



# 中国减缓气候变化的机遇： 非二氧化碳类温室气体

OPPORTUNITIES TO ADVANCE MITIGATION AMBITION IN CHINA:  
NON-CO<sub>2</sub> GREENHOUSE GAS EMISSIONS

宋然平 著

## 执行摘要

- 非二氧化碳类温室气体（以下简称“非二温室气体”）是气候变化的重要推手，并且对空气质量、人类健康和粮食生产也产生重大负面影响。根据官方最近一次（2014年）发布的数据，中国的非二温室气体排放量超过了日本或者巴西的温室气体总排放量。
- 2015年起中国推出了有关政策，使得非二温室气体的排放水平显著低于根据之前政策估算的排放水平。根据现有政策，本文测算中国的非二温室气体排放将会温和增长至2030年，在2030年至2040年间保持稳定，之后将开始比较显著地降低。
- 在现有政策的基础上，中国有巨大的潜力可以进一步减少排放。通过采取额外措施，中国在2020年至2030年间累计可以进一步减排非二温室气体达15亿至30亿吨二氧化碳当量。全国非二温室气体排放量能提前至2020年达到稳定，且排放量水平要低于在现有政策趋势下测算的排放量。
- 关键减排领域包括减少氢氟烃排放、煤矿的甲烷排放，以及减少硝酸和己二酸生产中产生的一氧化二氮排放。
- 中国在其国家自主贡献（NDC）中提出的主要量化目标并不包含非二温室气体。中国应当制定有力度且明确的非二温室气体减排目标，并且相应地开展有关减排行动，以此在2020年提升其国家自主贡献的减排力度。

## 目录

执行摘要 .....	1
缩写词 .....	6
引言 .....	7
研究方法 .....	7
主要发现 .....	10
对比分析 .....	18
讨论 .....	22
建议 .....	24
附录A. 各种情景下预测中国非二温室气体排放的方法论 和关键假设 .....	25
附录B. 中国非二温室气体排放预测的电子表格 .....	34
参考文献 .....	35
致谢 .....	39
关于作者 .....	39
关于世界资源研究所 .....	40

“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：**宋然平 著. 中国减缓气候变化的机遇：非二氧化碳类温室气体. 2019. 工作报告，华盛顿哥伦比亚特区：世界资源研究所. [www.wri.org/publication/opportunities-advance-mitigation-ambition](http://www.wri.org/publication/opportunities-advance-mitigation-ambition).

## 背景

中国正在按计划兑现其应对气候变化的国际承诺。截至2017年，中国已经完成了其2009年提出的2020年碳强度减排目标，提前三年兑现了该承诺。同时，关于中国2015年提出的国家自主贡献目标，目前完成进度良好。

然而，全世界若要实现《巴黎协定》的目标，中国和其他国家还必须超越现有目标，加快采取行动。即便各国的国家自主贡献目标全部达成，全球趋势仍将经历3.2°C的温升，这远远超出了《巴黎协定》规定的将温升控制在1.5至2°C之间的目标。作为主要排放国家之一，中国展现气候领导力是尤其重要的。

联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）的一份特别报告指出，在减少二氧化碳排放之外，如果不立即采取行动减少诸如甲烷（CH<sub>4</sub>）、一氧化二氮（N<sub>2</sub>O）和氢氟烃（HFCs）等具有高增温性的非二氧化碳类气候污染物的排放，那么全球温升将不可能被控制在1.5至2°C之间。立即采取快速行动，减少这些非二氧化碳类排放，从而避免触发那些危险的气候临界点是尤其重要的。

非二氧化碳类对空气污染、人类健康和粮食生产也会产生重大负面影响。甲烷是对流层（地面和上至15千米间）臭氧的最大前致物，每年在全球造成的作物减产产量达7900万至1.21亿吨，并与大约100万例过早死亡相关。一氧化二氮则会破坏平流层的臭氧层，由此来自太阳的有害紫外线将会威胁到人类和生态系统。

减少非二氧化碳类排放是中国在提出和更新其国家自主贡献时的一个重要机遇。根据中国政府最近一次发布的数据，中国2014年的非二氧化碳类排放量占全国温室气体排放总量的16%，超过日本或者巴西的温室气体排放总量，并且本文还预计该排放将继续增长。中国2015年提出的国家自主贡献的主要量化目标并未纳入非二氧化碳类。然而，中国已经采取了具体措施减少这类排放。多项研究表明，有诸多有效措施可以进一步减少排放量，这使得非二氧化碳类成为中国增强其减排力度的重要机遇。

### 表框 1 | 关于本工作论文

- 本工作论文是世界资源研究所（WRI）一项研究中两部分的第一部分，该研究会分析中国是否以及如何能够在2020年前提升其减排力度。
- 本文主要讨论非二氧化碳类排放，包括了有关的未来趋势、减排潜力和政策建议。这项研究的第二部分将会对中国更新其国家自主贡献提出更为全面的建议，包括与二氧化碳排放相关的有关目标。

## 研究方法和情景描述

本文识别出非二氧化碳类的30个主要排放源，综合分析了多项研究，以测算中国在各种情景下未来的非二氧化碳类排放。本文研究了有关的政府文件、知名机构的有关研究论文，以及经同行审阅的文献和行业研究报告，并咨询了有关专家的意见，从而制定了排放趋势的三个情景。

本文使用电子表格预测三个情景下到2050年的非二氧化碳类排放量。附录A更详细地阐述了有关的方法论和假设，而附录B则给出含有数据的全部电子表格信息。

参考情景（RS）中有关的政策和趋势均延续2015年的情形。在该情景中，中国会实施其2015年年底前宣布的政策并实现相应的承诺目标，包括当前国家自主贡献中的有关目标和政策。然而，中国不会推出更多额外政策减排非二氧化碳类。通过与该情景进行对照，可以评估中国自2015年以来就非二氧化碳类控制所取得的进展。

现有政策情景（CPS）中有关的政策和趋势均延续2018年的情形。在该情景中，中国会实施2018年年底之前所提出的政策和目标，包括根据《蒙特利尔议定书》下的《基加利修正案》中的氢氟烃（HFCs）削减目标、中国气候变化第一次两年更新报告中提到的一氧化二氮排放零增长目标，以及中国相关“十三五”规划中提出的关于煤矿甲烷利用、农村沼气发展和城市固体废物（MSW）处理的目标。通过和该情景进行对照，可以评估相对于2018年各项政策，未来政策是否以及在多大程度上将会进一步减少排放。

强化政策情景（SPS）中包括未来非二氧化碳类排放路径的范围，代表着超越现有政策情景、提升减排力度的各种可行选择。强化政策情景聚焦7个最大的排放来源，其排放总量占到中国在现有政策情景下2030年非二氧化碳类排放总量的76%。该情景中各排放高限下纳入所有减排措施的成本都较低，低于每吨二氧化碳当量14美元。这一水平是317个追踪中国碳市场发展的利益相关方预计的2025年中国碳市场的平均价格。而该情景中各排放低限趋势下则纳入了力度更大但仍然可行的一些假设，其中包括更高比例地应用低成本减排措施，以及额外应用一些成本更高的减排措施。我们根据有关的文献、其他各国的实践，并咨询有关专家的意见，作出了各种措施的应用比例及其减排潜力的有关假设。

## 主要发现

在参考情景中，中国的非二氧化碳类排放将会显著增加。2012年至2030年间，排放量会增加约44%，并且2030年至2050年还将继续增长15%。大多数排放产生于工业过程：随着氢氯氟烃（HCFCs）消费和生产的淘汰，氢氟烃（HFCs）的使用会增加；而硝酸和己二酸生产中产生的排放也是非二氧化碳类排放增加的一大重要因素。

中国自2015年以来的新政策已经从根本上改变了非二温室气体的排放趋势。在现有政策情景中，2020年至2030年间排放将温和增长，并在2030年至2040年间保持平稳，而2040年后会出现明显的降低。

额外措施可以进一步减少非二温室气体排放，使得排放显著低于当前政策下预期的排放水平。图ES-1显示，采取额外行动可

使得中国的非二温室气体排放提早十年（即2020年）达到稳定，并且排放量也比当前政策下的排放量要低，有可能在2030年就可以回归到2012年的排放水平。

强化行动可以显著地降低累计排放量。图ES-2显示，相对于参考情景，现有政策情景到2030年将会累计减排35亿吨二氧化碳当量，到2050年将累计减排178亿吨二氧化碳当量；相比之下，

图 ES-1 | 各种情景下预测的不同年份的非二温室气体排放量（百万吨二氧化碳当量）

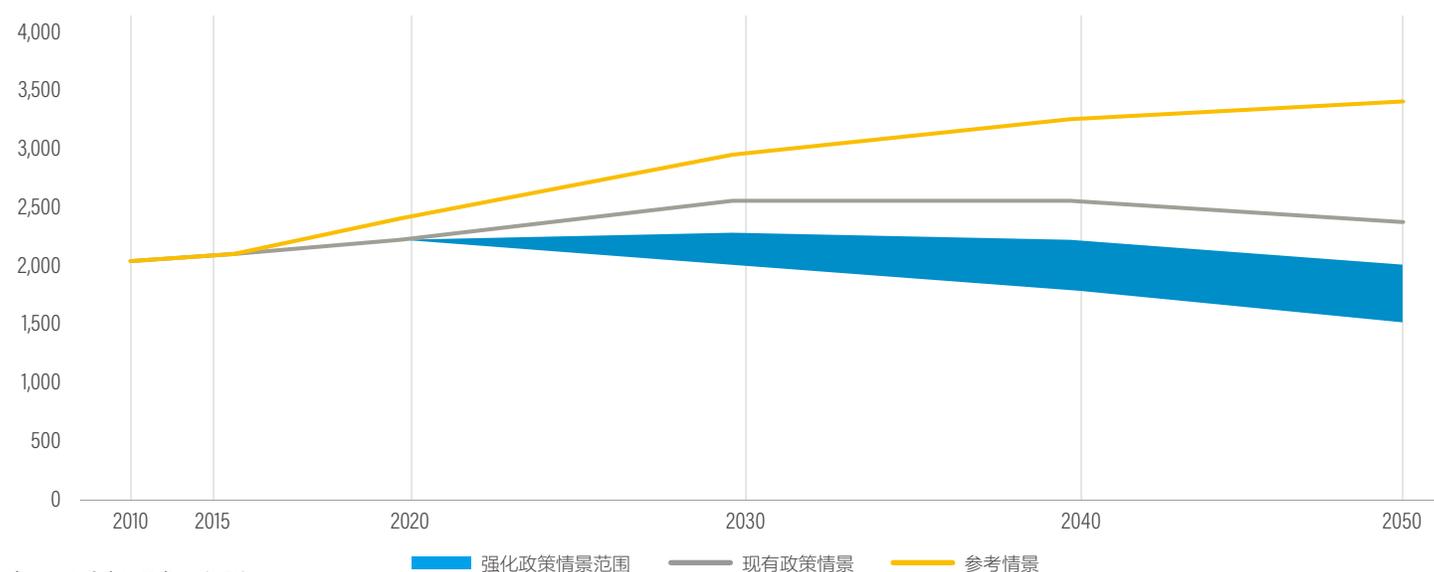
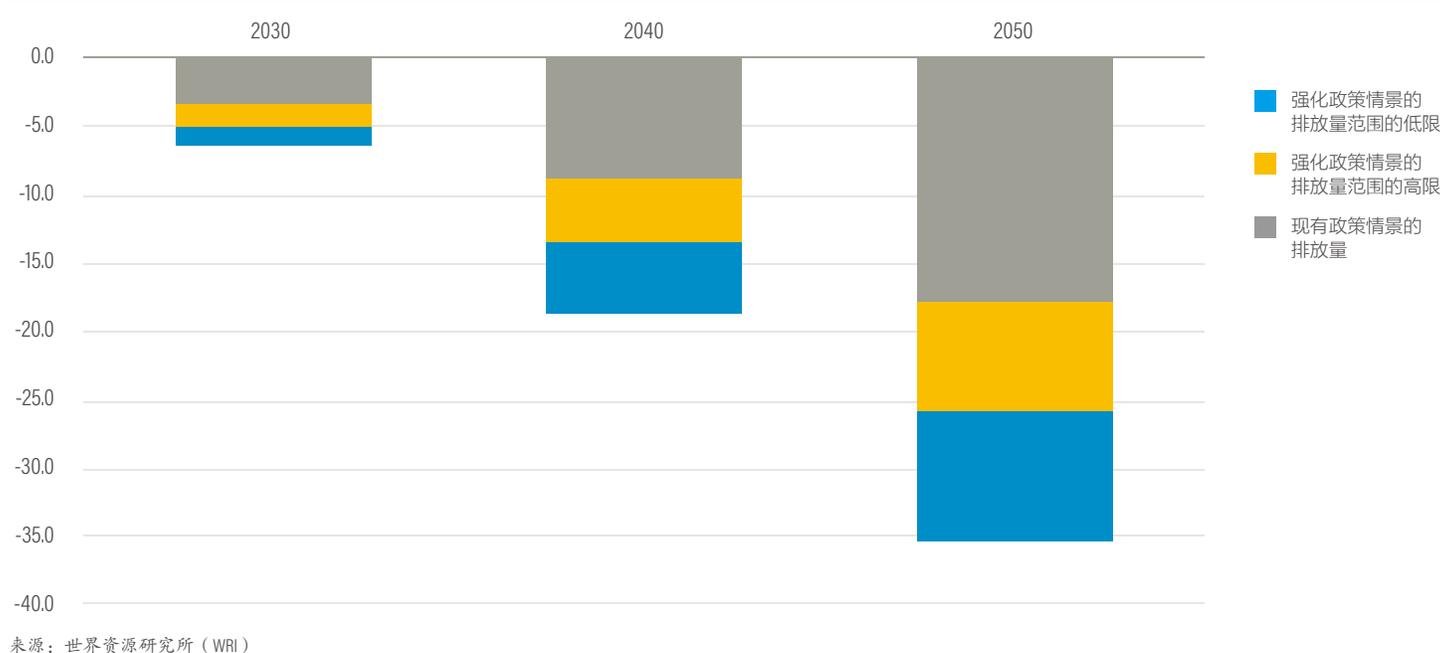


图 ES-2 | 自2015年起相对于参考情景的累计减排量（十亿吨二氧化碳当量）



强化行动到2030年将会进一步累计减排15亿至30亿吨二氧化碳当量，到2050年将进一步累计减排79亿至175亿吨二氧化碳当量。

**中国在2030年前可以以较低成本实现每年减排约2.8亿吨二氧化碳当量的非二温室气体。**如果采取更有力度且仍然有可行性的措施，减排效果将会接近于倍增。中国最大的七个排放源可以实现减排，这些排放源的排放量占2030年中国非二温室气体排放量的76%以上。图ES-3呈现出每个排放源减排潜力的范围。

## 讨论

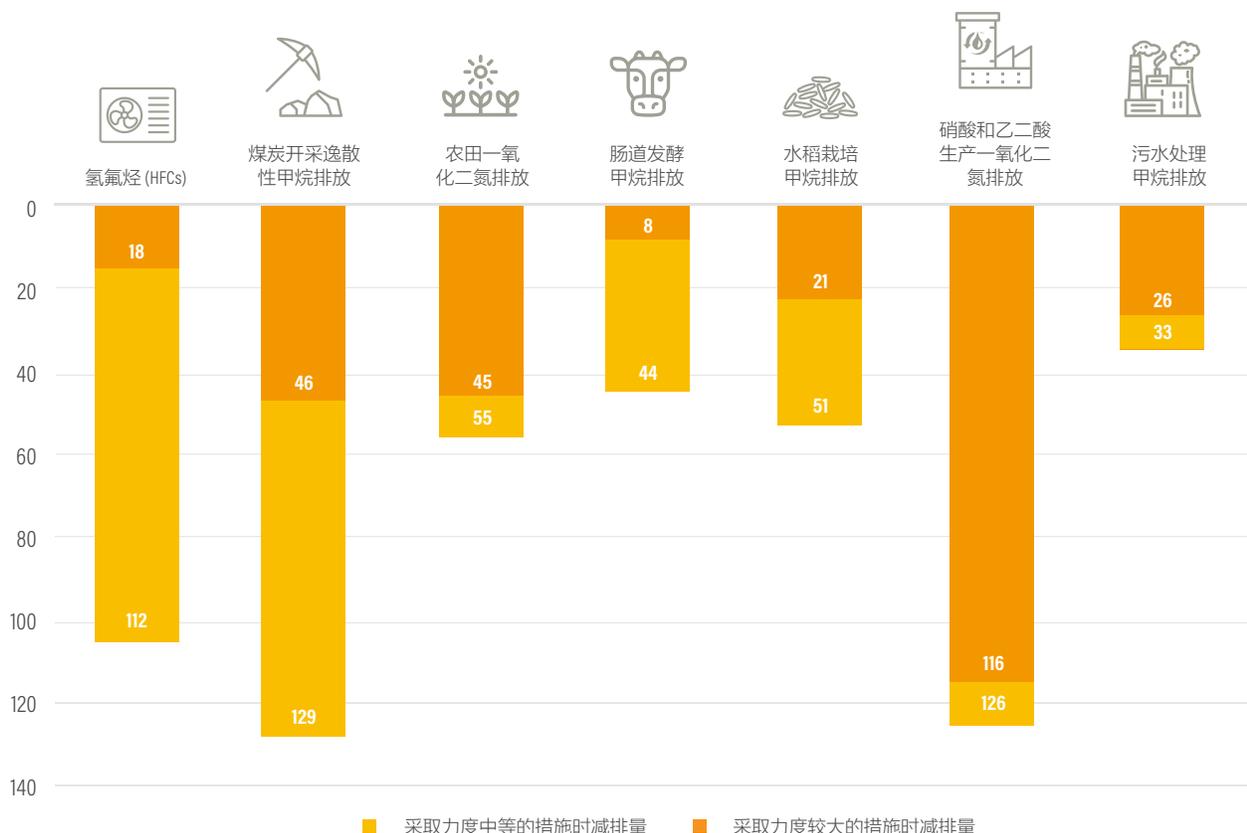
**减排非二温室气体具有重大的社会和经济效益。**减少甲烷和一氧化二氮的排放，可以减少近地面臭氧的生成并且防止破坏平流层臭氧层，由此改善空气质量、减少过早死亡和其他疾病、增

加粮食产量、保护生态系统，并提升工人的安全水平。较早采取行动减少氢氟烃排放，能够降低兑现《基加利修正案》有关义务的成本。

**多项减排措施已经存在。**表ES-1总结整理了主要排放源的减排措施。

可以采用排放交易体系（ETS）来推进非二温室气体的减排。考虑到非二温室气体具有很高的全球增温潜能，如果中国在即将推出的全国碳排放交易体系中纳入这些气体，那么企业就有动力去减少其相关排放。硝酸和己二酸生产中产生的一氧化二氮排放，以及铝、集成电路、平板显示器、光伏板生产所产生的含氟气体，由于其排放源较为集中，并且其测量、汇报及核证也相对容易，因此也尤其适用于采用排放交易体系来管控其排放量。

图 ES-3 | 强化政策情景下2030年各排放源的减排潜力范围（百万吨二氧化碳当量）



来源：世界资源研究所（WRI）

表 ES-1 | 主要排放源的减排措施

排放源	减排措施
氢氟烃 (HFCs)	在 2024 年至 2029 年间，将氢氟烃产量控制在《基加利修正案》所允许基准水平的 90%，并逐年以线性方式削减氢氟烃的生产，以达成《基加利修正案》的目标。进一步措施还包括到 2030 年时，分别以四氟丙烯 (HFO-1234yf) 和丙烷 (propane) 替代 50% 的 HFC-134a 和 HFC-410a，并且逐渐提高替代率
煤炭开采逸散甲烷排放	要求对浓度超过 9% 的煤矿瓦斯进行利用或燃烧排空。进一步措施包括到 2030 年将煤炭消费量减少至低于 20 亿吨标准煤
硝酸和己二酸生产一氧化二氮排放	要求所有的己二酸生产设施、所有主要的和新建的硝酸生产设施进行一氧化二氮的减排。进一步措施包括将这一要求推广至更小型的硝酸生产设施
农田一氧化二氮排放	推广肥料管理的最佳措施，减少对水稻、小麦、玉米和各类经济作物等施用氮肥。进一步措施包括制定 2020 年至 2050 年间线性减少氮肥施用的目标，使得各类氮肥的施用量能够减少到 2015 年水平的 50%。
肠道发酵甲烷排放	推广家畜繁育措施，在禽畜饲料中加入益生菌和茶皂苷。进一步措施包括改进饲料的可消化性和营养平衡，以提升肉类和奶类的产量
水稻栽培甲烷排放	加快改善灌溉管理和肥料的施用。进一步措施包括试点利用和促进使用硝化抑制剂、缓释肥料和生物炭。
污水处理甲烷排放	要求所有新建的和已有的主要厌氧污水处理厂（含市政污水和工业废水）安装甲烷回收系统。进一步措施包括要求推广至更小的污水处理设施
禽畜粪便产生甲烷排放	在“十四五”规划期间及之后对农村沼气和禽畜农场制定并达成有力度的沼气发展目标
固体废物产生甲烷排放	在“十四五”规划期间及之后制定并达成有力度的固体废物回收目标
电力设备六氟化硫排放	促进六氟化硫的回收、替代、泄露检测和整修。进一步措施包括减少电力需求

来源：世界资源研究所 (WRI)

## 建议

**采取行动控制非二温室气体排放能够展现中国的气候领导力，有利于达成《巴黎协定》的目标。**本文表明中国能够在 2020 年至 2030 年间额外累计减少 15 亿至 30 亿吨二氧化碳当量的非二温室气体排放。由于减排的发展和气候效益，中国应当在现行政策的基础上采取更多行动。

基于上述发现，本文就中国在 2020 年前在其国家自主贡献中提升减排的力度提出了四种方案。这四种方案并不互相排斥，决策者可同时选择多个方案。

**方案 1：制定一个覆盖全领域的、有力度的、包括二氧化碳和非二温室气体在内的温室气体减排目标。**首先，有力度的目标应当考虑进一步减排二氧化碳的潜力。此外，中国可以承诺 2020 年起非二温室气体排放达到稳定，并承诺努力促成相关排放在十年内尽早开始降低。

**方案 2：制定一个覆盖全领域的、有力度的非二温室气体减排**

**目标。**有力度的非二温室气体减排目标可以包括承诺非二温室气体自 2020 年起排放达到稳定，并承诺努力促成相关排放在十年内尽早开始降低。

**方案 3：对各类温室气体分别制定有力度的减排目标。**有力度的减排目标应该囊括大部分的非二温室气体，包括 2030 年甲烷排放相对 2014 年排放量减少 7% 至 21%，2030 年一氧化二氮排放相对 2014 年排放量减少 7% 至 11%，以及承诺采取早期行动使得氢氟烃的累计排放低于《基加利修正案》要求的排放限额。

