《国家自主贡献》（INDC）⁵中非CO₂温室气体有关的特别行动和措施，并通过案例研究分析减排的关键经济部门；第四章讨论中国非CO₂温室气体减排面临的挑战；第五章陈

《京都议定书》的第一承诺期（2008至2012年）具体目标包括六类温室气体，即二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、氧化亚氮（N₂O）、氢氟碳化物（HFCs）、全氟碳化物（PFCs）和六氟化硫（SF₆）。2013年，《京都议定书》第二承诺期开始，增加了第七种温室气体三氟化氮（NF₃）。SF₆、PFCs、HFCs和NF₃都含有氟原子，因此它们经常被合称为含氟温室气体（F-gases）。

虽然人为排放的温室气体主要是CO₂，但非CO₂温室气体排放对气候变化的影响也很显著。这些温室气体吸收热量的能力更强（常用“全球增温潜势”——GWP来衡量），而且许多气体的短期影响远大于CO₂。本报告涵盖《京都议定书》包括的全部六种非CO₂温室气体。

表A1给出了六种非CO₂温室气体的概述，包括分子式、来自政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告（AR5）提供的100年时间尺度的GWP值和主要的排放部门。

表 A1 | 非CO₂温室气体概述

温室气体	分子式	GWP ₁₀₀ ^a (IPCC 2013)	排放部门				
			工业	农业	能源	废弃物	
甲烷	CH ₄	28	×	✓	✓	✓	
氧化亚氮	N ₂ O	265	✓	✓	✓	✓	
氢氟碳化物 ^b	HFC-23 (CHF ₃)	12,400	✓	×	×	×	
	HFC-32 (CH ₂ F ₂)	677	✓	×	×	×	
	HFC-125 (CHF ₂ CF ₃)	3,170	✓	×	×	×	
	HFC-134a (CHF ₂ CHF ₂)	1,300	✓	×	×	×	
	HFC-143a (CF ₃ CH ₃)	4,800	✓	×	×	×	
	HFC-152a (CH ₃ CHF ₂)	138	✓	×	×	×	
	全氟化碳 ^b	PFC-14 (CF ₄)	6,630	✓	×	×	×
		PFC-116 (C ₂ F ₆)	11,100	✓	×	×	×
六氟化硫	SF ₆	23,500	✓	×	×	×	
三氟化氮	NF ₃	16,100	✓	×	×	×	

注释：

^a 全球增温潜势（GWP）是衡量当前大气中的温室气体在特定时间范围内相对相同质量的CO₂捕集热量能力的一个参数。“CO₂当量”或简称为“CO₂e”，是在GWP值基础上计算的用于统一各种温室气体全球增温影响的单位。GWP可以基于不同的时间尺度计算，如20年、100年或500年。例如，N₂O 100年时间尺度的GWP值为265，这意味着1吨N₂O在100年时间尺度上对全球气温升高的影响同265吨CO₂效果相同。表A1给出100年时间范围GWP值。这些参数被UNFCCC采纳作为统一各种温室气体增温能力的指标，并列在《京都议定书》中（IPCC 2013）。IPCC的历次科学评估报告都会更新温室气体的GWP值，表A1给出的GWP值来自IPCC发布于2013年的第五次评估报告（AR5）。

^b 这不是一个完全的列表。HFCs和PFCs只列出部分种类。所有HFCs和PFCs的详细信息请参阅IPCC AR5第8章“人为和自然辐射强迫”（IPCC 2013）。

述本研究的主要结论，提出解决现有的挑战及加强非CO₂温室气体减排力度的建议，并介绍了其他国家的成功案例。

尽管非CO₂温室气体减排政策经常同消除空气污染（如铅、颗粒物、地面臭氧、二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳）和短期气候污染物（如黑炭和对流层臭氧）结合在一起，本文只探讨《京都议定书》所涵盖的六种非CO₂温室气体。

1. 中国非二氧化碳温室气体排放量及预测

1.1 非二氧化碳温室气体历史排放量

中国通过“国家信息通报”向UNFCCC正式报告温室气体清单，包括按种类分类和按行业分类的细节数据。迄今为止，中国已提交了两版国家信息通报，包括：

- 《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》（简称

《初始国家信息通报》），2004年12月提交，报告中国1994年温室气体清单（初始国家信息通报2004）

- 《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》（简称《第二次国家信息通报》），2012年11月提交，报告中国2005年温室气体清单（中华人民共和国发展和改革委员会2012）

中国尚未正式发布2005年之后的温室气体清单⁶。

根据《第二次国家信息通报》，2005年非CO₂温室气体排放量占中国国家温室气体清单（包括土地利用变化和林业）的21%，达到14.9亿吨CO₂当量。2005年，CH₄在非CO₂温室气体中排放贡献最大，达到全部温室气体排放量的13%，其次是N₂O（6%）和含氟温室气体（2%）。从部门角度，2005年农业对非CO₂温室气体排放贡献最大（达到8.20亿吨CO₂当量），其次是能源（3.66亿吨CO₂当量）、工业生产过程（1.98亿吨）以及废弃物（1.09亿吨）。中国2005年非CO₂温室气体排放详细分解见表1。

表 1 | 2005年中国非CO₂温室气体排放量（一）

排放来源	2005年非CO ₂ 温室气体排放量（百万吨CO ₂ 当量）
能源	365.5
甲烷	324.0
化石燃料燃烧	2.6
生物质燃烧	45.4
煤炭开采过程逃逸	271.4
石油和天然气开采过程逃逸	4.6
氧化亚氮	41.5
化石燃料燃烧	21.7
生物质燃烧	19.8
工业生产过程	198.0
氧化亚氮	33.0
硝酸和己二酸生产	33.0
氢氟碳化物	148.8
臭氧层耗损物质替代物生产和使用	42.5
HCFC-22生产	106.3
全氟化碳	5.7

表 1 | 2005年中国非CO₂温室气体排放量（二）

排放来源	2005年非CO ₂ 温室气体排放量（百万吨CO ₂ 当量）
铝冶炼	5.5
半导体制造	0.2
平板显示器制造	未统计
光伏制造	未统计
六氟化硫	10.5
镁冶炼	0.5
电力设备制造和运行	9.9
平板显示器制造	未统计
三氟化氮	未统计
半导体制造	未统计
平板显示器制造	未统计
光伏制造	未统计
农业	820.0
甲烷	529.2
水稻种植	166.4
动物肠道发酵	302.0
动物粪便管理	60.1
农业残留物焚烧	0.7
氧化亚氮	290.8
动物粪便管理	82.5
农业土壤	208.3
农业残留物焚烧	0.1
废弃物	109.1
甲烷	80.3
固体废弃物填埋	46.3
生活和工业废水处理	34.0
氧化亚氮	28.8
生活废水处理	28.8
合计	1,492.7

注释：中国 2005 年温室气体排放量基于《IPCC 第二次评估报告》（SAR）百年尺度的 GWP 值计算（中华人民共和国发展和改革委员会 2012）。
由于四舍五入，各分项数据加总可能不等于总数。

数据来源：中华人民共和国发展和改革委员会（2012）

非官方来源的数据，如世界资源研究所（WRI）气候分析指标工具（CAIT），也提供了更新的中国温室气体排放量估计。2012年，中国非CO₂温室气体排放量预计达到16.6亿吨（CAIT 2016），比2005年增加11%⁷。

1.2 非二氧化碳温室气体排放量预测

根据中国现有的一系列政策，一些机构预测了中国到2030年非CO₂温室气体的排放量。尽管这些研究的假设和范围各不相同，但综合各类预测制定一个排放量数据库，有助于更好地理解中国非CO₂温室气体排放现状及趋势，为特定的研究目标提供基础数据。

本工作论文综合三项研究成果，对中国非CO₂温室气体排放量进行了预测。本论文所参考的这三项研究成果相对较新（最早的研究成果发表于2012年），提供了整个国家尺度的非CO₂温室气体排放量预测（作为对比，IPCC⁸和其他数据⁹仅报道区域尺度排放量预测），分别是：

- 《我国典型行业非二氧化碳类温室气体减排技术及对策》，

该研究受中国环境保护部支持，2014年出版（杨礼荣等2014），后文简称为“中国环保部研究”（MEP）

- 《全球人为源非二氧化碳温室气体排放量：1990—2030》，美国国家环境保护局编写，2012年出版，后文简称为“美国环保局研究”（EPA）
- 2013年至2015年北京大学开展的系列研究，后文简称为“北京大学研究”（PKU），包括
 - 《中国HFC-23历史排放量及基于政策选择的2050年预测》（Fang, X, et al 2014）
 - 《1995年至2030年中国汽车空调行业HFC-134a排放量》（Su, S. et al 2015）
 - 《控制管理氢氟碳化物影响研究——机遇与挑战》（北京大学环境科学与工程学院 2013）

本论文的技术附录展示了各研究中关于非CO₂温室气体排放预测的具体数据，表2展示了各研究的相关信息¹⁰。

表 2 | 中国环保部研究、美国环保局研究和北京大学研究的相关信息

	中国环保部研究	美国环保局研究	北京大学研究
概述	该研究给出了能源、工业和废弃物领域中国非CO ₂ 温室气体的排放量预测	该研究给出了包括中国在内的92个国家和地区所有领域的非CO ₂ 温室气体排放量预测	该研究给出了工业领域中国HFCs排放量预测
研究成果发表时间	2014年	2012年	2013年至2015年
覆盖范围（温室气体种类和行业）	五种非CO ₂ 温室气体（CH ₄ 、N ₂ O、HFCs、PFCs和SF ₆ ），部分行业	六种非CO ₂ 温室气体（CH ₄ 、N ₂ O、HFCs、PFCs、SF ₆ 和NF ₃ ），能源、工业过程、农业和废弃物	HFCs，工业
预测时间范围	预测到2020年	预测到2030年	预测到2030或2050年
采用的GWP值	GWP值基于百年尺度，来自IPCC SAR	GWP值基于百年尺度，来自IPCC SAR	GWP值基于百年尺度，来自IPCC AR4
排放量预测方法	排放量预测基于各部门发展规划和现有的减排政策（指的是2014年的政策）。在能源行业，排放量估算基于预期产业目标。在工业部门，排放量估算基于未来产品需求。在废弃物领域，排放量估算基于预期的国内生产总值（GDP）增长。具体技术细节详见本文的技术附录	排放量预测基于2012年已实现的减排量。对于未来的减排行动，若已经有完善的计划或国际协议，则纳入未来减排量的预测。根据美国环保局的说明，未来排放量预测“细分到具体经济部门，因此，只有政策和程序直接影响到具体部门才反映在排放量预测上”。具体技术细节详见本文的技术附录	排放量预测基于现有工业部门的发展。对于HFCs，排放量预测基于中国汽车市场的增长率以及《蒙特利尔议定书》确定的HCFC-22的淘汰减排时间表。具体技术细节详见本文的技术附录
局限性	该研究局限性主要包括2点：未包括农业领域；排放量仅预测到2020年	该研究局限性主要包括3点：由于方法学和时间上的局限性，部分数据没有纳入；预测方法带来显著的不确定性；该研究采用的假设可能偏离各国实际政策和经济发展状况 该研究是涵盖中国所有非CO ₂ 温室气体排放源的唯一研究，然而由于中国政策环境变化迅速，该研究落后于实际情况	该研究局限性在于只分析了中国工业领域含氟温室气体

本论文涉及的各项研究中，中国环保部研究提供了综合且更新及时的非CO₂温室气体排放量结果。此外，其排放量的预测与中国最近的政策趋势一致。然而，中国环保部研究只涉及部分经济部门且排放量预测只到2020年。美国环保局研究的成果发表最早，由于其局限性，该估算结果可能准确性较低（更多信息见表2），但优点是涵盖了所有的经济部门且排放量预测到2030年。北京大学研究的实时性和详尽度最优，但只估算了中国HFCs排放量。本报告的技术附录定量分析了各研究预测结果的差异。

上述三项研究对一些行业的某几类温室气体排放量的预测吻合得相当好（例如，中国环保部研究和美国环保局研究预测煤炭开采

过程的CH₄逃逸排放量差距小于10%），但更多行业差距较大，特别是工业部门非CO₂温室气体排放量预测，不同的研究估算差值超过100%。这就更强调了需要充分考虑每项研究的基础数据、前提假设和预测方法，并尽可能采用最新的基于特定国家的具体分析。

因此，考虑到各项研究的优势，本报告建立了一个新的排放量数据集。这个数据集以来自中国环保部研究的数据作为基础，其未发布的研究空白用来自美国环保局研究的数据填补，而HFCs排放量采用了北京大学研究的结果。此外，由于中国环保部研究仅预测到2020年，这个数据集通过将2010和2020年各子行业的排放量增长率延伸至2030年的方式，将排放量结果外延至2030年。新的排放数据集见表3。

表 3 | 综合不同研究结果获得的中国非CO₂温室气体排放量及预测数据集（一）

排放来源	非CO ₂ 温室气体排放量（百万吨CO ₂ 当量）			数据来源
	2010	2020	2030	
能源	~ 436	~ 538	~ 638	
甲烷	~ 388	~ 475	~ 552	
化石燃料燃烧	35	39	44	EPA
生物质燃烧	49	46	43	EPA
煤炭开采过程逃逸	300	387	461	MEP
石油和天然气开采过程逃逸	4	4	5	EPA
氧化亚氮	~ 48	~ 63	~ 86	
化石燃料燃烧	38	54	77	EPA
生物质燃烧	10	9	9	EPA
工业生产过程	~ 361	~ 599	~ 1054	
氧化亚氮	~ 49	~ 167	~ 249	
硝酸和己二酸生产	49	167	249	MEP
氢氟碳化物	~ 238	~ 305	~ 578	
臭氧层耗损物质替代物的生产和使用	110	178	358	PKU
HCFC-22生产	128	127	220	PKU
全氟化碳	~ 20	~ 35	~ 80	
铝冶炼	16	23	23	MEP
半导体制造	3	3	3	EPA
平板显示器制造	0	1	5	EPA
光伏制造	2	8	49	EPA

表 3 | 综合不同研究结果获得的中国非CO₂温室气体排放量及预测数据集（二）

排放来源	非CO ₂ 温室气体排放量（百万吨CO ₂ 当量）			数据来源
	2010	2020	2030	
六氟化硫	~ 52	~ 85	~ 116	
镁冶炼	9	19	29	MEP
电力设备制造和运行	31	36	40	MEP
平板显示器制造	12	30	47	MEP
三氟化氮	~ 2	~ 8	~ 31	
半导体制造	1	1	1	EPA
平板显示器制造	1	5	22	EPA
光伏制造	0	2	7	EPA
农业	~ 702	~ 756	~ 805	
甲烷	~ 358	~ 370	~ 380	
水稻种植	125	114	107	EPA
动物肠道发酵	213	235	250	EPA
动物粪便管理	20	21	21	EPA
农业残留物焚烧	1	1	1	EPA
氧化亚氮	~ 344	~ 387	~ 425	
动物粪便管理	14	16	17	EPA
农业土壤	329	370	406	EPA
农业残留物焚烧	1	1	1	EPA
废弃物	~ 128	~ 212	~ 308	
甲烷	~ 111	~ 195	~ 291	
固体废弃物填埋	64	117	173	MEP
生活和工业废水处理	47	78	118	MEP
氧化亚氮	~ 17	~ 17	~ 17	
生活废水处理	17	17	17	EPA
合计	~ 1,626	~ 2,106	~ 2,804	

