



中国清洁空气政策伙伴关系
China Clean Air Policy Partnership

2030年全球甲烷评估：基准线报告

为什么现在采取行动：加速甲烷减排的新时代

UNEP / CCAC: Global Methane Assessment 2030: Baseline Report

Why act now: a new era for accelerated implementation

- 中文翻译 -

2024年2月



中国清洁空气政策伙伴关系
China Clean Air Policy Partnership

“CCAPP 经验分享”项目（CCAPP Volunteer Program for Clean Air）由中国清洁空气政策伙伴关系秘书处发起，该项目旨在组织梳理和解读大气污染治理、气候变化应对与人类健康和社会经济相关的政策报告，以及国内国际气候变化应对、生态治理、绿色金融、企业及社会可持续发展等经验，以增强公众、政府和不同利益相关者对国内外先进经验与成果的关注与了解。本中文翻译为该项目的产出之一。

中国清洁空气政策伙伴关系（China Clean Air Policy Partnership, CCAPP）是由能源基金会资助，清华大学、北京大学、生态环境部环境规划院、中国环境科学研究院等十多家国内学术机构和事业单位共同发起成立，旨在：

- 提供跨部门、跨行业、跨机构、跨地域的交流平台；
- 总结、宣传与推广国际、国内和地方先进经验；
- 分享清洁空气领域的相关管理和政策信息，推动清洁空气政策落地实施；
- 实现“寻求空气质量改善与温室气体减排的协同路径，持续改善中国空气质量，保护公众健康，共同创造世界级的洁净空气”的美好愿景。

原《报告》名称：Global Methane Assessment 2030: Baseline Report, Why act now: a new era for accelerated implementation

原《报告》发布机构：Climate and Clean Air Coalition (CCAC) convened by United Nations Environment Programme (UNEP)

原《报告》下载地址：<https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-2030-baseline-report>

本《报告》中文名称：2030年全球甲烷评估：基准线报告

本《报告》中文翻译召集人：蔡慈澜、王紫琼、张雨宁

本《报告》中文翻译：卜梦雅、代江玥、丁千惠、何雨璐、黄夏霖、唐岚岚、王紫琼、吴锴、张雨宁、周杼樾（按姓氏首字母排序）

本《报告》中文封面设计：王紫琼

本《报告》中文审阅：CCAPP志愿者管理团队何学娟、李姝慧、王雨薇

鸣谢：感谢 CCAPP 志愿者项目“甲烷减排战略小组”全体成员

免责声明：

CCAPP志愿者翻译Global Methane Assessment: 2030 Baseline Report出于纯公益性目的，旨在宣传交流国内外先进经验，报告内容不代表中国清洁空气政策伙伴关系及其成员观点。中国清洁空气政策伙伴关系不保证本书中所含数据的精确性，对使用这些数据所产生的任何后果不承担责任。本中文翻译报告由中国清洁空气政策伙伴关系所有，对外公开发布，使用者不得出于商业目的销售、传播或制作相关衍生作品。

序言



刘欣

能源基金会环境管理项目主任

甲烷作为一种“短寿命超级气候污染物”，对当前人类感知的全球变暖贡献率为 25%，其也是能源开采加工、农业生产及废弃物产生过程中的产物，协同控制甲烷和其他污染物排放，兼具气候、经济、环境和安全效益，且与碳减排相比在近中期具有不可替代的降温作用。当前中国已制定实施排放控制行动方案，但仍然面临 MRV 体系较为薄弱、管理制度体系不完备，治理技术有待突破，关键领域和全球主要区域减排责任不明确等问题。需要采取更加有力的措施，切实提升甲烷排放统计核算、监测监管等基础能力。

CCAPP 志愿者团队利用业余时间翻译了 UNEP 和 CCAC 共同编写的《2030 年全球甲烷评估：基准线报告》。该报告分析了不同模型系统在各基线情景下对 2030 年甲烷排放预测，特别是量化了全球不同区域、不同行业的甲烷排放贡献及变化趋势，并对各模型建立的排放清单不确定性进行了分析，这有助于我们更好了解不同模型工具的测算方法、应用范围等特性，对于中国全面有序推进甲烷排放控制工作，积极参与应对气候变化全球治理具有较强的参考意义。



傅莎

能源基金会战略规划主任

甲烷是仅次于二氧化碳的第二大温室气体，基于最新的 IPCC 第六次评估报告，其在百年尺度下的全球增温潜势是二氧化碳的 27.9 倍，二十年尺度下为 81.2 倍。相比二氧化碳，甲烷的减排可在短期内迅速降低温室气体浓度，控制全球温升，对实现全球气候目标具有重要意义。中国甲烷排放量居世界首位，据欧盟联合研究中心的测算，2021 年中国甲烷排放占全球总排放的 19% 左右。中国的甲烷减排对全球实现 1.5 度温升目标以及避免短期内的温升过冲意义重大，同时还能改善本土空气质量，带来经济和健康方面的效益。

近年来，甲烷控排已成为全球气候治理的重要议题之一，屡次出现在国际气候谈判议程上，中国也高度重视甲烷控排以推动全球气候治理。2021 年在 COP26 期间发布的《中美格拉斯哥宣言》和 2023 年底中美发布的《关于加强合作应对气候危机的阳光之乡声明》均提及要加强两国在甲烷减排议题上的合作。2023 年 11 月 7 日，中国发布了《甲烷排放控制行动方案》，作为中国开展甲烷排放管理控制的顶层设计文件，明确了“十四五”和“十五五”期间甲烷控排的主要目标和重点任务。由于甲烷排放的不确定性远高于二氧化碳且相关研究基础薄弱，中国甲烷控排仍需在制定中长期控减排目标，改善监测、报告和核查（MRV）体系夯实数据基础，完善激励机制，加强污染物与甲烷的协同控制，分类施策、先行先试等方面进一步落实和强化工作。

中国清洁空气政策伙伴关系志愿者团队翻译的《2030 年全球甲烷评估：基准线报告》，利用多模型比较的方法，对不施加额外政策干预的基准情景下的 2030 年全球主要地区和重点行业甲烷排放趋势进行了预测，并对削减甲烷排放的气候健康影响进行了评估，为各方认识甲烷减排的重要性和制定科学合理的控减排措施提供了很好的技术参考。

目录

执行摘要	2
第一章 引言：当前大气甲烷浓度、来源和相关政策	3
一、 大气甲烷浓度	3
二、 各来源、各地区的甲烷人为源排放量	3
三、 甲烷排放的自然源和汇	6
四、 与甲烷有关的最新政策	7
第二章 基准线人为甲烷排放量：预测方法	8
一、 基于综合评估模型和模拟模型的预测	8
二、 基于“自下而上”清单模型预测	10
三、 统一化方法	10
第三章 基准线排放量预测结果	11
一、 全球基准线排放总量及部门排放量	11
二、 区域尺度的总量及部门排放量	14
（一） 区域总量	15
（二） 区域各部门排放变化预估	18
三、 敏感性分析：社会经济情景及所用模型	20
四、 敏感性分析：统一过程对于结果的影响	22
第四章 甲烷排放预测及潜在减排对气候和健康的影响	26
一、 情景气候影响评价方法	26
二、 全球甲烷承诺对气候的影响	28
三、 广泛脱碳和重点减排甲烷对气候的影响	29
定义与模型	32
参考文献	33

执行摘要

本报告作为全球甲烷评估（Global Methane Assessment, GMA）的成果之一，详细阐述了在各基准线情景下，2030年人为甲烷排放预测结果，并介绍了基于这些基准线情景下甲烷排放的影响，比较了推动全球甲烷承诺（Global Methane Pledge, GMP）目标实现所带来的气候效益。

2021年，由气候与清洁空气联盟（CCAC）和联合国环境规划署（UNEP）共同发布了《全球甲烷评估：减缓甲烷排放的收益和成本》（UNEP, CCAC 2021）报告，明确指出削减甲烷排放是实现快速减缓全球变暖战略中最具成本效益的手段之一，并将为实现温升控制在1.5°C之内的全球目标做出重大贡献。其主要结论之一是目前可用的技术措施和政策可助力三个主要人为甲烷排放部门减排，其削减量有可能达到甲烷基准线排放水平的45%（至2030年，年均排放量约1.8亿吨）。基准线排放情景假设包括现有政策和目标承诺的执行情况，并不涉及额外的减排行动。在该情景下，若针对其他主要气候因子（包括二氧化碳和短期气候污染物）和甲烷等共同开展减排行动，甲烷减排范围与政府间气候变化专门委员会（IPCC）提出的将本世纪全球变暖限制在1.5°C之内的最低成本路径所要求的减排目标一致。

在2021年全球甲烷评估结论的推动下，2021年11月，全球甲烷承诺（GMP）于格拉斯哥举办的联合国气候变化大会第26次缔约方大会（COP26）上启动。参与承诺的各方同意采取自愿行动，为削减人为甲烷排放做出共同努力，到2030年在2020年水平基础上减排30%（GMP 2022）。

2022年，全球甲烷承诺的合作伙伴要求联合国规划署（UNEP）针对基准排放情景开展进一步分析，评估不采取额外减排行动的情况下，截至2030年甲烷排放增长情况，以得到较为合理（协调统一）的结果，并将基准情景下排放的影响与兑现全球甲烷承诺所带来的影响相比较。本报告的目标在于针对未来基准线排放的完整特性进行描述，同时便于与全球甲烷评估结论进行比较（译者注：全球甲烷评估结论是与2030年的大致基准线排放水平对比得出的，而全球甲烷承诺的目标则是根据2020年的排放水平设定的）。基于在基准线排放情景中不断增加的预期甲烷排放量，分析全球甲烷承诺目标所带来的气候收益，并与仅通过脱碳战略减排甲烷的效果进行比较，有助于各利益相关方意识到早期开展有针对性的甲烷减排行动（即全球甲烷承诺）的重要性。

本报告第一章更新了《2021年全球甲烷评估（GMA）》中大气甲烷排放量和关于其近期趋势的最新成果数据，探讨了最新的人为源和自然源的甲烷排放估算结果和相关不确定性。

本报告第二章详细介绍了本次《全球甲烷评估》中所采用的 11 种模型，并建立了一种统筹模型的方法。本报告第三章分析了在全球、区域和部门尺度下，各模型甲烷人为排放变化的预测结果，并详细介绍了模型排放结果的平均变化情况以及单一模型的预测结果。

本报告第四章分析了相较于平均基准线预测结果，履行全球甲烷承诺所带来的气候影响，并通过介绍脱碳和快速深入的甲烷减排等气候应对行动对于气候的影响，说明各战略之间的差异性与互补性。

第一章 引言：当前大气甲烷浓度、来源和相关政策

一、大气甲烷浓度

《2021 年全球甲烷评估（GMA）》报告指出，大气甲烷浓度在 2010 年代快速上升，至 2010 年代末，五年平均增长率达到了自 20 世纪 80 年代以来的最高水平，远高于 2013 年联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）评估报告中所提及的 2°C 温控情景下的甲烷浓度（UNEP 与 CCAC 2021）。自 2021 年 GMA 发布以来，通过进一步分析得出了 2020 年大气甲烷浓度：世界气象组织（WMO）全球大气观测计划（GAW）站点的观测数据显示，2020 年全球平均地表甲烷浓度达到 1889 ± 2 ppb，是工业化前（1750 年之前）水平的 262%。2019-2020 年的增幅（2019 年与 2020 年平均值之差）为 11 ppb，高于 2018-2019 年观测到的增幅，也高于过去十年间的平均年增长幅度（WMO 温室气体公报 2021）。美国国家海洋和大气管理局（NOAA）海洋边界层站点（约占 GAW 站点的 40%）数据分析表明，2021 年（自 1 月 1 日至 12 月 31 日）甲烷增长幅度为 17.0 ppb，创 38 年来的最高纪录（https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/）。WMO 和 NOAA 数据来自于不同的站点集，并代表不同时期的平均值，故无法进行直接比较。

针对卫星总柱数据（SRON 的 SCIAMACHY/ENVISAT 和 TANSO-FTS/GOSAT 产品，<https://cds.climate.copernicus.eu/>）的初步分析显示，2021 年甲烷浓度增长率升至每年 16.3 ppb，是 2003-2021 年记录中的最高值。此外，地面观测和卫星观测结果都表明，进入 21 世纪 20 年代，大气甲烷浓度正在持续快速增加。

二、各来源、各地区的甲烷人为源排放量

全球碳项目记录了并定期回顾大气甲烷排放的主要来源（Kirschke 等，2013；Sauniois 等，2016；Sauniois 等，2020）。自下而上的清单主要依靠排放源的活动水平数

据（例如垃圾填埋场数量）和排放因子（例如单位垃圾填埋场的排放量）进行估算，其中联合国气候变化框架公约（UNFCCC）的清单包含了各国报告的数据，而其他清单则纳入了非官方数据来源，如 CEDS 清单（Hoesly 等，2018）、EDGAR 清单（Crippa 等，2018）、美国环保局（US EPA）全球非二预测（EPA 2019）和 IIASA 清单（Höglund-Isaksson 等，2020）。本报告在评估近期（2020 年）各部门和地区的甲烷排放时，主要依据以上四个现有数据清单。此外，自上而下清单是由大气观测值结合模型手段所得的。模型应用于推断特定排放源对观测总量的贡献。然而，这些清单一般未覆盖所有国家。人为源主要包括农业（反刍动物、粪便和水稻）、废弃物管理（垃圾填埋场、废物和废水处理）、能源（化石燃料，即煤、石油和天然气生产和使用；生物质燃料燃烧）和露天生物质燃烧。自然源以湿地为主，也包括内陆淡水系统（湖泊、河流、水库、河口等）、地质渗漏、白蚁和野生动物。在全球范围内，人为排放源相当明确，自下而上和自上而下的清单估算均显示，2008-2017 年排放量约为 3.6 亿吨/年，不确定性范围在 3.4-3.8 亿吨/年（Canadell 等，2021）。根据守恒定律，总排放量必须等于总清除量加上大气增长量，因此全球总排放量主要受全球大气实地监测甲烷浓度值和氯代甲烷测量所约束（大气 OH 的参与反应是主要甲烷的汇）。

在部门层面，人为源的不确定性相对较大（表 1.1）。同位素测量可为排放源解析提供依据（Zhang 等，2021），但同位素来源特征（Howarth，2019；Lan 等，2021）和部分自然源排放量级（Hmiel 等，2020；Thornton 等，2021）具有不确定性。对特定部门的排放量，采用自上而下的方式进行估算仍然有限（Deng 等，2022）。区域层面的不确定性也较大（表 1.1）。反演建模研究可提供区域排放量估算值，但大多数地区的实地测量的覆盖度不足以提供高度精确的信息，特别是在热带地区（Tunnicliffe 等，2020）。近年来应用于甲烷测算的卫星遥感技术取得了重大进展，加上相关活动数据的收集，将有助于了解不同源头的排放过程，更好地引导甲烷减排行动，并为未来排放的预测提供参考（有关详细讨论，请参见专栏一）。