**方案 4：承诺对各个排放源实施有力度的行动。**作为第一步，决策者应当实施表 ES-1 中列出的所有措施，并达成相关目标。

在 2020 年之后，中国的政策制定者应当及早评估进展并识别有关机遇，在 2025 年前进一步提升中国非二温室气体的减排力度。技术发展、早期实施，以及新的社会经济趋势都可能会在短短数年内解锁更多的减排潜力。因此，中国在近期可能会取得比预期更大的进展。中国应本着 2025 年前提升减缓力度的初衷，对这些变化进行评估。

## 缩写词

AC	空调器	LBNL	劳伦斯伯克利国家实验室
AR4	联合国政府间气候变化专门委员会第四次评估报告	MSW	市政固体废物
BUR	气候变化第一次两年更新报告	NDC	国家自主贡献
CDM	清洁发展机制	NPS	新政策情景
COD	化学需氧量	ODS	消耗臭氧层物质
CPS	现有政策情景	PA-Continued	延续《巴黎协定》的情景
EDGAR	全球大气研究排放数据库	PA-Increased	强化《巴黎协定》的情景
EPA	美国国家环境保护局	PFC	全氟化碳
ETS	排放交易体系	PV	光伏
FYP	五年规划	RCP	典型浓度路径
GCAM	全球综合评估模型	RS	参考情景
GHG	温室气体	SAR	第二次评估报告
GWP	全球增温潜能	SPS	强化政策情景
HCFC	氢氯氟烃	TPED	一次能源总需求
HFC	氢氟烃	UNFCCC	联合国气候变化框架公约
IC	集成电路	WEO	世界能源展望
IPCC	联合国政府间气候变化专门委员会	WRI	世界资源研究所

## 引言

在减缓气候变化领域，中国在达成和超越其国际承诺方面保持着良好的记录。截至2017年，中国的碳排放强度已经相对2005年水平降低了46%，超越了中国在2009年提出的到2020年减排40%至45%的目标（Reuters 2018）。同时，中国正按计划兑现其2015年在国家自主贡献中提出的气候目标（UN Environment 2019），包括到2030年碳排放达到最大值，同时碳排放强度相对于2005年降低60%至65%，非化石能源在一次能源消费中的比例增加到20%，以及增加约45亿立方米的森林蓄积量（国家发展和改革委员会 2015）。

然而，即使各国国家自主贡献得以完全实施，仍将使得2100年全球平均气温相对于工业化前水平升高约3.2°C（UN Environment 2019），这显著地超出了《巴黎协定》的目标，也即将本世纪的全球温升控制在1.5至2°C。实现《巴黎协定》目标的契机正在逐渐丧失（Rockstrom et al. 2017）。既然各国已经同意到2020年前发布或更新其国家自主贡献的目标（UNFCCC 2016），那么各国应以此为契机提升其行动力度。

虽然中国的人均温室气体排放尤其是人均历史累积的排放还较小，但中国已经是当前最大的排放国，且1850年至2016年间累积的温室气体排放也在所有国家中排第二位（WRI 2018）。

考虑到中国在提升力度上具有特殊作用，世界资源研究所（WRI）开展了一项研究，评估中国进一步推进气候行动的各种机遇。本文是这项研究中的第一部分，旨在识别中国非二氧化碳类温室气体的减排潜力，并对中国应当如何提升其减排力度提出建议。这项研究的第二部分将会另行发布，将会综合其他各领域的减排机遇，从而为中国新提出的或者更新的国家自主贡献制定更为全面的建议，这其中就包括与二氧化碳排放相关的目标。

## 中国的非二氧化碳类温室气体排放

非二氧化碳类温室气体指的是除了二氧化碳之外、纳入《京都议定书》的六种温室气体，包括甲烷（CH<sub>4</sub>）、氧化二氮（N<sub>2</sub>O）、氢氟烃（Hydrofluorocarbons - HFCs）、全氟化碳（Perfluorocarbons - PFCs）、六氟化硫（Sulfur Hexafluoride - SF<sub>6</sub>）及三氟化氮（Nitrogen Trifluoride - NF<sub>3</sub>）。后面四类非二氧化碳类温室气体也被称作含氟类气体（F-gases）。

虽然二氧化碳占据了人为温室气体排放的大部分，但是非二氧化碳类温室气体也显著地引发了气候变化。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）指出，若要将全球温升控制在1.5至2°C，各国应当立即采取行动减少各种高增温性的非二氧化碳类温室气体排放，包括甲烷、氧化二氮和氢氟烃。立即采取快速行动减排这些非二氧化碳类温室气体尤其重要，由此才更有可能避免触发那些危险的气候临界点（IPCC 2018）。

甲烷和氧化二氮是两种主要的非二氧化碳类温室气体，并且对于人类健康和粮食生产也存在重大负面影响。甲烷是对流层（地面和上至15千米间）臭氧的最大前致物（UN Environment and WMO 2011），每年在全球造成的作物减产达7900万至1.21亿吨，并与大约100万例过早死亡相关（CCAC n.d.）。在平流层，臭氧保护着人类和生物免受来自太阳的有害紫外线的伤害，氧化二氮则会破坏该臭氧层。联合国环境规划署（UN Environment 2013）认为，氧化二氮自2010年起就超过了氯氟烃，成为当前最重要的消耗臭氧层物质。

中国政府最近一次发布非二氧化碳类温室气体排放数据是在2014年，其排放量已等同于20亿吨二氧化碳，或者说占到全国排除森林和土地利用变化的温室气体排放总量的16%（中国政府 2018）。这些排放超过了日本或者巴西同年的温室气体排放总量（WRI 2018）。

当前，中国已经制定政策政策，开始对非二氧化碳类温室气体进行减排。尽管中国提出的国家自主贡献中的主要量化目标并不包括非二氧化碳类温室气体，但也提及减少这些气体排放的有关政策和措施。此外，中国已经试行了一系列的非二氧化碳类温室气体减排技术。应用这些技术将会进一步显著地减少中国的非二氧化碳类温室气体排放（Lin et al. 2018；Yao et al. 2016）。本文对多个情景进行了研究，分析政策和技术将会如何影响中国的非二氧化碳类温室气体排放。首先，就各种情景下如何测算排放量，本文解释了所采用的研究方法；然后，本文分析了测算结果并对政策制定者提出了有针对性的建议。

## 研究方法

本文采用了与Yao et al.（2016）所采用方法相似的分类体系，使用一个电子表格测算排放量。该电子表格首先识别了30项非二氧化碳类温室气体的排放源，范围涵盖从煤矿开采的甲烷排放到废弃物焚烧排放氧化二氮等领域。接着，本文采用可获得的最新数据，即中国首份气候变化双年度报告（BUR）中的数据，建立起中国2012年的历史排放情况（中国政府 2016）。<sup>1</sup>同时，还根据Feng et al.（2016）和美国国家环境保护局（EPA 2013）进行的估算对2012年的有关排放情况进行了补充。

随后，根据政府部门的有关政策文件、知名机构的有关研究论文、经同行审阅的文献、行业研究报告，以及有关专家的意见等作出各种假设，利用电子表格对未来活动数据和排放因子的变化进行了预测。本研究考虑到中国的政策制定者往往根据政府发布的数据进行决策的习惯，采用了官方数据并尽可能根据官方数据对预测结果进行校准。然而，从其他来源收集到的数据也用做弥补有关空白。附录A详细阐述了方法论和各项关键假设，而附录B则提供了电子表格和所用的数据。

除了五氟丙烷 (HFC-245fa) 之外, 根据联合国政府间气候变化专门委员会第二次评估报告 (SAR) (IPCC 1996) 给出的百年时间尺度下的全球增温潜能 (GWP), 所有的非二温室气体都转换成了二氧化碳当量。而五氟丙烷的全球增温潜能则采用了联合国政府间气候变化专门委员会第四次评估报告 (AR4) 的百年时间尺度数值 (IPCC 2007)<sup>2</sup>。

对于2050年中国非二温室气体的可能排放趋势, 本文建立了三个情景:

- 参考情景 (RS), 代表着延续2015年的有关政策和排放趋势。
- 现有政策情景 (CPS), 代表着延续2018年的当前政策和排放趋势。
- 强化政策情景 (SPS) 中排放趋势的高限和低限, 代表着非二温室气体各种可行减排路径的范围。

## 参考情景

参考情景是基于中国仅仅实施其2015年年底宣布的有关政策, 包括全面实施其国家自主贡献, 但是并不进一步推出政策影响其非二温室气体的排放。参考情景并不符合现实情况, 因为自2015年来, 中国已经宣布并实施了一些新的政策。然而, 可以把参考情景作为一个基准, 从而相对于中国的首份国家自主贡献, 比较中国是否提升了非二温室气体的减排力度以及提升了多少。

参考情景包括了以下几项关键假设:

- 根据国家自主贡献所承诺的行动, 2020年前与化肥有关的排放实现零增长。
- 除了煤矿甲烷的回收之外, 根据国家自主贡献目标和2015年年底时现行的其他有关政策预测能源消费量和生产量, 比如《大气污染防治行动计划》(中华人民共和国国务院 2013)。
- 根据1997年修订的《蒙特利尔议定书》的规定, 二氟一氯甲烷 (HCFC-22) 作为一种消耗臭氧层物质 (ODS) 将会被淘汰, 而用作工业原料的二氟一氯甲烷及其相应的三氟甲烷 (HFC-23) 排放会继续增加。其他类氢氟烃的生产和使用则没有其他法规进行限制。
- 硝酸和己二酸生产中产生的一氧化二氮排放没有法规进行限制。
- 农村沼气的生产率、煤矿甲烷的利用率, 以及市政固体废物 (MSW) 的处理率保持在2015年水平, 这是因为当前与这些问题有关的政策都是在2016年年末或2017年年初发布的。

## 现有政策情景

现有政策情景回应了中国在排放领域内直至2018年年底的现行政策。如果小概率情况下中国没有采取进一步的行动, 那么本文中的现有政策情景就能够对中国的未来排放趋势做出最好预测。现有政策情景也可作为一种基准, 用以评估未来政策是否以及在多大程度上进一步减少了排放。

现有政策情景包括了以下几项关键假设:

- 中国在2020年前将会核准《蒙特利尔议定书》中的《基加利修正案》, 三氟甲烷 (HFC-23) 排在2020年前会接近于零<sup>3</sup>, 其他类氢氟烃物质排放也会有所削减。尽管中国尚未核准该修正案, 然而中国在谈判过程中对其表达了支持, 并且中国也承诺会加快核准进程 (赵静 2017)。因此, 本文认为《基加利修正案》是当前政策的一部分。
- 根据气候变化第一次两年更新报告, 工业过程产生的一氧化二氮排在2020年前会实现零增长 (中国政府 2016)。
- 正如中国在2016年年底和2017年所发布的有关“十三五”规划所明确的, 中国会实现其关于煤矿甲烷利用、农村沼气开发和市政固体废物处理率的政策目标 (国家能源局 2017; 国家发展和改革委员会和原农业部 2017; 住房和城乡建设部 2016)。
- 尽管中国气候变化第一次两年更新报告也承诺能源部门甲烷排放到2020年前实现零增长 (中国政府 2016), 参考情景中预测该排放源已经达到峰值。因此, 该政策不会对现有政策情景中的预测产生影响。
- 尽管中国宣布了建立全国排放交易体系的计划, 包括覆盖范围和总配额上限等相关细节尚且不得而知, 因此无法预测该政策的减排潜力。由此, 本研究不把排放交易体系视作当前政策的一部分。

## 强化政策情景

对于超越现有政策情景的各项可行减排方案, 强化政策情景试着预测其对于中国提升非二温室气体减排力度的影响。根据所采用的减排措施的强度, 本文识别出排放趋势范围的高限和低限。强化政策情景的排放高限所代表的是对减排潜力的保守预测, 而排放低限则是基于一系列更有力度但仍然可行的假设。

强化政策情景包括了以下几项关键假设:

- 为简化起见, 在强化政策情景中, 仅对七大排放源实施减排措施, 这些排放源的排放占到2030年中国非二温室气体排放的约76%。

■ 在强化政策情景排放趋势的高限下，仅考虑那些经过验证、马上可得且成本低于每吨二氧化碳当量14美元的减排措施。在强化政策情景排放趋势的低限下，一部分排放源的减排成本超过了每吨二氧化碳当量14美元。每吨二氧化碳当量14美元（折合98元）被视为是成本较低的基准碳价；根据被问卷调查的317个追踪中国碳市场发展的利益相关方，这一水平预计也是2025年中国的平均碳价（Slater et al. 2018）。

■ 除了成本之外，排放趋势的高限和低限还考虑到在特定领域应用和规模化有关措施是否现实，并且也对减排措施的选择以及/或者其应用比例作出了不同的假设，这得益于有关的文献、他国的实际应用，以及专家咨询情况。

表1总结整理了对七个最大的排放源所产生排放的高限和低限进行的有关假设，附录A更详细地阐述了相关假设及其合理性。

表 1 | 强化政策情景各项假设的总览

排放源	现有政策情景下 2030 年的排放占比 (%)	强化政策情景排放高限的有关假设	强化政策情景排放低限的有关假设
氢氟烃 (HFCs)	18	在 2024 年至 2029 年间，消费量冻结在《基加利修正案》所允许水平的 90%，并且在随后数年内以线性（而非分阶段）方式进行削减，避免出现搁浅资产损失	在强化政策情景排放趋势高限的有关假设之外，到 2030 年分别以四氟丙烯 (HFO-1234yf) 和丙烷 (propane) 替代 50% 的 HFC-134a 和 HFC-410a，并且逐渐提高替代率 (Lin et al. 2018)
煤炭开采逸散甲烷排放	16	2030 年前，对浓度相对较高 (9% 或更高) 的甲烷采取抽排、利用或者燃烧排空的方式进行减排处理。成本范围为每吨二氧化碳当量 0.5 至 11 美元 (杨礼荣等 2014)	在强化政策情景排放趋势高限的有关假设之外，2020 年后按中国煤炭消费总量控制方案和政策研究项目 (2016) 制定的控煤目标，减少煤炭产量
农田一氧化二氮排放	13	按照 Wang et al. (2014) 所研究识别的，采取三种成本为负的化肥施用措施，到 2030 年实现其 70% 的减排潜力，到 2050 年增至 100%	假设氮肥施用量从 2020 年至 2050 年以线性方式降低，到 2050 年施用量仅为 2015 年水平的 50%。该假设接近于 Lin et al. (2018) 基于咨询中国科学院有关专家的意见，也经本文作者的专家咨询所确认 (Li 2018)
肠道发酵甲烷排放	10	推广家畜繁育，采取加入益生菌和茶皂苷等措施，这些措施成本为负 (Wang et al. 2014)，同时认为 2030 年能够实现这些措施 70% 的潜力，到 2050 年增至 100%	假设通过改进饲料营养平衡和可消化性，中国到 2030 年和 2050 年可以分别减少 17% 和 30% 的相关排放，这与 Lin et al. (2018) 的假设也相近
水稻栽培甲烷排放	7	通过改善灌溉和施用肥料等负成本或低成本措施，到 2030 年和 2050 年相对于现有政策情景的排放量能够分别减少 12.5% 和 25%。该假设基于查询有关文献和咨询有关专家 (Li 2018; Lin et al. 2018; Tian et al. 2018)	假设在采取负成本或低成本措施之外，还使用硝化抑制剂、缓释肥料和生物炭等，可能在 2030 年和 2050 年相对于现有政策情景的排放量能够分别减排 30% 和 50%。该假设基于查询有关文献和咨询有关专家 (Li 2018; Linquist et al. 2012; Xiao et al. 2018)
硝酸和己二酸生产一氧化二氮排放	6	假设 2030 年前中国 100% 的己二酸生产设施都安装了减排系统，并且 2030 年中国的硝酸生产设施中有 20% 都安装了系统减排 (二级处理)，到 2050 年增至 80%。这些假设基于成本估算和其他国家的实践 (EPA 2013; Schneider and Cames 2014; 杨礼荣等 2014)	假设采取了更为积极的政策，中国到 2030 年为所有己二酸生产设施都安装了减排系统，并且 2030 年和 2050 年中国的硝酸生产设施中安装了减排系统 (二级处理) 的比例分别达到 40% 和 100%。这些假设基于中国和其他国家专家的有关研究 (EPA 2013; Schneider and Cames 2014; 杨礼荣等 2014)
污水处理甲烷排放	4	假设现有的厌氧污水处理厂安装甲烷回收系统，生活污水处理的排放到 2030 年和 2050 年将会分别减少 20% 和 30%，而工业废水处理的排放到 2030 年和 2050 年将会分别减少 36% 和 53%。这些假设基于成本估算 (大约每吨二氧化碳当量 7 至 9 美元) (杨礼荣等 2014)、估计不同工艺的排放因子，以及 2012 年的全国加权平均值 (蔡博峰等 2015)	假设采取了更为积极的政策推广在现有的厌氧污水处理厂安装甲烷回收系统，中国生活污水处理的排放到 2030 年和 2050 年将会分别减少 25% 和 44%，而工业废水处理的排放到 2030 年和 2050 年将会分别减少 46% 和 80%。本文根据中国学者的有关研究做出了上述假设 (蔡博峰等 2015; 杨礼荣等 2014)

## 研究局限

本文以大量的官方发布数据、研究和估算为基础。这些信息来源中的任何不确定性或者谬误都会对结论产生影响。在各相关的关键数据源缺乏定量化不确定性信息的情况下，本研究无法对结果的不确定性进行定量评估。

各类关键数据源包含了一些并不完全一致的假设。例如，对原铝需求进行预测所使用的国内生产总值（GDP）和人口数的假设可能会不同于对煤炭、石油和天然气生产量进行预测所使用的假设。为了提升一致性，只要能够获取相关信息（例如对六氟化硫进行预测时），本文均对预测作出调整，以便结果均基于一致的假设。同时，本文还力求把与各种情景均最为接近的有关研究作为数据信息来源。尽管如此，诸如国内生产总值和人口增长等一些关键变量的假设在大多数相关研究中并非完全一致，有可能会影响到预测的准确性。

本文还单独对各个排放源及其减排潜力进行了预测，并未明确考虑到各个排放源之间的相互影响。因此，所有排放源汇总结果的准确性也会降低。

排放及其影响因素（例如活动数据、生产量和消费量、经济增长率和人口数量）之间的关系可能会变化，这也使得预测不准。由于相关的各个系数更可能会在较长的时间内出现变化，在研究2030年后的有关结果时尤其会出现上述情况。因此，应当更加审慎地看待长期预测。

除非制定了特定的政策目标，本研究假设技术进步不会自动出现，长期内不会使得排放降低。这一点可能会高估了有关的排放量。

最重要的是，本文在计算减排潜力，尤其是测算强化政策情景的排放高限时，对“可行”的定义比较保守。也就是说，相关假设仅仅纳入了一些经过验证、马上可得且财务成本较低的技术，而没有纳入其全经济效益（如更清洁的空气、健康状况改善、消耗更少的自然资源、能源安全水平更高等带来的效益）。此外，本文仅仅量化了现有政策情景下2030年七大排放源的减排潜力，并未研究许多面向小排放源的有效措施。例如，超越当前的2020年目标，进一步利用禽畜粪便进行生物制气（国家发展和改革委员会和原农业部 2017），以及增加废物回收以避免市政固体废物的甲烷排放是可行的（国家发展和改革委员会和住房和城乡建设部 2016）。同时，也可以采取多项措施减少电力设备有关的六氟化硫排放（EPA 2013；Zhou et al. 2018）。因此，强化政策情景并未完全反映出减排潜力；相反，该情景旨在增进信心，推动在短期内对更有力的目标进行承诺。

即便全面采纳了强化政策情景下的排放目标，相应的排放趋势可能也不足以实现《巴黎协定》的长期目标。随着时间的推移，需要开展新的评估，以便为气候行动的力度水平提供信息。

附录A和附录B更为详细地给出了各个情景的假设、数据和量化公式，以便较为透明地对结果和结论进行评估。

## 主要发现

### 非二温室气体的总体排放趋势

图1展示了2012年至2050年非二温室气体的年排放量。在参考情景中，中国的非二温室气体排放量将从2012年的不到20.58亿吨二氧化碳当量，增加到2030年的约29.54亿吨二氧化碳当量，增长幅度达到44%。2030年后，非二温室气体排放量还可能继续增加15%，到2050年达到约33.96亿吨二氧化碳当量。

自2015年来推出的政策已经从根本上改变了中国非二温室气体的排放趋势。在现有政策情景中，2020年至2030年间的排放增幅约为16%，2030年至2040年间非二温室气体的排放量预计会稳定在25.71亿吨二氧化碳当量，而2040年后会出现明显的降低。

超越当前政策减排非二温室气体是可能的。在强化政策情景下，中国的非二温室气体排放量有可能提早十年至2020年达到稳定，并且排放量也比当前政策下的排放量低13%。采取强化行动，非二温室气体排放总量有可能2030年之前（排放量的低限），或者2050年之前（排放量的高限）就可以回归到2012年的水平。

温室气体排放量的累积使得大气中温室气体浓度升高，进而造成了气候变化。因此，累积的排放量应当引起关注。如图2所示，本研究中各个情景下自2012年起的累计排放量也存在显著差异。相比参考情景下的排放量，现有政策情景下到2030年将可能会减少35亿吨二氧化碳当量的累计排放量，到2040年达90亿吨，并且到2050年达178亿吨。在上述成就的基础上，强化政策情景到2030年将可能进一步减少15亿至30亿吨二氧化碳当量的累计排放量，到2040年达46亿至96亿吨，并且到2050年达79亿至175亿吨。