注：由于四舍五入，各分项数据加总可能不等于总数。表中的概数前用 ~ 表示。

1.3 局限

尽管我们尽力编制一个详尽而可靠的数据库来估算至2030年的中国非CO₂温室气体排放量，但是这个方法仍有一些局限性，这也是表3部分排放量仅能给出概数（数字前用~表示）的原因：

- 中国环保部研究和美国环保局研究的排放量估算基于IPCC SAR给出的GWP值，而北京大学研究估算的排放量基于IPCC AR4给出的GWP值。为了避免引入更大的不确定性，本报告综合各研究的排放量结果时并未根据GWP值的不同进行换算。例如，排放来源之一的“作为臭氧层耗损物质（ODS）替代物的排放量”包括几种HFCs，每种HFCs的GWP值不同。如果依据另一套GWP值调整其排放量，由于缺乏原始数据，需假设在整个排放量中不同HFCs排放量的比例。考虑到不同HFCs的GWP值差距很大（138至12400，基于百年尺度）（IPCC 2013），对HFCs比例采用不同假设，会对最终结果造成较大影响。例如，假设HFC-134a比例从25%至75%变化，则调整GWP值后，HFCs排放量对非CO₂温室气体贡献率从13%至17%不等。¹¹
- 表3中的排放量数据基于百年尺度的GWP值，这与《京都议定书》采用的标准一致。基于与上节相同的原因，由于缺乏基础数据，也无法根据不同时间尺度的GWP值对排放量结果进行调整。然而，必须意识到，不同时间尺度的选择对GWP值会有巨大的影响，从而对以CO₂当量计算的不同部门和行业排放贡献有巨大影响（IPCC 2013）。这意味着如果采用不同时间尺度的GWP值，对于中国最大非CO₂温室气体排放源的问题，可能会得出不同的结论。例如，基于20年尺度，CH₄的GWP值为84，而基于100年尺度，其GWP值则只有28（IPCC 2013）。
- 美国环保局研究、中国环保部研究和北京大学研究的结果发

表于2012年至2015年。虽然所有研究的估算都建立在“现有政策”和“当前增长预测”的基础上，但“现有”和“当前”的含义随着时间而有变化，而且所有研究都未考虑2015年及以后的最新政策。在本报告中，我们基于“现有政策”定义了新的排放数据集，但需要注意基础数据的区别。本报告的技术附录详细介绍了各项研究的排放量估算所对应的政策和措施。

- 表3的排放量数据集可能并不全面。它只包括中国《第二次国家信息通报》报告的非CO₂温室气体排放源。没有被量化的排放源包括工业生产的CH₄排放（例如石油化工生产、铁合金生产、碳化硅生产和钢铁生产）、来自森林火灾的CH₄和N₂O排放等。
- 表3按照温室气体种类和行业分类，给出了国家层面的非CO₂温室气体排放总体结果。但考虑到各个研究的假设、GWP值和政策均未统一，对不同研究的估算结果直接进行加和不够严谨。本研究整合这些数据的目的是给出中国非CO₂温室气体排放量的总体变化趋势，运用这些数据支持具体的决策时需要格外谨慎。这些整合后的数据可以用来识别排放量快速增长的排放源，以及关键的排放部门和行业，并帮助思考采取其他政策来支持进一步的减排。

1.4 非二氧化碳温室气体排放趋势

2005年，中国的非CO₂温室气体排放达到14.9亿吨CO₂当量（中华人民共和国发展和改革委员会 2012）。基于现有政策，我们预计到2020年这个数字将增加到约21.0亿吨CO₂当量（在2005年水平上增加41%），到2030年将增加到约28.0亿吨CO₂当量（在2005年水平上增加88%）。以上估算基于表3中的数据。表4和表5展示了基于现有政策，按行业或者按温室气体种类估算中国非CO₂温室气体的历史排放量并进行预测（根据表3加和）。

表 4 | 中国非CO₂温室气体的历史排放量及预测排放量（分部门）

部门	中国非CO ₂ 温室气体排放量（百万吨CO ₂ 当量）			
	历史	估算/预测		
	2005	2010	2020	2030
能源	366	~ 436	~ 538	~ 638
工业生产过程	198	~ 361	~ 599	~ 1,054
农业	820	~ 702	~ 756	~ 805
废弃物	109	~ 128	~ 212	~ 308
合计	1,493	~ 1,626	~ 2,106	~ 2,804

注：由于四舍五入，各分项数据加总可能不等于总数。

表 5 | 中国非CO₂温室气体的历史排放量及预测排放量（分种类）

温室气体种类	中国非CO ₂ 温室气体排放量（百万吨CO ₂ 当量）			
	历史	估算/预测		
	2005	2010	2020	2030
甲烷	934	~ 857	~ 1,040	~ 1,223
氧化亚氮	394	~ 458	~ 633	~ 777
氢氟碳化物	149	~ 238	~ 305	~ 578
全氟化碳	6	~ 20	~ 35	~ 80
六氟化硫	10	~ 52	~ 85	~ 116
三氟化氮	未估算	~ 2	~ 8	~ 31
合计	1,493	~ 1,626	~ 2,106	~ 2,804

注：由于四舍五入，各分项数据加总可能不等于总数。

从行业角度看，由于不断增长的制冷剂需求，到2030年，工业生产过程将是中国非CO₂温室气体最大的排放来源。在现有政策下，HFCs作为《蒙特利尔议定书》¹²减排的CFCs和HCFCs的替代物，2030年的预测排放量将超过2005年的3倍。此外，硝酸和己二酸是生产肥料和化工产品的重要原料，市场对它们的需求不断增加，将导致工业领域N₂O的排放量迅速增加，从2005年到2030年间几乎翻番。

从温室气体种类的角度看，尽管CH₄排放量在2005年至2030年间仅增长31%，它很可能仍为中国非CO₂温室气体中排放量最大的种类，主要来源是煤炭开采过程中CH₄的逃逸（约占2030年中国CH₄排放量的38%）。含氟温室气体将是2005年至2030年间非CO₂温室气体中增长速度最快的种类（增长400%），主要源于HFCs排放量的迅速增加。

本研究基于表3数据计算了中国非CO₂温室气体排放量趋势，在第三章统一展示在黄色框中。

2. 中国非二氧化碳温室气体减排的政策环境

近年来，中国已制定并实施了一系列政策，以应对气候变

化、减少温室气体（GHG）排放，完成以低碳、气候韧性为导向的社会转型。这些政策不仅呼应了减缓气候变化的全球努力，还满足中国国内的需求，包括促进可持续发展、清洁生产、治理空气污染和其他环境问题，以及保障国家能源安全。尽管中国的气候政策绝大多数都是针对CO₂减排，但是中国已经制定了一些关注非CO₂温室气体减排的政策。此外，中国的一些发展政策也支持非CO₂温室气体减排。

2.1 直接针对非二氧化碳温室气体减排的政策

2015年8月，中国政府颁布了修订后的《大气污染防治法》，该法对所有温室气体都有影响，其中第一章第二条特别写明“推行区域大气污染联合防治，对颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物、氨等大气污染物和温室气体实施协同控制”（全国人民代表大会常务委员会2015）。除《大气污染防治法》外，中国其他支持非CO₂温室气体减排的政策主要针对两类来源的温室气体：煤炭开采活动CH₄排放和工业生产过程HFCs排放，具体内容将在2.1.1和2.1.2详细介绍。

2.1.1 煤炭开采CH₄减排政策

对煤层气甲烷（以下简称CBM）的有效捕集不仅能够提高能源效率，保障煤炭行业生产安全（Aden et al. 2009），还能够减少CH₄的排放（煤炭生产CH₄排放是中国非CO₂温室气体排放的重要来源）。从上世纪九十年代开始，中国的煤矿企业就开始捕集并利

表 6 | 煤炭开采活动CH₄减排政策

日期	政策内容
2006年6月	为了加强煤矿安全，国务院下发了《关于加快煤层气（煤矿瓦斯）抽采利用的若干意见》，阐明了瓦斯抽采先于煤矿开采的指导原则，强调了瓦斯治理和利用的重要性。这个政策要求当地土地和规划部门确保煤矿生产“安全第一、预防为主”，严格执行安全标准，并由政府进行监督（IEA 2009）。
2007年4月	中国国家发展和改革委员会（NDRC，后文简称国家发改委）下发《关于利用煤层气（煤矿瓦斯）发电工作实施意见的通知》，鼓励部署利用煤层气（煤矿瓦斯）发电的项目。通知要求电网企业根据补贴后的价格优先收购煤层气（煤矿瓦斯）发电项目的富余电量（IEA 2009）。
2011年12月	国家发改委下发《煤层气（煤矿瓦斯）开发利用“十二五”规划》。该规划设定了2015年煤层气地面开发量达到160亿立方米且基本全部利用的目标（中华人民共和国发展和改革委员会2011）。该目标已于2014年实现（Yong and Jianping 2015）。
2013年9月	国务院下发《关于进一步加快煤层气（煤矿瓦斯）抽采利用的意见》，该意见给出了政府计划支持煤层气开采和利用的措施，包括财政补贴、更优惠的税收政策以及煤矿开采权的管理（China Law Insight 2013）。
2013年9月	国务院下发《大气污染防治行动计划》，最终目标是在今后的五年内显著改善中国的大气质量。该计划制定了煤炭控制目标，要求到2017年，煤炭占中国能源消费的比例下降到65%以下。这一目标将减少煤炭的生产和需求，由此减少煤炭生产过程CH ₄ 排放。
2015年2月	国家能源局编制了《煤层气勘探开发行动计划》，设定了2020年的目标：新增探明煤层气地质储量1万亿立方米，煤层气（煤矿瓦斯）抽采量力争达到400亿立方米，其中地面开发200亿立方米（国家能源局2015）。

表 7 | 煤炭开采活动CH₄减排政策

日期	政策内容
2013年6月	中国政府和美国政府达成控制HFCs的合作协议。根据协议，中美双方将同其他国家一道利用《蒙特利尔议定书》的经验和机制来削减HFCs的生产和消费，同时根据UNFCCC和《京都议定书》规定，继续核算和上报HFCs排放量（The White House 2013）。
2014年3月	中国和欧盟发表联合声明，将合作采取国内行动避免或减少HFCs的消费，并合作推动全球HFCs削减行动（European Commission 2014）。
2014年5月	国务院办公厅印发《2014—2015年节能减排低碳发展行动方案》，方案要求加强对HFCs排放的管理，加快HFCs销毁和替代，提出HFCs减排的量化指标，即“十二五”期间累计减排2.8亿吨CO ₂ 当量（中华人民共和国国务院2015b）。这也是中国首个国家层面的非CO ₂ 温室气体减排量化指标。
2015年5月	国家发改委下发通知，要求相关企业于2015年底上报HFC-23减排计划 ¹³ ，并制定退坡补贴办法，2014年按4元/吨CO ₂ 当量补贴，2019年减少至1元/吨CO ₂ 当量（中华人民共和国发展和改革委员会2015b）。
2015年11月	为应对HFCs排放量不断增加的情况，中国作为《蒙特利尔议定书》197个缔约方之一，同意首先建立工作小组，就HFCs纳入《蒙特利尔议定书》减排的可行性进行谈判。

用CBM。到2006年，中国政府开始制定CBM相关政策。本论文表6及3.1节深入介绍了中国开展CBM减排的具体情况。

2.1.2 工业生产过程HFCs减排政策

近年来中国开始着手控制HFCs排放量，具体政策见表7。本论文3.2节介绍了工业生产过程HFCs减排的具体措施。

2.2 间接支持非二氧化碳温室气体减排的政策

除了直接针对非CO₂温室气体减排的政策外，还有一系列国家政策或法律也对非CO₂温室气体减排有影响（影响的程度同财政资金的充足程度及其他因素有关）。

- 《“十三五”规划》：2016年3月，中国政府发布的《“十三五”规划》概括了2016年到2020年中国的战略构想。在绿色发展方面，《“十三五”规划》强调需要提高能源资源利用效率和发展循环经济（下文将详细讨论）——这两者都会影响非CO₂温室气体的排放。在第46章“积极应对全球气候变化”中，规划强调了“控制非二氧化碳温室气体排放”（但是规划中并未提出具体实施方案）。（中华人民共和国国务院 2016）
- 《循环经济促进法》：循环经济的最终目标是通过改进产品设计、提高资源利用率、提高回收率来减少废弃物的产生。上世纪九十年代末，中国首次引入了循环经济的概念，之后在2008年颁布了《循环经济促进法》。这部法律旨在提高资源利用效率，保护和改善环境，实现可持续发展（全国人民代表大会常务委员会 2008）。《“十二五”规划》和《“十三五”规划》都对该法律作出了响应，设置了提高资源利用效率、进一步促进循环经济的目标（中华人民共和国国务院 2011 2016）。2015年4月，国家发改委印发《2015年循环经济推进计划》（中华人民共和国发展和改革委员会 2015a）。这项计划细化了具体方案和目标，以更有效地使用资源（水、矿产、土地和煤炭），在工业、农业和城市更好地管理资源和废弃物（China Water Risk 2015）。循环经济推进计划包含的以下目标将影响中国非CO₂温室气体排放：
 - 以京津冀地区为重点，在城市层面和企业层面推动废弃物循环利用（影响CH₄排放）；
 - 推广低浓度瓦斯和煤矸石¹⁴发电，提高煤层气利用水平（影响CH₄排放）；
 - 到2015年，主要农作物肥料利用率提高1%（影响N₂O排放）¹⁵；
 - 2015年至2020年，开展25家园区循环化改造示范试点（影响N₂O、PFCs、HFCs、SF₆或NF₃排放，取决于被改造工业园区的类型）。
- 《清洁生产促进法》：清洁生产和温室气体减排齐头并进。任何改进生产方式的努力，无论是提高资源利用效率，还是

避免污染物的产生，都会减少温室气体排放。2012年2月，中国全国人大常委会对2002年6月通过的《清洁生产促进法》进行了修改。制定该法是为了促进清洁生产，与《循环经济促进法》类似，还可以保护和改善环境、保障人类健康，促进经济与社会整体可持续发展。根据这项法律，中国政府制定了相应的财政、税收政策、规划，筹措相应的资金支持，结合其他方面的措施，促进清洁生产（全国人民代表大会常务委员会 2012）。2003—2009年，中国采用清洁生产方法的做法不仅节约了水资源，减少了大气污染物，还节省了超过4900万吨标准煤（Yin 2013），相当于1.14亿吨CO₂、1200吨CH₄和1800吨N₂O¹⁶。

展望未来，除了《国家自主贡献》（INDC）中提出的相应目标，中国非CO₂温室气体减排还可能受到污染控制、安全生产和提高能效等方面政策的影响。

3. 支持达成中国《国家自主贡献》的非二氧化碳温室气体减排机遇

2015年6月，中国提交了《国家自主贡献》文件，细化了2020年后的国家气候行动计划，包括2030年前实现的四个具体目标：

- CO₂排在2030年左右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%
- 非化石能源占一次能源消费比重达到20%左右
- 森林蓄积量比2005年增加45亿立方米左右