尽管各排放估算值之间存在着巨大差异，且由于现有数据的局限性，无法更好地约束估算值，但当前甲烷排放的大部特征是明确的。农业和能源的排放量级相当，约为废弃物部门甲烷排放量的两倍（表 1.1）。国际能源署（IEA）基于类似自下而上排放因子法的核算结果指出，其能源行业的排放量与完整清单中的相似。IEA 报告称，2020 年能源部门甲烷排放量为每年 1.3 亿吨（1.2 亿吨来自化石燃料，其中 4,400 万吨来自煤炭，900 万吨来自生物能源）。化石源、天然源和生物质燃烧三类源的甲烷排放量是通过鉴定大气中甲烷同位素和碳氢化合物比率，进行分配而得，有关详细讨论参见专栏一。在子部门层面，各清单之间可能存在较大差异。例如，来自石油和天然气

基础设施的排放量可能相差超过两倍。对于评估单一部门或子部门的排放量，个别研究结果也可能显示出很大分歧。例如，与化石燃料或煤炭相关的排放量明显高于清单中的数值（分别为每年 1.2-1.7 亿吨和 8,600 万吨；Schwietzke 等，2016 和 Kholod 等，2020）。

客观来看，没有任何一个排放清单可以在众多清单中“脱颖而出”。尽管任何专项研究都有可能出现偏差，但本报告是以“所有排放清单同等有效”为前提的。在废弃物和天然气部门，US EPA 全球估算值略低于其他估算值，其总量接近 IPCC AR6 报告中 2008-2017 年排放量范围的下限（Canadell 等，2021；而且自该阶段早期开始，排放量已有所增加）。根据外推法得出的 EDGAR 值处于其他估算值范围的上限，尤其体现在农业部门（虽然总量高于 IPCC AR6 给出的范围，但后续年份的估算情况保持了一致性）。US EPA 和联合国气候变化框架公约（UNFCCC）均使用各个国家报告的数据作为基准线/预测的支撑，这与其他组织采用的方法不同，可能导致结果存在一定差异。例如，OECD90+EU 所覆盖的国家向 UNFCCC 报告的数值为每年 5,600 万吨，远低于除 US EPA 以外任何清单的数值。这与国际能源署（IEA）分析结论一致，相较其他所有清单，UNFCCC 报告有可能低估了甲烷总排放量，尤其低估了能源部门排放量（其中农业排放量为每年 1.3 亿吨，能源排放量为每年 7,900 万吨，废弃物排放量为每年 5,500 万吨）（IEA 2022）。尽管当前数据可为各国采取跨部门减排行动提供支撑，但关于排放量级和排放点位不确定性的结论（正如估算之间的差异所展现的）强调了在全球减排进展追踪中引入基于测量的评估方法的重要性，以及其对于寻找进一步减排机会的关键性。

表 1.1. 来自不同实体的近期排放量估计样本

部门	均值	EPA 2020	IIASA 2020	CEDS 2019	EDGAR 2020
农业	147	143	149	133	161
牲畜	114	114	113	107	123
水稻	30	25	32	25	38
废弃物	73	60	65	83	84
固体废弃物	43	40	45	40	47
废水	30	20	20	41	37
能源	134	128	140	146	121
天然气	35	21	44	32	43
石油	43	47	44	53	29
煤炭	41	38	41	46	37

总计 (包括 1,600 万吨/ 年的生物质燃烧)	372	348	371	378	391
区域数据 (不包括生物质燃烧)					
ASIA	132	118	133	127	149
LAM	48	41	43	54	53
MAF	74	65	75	71	84
OECD90+EU	64	57	70	63	64
FSU	37	48	41	35	24

US EPA和IIASA包括从最新数据开始的几年预测。CEDDS数据来自v2021-04-21。EDGAR数据是根据粮农组织（FAO）和英国石油公司（BP）分别对农业和能源的统计数据外推到 2020 年从而获取的 2018 年值，并对废弃物进行线性外推。由于表格并未显示所有子部门（如生物燃料、农业废物焚烧、工业等），因此部分子部门数据可能未计入到行业总数中。生物质燃烧是指大规模明火。拉丁美洲（LAM）、中东和非洲（MAF）、亚洲（不属于另一类的亚洲国家）、前苏联（FSU）、欧盟成员国或 1990 年加入经合组织的发达经济体（OECD90+EU）。

三、甲烷排放的自然源和汇

除人为排放外，大气中甲烷浓度还受自然源排放和甲烷去除速率（亦成“汇”）的影响。自下而上和自上而下方法估算的全球甲烷自然源逐年排放量存在相当大的差异，分别为约 3.7 亿吨和约 2.15 亿吨（Sauniois 等，2020）。这种差异主要是由于自下而上方法高估了甲烷自然源排放量（包括源分类的重叠，UNEP 和 CCAC 2021）。另外，许多国家自下而上的估算未纳入所有未经管理的土地排放的估算。约 50%的自上而下/自下而上的差异凸显了过程模型在源头层面准确量化自然源排放量的难度。相似的是，自上而下的估算受与反演建模相关的不确定性影响，即自大气浓度反推排放量（关于排放和汇、大气传输和浓度本身的先验知识）的过程。

自然排放的变化很难被准确预测，因此本评估报告并未纳入甲烷自然源的定量预测。甲烷浓度的预测建模包括化学过程甲烷的汇的变化，但可能不包括影响甲烷的汇的所有过程（例如，土壤的汇）。本小节简要描述了这些因素以及它们可能如何影响本报告中讨论的预测结果，以证实这些因素可能会影响基准线总排放量的预测。

从自然排放开始，有证据表明湿地的甲烷排放通常随着气温升高而增加，因为高温促使分解作用增强。（Zhang 等，2017；Dean 等，2018）。政府间气候变化专门委员会（IPCC）《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》（IPCC2019b）发现，各模型模拟结果之间存在一个高度一致的特征，即湿地甲烷排放将在 21 世纪增加，但变化幅度差异较大。IPCC 第六次评估报告（AR6）以对辐射强迫（单位为 $Wm^{-2}C^{-1}$ ）的影响来评估气候反馈的强度，正值对应正反馈。该报告将湿地甲烷-气候反馈评估为 0.03 ± 0.01

$\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ (平均 ± 1 个标准差; 证据有限, 一致性高), 如果把二氧化碳变化对生产力影响纳入考虑 (Canadell 等, 2021), 这一数值可能会更大 (最高可达 $0.16 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$; Gedney 等, 2019; Thornhill 等, 2021)。AR6 之后的新研究支持了在气候变暖下甲烷自然源排放量可能大幅增加的观点 (Kleinen 等, 2021)。IPCC AR6 得出结论表明, 由永久冻土融化导致的甲烷排放还会增加 $0.01 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ (0.003-0.04, 5-95 百分位数范围) 的甲烷-气候反馈 (证据有限, 一致性适中; Canadell 等, 2021)。野火频发和北极淡水增加也可能导致释放额外的甲烷, 但预计规模很小, 而来自水合物的排放预计将保持在当前水平 (Canadell 等, 2021)。结合 AR6 对湿地和永久冻土排放的估算, 这些过程将增加约 2% 的甲烷辐射强迫 (1-10%, 不排除更强的反馈), 以导致甲烷-气候影响。

未来甲烷浓度的预测通常包括对人为排放的响应, 如一氧化碳和氮氧化物的排放会影响甲烷的寿命。近期大量关于 COVID 封控带来排放变化的分析为甲烷浓度对氮氧化物排放降低的响应分析带来了初步约束 (Laughner 等, 2021; Stevenson 等, 2021), 这可能帮助改善未来的预测结果。然而, 关于氮氧化物和挥发性有机化合物等天然源的排放变化, 以及可溶性短寿命物种的去除速率变化很难预测, 使得预测未来甲烷汇的总量极具挑战性。在应用简单能量守恒模型预测甲烷浓度时, 一般不考虑这些对化学甲烷汇所影响的气候相关过程。这些过程已被纳入复杂的成分气候模型中, 但其不确定性很大。

由于甲烷自然源排放量和甲烷汇的不确定性, 目前对于其对未来大气浓度的影响程度, 尚未可知。但相较于仅考虑人为排放变化带来的大气浓度变化, 至少自然源排放的变化将使基准线浓度增高。鉴于观测结果和大多数模型所显示的反馈程度相对较小, 到 2030 年这种响应的影响可能较小 (尽管我们对上述预测信心较低)。因此, 根据大气甲烷的响应来评估未来减少人为甲烷排放所作的努力是否有成效, 需要同时考虑自然排放源和化学反应甲烷的汇的变化。

四、与甲烷有关的最新政策

截至 2022 年 8 月, 120 多个国家已加入了全球甲烷承诺。一些国家还宣布了采取附加行动以减少甲烷排放, 这些行动以 GMP 为基础且范围持续扩大。例如, 在 2021 年 11 月《中美关于加强气候行动的格拉斯哥联合宣言》中, 两国同意在 2022 年制定额外措施以加强甲烷排放控制 (US 2021)。中国还承诺制定一份全面且雄心勃勃的甲烷国家行动计划, 致力于在本世纪 20 年代实现科学、合理、有序、有效控制甲烷排放的目标。2021 年 11 月, 美国发布了《美国甲烷减排行动计划》, 详细说明了政府为实

现全球甲烷承诺目标所采取的行动（US 2021）。2021 年 12 月，欧洲委员会通过了一项旨在削减领域甲烷排放的提案法规，作为 2020 年欧盟甲烷战略的第一步（EC 2021）。

截至 2022 年 5 月，已有 168 个国家向联合国气候变化框架公约（UNFCCC）提交了更新的或新的国家自主贡献文件。在最新的国家自主贡献文件中，有 90%提到在其整体温室气体减排目标范围内处理甲烷问题，但却仅有 9%明确提出了专注于甲烷减排的措施。

第二章 基准线人为甲烷排放量：预测方法

本报告设计了无额外政策干预的情景（non-policy scenario），应用多种建模方法，预测了基准线甲烷排放量，并且讨论了采用综合评估模型、IEA 能源模拟模型和“自下而上”清单模型三种模型的测算结果。值得注意的是，基准线情景不包括未来政策，只包括在预测时已实施的政策措施。然而，由于现有法规和政策的目标可能无法实现，会导致更高的基准线水平。

一、基于综合评估模型和模拟模型的预测

综合评估模型（Integrated Assessment Models, 简称为 IAMs）为能源-土地-经济系统提供了一种内部统一的表述，并被广泛用于科学和监管分析，如政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告。这些模型囊括了所有主要的甲烷排放部门，但其对于能源和农业部门的描述通常比关于废弃物部门的更为细致。这些模型一般根据经济活动来预测未来排放。模型由未来社会经济要素演变的外部输入所驱动，例如人口、GDP 和消费偏好，以及排放因子等技术因素。

我们分析了近期一些多模型比较计划的预测结果，其中也包括“无气候政策”的基准线情景。通过比较分析给定情景下跨模型预测结果，可识别由能源-土地-经济系统表达所带来的不确定性；另外通过比较分析跨情景预测结果的，可识别由于预测的社会经济驱动变化而带来的不确定性。基准线情景源自 ADVANCE¹、NAVIGATE²和 ENGAGE³计划，以及基于 IPCC 第六次评估报告采用的共享社会经济路径（shared socio-economic pathways, SSPs）活动水平的五种基准线情景（Riahi 等，2017）。

上述共享社会经济路径（SSP）展望了五种不同的未来情景，分别为：以可持续性为重点，较低的资源能源消耗的路径（SSP1）、大体上遵循历史规律的“中间道路”发展

¹ <https://www.fp7-advance.eu>

² <https://www.navigate-h2020.eu/>

³ <https://www.engage-climate.org/>

路径（SSP2）、以区域能源和食品安全为重点的区域竞争和物质集约化消费路径（SSP3）、国家内部和国家间日益加剧的不均衡路径（SSP4）、同时拥有高收入增长、高能源和资源消耗的传统化石燃料驱动路径（SSP5）。由于 SSP 情景创立于 2015 年左右，因此包括自 2016 年之后的排放变化，但不包含 2015 年之后实施的政策或法规。

最新的 NAVIGATE 和 ENGAGE 情景包括至 2020 年的能源需求和成本等实际趋势，以及法规情况。为了体现不含任何政策假设情况下的模型性能，NAVIGATE 情景不包含任何气候政策（Harmsen 等，2021）。

ENGAGE 项目制定了两种基准线情景，“无气候政策”基准线情景以及沿用 SSP2 路径但包括在施的国家气候、能源和土地利用政策（截止 2019 年 7 月 1 日）的替代基准线情景，称为 NPi2100（即国家政策延长至 2100 年）。此情景假设未来将延续目前正在实施的国家能源和气候政策，但不会设立更为激进的目标。这些政策包括法律支持的 2020-2025 年现有目标，并通过调整模型的排放定价、技术部署、低碳能源的效率和份额等因素以实现上述目标。因此该情景纳入了与 SSP2 基准线情景有关的其他政策，所以其预估所得的甲烷排放量增幅可能偏低。

国际能源署既定政策情景（IEA's STEPS）提供了能源部门甲烷排放预测结果（IEA 2021）。该情景由国际能源署的能源模型开发所得（而不是综合评估模型），情景所体现的政策制定实施情况是基于逐部门政策评估所得（包括截至 2021 年 10 月各国政府宣布的政策）。由于 STEPS 和 NPi2100 情景与“无政策”情景不同，所以我们在下文对预测的主要分析中并不包含这些情景，但 STEPS 和 NPi2100 的结果为本报告的分析提供了参考价值。

针对 8 个主要基准线情景，我们对有效结果进行了评估，这些情景的区域数据及部分部门数据（起码总量和农业、林业以及其他土地利用（AFOLU）部门的数据）是公开提供的。此数据集包括来自以下各 IAM 模型的结果，AIM/CGE（版本 2.0 和 2.2），GCAM 4.2，IMAGE（版本 3.0.1，3.0.2，3.2），MESSAGE-GLOBIOM 1.0，MESSAGEix-GLOBIOM 1.1，POLES，REMIND 1.7，REMIND-MAgPIE（版本 1.5，2.0-4.1，2.1-4.2），WITCH 5.0，WITCH-GLOBIOM（版本 3.1 和 4.2），COFFEE 1.1。通常，早期模型版本应用于 SSPs 和 ADVANCE，最新的模型版本应用于 NAVIGATE 和 ENGAGE 模拟。由于并非逐个模型都参与了各个项目，并非每个模型都能提供可用于评估的结果，因此我们囊括了各种情景下来自于 42 个独立 IAM 模拟的基准线预测结果。

二、基于“自下而上”清单模型预测

IIASA 温室气体和空气污染相互作用和协同作用模型（IIASA's GAINS）应用类似于“自下而上”清单方法以估算全球人为甲烷排放量。计算方法是采用驱动各部门排放的人类活动乘以在特定技术和物理设定下的单位活动量的排放因子。Höglund-Isaksson 等人的文章（2020）概述详细方法，该方法遵循了 IPCC (2006, 2019a) 建议指南，即对于大多数排放部门，利用大量公开可用的国别信息推导出国家、部门和技术特有的 IPCC 方法二排放因子。基准线排放量估算反映了从现有排放控制法规对未来排放量的预期影响。由于各排放估算结果保持了内部一致性，并且在地理和时间尺度上具有可比性，因此还可以回溯历史排放趋势。