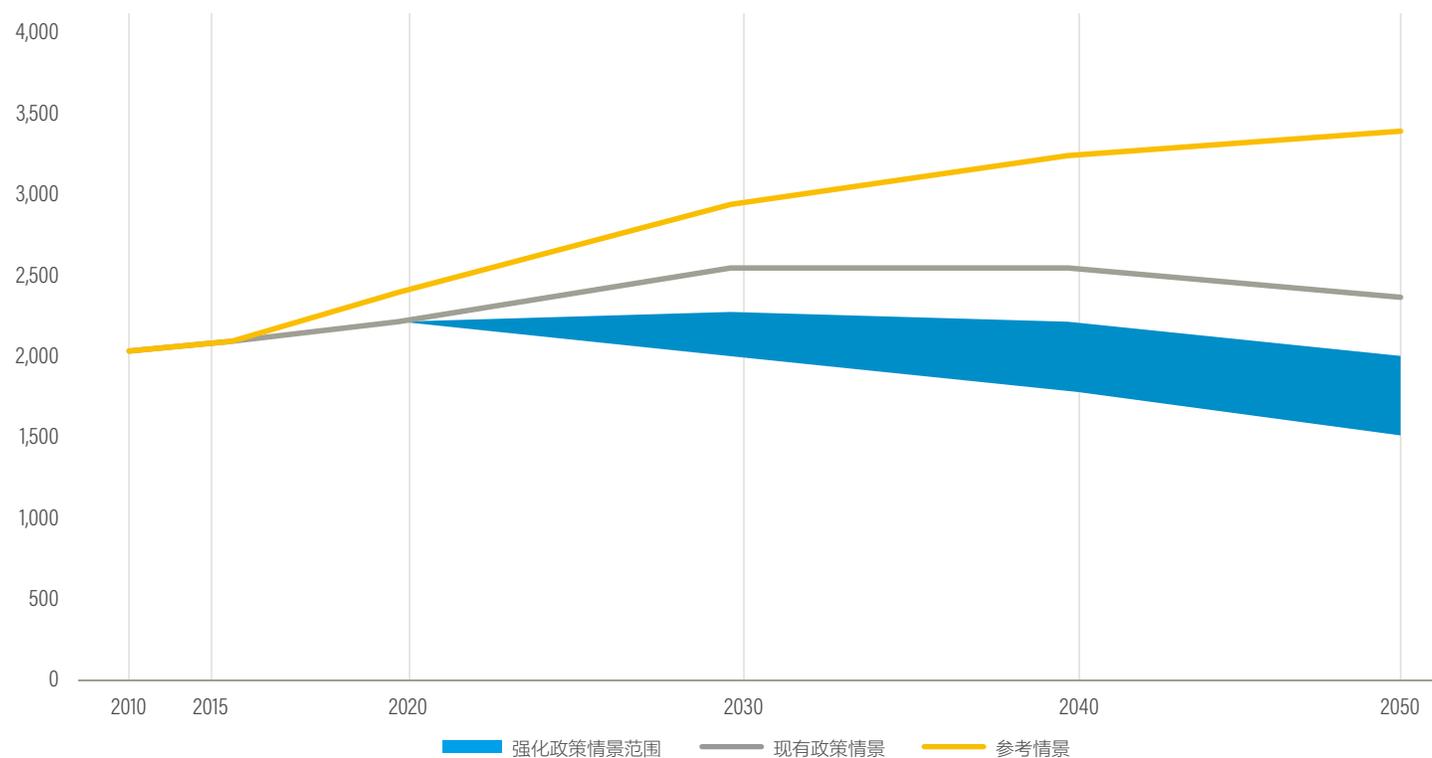
### 参考情景下的趋势

图3还详细呈现了参考情景下的有关趋势。2012年至2030年间，其他部门的排放要么保持稳定，要么趋于平稳，而工业过程的排放可能会增至三倍，并且从2030年至2050年还将增加50%。这一增长源于中国制冷需求的增加，也源于中国贯彻《蒙特利尔议定书》的要求而淘汰氢氟氯烃，并大规模采用氢氟氯烃替代氢氟氯烃，这使得氢氟氯烃的预测需求增长强劲。而己二酸作为一氧化二氮排放的一大主要来源，对其强劲需求的预测也使得排放量会显著增加。汽车行业中生产轻型汽车的需求，以及不断增长的电子消费产品行业带来的需求，都是己二酸行业发展的主要推动因素（GVR 2018）。

### 现有政策情景下的趋势

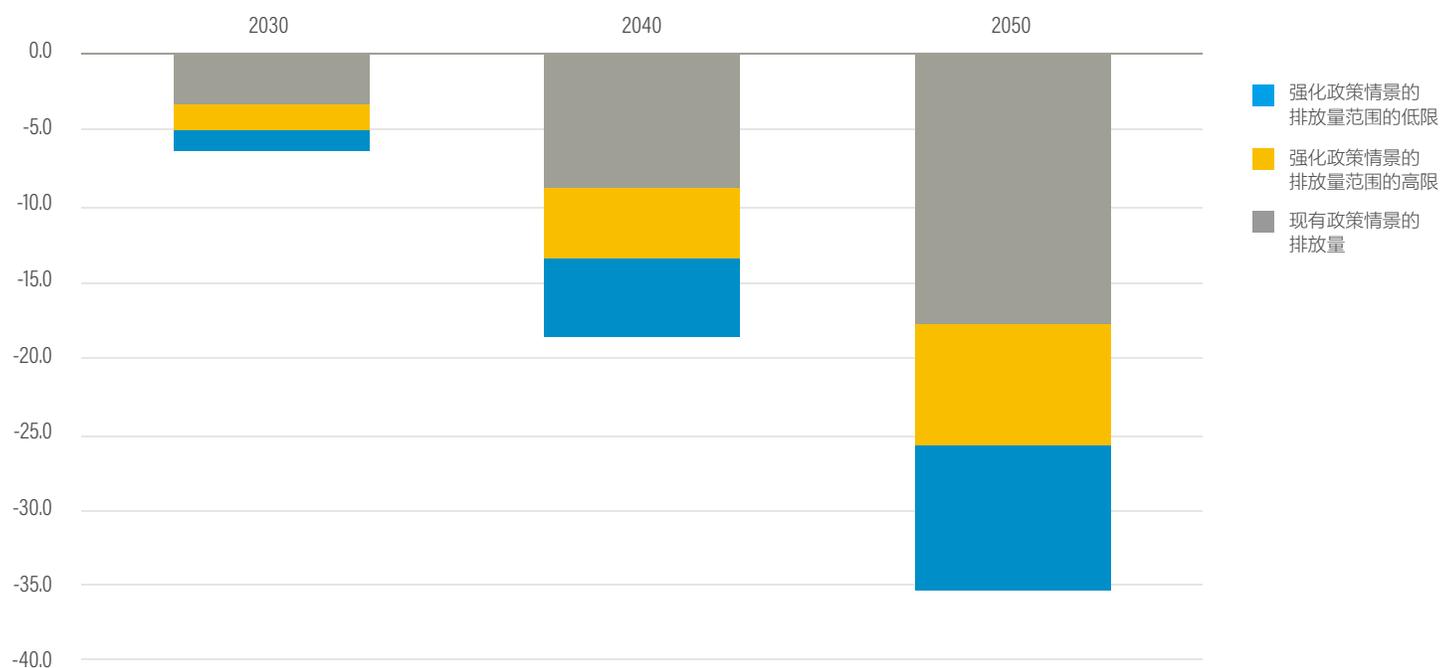
相比参考情景下的排放量，现有政策情景下到2030年有可能会减少约3.83亿吨二氧化碳当量，这超过了乌克兰2016年的温室气体排放总量（UNFCCC n.d.b）。

图 1 | 各种情景下预测的不同年份的非二氧化碳温室气体排放量（百万吨二氧化碳当量）



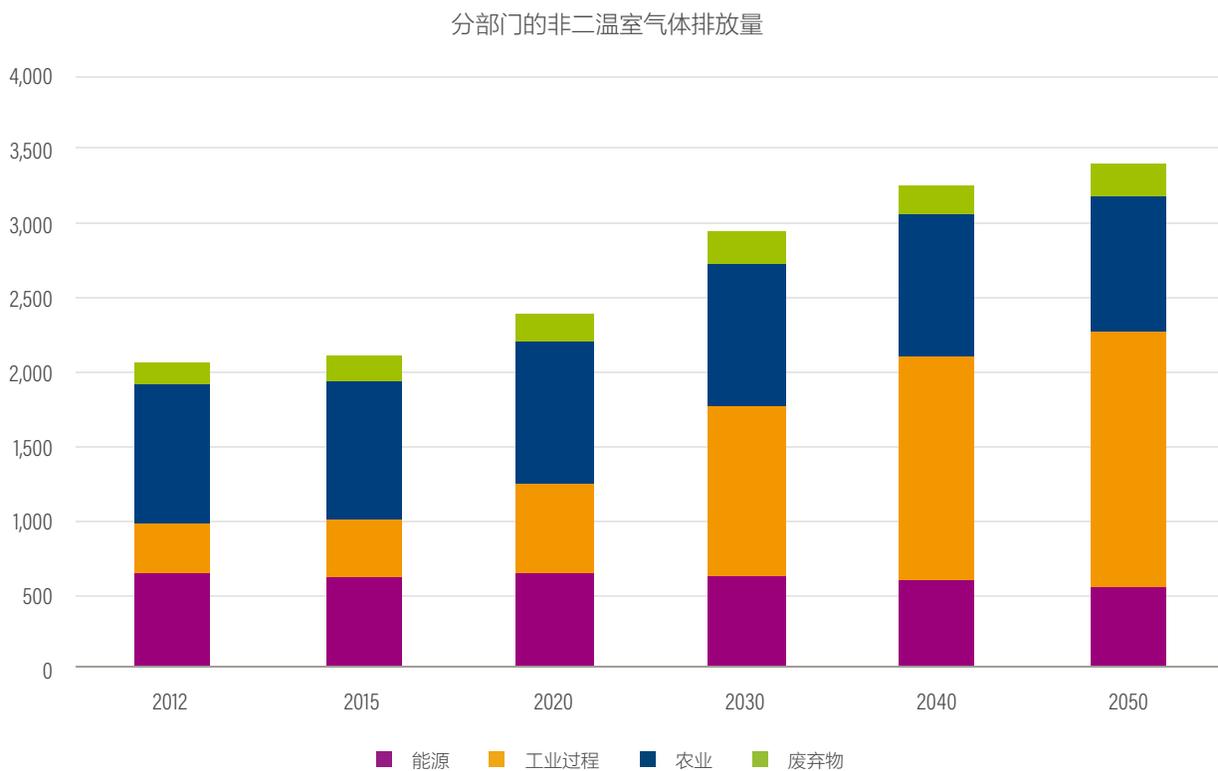
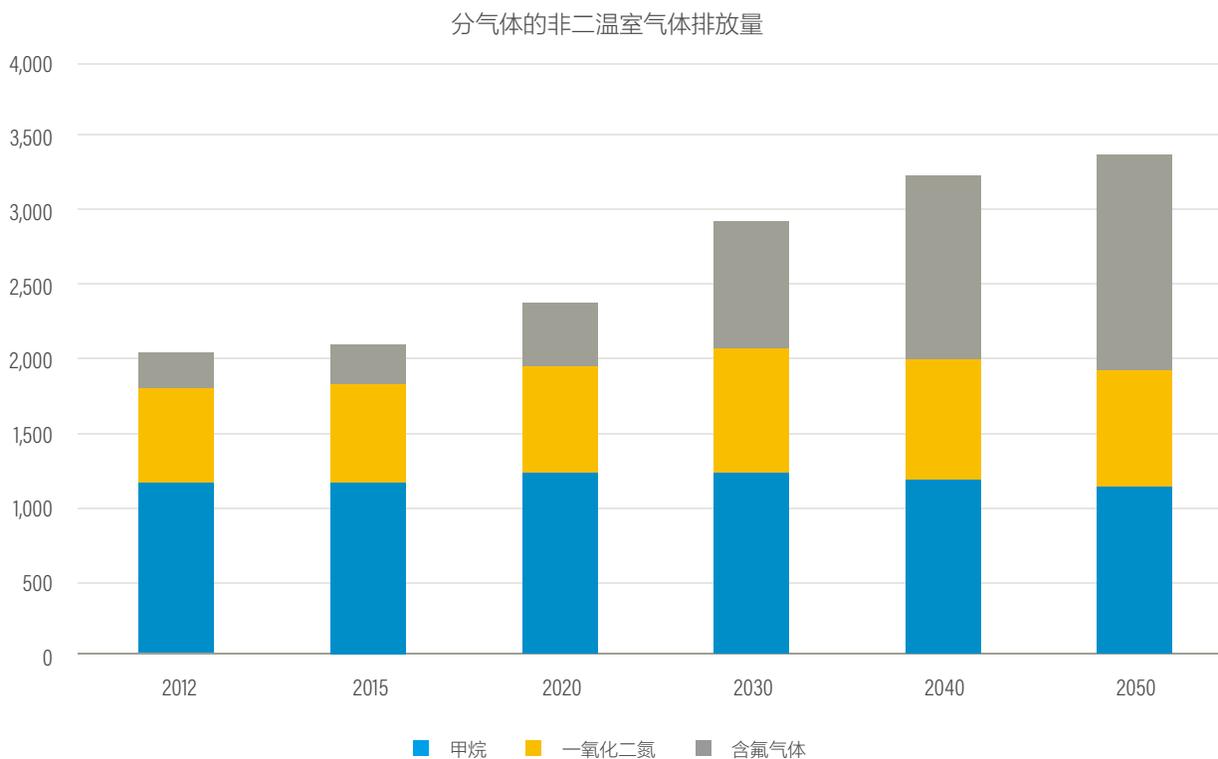
来源：世界资源研究所（WRI）

图 2 | 自2015年起相对于参考情景的累计减排量（十亿吨二氧化碳当量）



来源：世界资源研究所（WRI）

图 3 | 参考情景下分部门和分气体的非二温室气体排放量 (百万吨二氧化碳当量)

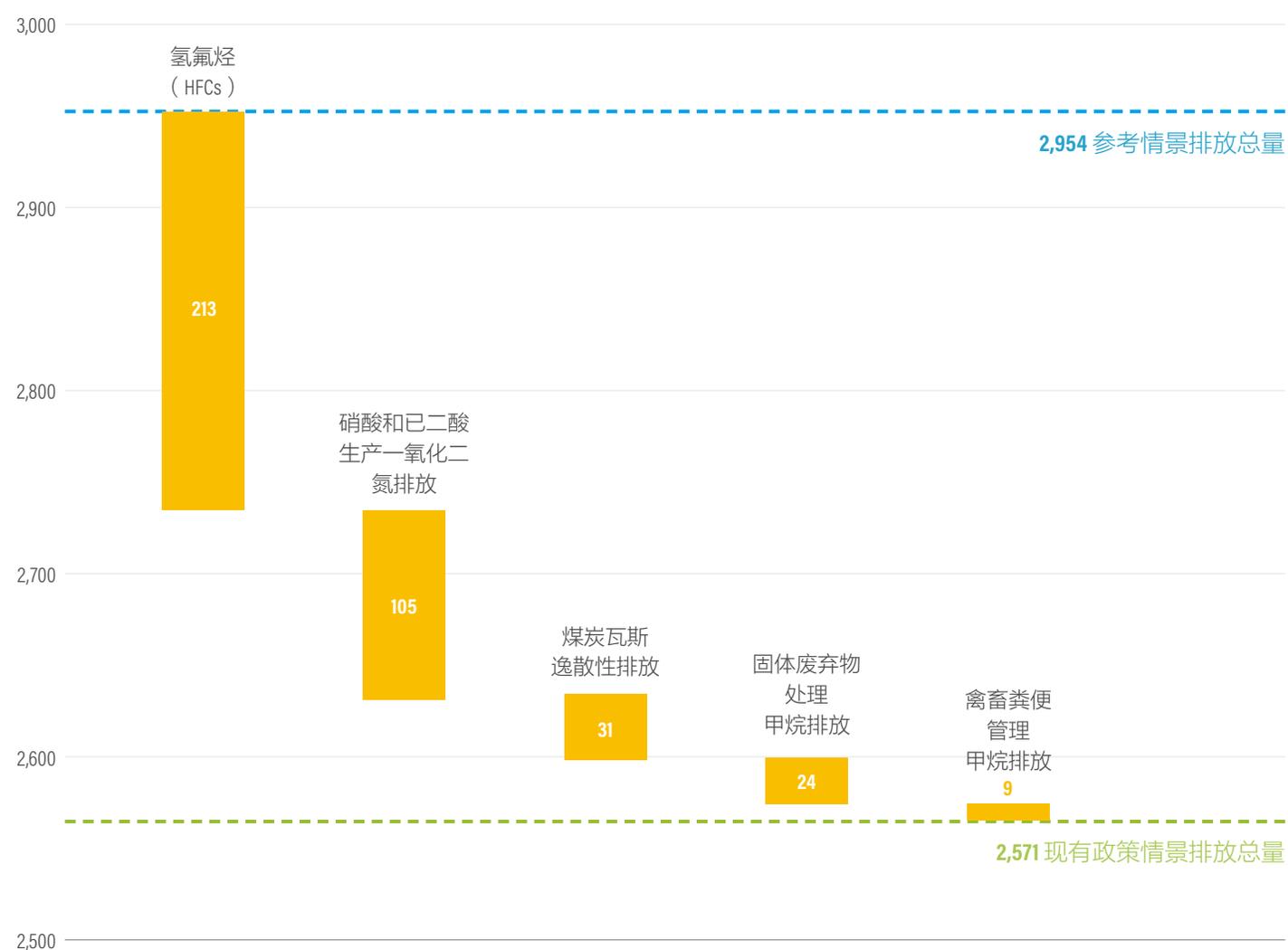


来源: 世界资源研究所 (WRI)

如图4所示，对氢氟烃采取行动会有助于完成《基加利修正案》要求的超过2亿吨二氧化碳当量的减排，而根据《基加利修正案》的要求，中国的三氟甲烷排放到2020年将会减至近零，并且自2024年起，中国将会限制其他氢氟烃类物质的生产和消费（UN Environment Ozone Secretariat 2018）。尽管如此，由于相关排放滞后所带来的影响，含氟类气体尤其是氢氟烃类物质（HFCs）要到2034年才会达到稳定。

中国承诺到2020年前实现工业过程中一氧化二氮排放的零增长，这将会产生重要的影响，使得硝酸和己二酸生产领域减排1.05亿吨二氧化碳当量。2015年之后，中国还在各个行业性的“十三五”规划中提出了相关政策目标，提高煤矿甲烷的回收和利用、改善市政固体废物处理，并开发农村沼气设施，这将会分别减排3100万吨、2400万吨和900万吨二氧化碳当量。

图 4 | 参考情景和现有政策情景下2030年非二温室气体排放以及实现减排的各个来源（百万吨二氧化碳当量）



备注：本图中给出的数字有取整，加总可能不准确。

来源：世界资源研究所（WRI）

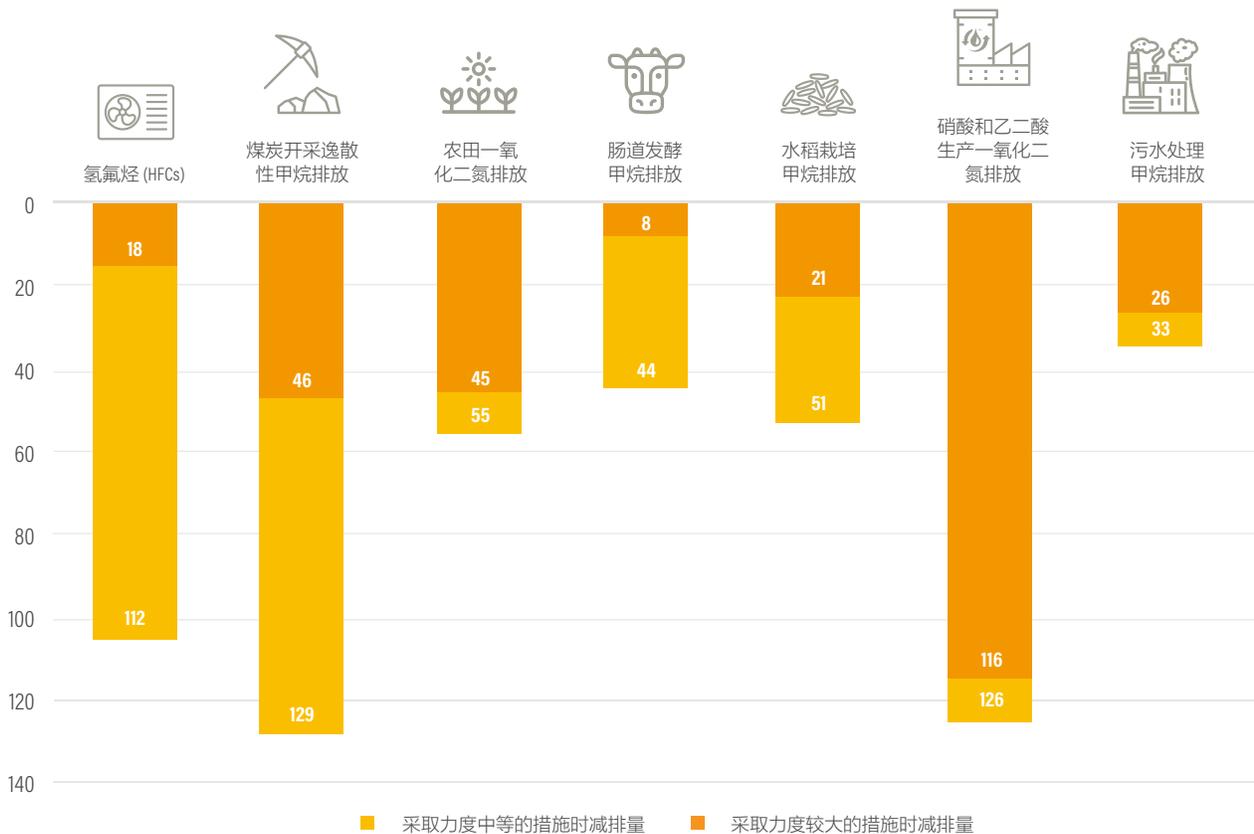
## 强化政策情景下的趋势

图5展示了2030年七大排放源减排潜力的范围。能够产生最大效果的有潜力的减排措施是加快削减氢氟烃、控制煤炭产量，以及强制要求减少硝酸和己二酸生产过程中的一氧化二氮排放。在强化政策情景中，如果仅仅采取那些成本为负或者成本较低的措施，中国到2030年前相对于现有政策情景将有可能减排2.8亿吨二氧化碳当量。若采取更有力的措施，中国的减排效果可能翻倍，到2030年减排5.49亿吨二氧化碳当量，并将2030年非温室气体排放量维持在2012年的水平。