尽管上述四个具体目标主要针对CO₂减排，中国仍在《国家自主贡献》中用大量篇幅阐述了在主要经济部门——包括能源、工业、农业和废弃物强化应对气候变化行动政策和措施的计划¹⁷。尽管这些措施多数只有定性描述，但很可能会对所有温室气体减排产生影响。

本章在第二章的基础上，详细分析了中国《国家自主贡献》中有关非CO₂温室气体减排的措施。本章在中国现有政策框架下进行讨论，并借鉴实际案例来说明受这些措施影响的部门和非CO₂温室气体排放源。

3.1 能源行业非二氧化碳温室气体减排机遇

2005年，能源行业非CO₂温室气体排放占中国温室气体排放总量的24%，达到3.66亿吨CO₂当量。在现有的政策框架下，至2020年，能源行业非CO₂温室气体排放量预计将达到约5.38亿吨CO₂当量，而到2030年，将达到约6.38亿吨CO₂当量。在能源行业，煤矿开采活动的CH₄排放对非CO₂温室气体排放总量贡献最大（2030年达到行业非CO₂温室气体排放总量的72%）。

中国《国家自主贡献》提出了构建低碳能源体系的计划，包括提高煤炭集中高效发电比例、扩大天然气利用规模、大力发展新能源（核电、水电、太阳能、风能、地热能、海洋能和生物质能）。（中华人民共和国国务院 2015a）

尽管《国家自主贡献》提出的能源行业具体目标（到2030年非化石能源占一次能源消费比重达到20%左右）主要影响化石燃料燃烧排放的CO₂，中国还设定了能源行业定量目标，对CH₄排放有影响。根据《国家自主贡献》，中国“煤层气产量力争达到300亿立方米”（中华人民共和国国务院 2015a），而中国2014年CBM生产量约37亿立方米（Andrews-Speed 2016）。

3.1.1 煤层气甲烷减排机遇

煤层气是一种天然产生的富含CH₄的气体，在煤层中富集并在煤炭开采活动中泄露。煤层气排放同煤矿开采活动正相关。作为世界上最大的煤炭生产国和消费国，中国排放大量的煤层气。2010年，煤炭开采活动的CH₄逃逸排放量估算达到3.00亿吨CO₂当量（杨礼荣等 2014），占中国非CO₂温室气体排放量的18%以上¹⁸。

自上世纪九十年代开始，中国的煤矿企业已经开始捕集和利用煤层气作为替代能源。本世纪初，中国开始发展清洁发展机制（CDM）¹⁹项目，使得更多的煤层气利用项目变得经济可行。2006年，中国的煤层气CDM项目占到中国CDM项目总签发量的63%。2008年，山西电力公司开始运行世界最大的瓦斯电厂（Aden et al. 2009）。截至《京都议定书》第一承诺期结束（2012年12月），中国注册了124个煤层气利用CDM项目（杨礼荣等 2014），但是2012年核证减排量（CER）市场崩溃²⁰，导致大量项目突然中止。

2013年9月，为了重振煤层气利用，同时也为了减少CH₄的逃逸排放，国务院下发《关于进一步加快煤层气（煤矿瓦斯）抽采利用的意见》，意见概括了政府计划用于支持煤层气提取和利用的方法，包括财政补贴、更加灵活的税收政策和煤层气矿业权管理（China Law Insight 2013）。2015年2月，国家能源局印发《煤层气勘探开发行动计划》（国家能源局 2015），行动计划设定了地面开采量以及低CH₄浓度煤层气发电目标（杨礼荣等，2014）——这两个领域的项目尚未进行大规模开发。依据《煤层气勘探开发行动计划》，预计到2020年新增探明煤层气地质储量1万亿立方米，煤层气（煤矿瓦斯）抽采量力争达到400亿立方米，其中地面开发200亿立方米（国家能源局 2015）²¹。假设浓度9%以上的煤矿CH₄得到全部利用，浓度低于9%的煤矿CH₄利用率达到32%，则中国煤矿CH₄排放量到2020年将降至1.73亿吨CO₂当量，意味着减排潜力达2.14亿吨CO₂当量（杨礼荣等，2014）。

在能源行业，中国应加强煤矿开采活动CH₄逃逸减排，其原因在于：

- 煤矿开采活动CH₄逃逸排放将一直成为中国非CO₂温室气

体排放的主要来源之一。在现有政策下，估算到2030年，煤矿开采活动CH₄逃逸排放将达到4.61亿吨CO₂当量，占非CO₂温室气体排放总量的16%²²。

- 具有显著的减排潜力。如果已发布的《煤层气勘探开发行动计划》能够实现，中国煤矿CH₄排放量2020年将下降至1.73亿吨CO₂当量，意味着减排潜力达2.14亿吨CO₂当量。
- 已有经过试点和试验的技术。从上世纪九十年代起，煤矿企业已经能有效捕集和利用煤层气作为替代能源。
- 已有配套支持政策，包括财政补贴、更灵活的税收政策（例如，国务院《关于进一步加快煤层气（煤矿瓦斯）抽采利用的意见》鼓励国内煤层气工业的发展）。
- 中国《国家自主贡献》包括了煤层气利用的计划。如果这些计划实现，可以减少煤矿开采活动CH₄逃逸排放。

3.2 工业生产过程非二氧化碳温室气体减排机遇

2005年，工业生产过程非CO₂温室气体排放量占中国非CO₂温室气体排放总量的13%，达到1.98亿吨CO₂当量。在现有政策框架下，到2020年，工业生产过程非CO₂温室气体排放量将迅速增加到5.99亿吨CO₂当量，2030年将达到10.54亿吨CO₂当量。在工业生产过程非CO₂温室气体排放中，HFCs排放量贡献最大，2030年将占整个行业非CO₂温室气体排放量的55%。

中国坚持走新型工业化道路，大力发展循环经济，严控高耗能、高排放行业扩张（中华人民共和国国务院 2015a）。中国《国家自主贡献》描述了走新型工业化道路的措施，包括加快淘汰落后产能，优化产业结构，大力发展服务业和战略性新兴产业（中华人民共和国国务院 2015a）。尽管这些措施会对一系列温室气体²³产生影响，但对于工业生产非CO₂温室气体排放，中国只制定了一个量化目标。根据《国家自主贡献》，中国计划逐渐减少HCFC-22受控用途的生产和使用，到2020年在基准线水平（2010年产量）上产量减少35%、到2025年减少67.5%（中华人民共和国国务院 2015a）²⁴。

3.2.1 HFC-23减排机遇

HCFC-22是常用的制冷剂，被《蒙特利尔议定书》归为ODS。尽管HCFC-22不是列入《京都议定书》的温室气体，但HCFC-22的生产过程会排放一种温室气体HFC-23。HFC-23是GWP值最高的HFCs²⁵。随着HCFC-22需求的迅速增加，中国HFC-23的排放量从1980年的不到100万吨CO₂当量增加到2010年的1.27亿吨CO₂当量（Fang et al. 2014），占中国非CO₂温室气体排

放总量的8%。²⁶中国HFC-23排放量已超过发达国家,如果不加以控制,估计将在2027年超过发达国家HFC-23的历史累计排放。(Fang et al. 2014)

本世纪初,中国HFC-23减排主要依靠CDM项目。到2009年,中国注册了11个减排HFC-23的CDM项目,累计获得联合国签发的核证减排量(CERs)2.99亿吨CO₂当量。在CDM项目的影响下,中国HFC-23排放在2006年达到峰值1.55亿吨CO₂当量,到2008年减少至1.08亿吨CO₂当量(Fang et al. 2014)。由于担忧现有方法学可能引发碳减排指标的过度签发,2010年CDM执行理事会修改了政策,以控制HFC-23削减CDM项目的注册数量。这些更严格的政策意味着很多中国HFC-23减排项目无法注册成为CDM项目。2011年,欧盟禁止任何HFC-23削减项目参与欧盟碳排放交易体系(EU ETS)(European Commission 2011)。上述政策修改和限制使得中国HFC-23项目陆续中止(在没有CER补贴的情况下,缺乏经济可行性),导致中国HFC-23排放量从2010年开始增加(Fang et al. 2014)。

为了应对日益增加的HFC-23排放量,2014年11月,中国国家发改委下发《关于下达氢氟碳化物削减重大示范项目2014年中央预算内投资计划的通知》,2015年5月,下发《关于组织开展氢氟碳化物处置相关工作的通知》,要求有关企业于2015年年底上报HFC-23处置情况报告²⁷,并对运行经费的补贴实行退坡办法。每吨CO₂当量的减排量从2014年补贴4元逐渐降低至2019年补贴1元(中华人民共和国发展和改革委员会 2015b)。这些补贴如果应用得当,到2020年将可以实现每年2亿吨CO₂当量的减排量(Fang et al. 2014)。

中国在工业领域应当**加强HFC-23减排**,其原因在于:

- HFC-23是中国非CO₂温室气体中较大的排放源之一,在现有政策下,到2030年HFC-23排放量预计将增加至2.20亿吨CO₂当量,占中国所有非CO₂温室气体排放量的8%²⁸。
- 具有减排潜力。如果充分利用政府现有补贴,到2020年将可以实现每年2亿吨CO₂当量的HFC-23减排量。
- 已有经过试点和试验的技术。自2006年起,利用HFC-23分解技术,中国HCFC-22生产企业已减排2.99亿吨CO₂当量²⁹(崔永丽等, 2013)。
- 已有配套支持政策,包括财政补贴。

尽管在《国家自主贡献》中只明确提及HFC-23的减排计划,但中国很可能实施涉及所有HFCs的减排措施。自2013年中美发表联合声明起,中国开始着手减排所有的HFCs(The White House 2013)。中国还将淘汰和替代HFCs的目标纳入《2014—2015年节能减排低碳发展行动方案》(中华人民共和国国务院 2015b)。专栏2提供了中国在控制其他两种主要HFCs(HFC-134a和HFC-410a)方面的试点技术范例。

专栏 2 | 中国其他HFCs减排机遇

除了HFC-23,中国还有两种主要的HFCs排放源,分别是HFC-134a和HFC-410a,主要作为空调制冷剂。《蒙特利尔议定书》规定淘汰氟氯碳化物(CFCs)和氢氟氯碳化物(HCFCs),而它们的替代品HFC-134a和HFC-410a的使用则迅速增加。

HFC-134a和HFC-410a的排放主要来自设备生命周期内的制冷剂泄露。目前,可行的低GWP甚至GWP值为0的替代物逐渐增多(Bianco et al. 2014),包括自然制冷剂(如CO₂或碳氢化合物)以及氢氟烯(HFOs,分子中含氢、碳及氟原子,但是GWP值低得多)(European Fluorocarbons Technical Committee 2015)。部分替代物具有较高的能效,降低设备运行所需的用电量。尽管有上述的优点,HFOs仍有较高的前期成本,因此无论在国家层面还是国际层面,都需要制定标准来推动高GWP值HFCs的替代淘汰。

中国HFC-134a减排机遇

在1994年前,CFC-12是中国汽车空调的主要制冷剂。根据《蒙特利尔议定书》,CFC-12被淘汰,它的替代品HFC-134a是一种百年尺度GWP值高达1300的温室气体(IPCC 2013)。随着HFC-134a的需求快速增加,1995年至2000年间,中国HFC-134a排放量年均增加超过100%,2001至2010年间年均增长约34%(Su et al. 2015)。2010年,中国HFC-134a排放量达到2200万吨CO₂当量,约占全球HFC-134a排放量的10%,占发展中国家排放量的29%(Su et al. 2015)。

尽管由于成本高和技术匮乏等原因³⁰,中国的HFC-134a淘汰替代行动还未达到商业化程度,一些企业正在积极开发HFC-134a的低GWP值替代品。江苏省的两家企业正在试点HFO-1234yf生产线。HFO-1234yf是一种消耗臭氧潜能值(以下简称ODP值)为0,GWP值小于1的替代物(Su et al. 2015)。其缺点在于研究和开发成本高,HFO-1234yf的价格是HFC-134a的3-5倍(Su et al. 2015)。还有中国企业尝试采用CO₂作为HFC-134a的替代物,并研发了汽车空调样机。但是采用此技术的空调尚未市场化(Su et al. 2015)。

中国HFC-410a减排机遇

HFC-410a是HFC-32和HFC-125按1:1比例组成的混合物,经常替代HCFC-22作为房间空调制冷剂。HFC-410a的ODP值为0,不可燃、低毒、化学性质稳定。因此在过去的15年其使用量迅速增加。同HFC-134a类似,中国已有企业开发HFC-410a的低GWP值替代物。2010年,《蒙特利尔议定书》多边基金执委会批准了中国两家企业房间空调器压缩机采用丙烷(R-290)替代HFC-134a/HCFC-22的替代转换示范项目。同年,全球首条R-290分体式空调示范生产线在广东省珠海市正式竣工。此外,为了适应可燃制冷剂在房间空调的应用,国家标准《家用和类似用途电器的安全热泵、空调器和除湿机的特殊要求》进行了修订,扫除了R-290制冷剂在房间空调中使用的障碍(北京大学环境科学与工程学院, 2013)。

尽管在《国家自主贡献》中工业领域非CO₂温室气体减排仅设定了一个定量目标，但是在文件中提到“积极控制工业生产过程温室气体排放”以及“严控高耗能、高排放行业扩张”(中华人民共和国国务院 2015a)，这些目标将对一系列工业活动产生影响。例如专栏3讨论了中国硝酸和己二酸生产过程减少N₂O排放的机会，专栏4展示了电解铝生产过程减少PFCs排放的办法，专栏5详细阐述了减少工业SF₆排放的措施。由于中国《国家自主贡献》没有对这些方面制定特别的目标，因此上述措施/办法采用案例来进行介绍。

专栏 3 | 减少中国硝酸和己二酸生产中N₂O排放

过去五年，中国是世界上硝酸和己二酸产量增长最快的国家（GVR 2015）。硝酸和己二酸是生产化肥和合成材料的原料，其增长受到化肥和合成材料需求驱动。硝酸和己二酸生产造成大量N₂O排放。2010年，中国硝酸和己二酸生产排放的N₂O达到4900万吨CO₂当量，占中国非CO₂温室气体排放总量的3%³¹，且预计排放量还将快速增加，在现有政策下，到2020年将达到1.67亿吨CO₂当量，2030年将达到2.49亿吨CO₂当量。中国已经开始采取措施减少硝酸和己二酸生产的N₂O排放，具体措施如下：

催化分解法减少己二酸生产中N₂O排放

中国神马化工和辽阳石化采用催化分解技术³²去除己二酸生产过程中的N₂O。自2010年以来，这一工艺每年可减排N₂O约1700万吨CO₂当量。但是这一工艺成本很高，其中购买催化剂的成本占总生产成本的三分之一。假设催化分解技术应用到中国所有的己二酸生产企业，则可以将己二酸生产过程中产生的N₂O排放减少98%。结合基于现有政策预测的增长率，相当于到2030年减排潜力达到1.83亿吨CO₂当量/年。