2015 年至 2050 年甲烷排放路径的制定是基于国际能源署《2018 年世界能源展望新政策情景》（IEA-WEO 2018）中的宏观经济和能源部门活动驱动因素、联合国粮农组织农业部门活动驱动因素（Alexandratos 和 Bruisma 2012）以及 IIASA 对固体废弃物和废水产生的预测与宏观经济驱动因素。此外，在路径中纳入 2018 年国际能源署能源情景中外推预测的政策后，其预测（相较于早期 SSPs）更为接近 NAVIGATE 和 ENGAGE 基准线结果。

US EPA 《全球非二氧化碳温室气体排放预测与减缓》报告结合了各个国家报告的清单数据和美国环保署根据 IPCC 清单指南估算的数据，进行了排放量预测。完整方法详见报告后所附方法文件。

历史排放量估算来自 1990 年至 2015 年各国报告数据。US EPA 对 2050 年的预测结果反映了“政策延续情景”（BAU）的情况，排放速率与历史水平一致，且不考虑政策带来的未来影响。在一定程度上，减排情况会体现国家报告基准年数据中，其减排率将应用于整个估算期。如果无法获得国家报告数据，通常使用 IPCC 默认 Tier1 法一排放因子或其他文献数据。根据源分类，预测的活动水平驱动因素可从全球各种可用的活动数据源中获得。能源生产和消费趋势参考自 EIA 2017 年国际能源展望参考案例情景，作物和牲畜生产的增长率取自国际粮食政策研究所的 IMPACT 模型（国际农产品和贸易政策分析模型；Robinson 等，2015）。与 GAINS 模型一样，由于其较晚的起始年份并囊括了其近期的能源情景，EPA 预测（相较于早期的 SSPs）更接近于 NAVIGATE 和 ENGAGE 基准线情景。

三、统一化方法

为了便于横向比较 11 个不同模型（包含九个 IAM 和两个自下而上的模型）的结果，我们首先统一了所有的结果，以便从同一基准点预测 2020 年人为排放量。我们采

用全球碳项目（GCP）甲烷分析结果（Saunois 等，2020），其提供了 2017 年自下而上和自上而下的最近估算值，以及 2008-2017 年间估算平均值。我们采用自下而上和自上而下的预估平均值，评估了 2012 年至 2017 年（预测期后半段时间中点）之间的排放增长率，再后推三年，最终获得 2020 年人为排放量的估计值为 3.78 亿吨。该值仅略高于 2017 年 GCP 估计的 3.72 亿吨，所以简短的外推（三年）方法并不会对结果造成太大影响，并且该值也位于表 1.1 所示的数据集平均值的百分之一范围以内。用于 2020 年的归一化方法同样适用于未来所有的预测值（即在特定时间周期内均采用等比例调整）。

当前数据来自于 2020 年 GCP 分析中所采用的清单，但我们对数据集的部分内容进行了更新。例如，2021 年版 CEDS 清单（Hoesly 等，论文处于准备期）记录了 2017 年的农业、能源和废弃物部门的排放量，分别为每年 1.43、1.32 和 0.81 亿吨，而 2018 年初的清单数据分别是 1.40、1.76 和 0.67 亿吨，这导致三个部门合计总排放量相差约 10%（3.56 与 3.83 亿吨），某些部门的差距甚至更大。

我们并未对区域及部门层面的结果进行标准化，这是一方面因为这些层面的排放量并不会像全球总量那样受到观测值的约束（以过去三年 CEDS 能源部门排放变化的估算值为例）；另一方面也很难保证所有模型在部门层面的分类完全一致。此类标准化可能会对某些模型的区域或部门结果产生重大影响。随着更多观测结果的出现，需重新审视这些数据。目前，得益于更多元的数值支撑，采用归一化方法得出一个单一的全局数值是必要的，但是实践表明这对结果的影响甚微。关于甲烷基准排放量变化预测对全球归一化流程的敏感性分析的更多内容，参见第 3.4 节。

第三章 基准线排放量预测结果

一、全球基准线排放总量及部门排放量

基于第二章所述的综合评估模型（IAMs）和自下而上的清单类模型，我们分析了人为甲烷排放的预测变化量。图 1 展示了给定的模型集合中，2020 年至 2030 年间全球基准线人为甲烷排放的预计增长总量。根据所有情景下所有模型的平均值，或基于所有情景的平均值（给予两类模型同等权重情况下），预计 2030 年人为甲烷排放量将较 2020 年增加约 2,500-4,000 万吨。这相当于比 2020 年预测排放水平（每年约 3.8 亿吨）增长约 10%。

社会经济情景的应用选择会带来数值的明显差异。在“可持续发展路径”SSP1 路径下，各 IAM 模拟结果表明 2030 年人为甲烷排放量仅比 2020 年高 2,400 万吨；而在最高排放路径下，即 SSP5“化石燃料发展路径”，相差 6,500 万吨（各模型的平均值；范围分别为每年 600-3,300 万吨和 4,900-7,400 万吨）。鉴于世界还未走上可持续发展的道路，但至少某些地方已经开始远离化石燃料，我们还研究了不包括这两种最极端情况的共享社会经济路径（SSPs）。在 SSPs2-4 路径模拟结果中，2020-2030 十年间甲烷年排放量平均增加 4,400 万吨（标准差为 1,300 万吨；范围为 2,200-6,900 万吨）。号称“中间路线”SSP2 路径下，年平均增幅与此相当，约为 4,100 万吨。

两项 IAM 最新项目 NAVIGATE 和 ENGAGE 的预测增长量处于 SSPs 路径中的较低水平，2030 年排放量分别比 2020 年高 2,800 和 2,200 万吨（各模型平均值；全部范围分别为 1,300-4,400 万吨和 500-3,600 万吨）。这些数值与两个“自下而上”模型的预测结果非常吻合，EPA 和 IIASA 分别预计年排放量增长 2,200 和 2,900 万吨。最新版本 of IAM 预测模型和自下而上清单都内化了近期发展带来的一些影响，例如大多数经合组织国家的废弃物管理改善、中国煤矿开采的趋缓等。

结合 IAM 模型和“自下而上”的清单模型预测结果，我们推测 2020-2030 年间可能最高的年排放量增长范围为 2,000-5,000 万吨，500-7,500 万吨的增长范围这一结果更为可靠。在一定程度上，早期开发的情景下的预测值更高，这些情景并未考虑到针对甲烷减排政治意愿的增加和可用于指导减排实践的观测手段的成熟，因此，较低的预测值象征着近期甲烷减排有新的进展，这使得 2022 年预测的基准值低于 2016 年（SSPs 发布于 2016 年）。为避免主观地选择单一特定的模拟子集以代表一个理想的基准线，我们下面采用所有 42 个 IAM 模拟的平均数和两个自下而上的模型的平均数，以相同的权重计算得出平均增幅（每年 3,100 万吨；范围为 2,200-4,600 万吨；图 1），开展进一步估计。对于不确定性范围，我们综合了 IAM 的第 25-75 个百分位数和自下而上模型的范围进行预测（即用离平均值较远的数值来代表平均值的范围）。

预测的甲烷排放变化，2030 vs 2020

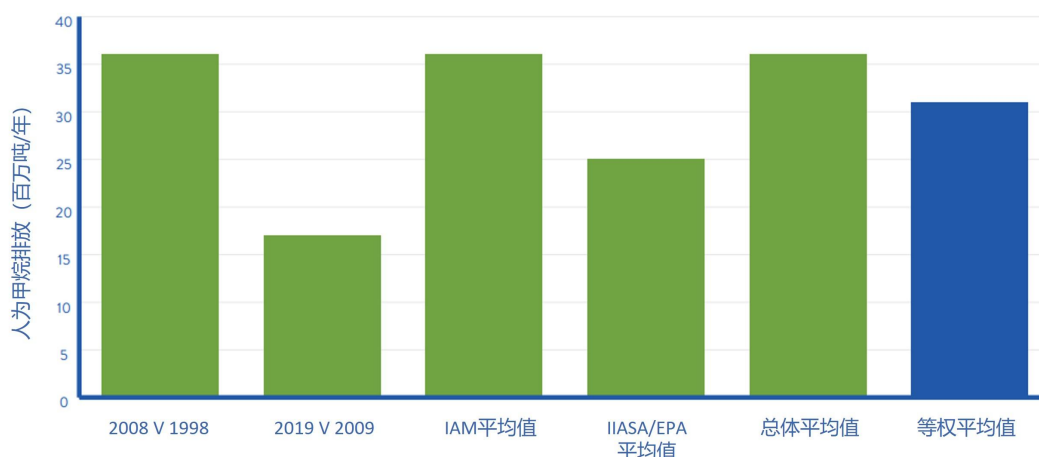


图1. 2020年至2030年期间全球基准线人为甲烷排放的预测增长总量（基于指定模型集合：42个基线情景下的IAM平均值；所有44个预测的平均值；42个IAM的平均值和两个自下而上模型的平均值的平均权重），并与前两个11年时期进行比较（历史数据来自CEDS）。由于下文将使用加权平均值进行分析，此处突出显示了该数据。

农业、废弃物处理和能源这三个主要排放部门对预估基准线排放增长的贡献大致相当（图2）。废弃物部门排放增长约14%，农业部门约为7%，能源部门约为8%（图2）。废弃物处理部门的变化预测一致性较好，能源部门预测结果离散最大，农业部门介于二者之间。这致使预测的不确定性较高。

针对特定子部门的趋势预测主要来自“自下而上”模型，同时结合了5个IAM（基于ENGAGE模拟）农业子部门的额外数据。通过评估主要子部门的结果，我们发现农业部门的增长几乎全部来自畜牧业，而水稻部门的变化很小，甚至可能出现下降（表3.1）。然而，在交叉对比各IAMs模型结果显示，与畜牧业有关的排放变化有很大差异，相较2020年，2030年排放变化量范围从每年增长3,200到每年减少200万吨。由于这些IAM结果来自单一的基准线情景，这表明该部门排放量预测对IAM中的假设敏感性较高。

在能源部门中，预测而得的各子部门趋势有类似的偏向，几乎所有的结果都预测增长将发生在石油和天然气部门，而与煤炭有关的甲烷排放量则预计保持稳定或略有下降。后者对中国（世界主要煤炭消费国）未来煤炭的使用情况敏感度高，但也可能受到煤炭开采排放强度各异的地区之间生产转移的影响。在废弃物领域，由人口增长和经济发展的推动，固体废弃物和废水处理所产生的甲烷排放预计都将增长。其中固体废弃物的年排放占比和年排放量预计将增长更快。两种自下而上模型在预测变化结果上高度一致，在废弃物部门排放预测最为接近，但在能源部门的差异最大。子部门预测不确定性反映了在所用模型和IAMs预测结果中子部门排放分布，如图2所示。

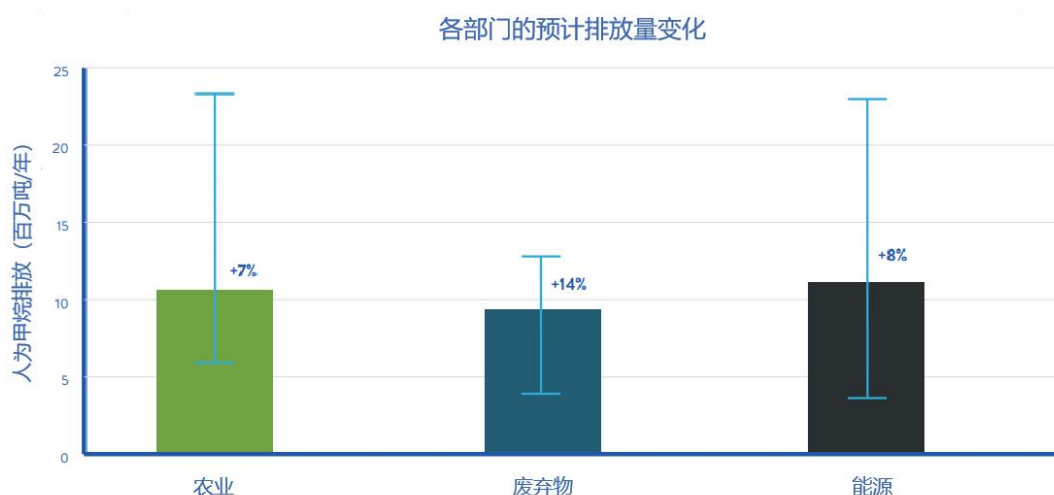


图2. 2020年至2030年期间全球各部门基线人为甲烷排放的预计增长总量。条形图表示各个估计值的平均值（IAMs/BU均等加权），范围来自IAMs和两个BU结果的第25和75百分位数的组合（以离平均值较远者为准，因此范围包括IAM的第25-75百分位数和两个BU结果）。条形图上附的数值表示平均增长量占当前部门排放量的百分比。

表 3.1. 2020 年至 2030 年全球各部门甲烷排放量的预测变化

部门	IIASA	EPA	IAMS 平均值	IAM 最大值	IAM 最小值
畜牧业	5.7	7.1	13.1	32.1	-2.0
水稻	0.0	-0.3	0.3	1.7	-1.5
煤炭	0.2	-1.8			
石油	2.0	0.5			
天然气	7.7	3.5			
固体废弃物	9.6	8.0			
废水	3.0	1.7			

预测值为 2030 年相对于 2020 年的甲烷排放量变化（单位：万吨/年）

二、区域尺度的总量及部门排放量

我们分析了在 IAM 模型研究领域广泛使用的五个区域的排放量，因为这些区域的数据最易获得，分别是拉丁美洲（LAM）、中东和非洲（MAF）、亚洲（未归于其他类的亚洲国家）、前苏联（FSU）和欧盟成员国或截止 1990 年加入经合组织的发达经济体（OECD90+EU）。

（一）区域总量

通过评估 2020 年至 2030 年各地区甲烷基准年排放量变化预测值发现，亚洲和中东/非洲的年排放量增幅最大（图 3 顶图）。这两个地区也呈现出了过去二十年中最大的年际涨幅（表 3.2）。相比之下，其他三个地区的排放增长则明显较低，其可能的范围包括无增长甚至略有下降，尤其是在 OECD90+EU 地区（与 21 世纪 10 年代的下降一致，Stavert 等（2021）），一般针对这三个地区的排放变化预估结果通常为小幅增加。基于亚洲的高排放量，其绝对排放量的大幅变化与拉丁美洲和前苏联的百分比增长相似（图 3 中图）。然而，主要由于化石燃料行业（Harmsen 等，2020），前苏联的人均甲烷排放增幅远高于其他地区（图 3 底图）。此外，人口预计减少以及排放量的增加也是该地区人均排放增幅高的原因，而其他地区的人口则预期将大幅增加（拉丁美洲、中东和非洲、亚洲）或相当稳定并伴有排放量的缓慢增加（欧盟成员国或截止 1990 年加入经合组织的发达经济体（OECD90+EU））。需注意的是，前苏联人均排放量的大幅增加几乎完全是由预测的能源部门变化驱动的，而其他部门的排放变化量小于 1.5 千克/人。