图6展示了2030年各行业的排放量。若采取强化行动，2030年农业和工业过程将会成为最主要的非二温室气体排放部门。

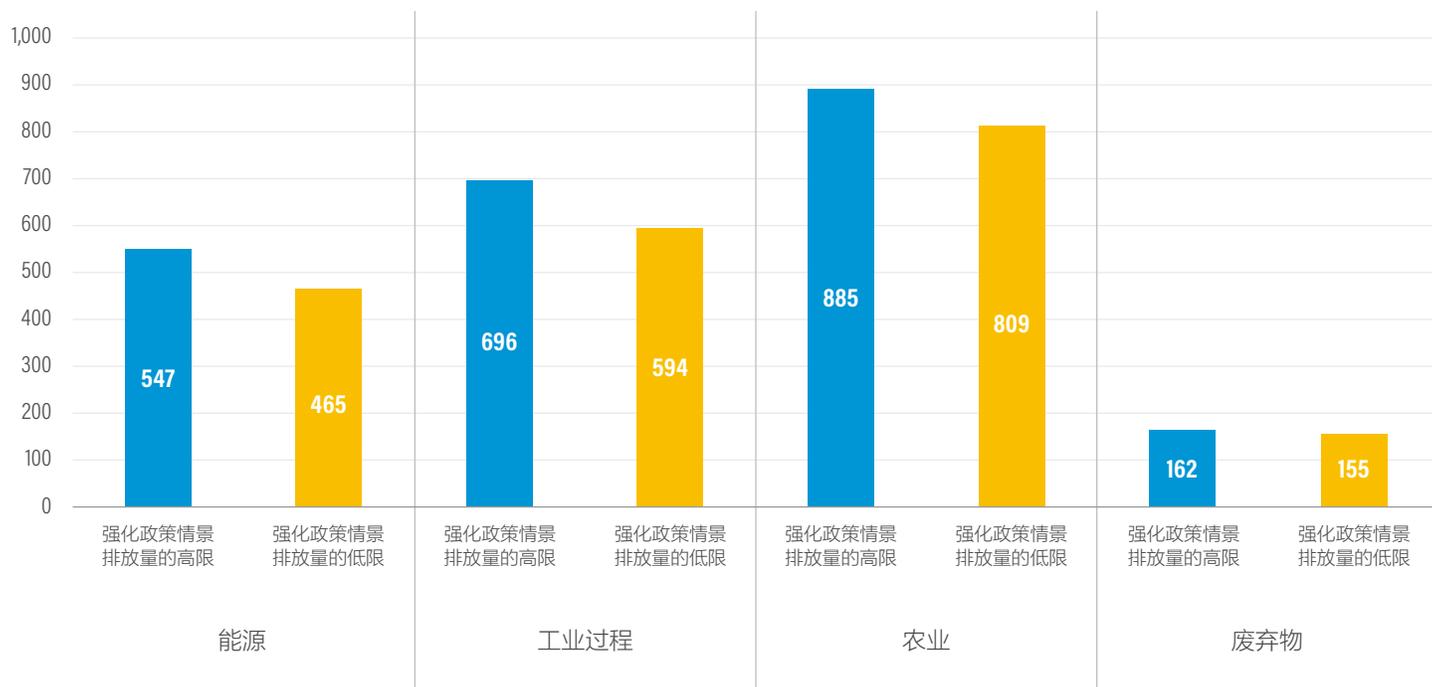
图7显示了温室气体排放的长期状况。甲烷排放虽然在2020年可能已经稳定，但仍然会是最主要的非二温室气体。尽管采取措施加快削减氢氟烃，然而含氟类气体在2012年至2030年间仍将增长80%至128%（基于排放量趋势的高限和低限）。

图 5 | 强化政策情景下2030年各排放源的减排潜力范围（百万吨二氧化碳当量）



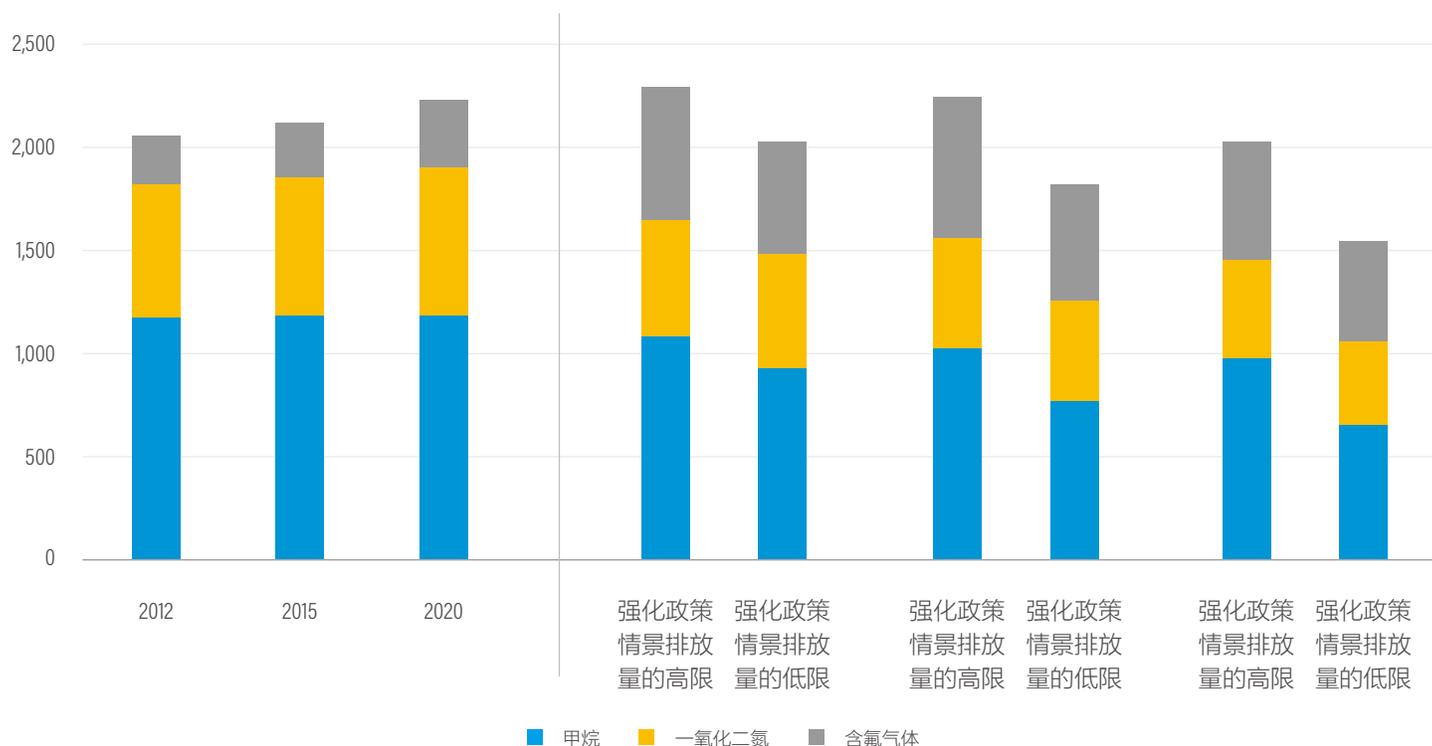
来源：世界资源研究所（WRI）

图 6 | 强化情景下2030年分部门的非二温室气体排放量（百万吨二氧化碳当量）



来源：世界资源研究所（WRI）

图 7 | 强化情景下分气体的非二温室气体排放量（百万吨二氧化碳当量）



来源：世界资源研究所（WRI）

## 甲烷排放的趋势

正如图8所示，即便在参考情景下，甲烷排放在2020年至2030年间也将稳定，并接着随时间增长不断降低。现有政策情景有可能使得甲烷排放提早十年达到稳定，接着与参考情景类似，甲烷排放量逐渐缓慢降低。

然而，若采取强化行动，中国有潜力使甲烷排放量降低得更快。在强化政策情景中，2030年甲烷排放能够比2012年降低8%至21%，如果在煤矿甲烷、污水处理、水稻栽培和肠道发酵等领域推出有力度且有成效的政策，就能够实现上述减排潜力。

## 一氧化二氮排放的趋势

图9显示在参考情景下，一氧化二氮排放会持续增加至2030年。这是因为如果没有政策来管控工业排放，来自硝酸和己二酸生产所产生的排放会持续增长至2030年。

在现有政策情景下，一氧化二氮排放自2020年起就开始保持平稳。一方面，根据气候变化第一次两年更新报告所提出的工业过程一氧化二氮排放零增长的目标，到2030年将会相对于参考情景减排1.05亿吨二氧化碳当量；另一方面，缺乏额外政策和行动也可能使得排放量维持在一个相对高的水平。

在强化政策情景下，一氧化二氮排在2020年至2030年间就可能显著降低，并在长期内持续降低。2030年一氧化二氮排放量相对于2012年可能会减少11%至15%，大部分减排均源自对硝酸

和己二酸生产所采取的措施，也即要求所有的己二酸生产设施和40%的硝酸生产设施均进行减排。其余的减排量源于减少施用氮肥的有关措施，这些措施将会减少来自农业土壤的排放。

## 含氟类气体排放的趋势

在所有情景下，含氟类气体排放均会相比2012年水平大幅增长，如图10所示。

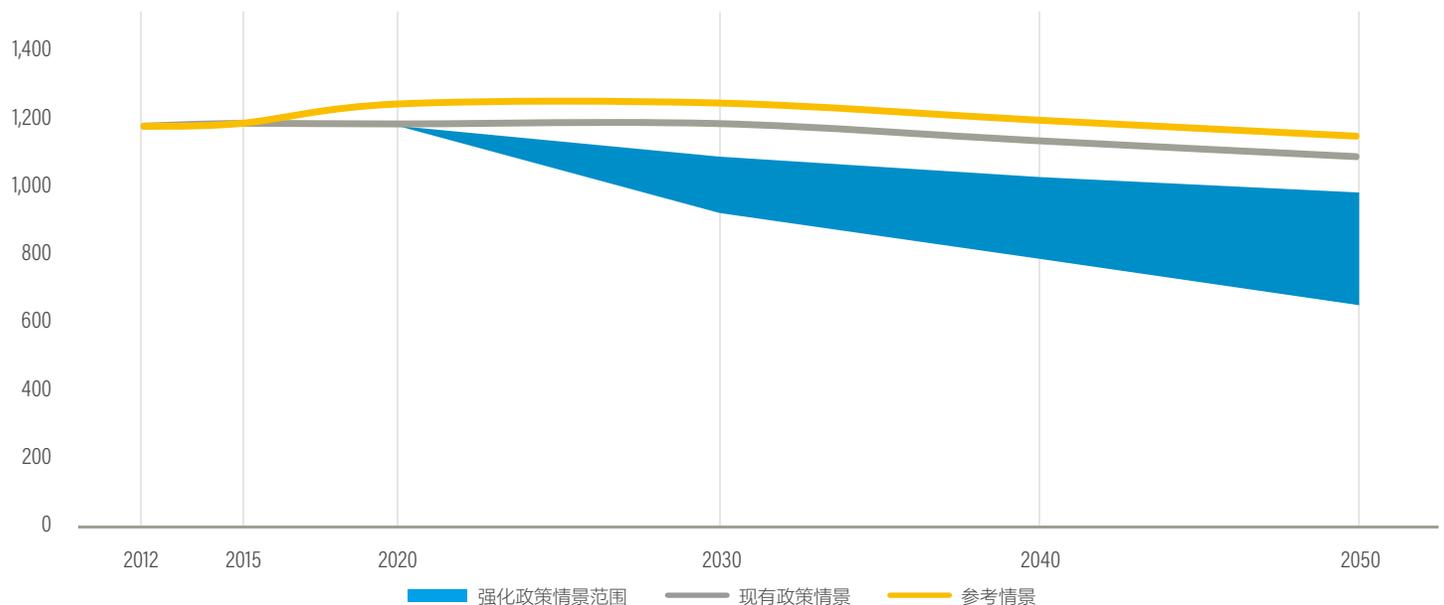
在参考情景下，由于对氢氟烃需求强劲且几乎没有管控，2050年的排放量可能增长500%。

由于《基加利修正案》的约束，现有政策情景下氢氟烃的排放量会增长到一个低得多的水平，到2030年达到6.64亿吨二氧化碳当量，并且到2050年最终降至5.88亿吨二氧化碳当量。尽管《基加利修正案》最早会从2024年开始限制氢氟烃的消费和生产，然而由于当前空调器和冷藏设备中使用的大量氢氟烃存在排放滞后的效应，其排放量要到2030年后才能达到峰值。这类气体的排放将会滞后到维修或者产品寿命终止时才会显现。

在强化政策情景下，若加快实施《基加利修正案》，那么2030年可能相对于现有政策情景减排1800万至1.12亿吨二氧化碳当量。

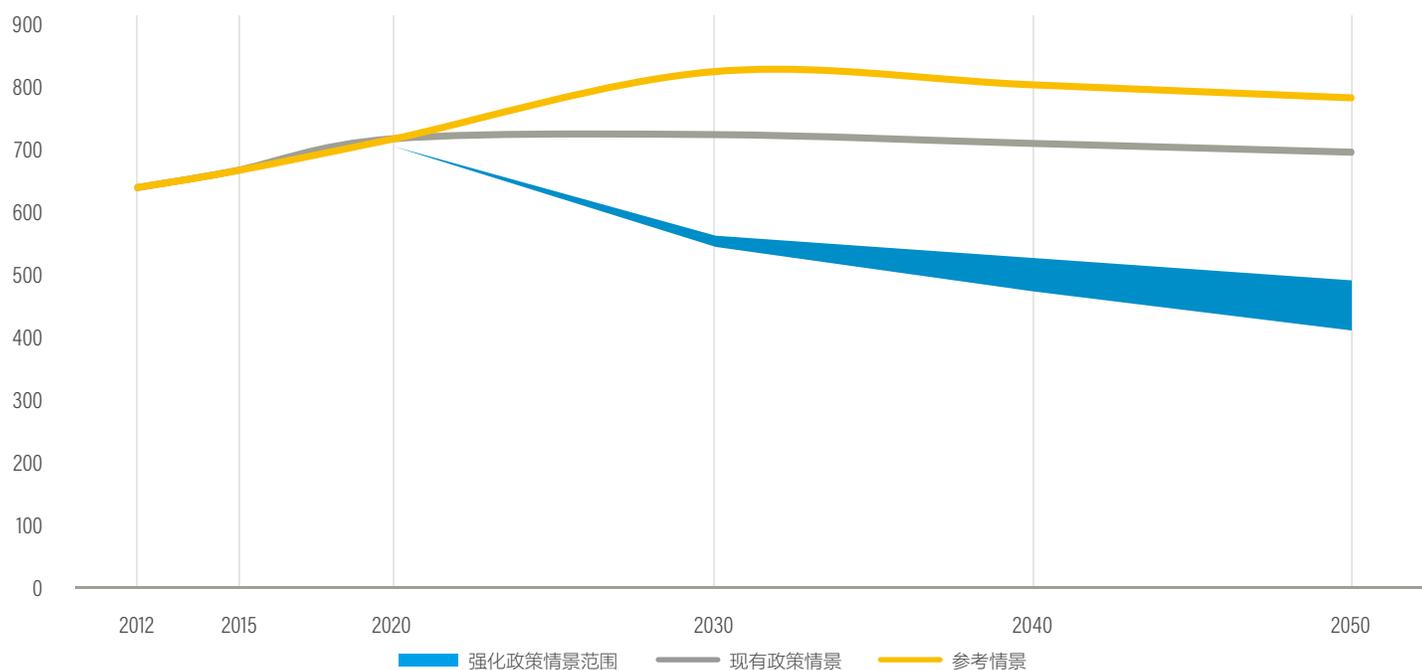
如果比《基加利修正案》提前几年对氢氟烃的消费和生产进行限制，就能够实现强化政策情景下排放趋势低限的减排量。这么做还可能会降低达成《基加利修正案》的成本，这是由于生产

图 8 | 各种情景下的甲烷排放量（百万吨二氧化碳当量）



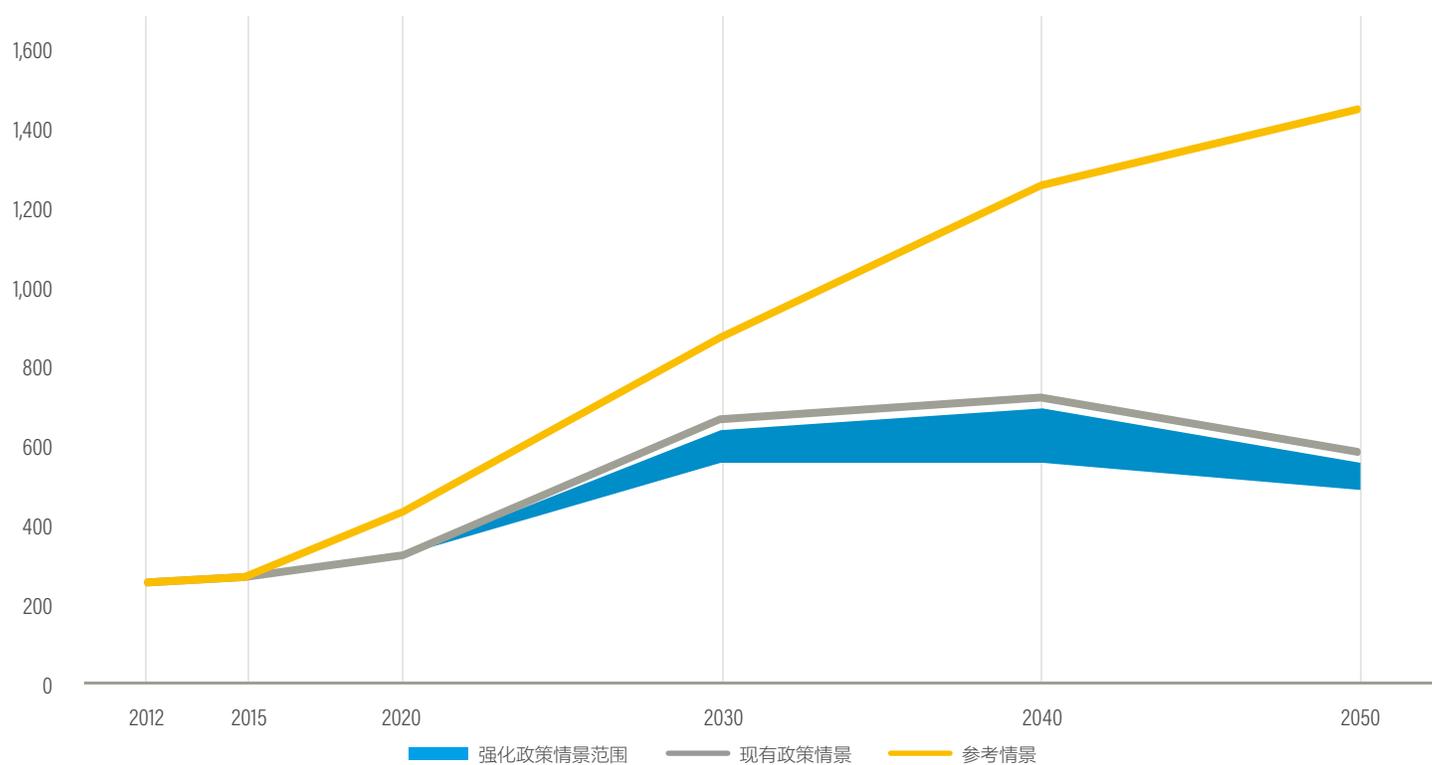
来源：世界资源研究所（WRI）

图 9 | 各种情景下的一氧化二氮排放量（百万吨二氧化碳当量）



来源：世界资源研究所 (WRI)

图 10 | 各种情景下的含氟类气体排放量（百万吨二氧化碳当量）



来源：世界资源研究所 (WRI)

设备往往会有十年的寿命周期，如果预见到将来对生产和消费的限制而提早五年采取行动，就可以避免出现搁浅资产损失。

为了实现强化政策情景下的排放低限，中国需要到2030年分别以四氟丙烯（HFO-1234yf）和丙烷（propane）替代50%的HFC-134a和HFC-410a。相关研究认为这是可行的（Lin et al. 2018）。该研究分析了四氟丙烯的应用和专利现状，以及其在江苏省的生产状况。该研究还考虑了中国美的集团开展的试点工作。

## 对比分析

尽管有一些研究分析中国的非二温室气体排放（EPA 2013；Fawcett et al. 2015；Lin et al. 2018；杨礼荣等 2014；Yao et al. 2016；Zhang et al. 2018），然而只有两份研究（Fawcett et al. 2015；Lin et al. 2018）明确考虑了中国在2015年推出的政策。

Fawcett et al.（2015）采用了一个全球综合评估模型（GCAM），相对于各国2015年提出的国家气候承诺建立起各国的排放路径，包括对中国的非二温室气体排放进行了预测。该研究包括了延续《巴黎协定》的情景和强化《巴黎协定》的情景，两个情景均认为中国在2030年会兑现其国家自主贡献的目标，而差别在于2030年之后的脱碳程度。由于中国的国家自主贡献并不包括一项非二温室气体的量化目标，GCAM假设经济体内所有部门（包括非二温室气体排放部门）的边际减排成本相等，从而推算出相应的减排量。GCAM采取的是联合国政府间气候变化专门委员会第四次评估报告中给出的全球增温潜能值（Fawcett et al. 2015）。

劳伦斯伯克利国家实验室（LBNL）的Lin et al.（2018）采用了一个自下而上的、根据终端使用情况的模型分析方法，模拟了来自能源和非能源部门的非二温室气体排放的重要推动因素及其影响。Lin et al.（2018）建立了一个参考情景，意在反映所有采纳了的政策，包括支持实施中国国家自主贡献的政策，尽管他们并不反

映国家自主贡献的承诺或目标的相应成果。LBNL的参考情景并未假设《基加利修正案》获得核准，而本报告中的现有政策情景则包括了《基加利修正案》获得核准的影响，而这个假设解释了本报告现有情景和参考情景的排放量差别的55%。LBNL的研究也构建了一个减缓情景，包括了一些关键的低成本且可获得的技术，以及在沒有特定政策的情况下中国市场上已经采用的减排措施。LBNL采用了联合国政府间气候变化专门委员会第二次评估报告给出的全球增温潜能值（Lin et al. 2018）。

根据对情景的描述，本研究中的参考情景与上述两项研究中的延续《巴黎协定》的情景和参考情景最为相似，本研究中的强化政策情景与上述两项研究中的强化《巴黎协定》的情景和减缓情景最为相似。上述两项研究中没有与本文中的现有政策情景相似的情景。表2总结了这三项研究的一些关键特征。

图11对比了几项研究预测的甲烷排放量，GCAM中的历史排放量比WRI和LBNL的数据要高很多。这是因为GCAM采用了全球大气研究排放数据库的行业数据，并根据典型浓度路径对排放总量进行了校准，而WRI和LBNL要么直接采用官方数据，要么根据官方数据对排放量进行校准，因此尽管与全球大气研究排放数据库的行业数据存在巨大差异，但更准确和全面。

在所有的情景下，GCAM均预测2012年至2015年间的甲烷排放量出现陡降，而WRI和LBNL均预测同期内甲烷排放量会温和增长。最近一份研究采用了卫星数据，结论认为煤矿甲烷排放在这一时期内会略微增加，这一排放占到中国甲烷排放总量的43%（Miller et al. 2019）。WRI和LBNL的预测与Miller et al.（2019）给出的结论相吻合。

尽管如此，在参考情景和类似的情景中，所有的研究均预测甲烷排放量在2030年前要么会保持稳定，要么会出现下降。而对于能源生产预测，尤其是对煤炭生产预测的不同可能就解释了各情景中排放趋势的差别。

