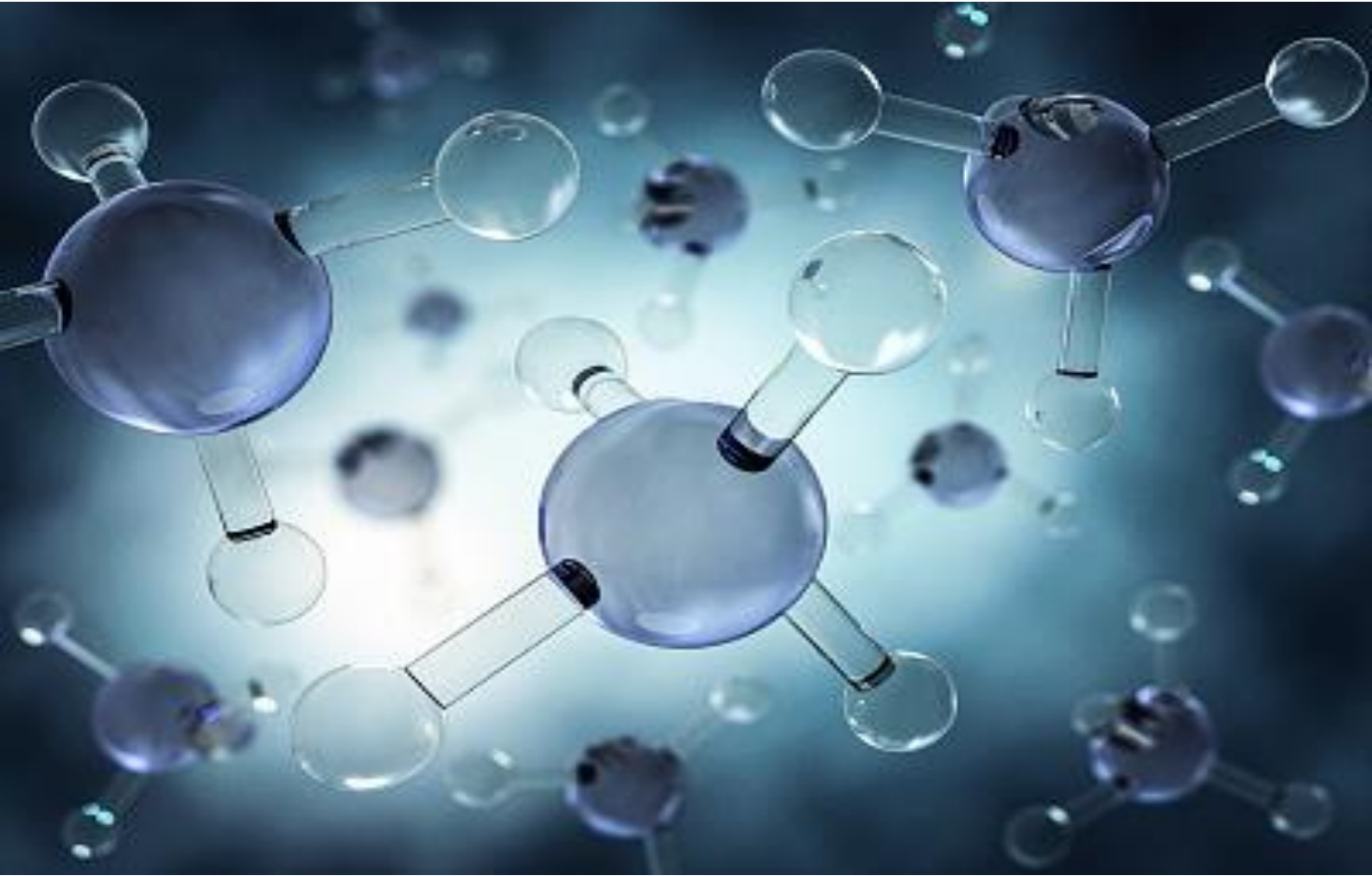




甲烷减排：碳中和新焦点



北京绿色金融与可持续发展研究院 高瓴产业与创新研究院 绿色创新发展中心

2022年6月

目录

摘要	2
一、为何关注甲烷?	6
1.1. 甲烷是重要的温室气体	6
1.2. 甲烷成为全球气候变化合作重要议题	7
1.3. 全球甲烷排放来自哪里?	9
二、我国甲烷减排路径	9
2.1. 甲烷排放主要来源	9
2.2. 甲烷减排潜力和路径	13
2.2.1. 煤炭开采	15
2.2.2. 油气行业	17
2.2.3. 畜牧业	18
2.2.4. 水稻种植	20
2.2.5. 固体废弃物处理	20
2.2.6. 污水处理	22
三、我国甲烷减排的挑战与机遇	23
3.1. 挑战	23
3.1.1. 总量大、仍有增长趋势	23
3.1.2. 难度高、缺少经济可行的技术	24
3.1.3. 数据基础较为薄弱	24
3.2. 机遇	25
3.2.1. 能源转型和瓦斯回收利用推动甲烷减排	25
3.2.2. 循环经济和无废城市助力甲烷减排	27
3.2.3. CCER 等市场化手段有望发挥更大作用	27
四、甲烷减排行动展望和建议	28
4.1. 加快和扩大国际合作	28
4.2. 制定国家和地区甲烷减排行动方案	29
4.3. 推动煤炭、油气领域企业率先开展行动	30
4.4. 强化金融支持甲烷减排行动的力度	32
References	34

摘要

甲烷 (CH₄) 是一种碳氢化合物,是天然气的主要成分,也是一种具有温室效应的气体。2019 年,全球温室气体总排放中甲烷排放当量约占 19%¹,是由人类活动造成的仅次于二氧化碳的第二大温室气体。甲烷在大气存留时间约为 12 年,远低于二氧化碳的 100 年。但甲烷具有较强的热效应,以 100 年和 20 年全球增温潜势(Global warming potential, 简称 GWP²) 衡量,分别约为二氧化碳的 28 和 82 倍³。2021 年 8 月联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 发布了 IPCC 第六次评估报告中指出,甲烷在全球气温较工业化前水平上升的 1.1° C 中,约有 0.5° C 源自甲烷排放。

甲烷的人为排放源主要包括能源、农业和废弃物处理等活动,具体包括来自煤炭、油气开采过程中释放的煤层气、天然气逃逸,水稻种植过程有机质分解、畜禽养殖的动物肠道发酵和动物粪便管理,以及生活垃圾和污水处理中产生的甲烷。甲烷的天然排放源包括湿地、冻土带等的排放。

作为短寿命强效温室气体,减少甲烷排放可为应对气候变化带来明显的近期效果,对实现《巴黎协定》温控目标尤为重要。IPCC 第六次评估报告认为,甲烷减排为未来几十年减缓全球变暖的最高效方法之一,因此强调减少甲烷排放的重要性和紧迫性。此外,甲烷本身就是宝贵的清洁燃料,控排、采集、回收甲烷兼具经济、社会、安全等多重效益。

美国和欧盟已经出台多项甲烷减排战略和行动计划。2021 年底联合国气候变化缔约方第 26 次大会(the 26th UN Climate Change Conference of the Parties, COP 26) 期间,约 100 个国家联合签署了“全球甲烷承诺”倡议(Global Methane Pledge),计划将在 2030 年将甲烷排放量在 2020 年基础上减少 30%。中美两国在 COP26 期间发布的《中美关于在 21 世纪 20 年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》中,也将甲烷减排作为交流合作的重点领域。目前,我国在“十四五”规划和《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中均提出“要加强对甲烷等非二氧化碳温室气体管控”,并明确表示将制定甲烷排放国家行动方案。

我国是甲烷排放大国,尽管 2030 年前碳排放提前达峰的主要控排对象是二氧化碳,要实现 2060 年前碳中和,甲烷减排将成为重点和难点之一,需提前采取行动。为此,本

¹荷兰环境评估所(PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, PBL),全球二氧化碳和温室气体总排放量的趋势:2020 年报告。

² GWP 是用于衡量各种温室气体对气候变暖影响的指数,指特定气体与同质量二氧化碳比,在特定时间段内造成的、以辐射强度衡量的全球暖化直接效应的比值,二氧化碳的 GWP 值为 1。不同衡量气体 GWP 值不同,GWP 值越大表示其暖化的直接效应影响越大。GWP 需要加上其所衡量的时间尺度,通常为 100 年或 20 年。

³ 根据 IPCC 第六次评估报告,非化石源甲烷的 100 年 GWP 为 27.2,20 年 GWP 为 80.8,化石源甲烷的 100 年 GWP 为 29.8,20 年 GWP 为 82.5。

报告对全球和我国甲烷排放最新现状和减排行动进行了梳理，并重点分析了我国甲烷排放源的构成、变化趋势以及相关的减排政策和技术，识别了甲烷减排所面临的挑战和机遇，探讨在碳中和愿景下，强化甲烷减排行动的可能性和潜力，以及金融支持甲烷减排的潜力，并提出了一系列具体建议。

主要发现：

甲烷减排对我国实现碳中和目标至关重要

根据最近的官方数据，2014 年我国甲烷排放为 11.3 亿吨二氧化碳当量，占当年总体温室气体排放约为 10%⁴。诸多研究表明⁵，未来 10 年，我国甲烷排放仍呈增长态势，有望在 2030-2050 年期间缓慢回落。若不采取积极措施，我国甲烷排放将在 2050 年仍将处于高位，现有较成熟技术的推广可将总体排放放在现有趋势基础上降低 40-50%；排放总量中，能源相关排放将逐步减少，而农业部门排放可能随经济发展、生活水平提高等增加。总体趋势距实现碳中和目标要求还有一定距离。要实现甲烷深度减排，仍需突破性技术和大量激励措施。

煤矿开采和农业活动是我国主要的甲烷排放源

我国能源活动相关的甲烷排放占总排放比例⁶约为 46%，主要是煤矿开采产生的排放，其在甲烷总排放的占比约为 45%（其中逃逸排放占 40%，燃料燃烧排放占 5%），农业活动相关甲烷排放约占 42%，废弃物处理相关甲烷排放占 12%。与其他国家不同，煤矿开采是中国最大排放源，而作为美国和欧洲主要排放源的油气行业（包括开采和运输过程的逃逸排放），在中国排放结构中占比较低。农业活动均为中国和美国第二大排放源，是欧洲最大排放源，然而中国农业排放主要来自水稻种植，美国和欧洲的农业排放则主要来自畜禽养殖。

甲烷减排措施的技术经济性差异大

甲烷减排的措施主要包括提高瓦斯回收减少煤矿相关排放，通过油气管道的维护、检测、修复等减少油气行业排放，通过改良水稻种植技术减少稻田排放，通过饲养管理及膳食结构调整等减少畜牧业相关排放，通过加强废弃物管理，减少固体废弃物填埋和污水处理的甲烷排放等。减排措施的推广有赖于其技术经济性。全球范围内低成本、甚至零成本减排技术主要在城市废弃物管理和油气行业内，以及水稻种植和煤矿开采。我国在短期内能以低成本减排的甲烷排放比例远低于其他发达国家，仅仅在控制油气逃逸和废弃物填埋等措施方面可实现一定比例的零成本减排；对于最大排放源煤矿开采逃逸排放，存在一定成熟减排技术，减

⁴ 来自中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告（2018），不包含土地利用、土地利用变化和林业（LULUCF），其中全球增温潜势（GWP）值根据发展中国家提交给联合国气候变化框架公约的排放清单报告要求，采用《IPCC 第二次评估报告》中 100 年时间尺度下的数值 21 倍，下文中单独计算我国的排放量时所用 GWP 系数均与此一致。

⁵ 参考清华大学、世界资源研究所、劳伦斯伯克利国家实验室的研究结果。

⁶ 同 4。

排的技术潜力明显，但成本差异大，减排经济性如何需在不同政策环境下进一步探讨。

我国甲烷减排的实践、机遇与挑战

我国早在 2007 年的首份应对气候变化国家方案中就已提出甲烷减排行动，主要集中在煤矿瓦斯回收和农村沼气工程。现行的清洁能源转型、“无废城市”、碳市场等战略和政策为更进一步促进甲烷减排带来机遇。随着煤炭开采总量下降，及煤层气开发利用效率提升，煤矿相关甲烷排放长期呈下降趋势；城市垃圾分类、固废、污水处理、管理水平的不断提升，有利于减少废弃物相关甲烷排放；国家自愿碳市场交易等市场化手段也会促进甲烷减排技术的推广、开发和探索。碳中和背景下，我国甲烷减排面临更多挑战。除了总量大、减排任务重，还有重点领域减排技术成本高、数据基础不完善等挑战。尤其是，第二大排放源农业活动相关甲烷排放控制，一方面缺少低成本高效减排的措施，另一方面，随着生活水平提升，膳食结构变化存在一定不确定性，农业畜禽养殖相关排放存在继续增加的可能性，成为未来的减排难点。

主要建议：

建议制定地区甲烷减排行动方案

我国有望发布国家层面的甲烷减排战略，将为双碳目标下甲烷减排提供重要指导。与此同时，考虑到地方性差异性，建议制定地方行动方案。方案的目标首先要摸清家底，衡量现有循环经济、能源转型、绿色农业等战略可以带来的甲烷减排潜力，制定新的减排要求、行动，出台激励和保障措施，促进技术创新和试点，以实现甲烷深度减排。

建议将更广泛的甲烷减排行动纳入金融支持目录

现有《绿色债券支持项目目录（2021 年版）》中已经覆盖了与甲烷减排相关的 3 个领域的 7 项具体内容。此外更多促进甲烷减排的项目有待纳入，比如废弃矿井处置、水稻种植改善、饲养管理（包括饲料改良、畜牧业育种）等。建议在未来目录更新，以及气候投融资和转型金融的支持目录制定中，有所体现。