催化分解法减少硝酸生产中N₂O排放

中国许多硝酸生产企业利用二级处理法或者三级处理法进行催化分解，减少N₂O排放。到2011年年底，中国已有19家企业注册了28个CDM项目，估算总减排量为每年500万吨CO₂当量。在28个注册项目中，只有河南开封晋开和广西柳州化工采用了三级处理法。假设把催化分解技术应用到中国所有的硝酸生产企业，则可将硝酸生产过程中产生的N₂O排放减少71%。结合基于现有政策预测的增长率，相当于到2030年减排潜力达到4500万吨CO₂当量/年。

但是，目前中国硝酸和己二酸生产过程N₂O减排遇到了瓶颈，主要障碍是昂贵的催化剂成本以及生产工艺改造的成本。美国国家环境保护局的非CO₂温室气体减排潜力评估报告（EPA 2013）中边际减排成本分析显示，在盈亏平衡价格0元/CO₂当量吨下，中国硝酸和己二酸生产中N₂O排放无减排潜力，这就意味着在考虑了所有相关成本和收益的情况下，中国目前还没有净成本为0的技术可以应用于硝酸和己二酸生产领域的N₂O减排。

来源：杨礼荣, 朱涛, 高庆先编著. 2014. 我国典型行业非二氧化碳类温室气体减排技术及对策. 中国环境出版社, 北京。

专栏 4 | 减少中国铝冶炼中PFCs排放

中国PFCs排放主要来自铝冶炼（杨礼荣等 2014）³³。尽管2010年PFCs排放量在中国非CO₂温室气体排放总量中贡献不大（少于1%），但是预计到2030年，PFCs排放量将翻番³⁴。

中国的研究人员和企业正在尝试三种不同的技术来减少电解铝过程中的PFCs排放（杨礼荣等 2014）：

- 自动熄灭阳极效应技术：该技术已在河南某电解铝企业进行工业试验试用，每条生产线的改造成本约405万元（相当于约62万美元³⁵），可减少30%的PFCs排放。
- 无效应铝电解工艺技术：该技术由国家铝冶炼工程技术研究中心于2005年开发成功，2007年在中国铝业公司全面推广应用。每条生产线改造成本约135万元（相当于约20.5万美元），可减少30%的PFCs排放。
- 氧化铝精准下料技术：该技术每条生产线改造成本约135万元（相当于约20.5万美元），非阳极效应可减少50%的PFCs排放。

中国电解铝产量在今后15年将保持在每年2400万吨，意味着电解铝行业PFCs排放量直到2030年可能一直保持在2300万吨CO₂当量。但是，如果将无效应铝电解工艺技术及自动熄灭阳极效应技术应用到50%的中国铝生产线，氧化铝精准下料技术应用于所有的铝生产线，则到2030年，中国电解铝行业PFCs排放量将下降至1000万吨CO₂当量，即减排潜力达1300万吨CO₂当量/年。

来源：杨礼荣, 朱涛, 高庆先编著. 2014. 我国典型行业非二氧化碳类温室气体减排技术及对策. 中国环境出版社, 北京。

专栏 5 | 减少中国工业领域SF₆排放

在中国非CO₂温室气体排放中，SF₆排放量相对较小但是增长迅速。据估算，2010年中国SF₆排放量约5200万吨CO₂当量，在现有政策下，2030年将增加到1.16亿吨CO₂当量/年。SF₆排放主要来自电力传输、平板显示器制造及镁冶炼过程。在电力行业，SF₆在电力传输和配电设备中用于绝缘和灭弧。在电子行业，SF₆用于半导体和平板显示器的制造。在镁冶炼行业，SF₆用作高温下防止镁氧化的保护气。多数SF₆减排技术目前尚在试点示范阶段。

减少电力传输SF₆排放的技术

根据中国电力行业长期发展规划，电力设备维护的SF₆需求量将在2020年增加至4470吨，到2030年增加至5007吨。因此，相应的SF₆排放量在现有政策下将在2030年达到4000万吨CO₂当量/年。电力行业目前主要有三种SF₆减排措施：

- 改进设备设计，减少SF₆用量及泄漏。
- 采用替代气体，如SF₆和N₂的混合气，或者纯N₂。
- 回收利用，包括在设备维修或拆卸期间将SF₆从电力设备转移至存储罐。

华北电网有限公司已经采用上述措施减少其电网的SF₆排放，公司将输配电设备中SF₆泄漏率控制在0.4%以内，在设备检修维护过程中对SF₆气体100%回收。如果这些措施可以应用到整个电力行业，并且在新设备中用N₂/SF₆按8:2混合的气体替代SF₆，则电力行业SF₆排放量到2030年可以几乎降低至0，其减排潜力达到4000万吨CO₂当量/年³⁶。

减少平板显示器制造SF₆排放的技术

采用替代气体可以减少平板显示器制造过程SF₆的排放，如NF₃或者碳酰氟（COF₂）。由于NF₃的GWP值高，也是《京都议定书》受控气体，因此，低GWP值的COF₂更为推荐。根据中国平板显示器及光纤制造业的增长趋势，SF₆需求量到2020年将增加至1290吨，到2030年将增加至2073吨。在现有政策下，相应的SF₆排放量到2020年将增加至2900万吨CO₂当量，到2030年将增加至4700万吨CO₂当量。但是，如果采用COF₂替代SF₆用于平板显示器制造，而且到2030年SF₆ 100%被淘汰，则到2030年SF₆减排潜力将达4700万吨CO₂当量/年。

来源：杨礼荣, 朱涛, 高庆先编著. 2014. 我国典型行业非二氧化碳类温室气体减排技术及对策. 中国环境出版社, 北京。

3.3 农业非二氧化碳温室气体减排机遇

2010年，农业非CO₂温室气体排放量占中国非CO₂温室气体排放总量的43%，达到7.02亿吨CO₂当量。在现有政策框架下，农业非CO₂温室气体排放主要受到化肥施用产生的N₂O排放量增加的驱动。预计到2020年，农业非CO₂温室气体排放量将增加到7.56亿吨CO₂当量，2030年将达到8.05亿吨CO₂当量。其中，农业土壤排放量贡献最大，2030年将占整个行业非CO₂温室气体排放量的51%。

中国《国家自主贡献》概括了农业应对气候变化的措施，包括如下目标：

- 推进农业低碳发展，到2020年努力实现化肥农药使用量零增长。
- 控制稻田CH₄排放和农田N₂O排放。
- 构建循环型农业体系，推动秸秆综合利用、农林废弃物资源化利用和畜禽粪便综合利用。

以上目标基于中国正在开展的“引进国际先进农业科学技术计划”（简称“948计划”）提出。该计划最初于1994年提出，之后持续实施，2015年仍在征集新项目。2009年，依托“948计划”，中国农业部采取三项措施控制农业温室气体排放：以农村沼气为重点，实施了农村生态家园富民计划，减少CH₄排放；开展测土配方施肥行动，提高科学施肥的水平，减少农田N₂O排放；推广以秸秆覆盖免耕为主要内容的保护性耕种，增加土壤的有机碳含量，减少CH₄排放。（中国经济网 2009）

3.3.1 农田施肥N₂O减排机遇

中国《国家自主贡献》文件及“948计划”都对农田施肥N₂O排放设定了减排目标。该行业的排放是中国非CO₂温室气体排放的主要贡献方。2010年，中国该行业排放量预计达3.3亿吨CO₂当量，高于世界其他国家，占全球该行业总排放量的30%（董红敏等 2008）。中国农民目前正在试验采用新的施肥技术以减少排放，包括：

- 开展测土配方施肥，提高氮肥利用率，避免不必要的过度施肥造成N₂O排放，2007年，推广测土配方施肥面积达42.7万平方公里，提高肥料利用率3%以上，减少N₂O排放量3%。（黄耀 2006）
- 推广缓释肥³⁷，可减少N₂O排放80%。（黄耀 2006）
- 添加生物抑制剂，如脲酶抑制剂氢醌和双氰胺氮肥料，可减

少N₂O排放30%~62%。（石生伟等 2010）

- 开展精准农业，包括精准施肥、精准播种、精准灌溉。与传统的施肥方法相比，精准农业技术能提高作物产量，减少施肥量。（李迎春 2009）

在农业领域，中国应加快减排步伐，减少农田施肥N₂O排放，其原因包括：

- 农田施肥N₂O排放是中国非CO₂温室气体较大的排放源之一，在现有政策框架下，预计到2030年，农田施肥N₂O排放将达到4.06亿吨CO₂当量，约占中国非CO₂温室气体排放总量的14%³⁸。
- 存在减排潜力。如果《国家自主贡献》文件中的目标能够达到，并且中国到2020年实现化肥零增长，那么到2030年中国的减排潜力达到3700万吨CO₂当量/年³⁹。
- 现有技术已经开始试点。中国部分农民已试验可以显著降低N₂O排放的农田施肥新技术。
- 控制农田N₂O排放已纳入中国《国家自主贡献》文件。

3.3.2 稻田CH₄减排的机遇

中国《国家自主贡献》提及了控制稻田CH₄排放。2010年，中国稻田CH₄排放估算达到1.25亿吨CO₂当量（占非CO₂温室气体排放总量的8%）⁴⁰。部分中国农民已经测试了几种可以减少CH₄排放，并最终提高产量和降低成本的技术。这些技术往往通过减少水稻幼苗的水分暴露，从而减少CH₄的排放。这些技术包括（黄德林等，2011）：

- 选择低CH₄排放的水稻品种——某些品种的水稻比传统品种减少50%的CH₄排放。如果全国有50%的稻田使用低CH₄排放的水稻品种，每年可减排CH₄ 2800万至3000万吨CO₂当量。
- 使用生物质沼渣肥作为低CH₄排放肥料——生物质沼渣肥是低甲烷排放肥料，目前中国大约仅有7%的稻田施用沼渣肥，大部分稻田施用的是未经发酵的有机肥。如果到2030年能有60%的稻田施用沼渣肥，中国稻田CH₄的排放潜力将达到2800万吨CO₂当量/年。
- 间歇落干的管理方法（相对常规淹灌）——目前只有28%的中国稻田采用这种技术，如能在50%的地区推广这一措施，可减少CH₄排放900万到1100万吨CO₂当量/年。
- 半旱式栽培——半旱式栽培是指在水田中，开沟起垄作厢，将水稻栽插在垄埂顶部两侧的水位线或厢面上，沟内灌水，并按水稻不同生育阶段调节水位高低的一种新型种稻方法。若全国有50%的稻田使用此措施，可减排CH₄ 4300万

到7500万吨CO₂当量/年。

- 水稻旱育稀植——采用旱育秧的方法培育秧苗,扩行减苗栽植的一项耕作技术。若此措施推广到全国,可减排CH₄ 200万到600万吨CO₂当量/年。
- 施用农药和化肥的CH₄抑制剂,可减少稻田CH₄排放量。如果这些抑制剂可应用于全国稻田,则CH₄减排潜力可达1900万到3200万吨CO₂当量/年。

(需注意上述大部分技术有一定程度的重叠,因此计算减排潜力时不能简单相加。)

在农业领域,中国应**加强稻田CH₄减排**,其原因包括:

- 稻田CH₄排放是中国非CO₂温室气体排放的主要来源之一,在现有政策下,估算到2030年,稻田CH₄排放将达到1.07亿吨CO₂当量,占非CO₂温室气体排放总量的4%。
- 具有显著的减排潜力。半旱式栽培技术具有巨大的减排潜力,如果应用至中国50%的稻田,中国稻田CH₄排放量可下降7500万吨CO₂当量/年(黄德林等,2011)。
- 部分技术已经过试验。中国农民已试验了可以显著减排稻田CH₄的新技术。
- 中国《国家自主贡献》提及了控制稻田CH₄排放。

3.4 废弃物处理领域非二氧化碳温室气体减排机遇

2005年,废弃物处理行业非CO₂温室气体排放量占中国非CO₂温室气体排放总量的7%,达到1.09亿吨CO₂当量。在现有政策框架下,到2020年,废弃物处理行业非CO₂温室气体排放量将增加到2.12亿吨CO₂当量,2030年将达到3.18亿吨CO₂当量。在废弃物处理行业,垃圾填埋场固体废弃物排放贡献最大,2030年将占整个行业非CO₂温室气体排放量的56%。

循环利用和减少废弃物是贯串《国家自主贡献》的主题。中国提倡的可持续循环经济也与此相关。《国家自主贡献》提出推动“倡导低碳生活方式”,引导人们适度消费,遏制各种铺张浪费现象。此外,《国家自主贡献》还强调完善废旧商品回收体系和垃圾分类处理体系,强化垃圾填埋场CH₄收集利用。

2008年,中国政府出台了《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB16889—2008),要求设计填埋量大于250万吨且垃圾填埋厚度超过20米的垃圾填埋场,应建设CH₄利用设施或火炬燃烧

设施处理含CH₄气体(中华人民共和国环境保护部科技标准司2008)。尽管这个标准只对大规模的垃圾填埋场提出了利用/焚烧含CH₄垃圾填埋气的要求,中国的小型垃圾填埋场也实施了小规模项目,一些项目开发成了CDM项目,来提高经济性。截至2010年,在联合国注册成功的CDM项目中,垃圾填埋处理CH₄回收利用年总减排量达6.08亿吨CO₂当量(杨礼荣等,2014)。这些项目包括垃圾填埋气回收供热、直接现场燃烧、发电或热电联产系统。

尽管垃圾填埋场固体废弃物CH₄排放对中国非CO₂温室气体排放总量有一定贡献(到2030年约占总量的6%)⁴²,由于缺乏相应政策、具体的垃圾填埋气利用目标以及财政奖励措施,该领域的减排仍任重道远。

4. 中国非二氧化碳温室气体减排面临的挑战

为加强中国非CO₂温室气体减排,在现有政策及《国家自主贡献》的基础上,中国政府需要应对以下挑战:

- **数据和知识缺乏。**到目前为止,中国的绝大多数气候政策及目标只针对CO₂减排,对非CO₂温室气体排放量及减排潜力的理解和认识相当有限。此外,如果按照现在的做法,国家温室气体清单每十年才更新一次,追踪政策和减排措施的影响将相当困难,对于快速增长的排放源尤其如此。例如,由于ODS淘汰替代行动,中国HFC-23的排放量在2005年到2010年间增长了14倍。硝酸和己二酸生产过程排放的N₂O在相同时间段也增加了60%。作为《第三次国家信息通报》和上报给IPCC的两年期报告的一部分,中国预计将公布更新的温室气体清单,这将解决部分问题。
- **缺乏非CO₂温室气体减排目标。**在中国,温室气体的总体减排目标发挥了关键作用。减排目标一般会细化分摊,采用问责制,驱动省级和企业层面的减排行动,有助于实现国家既定目标。总体减排目标还可以促进政府部门间的协调。针对CO₂减排,政府需要跨部门协调,如能源、交通、工业和林业部门间的协调,以实现CO₂排放2030年达到峰值并努力早日达峰,同时实现单位GDP的CO₂排放2005年水平上降低60%~65%(中华人民共和国国务院2015a)。事实上,这些部门在CO₂减排上已有合作的经验,如“千家企业节能行动”和“万家企业节能低碳行动实施方案”⁴³。由于非CO₂温室气体排放来自所有经济部门,这种协调工作对非CO₂温室气体减排尤其重要。如果缺乏非CO₂温室气体减排目标,难以激发减排的责任感、形成问责制,也不利于形成政府部门间的协作。