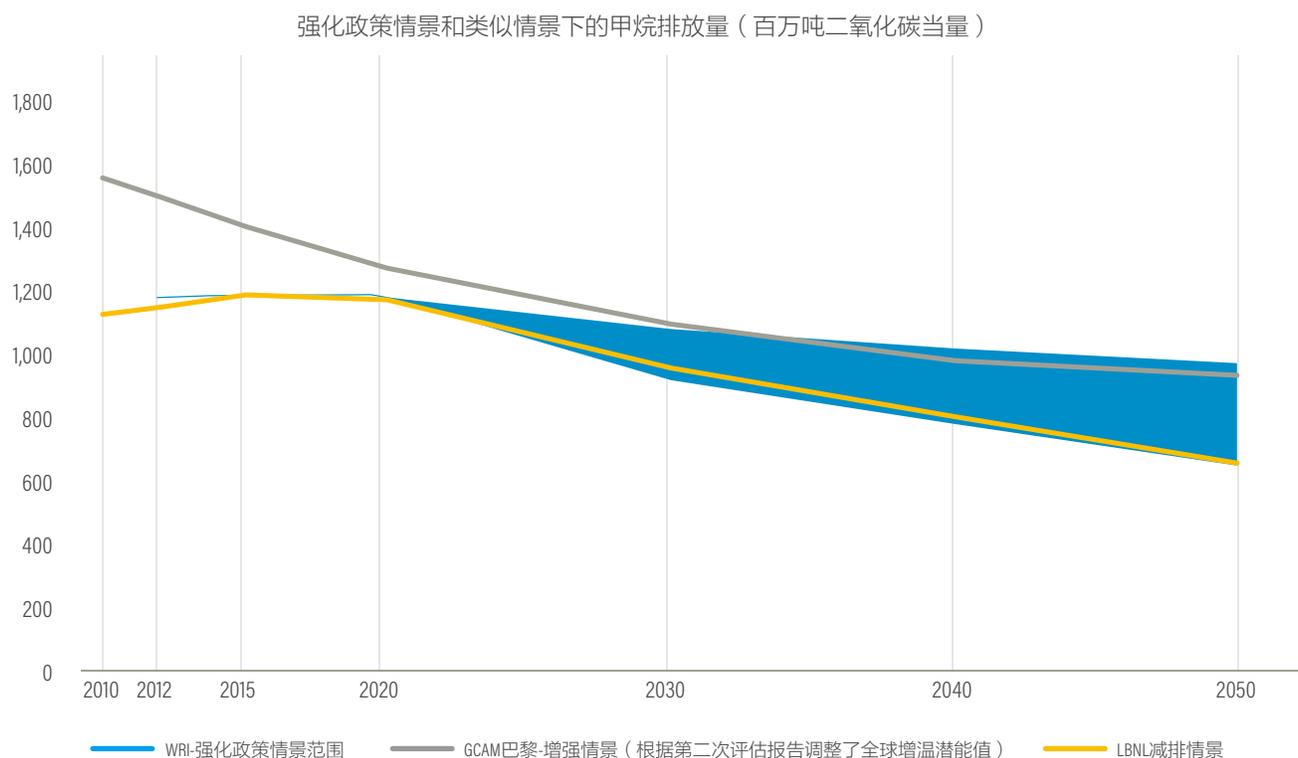
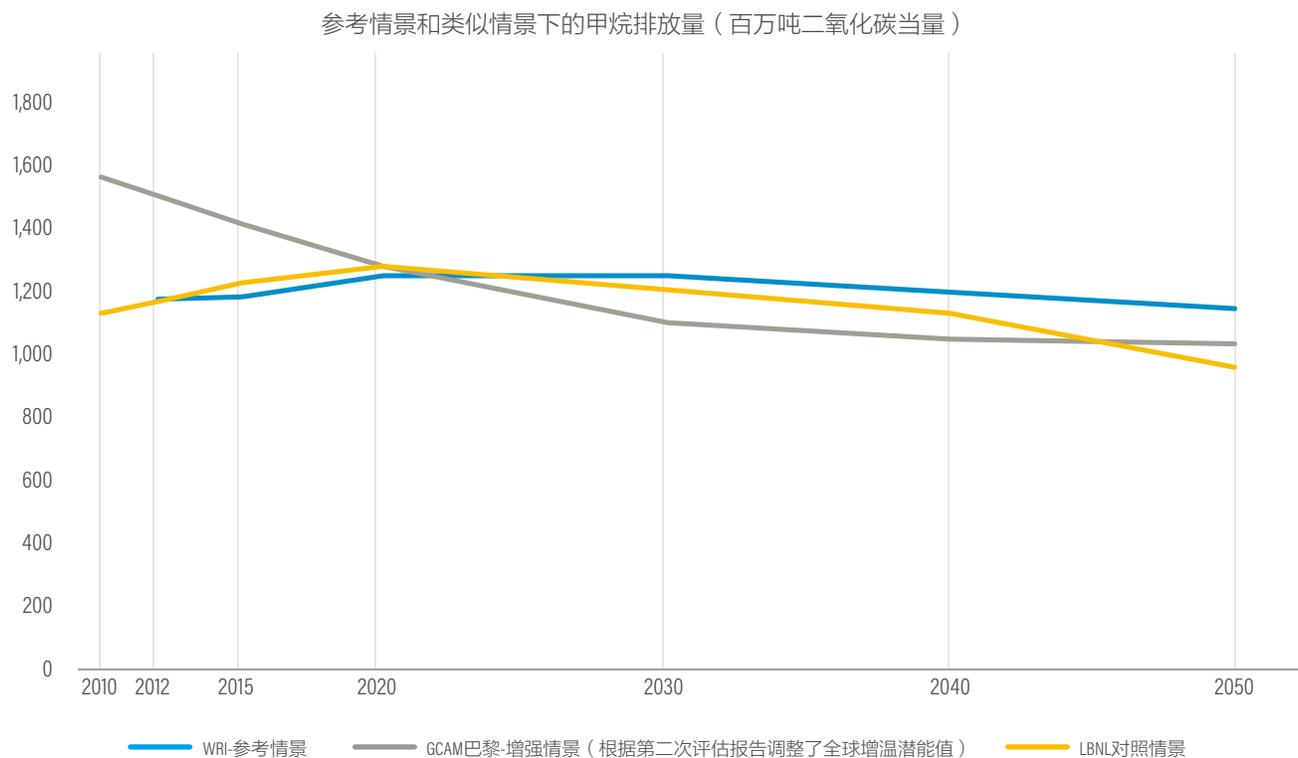
表 2 | 几份研究的关键参数对比

研究	全球增温潜能来源	基准年份	基准年数据来源
WRI	IPCC 第二次评估报告	2012	气候变化第一次两年更新报告，并以 Fang et al.（2016）和 EPA（2013）加以补充
LBNL	IPCC 第二次评估报告	2010	2050年中国资源与能源需求分析模型的结果，采用了发布的数据对历史活动水平进行了校准，也根据气候变化第一次两年更新报告对总排放进行了校准
GCAM	IPCC 第四次评估报告	2010	全球大气研究排放数据库

备注：作者对GCAM中甲烷和一氧化二氮的分析结果根据第二次评估报告的全局增温潜能值进行了调整，以便进行对比。由于缺乏有关气体组成的数据，因此含氟类气体的分析结果没有进行调整。

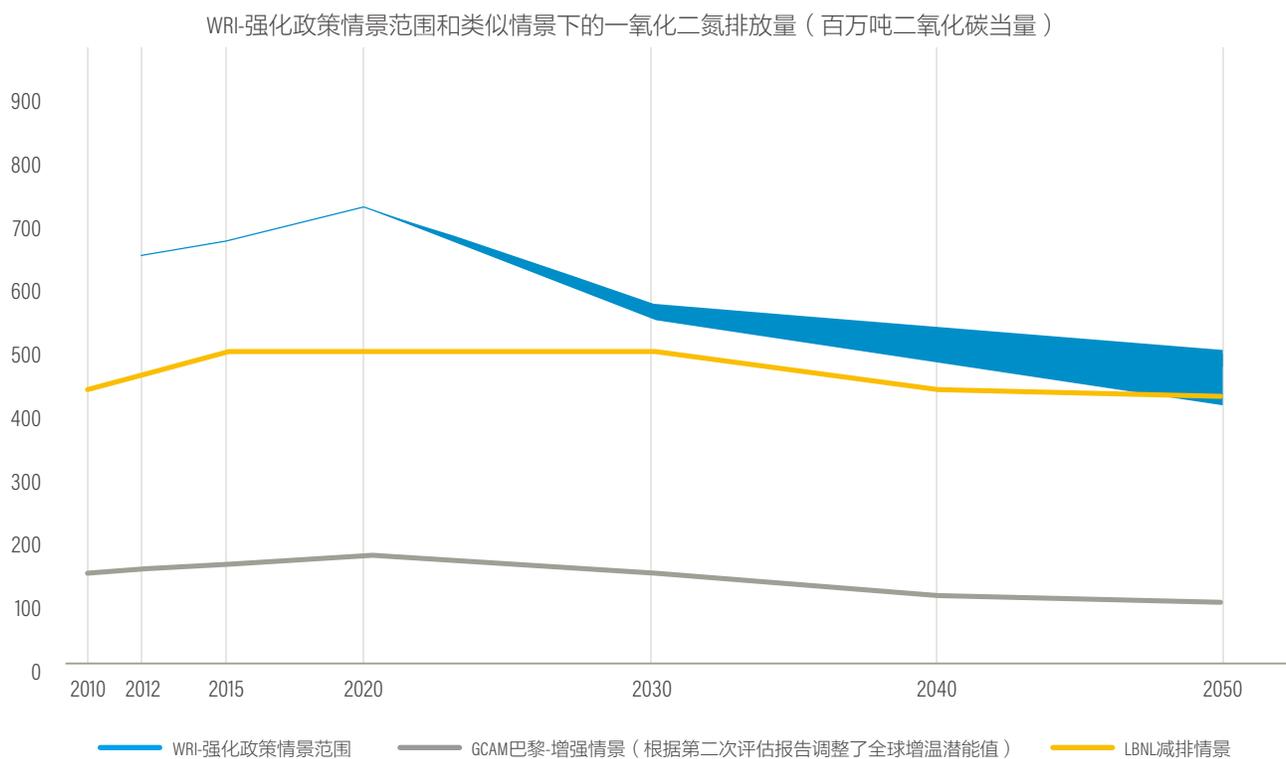
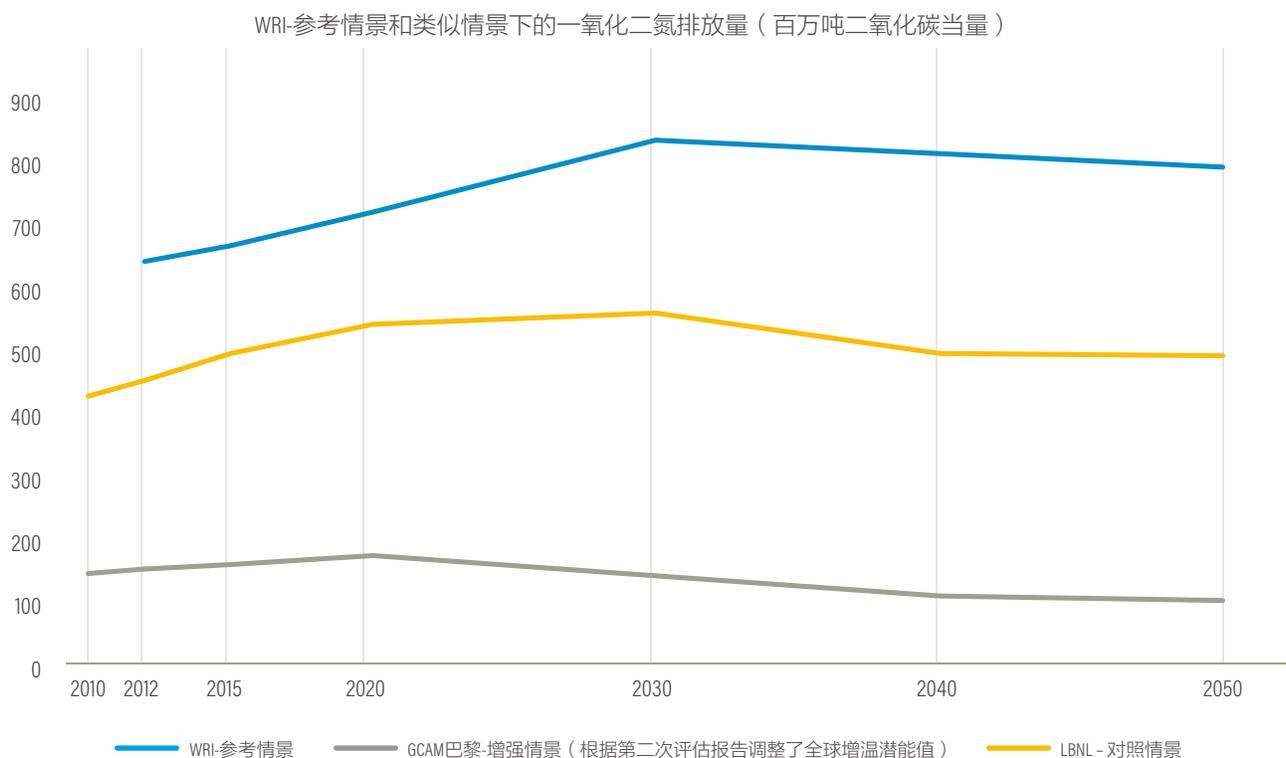
来源：世界资源研究所（WRI）

图 11 | 甲烷的预测排放量对比



来源：世界资源研究所根据 Fawcett et al. (2015) 和 Lin et al. (2018) 进行整理

图 12 | 一氧化二氮的预测排放量对比



来源：世界资源研究所根据 Fawcett et al. (2015) 和 Lin et al. (2018) 进行整理

在强化政策情景和类似的情景下，所有研究测算的排放量均呈现相似的趋势。强化政策情景的排放趋势范围与GCAM（接近于排放量范围的高限）和LBNL（接近于排放量范围的低限）的研究均有重合。

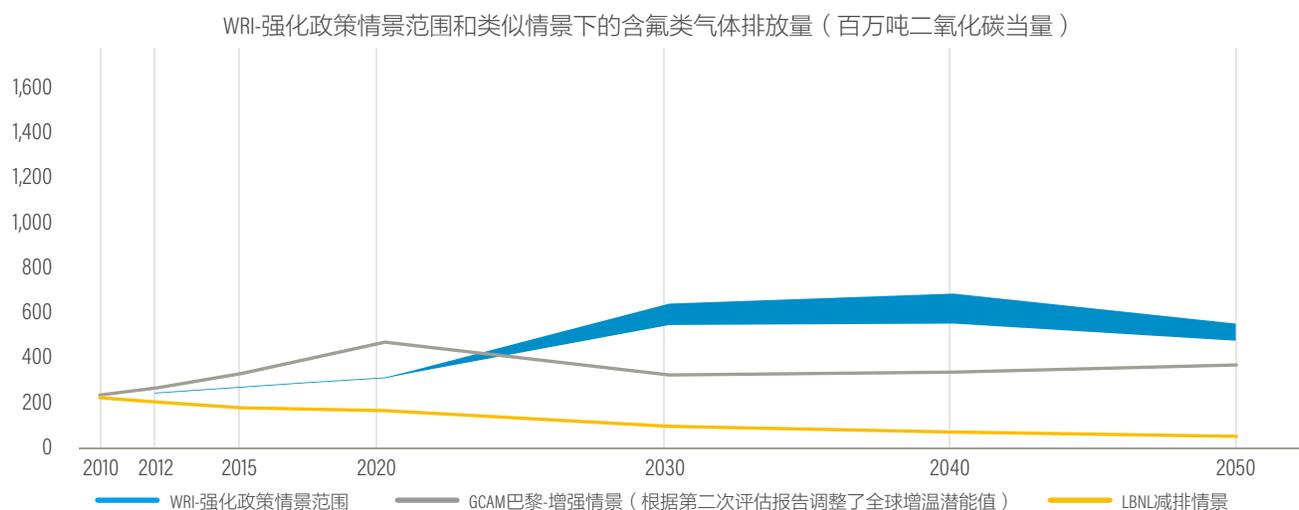
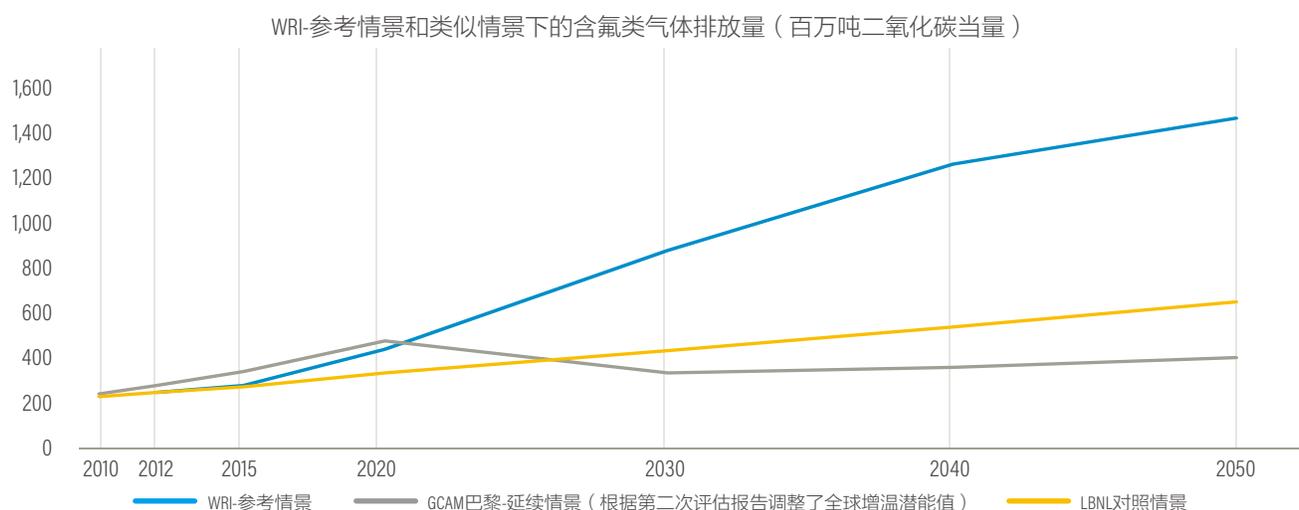
WRI、GCAM，以及LBNL的研究在一氧化二氮的历史排放量数据方面存在重大差异（见图12）。GCAM没有纳入农业排放源的一氧化二氮排放，这一排放源约占2012年一氧化二氮排放总量的59%。即使排放源相同，有关研究结果也存在差异，比如LBNL的估算排放量就比官方数据（也是WRI采用的数据）要低得多。

在参考情景和类似的情景下，LBNL假设硝酸和己二酸生产在2020年前达到峰值，然而WRI基于2024年全球市场展望（GVR 2018），认为该生产要到2030年才能达峰。这很可能就解释了两份研究在2020年后一氧化二氮排放趋势上的差异。

在强化政策情景和类似的情景下，WRI和LBNL对一氧化二氮的减排潜力也给出了不同的预测。原因在于，LBNL咨询的专家给出了更为保守的见解，其减缓情景据此也就排除了硝酸和己二酸生产中的一些减排措施。WRI根据中国和其他国家的有关文献和相关实践，对减排措施的成本及其应用比例作出了更为乐观的假设（EPA 2013；Schneider and Cames 2014；杨礼荣等 2014）。

如图13所示，几份研究对含氟类气体排放量的预测也差异迥然。除了采取的模型模拟方法不同之外，GCAM采用的数据来源和全球增温潜能值与WRI和LBNL均不同。而WRI和LBNL的预测量出现的差异可能是诸多因素综合作用的结果。首先，WRI涵盖的含氟类气体更为广泛，包括了生产光伏板和平板显示器的排放，以及来自HFC-143a、HFC-152a和HFC-245fa的排放，而LBNL并不包括这些排放源。在WRI的参考情景和LBNL的类似情景中，上述不同导致2030年两家机构预测的含氟类气体排放量产生了约35%的差距。

图 13 | 含氟类气体的预测排放量对比



来源：世界资源研究所根据 Fawcett et al. (2015) 和 Lin et al. (2018) 进行整理

其次，一些气体的历史排放量数据在各项研究中都不同。比如，在参考情景或类似情景中，WRI和LBNL均预测HFC-134a排放量在2012年至2030年间会增长，且增长率相近（分别为378%和372%）。然而，LBNL的研究中，2012年排放量数据仅为气候变化第一次两年更新报告中给出数据的27%，而后者也是WRI采用的数据。在参考情景和类似情景下，HFC-134a排放量的上述差异导致2030年两家机构预测的排放量产生了约23%的差距。

最后，几份研究采用的研究方法和假设均不同。比如，对于空调器和电冰箱的HFC-125排放，以及金属和半导体生产产生的含氟类气体排放，WRI和LBNL采用了比较接近的2012年历史排放量数据，但是WRI预测这些领域的排放增长要比LBNL的预测快很多。在参考情景和类似情景下，HFC-125和含氟类气体排放量的上述差异，导致2030年两家机构预测的排放量产生了约32%差距。

## 讨论

**减少非二温室气体的排放除了气候效益之外，还存在巨大的环境、社会和经济效益。**由于甲烷排放会增加对流层臭氧含量，而臭氧是雾霾的一种重要成分，因此减排甲烷有助于改善空气质量

量，并减少由于心肺疾病带来的（尤其是儿童和老人）过早死亡。减排甲烷能够防止形成对流层臭氧，还有益于粮食生产和生态系统保护（CCAC n.d.）。同时，由于一氧化二氮会消耗平流层臭氧，减排一氧化二氮也会减少皮肤癌和眼科疾病的发病率，并且有助于保障粮食生产（Leaf 1993）。

采取非二温室气体的减排措施还存在显著的社会和经济效益。回收煤矿甲烷可以降低爆炸的风险，提升工矿区安全水平。减少填埋场的甲烷排放也会降低恶臭，这也是公共投诉的一大领域。Cai et al. (2018) 的研究结论认为，填埋场减排甲烷会随着相关措施的实施进程而减少恶臭，并且中国因此受到影响的人口也会减少。收集到的甲烷若加以利用，则是一种清洁能源，排放更少的空气污染物，同时还节省了能源成本。一氧化二氮的减排也同样具有节省成本的效益。例如，Kanter et al. (2015) 估算认为，如果减少氮肥施用能够得到正确实施，那么中国农民在20年内可以省下约20%的肥料成本。

采取早期行动控制氢氟烃，可能会减少兑现《基加利修正案》义务的成本。根据《基加利修正案》的要求，中国需要从2024年起减少氢氟烃的排放和生产。在预测到这一限制的情况下，中国可以限制新建相关生产设施，并且减少由于搁浅资产所导致的经济损失。

表 3 | 助力提升减排力度的关键措施

排放源	力度水平	减排措施	可行性说明
氢氟烃（HFCs）	中等	在2024年至2029年间，将氢氟烃产量冻结在所允许基准水平的90%，并且以线性方式削减氢氟烃的生产，以达成《基加利修正案》的目标	预见到即将进行削减而控制生产量，将会避免产能过剩形成搁浅资产
	较高	除了采取中等力度的措施外，到2030年分别以四氟丙烯（HFO-1234yf）和丙烷（propane）替代50%的HFC-134a和HFC-410a，并且逐渐提高替代率	专家根据中国的当前市场情况、专利和试点工作状况作出的判断（Lin et al. 2018）
煤炭开采逸散甲烷排放	中等	要求对浓度超过9%的所有的煤矿甲烷排放进行利用或燃烧排空	尤其是浓度相对更高的煤矿甲烷在应用时，该措施的实施成本较低（每吨二氧化碳当量0.5至11美元）（杨礼荣等2014）
	较高	除了采取中等力度的措施外，将2030年的煤炭消费量减少至低于20亿吨标准煤	中国煤炭消费总量控制方案和政策研究项目（2016）纳入了大量研究人员和利益相关方的意见，包括关键的行业协会的意见，该项目开展的一系列一手研究均认为这是可行的