建议金融机构关注甲烷相关碳中和投资机遇

甲烷减排是大势所趋，国家将加强监管，也有望出台激励政策，甲烷本身是重要资源，加之近期天然气价格攀升，将带来更多投资机遇。短期内，减排技术较成熟的领域，其市场规模有望扩大，包括：资源综合利用和油气行业等，具体包括煤矿开采过程中高浓度瓦斯利用、农业废弃物综合利用、城市固废处理，以及油气行业甲烷泄漏检测与修复装置等相关项目。长期看，可关注有潜力的投资领域，包括中低浓度瓦斯回收、污水深度处理、绿色农业、替代蛋白、食品设计等，探索投入减排技术培育和试点。

建议加强数据基础建设和科研投入：

甲烷减排政策制定和行动所需的数据基础仍较为薄弱，现有研究关于我国甲烷排放状况和减排潜力的量化估计差别较大，亟需建立颗粒度高的排放清单。此外，农业相关甲烷减排手段的技术可行性和经济性较低，需投入大量资源进行研究实践。

甲烷减排是一个系统工程，且有多重社会效益；不断完善甲烷减排政策体系，提早做出制度安排和投资行动，对我国实现碳中和目标至关重要。

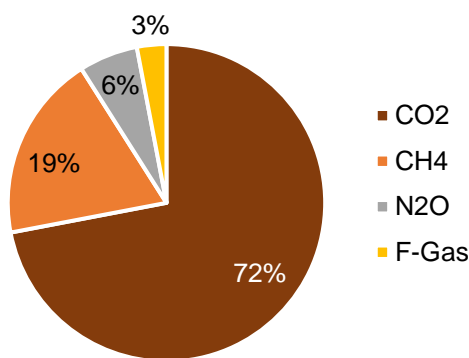
一、为何关注甲烷？

1.1. 甲烷是重要的温室气体

提到温室气体，大多数人第一反应便是二氧化碳，但其实温室气体的概念远不局限于二氧化碳，IPCC 温室气体清单中还涵盖了甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟化碳(PFCs)和六氟化硫(SF₆)。其中甲烷作为全球排放量第二大的温室气体(图 1)，全球年排放量约 99.6 亿吨 CO₂e，占全球温室气体排放总量的 19% (PBL, 2020)⁷。如图 2 所示，目前大气中甲烷的浓度比过去 80 万年来的任何时候都要高 (NOAA, 2021)⁸，在国际社会的关注度和重要性正在逐步提升。

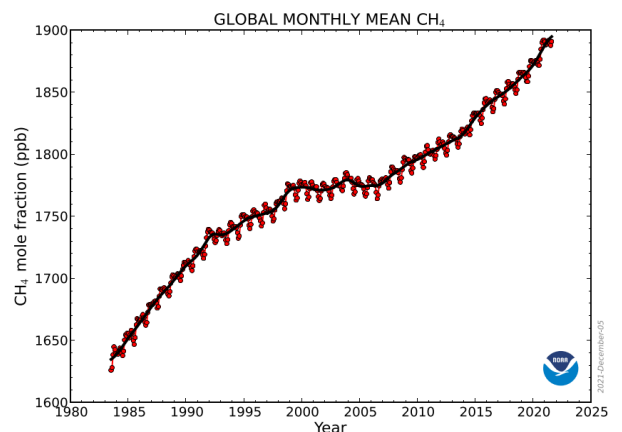
虽然排放量不及二氧化碳，但是甲烷具有“短期”、“强效”的特点，在达成“1.5°C”目标上发挥至关重要的作用。甲烷一旦进入大气层暴露于氧气和水蒸气中，将在 9 到 15 年内分解，在大气中存留时间较短，因此也被称为一种“短期气候驱动因素”(short-lived climate forcers)。尽管如此，甲烷却具备较强的增温效应，在 100 年内的增温潜势是二氧化碳的约 28 倍，20 年内的增温潜势更是超过 80 倍。IPCC 第六次评估报告指出，在全球气温较工业化前水平上升的 1.1°C 中，约有 0.5°C 来源于甲烷排放。此外，尽管甲烷本身在大气中停留的时间没有二氧化碳长，但其短期带来的温度激增可能造成温升过冲(overshoot)过大，加剧气候变化影响的冲击峰值，可能给生态系统带来不可逆转的伤害。

图1 2019年全球温室气体排放构成



数据来源: PBL (2020)

图2 大气层甲烷浓度观测值



数据来源: Dlugokencky E., NOAA/GML (2021)

⁷ 数据来自荷兰环境评估所 (PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, PBL)，基于 EDGAR 数据库计算，不包括土地使用变化的温室气体排放。其中甲烷排放采用 100 年时间维度的全球增温潜势 (GWP) 折算为二氧化碳当量，GWP 值根据《IPCC 第四次评估报告》采用数值 25 倍。

⁸ 数据来自美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)。

甲烷在大气中留存的时间较短，这意味着一旦减少排放，其大气浓度会在几周到几年的时间内降低，有望立竿见影地减缓短期升温速度。因此，甲烷减排也被 IPCC 称为未来几十年减缓全球变暖的最高效方法之一。

除了减缓温室效应，甲烷减排还能与环境和社会产生正面协同效应。甲烷是对流层臭氧的前体物，因此也是一种空气污染物和光化学烟雾的主要成分。减少甲烷排放能减少这类污染物，从而起到改善环境、减少疾病、避免粮食减产的作用。根据气候与清洁空气联盟 (Community College of Allegheny County, CCAC) 和联合国环境署 (United Nations Environment Programme, UNEP) 联合发布的《甲烷评估报告》估算，每减排百万吨甲烷，每年可避免 1430 例臭氧导致的早死、减少臭氧导致的 14.5 万吨粮食减产、避免高温导致的 18 万年工作时长损失，这也让甲烷减排具有较高的经济效益：每减排 1 吨甲烷，全球货币化效益达到 4300 美元。

甲烷对全球变暖具有重要影响，但受到的关注远不及二氧化碳，且在大多数国家尚未被纳入气候承诺。据统计，目前各国的国家自主贡献目标 (National Determined Contributions, NDC) 所涉及的甲烷减排量仅仅是实现 2°C 温控目标所需减排量的约三分之一，是实现 1.5°C 温控目标所需减排量的约 23%。要实现 1.5°C 目标，甲烷排放量需要在 2030 年之前减少 40%-45% (CCAC & UNEP, 2021)。

1.2 甲烷成为全球气候变化合作重要议题

近年来，国际社会对全球甲烷减排的关注程度明显增强，越来越多的国家将其纳入国家级战略规划。欧美国家已经出台多项甲烷减排战略或油气行业的甲烷减排行动计划，并不断更新相关减排目标。⁹

《联合国气候变化框架公约》第二十六次缔约方大会 (COP26) 上，甲烷成为了全球气候谈判议题的焦点，这也意味着甲烷减排已经从科学共识走向了政治共识。在 2021 年 11 月的 COP26 召开期间，美国与欧盟联合发起了“全球甲烷承诺”倡议 (Global Methane Pledge)，现已得到超过 100 个国家和地区的响应，包括加拿大、英国、日本等国，经济总量占全球经济总量的 70%，甲烷排放量占全球 50% 左右，承诺到 2030 年将全球甲烷排放量在 2020 年水平的基础上至少减少 30%。

作为全球甲烷排放大国，我国虽然尚未加入该倡议，但早在 2007 年的第一份应对气候变

⁹ 2020 年 10 月，欧盟委员会发布了《欧盟甲烷战略》(EU Methane Strategy) 成为全球甲烷减排的政策先锋，明确了在欧盟和国际范围内减少甲烷排放的措施。在此之前，早在 2015 年，美国奥巴马政府便宣布了一项削减甲烷排放的计划，目标到 2025 年，石油和天然气行业的甲烷排放将较 2012 年的水平减少 40%-45%。加拿大政府也在 2016 年加入这一减排计划。然而，随着 2016 年特朗普政府退出《巴黎协定》，相关监管标准的推行停滞不前。

化国家方案就已经提出了甲烷减排行动，我国的“十四五”规划中已明确提出要加大甲烷、氢氟碳化物、全氟化碳等其他温室气体的控制力度。此外，我国计划在国家自主贡献之外，制定一份全面、有力度的甲烷国家行动计划，争取在 21 世纪 20 年代取得控制和减少甲烷排放的显著效果。同时，中美联合发布了《中美关于在 21 世纪 20 年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》¹⁰，计划在 2022 年上半年召开会议，聚焦强化甲烷测量和减排具体事宜。在全球各国积极应对气候变化的大背景下，甲烷减排也是我国 2060 年实现碳中和的重要抓手，有望采取更多更为积极有效的行动。

专栏 1 什么是增温潜势

甲烷是仅次于二氧化碳的第二大温室气体，是一种“短寿命气候污染物”，其在大气中的存续时间相对较短，约为 12 年；但是在其存在的约 12 年中会吸收地球向外的长波辐射，改变地球的热收支进而导致温室效应。

甲烷的增温潜势即甲烷的热效应，代表不同时间框架内温室气体在大气中的综合影响及其造成辐射强迫的相对效果，这一概念能够让不同的温室气体按照同样的标准进行比较。在 IPCC 第六次评估报告中，甲烷的全球增温潜势（global warming potential, GWP）在 100 年的时间框架内是二氧化碳的约 28 倍，而在 20 年的时间框架内这一数值达到约 81 倍。

表 1 不同温室气体的增温潜势

气体	主要来源	大气层中平均周期	20 年 GWP	100 年 GWP
二氧化碳	化石燃料和固体废物的燃烧过程。	50-200 年	1	1
甲烷	石油、天然气及煤炭的生产和运输过程；畜牧业和农业活动；城市固体废物填埋场中有机废物的厌氧腐烂。	10-13.6 年	81±25.8	28±11
一氧化二氮	在农业、工业活动、化石燃料和固体废物的燃烧过程。	99-119 年	273±118	273±130
含氟温室气体*	包括氢氟烃、全氟化碳和六氟化硫等。各种工业过程及商业和家庭用途中排放。	几周至上千年	方差较大	方差较大

注*：含氟温室气体中增温潜势最高的是六氟化硫，GWP100 达到 23900

资料来源：IPCC 第六次评估报告（2021）

备注：IPCC 的各次评估报告中 GWP 的数值有所差异，且测量的不确定性范围较大。目前根据《联合国气候变化框架公约》的要求，发达国家（附件一国家）排放清单报告通常采用 2007 年 IPCC 第四次评估报告的数值（100 年框架下 GWP 为 25）；而发展中国家（非附件一国家，比如中国）排放清单报告通常采用 1995 年 IPCC 第二次评估报告的数值（100 年框架下 GWP 为 21）。为与官方口径以及主流研究保持一致，本文中二氧化碳当量换算时所选用的 GWP 均按此数值。

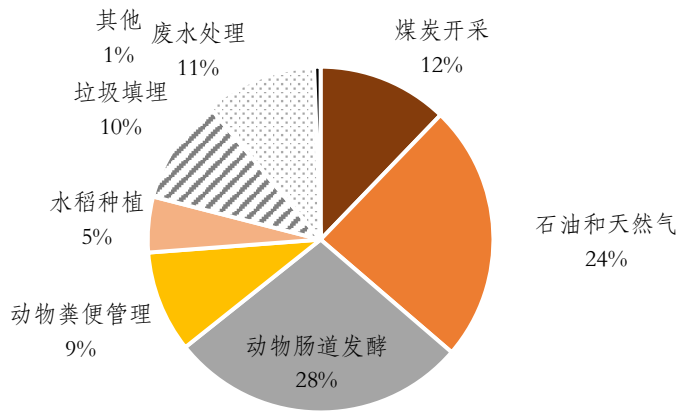
¹⁰ 新华社. 中美关于在 21 世纪 20 年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言.2021-11-11.
http://www.gov.cn/xinwen/2021-11/11/content_5650318.htm

1.3 全球甲烷排放来自哪里？

根据国际能源署（International Energy Agency, IEA）统计，全球每年排放的甲烷中，自然因素排放源约占 40%，其中湿地是最大的天然甲烷排放源，约占全球甲烷排放量的 33%。通常而言，湿地是指位于陆生生态系统和水生生态系统之间的过渡性地带，由于其土壤浸泡在水中，土壤微生物也就长期处于无氧环境，这会促使厌氧微生物排放甲烷。在人类活动之前，湿地曾一度是大气甲烷的主要排放源；而最近一项由全球 20 位科研人员参与的研究认为（Zhang et al., 2022），近三十年来全球甲烷浓度上升的因素中，人为排放源的贡献率远超过自然系统¹¹，相较于对于自然系统甲烷排放的担忧，人为活动才是大气甲烷上升的主要原因，也是现如今应该重点关注的领域。

根据 PBL 的统计（图 3），2019 年全球人类活动产生的甲烷排放主要来自三个部门：农业（占人为排放量的 42%）、化石燃料（包括石油、天然气和煤炭，占人为排放量的 36%）、废弃物处理（占人为排放量的 21%）。具体而言，在农业部门，来自动物肠道发酵的排放约占全球人为总排放量的 28%，动物粪便产生的排放约占 9%，水稻种植占 5%；在化石燃料部门，石油和天然气开采、加工和分销领域共占排放量的 24%，煤炭开采占排放量的 12%。在废弃物部门，垃圾填埋和污水处理分别占全球人为排放量的 10%和 11%。

图3 2019年全球人为活动的甲烷排放结构



数据来源：PBL (2020)