■ **成本。**一些非CO₂温室气体减排举措成本太高,在没有财政补贴或碳市场支持的情况下难以实施。我们的分析显示工业领域N₂O和HFCs减排尤其如此(更多信息见专栏2和专栏3)。另一方面,研究表明,除上述领域,中国可以在其他经济部门有效推进非CO₂温室气体减排。例如,根据美国国家环境保护局的报告《非二氧化碳温室气体的全球减排》,到2030年,中国可实现高性价比的非CO₂温室气体减排潜力2亿吨CO₂当量/年。在美国国家环境保护局的报告中,“高性价比”指的是存在可以实现净零成本的技术,并可能具有潜在的经济收益,或被称为“不后悔”的技术选择。

■ **非CO₂温室气体减排项目尚未纳入中国核证自愿减排量(CCER)体系,也未纳入筹建中的中国碳交易市场计划。**2014年12月,国家发改委下发《碳排放权交易管理暂行办法》,为全国统一碳交易市场的建设提供了制度框架,提出将在2015年和2020年期间分三个阶段进行实施(PMR 2015)。而另一方面,先行的地区碳市场试点项目在2013年6月至2015年4月期间开展。试点期间主要交易的CO₂减排项目类型包括:风能、水能、光伏、生物质、燃料转换、节能。约11.5%的项目与CH₄回收和利用有关,但没有N₂O或含氟温室气体相关的项目(PMR 2015)。此外,2015年9月,在对美国进行国事访问期间,习近平主席确认,中国计划在2017年启动国家碳排放交易体系,覆盖电力、钢铁、水泥及其他重点工业部门,并实施“绿色电力调度”,电网优先调用低碳发电资源(The White House 2015)。计划中的国家碳排放交易计划覆盖31个省级行政区、6个工业部门、15个子行业,但只针对CO₂排放(Jiang 2015)。

下一章将讨论本研究的主要结论,并提出应对上述减排挑战的三个关键建议,希望有助于中国政府加强非CO₂温室气体减排行动。

5. 讨论和政策建议

为减少CO₂排放,实现2030年碳排放达峰的目标,中国已经制定了各种相关政策。针对非CO₂温室气体排放控制的政策和工作也在不断增加。例如,近年来,中国提供了一系列财政激励来减少煤矿开采活动中逃逸的CH₄和工业排放的HFCs。尽管中国还未制定包含所有温室气体种类的综合政策和减排目标,但已经完成了很多重要的基础工作。我们的研究表明:

目前中国国家发展重点领域已经支持了很多非CO₂温室气体减排行动,提供了足够的资金资源。2008年颁布的《循环经济促进法》、2012年颁布的《清洁生产促进法》,以及2013年发布的《大气污染防治行动计划》中都包含了消除浪费、提高资源利用

率、促进清洁生产的倡议,以上措施都将减少温室气体排放。此外,中国《“十三五”规划》提出注重绿色发展、强调资源利用效率、减少废弃物,并明确指出“控制非二氧化碳温室气体排放”(中华人民共和国国务院 2016)。

中国《国家自主贡献》提出了减少非CO₂温室气体排放的政策和措施。虽然中国《国家自主贡献》的四个具体目标主要涉及CO₂减排,但文件也列出了中国将采取的“强化应对气候变化行动”的具体政策。这些政策涵盖了改进气候战略、提升低碳生活、增强金融和发展支持等多方面内容。《国家自主贡献》提出了中国将在能源活动、工业生产过程、农业、土地利用变化与林业、废弃物处理等领域采取措施减少温室气体排放。虽然文件对这些措施只进行了定性描述,但无疑将对所有温室气体排放产生影响。

中国已经试验了一系列减少非CO₂温室气体排放的技术。中国已经在各经济部门发展、试点和实施了一批技术减少非CO₂温室气体的排放。这些技术常常具有协同效应,可以同时增加生产安全性,提高资源利用率,以及促进可替代能源的利用(比如利用逃逸CH₄作为能源用在采矿和废弃物处理领域)。此外,中国通过财政补贴或者更优惠的税收政策为这些技术提供支持。如表8所示,通过在所有经济部门规模化推广这些现有技术,到2030年,中国可以减少约8亿吨CO₂当量/年的非CO₂温室气体排放,相当于中国当年非CO₂温室气体排放量的1/3。表8展示了基于第三章所述计算方法估算得到的减排潜力。这一估算仅考虑扩大中国已经采取的非CO₂温室气体减排行动,只关注了技术的可得性,而没有考虑政策、立法和金融等障碍。

中国可在五个主要领域进一步采取非CO₂温室气体减排行动。表9总结了本论文第一到三章,重点关注2030年中国十大非CO₂温室气体排放源⁴⁴。根据表9的内容,我们发现中国可在以下五个领域进一步采取减排行动:煤炭开采活动CH₄排放、农田施肥N₂O排放、臭氧层耗损物质替代物HFCs排放、HCFC-22生产过程HFCs排放以及稻田CH₄排放。我们依据下列因素确定减排行动重点领域:

- 这些排放源对中国非CO₂温室气体排放量贡献较大。
- 具有显著/部分减排潜力。
- 已有成熟或经过测试/试点的减排技术。
- 某种程度上已有减排政策支持。
- 《国家自主贡献》提及。

为了加强非CO₂温室气体的减排工作,中国仍需要克服现有的减排障碍,包括缺乏技术和知识、缺乏非CO₂温室气体减排目标、未纳入筹建中的中国碳交易市场计划等。针对这些挑战,我们提出以下建议:

表 8 | 基于现有技术估算的中国非CO₂温室气体减排潜力

部门	排放来源	2030年减排潜力（百万吨CO ₂ 当量/年）
能源	煤矿CH ₄ 排放	214
工业	HCFC-22生产的HFCs排放	200
	硝酸和己二酸生产的N ₂ O排放	228
	铝冶炼的PFCs排放	13
	电力传输的SF ₆ 排放	40
	电子产品生产的SF ₆ 排放	47
农业	稻田CH ₄ 排放	75
合计		817

来源：作者根据文献数据汇总计算。

表 9 | 基于现有技术估算的中国非CO₂温室气体减排潜力

排放来源	估算的2030年排放量 (百万吨CO ₂ 当量)	减排潜力 ^a	是否列入《国家自主贡献》	是否有现有政策的支持	是否已有减排技术
1. 煤矿开采CH ₄ 排放	461	高	是	是	是，已有成熟的技术
2. 农田施肥N ₂ O排放	406	中	是	否	是，已有成熟的技术
3. 臭氧层耗损物质替代物HFCs排放	358	中	否	是	是，已有小规模应用的示范技术
4. 动物肠道发酵CH ₄ 排放	250	未评估 ^b	否	未评估 ^b	未评估 ^b
5. 硝酸和己二酸生产N ₂ O排放	249	高	否	否	是，已有小规模应用的示范技术
6. HCFC-22生产HFCs排放	220	高	是	是	是，已有成熟的技术
7. 固体废弃物填埋CH ₄ 排放	173	未评估 ^b	否	是	是，已有成熟的技术
8. 废水CH ₄ 排放	118	未评估 ^b	否	未评估 ^b	未评估 ^b
9. 稻田CH ₄ 排放	107	高	是	否	是，已有小规模应用的示范技术
10. 固定和移动源燃烧N ₂ O排放	77	未评估 ^b	否	未评估 ^b	未评估 ^b

注释：

^a 减排潜力的划分依据：“高”指减排潜力大于现有政策下40%的预测排放量，“中”指减排潜力为现有政策下预测排放量的10%~40%。^b 减排潜力依赖于政策及技术，只有《国家自主贡献》特别指出的排放来源才讨论减排潜力。

1. 制定及时、全面的国家温室气体清单⁴⁵

制定并及时更新全面的国家温室气体清单。正如谚语所说，“无法量化的事物就无法管理”。中国公布的最新国家温室气体清单基于2005年的情况。虽然一些机构⁴⁶公布了中国最近几年的温室气体排放量估算结果，但这些研究的假设和范围各不相同，不能简单比较。2015年12月，在UNFCCC下，包括中国在内的195个缔约方通过《巴黎协定》，协定规定“各缔约方应定期提供以下信息：……编写的一份温室气体的人为源排放量和汇清除量的国家清单报告”。这将推动中国政府编写和发布更为及时的国家温室气体清单（至少两年一版）。及时、可靠、可信、细致（以温室气体种类分或以行业分类）的温室气体排放量数据，是识别非CO₂温室气体排放源，评估温室气体排放量随时间的变化，确定优先的减排行动等的重要数据基础，也将是评估政策实施情况和效果的关键指标。根据《巴黎协定》的规定，中国国家温室气体清单将受到技术专家的审查，这意味着中国应根据承诺提高国家温室气体排放清单的透明度和数据质量。

2. 进一步制定针对具体来源的非CO₂温室气体减排指标，制定涵盖所有经济部门的温室气体减排整体目标

中国政府在制定不同类型的温室气体减排目标方面已有超过十年的经验。2006年，国家发改委在《“十一五”规划》中首次提出了中国的能耗降低目标和森林覆盖率目标（中华人民共和国发展和改革委员会 2006）。2010年，中国承诺到2020年，单位GDP碳排放量相对2005年水平下降40%~45%，同时还提出包括森林覆盖率、非化石燃料在一次能源结构中的份额等目标（中华人民共和国发展和改革委员会 2010）。同年，中国政府还出台了《“十二五”规划》，制定了具有约束力的目标，包括增加森林覆盖率、减少能耗、降低碳排放强度、增加非化石燃料在一次能源结构中的比例，这些目标预计将在2015年实现（中华人民共和国国务院 2011）。2015年，中国承诺到2030年，单位GDP碳排放量在2005年水平上下降60%~65%，CO₂排放量在2030年达到峰值，并争取早日达峰。（中华人民共和国国务院 2015a）

国家层面目标的设置有助于推动以下进展或行动：

- 在地方政府层面和企业层面对预期目标实行问责制和责任制。例如，中国《“十二五”规划》的国家层面能耗降低目标（在5年内降低16%）被分解到31个省级行政区，每个省级行政区的目标从10%~18%不等（中华人民共和国国务院 2010）。这些目标通过“万家企业节能低碳行动方案”进一步分摊到企业层面。“万家企业节能低碳行动”要求超过15000家中国能耗最大的企业到2015年共减少能源消费2.5亿吨标准煤（相当于总能耗降低目标的37%）（IEPD 2016）。
- 开展目标完成情况的追踪，提升报告过程的透明度。例如，对于上述的能源强度目标，国家发改委每季度公布

各省级行政区能源强度降低情况（Song et al. 2015）。

- 加强政策的执行和效果。例如，《“十二五”规划》中的目标推动制定《“十二五”控制温室气体排放工作方案》和《节能减排“十二五”规划》（Song et al. 2015）。
- 推动和促进不同措施形成最优组合，并持续贯彻执行。
- 促进减排政治意愿的形成，加强政府部门之间就某一共同目标的合作。

综上，中国设定国家层面目标具有十分广泛而深远的影响。这些国家目标推动了更多的国内行动。非CO₂温室气体减排同样需要类似的涵盖所有经济部门的减排总体目标，以促进更加积极、全面的减排行动。涵盖所有经济部门的温室气体减排总体目标也有助于中国更好地响应《巴黎协定》附件4的倡议——鼓励发展中国家“根据不同的国情，逐渐实现全经济绝对减排或限排目标”。

制定涵盖所有经济部门的温室气体减排目标需要较长时间，特别是在缺乏当前温室气体排放量数据的情况下。但中国政府仍然可以采取迅速而有效的行动来控制非CO₂温室气体排放。我们的研究表明，根据未来排放预测、减排潜力分析、现有技术以及中国INDC的目标，可以在以下五个关键非CO₂温室气体排放源采取进一步减排行动：

- 煤炭生产行业CH₄排放。
- 农田施肥N₂O排放。
- 作为臭氧层耗损物质替代物的HFCs排放。
- HCFC-22生产过程副产物的HFCs排放。
- 稻田CH₄排放。

中国可以首先为这些特定排放源设定减排目标，将来推广形成部门减排目标，并最终设定涵盖所有经济部门的温室气体减排整体目标。将于2020年提交的下一版正式的中国《国家自主贡献》将是为各个经济部门设立温室气体排放目标的好机会⁴⁷，当然也可以利用其他更早的契机来设定这些目标。

美国、欧盟等国家或地区已经制定了涵盖所有经济部门的温室气体减排目标，不仅为各自国家推动温室气体减排奠定了基础，还为国际社会提供了实施类似项目的范例（见专栏6和专栏7）。除了发达国家，很多发展中国家也制定了涵盖各个经济部门的温室气体减排目标。例如，巴西计划到2025年，温室气体排放总量在2005年水平上减少37%（Federative Republic of Brazil 2015）。墨西哥也承诺2030年在基线水平上减少25%的温室气体（包括黑炭）排放量（Government of Mexico 2015）。

专栏 6 | 美国案例：制定CH₄减排政策和目标

2013年，美国总统奥巴马强调CH₄减排是气候行动计划的关键（Executive Office of the President 2013）。行动计划公布的时候，美国国家环境保护局已经颁布了一系列相应标准，同时还在制定更多标准，新标准旨在减少挥发性有机污染物（VOCs）等传统污染物的排放，也可以促进CH₄减排。例如，美国国家环境保护局根据《清洁空气法》第111条对垃圾填埋场VOCs排放提出限制要求，这一做法间接减少了CH₄排放（EPA 1996）。2012年，美国国家环境保护局提出了旨在减少天然气生产过程VOCs以及其他有害污染物排放的规定，这一规定预计可以减少天然气系统15%~20%的CH₄排放。（EPA 2012）

根据气候行动计划，联邦政府正在采取直接促进CH₄减排的措施。例如，2015年8月，美国国家环境保护局提交了两项提案，以进一步减少固体废物垃圾填埋场含CH₄气体的排放。这些提案将要求新建、改造以及现有的垃圾填埋场捕集和控制垃圾填埋气，减少1/3以上的排放量。

2015年9月，美国国家环境保护局提出了用于石油和天然气开采的新设备，以及改进设备的CH₄排放标准⁴⁸。天然气行业是CH₄排放最大的工业来源。奥巴马政府推行的标准和减排行动展示了CH₄减排的同时可以减少天然气产量，证明温室气体减排和经济增长可以互相支持。

专栏 7 | 欧洲案例：制定含氟温室气体减排政策和目标

HFCs排放

欧盟（EU）以及其他国家、环保组织、化工企业和设备制造商，正在倡导通过修订《蒙特利尔议定书》来淘汰高GWP值的HFCs。目前，修订方案已经看到曙光。这些修订方案针对非附件五国家（发达国家），淘汰时间表十分相似（2009—2016年间减少10%~15%的HFCs和HCFCs生产及消费），但是针对附件五国家（发展中国家），淘汰时间表差异较大。2015年11月，《蒙特利尔议定书》197个缔约方同意共同努力，争取在2016年“建立工作小组就HFCs在《蒙特利尔议定书》下管理的可行性进行谈判”（UNEP 2015）。即使缺乏国际约束，欧盟及其他几个国家也已经自行发起限制高GWP值HFCs使用的行动。