表 3 | 助力提升减排力度的关键措施（续）

排放源	力度水平	减排措施	可行性说明
硝酸和己二酸生产一氧化二氮排放	中等	要求所有的己二酸和硝酸生产设施进行一氧化二氮的减排	即便没有清洁发展机制的支持，这些措施的实施成本也较低：己二酸生产为每吨二氧化碳当量 0.12 至 1.35 美元；硝酸生产（二级处理）为每吨二氧化碳当量 0.2 至 10 美元。己二酸生产非常集中，硝酸生产分散一些但是生产设施的数量仍然是便于管理的，因此管控法规应该较容易实施（EPA 2013；Schneider and Cames 2014；杨礼荣等 2014）
	较高	加快采取中等力度的措施，并且将这一要求推广至更小型的硝酸生产设施	
农田一氧化二氮排放	中等	推广肥料管理的最佳措施，减少对水稻、小麦、玉米和各类经济作物等施用氮肥	这些措施的成本为负（Wang et al. 2014）
	较高	制定从 2020 年起减少氮肥施用的目标，到 2050 年，氮肥施用量减至 2015 年水平的 50%	专家判断（李玉娥 2018；Lin et al. 2018）
肠道发酵甲烷排放	中等	推广家畜繁育措施，在禽畜饲料中加入益生菌和茶皂苷，以及其他改善饲料营养平衡的措施	这些措施的成本为负（Wang et al. 2014）
	较高	进一步措施包括改进饲料的可消化性和营养平衡，以提升肉类和奶类的产量	专家的判断（Lin et al. 2018）
水稻栽培甲烷排放	中等	加快改善灌溉和肥料的施用方式	这些措施的成本为负并且可以在中国进一步推广（李玉娥 2018；Lin et al. 2014；Tian et al. 2018）
	较高	除了采取中等力度的措施外，试点利用和促进使用硝化抑制剂、缓释肥料和生物炭	文献综述以及专家的判断（李玉娥 2018；Linquist et al. 2012；Xiao et al. 2018）
污水处理甲烷排放	中等	要求所有新建的和已有的主要厌氧污水处理厂（含市政污水和工业废水）安装甲烷回收系统	这一措施的实施成本（每吨二氧化碳当量 7 至 9 美元）是可接受的，并且根据中国污水处理厂的现状，还有巨大的潜力（蔡博峰等 2015；杨礼荣等 2014）
	较高	除了加快采取中等力度的措施外，要求相关措施推广至更多设施	
禽畜粪便甲烷排放	未评估	在“十四五”规划期间及之后，对农村沼气和禽畜农场制定并达成有力度的沼气发展目标	国家发展和改革委员会和原农业部（2017）估算认为，中国生物制气的生产潜力约为 1227 亿立方米。“十三五”规划的目标若到 2020 年全面达成，也仅仅占到这一潜力的不到 17%
固体废弃物甲烷排放	未评估	在“十四五”规划期间及之后，制定并达成有力度的固体废物回收目标	中国在重点城市已经在采取行动加强回收固体废物（国家发展和改革委员会和住房和城乡建设部 2016）。在今后设定一个国家回收目标应当是可行的
电力设备六氟化硫排放	未评估	促进六氟化硫的回收、替代、泄露检测和设备整修。进一步措施包括减少电力需求，也有助于减少排放	相关措施来源于 Zhou et al.（2018）和 EPA（2013）。美国国家环境保护局估算认为，大部分措施的成本都不到每吨二氧化碳当量 2 美元

备注：本表中与强化政策情景排放趋势范围的高限相吻合的措施归类为中等力度，而与强化政策情景排放趋势范围的低限相吻合的措施归类为较高力度。  
来源：世界资源研究所（WRI）

**已经有诸多现成的减排措施。**为了实现强化政策情景所需的有关假设，本文识别了一些减排措施。表3总结了这些措施并且给出了相应的可行性说明。

**排放交易体系可能会推进非二温室气体减排。**由于大部分减排措施的成本较低，排放交易体系可能会被用作减少非二温室气体的排放。对于硝酸和己二酸生产中产生的一氧化二氮排放，以及铝、集成电路、平板显示器、光伏板生产所产生的含氟类气体，由于排放源往往集中于少数工业设施，并且其相关排放量的测量、汇报及核证也相对简单，因此尤其适于采用排放交易体系来管控其排放量。由于非二温室气体具有很高的全球增温潜能，如果中国的碳排放交易体系中纳入这些气体，企业就有动力减排。

中国的全国排放交易体系在第一阶段仅仅涵盖电力部门和二氧化碳排放。如果将该体系扩展至覆盖上述行业，并且在随后的阶段中纳入非二温室气体，中国就能解锁一些巨大的减排潜力。

## 建议

**基于上述发现，本文建议中国在其2020年新提交的或更新的国家自主贡献中，提出明确的、有力度的非二温室气体控制目标并采取相应的行动措施，并在2025年前识别进一步减排的途径。**

提出更有力的国家自主贡献对于达成《巴黎协定》的目标是至关重要的。全面实施新的或更新的国家自主贡献，其累计排放量应当比实施现有的国家自主贡献更低，由此才能说目标是有力度的（Fransen et al. 2017）。

中国当前的国家自主贡献的主要量化目标中未包括非二温室气体。中国支持《基加利修正案》但尚未正式核准。中国在其气候变化第一次两年更新报告中提到，工业过程一氧化二氮排在2020年实现零增长的目标，也不在2015年提出的国家自主贡献中。由于这两项政策占到了现有政策（相较于参考情景）减排量的80%以上，因此中国新提出的或更新的国家自主贡献中应全面纳入这些政策的影响。

采取行动管控非二温室气体可以展现中国的气候领导力，并为达成《巴黎协定》的目标释放积极信号。本研究证明，中国到2030年前在非二温室气体领域额外累计减排15亿至30亿吨二氧化碳当量是可行的。由于存在发展和气候的效益，中国应当在当前政策的基础上，采取以下列出的一项或多项方案来提升其国家自主贡献。这些方案并不相互排斥。

**方案1：制定一个覆盖全领域的、包括二氧化碳和非二温室气体在内的、有力度的温室气体减排目标。**首先，有力度的目标应当考虑进一步减排二氧化碳的潜力。此外，中国可以承诺2020年起非二温室气体排放达到稳定，并承诺努力促成相关排放放在十年内尽早开始降低。

**方案2：制定一个覆盖全领域的非二温室气体有力度的减排目标。**有力度的非二温室气体目标可以包括承诺非二温室气体自2020年起排放达到稳定，并承诺努力促成相关排放放在十年内尽早开始降低。

**方案3：对各类温室气体分别制定有力度的减排目标。**有力度的减排目标应该囊括大部分的非二温室气体，包括2030年甲烷排放相对2014年排放量减少7%至21%，2030年一氧化二氮排放相对2014年排放量减少7%至11%，以及承诺采取早期行动使得氢氟烃（HFCs）的累计排放低于《基加利修正案》要求的排放限额。

**方案4：承诺对各个排放源实施有力度的行动。**作为第一步，政策制定者应当实施表ES-1中列出的所有措施和目标。

方案1、方案2和方案3的优势在于能够清楚地表明温室气体排放量，而仅仅采纳方案4可能会让人难以了解国家自主贡献的减排影响。在方案1和方案2中，中国实现相关目标的灵活性更高，在某一领域的绩效若不尽人意，在其他领域超额完成目标即可弥补。相比之下，方案3和方案4对于具体监管部门、企业、投资者和消费者来说就更明确，更具有针对性。

即便中国完全采纳了上述建议，减排量很可能仍然不足以实现《巴黎协定》的2°C目标，遑论1.5°C目标（Robiou du Pont and Meinshausen 2018）。然而，随着技术进步并逐渐成熟，低成本的可行减排方案的范围很可能会有所扩展。更多的最新数据、不断涌现的经济社会趋势，以及新的研究等，都可能会带来增加减排潜力的政策。因此，在数年内，本着在2025年前提升减排力度的初衷，政策制定者应当重新评估中国在非二温室气体领域的减排潜力。

## 附录A. 各种情景下预测中国非二氧化碳温室气体排放的方法论和关键假设

### 总体假设

#### 国内生产总值

本文采用了多项已有的国内生产总值增速预测值的均值，相关预测来源于多家具有经济研究能力的知名机构。2018年至2020年的预测均值取自国际能源署（IEA 2017a, 2017b）、国际货币基金组织（IMF 2017）、经济合作与发展组织（OECD n.d.）和世界银行（World Bank 2018）。2021年至2040年的均值取自国际能源署（IEA 2017a, 2017b）和经济合作与发展组织（OECD n.d.）。而2041年至2050年的均值则来自国际能源署（IEA 2017a）和经济合作与发展组织（OECD n.d.）。由于中国经济在过去几年经历了显著变化，因此本研究只纳入了2017年后发布的预测。表A1列出了国内生产总值增速的假定数值。

署（IEA 2017a, 2017b）和经济合作与发展组织（OECD n.d.）。而2041年至2050年的均值则来自国际能源署（IEA 2017a）和经济合作与发展组织（OECD n.d.）。由于中国经济在过去几年经历了显著变化，因此本研究只纳入了2017年后发布的预测。表A1列出了国内生产总值增速的假定数值。

#### 人口

由于缺乏多项研究预测，本文假设在某一时间点以后，某些情景下的某一些排放源相关的活动数据会随着人口变化而改变。这些假设基于本文作者的判断，认为随着中国经济的成熟，人均需求会变得稳定，因此总的活动数据主要受到人口变化的影响。表A2详细列出了相关的活动数据，以及相关的情景和时间段。

表 A1 | 国内生产总值增速的假定值

年份	2018—2020	2021—2025	2026—2030	2031—2035	2036—2040	2041—2045	2046—2050
增速	6.45%	5.28%	4.96%	3.25%	3.03%	1.63%	1.53%

来源：国际能源署（IEA 2017a, 2017b）、国际货币基金组织（IMF 2017）、经济合作与发展组织（OECD n.d.）和世界银行（World Bank 2018）预测值的均值

表 A2 | 假定活动数据与人口数等比例变化的各排放源、情景和时间段

排放源	受影响的情景	受影响的时间段
硝酸和己二酸生产	参考情景	2031—2050
HFC-143a、HFC-245fa、HFC-152a、HCFC-141b、HCFC-142b、HFC-134a (通过轻型汽车销售量)	参考情景	2031—2050
金属生产（铝）	参考情景，现有政策情景，强化政策情景	2041—2050
集成电路生产	参考情景，现有政策情景，强化政策情景	2031—2050
平板显示器生产	参考情景，现有政策情景，强化政策情景	2031—2050
水稻栽培	参考情景，现有政策情景，强化政策情景	2031—2050
肠道发酵和禽畜粪便管理 (通过肉牛、奶牛、山羊、绵羊和生猪的清单)	参考情景，现有政策情景，强化政策情景	2031—2050
农业土壤（通过氮肥施用量）	参考情景，现有政策情景，强化政策情景	2031—2050
固体废物（通过固体废物产生量）	参考情景，现有政策情景，强化政策情景	2031—2050
污水处理产生的甲烷排放（通过工业废水）	参考情景，现有政策情景，强化政策情景	2020—2050
污水处理产生的甲烷排放（通过生活污水）	参考情景，现有政策情景，强化政策情景	2030—2050
污水处理产生的一氧化二氮排放	参考情景，现有政策情景，强化政策情景	2013—2050

来源：世界资源研究所

表 A3 | 不同年份中国人口的假定值

年份	2017	2020	2030	2040	2050
人口 (千人)	1,409,517	1,416,762	1,441,182	1,402,820	1,364,457

来源：联合国经济与社会事务部 (UNDESA 2017)

表 A4 | 各个情景下假定的化石燃料需求总量

年份	2012	2020	2030	2040	2050
化石燃料需求总量 (百万吨标准煤)	3,631	4,250	4,227	4,130	4,035

来源：国际能源署 (IEA 2017b) 和作者推算

表 A5 | 各种情景下煤炭生产量的假定值

年份	2012	2020	2030	2040	2050
参考情景、现有政策情景、强化政策情景排放量范围的高限 (百万吨标准煤)	2,675	2,614	2,536	2,365	2,205
强化政策情景排放量范围的低限 (百万吨标准煤)	2,675	2,614	1,978	1,419	907

来源：国际能源署 (IEA 2017b)、中国煤炭消费总量控制方案和政策研究项目 (2016) 和作者的推算

表 A6 | 各种情景下石油和天然气生产量的假定值

年份	2012	2020	2030	2040	2050
石油和天然气生产量 (百万吨标准煤)	442	552	494	539	599

来源：国际能源署 (IEA 2017b) 和作者的推算

中国的人口预测数据取自联合国经济和社会事务部（UNDESA 2017），而在其没有数据的年份，本文直接插入了预测的人口数。表A3给出了不同年份中国人口的假定值。

## 2012年的排放量

2012年大多数的排放量都取自中国的气候变化第一次两年更新报告（中国政府 2016），以下数据除外：

- 气候变化第一次两年更新报告不包括使用HFC-32、HFC-125、HFC-143a和HFC-152a的排放量数据。由于使用这些物质造成了这些物质大部分的排放，因此本文引用了Fang et al.（2016）给出的排放量估计值。
- 气候变化第一次两年更新报告不包括来自半导体、平板显示器和光伏板生产所产生的全氟化碳（PFCs）、六氟化硫（SF<sub>6</sub>）和三氟化氮（NF<sub>3</sub>）的排放量数据，因此本文采用了美国国家环境保护局（EPA 2013）对2012年排放量的估计值进行计算。

## 能源部门

### 燃料燃烧产生的甲烷和一氧化二氮排放

在所有的情景下，本文假定排放量与一次能源需求总量中的化石燃料消费量是成正比的，后者的数据取自《能源发展“十三五”规划》（国家发展和改革委员会 2016a）和国际能源署《2017年世界能源展望》（IEA 2017b）中的新政策情景（NPS）。而2041年至2050年的预测值则是根据《2017年世界能源展望》中新政策情景对2030年和2040年的预测值进行推算得出的。本文采用的是《2017年世界能源展望》中的新政策情景，而非现有政策情景（CPS），这是因为新政策情景与2015年中国的国家自主贡献是一致的，因此与本文中现有政策情景的定义更吻合。表A4展示了各个情景下假定的化石能源需求总量。

### 煤矿开采中的逸散性排放

本文采用气候变化第一次两年更新报告（中国政府 2016）的数据以及2012年的煤矿甲烷利用率数据（Huang 2013），首先量化了2012年回收利用前的煤矿瓦斯排放量。接着，本文假定排放量与煤炭产量预测值等比例变化，进而量化了未来进行减排前的煤矿瓦斯排放量。最后，从未来回收利用前的煤矿瓦斯排放量中扣除掉利用量的预测值，就量化了未来的逸散性排放。

2012年至2040年间的煤炭生产数据取自《中国能源统计年鉴2017》（国家统计局 2017）、《煤炭工业发展“十三五”规划》（国家发展和改革委员会、国家能源局 2016）、《“十三五”电力煤控中期评估与后期展望》研究报告（中国煤炭消费总量控制方案和政策研究项目 2018）以及《2017年世界能源展望》的新政策情景（IEA 2017b）。2041年至2050年的预测值是根据《世界能源

展望》中新政策情景对2030年和2040年的预测值进行推算得出的。本文采用的是《2017年世界能源展望》中的新政策情景，而非现有政策情景，这是因为新政策情景中的政策目标与中国2015年提出的国家自主贡献承诺是一致的，与本文中现有政策情景的定义更吻合。

2015年至2020年的煤矿瓦斯利用率取自国家能源局（2017）。由于中国对煤矿瓦斯排放制定的标准是低于30%的浓度（原环境保护部、原国家质量监督检验检疫总局 2008）。因为浓度高于30%的甲烷气体是很容易利用的，本文假定被回收但没有被利用的煤矿瓦斯全部被排放。

参考情景：假定2015年之后，煤矿瓦斯利用保持在2015年水平。

现有政策情景：假定2020年之后，煤矿瓦斯利用保持在2020年水平。

强化政策情景排放量范围的高限：杨礼荣等（2014）根据安装甲烷回收、利用或燃烧排空系统等情况，估算了甲烷减排成本的范围为每吨二氧化碳当量0.5至11美元。考虑到这一成本较低，可以假设浓度相对较高（高于9%）的甲烷都能够被利用，或者被燃烧排空。

强化政策情景排放量范围的低限：除了安装甲烷排放的回收、利用或燃烧排空系统外，本文假定中国会减少2020年至2050年的煤炭消费量，减至中国煤炭消费总量控制方案和政策研究项目（2016）中煤炭控制情景的预测水平，同时煤炭的生产量和排放量也可以成比例地下降。表A5给出了各种情景下煤炭生产量的假定值。

### 石油和天然气体系的逸散性排放

所有的情景假定排放量与石油和天然气的生产量是成比例的，生产量取自《天然气发展“十三五”规划》（国家发展和改革委员会 2016b）、《石油发展“十三五”规划》（国家发展和改革委员会 2016c），以及《2017年世界能源展望》中的新政策情景（国际能源署 2017b）。2041年至2050年的预测值则是根据《2017年世界能源展望》中新政策情景对2030年和2040年的预测值进行推算得出的。本文采用的是《2017年世界能源展望》中的新政策情景，而非现有政策情景，这是因为新政策情景中的政策目标与中国2015年提出的国家自主贡献承诺是一致的，与本文中现有政策情景的定义更吻合。表A6展示了各种情景下石油和天然气生产量的假定值。

本文以石油和天然气的总产量（能源含量）来估算排放量，这是因为缺乏2012年石油和天然气的细分数据。这种方法没有考虑到石油和天然气生产的排放因子有所不同，更没有考虑到传统天然气和页岩气排放因子的不同。因此，该预测不太准确。然而，由于石油和天然气生产产生的排放很小（2012年仅占非二氧化碳温室气体的1%），因此这种简化产生的影响相当有限。

## 工业过程

### 硝酸和己二酸生产

参考情景：2020年的排放量取自杨礼荣等（2014）研究中的参考情景，该研究假定己二酸产量在2020年达到140万吨（排放因子为每吨己二酸排放0.296吨一氧化二氮），并且硝酸产量在2020年达到1700万吨（排放因子为每吨硝酸排放0.0095吨一氧化二氮）。此外，假定硝酸和己二酸未来不采取减排行动。2030年的预测是根据己二酸生产预计每年增长5%而计算得出的（Schneider and Cames 2014），这一假设很接近全球己二酸市场每年增长4.7%（直至2024年）的预测（GVR 2018）。同时，还假设2031年至2050年的生产量和相关排放也随着人口变动而等比例变化。

现有政策情景：直至2020年，排放量均与参考情景相同。根据气候变化第一次两年更新报告提出的目标，2020年之后的排放量保持在2020年的水平（中国政府 2016）。

强化政策情景排放量范围的高限：假设己二酸生产产生的排放占到了硝酸和己二酸相关排放的75%，该比例等同于杨礼荣等（2014）对2020年作出的预测。己二酸生产的技术减排成本预计为0.12至1.35美元（Schneider and Cames 2014）。在2010年，全世界有75%的己二酸生产设施都配备了减排系统，其中11个生产国中有7个都达到了100%的安装比例（EPA 2013）。此外，己二酸生产高度集中且易于管控，因此假定中国到2030年可以对全部己二酸生产设施安装减排系统。减排有效率约为99%（Schneider and Cames 2014）。

硝酸生产（二级处理）的减排成本预计为0.2至10美元，减排有效率能达到100%（Schneider and Cames 2014）。与己二酸相比，硝酸生产设施分布更为分散（EPA 2013），减排成本也更高。因此，假定2030年中国的硝酸生产设施中有20%安装了减排设施减排（二级处理），到2050年增至80%。

强化政策情景排放量范围的低限：根据上述同样的文献，假定采取了更为积极的政策，中国到2030年可以对全部己二酸生产

设施安装减排系统，同时，中国的硝酸生产（二级处理）中进行技术调整的比例，到2030年和2050年分别达到40%和100%。

### 三氟甲烷（HFC-23）

参考情景：排放量取自Feng et al.（2016）研究中的趋势照常情景。假定中国会按照《蒙特利尔议定书》淘汰消耗臭氧层物质并生产二氟一氯甲烷，尽管国内原料生产量仍然会随着国内生产者成比例增加。用作出口的原料生产量根据除中国之外的全世界总产值的增速进行推算得出。假定在没有三氟甲烷减排法规之后，清洁发展机制（CDM）各个项目仍会在政府支持下运作。

现有政策情景和强化政策情景：假定中国在2020年前会核准《基加利修正案》（赵静 2017），根据该修正案的2J（6）款，三氟甲烷排放量到2020年应当为零（UN Environment Ozone Secretariat 2018）。

### 其他氢氟烃（HFCs）

本文首先量化了氢氟烃的需求量，这代表了在没有其他限制的情况下将会出现的氢氟烃消费量。在这一需求的基础上，本文在各个情景中加入了各种对消费的限制（或根本不允许消费），量化了氢氟烃的消费量。最后根据年消费量、设备中的各类氢氟烃存量和排放因子计算排放量。计算公式和各个排放因子均取自Fang et al.（2016）。

在所有的情景下，假定排放因子都是不变的，并且也不采取回收氢氟烃的措施。由于生产端的氢氟烃排放量很小，因此本文仅仅研究了氢氟烃消费端产生的排放。

### 需求量的测算

本文沿用了Fang et al.（2016）采用的方法，把氢氟烃需求量分为两个部分，其中第一个部分就包括了2015年前已有氢氟烃需求量的自然增长。

HFC-32和HFC-125主要用于室内空调器（ACs）和电冰箱，本文假定其需求量会随着中国室内空调器的销量而增加。本文采

表 A7 | 中国轻型汽车和室内空调器的历史和预测销售量（三年平均值）

年份	2012	2020	2030	2040	2050
轻型汽车（百万）	15.5	31.5	35.7	34.7	33.85
房间空调器（百万）	56	79	100	111	118

来源：Kuhnert et al.（2018）、国际能源署（IEA 2018）和作者计算

用了2012年至2014年间的表观消费量均值（浙江省化工研究院2016），并对出口量进行了调整。由于表观消费量包括了HFC-32和HFC-125，这些物质用于制造供出口的室内空调器，而与出口设备相关的排放不应纳入中国的温室气体清单当中，因此相关调整是必要的。本研究采用了中国产业信息网（2018）给出的2012年至2014年间室内空调器的国内外销售量比例，计算了2012年至2014年间HFC-32和HFC-125的国内需求量均值。