二、我国甲烷减排路径

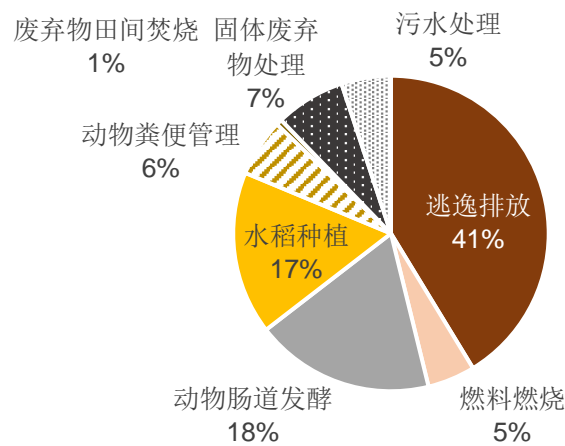
2.1 甲烷排放主要来源

根据《中国气候变化第二次两年更新报告》，2014 年我国甲烷排放共计 5357.1 万吨，折

¹¹ 该研究采用同位素追踪的方式发现，2007-2017 年相较于 2000-2006 年新增的甲烷浓度中，人为活动（农业、废弃物、油气系统等）的贡献达到了 87±37%，而湿地的贡献率仅有 13±9%。

合为 11.3 亿吨 CO₂e¹²。能源活动是第一大甲烷排放源，主要是煤矿开采产生的排放，在甲烷总排放的占比约为 46.2%，其中逃逸排放占 41.3%，燃料燃烧排放占 4.9%；其次是农业活动的甲烷排放，在甲烷总排放的占比约 41.5%，其中动物肠道发酵排放占 18.4%，水稻种植排放占 16.6%，畜禽粪便管理排放占 5.9%，农业废弃物田间焚烧排放占 0.6%；第三大甲烷排放源则是废弃物处理，占比约 12.3%，其中固体废弃物处理排放占 7.2%，污水处理排放占 5.1%（图 4）。

图4 我国甲烷排放结构（2014）



数据来源：中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告（2018）

为便于国家之间的横向比较，基于欧盟的全球大气研究排放数据库（Emissions Database for Global Atmospheric Research, EDGAR）的最新统计数据（图 5），2018 年我国煤矿产生的甲烷排放量占比达 31%，远高于美国（7%）和欧盟（9%），这与我国以煤炭为主的能源结构相符合，我国在过去的几十年中一直是全球最大的煤炭生产国；其次，作为全球第一大水稻生产国，我国第二大排放源农业活动中，水稻种植产生的甲烷排放占比远高于欧美。我国水稻种植产生的甲烷排放量占比达到 21%¹³，而该领域在美国和欧盟国家中占比极低，分别仅占 1%和 10%，相比而言，我国动物肠道发酵产生的甲烷排放占比相对较低，为 10%，而欧美这一比重分别达到了 27%、29%。

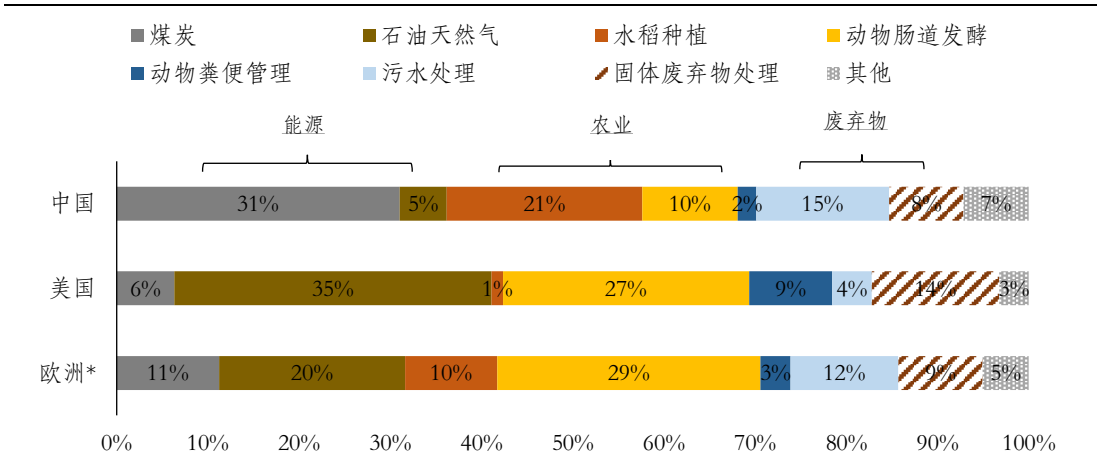
此外，我国的石油和天然气行业产生的甲烷排放占比仅为 5%左右，这一比重在美国达到了 35%，是美国最主要的甲烷排放来源，在欧洲国家也达到了 20%。不仅所占比例低，我

¹²甲烷的全球增温潜势（GWP）值采用《IPCC 第二次评估报告》中 100 年时间尺度下的数值 21，不包含土地利用、土地利用变化和林业（LULUCF）。若包含 LULUCF，排放量为 5529.6 万吨，折合为 11.6 亿吨 CO₂e。

¹³ 为了便于多国横向比较，统一采用 EDGAR 的 2018 年最新数据（EDGAR v6.0），和我国气候变化第二次两年更新报告的数字 16%相比，主要差别在于年份不同，且计算所采用排放系数或有不同，作为定性参考。数据库链接：https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ghg60

国油气行业排放的绝对值也低于美国和欧盟。

图5 中、美、欧甲烷排放结构对比（2018）

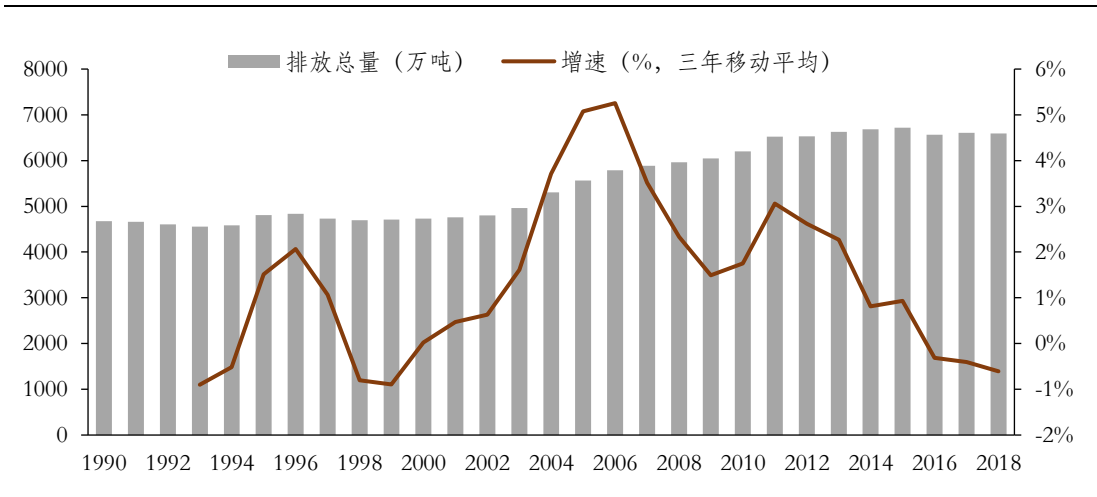


数据来源：EDGAR（2020）

注：*欧洲选取的是欧洲 OECD 国家

从历史排放变化而言（图 6），根据 EDGAR 的统计，1990 年至 2018 年间我国甲烷排放量增长了 1.4 倍，复合年均增长率 1.2%。从 2004 年起甲烷排放总量增速趋缓，近 5 年呈现负增长，年均增速-0.3%。

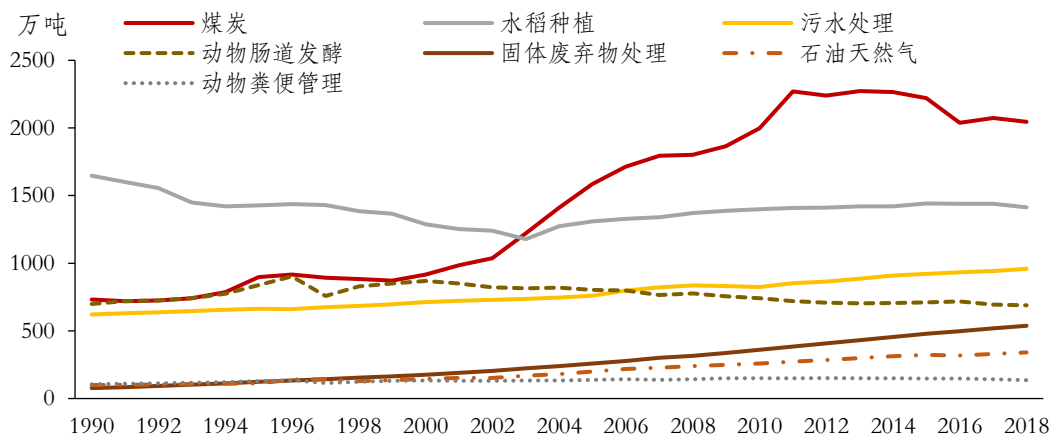
图6 1990-2018年我国甲烷排放总量变化



数据来源：EDGAR（2020）

分部门而言（图 7），1990 年至今的甲烷排放量增长主要来自能源部门，其中煤炭行业是最主要的推动力。一项发表于《自然》子刊的研究发现（Miller, S.M., et al, 2019），2010 年至 2015 年间我国的甲烷排放量主要增长来自煤炭行业，其他部门保持平稳，这也与同时期我国的煤炭产量持续增加，而畜牧业和大米的产量保持相对平稳的趋势相符合。此外，废弃物部门也保持了相对平稳的增速，与我国的经济增速及城市化进程相匹配。

图7 1990-2018年我国分部门甲烷排放量变化



数据来源：EDGAR (2020)

专栏2 甲烷减排的“前世今生”

甲烷作为燃料可以提供能源，作为易燃气体又会对煤矿开采过程带来安全隐患，一直以来都是各类政策关注的重点。随着国际社会对甲烷问题的认知逐渐加强，甲烷也逐步进入气候变化问题的历史舞台。

沼气工程：甲烷是沼气的主要组成气体，将农作物、畜禽粪污、有机废弃物和废水等通过厌氧发酵的处理便能够得到沼气，可以作为生物质燃料。沼气除了提供能源所带来的经济效益外，还提供了额外的环境效益。我国早在上个世纪80年代就开始了甲烷的资源化利用探索，2001年财政部提出要利用中央财政对沼气项目进行补助；2005年中央1号文件更是明确指出，农村沼气是农村“六小工程”之一，对改善农民生产生活条件、带动农民就业、增加农民收入发挥着积极作用。

煤矿瓦斯回收利用：甲烷极易燃烧，是瓦斯的主要成分。瓦斯是在成煤过程中形成并储存于煤层中的气体，一旦与空气混合浓度达到5%左右将形成易爆混合物，带来安全事故，是很多煤矿安全事故的第一大诱因。因此出于安全考虑，全球各国也较早进行了能源开采领域的甲烷管理及回收利用。以我国为例，我国埋深2000米以浅的煤层气地质资源量约36.8万亿立方米，居世界第三位。我国政府在“十一五”规划中明确表示煤矿瓦斯抽采将以保障煤矿安全生产为重点，建立健全瓦斯抽采法规标准体系，组织科技攻关和示范工程建设，逐步提高煤矿瓦斯抽采率和利用率。不过，基于安全为目标的甲烷管控政策中，对煤矿高浓度瓦斯多以抽采、利用为主，低浓度瓦斯利用较少，风排瓦斯绝大部分都直接排空。

资料来源：财政部，国家发展改革委，国家能源局

2.2 甲烷减排潜力和路径

展望我国甲烷未来的减排趋势，已有较多研究进行相关的测算。从整体排放量而言，根据清华大学气候变化与可持续发展研究院（2020）的测算，2015年我国的甲烷排放量约为12.2亿吨CO₂e，预计在基准政策情景¹⁴下2030年和2050年将分别达到13.9亿吨CO₂e和12.0亿吨CO₂e。其中甲烷排放最主要的两个领域是煤炭开采和农业，未来随着煤炭开采量下降以及煤矿瓦斯利用的加强，煤炭开采过程的甲烷排放有望逐步降低。农业部门动物肠道发酵和水稻种植的甲烷排放占比目前也已超过三分之一，随着人均蛋白质消费量的提升，未来将呈现持续上升的趋势，2050年后或将超过煤炭开采的排放量成为最主要的甲烷排放增长来源。因此，未来甲烷的减排与消费者行为以及能源行业的发展密不可分。

据该测算，未来通过控制和减少煤炭和油气生产过程中甲烷排放，推广回收利用和末端处理分解技术，改良水稻种植方式和牲畜饲养方式，改进废弃物管理和处置方式，而在2°C和1.5°C情景下¹⁵，甲烷排放总量在2030年分别为11.8亿吨CO₂e和7.9亿吨CO₂e，相较于基准政策情景减排率为14.2%和43%。2050年分别有望进一步减排至8亿吨CO₂e和5.2亿吨CO₂e（图8-9）。

图8 基准情境下我国甲烷排放量 (Mt CO₂e)

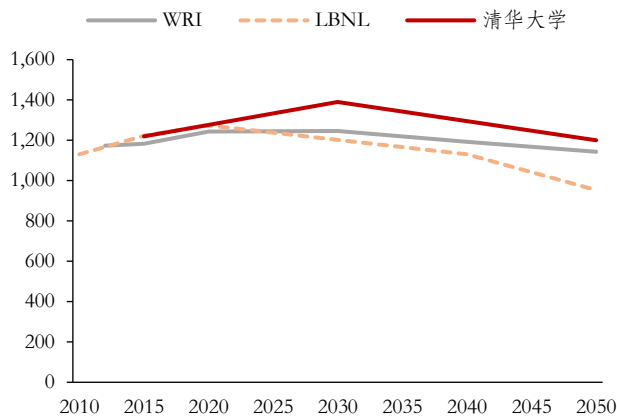
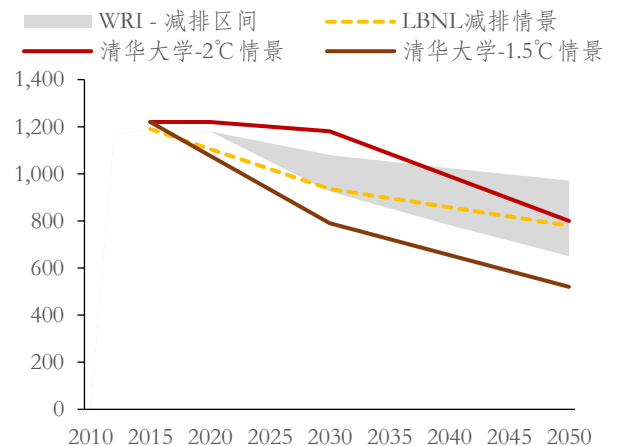