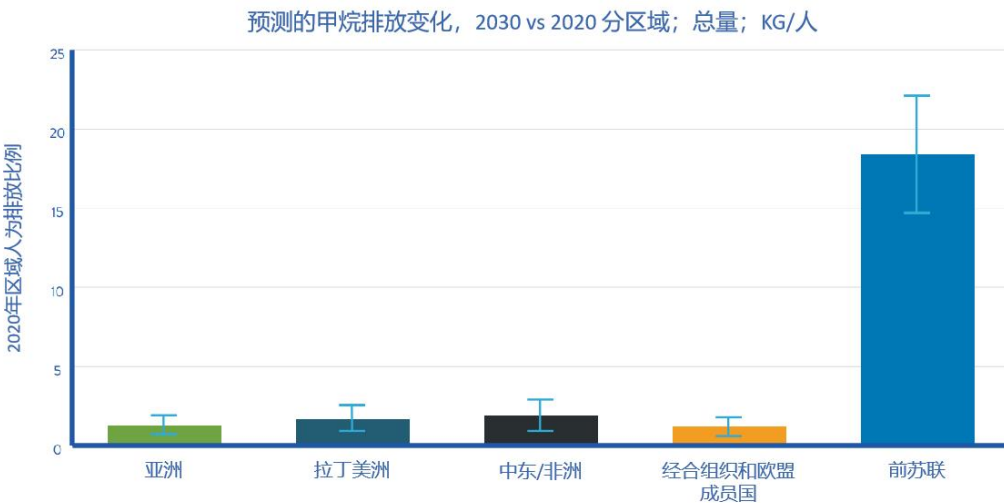
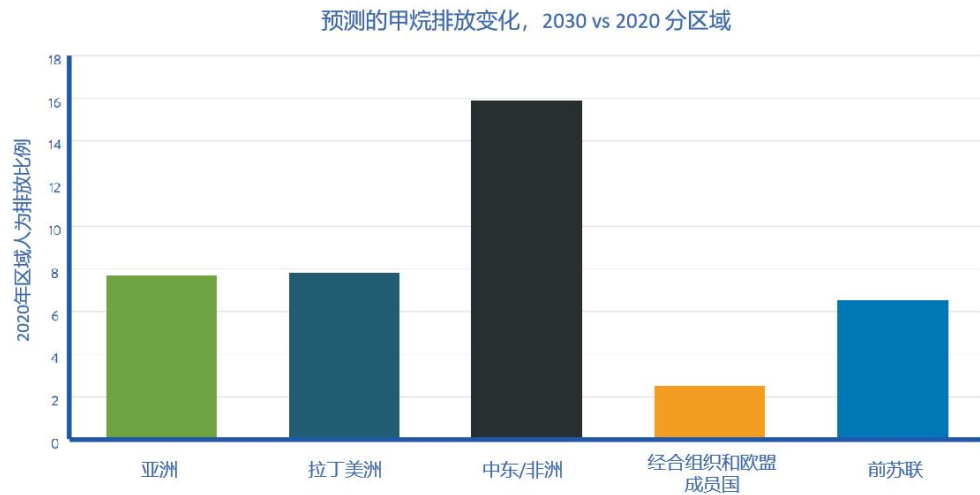
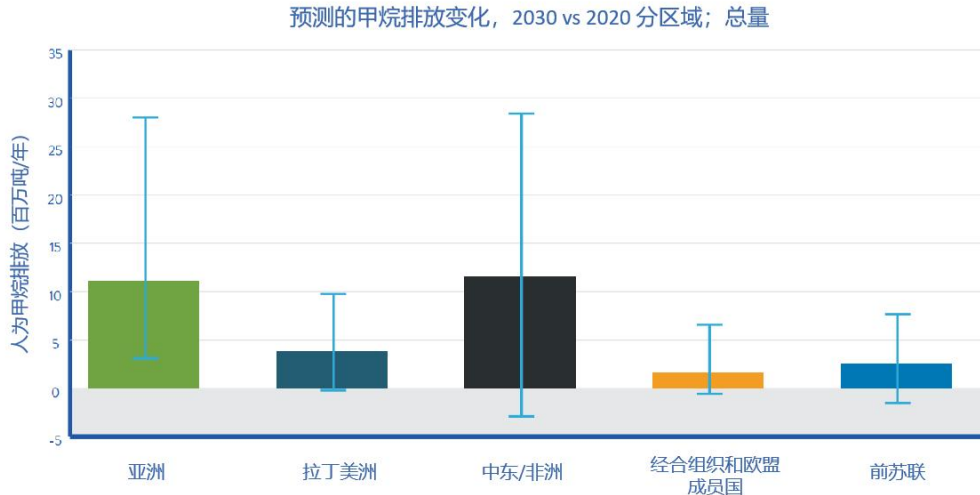


图3. (上图) 全球总量 (所有部门) 预计 2020 年至 2030 年间指定区域的基线人为甲烷排放量增加。条形表示估计值的平均值 (等权重的 IAM/BU)，范围是 IAM 和 BU 结果的第 25 和第 75 个百分点数的组合结果 (以离平均值较远的为准)。(中图) 当前区域排放量的百分比相同 (不确定性范围与上图中的相似)。(下图) 人均排放量变化相同。

为呈现 IAM 结果的完整范围，我们逐一展示了单一模拟的结果以及本报告中后续分析所使用的中心范围 (图 4)。综合评估模型 (IAM) 结果揭示的结果可能性范围较

大，有的结果表现为在该组结果中显著异常值，但这些异常值的数量很少，在整个地区中仅存 1-4 个。

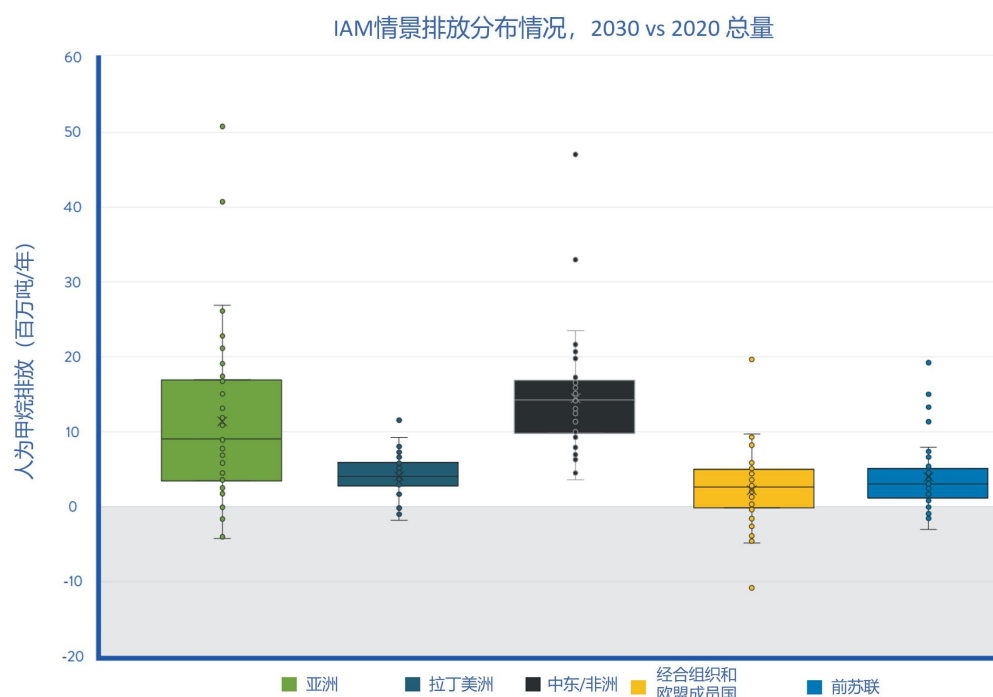


图4. 42 个 IAM 情景中 2020 年和 2030 年的区域排放差异。条形显示结果的第 25 到第 75 个百分点，条形内的水平线显示平均结果，须线延伸到中心 50% 以上和以下 1 个四分位数范围，以表明哪些点可能被视为异常值。

与历史趋势相比，2020 年代亚洲地区甲烷排放（2030 年相对于 2020 年的）预测增长量与 2010 年代相似，但远低于先前的十年（2000 年代）（表 3.2）。相比之下，中东/非洲的预测增长量大约是 2010 年代的两倍，但在数值上与 2000 年代相似。虽然拉丁美洲和前苏联 2020 年代的排放增幅低于 2000 年代的增长，但与 2010 年代相比则增幅有所上升。最后，与前二十年这些国家排放量减少的情况明显不同，OECD90+EU 的预计排放量在 2020 年代适度增长。需注意，鉴于模型中范围较大（图 4），通常年际之间的比较具有极大不确定性。

表 3.2. IAMs 按区域估计的历史和预测的人为甲烷排放总量（百万吨/年，结束年与启示年相差十一年）

	2010 V 2000	2020 V 2010	2030 V 2020
ASIA	40	12	11
LAM	6	3	4
MAF	10	5	11
OECD90+EU	-5	-2	2
FSU	5	-1	3

（二）区域各部门排放变化预估

通过分析区域部门层面排放结果，预计在 2020 至 2030 年期间，农业排放量增长最大的地区为亚洲和中东/非洲（每年约 400 万吨），其次是拉丁美洲（约 200 万吨/年），OECD90+EU 或前苏联的增长极小（图 5）。在能源部门，中东/非洲地区的预计增长量（每年约 400 万吨）与其他地区每年约 1-2 万吨的增幅相比尤为突出。废弃物部门的预测结果与农业部门的预测非常相似，亚洲和中东/非洲排放增长最大（每年约 300-500 万吨）。农业和能源部门的模型结果范围比废弃物部门的范围要大得多，但各区域大多数部门的变化相似。但亚洲的能源部门例外，其模型结果范围特别大，具体表现为每年大幅下降（大于 400 万吨的减少）到大幅增长。

根据分区域和分部门人均排放预测，除前苏联的能源部门人均排放增长约 17 千克外，所有地区全部部门的人均排放增长均小于 1.5 千克。如第 3.2.1 节所述，这在一定程度上是由该地区的预估人口保持不变或减少并伴有排放量增加所导致的，且该部门的变化主导了地区人均总排放变化（图 3）。按人均计算，区域和部门排放增长预期的次高值是前苏联的废弃物部门，其次是拉丁美洲和中东/非洲的农业部门（均处于人均 0.9-1.4 千克的增幅范围内）。

将清单/自下而上模型与 IAM 的结果范围比较表明，对于区域总量，亚洲、拉丁美洲和 OECD90+EU 这三个区域的自下而上估算结果位于第 25-75 个百分位内，而中东/非洲和前苏联则处在 IAM 结果的第 10-90 个百分位（表 3.3）。对于特定部门的区域排放而言，自下而上模型中预估的变化与 IAM 模型中的预测基本一致，其中 10 个农业案例中的 8 个案例处于在第 25-75 个百分位数内，10 个能源部门案例中有 7 个处于第 25-75 个百分位数内（农业与能源部门的 10 个案例中均有 9 个案例落在第 10-90 个百分位内）。然而，废弃物部门的预估差异更大，自下而上模型仅与 IAM 模型在 OECD90+EU 地区的结果较为一致，而在其他地区，自下而上模型预测的增长量高于 IAM 模型结果第 90 个百分位的增长量。由于 IAM 模型一般更关注能源和农业部门而不是废弃物部门，我们预计自下而上模型估算的高增长幅度可能更为合理。因此，对于农业和能源部门，给予自下而上模型和 IAM 模型结果相同权重，计算了各模型的平均值，而废弃物部门仅采用自下而上模型结果。最终估算结果为每年增长 3,400 万吨（范围为 2,500 万吨-4,900 万吨），不同于每年增长 3,100 万吨（对所有部门使用等权重方法计算得到的），我们采用这个值和范围作为本报告的“最佳估计值”。

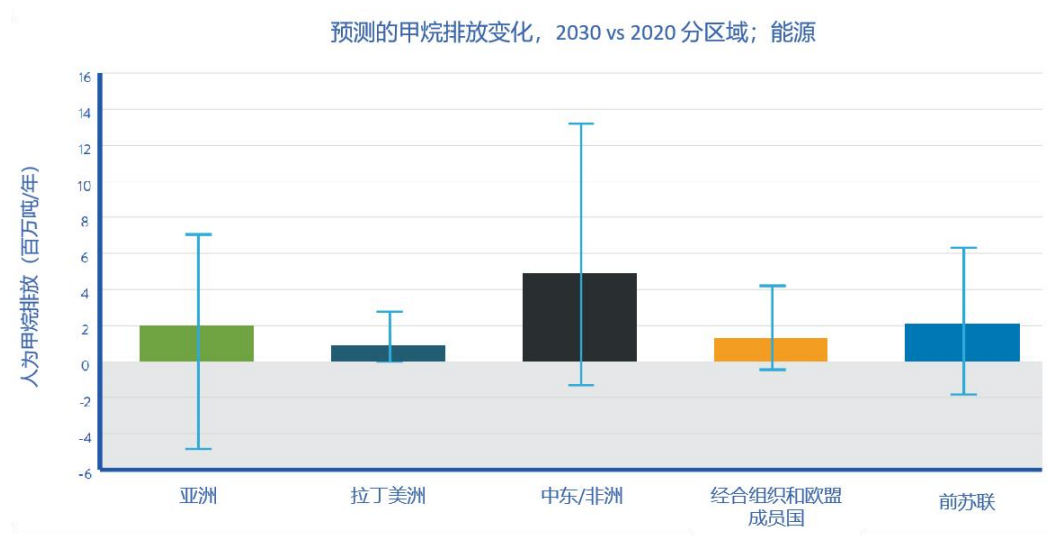
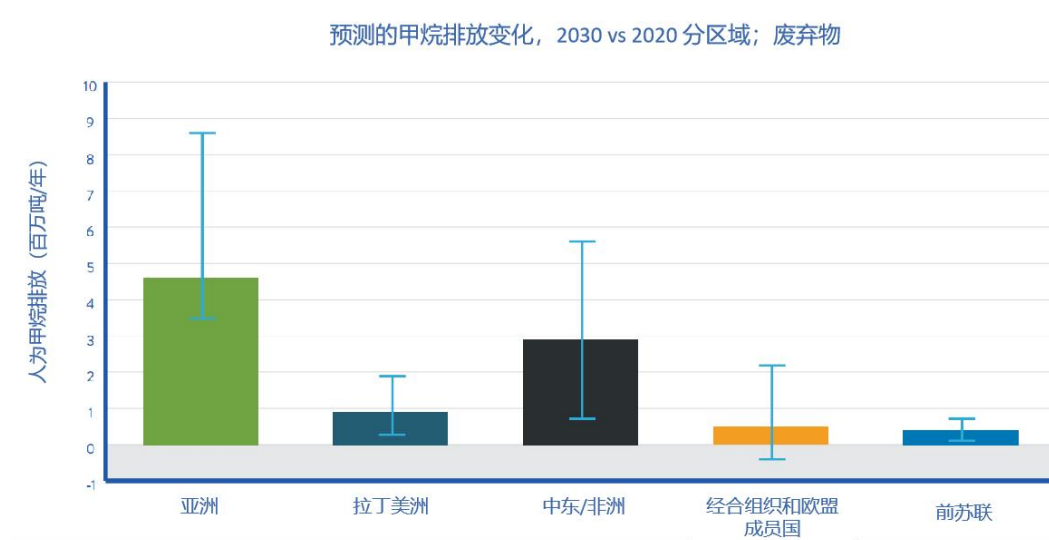
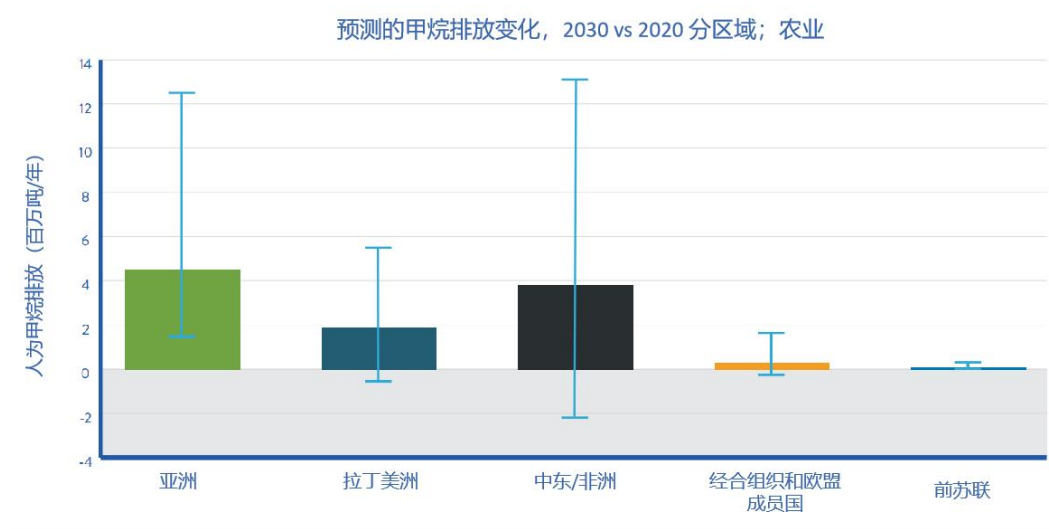