其他含氟温室气体排放

2006年，欧盟通过汽车空调系统的欧盟指南（2006/40/EC）。从2011年起，汽车生产商将不能在新型号的小汽车和商务车中使用GWP值超过150（含）的温室气体；到2017年，这一限制将扩展到所有的新生产汽车。2014年，欧盟通过了新的含氟气体法规以替代2006年的版本，新法规要求自2015年起限制欧盟内部含氟温室气体销售量，最终目标是到2030年含氟温室气体销售量减少到2014年水平的1/5（European Commission 2015）。含氟气体法规规定对于多种类型的新设备，若可以采用替代物，则严禁使用含氟温室气体，同时严禁现有设备的含氟温室气体泄漏。

3. 加强非CO₂温室气体减排的政策和行动，提供足够的资金支持，将非CO₂温室气体减排同CO₂减排和空气污染治理相结合

加强政策和财政支持

为了实现非CO₂温室气体排放的大幅削减以及温室气体整体减排目标，中国应加强非CO₂温室气体减排的政策和行动，并提供足够的资金支持。首先，中国可以针对前面所述的五个关键非CO₂温室气体排放源（见表9），对现有政策的有效性开展评估。例如，我们的研究表明，农田施肥N₂O排放和稻田CH₄排放目前缺乏政策引导和支持，表明这些行业的政策支持同温室气体减排需求之间存在差距。另一个例子是，HFCs和煤层气CH₄具有显著的减排潜力，虽然有一系列政策关注这两个方面的减排，但这些

政策的实施效果有待监测和评估。我们的研究还显示目前HFCs减排技术若无碳市场的经济刺激，其成本过于昂贵，无法快速推广（见专栏2），因此需要改进现有政策。

协调机制

中国应将非CO₂温室气体减排同CO₂减排相结合，制定一个涵盖所有温室气体的全面的气候变化政策。政府应建立起CO₂和非CO₂温室气体减排的协调机制。例如，减少用电量不仅控制化石燃料消耗（降低CO₂排放），还将降低电气开关设备的SF₆排放量（Hyman et al. 2002）。最后，协调机制应促使中国政府将非CO₂温室气体减排项目纳入中国核证自愿减排量（CCER）体系和筹划中的国家碳交易市场，这对加强非CO₂温室气体减排至

关重要。到目前为止，中国大部分非CO₂温室气体减排举措是在CDM机制支持下实施的，但是2012年CER市场崩溃⁴⁹导致大部分项目突然中止⁵⁰，无法再提供持续的激励，而CCER体系可以接过这一角色。未来，气候变化政策和改善区域环境质量政策间也可以形成协同作用。新修订的《大气污染防治法》已提及“推行区域大气污染联合防治，对颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物、氨等大气污染物和温室气体实施协同控制”。虽然气候变化和改善空气质量的目標不完全一致，但是旨在提高能效、提高资源利用率或使用清洁能源等的措施将对这两类目标都发挥正面影响。

中国对非CO₂温室气体排放量的态度会对全球温室气体排放足迹产生显著影响。为了最终实现《巴黎协定》目标（包括在本世纪后半叶实现零温室气体排放），中国将需要加强行动，减排所有温室气体——而不仅仅是CO₂。

技术附录：中国非二氧化碳温室气体排放量预测的数据来源

本附录介绍了用来构建中国非CO₂温室气体排放量新数据集的数据来源。表10显示了来自美国环保局（EPA）研究、中国环保部（MEP）研究、北京大学（PKU）研究的原始数据。表11总结了整理后的用于预测非CO₂温室气体排放量的数据（也在本论文的第一章中展示）以及详细的预测方法。

表 10 | 根据不同研究汇总的中国非CO₂温室气体排放量预测（一）

排放来源	非CO ₂ 温室气体排放量（百万吨CO ₂ 当量）								
	2010			2020			2030		
	EPA ^a	MEP ^b	PKU ^c	EPA ^a	MEP ^b	PKU ^c	EPA ^a	MEP ^b	PKU ^c
能源									
甲烷									
化石燃料燃烧	35	未统计	未统计	38	未统计	未统计	44	未统计	未统计
生物质燃烧	48	未统计	未统计	46	未统计	未统计	43	未统计	未统计
煤炭开采过程逃逸	296	300	未统计	354	387	未统计	436	未统计	未统计
石油和天然气开采过程逃逸	4	未统计	未统计	4	未统计	未统计	5	未统计	未统计
氧化亚氮									
化石燃料燃烧	38	未统计	未统计	54	未统计	未统计	77	未统计	未统计
生物质燃烧	10	未统计	未统计	9	未统计	未统计	8	未统计	未统计
工业生产过程									
氧化亚氮									
硝酸和己二酸生产	7	49	未统计	9	166	未统计	10	未统计	未统计
氢氟碳化物									
臭氧层耗损物质替代物生产和使用	58	26	110	188	86	178	599	未统计	358
HCFC-22生产	62	91	128	132	230	127	147	未统计	220
全氟化碳									
铝冶炼	11	16	未统计	14	23	未统计	18	未统计	未统计
半导体制造	3	未统计	未统计	3	未统计	未统计	3	未统计	未统计

表 10 | 根据不同研究汇总的中国非CO₂温室气体排放量预测（二）

排放来源	非CO ₂ 温室气体排放量（百万吨CO ₂ 当量）								
	2010			2020			2030		
	EPA ^a	MEP ^b	PKU ^c	EPA ^a	MEP ^b	PKU ^c	EPA ^a	MEP ^b	PKU ^c
平板显示器制造	0	未统计	未统计	1	未统计	未统计	5	未统计	未统计
光伏制造	2	未统计	未统计	8	未统计	未统计	49	未统计	未统计
六氟化硫									
镁冶炼	1	9	未统计	2	18	未统计	2	未统计	未统计
电力设备制造和运行	13	30	未统计	19	6	未统计	26	未统计	未统计
平板显示器制造	0	12	未统计	26	30	未统计	132	未统计	未统计
三氟化氮									
半导体制造	1	未统计	未统计	1	未统计	未统计	1	未统计	未统计
平板显示器制造	1	未统计	未统计	5	未统计	未统计	22	未统计	未统计
光伏制造	0	未统计	未统计	2	未统计	未统计	7	未统计	未统计
农业									
甲烷									
水稻种植	125	未统计	未统计	114	未统计	未统计	107	未统计	未统计
动物肠道发酵	213	未统计	未统计	234	未统计	未统计	250	未统计	未统计
动物粪便管理	20	未统计	未统计	21	未统计	未统计	21	未统计	未统计
农业残留物焚烧	1	未统计	未统计	1	未统计	未统计	1	未统计	未统计
氧化亚氮									
动物粪便管理	14	未统计	未统计	16	未统计	未统计	17	未统计	未统计
农业土壤	329	未统计	未统计	370	未统计	未统计	406	未统计	未统计
农业残留物焚烧	1	未统计	未统计	1	未统计	未统计	1	未统计	未统计
废弃物									
甲烷									
固体废弃物填埋	47	64	未统计	49	117	未统计	49	未统计	未统计
生活和工业废水处理	132	47	未统计	137	78	未统计	138	未统计	未统计
氧化亚氮									
生活废水处理	17	未统计	未统计	17	未统计	未统计	17	未统计	未统计

注释：

^a EPA 的非 CO₂ 温室气体排放量预测基于 IPCC SAR (100 年时间尺度)。

^b MEP 的非 CO₂ 温室气体排放量预测基于 IPCC SAR (100 年时间尺度)。

^c PKU 的非 CO₂ 温室气体排放量预测基于 IPCC AR4 (100 年时间尺度)。

表 11 | 本报告根据不同研究整理的中国非CO₂温室气体排放量预测以及对应的估算方法（一）

排放来源	非CO ₂ 温室气体排放量 (百万吨CO ₂ 当量)			数据来源	预测方法
	2010	2020	2030		
能源					
甲烷					
化石燃料燃烧	35	39	44	EPA	基于2009年国际能源署（IEA）预测的到2030年的中国煤炭、石油、天然气消费量
生物质燃烧	49	46	43	EPA	基于2009年IEA预测的到2030年的中国生物质燃料消费量
煤炭开采过程逃逸	300	387	461	MEP	假设到2020年，CH ₄ 浓度高于9%的煤矿开采过程中CH ₄ 100%被捕获并利用，CH ₄ 浓度低于9%的煤矿开采过程中32%的CH ₄ 被捕获并利用
石油和天然气开采过程逃逸	4	4	5	EPA	基于美国能源信息管理局（EIA）对至2030年的中国天然气和CH ₄ 生产量的预测
氧化亚氮					
化石燃料燃烧	38	54	77	EPA	基于2009年IEA预测的到2030年的中国煤炭、石油、天然气消费量
生物质燃烧	10	9	9	EPA	基于2009年IEA预测的到2030年的中国生物质燃料消费量
工业生产过程					
氧化亚氮					
硝酸和己二酸生产	49	167	249	MEP	假设己二酸产量2020年达到140万吨（对应的排放率0.296吨N ₂ O/吨己二酸），硝酸产量2020年达到1700万吨（对应的排放率0.0095吨N ₂ O/吨硝酸）。此外，考虑到成本过高，此情景无减排措施
氢氟碳化物					
臭氧层耗损物质替代物生产和使用	110	178	358	PKU	主要考虑HFC-134a和HFC-410a的排放。对于HFC-134a，假设中国汽车市场的增长率与GDP增长率一致，HFC-134a持续用于汽车空调制冷剂。此外，HFC-134a的回收呈线性增加，从2010年的0到2030年的10%。关于HFC-410a，假设其使用量与根据《蒙特利尔议定书》得出的HCFC-22的淘汰量相当
HCFC-22生产	128	127	220	PKU	假设到2020年HFC-23的副产物比率（HFC-23/HCFC-22）保持在2008年至2012年的平均值（即2.82%），中国现有的CDM项目在今后三个连续的计入期都获批准（计入期到2027年至2030年）

表 11 | 本报告根据不同研究整理的中国非CO₂温室气体排放量预测以及对应的估算方法（二）

排放来源	非CO ₂ 温室气体排放量 (百万吨CO ₂ 当量)			数据来源	预测方法
	2010	2020	2030		
能源					
全氟化碳					
铝冶炼	16	23	23	MEP	假设中国电解铝产量2015年达到2400万吨，2015年至2030年保持在这个水平
半导体制造	3	3	3	EPA	假设在2020年前，中国半导体产业温室气体排放量增长率相当于5年GDP的复合增长率。此外，假设中国到2020年相对2012年排放水平降低10%。考虑到信息有限，假定中国2025年和2030年排放量保持在预期的减排水平
平板显示器制造	0	1	5	EPA	基于预期的全球平板显示器最大设计生产能力（利用5年全球复合增长率）以及中国占全球的份额
光伏制造	2	8	49	EPA	基于预期的全球光伏最大设计能力（来自DisplaySearch的数据库（ https://technology.ihs.com/ ））以及预计中国占全球的份额
六氟化硫					
镁冶炼	9	19	29	MEP	假设2020年镁产量达到810吨且无减排措施
电力设备制造和运行	31	36	40	MEP	假设电力设备制造和运行排放的SF ₆ 在2010年和2020年期间年均增长2%
平板显示器制造	12	30	47	MEP	假设平板显示器制造业SF ₆ 消费量在2020年达到1290吨且无减排措施。
三氟化氮					
半导体制造	1	1	1	EPA	假设在2020年前，中国半导体制造业温室气体排放量增长率相当于5年间GDP的复合年增长率。此外，假设中国到2020年相对2012年排放水平降低10%。考虑到信息有限，假定中国2025年和2030年排放量保持在预期的减排水平
平板显示器制造	1	5	22	EPA	基于预期的全球平板显示器最大设计能力（利用5年全球复合增长率）以及中国占全球的份额
光伏制造	0	2	7	EPA	基于预期的全球光伏最大设计能力（来自DisplaySearch的数据库）以及预计中国占全球的份额

表 11 | 本报告根据不同研究整理的中国非CO₂温室气体排放量预测以及对应的估算方法（三）

排放来源	非CO ₂ 温室气体排放量 (百万吨CO ₂ 当量)			数据来源	预测方法
	2010	2020	2030		
农业					
甲烷					
水稻种植	125	114	107	EPA	基于来源于美国食品及农业政策研究所预期的2018/2019年中国水稻收获面积数据（FAPRI 2010）
动物肠道发酵	213	235	250	EPA	基于国际粮食政策研究所预期的中国牛肉、猪肉、羊肉、牛奶需求量（IFPRI 2009）
动物粪便管理	20	21	21	EPA	基于国际粮食政策研究所预期的畜产品增长率（IFPRI 2009）
农业残留物焚烧	1	1	1	EPA	排放量假设保持在2005年水平
氧化亚氮					
动物粪便管理	14	16	17	EPA	基于国际粮食政策研究所预期的畜产品增长率（IFPRI 2009）
农业土壤	329	370	406	EPA	基于Tenkorang和Lowenberg-DeBoer（2008）预测的化肥消费区域增长率
农业残留物焚烧	1	1	1	EPA	假设2030年排放量保持在2005年水平
废弃物					
甲烷					
固体废弃物填埋	64	117	173	MEP	基于2014年预测的中国GDP增长率且无减排措施
生活和工业废水处理	47	78	118	MEP	基于2014年预测的中国GDP增长率且无减排措施
氧化亚氮					
生活废水处理	17	17	17	EPA	根据2014年预测的中国人口增长预期以及联合国粮农组织（FAO）2009年联合国统计年鉴中预测的蛋白质消费量数据