图9 强化政策情境下我国甲烷排放量 (Mt CO₂e)



数据来源：世界资源研究所（2019），Lin, et al（2021），清华大学气候变化与可持续研究院等（2021）

注：*世界资源研究所的研究为《中国减缓气候变化的机遇：非二氧化碳类温室气体》报告中的测算，LBNL为Lin, et al (2021)中劳伦斯伯克利国家实验室（LBNL）的研究结果。清华大学测算结果为清华大学气候变化与可持续研究院等《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》中的测算结果。

¹⁴ 基准政策情景：以我国在《巴黎协定》下提出的 NDC 目标、行动计划和相关政策为支撑，延续当前低碳转型的趋势和政策的情景。

¹⁵ 2°C 温控目标情景（简称“2°C 情景”）：以实现全球控制升温 2°C 目标为导向，以 21 世纪中叶深度脱碳目标倒逼下的减排对策和路线图分析为基础设定的情景。

1.5°C 温控目标情景（简称“1.5°C 情景”）：以控制 1.5°C 升温目标为导向，到 21 世纪中叶努力实现二氧化碳净零排放和其他温室气体深度减排为目标为基础设定的情景。

其他主要机构的测算结论也较为相似¹⁶，如世界资源研究所（World Resources Institute, WRI）的研究认为，在现有政策目标下，2030年甲烷排放将达到峰值，2050年将较2030年减排8%，而如果政策加大减排政策力度，2030年较2020年约有9%-22%的减排潜力，2050年相较2030年进一步减排的空间在10%-30%。分行业展望，参考美国环保局（U.S. Environmental Protection Agency, US EPA）的测算，2030年全球各行业的减排成本预测如图10所示，从成本有效性的角度，全球共计有7%的排放能够以零成本实现减排，其中城市废弃物填埋和油气领域中预计各有19%和12%的甲烷排放能够实现零成本减排，其次是水稻种植和煤矿开采领域，分别约有12%、10%的减排成本为零；而我国的情况有较大差别（图11），能以零成本实现的减排总量占比远低于全球平均水平，仅有2%，其中油气领域¹⁷中有11%的减排量能够实现零成本减排，其次是废弃物填埋领域，零成本减排的比例有6%。

而从技术可行性的角度，不计成本的情况下，到2030年全球约有31%的甲烷排能够实现减排，其中煤矿开采、废弃物填埋中可减排比例分别为64%、53%，畜牧业仅有9%的排放量能够实现减排。我国的情况略有不同，煤炭开采的减排潜力同样高达64%，其次是油气领域和污水处理领域，分别有37%和36%，废弃物处理中仅有15%在技术层面能够实现减排。农业领域的技术可行性最低，水稻种植和畜牧业仅有13%和9%的比例能够实现减排。

图10 预计2030年全球甲烷减排潜力及成本*

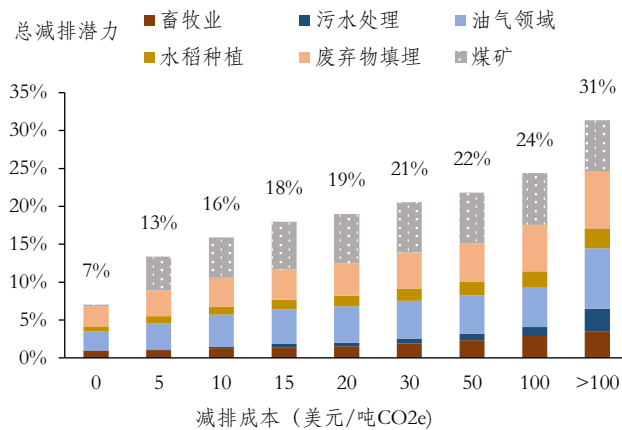
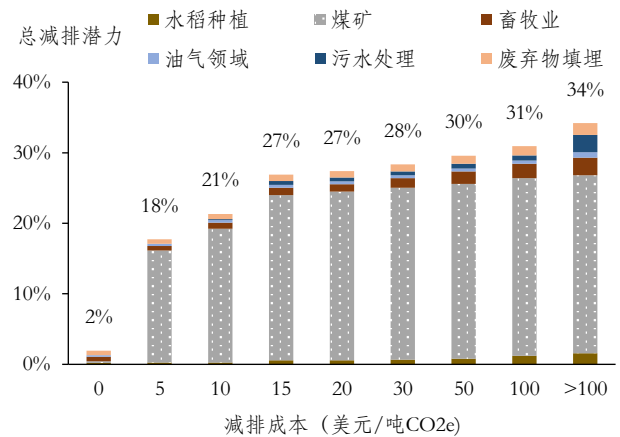


图11 预计2030年我国甲烷减排潜力及成本*



数据来源：美国环保局《全球非二氧化碳温室气体减排：2015-2050》，数据库见 <https://cfpub.epa.gov/ghgdata/nonco2/>
注：*统计口径为全部非二氧化碳温室气体，图中所选行业的非二气体排放以甲烷为主，以此作为估计

对于我国而言，短期内煤炭开采、城市固体废弃物处理的甲烷减排和油气领域减少甲烷泄露将成为甲烷减排行动的重点，能够实现在短期内降低甲烷排放的目标；长期而言，甲烷减排在农业、污水处理等减排技术的探索将成为实现碳中和目标的重要途径。表2中总结了

¹⁶ 图8和图9对比了三项具有代表性的对中国甲烷减排趋势的研究测算，甲烷换算所用的100年GWP均与中国官方清单报告一致，采用《IPCC第二次评估报告》中数值。

¹⁷ 油气领域包括天然气生产、加工、传输和分配的全过程以及石油的生产和加工炼油过程。

关键部门的甲烷减排措施及主要技术，下文将基于我国的实际情况进行分析。

表 2 助力提升减排力度的关键措施和技术总结

排放源	减排措施
煤炭开采逸散	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 减少煤炭消费量 ✓ 中高浓度瓦斯的发电/供暖 ✓ 低浓度瓦斯过滤技术（变压吸附、分子筛吸附、深冷分离等） ✓ 风排瓦斯回收（热氧化和催化氧化）
油气	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 高排放器件替换（老旧设备、泵、压缩机密封器、通风系统等） ✓ 安装排放控制装置 ✓ 泄漏检测和修复技术（Leak Detection and Repair, LDAR）
动物肠道及粪便	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 饲料改良，如添加饲料添加剂抑制禽畜消化系统的甲烷生成 ✓ 改善育种及饲养管理模式，提升肉类和奶类产量 ✓ 消费侧饮食习惯调整，推广替代蛋白 ✓ 促进禽畜粪便的资源化利用（沼气工程等）
水稻栽培	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 选育高产低排放品种 ✓ 改良耕作方式，比如改善灌溉和肥料施用方式 ✓ 调整土壤微生物群落结构
污水处理	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 污水处理厂设备及流程优化 ✓ 在新建和已有的厌氧污水处理厂安装甲烷回收系统
固体废弃物	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 垃圾源头减量及分类 ✓ 垃圾回收利用（生物稳定/干化处理、堆肥、沼气工程） ✓ 垃圾填埋方式改良（可持续填埋、好氧填埋和准好氧填埋等）

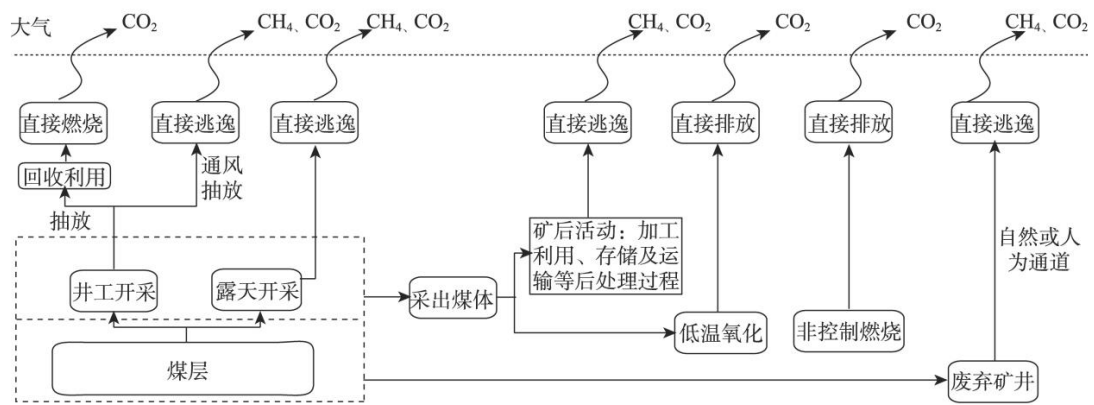
数据来源：世界资源研究所（2019），Brink, S. (2013)，作者分析

2.2.1 煤炭开采

减排特点：我国煤炭领域的排放主要来自煤矿井工开采时的中低浓度甲烷逃逸（图 12）。煤矿甲烷又称为瓦斯，与煤矿安全问题息息相关，因此我国一直都非常重视瓦斯的回收利用。目前，对于浓度在 30% 以上的高浓度煤矿瓦斯及煤层气已经严格禁止其排放¹⁸，但没有形成强制性的监管机制，有些煤矿利用率不足 50%，依然有较大的提升空间；对煤矿瓦斯抽放系统的低浓度瓦斯（甲烷体积分数 < 30%）和煤矿回风井中风排瓦斯尚未有限制性要求，虽然这一类瓦斯利用技术比较成熟，但经济性一般，有待建立约束性控排制度，加大利用减排力度。对于瓦斯浓度低于 1% 的煤矿风排瓦斯，由于浓度很低，瓦斯利用率还处于较低水平，现有的回收利用技术适应性差，经济效益不明显。这些将是未来煤矿领域的减排重点。

¹⁸ 煤矿甲烷（瓦斯）根据浓度的高低可以分为高浓度瓦斯（浓度高于 30%）、低浓度瓦斯（浓度在 1% 至 30% 之间）和矿井风排瓦斯（浓度小于 1%）。2008 年国家环保总局出台的《煤层气（煤矿瓦斯）排放标准（暂行）》中要求煤层气地面开发系统的煤层气以及煤矿瓦斯抽放系统的高浓度瓦斯（甲烷体积分数 ≥ 30%）禁止排放。

图12 煤炭开采环节的温室气体排放示意图



数据来源：马翠梅等（2020）

可行技术：

煤矿领域的甲烷减排主要是对逸散的甲烷进行回收及利用，回收后得到的瓦斯气体还需进行进一步的利用，利用方式的选择主要取决于浓度。其中，高浓度瓦斯（浓度在30%以上）的利用技术较为成熟，可直接应用于发电、城市燃气、工业燃料、车辆燃料等方面。浓度在8%-30%的抽放瓦斯可以通过内燃机发电及余热利用等技术利用，具备一定的经济性。

- **发电：**不同浓度的煤矿瓦斯可以用于燃气内燃机、燃气汽轮等进行发电，其原理是将甲烷与空气混合至爆炸极限，推动活塞运动，从而带动同步发电机发电，是目前煤矿瓦斯利用的主要方式。
- **民用燃料/区域供暖：**将矿井中抽采浓度高于40%的煤矿瓦斯气收集存储、铺设管道系统，调压输送到城镇居民区，能够为居民生活提供燃气。目前我国安徽、贵州、山西等地都有应用。煤矿瓦斯作为燃料还能替代燃煤锅炉用于矿区供暖。
- **化工生产：**较高浓度的煤矿瓦斯能生产炭黑、甲醇和甲醛等化工产品。但近年来由于环保、限煤等方面的考虑，瓦斯直接生产甲醇的工艺已经被禁止。
- **汽车燃料：**对预抽的高浓度瓦斯和煤层气进行提纯，生产压缩天然气（Compressed Natural Gas, CNG）和液化天然气（Liquefied Natural Gas, LNG），可以应用于汽车燃料。

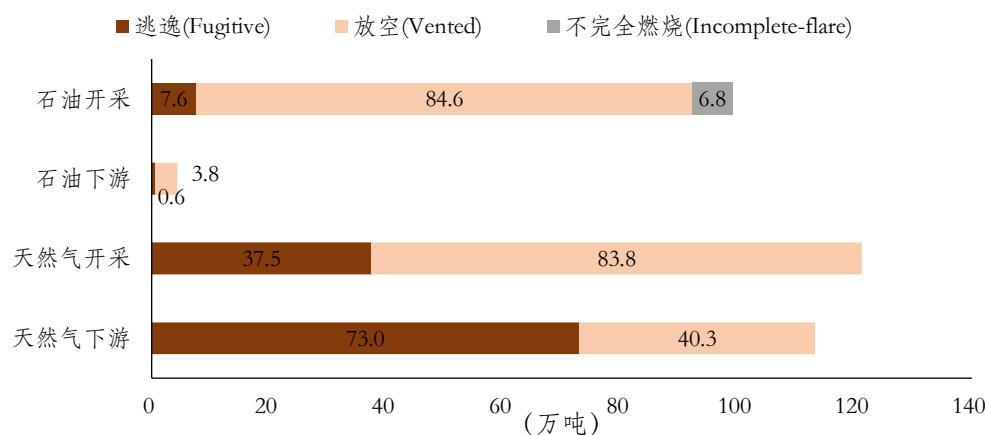
而浓度低于8%的煤矿瓦斯，通常需要采取更进一步的深度加工提纯技术提高其质量才能加以利用。甲烷浓度小于1%的瓦斯目前以排空为主¹⁹，虽然体量大但极低的浓度导致其利用难度很大。现有的利用技术主要是通过加热氧化或催化氧化的方式将其转化为二氧化碳和水，回收反应中的热量用于供暖、煤炭加工甚至发电（联合国欧洲经济委员会，2010）。