图5. 2020年至2030年间人为甲烷排放基准线的区域和部门预计增加量。条形图表示估算值的平均值(等权重IAM/BU), 范围是IAM和BU结果的第25和第75百分位数的组合结果(以离平均值更远的为准)。前苏联人口约3亿, 其他地区的比例为: 前苏联1, 拉丁美洲2, OECD90+欧盟4, MAF 5, 亚洲13。

表 3.3. IAM 平均值和范围以及按区域和部门划分的 BU 值（2020 年至 2030 年十年间的年度排放变化，单位为百万吨）

排放	IAM 平均值	IAM 25TH	IAM 75TH	IIASA	EPA	IAM 10TH
ASIA	11.4	3.4	16.9	13.0	8.4	
LAM	4.0	2.7	5.9	4.2	2.9	
MAF	14.5	9.8	16.9	8.3	8.9	6.6
OECD90+EU	2.2	-0.2	5.0	1.6	0.6	
REF	4.0	1.1	5.1	1.0	0.9	-1.0
排放 农业	IAM 平均值	IAM 25TH	IAM 75TH	IIASA	EPA	IAM 10TH
ASIA	5.5	2.4	8.0	3.5	3.5	
LAM	2.5	1.8	3.6	2.0	0.8	-1.1
MAF	6.0	1.3	9.3	0.0	3.1	0.7
OECD90+EU	0.5	0.0	1.4	0.2	0.0	
REF	0.1	-0.2	0.2	0.2	0.0	
排放 能源	IAM 平均值	IAM 25TH	IAM 75TH	IIASA	EPA	IAM 10TH
ASIA	2.8	-4.0	5.1	2.3	-0.1	
LAM	0.9	0.1	1.9	1.1	0.8	
MAF	6.2	3.6	8.3	4.6	2.5	2.0
OECD90+EU	1.8	-0.3	2.9	1.7	0.0	
REF	3.9	0.8	4.2	0.0	0.5	0.2
排放 废弃物	IAM MEAN	IAM 25TH	IAM 75TH	IIASA	EPA	IAM 90TH
ASIA	3.0	1.9	4.0	7.2	5.0	4.8
LAM	0.6	0.2	1.0	1.1	1.3	1.0
MAF	2.2	1.6	2.7	3.7	3.3	3.2
OECD90+EU	0.9	-0.3	1.7	-0.3	0.5	
REF	0.3	-0.1	0.3	0.8	0.4	0.3

三、敏感性分析：社会经济情景及所用模型

图 6 所示，对于一些综合评估模型来说，其结果对社会经济基准线情景的变化敏感性较小。然而 IMAGE、MESSAGE 和 WITCH 等其他模型对不同情景基准线变化的预测差异很大。在 SSPs 路径中，一般 SSP1 路径下增幅最小，SSP2 和 SSP3 路径下增幅逐渐增加，SSP5 路径下增幅最大，SSP4 路径下增幅介于 SSP1 和 SSP5 之间（图 6）。

在所有可用基准线中，预计 2020 年至 2030 年期间年排放量增长的标准差为 1,000-1,400 万吨。在一些情景下，模型预估得出排放量增长相对较小的情况中，模型中的这种变化却在预估的排放增长量的占据较大比例，例如占 SSP1 的 47%，ENGAGE 的 61%。相比之下，各模型之间的差异仅占高排放的 SSP3 和 SSP5 路径下 2020 年至 2030 年预计排放增长量的 10-15%。

正如预期，包括 SSP3 和 SSP5 路径在内的更依赖化石燃料和高资源消耗的基准线年排放量预测增长最高：各综合评估模型（IAM）的平均排放量分别为 5,600 万吨和 6,500 万吨。相比之下，可持续发展情景表现出不到一半的预期增长（SSP1 路径：所有 IAMs 结果平均值为 2,400 万吨），最新的 NAVIGATE 和 ENGAGE 模拟结果中也发现了相近情况（分别为 2,800 万吨和 2,200 万吨）。因此，情景的选择可能会使预测围绕着评估模型中所有情景的平均值（每年 3,600 万吨）浮动，范围约-1,500 到+3,000 万吨。另外值得注意的是，基于 SSP1 路径所预测的排放量极低，这其中包括相较于 50% 的 IAMs 评估模型的结果，2010 年到 2020 年大气甲烷浓度增长幅度偏小，这表明如此的低值情况可能不符合实际（与其他路径相比）。

近期的 NAVIGATE 和 ENGAGE 模拟还包括部分关于底层 IAMs 更新的案例。在 IMAGE 模型中，这些更新对 2030 年甲烷年排放量变化（相对于 2020 年）的影响甚微。就 IMAGE 评估模型而言，模型 3.2 和 3.0 版本（用于在 SSPs 路径中）都进行了 NAVIGATE 基准线模拟，并发现全球预测总量增长和部门增长都在 200 万吨以内。然而，在区域层面上的差异更大，例如较新的版本预测前苏联的能源部门年增长量为 800 万吨，而亚洲则减少了 500 万吨。相比之下，MESSAGE-GLOBIOM 模型 1.0 版（用于 SSPs）和 1.1 版都进行了 ENGAGE 基准线模拟，结果差异非常大：2020 年至 2030 年全球年排放总量分别增加了 2,200 和 500 万吨。在该模型中，各模型版本中预测变化最大的是 OECD90+EU 的农业排放量，其在版本 1.0 中增长了 100 万吨，但在版本 1.1 中减少了 400 万吨。总的来说，模型各版本中 2030 年与 2020 年的年排放量相差 1,700 万吨，其中 1,300 万吨源自 MESSAGE-GLOBIOM 版本之间农业部门的预测排放量的减少。基于 NAVIGATE-ENGAGE 和 SSPs 的 REMIND-MAgPIE 版本 1.5 结果的粗略比较，新版本的 REMIND-MAgPIE 模型（版本 2.0-4.1 和 2.1-4.2）预测结果与旧版本相近，而更新 5.0 版本 WITCH 模型预测的能源部门的排放增长量小于 WITCH-GLOBIOM 版本 3.1（用于 SSPs）的预测结果，其他部门的预测结果相近。然而，鉴于情景的不同，不能对这些模型版本进行直接比较。

ENGAGE 情景包含了外推到 2100 年的国家政策（NPi2100），结果显示 2020 年至 2030 年间的年均预期增长量仅为 1,300 万吨，而模型之间的标准偏差更大，为 1,700 万

吨。使用此情景进行模拟的八个模型的年预期增长值域为-1,300 万吨到 4,200 万吨。因此，尽管此情景表明目前国家政策可能会使预期排放量减少约 900 万吨（NPi2100 与 ENGAGE 基准线相比较），但这个数值高度依赖于模型本身。由于 7 个模型（共 8 个模型）发现目前国家政策实施清情况下，2020 年代甲烷排放量仍然增加，即使完全实施目前的政策也很可能不足以令甲烷排放的增长态势扭转。

在部门层面，NPi2100 情景显示 2020 年与 2030 年农业和废弃物部门的甲烷年排放量继续增加，平均值分别为 600 万吨和 700 万吨（值域分别为-200 至 2,500 万吨和 500 至 1,100 万吨），同时能源部门的排放量小幅下降（平均为-100 万吨，值域为 +1,000 至-1,700 万吨）。这一范围的最小值与国际能源署的既定政策情景（STEPS）的预测一致，该情景预测 2020 年至 2030 年期间能源部门的甲烷排放量将减少 1,000 万吨。

四、敏感性分析：统一过程对于结果的影响

本报告所呈现的结果对全球人为排放预测总量不确定性的敏感度甚微。表 1.1 中的全球年度人为排放总量的范围为 3.5 亿至 3.9 亿吨。将全球总量增加或降低到这些水平，预计相较 2020 年，2030 年人为甲烷排放的分别平均增加 2% 和下降 5%。由于能源和农业每年的预计增加量略大，类似的敏感度测试表明这些部门的预计增长变化为 2-6%，而对废弃物部门的影响为 1-3%

需正视这些影响，年排放总量的预计增长 5% 相当于甲烷排放量变化不到 200 万吨。由于全球总体情况差异而产生的这种变化完全处于由不同的模型（约 1,500-2,000 万吨）或不同的社会经济预测（约 2,000-2,500 万吨；见本章第三部分）带来的不确定性范围之内。如上所述，开展基于测量的人为排放量估算，在国家和部门层面是非常有价值（见第一章和专栏一）。后续采取统一化后，可带来更大的影响，且对未来评估国家尺度的预测也很重要。值得注意的是，在本报告制定时，大多数国家尚未有官方 2020 年预测数据。此外，2020 年排放可能会受到 COVID 大流行应对措施的影响（见第一章第一部分）。然而，表 1.1 中大多数结果的预测过程都未包括应对措施，或是借鉴了 CEDS 前一年预测数据。因此，无论如何判断大流行对排放带来的潜在的短期影响，都应尽可能合理地描述长期的排放情况。

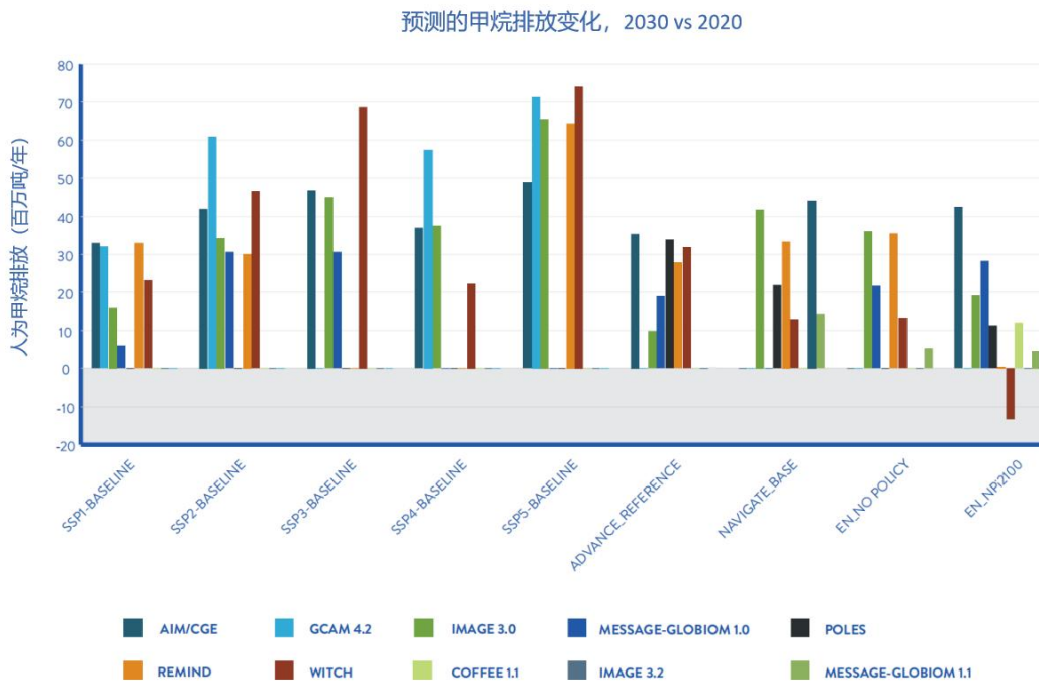
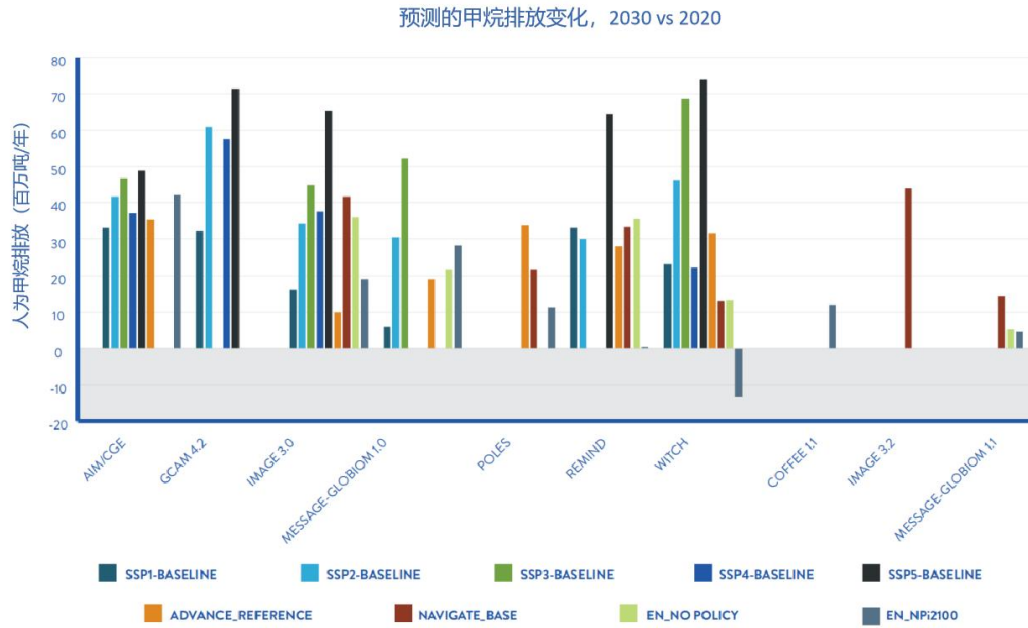