参考文献

1. Aden, N., D. Fridley, and N. Zheng. 2009. "China's Coal: Demand, ConAden, N., D. Fridley, and N. Zheng. 2009. "China's Coal: Demand, Constraints, and Externalities." Berkeley, CA: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Environmental Energy Technologies Division.
2. Adhya, T.K. et al. 2014. "Wetting and Drying: Reducing Greenhouse Gas Emissions and Saving Water from Rice Production." Working Paper, Installment 8 of Creating a Sustainable Food Future. Washington, D.C.: World Resources Institute. Accessible at: <https://www.wri.org/sites/default/files/wetting-drying-reducing-greenhouse-gas-emissions-saving-water-rice-production.pdf>.
3. Andrews-Speed, P. 2016. "China's Unconventional Gas Production: Slow but Steady Progress." Accessible at: <http://www.andrewsspeed.com/chinas-unconventional-gas-production-slow-but-steady-progress/>.
4. 北京大学环境科学与工程学院. 2013. 《控制管理氢氟碳化物影响研究——机遇与挑战》, 研究报告.
5. Bianco, N., K. Meek, R. Gasper, M. Obeiter, S. Forbes, and N. Aden. 2014. "Seeing is Believing: Creating a New Climate Economy in the United States." Working Paper: 103. Washington, D.C.: World Resources Institute. Accessible at: <http://www.wri.org/publication/new-climate-economy>.
6. CAIT. 2016. Climate Analysis Indicators Tool: WRI's Climate Data Explorer. Washington, D.C.: World Resources Institute. Accessible at: <http://cait2.wri.org>.
7. CCSP (United States Climate Change Science Program). 2008. "Climate Projections Based on Emissions Scenarios for Long-Lived and Short-Lived Radiatively Active Gases and Aerosols." Washington, D.C.: Global Change Research Information Office.
8. CDM Policy Dialogue. 2012. "Climate Change, Carbon Markets and the CDM: A Call to Action." Accessible at: <http://www.cdmpolicydialogue.org/report/rpt110912.pdf>.
9. China Law Insight. 2013. "New State Council Opinion Encourages CBM Development." Published on October 22, 2013. Accessible at: http://www.chinalawinsight.com/2013/10/articles/energy-resource/new-state-council-opinion-encourages-cbm-development/#_ednref1.
10. China Water Risk. 2015. "China's Circular Economy Plans for 2015." Accessible at: <http://chinawaterrisk.org/notices/chinas-circular-economy-plans-for-2015/>.
11. 崔永丽, 林慧, 杨礼荣, 郑文茹. 2013. 中国氟化工行业HFC-23减排潜力分析. 气候变化研究进展, 9 (2): 139-143
12. 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 彭小培, 李娜, 朱志平. 2008. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策. 农业工程学报. 24 (10): 269-273
13. EIA (United States Energy Information Administration). 2015. China. Accessible at: <https://www.eia.gov/beta/international/analysis.cfm?iso=CHN>.
14. EMF (Energy Modeling Forum). 2009. "EMF 22: Climate Change Control Scenarios." Accessible at <https://emf.stanford.edu/projects/emf-22-climate-change-control-scenarios>.
15. EPA (United States Environmental Protection Agency). 1996. "Standards of Performance for New Stationary Sources and Guidelines for Control of Existing Sources: Municipal Solid Waste Landfills." Accessible at: <http://www.epa.gov/ttn/atw/landfill/fr12mr96.pdf>.
16. EPA. 2012. "Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990–2030." Accessible at: <http://www.epa.gov/climatechange/EPAactivities/economics/nonco2projections.html>.
17. EPA. 2013. "Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases: 2010–2030." Accessible at: http://www3.epa.gov/climatechange/Downloads/EPAactivities/MAC_Report_2013.pdf.
18. EPA. 2015a. "Coalbed Methane Outreach Program: China International Activities." Accessible at: <http://www3.epa.gov/cmop/international/china.html>.
19. EPA. 2015b. "Rule and Implementation Information for Standards of Performance for Municipal Solid Waste Landfills." Accessible at: <http://www3.epa.gov/airtoxics/landfill/landfipg.html>.
20. EPA. 2016. "The Basics of the Regulatory Process." Accessible at: <http://www.epa.gov/laws-regulations/basics-regulatory-process>.
21. European Commission. 2011. "Emissions Trading: Commission Welcomes Vote to Ban Certain Industrial Gas Credits." Accessible at: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-11-56_en.htm.
22. European Commission. 2014. "Joint Statement: Deepening the EU-China Comprehensive Strategic Partnership for Mutual Benefit." Accessible at http://europa.eu/rapid/press-release_STATEMENT-14-89_en.htm.
23. European Commission. 2015. "EU Legislation to Control F-Gases." Accessible at: http://ec.europa.eu/clima/policies/f-gas/legislation/index_en.htm.

24. European Fluorocarbons Technical Committee. 2015. "Hydrofluoroolefins (HFOs) Factsheet." Accessible at: http://www.fluorocarbons.org/uploads/Modules/Library/fact-sheet-hfos_19.pdf.
25. Executive Office of the President. 2013. "The President's Climate Action Plan." Accessible at: <https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/image/president27sclimateactionplan.pdf>.
26. Fang, X., B.R. Miller, S. Su, J. Wu, J. Zhang, and J. Hu. 2014. "Historical Emissions of HFC-23 (CHF₃) in China and Projections upon Policy Options by 2050." *Environmental Science and Technology* 48(7): 4056–4062.
27. FAPRI (Food and Agriculture Policy Research Institute). 2010. "U.S. and World Agricultural Outlook." Ames, IA and Columbia, MO: Iowa State University and University of Missouri, FAPRI.
28. Federative Republic of Brazil. 2015. Intended Nationally Determined Contribution. Accessible at: <http://www4.unfccc.int/submissions/INDC/Published%20Documents/Brazil/1/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf>.
29. Fridley, D., N. Khanna, and L. Hong. 2012. "Review of China's Low-Carbon City Initiative and Developments in the Coal Industry." Accessible at: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1171744/>.
30. Government of Mexico. 2015. Intended Nationally Determined Contribution. Accessible at: <http://www4.unfccc.int/submissions/INDC/Published%20Documents/Mexico/1/MEXICO%20iNDC%2003.30.2015.pdf>.
31. 国家能源局. 2015. 国家能源局发布煤层气勘探开发行动计划. 网页链接: http://www.nea.gov.cn/2015-02/16/c_134000813.htm.
32. 国家信息通报. 2005. 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报. 网页链接<http://nc.ccchina.gov.cn/web/NewsInfo.asp?NewsId=336>
33. GVR (Grand View Research). 2015. "Nitric Acid Market By Application (Fertilizers, Adipic Acid, Nitrobenzene, Toluene di-isocyanate, Nitrochlorobenzene) Expected to Reach USD 14.00 Billion by 2022." Accessible at: <http://www.grandviewresearch.com/press-release/global-nitric-acid-market>.
34. 黄耀. 2006. 中国的温室气体排放、减排措施与对策. 第四纪研究. 26 (5) :722-731
35. 黄德林, 杨军, 蔡松锋. 2011. 中国非二氧化碳类温室气体减排潜力及其政策意涵. 中国农学通报. 27 (02) :253-259
36. Hyman, R., J. Reilly, M. Babiker, A. De Masin, and H. Jacoby. 2002. "Modeling Non-CO₂ Greenhouse Gas Abatement." *Environmental Modeling and Assessment* 8: 175–186.
37. IEA (International Energy Agency). 2009. "Coal Mine Methane in China: A Budding Asset with the Potential to Bloom." Accessible at: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/china_cmm_report.pdf.
38. IEA. 2015. IEA Energy Atlas. Accessible at: <http://energyatlas.iea.org/?-subject=2020991907>.
39. IEPD (Industrial Efficiency Policy Database). 2016. "Top 10,000 Energy-Consuming Enterprises Program." Accessible at: <http://iepd.iipnetwork.org/policy/top-10000-energy-consuming-enterprises-program>.
40. IFPRI. 2009. International Food Policy Research Institute: Impact Model Growth Rate Spreadsheet. Emailed from Siwa Msangi of IFPRI to Katrin Moffroid of ICF International, November 5, 2009.
41. IFPRI (International Food Policy Research Institute). 2009. "International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade (IMPACT) Model. Washington, D.C.: IFPRI.
42. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. "Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories: Emissions of Substitutes for Ozone-Depleting Substances." Accessible at: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/3_7_Substitutes_Ozone-Depleting_Substances.pdf.
43. IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. "Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing." Accessible at: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf.
44. IPCC. 2014. "Data Distribution Centre: Socio-Economic Data and Scenarios." Accessible at: <http://sedac.ipcc-data.org/ddc/index.html>.
45. Jiang, J. 2015. Quoted in "China CO₂ Market to Cover Half of Total Emissions by 2017 Launch." Reuters. Published on December 8. Accessible at: <http://www.reuters.com/article/us-climatechange-summit-china-carbon-trad-idUSKBN0TR18420151208>.
46. 李迎春. 2009. 中国农业氧化亚氮排放及减排潜力研究. 中国农业科学研究院, 博士学位论文.

47. NRDC (Natural Resources Defense Council). 2015. "India Proposes HFC Phase-Down Amendment Proposal to the Montreal Protocol Draft Fact Sheet." Council on Energy, Environment and Water, Institute for Governance and Sustainable Development. April 2015. Accessible at: <https://www.nrdc.org/experts/anjali-jaiswal/progress-climate-change-india-takes-drivers-seat-amending-montreal-protocol>.
48. PMR (Partnership for Market Readiness). 2015. "China Carbon Market Monitor." Accessible at: https://www.thepmr.org/system/files/documents/PMR%20China%20Market%20Newsletter_Hi%20Res%205_19.pdf.
49. Point Carbon. 2014. "Global Carbon Markets have Shrunk in Value by 60% Since 2011." Accessible at: <http://www.redd-monitor.org/2014/01/09/global-carbon-markets-have-shrunk-in-value-by-60-since-2011/>.
50. 全国人民代表大会常务委员会. 2008. 中华人民共和国循环经济促进法". 网页链接: http://www.gov.cn/flfg/2008-08/29/content_1084355.htm.
51. 全国人民代表大会常务委员会. 2012. 中华人民共和国清洁生产促进法. 网页链接: http://www.npc.gov.cn/wxzl/gongbao/2012-05/29/content_1728285.htm.
52. 全国人民代表大会常务委员会. 2015. 中华人民共和国大气污染防治法. 网页链接: http://www.zhb.gov.cn/ztd/rdzl/gwy/wj/201509/t20150906_309355.htm.
53. 石生伟, 李玉娥, 刘运通, 万运帆, 高清竹, 张仲新. 2010. "中国稻田CH₄和N₂O 排放及减排整合分析" 中国农业科学 43 (14): 2923–2936.
54. Smith, K. 2010. "Nitrous Oxide and Climate Change." New York, NY: Taylor & Francis.
55. Song, R., W. Dong, J. Zhu, X. Zhao, and Y. Wang. 2015. "Assessing Implementation of China's Climate Policies in the 12th Five-Year Period." Working Paper. Washington, D.C.: World Resources Institute. Accessible at: <http://www.wri.org/publication/assessing-implementation-chinas-climate-policies-12th-5-year-period>.
56. Su, S., X. Fang, L. Li, J. Wu, J. Zhang, W. Xu, and J. Hu. 2015. "HFC-134a Emissions from Mobile Air Conditioning in China from 1995 to 2030." Atmospheric Environment 102: 122–129.
57. Tenkorang, F. and J. Lowenberg-DeBoer. 2008. "Forecasting Long-term Global Fertilizer Demand." Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
58. The White House. 2013. "United States and China Agree to Work Together on Phase Down of HFCs." Washington, D.C.: Office of the Press Secretary. Accessible at: <https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2013/06/08/united-states-and-china-agree-work-together-phase-down-hfcs>.
59. The White House. 2015. "Fact Sheet: The United States and China Issue Joint Presidential Statement on Climate Change with New Domestic Policy Commitments and a Common Vision for an Ambitious Global Climate Agreement in Paris." Washington, D.C.: Office of the Press Secretary. Accessible at: <https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2015/09/25/fact-sheet-united-states-and-china-issue-joint-presidential-statement>.
60. Trager, R. 2014. "U.S. Pushes for Global Phase-out of HFCs." Chemistry World. Published online, September 14. Accessible at: <http://www.rsc.org/chemistryworld/2014/09/us-pushes-global-phase-out-hydrofluorocarbons>.
61. UNEP (United Nations Environment Programme). 2015. "Montreal Protocol Parties Devise Way Forward to Protect Climate Ahead of Paris COP21." Accessible at: <http://www.unep.org/newscentre/Default.aspx?DocumentID=26854&ArticleID=35543&l=en>.
62. UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2012. Report of the Conference of the Parties on its Seventeenth Session, Held in Durban from 28 November to 11 December 2011. (Addendum. Part Two: Action taken by the Conference of the Parties at its Seventeenth Session.) Accessible at: <http://unfccc.int/resource/docs/2011/cop17/eng/09a01.pdf>.
63. UNFCCC. 2015a. Adoption of the Paris Agreement. Accessible at: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109.pdf>.
64. UNFCCC. 2015b. Kyoto Protocol. Accessible at: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php.
65. UNFCCC. 2015c. "What is the CDM?" Accessible at: <https://cdm.unfccc.int/about/index.html>.
66. UNFCCC 2015d. Data Table Used Solely for the Purposes of Article 21 of the Paris Agreement. Accessible at http://unfccc.int/files/ghg_data/application/pdf/table.pdf.
67. WRI (World Resources Institute). 2015a. "INSIDER: Understanding the Paris Agreement's Long-term Goal to Limit Global Warming." Blog, published on December 15, 2015. Accessible at: <http://www.wri.org/blog/2015/12/insider-understanding-paris-agreement%E2%80%99s-long-term-goal-limit-global-warming>.

68. WRI. 2015b. "Not Just for Paris, but for the Future: How the Paris Agreement Will Keep Accelerating Climate Action." Blog, published on December 14, 2015. Accessible at: <http://www.wri.org/blog/2015/12/not-just-paris-future-how-paris-agreement-will-keep-accelerating-climate-action>.
69. 杨礼荣, 朱涛, 高庆先编著. 2014. 我国典型行业非二氧化碳类温室气体减排技术及对策. 中国环境出版社, 北京.
70. Yin, J. 2013. "CP Promotion Law in China." Accessible at: <http://www.unep.org/search.asp?sa.x=0&sa.y=0&sa.go%21&q=YinJie.ppt&cx=-007059379654755265211%3Ajknxjgnyii&cof=forid%3A11>.
71. Yong, Q., and Y. Jianping. 2015. "A Review of the Development of CBM Industry in China." Published on June 30, 2015. Accessible at: http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2015/80454yong/ndx_yong.pdf.html.
72. 中国经济网. 2009. "农业部: 三项措施控制农业温室气体排放." 网页链接: http://www.ce.cn/cysc/agriculture/gdxw/200908/25/t20090825_19619383.shtml
73. 中华人民共和国发展和改革委员会. 2006. The 11th Five-Year Plan: Targets, Paths, and Policy Orientation. Accessible at: http://www.gov.cn/english/2006-03/23/content_234832.htm.
74. 中华人民共和国发展和改革委员会. 2010. China's Nationally Appropriate Mitigation Action. Submitted to the UNFCCC on January 28, 2010. 网页链接: http://unfccc.int/files/meetings/cop_15/copenhagen_accord/application/pdf/chinacphaccord_app2.pdf.
75. 中华人民共和国发展和改革委员会. 2011. 关于印发煤层气(煤矿瓦斯)开发利用"十二五"规划的通知 http://www.nea.gov.cn/2011-12/31/c_131337364.htm
76. 中华人民共和国发展和改革委员会. 2012. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报. 网页链接: http://qhs.ndrc.gov.cn/zcfg/201404/t20140415_606980.html.
77. 中华人民共和国发展和改革委员会. 2015a. 国家发展改革委关于印发《2015年循环经济推进计划》的通知. 网页链接: http://www.sdpc.gov.cn/gzdt/201504/t20150420_688560.html.
78. 中华人民共和国发展和改革委员会. 2015b. 国家发展改革委办公厅关于组织开展氢氟碳化物处置相关工作的通知. 网页链接: http://www.sdpc.gov.cn/gzdt/201505/t20150515_692028.html.
79. 中华人民共和国国务院. 2010. "国务院关于印发"十二五"节能减排综合性工作方案的通知." 网页链接: http://www.gov.cn/zwgc/2011-09/07/content_1941731.htm
80. 中华人民共和国国务院. 2011. "中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要." 网页链接: http://www.gov.cn/2011lh/content_1825838.htm
81. 中华人民共和国国务院. 2013. 关于印发大气污染防治行动计划的通知. Accessible at: http://www.gov.cn/zwgc/2013-09/12/content_2486773.htm.
82. 中华人民共和国国务院. 2015a. 强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献. 网页链接: <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbh/wqfbh/2015/20151119/xgbd33811/Document/1455864/1455864.htm>.
83. 中华人民共和国国务院. 2015b. 关于印发2014-2015年节能减排低碳发展行动方案的通知. 网页链接: http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-05/26/content_8824.htm
84. 中华人民共和国国务院. 2016. "中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要." 网页链接: http://news.xinhuanet.com/politics/2016lh/2016-03/17/c_1118366322.htm.
85. 中华人民共和国环境保护部. 2014. 中华人民共和国环境保护法. 网页链接: http://zfs.mep.gov.cn/fl/201404/t20140425_271040.htm.
86. 中华人民共和国环境保护部科技标准司. 2008. 生活垃圾填埋场污染控制标准(GB16889-2008). 中国标准出版社, 北京
87. Zhou, C., G. Liu, S. Wu, and P.K.S. Lam. 2014. "The Environmental Characteristics of Usage of Coal Gangue in Brick-making: A Case Study at Huainan, China." Chemosphere (95), published online. Accessible at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004565351301232?np=y>.