¹⁹ 即煤矿在生产过程中需要通风稀释瓦斯浓度，从而释放到大气中。

2.2.2 油气行业

减排特点：油气系统中的生产环节以及天然气系统的储存和运输环节（如城镇居民天然气管道等）是关键排放源，具有较大的减排潜力（图 13）。其中，石油领域的甲烷排放集中在开采环节，天然气领域则在生产、储运、分销环节均有分布，各环节的占比分别为 36.5%、35.3%和 25.5%（杨梓诚等，2016）。由于排放源较为集中，油气行业甲烷减排初期成本较低。国际能源署（IEA）的研究表明，全球油气行业 75%的甲烷泄漏可以通过现有技术得到控制，其中有 40%-50%的减排没有额外成本。

图13 油气领域我国甲烷排放量分布（2020）



数据来源：IEA（2020）

可行技术

从减排方式的角度，油气行业的主要甲烷排放源可分为逃逸、放空和火炬燃烧三类。针对甲烷逃逸的治理较为复杂，甲烷的逃逸发生在石油和天然气产业链的各个环节。泄露源主要是管线的法兰、阀门、压缩机、气动设备、维修泄露、管线老化等。这种甲烷排放多是由于失效产生的突发性泄漏，现有可供选择的技术包括²⁰：

- **将高排放器件更换为低排放器件：**更换高排放泵、压缩机密封件、压缩机密封杆、仪表空气系统和电动机等控制甲烷高排放环节。
- **安装排放控制装置：**通过安装蒸汽回收装置、排污捕获单元、柱塞、火炬燃烧²¹等对甲烷排放环节加以控制，从而减少甲烷排放。
- **泄漏检测和修复 (LDAR)：**LDAR 技术是利用红外摄像头等现代化检测手段和信息技术，系统化地定位和修复全价值链泄漏。通过对天然气行业基础设施的潜在泄漏点进行检测，能够及时发现存在泄漏问题的部件，对其进行修复或替换，进而减少

²⁰参考材料包括仲冰等人（2021）、麦肯锡（2021）、IEA（2021）。

²¹火炬燃烧是通过燃烧将甲烷转化成二氧化碳，一定程度上仍会产生温室气体。

或消除甲烷排放。

- **数字传感器、卫星以及无人机检测：**除了日常的甲烷泄露，一些意外事故导致的超级排放源需要特别注意，如井喷、管线破裂、意外事件导致基础设施被破坏等。此类排放源在短时间内造成的甲烷泄露量巨大，甚至会超过常规逃逸性排放全年的泄露量，具有偶发性和随机性。因此，需要借助特殊的工具来定位和处理，比如通过卫星、无人机等来实时对泄漏数据进行监测，出现问题及时进行修复。

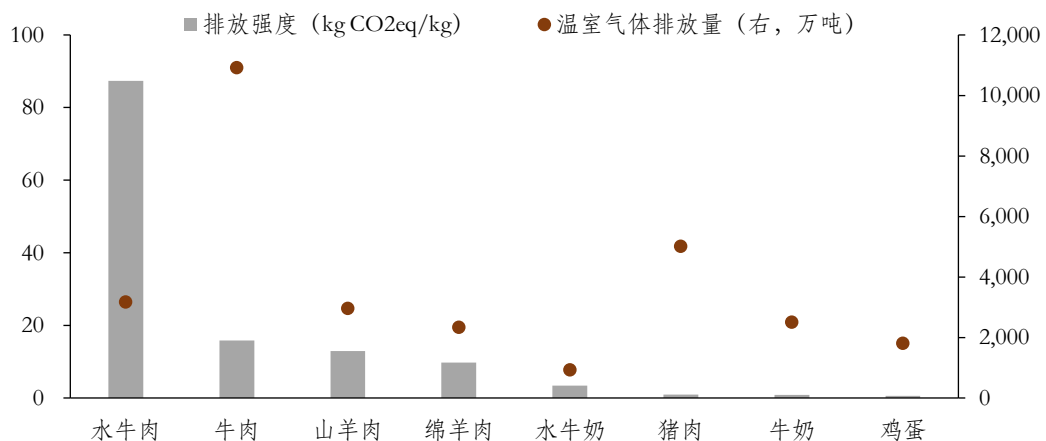
另外，针对放空和火炬燃烧的甲烷排放源较为单一，减排方式较为直接，比如禁止未经燃烧的天然气排放到大气中、对于不得不排放的天然气要求点燃且保证充分燃烧后才能排放。若想彻底解决此类甲烷排放，还需要在新区块勘探开发之前，充分考虑到管线等基础设施的建设，保证天然气充分利用、尽可能避免放空和火炬活动。

2.2.3 畜牧业

减排特点：畜牧业中，反刍动物是主要的甲烷排放源。反刍动物进食后，瘤胃中的大量微生物会将大分子的纤维素、淀粉等分解成可供动物消化吸收的小分子物质，甲烷就是这一分解过程的副产物。由于微生物的发酵过程会受动物摄入饲料成分的影响，消化率低、品质差的饲料配给会提高每单位摄入能量的甲烷排放。非反刍动物（如猪）在消化过程中虽然也会产生甲烷，但与反刍动物相比排放量极低（图 14）。

畜禽粪便是畜牧生产中另一重要甲烷来源，在粪便的存储和处理过程中，一旦有机物处于厌氧条件，如较深的粪便池或液态粪水里，就会发酵产生大量甲烷。

图14 我国不同禽畜产品的温室气体排放强度（2017）



数据来源：联合国粮食及农业组织（Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO）

可行技术：

针对反刍动物肠道发酵的甲烷减排，可以通过改善饲料、畜禽健康和基因来优化生育率、死亡率和年龄，或通过降低初产年龄、调整屠宰重量和年龄以及调整乳牛群的替代率等种群

管理措施实现。对放牧系统而言，可以加强放牧和草地管理，提高饲草质量和草地固碳量。对舍饲或混合系统而言，可以提高农作物秸秆和饲料的利用率，加强畜禽粪便管理，推进农场可再生能源的利用。具体行动包括：

- **选育优良品种。**动物育种是改善养殖业生产效率和产品质量的关键因素，通过育种提高品种的饲料转换效率、或者缩短饲养周期，有利于降低单位产品（比如每公斤肉或奶）的甲烷排放，此外，养殖效率的提升也有利于畜牧行业的发展，还能够改善土壤健康和农民收入。
- **一些饲料添加剂能够抑制反刍动物消化系统中甲烷的形成**，包括 3-NOP、单宁、海藻、一些植物脂肪和高级脂肪酸等（如表 3）。但技术仍然处于早期阶段，实际减排效果仍伴随一定争议。

表3 减缓甲烷排放的饲料添加剂总结

添加剂	潜力	置信度	潜在风险
3-Nitrooxypropional	很高	5	未知
Asparagopsis（一种藻类）	很高	1	对动物瘤胃壁可能会带来损伤、在食物中带来溴化碘残留
硝酸盐	高	4	对一些动物有毒性
精油	低	2	未知
皂苷	低	2	未知
Monensin（莫能菌素）	低	5	未知

数据来源：The CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (2021)

- **改善日粮及饲养管理模式。**畜禽肠道发酵产生甲烷的量因畜禽采食量、饲料的种类及饲养水平的不同而有较大差别，采用少量多次饲喂方式，可以增加粗饲料的采食量和水的摄入量，从而提高瘤胃内食糜的流通速率，降低甲烷排放。此外，在饲料中减少粗饲料数量或用一些浓缩剂取代粗饲料，也能够通过加快发酵速度从而减缓甲烷的排放（亚洲开发银行，2014）。此外，还可以优化禽畜粪污管理。通过厌氧发酵去除粪便的产甲烷潜力，产生的甲烷收集起来能够作为清洁能源。
- **膳食结构调整。**改变人们的饮食结构可以在改善健康的同时减少温室气体排放，有研究发现若采用更为均衡的饮食（参照全球膳食指南）和多植物性蛋白素食饮食，以甲烷为主的温室气体排放将分别减少 29%、56%（Springmann et al.,2018）。
- **发展新型替代蛋白技术。**联合国环境署生态系统部门粮食系统与农业顾问洛马克斯就表示，世界需要“重新思考农业种植和畜牧生产方法”²²。一些新兴的替代蛋白技术，如植物蛋白、细胞培养肉、发酵蛋白等能够改变传统农业生产模式，为甲烷减排、资源节约及生物多样性等方面提供解决方案。

²² 联合国环境署. 为什么食物系统需要改变——联合国环境署顾问洛马克斯（James Lomax）的访谈. 2019-11-4. <https://www.unep.org/news-and-stories/story/why-food-systems-need-change>

2.2.4 水稻种植

减排特点：我国是世界上最大的水稻生产国和进口国，占全球水稻总产量的 30%以上。通常在水稻种植过程中，稻田长期处于淹水条件下，土壤中的有机质会被分解而释放出甲烷。其中部分甲烷在有氧环境下被土壤微生物氧化成二氧化碳；剩余部分通过水稻植株以及水土界面扩散和冒泡方式排放到大气中。因水稻种植产生的甲烷减排机理较为复杂，需要考虑植株、土壤碳源、氧源及微生物群落之间互相的影响关系，在保障粮食安全的同时实现减排效果，具有较大难度。

可行技术：对于水稻减排而言，主要的减排技术包括从育种到耕种方式等的改变。

- **选育高产优良水稻品种。**利用生物技术、强化栽培管理、增加种植密度、适度增加有机肥使用、精准灌溉等方式，可以提高水稻单产 5%-18% (Wu et al., 2019; Sun et al., 2019)。通过高产水稻的育种有望在增产的同时显著减低排放 (张卫健等人, 2020)。
- **合理的灌溉模式。**水分管理方式与水稻产量形成密切相关，也同时影响温室气体排放量。由于甲烷产生于严格的厌氧环境，相比于稻田持续处于淹水状态，采取中期烤田和间歇灌溉能够改善稻田土壤通气性，增加氧气含量，减少甲烷的产生和排放。(颜晓元 & 夏龙龙, 2015)
- **优化秸秆还田措施。**采用高效秸秆腐解菌、补充氮肥、秋冬季秸秆翻耕等措施加快秸秆旱季有氧分解，减少水稻生长季的土壤活性有机碳供应，从而降低稻田甲烷排放。此外，秸秆离田通过沼气工程去除其产甲烷潜力后再还田，可使秸秆还田的甲烷排放降低 30%-45% (晏珍梅等人, 2022)。
- **调整土壤微生物群落结构。**稻田甲烷产生和氧化过程还取决于微生物的结构和活性，因此通过调整稻田甲烷排放相关微生物群落结构，有望影响稻田甲烷排放。最新研究发现 (Scholz, 2020) 稻田土壤施入电缆菌以后，稻田甲烷排放减少了 93%。

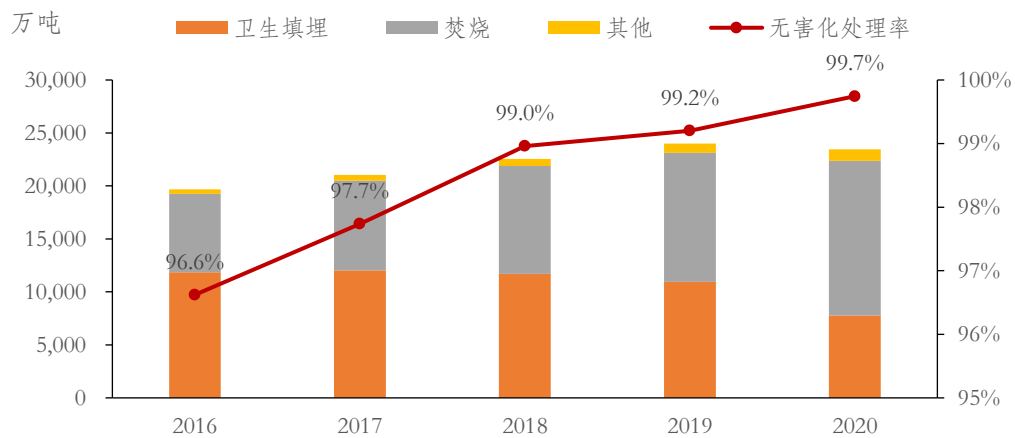
2.2.5 固体废弃物处理

减排特点：固体废弃物处理产生的甲烷排放主要来自垃圾填埋场内的有机物，其在厌氧微生物的作用下，分解产生垃圾填埋气和渗滤液，其中垃圾填埋气在稳定态下含有大约 50% 的甲烷和 50% 的二氧化碳。垃圾填埋的过程中，甲烷的产生取决于多个因素，包括垃圾的总量、堆积时间、垃圾组分 (包括可降解有机物的含量及其纤维素、蛋白质和脂肪的构成比例等)、温度等。我国的生活垃圾总体呈现含水率高 (40%~60%)、易降解有机物含量大 (50%~70%) 等特征，在填埋过程中的甲烷产生潜力较大。但随着垃圾处理技术不断转型，垃圾焚烧比例提升，以及垃圾分类工作的推进，我国固体废弃物处理领域的甲烷排放增量将呈现明显的下降趋势。

可行技术²³：固体废弃物处理一般是在垃圾源头采取减量措施、尽可能对垃圾进行分类、回收和利用，废弃物量的减少能够直接实现甲烷减排，在此基础上再对垃圾的焚烧或填埋等处理方式应用减排技术进行优化。具体措施包括以下方面：