图6. 2020年至2030年全球基线人为甲烷排放量的预计增长总量, 可用IAM模拟按模型(上图)和情景(下图)分组。

专栏一

提高测量和区分不同排放源甲烷排放量的能力

在过去十年中, 针对甲烷排放源的规模和点位方面的工作已取得重大进展。这项工作已开始大大降低排放量结果的不确定性, 助力改进清单, 并为创造额外的减排机会提供支撑。虽然各部门均存在技术可行的减排方案, 并且其方案的实施无需等待完

美的数据，但改进后的经验数据对于进一步扩大减排行动、评估减排行动是否为实现目标带来效果至关重要。

基于区域和国家尺度大气测量所估算的排放量可以提供有用的信息，助力量化当前排放和跟踪排放量随时间的变化。在区域尺度上，基于观测值的排放量化方法（通常称为自上而下方法）依赖于地面观测网络（如 Bergamaschi 等，2018 年）、采用了质量平衡和大气输送模型的机载测量（Neininger 等，2021 年；Gorchov-Negron 等人，2020 年）以及最近的卫星遥感（Turner 等，2016 年；Schneising 等，2020 年；张等，2020 年；Pandey 等，2021 年）。尽管这些方法存在从环境浓度到推测排放量的不确定性，如在正确的条件下应用，现有方法可以准确地评估排放量（例如，以足够频率取样，捕捉排放的潜在变化）。

利用观测数据量化区域和国家甲烷排放的关键挑战之一是区分化石源（如石油、天然气、煤炭源）和生物源（如农业、废物部门）以及人为源和自然源。已开发的分析方法可以通过应用稳定的同位素（Neininger 等，2021）以及示踪剂/示踪剂的比率（例如，甲烷与乙烷的比率；乙烷仅由化石源共同排放）（Smith 人，2015 年）在区域尺度上进行排放源分析。

根据国际协议，大多数国家依靠排放因子来评估自下而上的甲烷排放量，并编制排放清单（如 IPCC 方法一或更复杂的方法二、方法三）。近期研究指出，国家排放清单和自上而下的排放量估算之间存在着巨大差异——既有低估又有高估的情况（Deng 等，2022 年）。此外，即使有时在国家排放清单中会囊括这些不确定性相关内容，但多数现有的全球排放清单或过程模型报告的甲烷排放量未包含不确定性（EPA 2021；IEA 2022）。一些模型提供了一定范围的自下而上预测结果（Saunois 等，2020 年）。基于卫星观测以及地面和机载方法评估的排放结果可有助于更清楚地了解来源，特别是在亚洲、非洲和南美洲等未经充分研究的地区。

自下而上方法可以将数据分解到每个部门或行业内的具体源头，这为推动减缓行动提供了有益洞悉。在区域和国家层面，由直接测量甲烷浓度而得的自上而下数据可以更有效地约束排放量级和点位，以及它们随时间变化的情况。在不同地形的区域和国家尺度上，将自上而下和观测方法融合得到的设施级数据工作已渐完成：如美国（Alvarez 等，2018）、澳大利亚苏拉特盆地（Neininger 等，2021）和墨西哥（Shen 等，2021）。英国和瑞士采用自上而下的数据来完善国家排放估算的做法，已经被纳入 IPCC 工作组清单指南的修订版。

地面和机载观测已被广泛用于描述数量庞大的设施级排放点位的特征（Robertson

等, 2020; Tyner 等, 2021)。在点位/设施级尺度上, 排放分布的表征大大降低了石油和天然气基础设施甲烷排放估算的不确定性——整个供应链的一个共性特征是存在一部分高排放设施与其对总排放量的贡献不成比例。这些高排放设施的数量在时空尺度上都有变化, 因此为准确估计总排放量, 需了解各类点位的排放频率和量级, 而不是对一小部分点位的排放开展监测。有效的方法是需要认识到超级排放设施分布的随机性。因此, 易于部署的地面和机载测量是实现大样量数据获取, 进一步有效描述排放分布特征的必要能力。类似的方法也被用于表征其他甲烷源, 如煤矿 (Kostinek 等, 2021)、废弃物 (Mønster 等, 2015) 和牲畜 (Arandt 等, 2018)。

卫星遥感观测能够描述单一地点以及区域和国家层面的甲烷排放特征 (Lauvaux 等, 2022 年), 并能补充地方活动数据。遥感优势在于可以了解地面或及机载方法难以进入的地区。

甲烷遥感观测可分为三类:

1. 全球测图。这一类别包括 TROPOMI (2017 年发射) 等卫星任务。其他卫星如 GOSAT-GW 也即将加入。这些全球准实时日覆盖的卫星具有相对较粗的空间分辨率 (TROPOMI 为 7 千米×5.5 千米) 或相对中等精度——它们可用于描绘区域尺度 (如美国的二叠纪盆地; Zhang 等, 2020) 和国家尺度 (如墨西哥; Shen 等, 2021) 的排放特征。
2. 点源成像仪。旨在检测和量化来自单一点源羽流的系统。运行中的卫星, 如 GHGSat、PRISMA 和 GF5-02, 以及即将到来的 CarbonMapper、EnMAP 和 Satlantis 等。这些卫星具有较高的空间分辨率 (即 25-50 米) 和足够的光谱灵敏度, 可以探测到 100-500 千克/小时的排放。研究已经证实了遥感是如何成功表征这些大的点源排放情况, 即所谓的超级排放源, 以及如何使用全球测绘和点源测绘仪器对其进行跟踪 (例如 Lavaux 等, 2022; Irakulis-Liotxate 等, 2021; Varon 等, 2018; Varon 等, 2019; Pandey 等, 2019; Sadavarte 等, 2021; Cusworth 等, 2021)。
3. 复合区域通量测绘仪和点源成像仪。计划中的高精度卫星任务, 例如将于 2023 年发射的 MethaneSAT, 将耦合前两类卫星, 为目标区域提供区域总排放或者源的总排放数据。

这些遥感测量说明基于卫星的甲烷监测仪器的生态在不断发展, 可以提供甲烷排放的定量数据, 以及它们在不同来源和地理区域随时间的变化情况。改进后的数据也

将有助于更多地报告甲烷排放的不确定性，这对于证明任一量化方案的稳健性至关重要。鉴于行业标准和环境政策的差异，各地区的排放特征可能存在很大不同。因此，需要在国家、区域和地方尺度上进行更多研究，以产生准确的政策制定实施相关数据，从而有效地指导减排。

正在进行的多项工作将帮助决策者优化甲烷排放量结果。例如，世界气象组织与一些合作伙伴正在开发和推广的全球温室气体综合信息系统（IG3IS），为不同气体和尺度的基于观测的排放估算工作提供了一个共同框架，已被推荐应用于《联合国气候变化框架公约》科技咨询机构第 50 届大会。该方法也被纳入了《IPCC 国家温室气体清单指南 2019 修订版》第六章（排放核查）。同时，由联合国环境规划署（UNEP）主持的国际甲烷排放观察站（IMEO）正在开发一个公共数据平台，以整合不同来源和估算方法的甲烷排放数据（行业报告的、经核实的排放数据、基于经验的区域和国家尺度估算、国家清单、卫星遥感数据集）。IMEO 将通过科学方式将这些多源异质排放数据整合为一个连贯、透明的政策相关数据集。这些数据集和其他数据集将使政府、行业参与者和民间社会能够在此基础上扩大有针对性的减排机会，进一步促进行动，跟踪全球甲烷承诺目标实施阶段的排放变化。

第四章 甲烷排放预测及潜在减排对气候和健康的影响

全球甲烷评估报告分析显示，要实现 1.5°C 情景目标，到 2030 年前削减甲烷排放是最经济有效的途径。报告表明，如果没有采取气候变化政策措施，甲烷排放量将持续增长，因此若要实现 1.5°C 温控目标，须立即采取强有力行动。本节分析了相较于本报告基准线情景，全球甲烷减排承诺的气候影响，介绍了广泛脱碳减排和快速且深入的甲烷减排对气候变化的相互影响，并探讨了相较于针对性行动措施，脱碳带来的甲烷减排影响。

一、情景气候影响评价方法

本研究假设甲烷变化持续到 2030 年以后且遵循 1.5°C 路径，通过时间序列分析了甲烷减排对气候变化的影响，并将这些影响与符合 1.5°C 路径下广泛脱碳的影响进行了比较。脱碳主要是通过化石燃料替代来实现，包括终端电气化、效率提高、需求管理以及土地利用变化的贡献（Rogelj 等，2018）。排放数据主要基于共享社会经济路径情景（SSP），其中 SSP1、2 和 5 的基准线情景和 1.5°C 目标路径保持一致。除甲烷外，所有其他污染物（包括具有冷却效应的气溶胶和二氧化硫等气溶胶前体物）排放量均基于这三个 SSP 情景，2020 年（而不是最初的 2015 年）二氧化碳排放量来自各情景

结果的归一化结果。中心估计值是这三种情况的结果的平均值。甲烷基准线中心估计值是基于 2020 年 3.8 亿吨和本报告调查结果，即 2020 年至 2030 年预计每年增长 3,400 万吨（范围在 2,500-4,900 万吨/年）。将三个 SSPs 路径中所得的 2050 年相对于 2020 年的预估增长率标准化（乘以系数 0.9，系数等于 2030 年 3,400 万吨增长与该年 SSPs 路径预测增长的比率），以匹配本报告中 2030 年分析结果，得出 2050 年中心基准线预估值为 4.7 亿吨/年。全面甲烷减排情景是基于这 3 个 SSP 在 1.5°C 情景下的减排百分比，而脱碳的甲烷成分（主要是减少化石燃料的使用）是基于先前的分析，这约占 1.5°C 情景下甲烷减排总量的 30%（Shindell 和 Smith, 2019; Harmsen 等, 2019）（图 7）。其他脱碳行动，如减少森林砍伐或植树造林，对甲烷排放量影响很小，而情景中的其他甲烷减排行动，如牲畜或废物管理的变化，不作为脱碳行动的一部分。单独检验 3 个 SSP 路径下甲烷减排情况以表征不确定性范围。全球甲烷评估分析了一组更广范围的 1.5°C 情景，其中许多情景不涵盖相关的基准线估算，因此不适合在此进行分析。我们注意到，在更多情景下，相较于所有情景使用的统一基准线增量，2030 年甲烷平均减排量（45%）略高于 SSP1, 2 和 5 路径的结果（37%），但后者的数值完全在全球甲烷评估（GMA）评估的情景结果内（约 30-60%）。

本研究采用与之前评估报告《联合国环境规划署 2017 年评估报告》（UNEP 2017）和《2021 年联合国环境规划署与 CCAC 评估报告》（UNEP 和 CCAC 2021）一致的方法评估气候响应，包括绝对全球升温潜势（AGTPs）、发表研究结论（如 Shindell 等, 2017a）和 CCAC 科学顾问小组的公共温度路径工具¹。简言之，年 AGTPs 用于表示每年每千克排放导致的全球平均温度变化，这是基于气候系统的脉冲响应函数，如 IPCC 在选定的示例年中所使用的 AGTP50 或 AGTP100（Myhre 等, 2013）。在本评估的计算中，瞬态气候响应仍然基于对上一代气候模型（CMIP5）的分析（Geoffroy 等, 2013），因为第六次评估报告发现，这一敏感性范围很好地代表了当前认知。AGTPs 包括对排放物质引起的温度变化碳循环响应，包括甲烷产生的臭氧对碳吸收的影响（Gasser 等, 2017; Collins 等, 2010），如 Shindell 等（2017）所述。与全球甲烷评估（UNEP 和 CCAC 2021）一样，我们采用校准后的甲烷响应，以匹配该评估中使用的全组分气候模型体现的全球气候影响。此外，更新了对二氧化硫排放的反馈以反映其当前更大的影响，例如相比之前评估，第六次评估报告中涉及云反馈。

¹ https://sappathwaytool.shinyapps.io/CCAC_Pathway_Tool_V1/

二、全球甲烷承诺对气候的影响

假设 2020 年排放量为 3.8 亿吨，我们可以评估全球甲烷承诺中设想的甲烷减排行动对气候的影响。GMP 要求相较于 2020 年至少减排 30%，即从 3.8 亿吨减少到 2.7 亿吨。与 2020 年排放量相比，减少了 1.13 亿吨。然而，与基于 2020-2030 年平均增加量 3,400 万吨/年而预估的 2030 年排放量相比，这一较低水平意味着减少 1.5 亿吨，相较于 2030 年预估排放水平减少 36%。

如前文所述，相对于 2030 年基准线 36%的减排幅度是在 1.5°C 温控情景的范围内，1.5°C情景要求在 GMA 评估（全球甲烷评估）的 2030 年水平上减少 30%-60%，但这小于大部分 1.5°C情景下平均 45%的减排比例。

根据全球甲烷评估所采用气候建模，相较 2030 年基准线预测排放量，若能实现甲烷减排，将有助于 2040-2070 年期间全球平均温升降低 0.22°C。在不考虑基准线预估增长的情况下，评估甲烷减排相对于 2020 年排放量的影响，预计将带来 0.17°C 的较小降幅。需要强调的是，以上结果仅基于到 2030 年甲烷变化预测；随着 2030 年后的进一步削减，预期将带来更大的效益。

全球甲烷承诺目前涵盖了世界上约一半的人为甲烷排放量。若要实现这一规模的气候效益，不仅要在签署承诺的各国内达成承诺目标，还需要将全球甲烷承诺推广至更多国家，激励未签署承诺的国家采取类似行动，或者鼓励签署国付诸更大力度的行动。

全球甲烷承诺的多重好处

基于全球甲烷评估中应用综合模型进行的影响分析，我们进一步研究了在 1.5°C 情景下，针对甲烷减排重点的社会若干影响。基于 SSP1、SSP2 和 SSP5 预测的平均甲烷排放基准线，2030 年排放量与 GMP（全球甲烷承诺）实现几乎一致（图 7），到 2050 年，甲烷减排将在全球范围内产生以下累积效益：

- 避免大约 560 万人因臭氧暴露而造成的过早死亡（360 万-800 万范围）
- 避免小麦、玉米、水稻和大豆产量损失 5.8 亿吨（3.6-10 亿吨范围）
- 避免因非死亡率健康影响、林业和农业造成的 5200 亿美元（2018 年）损失（3600-7000 亿美元范围）
- 避免因高温暴露而损失 16000 亿工时（480-2700 亿范围）