HFC-143a、HFC-245fa和HFC-152a主要用于车载制冷设备和发泡剂。由于氢氟烃的需求量有可能在发展达到某一程度之前与经济活动存在紧密关系，本文假定这些氢氟烃的需求在2030年前会随国内生产总值等比例增加，并在2030年后随着人口的变动等比例变化。一旦经济达到成熟阶段后，人均需求就应该变得稳定，并且主要受人口变化的影响。这一假定与Feng et al.（2016）的研究一样。HFC-134a主要用于车载制冷设备，假定其需求量会随着轻型汽车销售量的变化而等比例变化。

本文采用2012年至2014年间的年度表观消费量，计算了HFC-134a、HFC-143a、HFC-245fa和HFC-152a的基准需求量（浙江省化工研究院2016）。由于中国使用这些物质的设备中出口比例不大，因此未对其进行出口调整。

2017年至2030年，轻型汽车销售量的预测值取自Kuhnert et al.（2018）。由于中国的轻型汽车销售量可能在2030年前达到峰值，本文假定在2031年至2050年间，轻型汽车的销售量会随着人口变动而改变。本文还采用了国际能源署（2018）给出的中国室内空调器清单的预测，假设使用寿命为12年，计算了每年的室内空调器销售量。由于室内空调器和轻型汽车每年的销售量存在较大的年际波动，因此采用了三年的平均值。表A7给出了轻型汽车和室内空调器的历史销售量和预测销售量。

氢氟烃需求量的第二部分来自于对氢氯氟烃的替代。

根据1997年修订的《蒙特利尔议定书》的规定，氢氯氟烃在中国的销售和生产自2015年起就面临着配额限制，并且该配额还将逐渐降低，直至2040年完全淘汰。假定被淘汰掉的氢氯氟烃有一部分会被氢氟烃替代，因此也就增加了氢氟烃需求量。

本文首先采用了2015年前的基准线水平氢氯氟烃消费比例，以及未来数年内室内空调器和国内生产总值增速的预测值，由此计算了没有配额限制的氢氯氟烃需求量。随后，本文采用氢氟烃的基准需求量、氢氯氟烃配额和替代因子量化了因氢氯氟烃淘汰而产生的氢氟烃需求量。

2012年至2014年间，二氟一氯甲烷（HCFC-22）、HCFC-141b和HCFC-142b的平均消费量取自执行《蒙特利尔议定书》多边基金的秘书处（2016）。二氟一氯甲烷主要用作空调器和电冰箱的制冷剂，2015年前其消费量中的一部分用于生产有关的家用电器，最终被用于出口。代替这一部分氢氯氟烃的氢氟烃不应被纳入中国的国家温室气体排放清单中。本研究采用了中国产业信

息网（2018）给出的2012年至2014年间室内空调器的国内外销售量比例，计算了2012年至2014年间二氟一氯甲烷的国内需求量均值。其余的氢氯氟烃并未做出口调整，这是因为相关设备的出口量不大。

假设没有配额限制，二氟一氯甲烷的国内需求量会与室内空调器的国内销售量等比例增长。而对于HCFC-141b和HCFC-142b，假设其需求量在2030年前会与国内生产总值等比例增长，在2030年后与人口变动等比例变化。上述假设也是Fang et al.（2016）的研究所采用的。氢氯氟烃的配额取自联合国环境规划署臭氧秘书处（UN Environment Ozone Secretariat 2018）。二氟一氯甲烷的配额还进行了调整，剔除了生产用于出口的空调器所使用的配额。氢氟烃和氢氯氟烃之间的替代因子取自Fang et al.（2016）。

### 消费量的测算

参考情景：如果没有《基加利修正案》，那么除了中国的国家自主贡献中提到的三氟甲烷控制目标之外，就没有任何控制氢氟烃的法规，其需求量和消费量是一样的。

现有政策情景：直到2023年前，氢氟烃消费量和需求量都是一样的。假设中国会核准《基加利修正案》，并且遵守其有关规定。

根据《基加利修正案》，2020年至2022年间氢氟烃的平均消费量加氢氯氟烃基准消费量的65%，就是氢氟烃的基准消费量。《基加利修正案》下许可的氢氟烃消费量包括了国内的和出口的有关设备中所使用的氢氟烃。本文剔除了生产用于出口的有关设备的氢氯氟烃基准消费量，以及2020年至2022年间出口的设备所使用的HFC-32和HFC-125，从而建立起氢氟烃国内消费量的基准线。2024年至2029年，氢氟烃的国内消费会冻结在基准线水平，并且根据《基加利修正案》规定的时间表逐渐削减。

强化政策情景排放量范围的高限：直至2023年，氢氟烃消费量和需求量都是一样的。2024年后的消费量根据以下假设进行量化：2024年至2029年间，假定氢氟烃的国内消费量保持在氢氟烃国内消费量基准线水平的90%。从2030年起，假定氢氟烃消费量每年会等量减排（而不是像《基加利修正案》规定的分阶段减排），满足《基加利修正案》规定的限制消费量的目标和时间表要求。上述假设是有成本效益的，这是因为安装的生产设备通常都会有十年的折旧期。如果比进度提前五年控制和减少氢氟烃消费和生产，有可能会减少搁浅资产所导致的经济损失。

强化政策情景排放量范围的低限：直至2019年，氢氟烃消费量和需求量都是一样的。2020年后的消费量根据以下假设进行量化：到2030年，四氟丙烯（HFO-1234yf）和丙烷（propane）会分别替代50%的HFC-134a和HFC-410a，并且替代率到2035年提升至100%。这些假设与Lin et al.（2018）的研究很相似，并且分析了世界范围内（包括在中国）的四氟丙烯应用和专利现状，以及在江苏省的生产状况。该研究（Lin et al. 2018）为了建立起替

代情景，还考虑采用丙烷，并且研究了中国的的美的集团开展的试点工作。其他氢氟烃的消费量与强化政策情景排放量范围的高限是一样的。

## 金属（铝）生产

在所有情景下，假定与铝生产相关的排放量是与原铝产量成比例的，2020年的生产量数据取自《有色金属工业发展规划（2016—2020年）》（工业和信息化部 2016），假定2021年至2040年的生产量等于原铝需求量（Abubakar 2015），假定2041年至2050年的排放量与人口数量是等比例变化的。

## 集成电路生产或半导体生产

在所有情景下，本文均采用了美国国家环境保护局估算的排放量（EPA 2012），基准线假定活动数据与中国大陆集成电路（IC）生产量成等比例变化。根据世界半导体理事会（WSC 2016）的研究成果，2010年至2020年间排放因子会降低30%。假定2020年后排放因子不再进一步降低。2010年至2018年的产量数据取自前瞻产业研究院（2018a）和中商产业研究院（2018）。假定2019年至2020年中国集成电路产量将会保持与2015年至2018年间同样的复合增长率。假定2020年至2026年中国大陆产量的增速会与亚太地区半导体的预测增速保持一致（Inkwood Research 2017）。假定2027年至2030年间产量会与GDP成等比例变化，并且在2030年后与人口数量成等比例变化。

## 平板显示器生产

所有情景均采用了美国国家环境保护局对2010年排放量的估算值（EPA 2012），且假定排放量与成品面积成一定比例。假定2010年至2011年的产量与同期生产能力成等比例变化（前瞻产业研究院 2018b）。2011年至2017年各地区产量数据取自前瞻产业研究院（2018c），并且假定2018年至2024年生产量与全球需求量成等比例变化（Hsieh 2018）。假定2025年至2030年间的产量与国内生产总值成等比例变化。2030年后，生产量会与人口数量成等比例变化。

## 光伏板生产

所有情景均采用了美国国家环境保护局对2010年排放量的估算值（EPA 2012），且假定其与中国太阳能电池的产量成一定比例。2010年至2017年的数据取自工业和信息化部（2018）。2017年至2020年间，假定中国大陆太阳能电池的产量与全球太阳能电池的产量成等比例变化（ESCN 2017；GVR 2017）。在2021年至2030年间，假定太阳能电池产量每年增长10%，而2031年至2040年间的增速为每年7%，并在2041年至2050年间降至每年5%。

## 电力设备

电力设备是利用六氟化硫（SF<sub>6</sub>）的主要部门，由于生产过

程中的排放可以忽略不计，因此也是未来六氟化硫排放的主要来源。在中国，半导体和镁的生产已经淘汰了六氟化硫。

Zhou et al.（2018）估算了2050年的六氟化硫排放量，并且作者们考虑了电力需求、电源构成、六氟化硫初始填充量、产品寿命周期，以及在生产、安装、运行和维护中的排放因子，还有其残留和回收比例（Zhou et al. 2018）。然而，这一研究假定的电力装机容量较高。更重要的是，该研究中2012年的六氟化硫排放量比气候变化第一次两年更新报告发布的数据几乎高了三倍。

本文对所有情景均进行了调整。首先，为了提升一致性，本文将假定的电力装机容量调整到《2017年世界能源展望》新政策情景中的水平（IEA 2017b）。由于Zhou et al.（2018）就电力装机容量对2050年预测排放量的影响进行了敏感性分析，因此这一调整是可能的。其次，假定气候变化第一次两年更新报告给出的排放量数据更为全面和准确，本文将其2012年的排放量作为基准线，并且采用了调整后的排放量增长率，得出了未来年份的排放量预测值。

## 农业部门

### 水稻栽培产生的甲烷排放

对于参考情景和现有政策情景，假定排放量会与中国水稻产区的估算面积成等比例变化，数据取自经济合作与发展组织和联合国粮食及农业组织发布的《1990—2028年农业展望》（OECD and FAO 2017）。2028年至2030年水稻产区的估算面积是根据2022年至2027年间预测值进行推算得出的。由于缺乏其他来源的预测数据，本文假定2031年至2050年中国水稻产区面积与人口变动成等比例变化。本文认为，一旦中国达到相对较高的人均粮食消费量水平之后，人均稻米需求将变得稳定，增长幅度有限，据此作出上述假定。

强化政策情景排放量范围的高限：Tian et al.（2018）采用了脱氮—解构模型、农业技术转移决策支持系统模型和农业生态区模型，并且根据对中国九个水稻主产区进行实地实验的结果，作者们估算认为，根据作物需要和土壤测试开展年中排灌和均衡施肥的措施，中国水稻栽培产生的甲烷排放可以减少25%，且成本为负。中国农业科学院的一位气候变化专家考虑到中国的水稻种植方式，也认同改善灌溉措施具有负成本或低成本减排的潜力。根据与专家们的讨论，Lin et al.（2018）假定2015年至2050年间中国可以相对于基准线减少30%的甲烷排放。由于水稻种植并不仅仅集中在中国，因此推广新工艺和新技术也存在挑战。因此，本文作出较为保守的假定，认为通过采用负成本或低成本的减排措施，到2030年和2050年，中国能够分别实现12.5%和25%的甲烷减排。

强化政策情景排放量范围的低限：中国农业科学院的一位气候变化专家认为，除了灌溉和改良施肥之外，使用硝化抑制

剂、缓释肥料和生物炭有可能进一步减少排放（李玉娥 2018）。Linquist et al. (2012) 综述了各项有关实验和研究，结论认为某些硝化抑制剂和缓释肥料可以减少15%的水稻栽培产生的甲烷排放。此外，中国的田野实验也表明，合理使用生物炭和节水灌溉措施还可能减少30%的甲烷排放（Xiao et al. 2018）。根据这一信息，假定在改善灌溉措施和减少肥料施用之外，到2030年和2050年，使用硝化抑制剂、缓释肥料和生物炭有可能比现有政策情景下的排放量分别减排30%和50%。

### 肠道发酵

对于肉牛、奶牛、山羊、绵羊和生猪，本文采用了2012年《中国统计年鉴》的数据，将有关牲畜的清单作为一条基准线，假定活动数据与经济合作与发展组织和联合国粮食及农业组织（OECD and FAO 2017）预测的2012年至2027年间的牲畜清单成等比例变化。本文还将经济合作与发展组织和联合国粮食及农业组织的预测推算至2028年至2030年。对于2030年至2050年，假定有关数据与同期人口数量成等比例变化。本文认为，一旦中国达到相对较高的人均粮食消费量水平之后，人均肉类需求将变得稳定，增长幅度有限，据此作出上述假定。

对于马、驴、骡和骆驼，本文采取与Lin et al. (2018) 一样的预测方法，根据历史数据进行了线性回归，假定动物清单在某一段时间内保持不变。

由于缺乏动物细分的数据，本文根据《省级温室气体清单编制指南（试行）》（国家发展和改革委员会 2011）对各相关的排放因子取均值，对每种动物都计算出一个简化的排放因子。

采用这一方法计算得出的2012年排放量要低于气候变化第一次两年更新报告发布的数据。假定该结果的偏差源于排放因子，并认为气候变化第一次两年更新报告的数据更为准确，因此将气

候变化第一次两年更新报告的数据除以前述计算得出的排放量数据，得出了调整系数（1.1978），然后将未来年份计算得出的排放量数值乘以该调整系数，从而得出最后的排放量预测值。

强化政策情景排放量范围的高限：Wang et al. (2014) 根据相关的综合分析和研究，对中国的畜牧业构建了一条减排成本曲线。由于中国的畜牧业并不集中且难以管理，因此假定仅仅采用一些成本为负的减排措施（见表A8），还假定到2030年和2050年，可以分别兑现这些措施70%和100%的减排潜力。

强化政策情景排放量范围的低限：Lin et al. (2018) 根据与专家们的讨论，假定通过改善牲畜饲料营养的均衡性和易消化性，到2020年和2050年，排放量可以分别减少17%和30%。虽然减排是2020年后才开始的，但本文假定了同样的减排率。

### 农业残留物的田野焚烧

这是中国排放量的一大重要来源。为简化计算，假定所有情景中相关排放都保持在2012年的水平。

### 禽畜粪便管理

所有情景均采用了与肠道发酵相关排放相同的方法论，由此来确定活动数据和排放因子。

参考情景：假定2015年后农村沼气没有任何新的发展。

现有政策情景和强化政策情景：本文纳入了2015年后新的沼气开发利用所带来的影响。由于缺乏量化的政策目标，假定2020年后农村沼气开发保持在2020年水平。根据《全国农村沼气发展“十三五”规划》，中国到2020年将会相对于2015年每年新增1762万吨二氧化碳当量的减排量（国家发展和改革委员会 原农业部 2017），这其中包括了减少禽畜粪便的甲烷排放，以及替代化

表 A8 | 强化政策情景下排放量范围的高限所假定的减排措施、成本与潜力

减排措施	2020年前的最大减排潜力（百万吨二氧化碳当量）	估算成本（美元/每吨二氧化碳当量）
动物育种改良	4.4	-395
饲料中添加益生菌	5.53	-8.6
饲料中添加茶皂苷	1.09	-1,089

来源：Wang et al. (2014)

石能源而减少的碳排放，同时还假定被替代的能源来自煤炭。根据《省级温室气体清单编制指南（试行）》（国家发展和改革委员会 2011）中的排放因子以及《全国农村沼气发展“十三五”规划》（国家发展和改革委员会 原农业部 2017）中提出的能源替代目标，计算得出禽畜粪便的甲烷排放将会减少900万吨二氧化碳当量。

## 农业土壤

参考情景和现有政策情景：假定排放量与氮肥的施用量成一定比例。2012年至2017年的数据取自国家统计局（NBS n.d.）。国际肥料工业协会评估认为，中国的化肥施用量还会缩减（IFA 2018），假定直至2020年氮肥施用量都会保持在2017年的水平。由于国家自主贡献中提出了零增长目标（国家发展和改革委员会 2015），气候变化第一次两年更新报告也提出了一氧化二氮零增长目标（中国政府 2016），假定2020年至2030年的排放量会保持在2020年水平。还假定氮肥施用量从2031年到2050年将会随人口数量等比例变化。本文认为，一旦中国达到相对较高的人均粮食消费量水平之后，对各类作物的人均需求将变得稳定，增长幅度有限，据此作出上述假定。

强化政策情景排放量范围的高限：Wang et al.（2014）根据相关的综合分析和研究，对中国的种植业构建了一条减排成本曲线。由于中国的种植业并不集中且难以管理，因此假定仅仅采用一些成本为负的减排措施（见表A9）。还假定到2030年和2050年，可以分别兑现这些措施70%和100%的减排潜力。

强化政策情景排放量范围的低限：Lin et al.（2018）根据与

中国科学院有关专家的讨论，指出中国的氮肥施用量超过了需要量，且假定氮肥施用量首先在2010年至2015年间将增加20%，接着到2050年会减少50%。本文也采纳了一个相近的假设，认为中国的氮肥施用量自2020年起会开始下降，并且到2050年减至2015年水平的50%。

## 废弃物行业

### 固体废物产生的甲烷排放

固体废物包括工业废物和市政固体废物。中国的工业废物大部分来自采矿、采石和其他行业部门（原环境保护部 2017），相关的排放量应该非常低（IPCC 2006）。因此，本文并未考虑工业废物产生的排放量。市政固体废物包括了来自城市和县乡的固体废物。由于县乡固体废物预测的研究很少，因此假定县乡层面的固体废物与城市层面的固体废物等比例变化。

在所有情景下，本文采用了与市政固体废物收集总量、无害化处理，以及三种处理方式（填埋、焚烧与其他）、填埋气回收等有关的数据，并且还采用了2012年发布的排放量数据（中国政府 2016），预测了固体废物产生的排放量。

本文采用马占云和高庆先（2018）构建的公式，预测了2030年前市政固体废物的收集总量，也即：市政固体废物的收集总量 =  $0.504 + 0.3124 \times \ln(\text{GDP})$ 。

2030年后，假定市政固体废物会随着人口等比例变化。这是由于经济发展到一定阶段之后，人均市政固体废物产生量趋向于

表 A9 | 强化政策情景下排放量范围的高限所假定的减排措施、成本与潜力

减排措施	2020年前的最大减排潜力（百万吨二氧化碳当量）	估算成本（美元 / 每吨二氧化碳当量）
肥料的最佳管理措施 ——正确的比例	30.65	-67
肥料的最佳管理措施 (小麦和玉米) ——正确的时间和正确的施用点	11.38	-475
肥料的最佳管理措施(经济作物) ——正确的产品、正确的时间和 正确的施用点	21.86	-290

来源：Wang et al.（2014）

稳定。例如，2005年间，美国人均市政固体废物的产生量与1990年基本持平（EPA n.d.）。

历史无害化处理率的数据取自《中国城市建设统计年鉴》（住房和城乡建设部 2013, 2016）。根据过去的趋势，假定无害化处理率到2030年将会达到100%。市政固体废物处理量根据收集总量和无害化处理率计算得出。填埋处理量根据市政固体废物处理量和填埋处理比例计算得出。假定诸如甲烷转化系数、市政固体废物的组成、氧化率、半衰期等参数均保持不变。由此，在考虑填埋气回收之前，市政固体废物产生的甲烷排放就与填埋处理量同比例变化。

根据《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC），截至2012年末，中国总共注册了56个填埋气清洁发展机制项目，测算年度减排量在2015年前达到734万吨二氧化碳当量（UNFCCC n.d.）。根据对所选取的一些清洁发展机制项目文件的数据，假定有15%的减排量是源于对化石燃料的替代，而另外85%则是因为减少了甲烷排放。进一步还假定这些清洁发展机制项目的减排量粗略等同于中国填埋气的回收量。

参考情景：假定填埋比率（住房和城乡建设部 2016）和填埋气回收形成的甲烷减排量（UNFCCC n.d.a）均会保持在2015年水平。

现有政策情景和强化政策情景：假定填埋比例和焚烧比例到2020年均会达到《“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施

建设规划》（国家发展和改革委员会 住房和城乡建设部 2016）的目标，并且2020年后将会继续保持该比例。还假定填埋气回收形成的甲烷减排量（UNFCCC n.d.a）也保持在2015年水平。

### 污水处理产生的甲烷排放

参考情景和现有政策情景：Du et al.（2018）采用了一种人工神经网络，根据国内生产总值、人口增长及有关的位置因素，计算了2020年由于污水处理产生的甲烷排放。本文中2020年的排放量取自上述研究。对于排放进入江河湖海的工业废水，假定从2021年至2050年的复合年变化率将会和2015年至2020年一致。对于排放进入污水处理厂的工业废水，假定2020年后的排放量与人口数量成等比例变化，这是因为Du et al.（2018）指出2018年至2020年间的相关排放量会变稳定。对于生活污水，假定2021年至2030年间的排放量会与国内生产总值成等比例变化，在2031年至2050年会与人口数量成等比例变化。

强化政策情景排放量范围的高限：杨礼荣等（2014）综述了污水处理领域的清洁发展机制项目，估算采用甲烷回收和/或进行燃烧排空的减排成本将会是每吨二氧化碳当量7至9美元。蔡博峰等（2015）根据市政污水处理厂的有关数据和实地实验结果，确定了中国市政污水处理厂的排放因子（见表A10）。该研究的作者们指出，中国的生活污水主要采用好氧工艺进行处理，而厌氧工艺是工业废水的主要处理方法。

虽然采用厌氧工艺和甲烷回收工艺的污水处理厂具有最小的

表 A10 | 中国市政污水处理厂的排放因子

污水处理	处理工艺	排放因子 (千克甲烷/千克化学需氧量)	2012年全国加权平均排放因子 (千克甲烷/千克化学需氧量)
生活污水	厌氧 + 甲烷回收	0.0030	0.0078
	厌氧	0.0440	
	主要好氧	0.0040	
工业废水	厌氧 + 甲烷回收	0.0008	0.0354
	厌氧	0.1400	
	主要好氧	0.0040	

来源：蔡博峰等（2015）

排放因子，但是将已建成的好氧工艺污水处理厂改建成厌氧工艺污水处理厂并不具有经济性。因此，假定主要采用好氧处理工艺的污水处理厂的排放因子就是中国能够实现的最低的排放因子。这意味着，与2012年全国的加权平均值相比，生活污水和工业废水还分别有49%和89%的减排潜力。

根据上面提到的原因和信息，假定在已建成的厌氧工艺污水处理厂基础上安装甲烷回收系统，生活污水处理产生的排放量到2030年和2050年可以分别减少20%和30%，而工业废水处理产生的排放量到2030年和2050年可以分别减少36%和53%。

强化政策情景排放量范围的低限：假定在已建成的厌氧工艺污水处理厂基础上安装甲烷回收系统，生活污水处理产生的排放量到2030年和2050年可以分别减少25%和44%，而工业废水处理产生的排放量到2030年和2050年可以分别减少46%和80%。

### 污水处理产生的一氧化二氮排放

在所有情景下，本文均采用气候变化第一次两年更新报告中的2012年数据（中国政府 2016）作为基准线，并且假定排放量在2030年至2050年与人口数量成等比例变化。