- **源头削减、垃圾分类。**首先要在生产、流通和消费过程中减少垃圾量的产生，鼓励公众减少垃圾丢弃、鼓励回收及可再生产品的使用。其次对垃圾进行分类收集及分类处理。随着生活垃圾强制分类政策的推广和实施，全国包括直辖市、省会城市、计划单列市和第一批生活垃圾分类示范城市在内的 46 个城市已经先行实施生活垃圾强制分类，逐步建立和完善垃圾分类体系，针对不同类型垃圾有不同的垃圾收集、转运和处理处置方式。
- **废弃物处理过程焚烧比例的逐步提高。**相比混合垃圾直接填埋，焚烧处理的比例正逐渐提高，能有效减少甲烷排放。根据统计局，2020 年我国城市生活垃圾的清运量已经达到了 2.4 亿吨，其中无害化处理的占比达到 99.7%（图 15）。卫生填埋的占比逐渐降低，从 2016 年的 60% 降至 2020 年的 33%，而焚烧处理的占比则逐年提高，焚烧替代填埋的趋势明显。另外，焚烧处理过程中的能源利用也值得重视，探索供热及热电联产能更高效的能源利用模式，可以进一步推动焚烧设施低碳转型。

图15 我国城市生活垃圾处理量



数据来源：中国城乡统计年鉴（2020）

- **针对垃圾填埋中产生的甲烷，可优化填埋方式减少排放。**目前，垃圾填埋过程可以采用可持续填埋、好氧填埋和准好氧填埋等技术避免填埋气中的甲烷泄漏，其中：
 - **可持续填埋**对垃圾进行好氧预处理，使其稳定化进程加快，通过新旧填埋场的交替使用以减少甲烷的释放。

²³ 参考资料包括绿色创新发展中心（2021），谭灵芝等人（2019），岳波等人（2010），张相锋等人（2006）。

- **好氧填埋**则通过间歇式强制通风,加速填埋垃圾的稳定化,同时抑制甲烷产生。
- **准好氧填埋**利用填埋层内外的温度差和渗滤液收集管道的不满流设计,使空气自然通入,保证导气管周围形成好氧区域,而远离导气管则处于厌氧状态。
- 另外填埋气收集及能源回收也是有效的减排行为。
- **沼气工程、堆肥等方式能对废弃物处理中的甲烷进行回收利用。**例如,针对厨余垃圾的回收利用,当前最常见的技术包括生物稳定/生物干燥处理、堆肥和厌氧消化(即大中型沼气工程)等。其中:
 - **堆肥**常用于处理园林绿化垃圾或园林绿化和食物垃圾混合物,将其制成堆肥产品。其适用于不同品质的厨余垃圾原料,无污染的清洁原料可以生产出具有更高市场价值的优质堆肥产品,混合厨余垃圾堆肥产品可用于场地修复、园林绿化或矿山生物修复。
 - **厌氧消化**利用微生物在厌氧环境中将有机物转化为沼气和沼渣沼液,同步去除有机物中的产甲烷潜力,可以实现物质和能源回收。沼气通过热电联产能够供热及供电,或经提纯转化为生物天然气,可售入天然气管网,或作为 LNG 和 CNG 出售;沼渣沼液可以生产液肥,或进一步制成堆肥。
 - **生物稳定/生物干化处理技术**适用于品质较低,杂质含量高,不能进入堆肥或厌氧消化系统的厨余垃圾或混合有机垃圾,通过生物稳定及生物干化,使其不再具有生物活性,不再产生渗滤液及排放温室气体。生物干化处理后的产物或可运往垃圾焚烧厂或填埋场处理。

2.2.6 污水处理

减排特点:污水处理包括生活污水和工业废水,甲烷排放主要来自两个方面,一是处理流程中形成厌氧或缺氧的环境(比如除磷脱氮工艺),污水中的有机物在厌氧菌作用下分解产生的甲烷排放到大气中;二是一些处理流程通过表面曝气,污水中溶解的甲烷也会排入大气中。此外,还有一部分排放来自处理完排出的污水中所溶解的甲烷。

可行技术:根据全球甲烷行动(Global Methane Initiative, GMI)的总结,减排可以从两个方面进行,一是对污水处理厂进行设备优化升级及集中化,提高效率和操作标准,比如改进膜过滤、压力设置、排气等,从而最大程度避免厌氧处理过程的甲烷排放。

另一方面,应用先进技术对污水处理过程及污水排放过程产生的甲烷进行捕集回收或资源化利用,比如利用微藻、有盖泻湖、出水脱气等方式减少甲烷排放,或是建设厌氧污泥消化器和沼气工程来对甲烷进行资源化利用。具体而言:

- **在现有露天厌氧池中加装沼气抽采系统:**与投资建设新的集中式好氧处理厂相比,封闭现有的污水处理池并抽采沼气或具有更优的经济性。

- **在厌氧反应器的污水排放口加装脱气设备：**在反应器的尾部进行封闭并安装脱气设备，让气体在其中充分反应，能够让甲烷得到更为充分的利用。
- **安装厌氧污泥消化系统：**厌氧消化池用于处理好氧污水处理后的污泥等生物固体，能够产生沼气，所收集的甲烷能够被注入燃气网或用作热电联产(Combined Heat and Power, CHP)系统、燃料电池等。

三、我国甲烷减排的挑战与机遇

3.1 挑战

3.1.1 总量大、仍有增长趋势

我国甲烷减排面临总量大、难度高的挑战。一方面，我国甲烷排放量将随经济发展、城镇化和居民生活水平提高而增长；另一方面，由于成本有效和技术可行的减排技术有限，甲烷的深度减排难度较大。

根据 PBL 的最新统计，2019 年我国甲烷排放占全球甲烷排放的比重约 19%，伴随经济和人口变化，能源、农业和废弃物管理产生的甲烷排放呈增长并趋于稳定的趋势。根据清华大学的预测，基准政策情景下我国甲烷排放到 2030 年将达到 13.9 亿吨 CO₂e，到 2050 年仍有 12.0 亿吨 CO₂e。

图16 中、美、欧农业温室气体排放占比

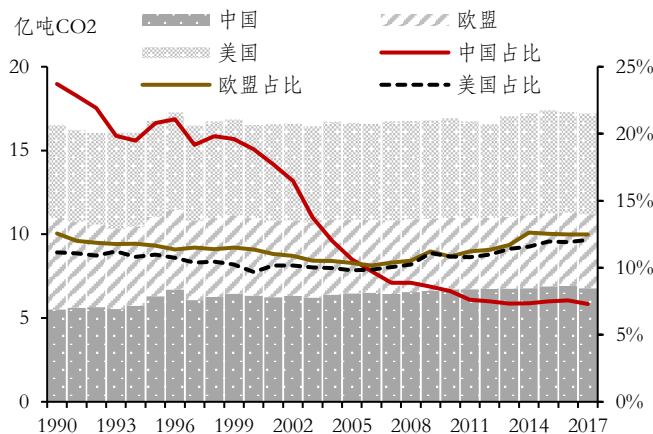
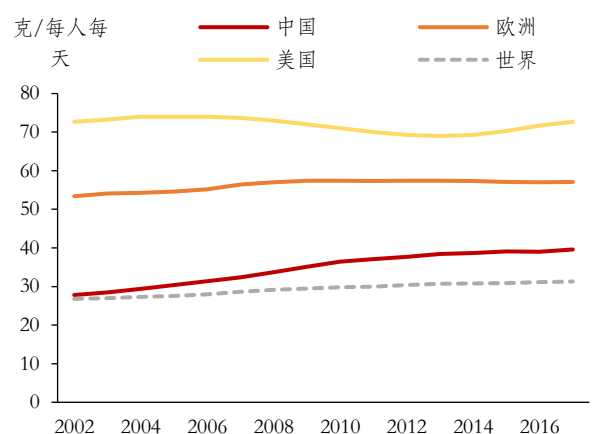


图17 中、美、欧人均动物蛋白摄入量



数据来源： 经合组织 (OECD)、 FAO

我国作为农业大国，农业相关温室气体排放占比始终高于欧美。随着人口数量的增加以及人均蛋白质摄入的不断提升，来自水稻种植和畜禽养殖的甲烷排放占比仍有增长空间(图16-17)。水稻作为我国主要粮食作物之一，需要在保障粮食安全的同时进行甲烷减排。与此同时，我国的人均蛋白质消费量依然低于发达国家水平，随着人口的增长和居民生活水平提

高,要满足日益增长的肉蛋奶需求,畜牧业增长空间大,也因此增加了相关甲烷减排的压力。

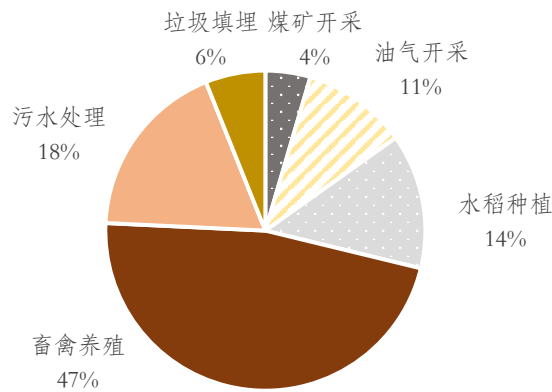
3.1.2 难度大、缺少经济可行的技术

相较于欧美,我国甲烷减排面临更大挑战。我国煤炭领域的甲烷排放占比高,油气领域的占比很低。煤炭瓦斯回收存在浓度低、波动大的特点,回收利用技术难度大、成本高;而目前油气领域的甲烷减排相对而言有着较低的减排成本、较为成熟的解决措施,根据 IEA 的统计,在油气行业中,45%的甲烷泄漏可以实现净零成本减排。

全球针对农业领域的大多减排技术,其技术可行性和经济性不足,减排难度较大;加之,个人消费包括饮食结构刚性较大,寄希望于素食等饮食习惯改变的减排措施,不确定性较大(图 18)。

因此,对于甲烷减排预测的诸多分析中,在采取成本有效和强化政策的情景下,实现甲烷排放的深度减排量难度极大,将为我国实现碳中和目标带来挑战。

图18 我国2050年深度减排后剩余甲烷分行业占比



数据来源: Lin et al (2021): LBNL 深度减排情景

3.1.3 数据基础较为薄弱

我国在甲烷的核算和监测领域仍需更多积累。甲烷排放来源复杂多样,涉及的行业差异较大,准确的甲烷排放数据是有效治理甲烷的重要前提,也是甲烷利用与减排政策制定和技术路径选择的基础。

然而,我国甲烷方面的基础数据与测算方法与国际相比存在较多不足。甲烷尚未纳入我国的年度排放统计工作,时效性相对较差。虽然在向《联合国气候变化框架公约》秘书处提交的历次信息通报中都包括了甲烷数据,但总体而言,甲烷排放系数在国内外研究中存在较大不同,数据结果准确性有着较大的差异。

我国在甲烷相关基础研究仍有提升空间,数据的精度和广度有所欠缺。除自下而上的统计测算以外,无人机和飞机监测、固定连续监测、卫星高精度监测等自上而下监测方法的使

用，将提高甲烷监测的及时性，使更多的甲烷泄漏能够被及时发现和处置。目前，我国已发射多颗温室气体监测卫星，已初步具备监测甲烷等多种温室气体浓度分布的能力。但整体看，与发达国家在空间分辨率、测量精度及重访周期等指标上仍存在较大差距。

3.2 机遇

3.2.1 能源转型和瓦斯回收利用推动甲烷减排

煤炭领域的甲烷逸散是我国最为主要的甲烷排放源，这一领域的减排对于我国至关重要，作为世界上最大的煤炭消费国和生产国，煤炭广泛应用于电力、钢铁和水泥生产、建材、化工、建筑供暖和制冷等领域。因此，煤炭领域的甲烷减排与整个能源体系的转型相互耦合。甲烷减排在能源领域的应用，符合能源结构调整、安全生产、资源利用等多方面的需求，是能源领域绿色转型的必要选择。

煤炭领域的甲烷减排，需要采取“减、用、治”等三方面的措施。具体来说：“减”，即减少以煤炭为主的化石能源的消耗总量：实现我国 2060 年碳中和的目标，需要整体能源系统从以化石能源（煤炭、石油、天然气）为主导转变为以可再生能源为主导。根据清华大学气候变化与可持续发展研究院的测算，在碳中和目标下，我国 2050 年煤炭比重将下降到 10% 以下，而非化石能源占比将达到 70% 以上，甚至超过 85%。近年来，煤炭在我国一次能源的消费量占比已经逐渐下降，从 2005 年的 67% 降低到 2020 年的 57%。随着消费端的逐步转型，我国在生产端也将逐渐退煤，煤炭开采产生的甲烷排放也将随之减少。

“用”，即加大煤炭开采过程中甲烷回收的利用力度。针对不同梯次的甲烷，采用合适的技术路线，提高利用效率，减少直接排放。对于国家严格禁止排放的 30% 以上的高浓度煤矿瓦斯及煤层气，尽快形成强制性的监管机制，确保高效利用；针对 8-30% 浓度的瓦斯，地方政府针对煤炭企业下达瓦斯控排指标，促使煤矿企业利用现有较为成熟的技术，加大利用减排力度；针对排放量较大的 1% 浓度以下风排瓦斯，提高其技术适应性，利用 CCER 机制及约束性制度，提高利用效率。

“治”，即针对废弃矿井的瓦斯排放进行治理，在矿井关闭前制定完善的关闭措施、验收标准及技术文件的移交等，为下一步的废弃矿井瓦斯治理和水害治理奠定基础。截止目前，针对废弃矿井的治理，在国家层面已经建立研究课题并酝酿制定相关标准，在国内产煤地区地方政府也已出台了相关约束性条例，为废弃矿井的治理做出了相应安排。下一步，需要推动示范废弃矿井瓦斯治理示范项目最佳实践，加大对废弃矿井甲烷逃逸的控排力度。