尽管这些优势只涵盖了一部分气候损害内容（那些构成作物影响和劳动力损失的部分）。例如，虽然并非所有国家都详细阐述了热暴露对过早死亡的影响，但全球甲烷评估报告称，每百万吨甲烷排放约增加死亡人数 390 例（UNEP 和 CCAC 2021）。基于这些结果，到 2050 年，SSPs 第 1、2 和 5 阶段通过对甲烷减排预计可防止大约 5 万人因热暴露而过早死亡，到本世纪末这个效益将变得更加庞大。

三、广泛脱碳和重点减排甲烷对气候的影响

为了评估广泛脱碳和重点甲烷减排行动对近期气候的作用，我们进行了两项分析：在一种情况下与 2020 年恒定甲烷排放量进行比较（图 8），在另一种情况下与基准线排放量的预测变化进行比较（图 9）。这揭示了在基准线水平下，预测包括二氧化碳和二氧化硫（SO₂）在内的几种非甲烷污染物排放变化的重要作用。

在短期内，甲烷减排比单独脱碳能够产生更大的温控效应。与 2020 年固定排放量相比，在本世纪上半叶，有针对性的甲烷减排对气候的影响大于脱碳对气候的影响（图 8）。在对照基准线预测评估影响时，重点甲烷减排措施对气候的影响超越了 2046 年脱碳对气候的影响（图 9；考虑到标题中所述场景之间的系统差异）。我们重申，脱碳包括在能源部门大幅减少甲烷排放。如果比较针对所有污染物减排中的甲烷减排，并非是脱碳情景下的甲烷减排，有针对性地甲烷减排带来的影响将在 2050 年之前更为显著。根据 2020 年恒定甲烷排放情况或预测基准线排放情况，评估脱碳对气候的影响，脱碳行动在 21 世纪 40 年代变得重要，并将在未来几十年进一步显现其重要性，但它们在 20 年提供的气候效益相对有限（尽管它们提供了很大的空气质量效益）。当然，脱碳和定量的甲烷减排同步推进将产生最大的效益（图 8）。

仅依赖化石燃料逐步淘汰引起的脱碳行动并不能在短期内缓解变暖趋势，是由同源排放物中具有冷却作用的污染物（主要是 SO₂）的有效削减带来的影响。因此，虽然二氧化碳的减少在较长时期内确实会导致气温下降，但在脱碳行动后的起初 1.5 年至 2.5 年，若无额外的针对性措施来抑制甲烷和其他非二氧化碳温室气体的排放，可能会出现一定程度的变暖现象。

这与先前的分析相吻合，表明切实逐步淘汰化石燃料可避免在理想化的短期移除情景中出现的温度大幅增加，但也会带来最小程度的变暖（Shindell 和 Smith, 2019）。然而，当与 SSP 路径中基准线预测相比，而不是与 2020 年的恒定排放量相比，脱碳行动几乎不会导致近期变暖，而在 2040-2050 年期间会出现更显著的降温。这是由于基准线情景中的假设，即在三个 SSP 情景中，CO₂ 排放量将增加（取决于情景强弱），而 SO₂ 排放量将下降，这主要得益于空气污染控制的加强。相对于 2020 年恒定排放的情

况，脱碳下减少 SO₂ 导致较小的变暖，因为在基准线情景下，SO₂ 无论如何都被假设处于下降态势。这也导致了 CO₂ 减排的影响更为显著，因为它们是从较高的基准值开始削减。这两种变化都带来脱碳行动降低温度造成影响。请注意，本报告并未详尽地探讨 CO₂ 和 SO₂ 的预测情况，而是仅依赖于 SSP 路径情景，因此脱碳相对于基准线预测的影响不一定包括所有可能性。

此分析证实了 GMA 和其他研究的结论（如 Dreyfus 等，2022；Allen 等，2022；Shindell 等，2017b；Jackson，2009；Daniel 等，2012），他们都强调了针对二氧化碳/化石燃料采取的应对措施和针对甲烷等短期气候污染物的行动具有独特性和互补性，并呼吁制定单独的缓解战略和/或报告。

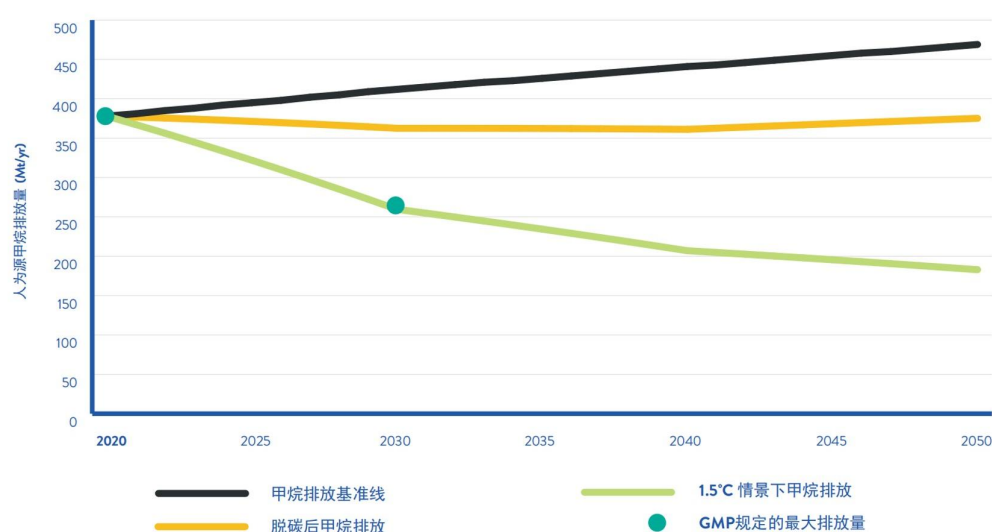


图7. 在最佳估计基准预测（第3.2.2节）、逐步淘汰化石燃料的深度脱碳情景和完全1.5°C情景下的甲烷排放。蓝绿色圆点表示2030年相对于2020年的排放量减少30%，这是全球甲烷承诺的最低目标。

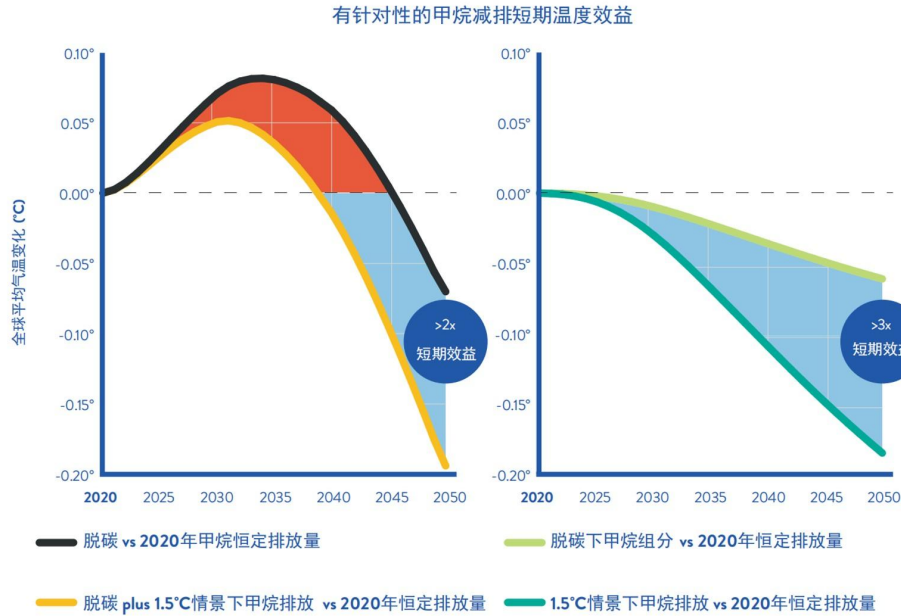


图8. (左图) 与脱碳情景加上1.5°C情景下有针对性的甲烷减排措施(橙色)相比,在逐步淘汰化石燃料使用的脱碳情景下(黑色)的气候响应。请注意,脱碳情景减少了包括一些甲烷在内的所有污染物。(右图)气候仅对脱碳情景下甲烷排放量变化的响应(浅绿色),与脱碳情景加上1.5°C情景下的目标甲烷减排(绿松石色)相比,所有这些情景都相对于2020年的恒定排放量。这些值是IPCC共同社会经济路径(SSP)情景1、2和5的平均值。

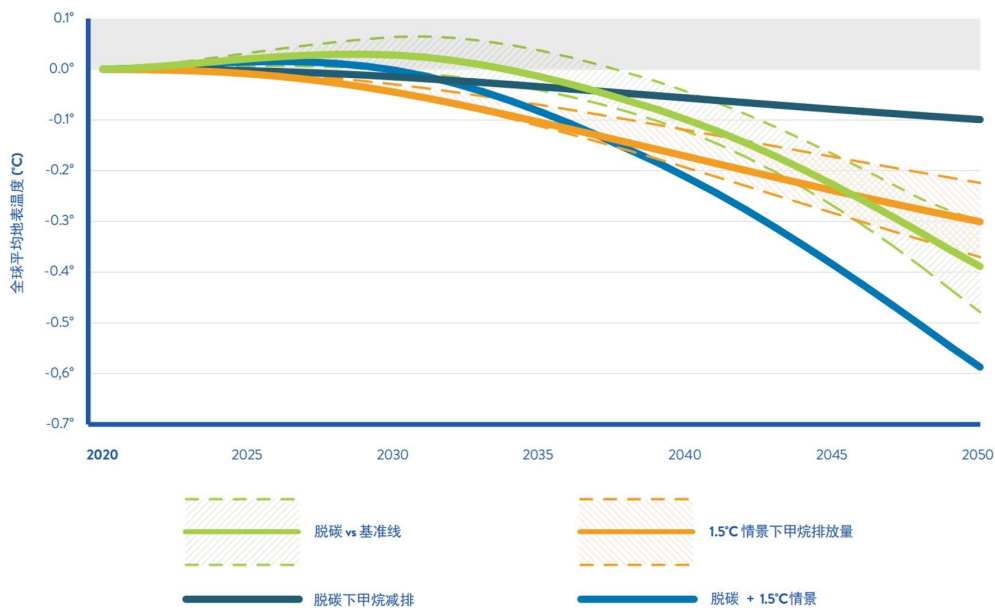


图9. 相对于预计的基线变化,脱碳情景下(绿色)对所有污染物(包括甲烷)的气候响应,脱碳情景(蓝色)和1.5°C情景下对单独甲烷的气候响应以及1.5°C场景下(橙色)对脱碳和甲烷的气候反应。实线表示SSP第1、2和5阶段的平均值,虚线表示这三种情况下的范围。请注意,尽管脱碳的最大影响在20世纪30年代末超过了甲烷的最小影响,但这种比较是不现实的,因为这两种污染物的影响在这些情况下系统地变化(即,最大值应与最大值进行比较,平均值应与平均值进行比较;最小值应与相应的最小值进行比较)。

定义与模型

EDGAR - 全球大气研究排放数据库（EDGAR）是一个关于温室气体和空气污染人为排放的全球数据库。<https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>

CEDS - 社区排放数据系统（CEDS）清单是一个公开的开源框架，可计算人为气溶胶、气溶胶前体和反应性化合物的年度历史排放估计值。
<http://www.globalchange.umd.edu/ceds/>

ADVANCE - 减排政策成本和影响改良分析的高级模型开发和验证（ADVANCE）项目。可参见：<https://www.fp7-advance.eu/>

NAVIGATE - 支持气候决策的下一代高级综合评估模型（NAVIGATE）项目。可参见：<https://www.navigate-h2020.eu/>

ENGAGE - ENGAGE 项目。可参见：<https://www.engage-climate.org/>.

SSP 数据库（共享社会经济路径）。可参见：<https://iiasa.ac.at/models-anddata/iamc-15degc-scenario-explorer>

GAINS - 温室气体和空气污染物的相互作用和协同效应模型。可参见：
<https://iiasa.ac.at/models-and-data/greenhouse-gas-and-air-pollution-interactions-and-synergies>

参考文献

- Alexandratos, N. and Bruisma, J. (2012). *World Agriculture Towards 2030/2050 –The 2012 Revision*, ESA Working Paper No. 12-03, Agricultural Development Economics Unit, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- Allen, M. R., Peters, G. P., Shine, K. P., Azar, C., Balcombe, P., Boucher, O. *et al.* (2022). Indicate separate contributions of long-lived and short-lived greenhouse gases in emission targets. *NPJ Climate and Atmospheric Science* 5(1), 1-4. <https://www.nature.com/articles/s41612-021-00226-2>.
- Alvarez, R. A., Zavala-Araiza, D., Lyon, D.R., Allen, D.T., Barkley, Z.R., Brandt, A.R., Davis, K.J. *et al.* (2018). Assessment of methane emissions from the US oil and gas supply chain. *Science* 361, no. 6398, 186-188. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aar7204>.
- Arndt, C., Leytem, A. B., Hristov, A. N., Zavala-Araiza, D., Cativiela, J. P., Conley, S. *et al.* (2018). Short-term methane emissions from 2 dairy farms in California estimated by different measurement techniques and US Environmental Protection Agency inventory methodology: A case study. *Journal of dairy science* 101(12), 11461-11479. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30316601/>.
- Bergamaschi, P., Karstens, U., Manning, A. J., Saunio, M., Tsuruta, A., Berchet *et al.* (2018). Inverse modelling of European CH₄ emissions during 2006–2012 using different inverse models and reassessed atmospheric observations. *Atmos. Chem. Phys.* 18, 901-920, <https://doi.org/10.5194/acp-18-901-2018>.
- Canadell, J. G., Monteiro, P. M. S., Costa, M. H., Cotrim da Cunha, L., Cox, P. M., Eliseev *et al.* (2021). Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Collins, W.J., Sitch, S. and Boucher, O. (2010). How vegetation impacts affect climate metrics for ozone precursors. *J. Geophys. Res.* 115, D23308. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2010JD014187>.
- Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Dentener, F., Van Aardenne, J.A. *et al.* (2018). Gridded emissions of air pollutants for the period 1970–2012 within EDGAR v4.3.2. *Earth Syst. Sci. Data* 10(4), 1987-2013. <https://essd.copernicus.org/articles/10/1987/2018/>.
- Cusworth, D.H., Duren, R.M., Thorpe, A.K., Pandey, S., Maasackers, J.D., Aben, I. *et al.* (2021). Multi-satellite imaging of a gas well blowout enables quantification of total methane emissions. *Geophys. Res. Lett.* 42(2), e2020GL090864. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2020GL090864>.
- Daniel, J.S., Solomon, S., Sanford, T.J., McFarland, M., Fuglestedt, J.S. and Friedlingstein, P. (2012) Limitations of single-basket trading: lessons from the Montreal Protocol for climate policy. *Clim. Change* 111, 241–248. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0136-3>.
- Dean, J.F. Middelburg, J.J., Röckmann, T., Aerts, R., Blauw, L.G., Egger, M. *et al.* (2018) Methane feedbacks to the global climate system in a warmer world. *Reviews of Geophysics* 56(1), 207–250. <https://doi.org/10.1002/2017RG000559>.
- Deng, Z., Ciais, P., Tzompa-Sosa, Z. A., Saunio, M., Qiu, C., Tan, C. *et al.* (2022). Comparing national greenhouse gas budgets reported in UNFCCC inventories against