缩略语

°C	摄氏度
1NC	初始国家信息通报
2NC	第二次国家信息通报
AR4	政府间气候变化专门委员会第四次评估报告
BAU	基线情景
C ₂ F ₆	六氟乙烷
CBM	煤层气甲烷
CCER	中国核证自愿减排量
CER	核证减排量
CDM	清洁发展机制
CF ₄	四氟化碳
CFCs	氟氯碳化物
CH ₄	甲烷
CMM	煤矿甲烷
CO ₂	二氧化碳
COF ₂	碳酰氟
EPA	美国国家环境保护局
FYP	五年规划
GHG	温室气体
GWP	全球增温潜势
HCFCs	氢氟氯碳化物
HFCs	氢氟碳化物
HFOs	氢氟烯
INDC	国家自主贡献（《巴黎协定》生效前提交的预案）
IPCC	政府间气候变化专门委员会
MAC	边际减排成本
MEP	中国环境保护部
N ₂ O	氧化亚氮
NDC	国家自主贡献（《巴黎协定》生效后的正式文件）
NDRC	中国国家发展与改革委员会
NF ₃	三氟化氮
ODS	臭氧层耗损物质
PFCs	全氟化碳
PKU	北京大学
SF ₆	六氟化硫
SAR	政府间气候变化专门委员会第二次评估报告
tCO ₂ e	二氧化碳当量吨
UNFCCC	联合国气候变化框架公约
US\$	美元

注释

- 中国预期将发布更新版的国家温室气体清单，包含在《第三次气候变化国家信息通报》以及第一次提交给《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）的两年期报告（BUR），可以部分解决本段提出的问题。
- 《巴黎协定》的中长期目标涉及全部温室气体而不仅仅是CO₂。协定目标是在本世纪下半叶达到人为产生的温室气体排放和清除之间的平衡。协定还提出了温度控制目标，即将气温升高控制在2℃之内，并力争控制在1.5℃以内。为了实现上述目标，科学家们提出全球需要遵循以下情景（WRI 2015a）：
 - 为了实现升温低于2℃，CO₂净排放量需要在2060年至2075年降至0并且所有温室气体排放总量需要在2080年至2090年间降至0。
 - 为了实现升温低于1.5℃，CO₂净排放量需要在2045年至2050年降至0并且所有温室气体排放总量需要在2060年至2080年间降至0。
- 1吨相当于1000千克。
- 《京都议定书》是UNFCCC下的一个国际公约。它对缔约国设置了有国际约束力的减排目标。《京都议定书》于1997年12月11日在日本京都通过，2005年2月16日强制生效（UNFCCC 2015b）。
- 更多信息请参考<http://www.wri.org/indc-definition>。
- 和其他的非附件1缔约方一样，中国预期将通过两年期报告（BUR）报道更新更快的国家温室气体清单，这个报告应于2014年年底提交至UNFCCC（UNFCCC 2012）。根据第17次缔约方大会（COP17）决议2，非附件1国家首次提交的BUR涉及的温室气体清单年份应至少不晚于4年提交，如果信息可用，应尽早提交（UNFCCC 2012）。然而中国首份BUR尚未公布。
- CAIT估算2005年中国非CO₂温室气体排放量为14.10亿吨CO₂当量，同《第二次国家信息通报》差距较小（6%）。
- IPCC数据发布中心（DDC）提出了两套排放情景的数据：“IS92”展示了发表在1992年IPCC评估报告增补报告中的6种替代情景。“SRES”展示了发表在IPCC第三次评估报告中的4种情景。它针对温室气体和气溶胶前体物排放揭示了未来全球环境的变化。尽管这些研究预测了特定温室气体的排放量，但报道的尺度仅限于区域尺度，即中国同其他国家一起作为亚洲整体进行报道。这些排放量预测时限也较旧，目前最新的数据集是2000年开发的。
- 由诸如美国斯坦福大学能源模型论坛（EMF 2009）和美国气候变化科学计划（CCSP 2008）等组织开展的研究将排放量预测延伸至2100年，但这些预测仅限于全球尺度（或仅限于美国或欧洲这样特定的国家或地区）。
- 本报告仅定量中国境内的非CO₂温室气体排放量，中国在海外的投资及进口产生的非CO₂温室气体排放量未计算在内。
- 该假设的近似值计算方法如下：假设排放源“臭氧层耗损物质替代物的生产和使用”由HFC-134a（比例从25%~75%）和HFC-410a（HFC-32和HFC-125按1:1比例混合而成）组成。HFC-134a百年尺度的GWP值在IPCC SAR中为1300，在AR4中为1430，而HFC-32和HFC-125的GWP值在SAR中分别为650和2800，而在AR4中分别为675和3500。根据上述假设，分别按照SAR和AR4的数据计算该排放源的比例为13%和17%。
- 《蒙特利尔议定书》于1987年签署，目标是全球合作应对平流层臭氧损耗。世界上的所有国家都是该协议的缔约方。协议已成功淘汰或正在淘汰几类关键的化合物，包括CFCs、HCFCs和哈龙。CFCs和HCFCs的替代对全球臭氧层保护有利，但是其无意的后果就是造成气候活性气体HFCs当前和预测浓度的快速上升（The White House 2013）。
- 截至2015年6月，已有9个中国企业提交了HFC-23处置方案。
- 煤矸石是煤矿开采的副产品。根据采矿和地质条件，中国煤矸石的产量约为原煤产量的10%~15%（Zhou et al. 2013）。
- 截至2015年年底，肥料利用效率实际提高了2.2%，超过了预期目标。
- 中国生产的煤炭约有四分之三为烟煤，剩下的四分之一是褐煤和无烟煤（Fridley 2012）。假设褐煤和无烟煤各占1/8，则利用清洁生产减少煤炭使用包括3700万吨烟煤、600万吨褐煤和600万吨无烟煤。采用IPCC 2006年温室气体清单指南中的排放因子，温室气体减排量分别为1.14亿吨CO₂、1200吨CH₄和1800吨N₂O。
- 尽管中国的《国家自主贡献》包括章节“控制建筑和交通领域排放”，本报告未包括建筑和交通领域非CO₂温室气体减排，原因是该领域的非CO₂排放量仅占总量的很小份额。例如，2005年中国交通领域非CO₂温室气体排放量仅占总量的0.01%以下（NDRC 2012）。
- 根据表3中的排放量数据。

19. CDM允许发展中国家的减排项目获得核证减排量（CER）信用额，每个相当于1吨CO₂当量。CER可以交易和买卖，并被工业化国家使用以满足其《京都议定书》减排目标。该机制促进了可持续发展和温室气体减排，同时为工业化国家达到减排指标提供了灵活性（UNFCCC 2015c）。
20. 2012年，CER价格一年内下降超过70%（CDM Policy Dialogue 2012），主要原因在于2020年前减排的温指标被批准（Point Carbon 2014）。
21. 该行动计划提出比《国家自主贡献》（2020年前煤层气生产量达到30亿立方米）更为雄伟的目标。
22. 根据表3中的排放量数据。
23. 工业生产过程是中国唯一排放《京都议定书》涵盖的六类温室气体的经济部门。具体信息见表1。
24. 这个目标意味着2025年前HFC-23每年减排4400万吨CO₂当量。该减排潜力的计算基于本报告表3的数据以及作为HCFC-22副产物的HFC-23排放量同HCFC-22产量呈正比的假设。
25. HFC-23百年尺度GWP值为12400（IPCC 2013）。
26. 根据表3中的排放量数据。
27. 截至2015年6月，已有9个中国企业提交了HFC-23处置方案。
28. 根据表3中的排放量数据。
29. HFC-23分解过程中HFC-23和补充燃料（如煤炭、天然气和柴油）被送入焚烧炉，并被足够的空气氧化。在焚烧炉中，有机物彻底分解，HFC-23转化为CO₂、氟化氢（HF）和其他气体，这些反应产物既不是温室气体也非臭氧层耗损物质（内容来自已注册的CDM项目“山东东岳HFC-23分解项目”，见https://cdm.unfccc.int/filestorage/7/T/Z/7TZGJPKFU27EIL1UGEF1U3KH-H16LJS/DongyueHFC23PDD.pdf?t=bVN8bzJha216fDAu2ZXN8kON52jz-j_s_bQ--W）。
30. HFC-134a的替代产物HFO-1234yf的专利主要掌握在美国和欧盟公司，如霍尼韦尔和杜邦(Trager 2014)。
31. 根据表3中的排放量数据。
32. 催化分解过程温度达500℃，N₂O经过催化剂（如CuAl₂O₄）并转化为N₂和O₂，分解率通常达到99%甚至更高（Smith 2010）。
33. 在铝冶炼过程，来自阳极的碳和来自冰晶石助融剂的氟结合产生2种PFCs，四氟化碳（CF₄）和六氟乙烷（C₂F₆）。
34. 根据表3中的排放量数据。
35. 根据汇率1美元=6.53元，（2016年1月，见<http://www.xe.com/currencycharts/?from=USD&to=CNY&view=1Y>）
36. 根据表3中的排放量数据。
37. 缓释肥是一种营养物质逐渐释放到土壤中的肥料，肥料的释放速度基于肥料化合物的溶解度。
38. 根据表3中的排放量数据。
39. 根据表3中的排放量数据。
40. 根据表3中的排放量数据。
41. 世界上大多数水稻都在淹水条件下生长，而减少水稻CH₄排放的最有前途的技术之一就是减少或中断淹水期。在淹水稻田中，由于水分阻碍了氧气扩散到土壤，形成了适宜产甲烷菌生存的无氧环境，因此会产生大量CH₄。较短的淹水时间间隔和更频繁的干湿交替降低了甲烷菌的产量，从而降低了CH₄的排放（Adhya et al. 2014）。
42. 根据表3中的排放量数据。
43. “千家企业节能行动”关注中国能耗最大的一千多家企业，该行动成功超越其“十一五”期间节能1亿吨标准煤的目标，实现上报节能超过1.5亿吨标准煤。“千家企业节能行动”在“十二五”期间扩大为“万家企业节能低碳行动”。“万家企业节能低碳行动”的目标是覆盖中国能源消耗的2/3，也就是15000家工业企业（每家每年消费超过1万吨标准煤）、约160家最大的交通运输企业（例如大型航运公司）以及年煤炭消费量超过5000吨的公共建筑。“万家企业节能低碳行动”的目标是到2015年绝对节能达2.5亿吨标准煤（IEPD 2016）。
44. 根据表3中的排放量数据。
45. 中国预期将发布更新一版的国家温室气体清单，包含在《第三次气候变化国家信息通报》以及第一次提交给UNFCCC的BUR，可以部分解决本段提出的问题。
46. 这些机构包括世界资源研究所（通过CAIT，气候数据分析指标工具），国际能源署（IEA）和美国能源信息管理局（EIA）等。

47. 《巴黎协定》的核心要素之一就是它的力度机制，它将定期和及时加强各国的气候行动。在这种力度机制下，各国将每隔5年提交一份更新的《国家自主贡献》文件，包括每个成功贡献的预期进展和尽可能大的力度（WRI 2015b）。
48. 在美国颁布一部环境法规的步骤如下：第一步，美国国家环境保护局提出一项法规的提议，即规章制定通知（Notice of Proposed Rulemaking），该提案被列入联邦登记册，以便市民可以考虑并提供意见；第二步，当提案开始讨论时，美国国家环境保护局根据收到的评论对提案进行修改调整，然后颁布最终版本；第三步，一旦法规制定完毕，在纳入《美国联邦法规汇编》（CFR）时将其法典化。CFR是由联邦政府颁布的所有法规的正式记录（EPA 2016）。
49. 2012年，CER价格一年内下降超过70%（CDM Policy Dialogue 2012），主要原因在于2020年前减排的温和指标被批准（Point Carbon 2014）。
50. 过去，中国注册CDM的HFCs项目被批评没有提供足够的“额外性”证明。“额外性”这个概念是指特定的减排项目在缺乏清洁发展机制下的核证减排量销售收入下不可能发生。这也是将HFCs减排项目纳入中国碳核证减排量计划以及国家碳交易市场的重要性体现。

致谢

在此感谢各位专家和同事的评论、反馈和贡献，包括Nate Aden、Pankaj Bhatia、崔永丽、冯相昭、Max Frankel、Taryn Fransen、Wee Kean Fong, Mengpin Ge、Rhys Gerholdt、Geoffrey Henderson、Katie Lebling、Brian Lipinski、Jonathan Moch、Catherine Witherspoon和张霖。本报告仅代表作者的观点。

同样感谢Hyacinth Billings、Courtney Durham、Emily Matthews、Jenna Park和Carni Klirs对项目管理、编辑和设计的支持。

最后，感谢ClimateWorks Foundation提供资助。

关于作者

姚波是中国气象科学研究院副研究员。

Katherine Ross是世界资源研究所全球气候项目研究分析员，
请联系：krass@wri.org

朱晶晶是世界资源研究所中国气候项目研究分析员。

Kristin Igusky是世界资源研究所全球气候项目助理。

宋然平是世界资源研究所全球气候项目发展中国家气候行动
经理。

Thomas Damassa是世界资源研究所全球气候项目高级助理。

关于世界资源研究所

WRI关注环境与社会经济发展的相互关系。我们不只是研究，而且把想法转化为行动，与全世界的政府、企业和民间组织合作，制定改革性的解决方案，保护地球，改善人民生活。

对于紧急的可持续性挑战的解决方案

WRI采用改革性的思路，保护地球，促进发展，推进社会平等，因为只有实现可持续性，才能满足人类当今的需要，达成人类未来的理想。

实用的变革战略

WRI采用实用的变革战略和有效的变革工具，促进变革进程。我们衡量成功与否的方式是，是否制定了新政策，采用了新产品，采取了新措施，改变了政府的工作方式、企业的运营方式和人们的行为方式。

全球行动

我们的活动遍及全球，因为当今的问题没有边界。我们渴望交流，因为世界各地的人们均需要思想的激发，知识的启迪，通过相互了解，积极做出改变。我们通过准确的、公平的、独立的工作，为地球可持续发展提供了创新性的路径。

关于OPEN CLIMATE NETWORK

Open Climate Network (OCN)为独立研究机构和各利益相关方提供交流、合作平台，共同促进主要国家在应对气候变化领域的实质性进展。我们通过提供持续、可靠的信息和研究，加强气候变化行动的国际和国内问责，推动全球迈向低排放、适应气候变化的未来。www.openclimatenetwork.org