专栏3 甲烷的核算和监测方法

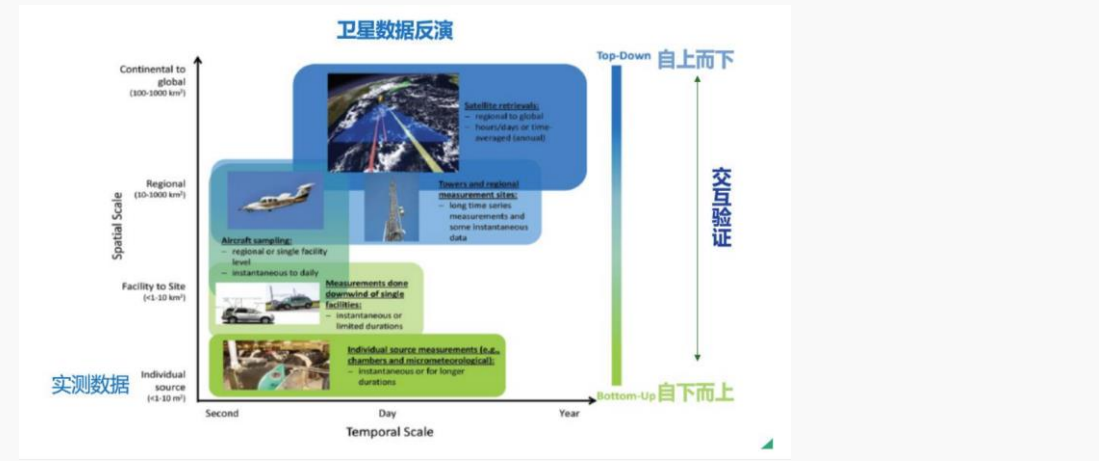
甲烷排放测量可以分为自上而下和自下而上两个维度，由于其排放大多数属于无组织逸散，其泄漏浓度低、波动大、持续性强，监测也具有高度不确定性。因此，多尺度不同数据源的甲烷排放清单交叉印证至关重要。

自上而下监测是指在较大的空间尺度（如全球、大陆或区域），地面、飞机、塔台或卫星观测收集到的甲烷浓度数据与大气传输模型相结合，来估计区域排放量。目前全球甲烷监测技术发展迅速，除了现场采样、车载监测器等常规技术，为了更好地满足跨区域动态监测需求，欧美国家发射甲烷监测专用卫星，对能源生产设施和重要天然气管线进行全天候监测，其空间分辨率已达到米级。比如来自欧洲的 TROPOMI 和 Prims 卫星，以及即将于 2022 年发射的 MethaneSAT 甲烷监测卫星。

自下而上的监测则主要聚焦在较小的空间尺度上开展对单一流程、排放点源、场站级部件等排放源的测量。以天然气行业为例，主要是通过红外热像仪、超声泄漏检测仪等手段查找甲烷排放点源，并使用大流量采样器进行甲烷排放速率和浓度测定，重点监测法兰和螺纹连接部位、阀门、压缩机密封部位等，得到甲烷的逸散排放系数，从而得到整体的甲烷排放估算值。

两种监测方法各有优劣，需要进行交叉验证。“自上而下”的估算包括所有来源的排放，但可能难以将排放归因于特定来源或来源类别，且大气传输模式的不确定性、排放估算的不确定性更高。“自下而上”的方法提供了特定来源排放量和排放格局的信息，但其排放量清单中可能无法及时准确识别排放因子的变化，比如，美国环境保护署（EPA）至今对油气甲烷排放的统计还是基于 20 世纪 90 年代初期收集的数据，当时水平钻井和水力裂压法并未广泛地投入使用，有研究表明（Barkley, Z. R., 2021），该方法测算的甲烷排放产生了严重低估，其中对石油生产的甲烷排放低估了 90%，天然气生产活动则低估了 50%。

图 19 多维度甲烷监测体系一览



数据来源：美国环保协会（Environmental Defense Fund, EDF）

3.2.2 循环经济和无废城市助力甲烷减排

尽管城市废弃物相关的甲烷排放只占我国甲烷排放的不到 12%，但是在现有政策和技术推动下，减排潜力可观。随着我国快速的城镇化和工业化，以城市生活垃圾为主的废弃物将成倍增长。我国在废弃物管理中采取的包括确立生活垃圾分类制度、新固废法的出台以及建设“无废城市”等政策措施，加上已有的废弃物处理处置和资源回收利用技术，将助推甲烷减排。

对生活垃圾分类管理以及对易腐有机垃圾的资源化利用的技术可以减少甲烷排放。首先应鼓励生活垃圾源头减量，从而避免和减少不必要生活垃圾的产生以及由此带来的甲烷排放。“源头减量”资金投入少，效果直接显著，但是其实现需要公众参与，其核心涉及到公众的行为改变，以“光盘行动”为代表的源头减量活动对于减少食物浪费，减少城市易腐有机垃圾，具有积极的作用。

其次，我国垃圾管理领域的技术转型，以焚烧为代表的处理方式的大力发展，虽然对于塑料产生的温室气体排放仍需探讨，但对于避免甲烷排放有积极的意义；进而，在源头削减的基础上采取垃圾分类，通过将易腐垃圾有效分类和处理处置，也将减少最终需要进行填埋和焚烧的易腐有机垃圾，也可实现减少甲烷产生的减排效益；同时，分类出来的易腐垃圾可以运送到餐厨/厨余垃圾处理厂，通过厌氧发酵等技术转变为沼气。沼气提纯后的气体可以用于上网发电、提纯进入城市天然气管网或者做车用燃气等。而沼渣可以用于土地利用，沼液则回到污水处理厂进行处理。

3.2.3 CCER 等市场化手段有望发挥更大作用

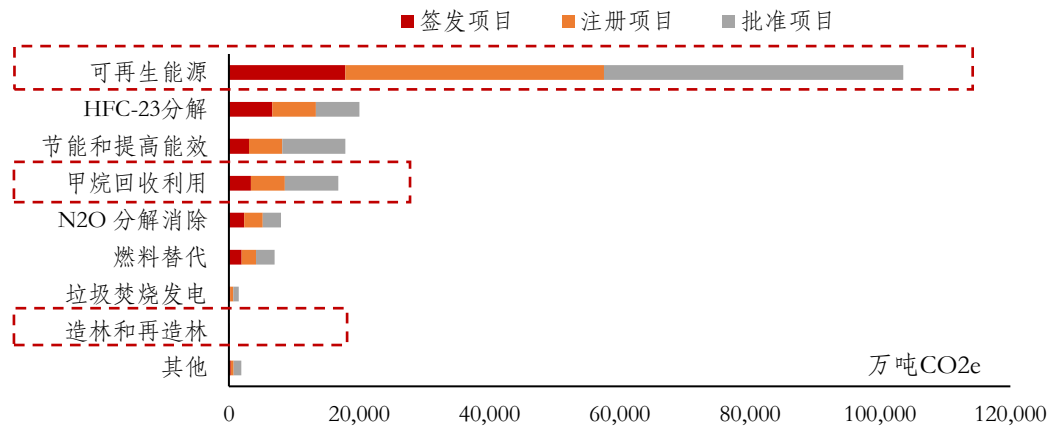
自愿碳市场交易等市场化手段也有助于甲烷减排技术的开发和探索。2021 年 7 月我国的全国碳交易市场启动运营，而暂停了 5 年国家核证自愿减排机制（CCER）²⁴也有望在 2022 年重新启动。CCER 不仅可以用于强制性的全国碳排放交易市场，也可以用于自愿碳市场，CCER 通过市场化的手段，提升林业碳汇、甲烷回收利用，以及太阳能、风能利用等温室气体减排项目的经济性。项目产生的减排量经核证后可作为碳减排产品进入市场交易，非控排的企业或个人能够通过购买 CCER 抵消自身碳排放，实现碳中和。

根据中国自愿减排交易信息平台的统计（图 20），此前的 CCER 一半以上都签发了可再生能源项目（包括水电、风电、光伏等），此外占比较高的还有 HFC-23 分解和节能项目。而根据试行办法与草案修改稿，在全国碳市场背景下允许使用的 CCER 类型进一步限制为三大类，包括可再生能源、林业碳汇和甲烷利用，有望提升相关项目经济性、促进技术探索和

²⁴ CCER（Certified Emission Reduction）是国家核证自愿减排量的简称，是依据《温室气体自愿减排交易管理暂行办法》的规定，经国家发改委备案并在国家注册登记系统中登记的温室气体自愿减排量，单位为“吨二氧化碳当量(CO₂e)”。

推广。

图20 CCER已备案项目分类（截至2020年末）



数据来源：中国自愿减排交易信息平台

其中甲烷利用的项目中，农村户用沼气、煤层气/瓦斯利用、垃圾填埋气利用、工业废水和生活污水处理、养殖粪便处理/垃圾堆肥等项目有可能迎来开发机遇。

四、甲烷减排行动展望和建议

4.1 加快和扩大国际合作

甲烷控制的必要性已从全球科学共识走向政策共识，而国际合作在全球的甲烷减排行动中至关重要。

a. 国际甲烷排放观测站（International Methane Emissions Observatory, IMEO）²⁵

数据的准确、透明和规范是各国进行甲烷减排行动的重要前提，而当前全球甲烷减排面临的最为迫切的问题是底数不够清晰，可用的甲烷排放数据主要基于排放因子的通用计算，这些计算的准确性有一定局限，因此，获取更广泛维度的甲烷排放数据有助于更准确地评估甲烷排放量。第26次缔约方大会（COP26）召开之际，联合国和欧盟宣布成立国际甲烷排放观测站（International Methane Emissions Observatory, IMEO），负责监督各国政府承诺减少的温室气体甲烷的排放量，将率先在油气领域完善甲烷监测的数据基础，之后再延伸到农业和废弃物处理领域。包括使用来自卫星观测的数据、油气公司申报的数据等进行综合比对，并根据这一数据编制欧盟和国际甲烷供应指数（Methane-Supply Index, MSI），为燃料购买者

²⁵ IMEO, <https://www.unep.org/explore-topics/energy/what-we-do/methane/imeo-history>.

提供决策参考。

b. OGMP 黄金标准

欧盟与联合国推出 OGMP 2.0²⁶作为油气领域新的黄金标准报告框架，致力于提高石油和天然气部门甲烷排放报告的准确性和透明度，目前已有 70 家公司将报告其产业上下游价值链中所有来源的甲烷排放量，占世界石油和天然气产量的 50%。虽然 OGMP 目前仅是一项自愿倡议，且仅涵盖上游公司（所有欧洲大型企业都是参与者），但其正在扩展到包括能源价值链的所有环节。

表4 OGMP 甲烷披露准则前后对比

	目前的框架	未来的框架
排放源覆盖面	只涵盖上游的 9 类排放源	涵盖所有环节：上游、中游和下游的排放源，以及火炬燃烧等过程中的不完全燃烧
资产覆盖面	运营资产	所有资产
披露要求	不会公开披露实际排放量，只会公布实现的减排量	披露排放量的绝对值
披露标准	无	将制定 1-5 层级的披露规范，其中最高的层级 5 是基于 site-level measurements
合规要求	自愿性	可能采取强制披露；2024 年要求实现运营资产的层级 4-5 报告，2025 年要求涵盖非运

数据来源：联合国环境署

c. 全球甲烷倡议（Global Methane Initiative, GMI）²⁷

美国环保署在 2004 年发起了一项全球范围内自愿、非约束性的国际合作框架——“全球甲烷倡议”（Global Methane Initiative, GMI），旨在推动具有经济性的甲烷减排技术以及甲烷作为清洁能源在沼气、煤矿及油气系统中的回收利用。已有我国在内的 45 个国家加入该倡议，占全球甲烷排放量的约 70%。

4.2 制定国家和地区甲烷减排行动方案

我国在 2007 年的首份应对气候变化国家方案中就已提出了甲烷减排行动，包括但不限于煤矿瓦斯的补贴、抽采率目标、煤矿甲烷排放限值标准；农业的粪污配套率和综合利用率指标等等相关政策措施。近年来，随着我国“3060”目标的提出，对气候变化问题的重视程度提升，对甲烷排放的关注度逐渐从安全隐患和资源利用的视角转为温室气体的控排，相关政策措施加速推进。

²⁶ 石油和天然气甲烷伙伴关系（OGMP）是联合国环境署和气候与清洁空气联盟于 2014 年发起的一项多方利益相关者倡议。<https://www.ogmpartnership.com/>

²⁷ 全球甲烷倡议 GMI 官网。<https://www.globalmethane.org/partners/index.aspx>

“十四五”规划首次将控制甲烷排放写入五年规划，提出“加大甲烷、氢氟碳化物、全氟化碳等其他温室气体控制力度”，这是甲烷减排在气候变化领域的里程碑事件。

2021年4月和10月，我国对外发布的中美应对气候危机联合声明和中欧环境与气候高层对话联合新闻公报²⁸都提到了甲烷减排的相关内容。我国是畜牧生产和水稻种植大国，在农业甲烷减排方面也多次作出积极表态：我国政府在2015年提交的国家自主贡献方案中承诺“控制稻田甲烷和农田氧化亚氮排放，构建循环型农业体系，推动秸秆综合利用、农林废弃物资源化利用和畜禽粪便综合利用”²⁹。

2021年9月，中共中央、国务院印发的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》明确提到“加强甲烷等非二氧化碳温室气体管控”³⁰；2021年10月，我国最新提交的国家自主贡献（NDC）文件中，即《中国落实国家自主贡献成效和新目标新举措》，首次明确了能源领域甲烷减排的方向：“重点通过合理控制煤炭产能、提高瓦斯抽采利用率等，以及控制石化行业挥发性有机物排放量、鼓励采用绿色完井、推广伴生气回收技术等举措，有效控制煤炭、油气开采甲烷排放”。

2021年11月，《中美关于在21世纪20年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》中提到：中方计划在其近期通报的国家自主贡献之外，制定一份全面、有力度的甲烷国家行动计划，争取在21世纪20年代取得控制和减少甲烷排放的显著效果；中美计划在2022年上半年共同召开会议，聚焦强化甲烷测量和减排具体事宜，包括通过制定标准减少来自化石能源和废弃物行业的甲烷排放，以及通过激励措施和示范项目减少农业甲烷排放。

4.3 推动煤炭、油气领域企业率先开展行动

煤炭领域的甲烷逸散是我国最大甲烷排放源，积极推动煤炭企业对煤层气（煤矿瓦斯）高效利用和回收力度是推动我国甲烷减排的关键之一。

一方面可以通过完善甲烷回收利用相关的政策措施，例如加大对煤层气（煤矿瓦斯）的补贴力度，以及加大对技术难度高且投入成本大的瓦斯利用项目的政策支持，来激励企业采取减排行动。另一方面，在煤炭企业中加强对已有的煤层气（煤矿瓦斯）抽采和利用最佳实践的分享和推广也可以助力甲烷减排。例如联合国欧洲经济委员会依托山西焦煤集团设立的

²⁸ 新华社. 第二次中欧环境与气候高层对话联合新闻公报(全文). 2021-10-11. http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/11/content_5641885.htm.