- atmospheric inversions. *Earth System Science Data* 14, 1639-1675. <https://essd.copernicus.org/articles/14/1639/2022/>.
- Dreyfus, G., Xu, Y., Shindell, D., Zaelke, D., and Ramanathan, V. (2022) Mitigating Climate Disruption in Time: a self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 119(22), e2123536119. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2123536119>.
- Ganesan, A. L., Schwietzke, S., Poulter, B., Arnold, T., Lan, X., Rigby, M. *et al.* (2019). Advancing Scientific Understanding of the Global Methane Budget in Support of the Paris Agreement. *Global Biogeochem. Cycles* 33 (12). <https://doi.org/10.1029/2018GB006065>.
- Gasser, T., Peters, G.P., Fuglestedt, J.S., Collins, W.J., Shindell, D.T. and Ciais, P. (2017). Accounting for the climate-carbon feedback in emission metrics. *Earth System Dynamics* 8(2), 235-253. <https://esd.copernicus.org/articles/8/235/2017/>.
- Gedney, N., Huntingford, C., Comyn-Platt, E. and Wiltshire, A. (2019). Significant feedbacks of wetland methane release on climate change and the causes of their uncertainty. *Environmental Research Letters* 14(8), 84027. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab2726>.
- Geoffroy, O., Saint-Martin, D., Bellon, G., Voldoire, A., Oliv  , D.J.L. and Tyt  ca, S. (2013). Transient climate response in a two-layer energy-balance model. Part II: Representation of the efficacy of deep-ocean heat uptake and validation for CMIP5 AOGCMs. *J. Climate*. 26, 1859-1876. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00196.1>.
- Global Methane Pledge (2022). Global Methane Pledge website: Pledges, 1 September. <https://www.globalmethanepledge.org/#pledges>. Accessed 1 September 2022.
- Gorchov Negron, A. M., Kort, E. A., Conley, S. A., and Smith, M. L. (2020). Airborne assessment of methane emissions from offshore platforms in the US Gulf of Mexico. *Environmental Science & Technology* 54(8), 5112-5120. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.0c00179>.
- Harmsen, M.J.H.M., van Vuuren, D.P., Bodirsky B.L., Chateau, J., Durand-Lasserve, O., Drouet, L. *et al.* (2019). The role of methane in future climate strategies: mitigation potentials and climate impacts. *Climatic Change* 163, 1409–1425. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-019-02437-2>.
- Harmsen, M., van Vuuren, D.P., Bodirsky, B.L., Chateau, J., Durand-Lasserve, O., Drouet, L. *et al.* (2020). The role of methane in future climate strategies: mitigation potentials and climate impacts. *Climatic Change* 163, 1409–1425. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-019-02437-2>.
- Harmsen, M., Kriegler, E., Van Vuuren, D.P., van der Wijst, K.I., Luderer, G., Cui, R. *et al.* (2021). Integrated assessment model diagnostics: key indicators and model evolution. *Environmental Research Letters* 16(5), 054046. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abf964>.
- Hmiel, B., Petrenko, V.V., Dyonisius, M.N., Buizert, C., Smith, A.M., Place, P.F. *et al.* (2020). Preindustrial 14 CH₄ indicates greater anthropogenic fossil CH₄ emissions. *Nature* 578, 409–412. <https://www.nature.com/articles/s41586-020-1991-8>.
- Hoesly, R.M., Smith, S.J., Feng, L., Klimont, Z., Janssens-Maenhout, G., Pitkanen, T. *et al.* (2018). Historical (1750–2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS). *Geoscientific Model Development* 11(1), 369-408. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-369-2018>.
- H  glund-Isaksson, L., G  mez-Sanabria, A., Klimont, Z., Rafaj, P. and Sch  pp, W. (2020). Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in a

- 2050 timeframe. *Environmental Research Communications* 2(2).
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/ab7457>.
- Howarth, R.W. (2019). Ideas and perspectives: is shale gas a major driver of recent increase in global atmospheric methane?. *Biogeosciences* 16(15), 3033-3046.
<https://doi.org/10.5194/bg-16-3033-2019>.
- International Energy Agency (IEA) (2021). *World Energy Outlook 2021*, International Energy Agency, Paris, 2021. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.
- International Energy Agency (IEA-WEO) (2018) *World Energy Outlook 2018*, International Energy Agency, Paris.
- International Energy Agency (IEA) 2022. *Methane Tracker 2022*. IEA.
<https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Japan.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2019a). *Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Japan.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2019b). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 755.
<https://doi.org/10.1017/9781009157964.001>.
- Jackson, S. C. (2009). Parallel Pursuit of Near-Term and Long-Term Climate Mitigation. *Science* 326, 526–527. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1177042>.
- Kirschke, S., Bousquet, P., Ciais, P., Saunois, S., Canadell, J.G., Dlugokencky, E.J. *et al.* (2013). Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience* 6, 813–823. <https://doi.org/10.1038/ngeo1955>.
- Kholod, N., Evans, M., Pilcher, R.C., Roshchanka, V., Ruiz, F., Coté, M. *et al.* (2020). Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production. *Journal of Cleaner Production* 256, 120489.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120489>.
- Kleinen, T., Gromov, S., Steil, B. and Brovkin, V. (2021). Atmospheric methane underestimated in future climate projections. *Environmental Research Letters* 16(9), 094006. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac1814>.
- Kostinek, J., Roiger, A., Eckl, M., Fiehn, A., Luther, A., Wildmann, N. *et al.* (2021). Estimating Upper Silesian coal mine methane emissions from airborne in situ observations and dispersion modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics* 21(11), 8791-8807. <https://doi.org/10.5194/acp-21-8791-2021>.
- Lan, X., Basu, S., Schwietzke, S., Bruhwiler, L. M. P., Dlugokencky, E. J., Michel, S. E. *et al.* (2021). Improved Constraints on Global Methane Emissions and Sinks Using $\Delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$. *Global Biogeochem. Cycles* 35 (6). <https://doi.org/10.1029/2021GB007000>.
- Laughner, J.L., Neu, J.L., Schimel, D., Wennberg, P.O., Barsanti, K., Bowman, K.W. *et al.* (2021). Societal shifts due to COVID-19 reveal large-scale complexities and feedbacks between atmospheric chemistry and climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 118, e2109481118. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34753820/>.
- Mønster, J.G., Samuelsson, J., Kjeldsen, P., and Scheutz, C. (2015). Quantification of methane emissions from 15 Danish landfills using the mobile tracer dispersion method. *Waste Manage* 35, 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.006>.

- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J. *et al.* (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. Midgley, P.M. (eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Neininger, B. G., Kelly, B. F., Hacker, J. M., Lu, X. and Schwietzke, S. (2021). Coal seam gas industry methane emissions in the Surat Basin, Australia: comparing airborne measurements with inventories. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 379(2210), 20200458. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0458>.
- Pandey, S., Gautam, R., Houweling, S., Denier van der Gon, H., Sadavarte, P., Borsdorff, T., *et al.* (2019). Satellite observations reveal extreme methane leakage from a natural gas well blowout, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 116(52), 26376-26381. <https://doi.org/10.1073/pnas.1908712116>.
- Pandey, S., Houweling, S., Lorente, A., Borsdorff, T., Tsvilidou, M., Bloom, A.A. *et al.* (2021). Using satellite data to identify the methane emission controls of South Sudan's wetlands. *Biogeosciences* 18, 557-572. <https://doi.org/10.5194/bg-18-557-2021>.
- Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B., Fujimori, S., *et al.* (2017). Shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environ. Change* 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
- Robertson, A. M., Edie, R., Field, R. A., Lyon, D., McVay, R., Omara, M. *et al.* (2020). New Mexico Permian Basin measured well pad methane emissions are a factor of 5–9 times higher than US EPA estimates. *Environmental Science & Technology* 54(21), 13926-13934. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02927>.
- Robinson, S., Mason d'Croz, D., Islam, S., Sulser, T.B., Robertson, R.D., Zhu, T. *et al.* (2015). *The International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade (IMPACT): model description for version 3*. IFPRI Discussion Paper 1483, Washington, DC: International Food Policy Research Institute. <https://www.ifpri.org/publication/international-model-policy-analysis-agricultural-commodities-and-trade-impact-model-0>.
- Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V. *et al.* (2018). Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development. In Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R. *et al.* (eds.). *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Sadavarte, P., Pandey, Maasakkers, Lorente, Borsdorff, vd Gon, Houweling, Aben (2021). Methane emissions from super-emitting coal mines in Australia quantified using TROPOMI observations. *Environ. Sci. Technol.* 55(24), 16573-16580. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03976>. Saunio, M., Bousquet, P., Poulter, B., Peregón, A., Ciais, P., Canadell, J.G. *et al.* (2016). The global methane budget 2000–2012. *Earth System Science Data* 8, 697-751. <https://doi.org/10.5194/essd8-697-2016>.
- Saunio, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B. *et al.* (2020). The Global Methane Budget 2000-2017. *Earth Syst. Sci. Data* 12(3), 1561-1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>.

- Schneising, O., Buchwitz, M., Reuter, M., Vanselow, S., Bovensmann, H., and Burrows, J.P. (2020). Remote sensing of methane leakage from natural gas and petroleum systems revisited. *Atmos. Chem. Phys.* 20, 9169–9182. <https://doi.org/10.5194/acp-20-9169-2020>.
- Schwietzke, S., Sherwood, O.A., Bruhwiler, L.M., Miller, J.B., Etiope, G., Dlugokencky, E.J. *et al.* (2016). Upward revision of global fossil fuel methane emissions based on isotope database. *Nature* 538(7623), 88-91.
- Shen, L., Zavala-Araiza, D., Gautam, R., Omara, M., Scarpelli, T., Sheng, J. *et al.* (2021) Unravelling a large methane emission discrepancy in Mexico using satellite observations. *Remote Sensing of Environment* 260(2021), 112461. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112461>.
- Sherwood, O. A., Schwietzke, S., Arling, V. A., and Etiope, G. (2017). Global inventory of gas geochemistry data from fossil fuel, microbial and burning sources, version 2017. *Earth System Science Data* 9(2), 639-656. <https://doi.org/10.5194/essd-9-639-2017>.
- Shindell, D., Fuglestedt, J.S. and Collins, W.J. (2017a). The Social Cost of Methane: Theory and Applications. *Faraday Disc.* 200, 429-451. <https://doi.org/10.1039/C7FD00009J>.
- Shindell, D., Borgford-Parnell, N., Brauer, M., Haines, A., Kuylenstierna, J.C.I., Leonard, S.A. *et al.* (2017b). A climate policy pathway for near-and long-term benefits. *Science* 356(6337), 493-494. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aak9521>.
- Shindell, D. and Smith, C.J. (2019). Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels. *Nature* 573, 408-411. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1554-z>.
- Smith, M. L., Kort, E. A., Karion, A., Sweeney, C., Herndon, S. C., and Yacovitch, T. I. (2015). Airborne ethane observations in the Barnett Shale: Quantification of ethane flux and attribution of methane emissions. *Environ. Sci. Tech.* 49(13), 8158-8166. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00219>.
- Stavert, A.R., Saunio, M., Canadell, J.G., Poulter, B., Jackson, R.B., Regnier, P. *et al.* (2022). Regional trends and drivers of the global methane budget. *Global Change Biology* 28(1), 182-200. <https://doi.org/10.1111/gcb.15901>.
- Stevenson, D., Derwent, R., Wild, O. and Collins, W. (2021). COVID-19 lockdown NO_x emission reductions can explain most of the coincident increase in global atmospheric methane. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 1-8. <https://doi.org/10.5194/acp-2021-604>.
- Thornhill, G., Collins, W., Olivie, D., Skeie, R.B., Archibald, A., Bauer, S. *et al.* (2021). Climate-driven chemistry and aerosol feedbacks in CMIP6 Earth system models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(2), 1105-1126. <https://doi.org/10.5194/acp-21-1105-2021>.
- Tunnicliffe, R. L., Ganesan, A. L., Parker, R. J., Boesch, H., Gedney, N., Poulter, B. *et al.* (2020). Quantifying sources of Brazil's CH₄ emissions between 2010 and 2018 from satellite data. *Atmospheric Chemistry and Physics* 20(21), 13041-13067. <https://doi.org/10.5194/acp-20-13041-2020>.
- Turner, A. J., Jacob, D. J., Benmergui, J., Wofsy, S. C., Maasakkers, J. D., Butz, A. *et al.* (2016) A large increase in U.S. methane emissions over the past decade inferred from satellite data and surface observations. *Geophys. Res. Lett.* 43, 2218– 2224. <https://doi.org/10.1002/2016GL067987>.
- Turner, A. J., Frankenberg, C., and Kort, E. A. (2019). Interpreting contemporary trends in atmospheric methane. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(8), 2805-2813. <https://doi.org/10.1073/pnas.1814297116>.

- Tyner, D. R., and Johnson, M. R. (2021). Where the Methane Is—Insights from Novel Airborne LiDAR Measurements Combined with Ground Survey Data. *Environmental Science & Technology* 55(14), 9773-9783. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34251207/>.
- United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition (2021). Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- United States (2021). U.S. Methane Emissions Reduction Action Plan. *The White House Office of Domestic Climate Policy*.
- United States Department of State (2021). *U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s*. Press Release 10 November 2021.
- United States Environmental Protection Agency (2019). *Global Non-CO₂ Greenhouse Gas Emission Projections & Marginal Abatement Cost Analysis: Methodology Documentation*. EPA-430-R-19-012. https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-09/documents/nonco2_methodology_report.pdf.
- United States Environmental Protection Agency (2021). *GHG Inventory Development Process and Guidance*. EPA Center for Corporate Climate Leadership.
- Varon, D. J., Jacob, D. J., McKeever, J., Jervis, D., Durak, B. O., Xia, Y. *et al.* (2018). Quantifying methane point sources from fine-scale satellite observations of atmospheric methane plumes. *Atmospheric Measurement Techniques* 11(10), 5673-5686. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5673-2018>.
- Varon, D.J., McKeever, J., Jervis, D., Maasackers, J.D., Pandey, S., Houweling, S., *et al.* (2019). Satellite discovery of anomalously large methane point sources from oil/gas production. *Geophys.Res.Lett.* 26(22), 13507-13516. <https://doi.org/10.1029/2019GL083798>.
- Zhang, Z., Zimmermann, N.E., Stenke, A., Li, X., Hodson, E.L., Zhu, G. *et al.* (2017). Emerging role of wetland methane emissions in driving 21st century climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(36), 9647-9652. <https://doi.org/10.1073/pnas.1618765114>.
- Zhang, Y., Gautam, R., Pandey, S., Omara, M., Maasackers, J. D., Sadavarte, P. *et al.* (2020). Quantifying methane emissions from the largest oil-producing basin in the United States from space. *Science advances* 6(17), eaaz5120. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aaz5120>.
- Zhang, Z., Poulter, B., Knox, S., Stavert, A., McNicol, G., Fluet-Chouinard, E. *et al.* (2021). Anthropogenic emission is the main contributor to the rise of atmospheric methane during 1993–2017. *National Science Review* 9(5), nwab200. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab200>.