### 废物焚烧和固体废物填埋产生的一氧化二氮排放

在所有情景下，本文均采用气候变化第一次两年更新报告中的2012年数据（中国政府 2016）作为基准线，并且假定一氧化二氮排放量在2030年至2050年与市政固体废物填埋处理量和焚烧处理量成等比例变化。预测市政固体废物收集量的方法论和有关假设均与量化固体废物甲烷排放量一致。

参考情景：假设填埋比例和焚烧比例均保持在2015年水平（住房和城乡建设部 2016）。

现有政策情景和强化政策情景：假定市政固体废物填埋和焚烧的比例均会达到《“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划》（国家发展和改革委员会 住房和城乡建设部 2016）的目标，并在2020年后也保持该比例。

## 附录B. 中国非二氧化碳温室气体排放预测的电子表格

该电子表格可以点击以下链接下载：<https://bit.ly/2FQLZ3A>

## 参考文献

- Abubakar, A. 2015. "Primary Aluminum Demand: The Power of Demographics—Americas and Asia to Lead." Paper presented at the Platts Aluminum Symposium, Scottsdale, AZ, January 18–20. <https://www.platts.com/IM.Platts.Content/ProductsServices/ConferenceandEvents/2015/gc503/presentations/AdelAbubakar.pdf>.
- 蔡博峰, 高庆先, 李中华, 吴静, 曹东, 刘兰翠. 中国城市污水处理厂甲烷排放因子研究[J]. 中国人口·资源与环境. 2015. 25(04): 118-124
- Cai, B., Z. Lou, J. Wang, Y. Geng, J. Sarkis, J. Liu, and Q. Gao. 2018. "CH<sub>4</sub> Mitigation Potentials from China Landfills and Related Environmental Cobenefits." *Science Advances* 4 (7): EAAR8400. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar8400>.
- CCAC (Climate and Clean Air Coalition). n.d. "Tropospheric Ozone." <http://cca-coalition.org/en/slcp/tropospheric-ozone>. Accessed March 27, 2019.
- 中国煤炭消费总量控制方案和政策研究项目. 2016. 中国“十三五”煤炭消费总量控制规划研究报告. 美国自然资源保护协会. 北京. <http://nrdc.cn/Public/uploads/2017-01-12/5877316351a6b.pdf>.
- 中国煤炭消费总量控制方案和政策研究项目. 2018. 中国煤控项目“十三五”中期评估与后期展望研究报告. 美国自然资源保护协会. 北京.
- 中国产业信息网. 2018. 2017年我国家用空调行业市场销量分析. 1月9日. <http://www.chyxx.com/industry/201801/601728.html>.
- Du, M., Q. Zhu, X. Wang, P. Li, B. Yang, H. Chen, M. Wang, X. Zhou, and C. Peng. 2018. "Estimates and Predictions of Methane Emissions from Wastewater in China from 2000 to 2020." *Earth's Future* 6 (2): 252–63. <https://doi.org/10.1002/2017EF000673>.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2012. Global Anthropogenic Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Emissions: 1990–2030. EPA 430-R-12-006. Washington, DC: Office of Atmospheric Programs, Climate Change Division,
- EPA. [https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-08/documents/epa\\_global\\_nonco2\\_projections\\_dec2012.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-08/documents/epa_global_nonco2_projections_dec2012.pdf).
- EPA. 2013. Global Mitigation of Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases: 2010–2030. EPA-430-R-13-011. Washington, DC: Office of Atmospheric Programs, EPA. [https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/mac\\_report\\_2013.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/mac_report_2013.pdf).
- EPA. n.d. "National Overview: Facts and Figures on Materials, Wastes and Recycling." <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials>. Accessed February 20, 2019.
- 中国储能网. 2017. 中国光伏十年成长履历. 6月2日. <http://www.escn.com.cn/news/show-427030.html>.
- Fang, X., G.J.M. Velders, A.R. Ravishankara, M.J. Molina, J. Hu, and R.G. Prinn. 2016. "Hydrofluorocarbon (HFC) Emissions in China: An Inventory for 2005–2013 and Projections to 2050." *Environmental Science & Technology* 50 (4): 2027–34. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04376>.
- Fawcett, A.A., G.C. Iyer, L.E. Clarke, J.A. Edmonds, N.E. Hultman, H.C. McJone, J. Rogelj, et al. 2015. "Can Paris Pledges Avert Severe Climate Change?" *Science* 350 (6265): 1168–69. <https://science.sciencemag.org/content/350/6265/1168>.
- Fransen, T., E. Northrop, K. Mogelgaard, and K. Levin. 2017. "Enhancing NDCs by 2020: Achieving the Goals of the Paris Agreement." Working Paper. Washington, DC: World Resources Institute. <http://www.wri.org/publication/NDC-enhancement-by-2020>.
- GHG (Greenhouse Gas) Protocol. n.d. "Global Warming Potential Values." [https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29\\_1.pdf](https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf). Accessed August 1, 2018.
- 中国政府. 2016. 中华人民共和国气候变化第一次两年更新报告. 北京.
- 中国政府. 2018. 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告. 北京.
- GVR (Grand View Research). 2017. Solar PV Market Size, Share & Trend Analysis Report by Application (Residential, Non-residential/Commercial, Utility), Value Chain Analysis, Market Dynamics, and Segment Forecasts, 2012–2020. San Francisco: GVR.
- GVR. 2018. "Adipic Acid Market Size Worth \$8.0 Billion by 2024." <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/adipic-acid-market>.
- Hsieh, D. 2018. Flat Panel Display Market & Technology Outlook. London: HIS Markit. <http://xqdoc.imedao.com/16184d36f5150de13fd3f231.pdf>.
- Huang, S. 2013. "Current Situations of CBM/CMM Recovery and Utilization & Methane Emission Reduction in China." Paper presented at the Global Methane Initiative Expo, Vancouver, Canada, March 12–15. [https://www.globalmethane.org/expo-docs/canada13/coal\\_02\\_Huang\\_UPDATED.pdf](https://www.globalmethane.org/expo-docs/canada13/coal_02_Huang_UPDATED.pdf).
- IEA (International Energy Agency). 2017a. Energy Technology Perspectives 2017. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development/IEA.
- IEA. 2017b. World Energy Outlook 2017. Paris: Organisation for Economic Cooperation and Development/IEA.
- IEA. 2018. The Future of Cooling: Opportunities for Energy-Efficient Air Conditioning. Paris: IEA.
- IFA (International Fertilizer Association). 2018. "Fertilizer Outlook 2018–2022." Summary of the IFA Annual Conference, Berlin, June 18–20. Paris: IFA.

28. IMF (International Monetary Fund). 2017. World Economic Outlook 2017 Database. Washington, DC: IMF. <https://www.imf.org/en/publications/weo>. Accessed February 15, 2019.
29. Inkwood Research. 2017. Global Perimeter Security Market Forecast 2018–2026. Boston: Inkwood Research. <https://www.slideshare.net/sherrythomas13/semiconductors-market-research-report-analysis-20172024-inkwoodre-search-75843862>.
30. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A.
31. Kattenberg, and K. Maskell. Cambridge: Cambridge University Press. IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 5 vols. Geneva: IPCC. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.htm>.
32. IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller. Cambridge: Cambridge University Press. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4\\_wg1\\_full\\_report-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf).
33. IPCC. 2018. “Summary for Policymakers.” In Global Warming of 1.5° C, edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield. Geneva: IPCC. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15\\_SPM\\_version\\_report\\_LR.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf).
34. Kanter, D.R., X. Zhang, and D.L. Mauzerall. 2015. “Reducing Nitrogen Pollution while Decreasing Farmers’ Costs and Increasing Fertilizer Industry Profits.” *Journal of Environmental Quality* 44 (2): 325–35. <https://doi.org/10.2134/jeq2014.04.0173>.
35. Kuhnert, F., C. Stürmer, and A. Koster. 2018. Five Trends Transforming the Automotive Industry. London: PricewaterhouseCoopers. [https://www.pwc.at/de/publikationen/branchen-und-wirtschaftsstudien/easyc-five-trends-transforming-the-automotive-industry\\_2018.pdf](https://www.pwc.at/de/publikationen/branchen-und-wirtschaftsstudien/easyc-five-trends-transforming-the-automotive-industry_2018.pdf).
36. Leaf, A. 1993. “Loss of Stratospheric Ozone and Health Effects of Increased Ultraviolet Radiation.” In *Critical Condition: Human Health and the Environment*, edited by E. Chivian, M. McCally, H. Hu, and A. Haines, 39–150. Cambridge, MA: MIT Press.
37. 李玉娥. 2018. 作者与李玉娥关于农业领域减排措施的交流. 中国农业科学研究院. 北京. 12月17日.
38. Lin, J., N. Khanna, and A.X. Liu. 2018. “China’s Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Emissions: Future Trajectories and Mitigation Options and Potential.” Berkeley-Tsinghua Joint Research Center Working Paper 003. Berkeley, CA: Energy Analysis and Environmental Impacts Division, Lawrence Berkeley National Laboratory.
39. Linquist, B.A., M.A. Adviento-Borbe, C.M. Pittelkow, C. van Kessel, and K.J. van Groenigen. 2012. “Fertilizer Management Practices and Greenhouse Gas Emissions from Rice Systems: A Quantitative Review and Analysis.” *Field Crops Research* 135 (August): 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.06.007>.
40. 马占云, 高庆先等. 2018. 城市生活垃圾填埋处理甲烷排放关键排放因子研究. 2018. 科学出版社. 北京
41. 环境保护部. 2017. 全国环境统计公报 (2015年). 北京. [http://www.mee.gov.cn/gzfw\\_hjtj/hjtjnb/201702/P020170223595802837498.pdf](http://www.mee.gov.cn/gzfw_hjtj/hjtjnb/201702/P020170223595802837498.pdf).
42. 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 2008. GB 21522—2008 煤层气 (煤矿瓦斯) 排放标准 (暂行). 北京: 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局.
43. 工业和信息化部. 2016. 有色金属工业发展规划 (2016—2020年). 北京.
44. 工业和信息化部. 2018. 2017年我国光伏产业运行情况. 北京. <http://www.miit.gov.cn/n1146290/n1146402/n1146455/c6032015/content.html>.
45. Miller, S.M., A.M. Michalak, R.G. Detmers, O.P. Hasekamp, L.M.P. Bruhwiler, and S. Schwietzke. 2019. “China’s Coal Mine Methane Regulations Have Not Curbed Growing Emissions.” *Nature Communications* 10 (1): 303. <https://www.nature.com/articles/s41467-018-07891-7.pdf>.
46. 住房和城乡建设部. 2013. 中国城市建设统计年鉴 (2012年). 北京.
47. 住房和城乡建设部. 2016. 中国城市建设统计年鉴 (2015年). 北京.
48. 国家统计局. 2017. 中国能源统计年鉴 (2017年). 中国统计出版社. 北京
49. 国家统计局. 时间未知. 国家数据平台. 数据库. 2018年8月1日访问. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
50. 国家发展和改革委员会. 2011. 省级温室气体清单编制指南 (试行). 北京. <http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf>.
51. 国家发展和改革委员会. 2015. 中国的国家自主贡献. 于6月30日提交联合国气候变化框架公约. 北京. <http://www4.unfccc.int/submissions/INDC/Published%20Documents/China/1/China's%20INDC%20-%20on%2030%20June%202015.pdf>.
52. 国家发展和改革委员会. 2016a. 能源发展“十三五”规划. 北京.
53. 国家发展和改革委员会. 2016b. 天然气发展“十三五”规划. 北京.

54. 国家发展和改革委员会. 2016c. 石油发展“十三五”规划. 北京.
55. 国家发展和改革委员会, 农业部. 2017. 全国农村沼气发展“十三五”规划. 北京.
56. 国家发展和改革委员会, 住房和城乡建设部. 2016. “十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划. 北京. <http://hzs.ndrc.gov.cn/newhjbh/201701/W020170123352664726176.pdf>.
57. 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 2016. 煤炭工业发展“十三五”规划. 北京.
58. 国家能源局. 2017. 煤层气(煤矿瓦斯)开发利用“十三五”规划. 北京.
59. OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). n.d. “Real GDP Long-Term Forecast” (indicator), OECD Data. <https://doi.org/10.1787/d927bc18-en>. Accessed November 12, 2018.
60. OECD and FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2017. OECD-FAO Agricultural Outlook 2017–2026. Paris: OECD. [https://doi.org/10.1787/agr\\_outlook-2017-en](https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2017-en).
61. 前瞻产业研究院. 2018a. 2018年集成电路制造行业发展趋势分析. 5月18日. <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/180518-b6b72238.html>.
62. 前瞻产业研究院. 2018b. 液晶显示器行业发展趋势分析. 8月15日. <https://bg.qianzhan.com/report/detail/458/180815-98c01487.html>.
63. 前瞻产业研究院. 2018c. 面板产业发展现状分析. 9月26日. <https://bg.qianzhan.com/report/detail/459/180926-816e9eed.html>.
64. Reuters. 2018. “China Meets 2020 Carbon Target Ahead of Schedule: Xinhua.” March 27. <https://www.reuters.com/article/us-china-climatechange-carbonidUSKBN1H312U>.
65. Robiou du Pont, Y., and M. Meinshausen. 2018. “Warming Assessment of the Bottom-Up Paris Agreement Emissions Pledges.” *Nature Communications* 9 (1): 4810. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07223-9>.
66. Rockstrom, J., O. Gaffney, J. Rogelj, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, and H.J. Schellnhuber. 2017. “A Roadmap for Rapid Decarbonization.” *Science* 355 (6331): 1269–71. <https://doi.org/10.1126/science.aah3443>.
67. Schneider, L., and M. Cames. 2014. “Options for Continuing GHG Abatement from CDM and JI Industrial Gas Projects.” Berlin: Öko-Institut. <https://www.oeko.de/oekodoc/2030/2014-614-en.pdf>
68. Secretariat of the Multilateral Fund for the Implementation of the Montreal Protocol. 2016. Executive Committee of the Multilateral Fund for the Implementation of the Montreal Protocol, Seventy-Sixth Meeting. Nairobi:
69. United Nations Environment Programme. <http://www.multilateralfund.org/76/English/1/7625.pdf>.
70. Slater, H., D. De Boer, S. Wang, and G. Qian. 2018. 2018 China Carbon Pricing Survey. Beijing: China Carbon Forum. <http://www.eu-chinaets.org/upload/file/20180906/1536164718942317.pdf>.
71. 中华人民共和国国务院. 2013. 大气污染防治行动计划. 北京.
72. Tian, Z., Y. Niu, D. Fan, L. Sun, G. Ficsher, H. Zhong, J. Deng, and F.N. Tubiello. 2018. “Maintaining Rice Production while Mitigating Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in China: Evaluating Tradeoffs by Using Coupled Agricultural Systems Models.” *Agricultural Systems* 159 (January): 175–86. <https://doi.org/10.1016/j.jagsy.2017.04.006>.
73. UN Environment (United Nations Environment Programme). 2013. Drawing Down N<sub>2</sub>O to Protect Climate and the Ozone Layer: A UNEP Synthesis Report. Nairobi: UN Environment.
74. UN Environment. 2019. Emissions Gap Report 2018. Nairobi: UN Environment.
75. UN Environment Ozone Secretariat. 2018. Handbook for the Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer. Nairobi: Ozone Secretariat, UN Environment.
76. UN Environment and WMO (World Meteorological Organization). 2011. Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone: Summary for Decision Makers. Nairobi: UN Environment.
77. UN DESA (United Nations Department of Economic and Social Affairs). 2017. “World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables.” Working Paper ESA/P/WP/248. New York: United Nations. [https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017\\_KeyFindings.pdf](https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf).
78. UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2016. Decision 1/CP.21, Adoption of the Paris Agreement, FCCC/CP/2015/10/Add.1, January 29. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>
79. UNFCCC. n.d.a. “CDM: Project Activities.” <https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>. Accessed November 1, 2018.
80. UNFCCC. n.d.b. Greenhouse Gas Inventory Data—Detailed Data by Party. Database. [http://di.unfccc.int/detailed\\_data\\_by\\_party](http://di.unfccc.int/detailed_data_by_party). Accessed March 30, 2019.
81. Wang, W., F. Koslowski, D.R. Nayak, P. Smith, E. Saetnan, X. Ju, L. Guo, et al. 2014. “Greenhouse Gas Mitigation in Chinese Agriculture: Distinguishing Technical and Economic Potentials.” *Global Environmental Change* 26 (May):53–62. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.03.008>.
82. World Bank. 2018. Global Economic Prospects, June 2018: The Turning of the Tide? Washington, DC: World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29801>.

## 注释

83. WRI (World Resources Institute). 2018. Climate Watch. Database. <https://www.climatewatchdata.org>.
84. WSC (World Semiconductor Council). 2016. "Joint Statement of the 20th Meeting of World Semiconductor Council." <https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2018/05/20th-WSC-Joint-Statement-May-2016-Seoul-FINAL.pdf>.
85. Xiao, Y., S. Yang, J. Xu, J. Ding, X. Sun, and Z. Jiang. 2018. "Effect of Biochar Amendment on Methane Emissions from Paddy Field under Water-Saving Irrigation." *Sustainability* 10 (5): 1371. <https://doi.org/10.3390/su10051371>.
86. 杨礼荣, 竹涛, 高庆先. 2014. 我国典型行业非二氧化碳类温室气体减排技术及对策. 中国环境科学出版社. 北京.
87. Yao, B., K. Ross, J. Zhu, K. Igusky, R. Song, and T Damassa. 2016. Opportunities to Enhance Non-carbon Dioxide Greenhouse Gas Mitigation in China. Washington, DC: World Resources Institute.
88. Zhang, B., Y. Zhang, X. Zhao, and J. Meng. 2018. "Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Emissions in China 2012: Inventory and Supply Chain Analysis." *Earth's Future* 6 (1): 103-16. <https://doi.org/10.1002/2017EF000707>.
89. 赵静. 2017. 保护臭氧层: 环保部拟五方面开展工作. 中国证券网. 9月13日. <http://news.cnstock.com/news,bwtx-201709-4129210.htm>.
90. 浙江省化工研究院. 2016. 中国氟化工行业氢氟烃 (HFCs) 逐步削减趋势研究. 杭州. <http://www.efchina.org/Reports-zh/report-20170710-3-zh>.
91. 中商产业研究院. 2018. 2018年中国集成电路产量及产业规模预测 (附图表). <http://www.askci.com/news/chanye/20180206/113644117708.shtml>.
92. Zhou, S., F. Teng, and Q. Tong. 2018. "Mitigating Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) Emission from Electrical Equipment in China." *Sustainability* 10 (7): 2402. <https://doi.org/10.3390/su10072402>.
1. 因分析时2014年数据并未发布, 本文测算时未使用2014年的排放数据。
2. 尽管温室气体核算体系 (Greenhouse Gas Protocol) (n.d.) 建议采用最新的全球增温潜能值, 本文为了与中国政策制定者和专家的习惯保持一致, 采用的是IPCC第二次评估报告给出的数值。
3. 中国的三氟甲烷 (HFC-23) 排放量是生产二氟一氯甲烷 (HCFC-22) 而造成的。根据《蒙特利尔议定书》第2 (J) (6) 条款所载: "生产附录C第一类物质或附录F物质的每一缔约方应确保于自2020年1月1日起的十二个月期间, 及其后每十二个月期间, 其生产附录C第一类物质或附录F物质的每处生产设施产生的附录F第二类物质的排放应在相同的十二个月期间使用缔约方核准的技术尽量销毁"。二氟一氯甲烷属于附录C组第一类物质, 而三氟甲烷属于附录F组第二类物质。

## 致谢

作者感谢我们的机构战略伙伴，他们为世界资源研究所提供了核心的资金支持，包括 荷兰外交部（ Netherlands Ministry of Foreign Affairs ）、丹麦外交部（ Royal Danish Ministry of Foreign Affairs ）和瑞典国际发展合作署（ Swedish International Development Cooperation Agency ）。

世界资源研究所的同事们和外部专家非常慷慨地贡献了他们的时间，提供了他们的见解，而本工作论文反映的仅仅是作者的观点。即便如此，作者感谢以下专家所提供的宝贵的审阅、回复和意见，他们是 Pankaj Bhatia、Taryn Fransen、David Waskow、Juan Carlos Altamirano、Katie Ross、Laura Malaguzzi Valeri、林江、姚波、刘强、高庆先、李玉娥、傅莎、冯向昭、李慧民、滕飞、林翎、胡建信。同时还感谢 Emily Matthews、Lauri Scherer、Margie Peters-Fawcett、Emilia Suarez 和 Romain Warnault 对报告给予的管理、编辑、设计和传播支持。

作者对鲁斯·麦克康米克·坦卡斯利慈善信托基金（ Ruth McCormick Tankersley Charitable Trust ）给予世界资源研究所气候变化项目的支持表示感激，同时也感谢威廉和芙洛拉·休利特基金会（ William and Flora Hewlett Foundation ）及爱尔兰援助署（ Irish Aid ）。

## 关于作者

**宋然平**是世界资源研究所全球气候变化项目的高级研究员、发展中国家气候行动项目经理。他负责制定、协调和执行项目的战略和研究，促进发展中国家采取行动制定和实施各个部门的相关政策和计划，从而达成温室气体的减排目标。

联系方式：[rsong@wri.org](mailto:rsong@wri.org)

---

## 关于世界资源研究所

世界资源研究所是一家独立的研究机构，其研究工作致力于寻求保护环境、发展经济和改善民生的实际解决方案。

### 我们的挑战

自然资源构成了经济机遇和人类福祉的基础。但如今，人类正以不可持续的速度消耗着地球的资源，对经济和人类生活构成了威胁。人类的生存离不开清洁的水、丰饶的土地、健康的森林和安全的气候。宜居的城市和清洁的能源对于建设一个可持续的地球至关重要。我们必须在未来十年中应对这些紧迫的全球挑战。

### 我们的愿景

我们的愿景是通过对自然资源的良好管理以建设公平和繁荣的地球。我们希望推动政府、企业和民众联合开展行动，消除贫困并为全人类维护自然环境。

## 我们的工作方法

### 量化

我们从数据入手，进行独立研究，并利用最新技术提出新的观点和建议。我们通过严谨的分析，识别风险，发现机遇，促进明智决策。我们重点研究影响力较强的经济体和新兴经济体，因为它们对可持续发展的未来具有决定意义。

### 变革

我们利用研究成果影响政府决策、企业战略和民间社会行动。我们在社区、企业和政府部门进行项目测试，以建立有力的证据基础。我们与合作伙伴努力促成改变，减少贫困，加强社会建设，并尽力争取卓越而长久的成果。

### 推广

我们志向远大。一旦方法经过测试，我们就与合作伙伴共同采纳，并在区域或全球范围进行推广。我们通过与决策者交流，实施想法并提升影响力。我们衡量成功的标准是，政府和企业的行动能否改善人们的生活，维护健康的环境。



Copyright 2019 World Resources Institute. This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License. To view a copy of the license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>