²⁹ 新华社. 强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献（全文）. 2015-6-30. http://www.gov.cn/xinwen/2015-06/30/content_2887330.htm.

³⁰ 新华社. 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见. 2021-10-24. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.

全球唯一甲烷管理机构，由致力于煤层气（煤矿瓦斯）管理的 15 家理事单位结成³¹，在我国推广联合国倡导的“有效抽采利用煤矿瓦斯最佳实践指南”，并推动中国煤层气（煤矿瓦斯）的研发与合作。

根据 CCAC 估算，石油和天然气是唯一可以通过现有技术以具有成本有效性的方式减少大部分排放的行业，使用目前可用的技术和解决方案可以减少近 70% 的化石甲烷排放，因此，油气领域也是甲烷减排行动最为迅速的行业。

欧洲油气公司受欧盟绿色新政的影响成为甲烷减排的先行者（表 5）。欧洲油气公司在 2019 年底欧盟发布“绿色新政”（Green Deal）之后纷纷出台了以甲烷减排为主要内容的“净零”（net-zero）排放战略，欧洲主要的油气公司如英国石油、荷兰壳牌、法国道达尔、意大利埃尼、挪威国油、西班牙雷普索尔等在 2020 年相继发布了其气候目标，并将远期目标与欧盟的 2050 年整体目标保持一致。

美国的油气公司以埃克森美孚、雪佛龙、康菲石油、西方石油为代表，气候目标明显不如欧洲油气公司积极。在其提出的甲烷排放控制方面，美国油气公司仅提出了 2030 年的目标，且在减排力度方面要较欧洲油气公司低很多，常规火炬活动的退出时间要较欧洲油气公司晚 5 年。美国最大的石油公司埃克森美孚迫于投资者压力，承诺在 2021 年开始披露其温室气体排放数据。

2018 年，油气行业气候倡议组织（Oil & Gas Climate Initiative, OGCI）³²率先在全球制定了甲烷强度排放目标，以实际行动推动能源供给侧结构性改革。油气行业气候倡议组织（OGCI）由 12 个国际石油公司组成，成员油气产量占全球油气产量的 30%。倡议提出到 2025 年上游业务平均甲烷排放强度力争降至 0.2% 以下。其中，中国石油是唯一加入该组织的我国油气企业。

在我国，油气领域的企业也已经行动起来，2021 年 5 月“中国油气企业甲烷控排联盟”成立³³，发起者包括中国石化、中国石油、中国海油、国家管网、北京燃气、华润燃气、新奥能源，共同推进全产业链甲烷控排行动，力争实现 2025 年天然气生产过程甲烷平均排放强度降到 0.25% 以下，接近世界先进水平，并努力于 2035 年达到世界一流水平。

³¹ 人民网. 中国国际卓越煤矿瓦斯治理中心正式揭牌. (2017-09-26). <http://finance.people.com.cn/n1/2017/0928/c153179-29565933.html>.

³² 油气行业气候倡议组织 官网: <https://www.ogci.com/>.

³³ 我国石油新闻中心, 我国油气企业甲烷控排联盟成立, 2021-05-19, <http://news.cnpc.com.cn/system/2021/05/19/030033272.shtml>

表5 全球油气企业甲烷承诺总结

公司	国家	气候目标	甲烷排放强度	常规火炬取消时间
壳牌	荷兰	2050年净零排放(运营+能源使用)	2025年控制在0.2%	2025年
道达尔	法国			2025年
英国石油	英国			2025年
埃尼	意大利			2025年
挪威国油	挪威		2030年净零	2030年
埃克森美孚	美国	2025年减少15%-20% (基于2016年)	2025年降低40%-50% (基于2016年)	2030年
雪佛龙	美国	2025年减少5%-20% (基于2016年)	2023年降低20%-25% (基于2016年)	2030年
康菲石油	美国	2050年净零排放(运营+能源使用)	2021年安装甲烷监测设备	2030年
西方石油	美国	2040年净零排放(运营+能源使用) 2050年净零排放(运营+能源使用+产品)	2025年控制在0.25%	2030年
中国石油	中国	2050年左右实现“近零”排放	2025年降低50% (基于2019年)	2030年

数据来源：魏威等人(2021)，公司官网

注：常规火炬指油气开采过程中因缺乏管线、储集等基础设施将多余天然气燃烧的活动

4.4 强化金融支持甲烷减排行动的力度

无论是甲烷减排措施的推广还是减排技术的研发都离不开资金的支持。引导金融机构来为不同行业的甲烷减排项目和技术提供多元化的金融产品，将可以进一步助力中国的甲烷减排行动。

我国现有政策体系中，已经包括了部分甲烷减排项目，值得重视。在发改委已经发布的《绿色产业指导目录（2019版）》中将煤层气（煤矿瓦斯）抽采利用、绿色畜牧业、城镇污水处理厂污泥处置综合利用等都列为了绿色产业。《绿色债券支持项目目录（2021年版）》也把在能源供应、农业和废弃物处理行业中的提供甲烷减排的项目纳入进来。表6中选取了《绿色债券支持项目目录（2021年版）》中所覆盖的甲烷减排领域以及具体项目。

此外，由于不同甲烷减排项目的技术成熟度和商业化程度不同，应针对不同类型的减排

项目和技术提供具有差异化的金融产品，例如绿色信贷、绿色债券、绿色基金以及对其他创新性绿色金融产品的探索，拓宽甲烷减排项目获得绿色资金的渠道，将可以加速甲烷减排的步伐。

表6 《绿色债券支持项目目录》中覆盖的甲烷减排领域及项目。

领域	项目名称	涉及甲烷减排的项目说明
资源综合利用	1.5.1.4 餐厨废弃物资源化无害化利用装备制造	利用餐厨废弃物生产生物柴油、有机肥、沼气、工业乙醇等产品的餐厨废弃物减量化、无害化处理和资源化利用等装备制造及贸易活动。
	1.5.2.1 矿产资源综合利用	伴生天然气、低浓度瓦斯等能源伴生矿产资源、低品位伴生资源的开发或回收综合利用。
	1.5.3.2 农业废弃物资源化利用	畜禽粪污生产沼气设施建设和运营。
	1.5.1.8 农林废物资源化无害化利用装备制造	利用秸秆、畜禽粪污、农村厕所粪污等农林废弃物生产发酵饲料、沼气、生物天然气、固体燃料、有机肥料等产品的农林废物资源化无害化利用装备制造及贸易活动。
	3.2.1.3 生物质能利用装备制造	生物质发电、供热装备，沼气、生物质燃气生产装备，生物质固液体燃料生产装备，生物质能利用中的环保装备等装备制造及贸易活动。
清洁能源产业	3.2.3.3 天然气输送储运调峰设施建设和运营	天然气输送、储运、调峰设施建设和运营，以及甲烷泄漏检测与修复装置配备。
绿色农业	4.1.3.2 绿色畜牧业	畜禽养殖废弃物贮存处理利用设施建设，构建“养殖+沼气+种植+加工”的循环农业产业园区建设。

数据来源：《绿色债券支持项目目录（2021年版）》

甲烷减排是一个系统工程，且有助于建设循环经济，具有多重社会效益；不断完善甲烷减排政策体系，提早做出制度安排和投资行动，对我国实现碳中和目标至关重要。

References

- Barkley, Z. R., Davis, K. J., Feng, S., Cui, Y. Y., Fried, A. L. A. N., Weibring, P. E. T. T. E. R., ... & Kostinek, J. (2021). Analysis of oil and gas ethane and methane emissions in the southcentral and eastern United States using four seasons of continuous aircraft ethane measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(10), e2020JD034194.
- Brink, S., Godfrey H., Kang M., Lyser S., Majkut J., Mignotte S., Peng W., Reid M., Sengupta M., Singer L. (2013). Methane mitigation opportunities in China. *Princeton University*.
- Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Lo Vullo, E., Solazzo, E., ... & Vignati, E. (2021). EDGAR v6. 0 Greenhouse Gas Emissions, *European Commission, Joint Research Centre (JRC)*[data set]. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ghg60.
- Crippa, M., Guizzardi, D., Solazzo, E., Muntean, M., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., ... & Vignati, E. (2021). GHG emissions of all world countries – 2021 Report. *Office of the European Union, Luxembourg*.
- Dlugokencky E. (2021). Global CH₄ Monthly Means. *NOAA/GML Global Monitoring Laboratory*. gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/.
- Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- FAO. (2017). The global livestock environmental assessment model. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*, 22-6.
- Global Methane Initiative. (2013). Municipal Wastewater Methane: Reducing emissions, advancing recovery and use opportunities. www.globalmethane.org.
- Haugland, T. (2019). Best Practice Guidance for Effective Methane Management in the Oil and Gas Sector. *Monitoring, Reporting and Verification (MRV) and Mitigation*. August.
- Hegarty RS., Cortez P. R., Dittmer K.M., Wang Y., Shelton S., Emmet-Booth J., Wollenberg E., McAllister T., Leahy S., Beauchemin K., Gurwick N. (2021). An evaluation of emerging feed additives to reduce methane emissions from livestock. Edition 1. *Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS) & New Zealand Agricultural Greenhouse Gas Research Centre (NZAGRC) initiative of the Global Research Alliance (GRA)*.
- Höhne, N., Gidden, M. J., den Elzen, M., Hans, F., Fyson, C., Geiges, A., ... & Rogelj, J. (2021). Wave of net zero emission targets opens window to meeting the Paris Agreement. *Nature Climate Change*, 11(10), 820-822.
- IEA (2021), World Energy Balances: Overview, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>.
- IEA. (2020). Methane Tracker 2020, *IEA, Paris* <https://www.iea.org/reports/methane-tracker-2020>
- IEA. (2021). Driving Down Methane Leaks from the Oil and Gas Industry. A regulatory roadmap and toolkit. *IEA*.
- IEA. (2021). Methane Tracker 2021. *IEA. Paris*. <https://www.iea.org/reports/methane-tracker-2021>
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. 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*.

- In Press.
- IPCC. (1995). IPCC Second Assessment. *A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO-UNEP*.
- Kholod, N., Evans, M., Pilcher, R. C., Roshchanka, V., Ruiz, F., Coté, M., & Collings, R. (2020). Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production. *Journal of cleaner production*, 256, 120489.
- Liang, D., Lu, X., Zhuang, M., Shi, G., Hu, C., Wang, S., & Hao, J. (2021). China's greenhouse gas emissions for cropping systems from 1978 – 2016. *Scientific data*, 8(1), 1-10.
- Lin, J., Khanna, N., Liu, X., Teng, F., & Wang, X. (2018). China's non-CO₂ greenhouse gas emissions: Future trajectories and mitigation options and potential. *Scientific reports*, 9(1), 1-10. Berkeley-Tsinghua Joint Research Center Working Paper 003. Berkeley, CA: Energy Analysis and Environmental Impacts Division, Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Lin, J., Khanna, N., Liu, X., Wang, W., Gordon, J., & Dai, F. Opportunities to Tackle Short-Lived Climate Pollutants and Other Greenhouse Gases for China.
- Miller, S. M., Michalak, A. M., Detmers, R. G., Hasekamp, O. P., Bruhwiler, L. M., & Schwietzke, S. (2019). China's coal mine methane regulations have not curbed growing emissions. *Nature Communications*, 10(1), 1-8.
- Naik, V., S. Szopa, B. Adhikary, P. Artaxo, T. Berntsen, W. D. Collins, S. Fuzzi, L. Gallardo, A. Kiendler Scharr, Z. Klimont, H. Liao, N. Unger, P. Zanis. (2021). Short-Lived Climate Forcers. 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*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Ocko, I. B., Sun, T., Shindell, D., Oppenheimer, M., Hristov, A. N., Pacala, S. W., ... & Hamburg, S. P. (2021). Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming. *Environmental Research Letters*, 16(5), 054042.
- Olivier, J. G. J., & Peters, J. A. H. W. (2020). Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions. *PBL Netherlands Environmental Assessment Agency: The Hague, The Netherlands*.
- Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (2007). IPCC fourth assessment report. *IPCC, Geneva*.
- Saunois, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., ... & Zhuang, Q. (2020). The global methane budget 2000 – 2017. *Earth system science data*, 12(3), 1561-1623.
- Scholz, V. V., Meckenstock, R. U., Nielsen, L. P., & Risgaard-Petersen, N. (2020). Cable bacteria reduce methane emissions from rice-vegetated soils. *Nature communications*, 11(1), 1-5.
- Springmann, M., Clark, M., Mason-D' Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B. L., Lassaletta, L., ... & Willett, W. (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, 562(7728), 519-525.
- Stern, J. (2022). Measurement, reporting, and verification of methane emissions from natural gas and LNG trade: creating transparent and credible frameworks. *Oxford Institute for Energy Studies*.
- Sun, Yiduo, Ruifa Hu, and Chao Zhang. "Does the adoption of complex fertilizers contribute to fertilizer overuse? Evidence from rice production in China." *Journal of Cleaner Production* 219 (2019): 677-685.
- UNFCCC. (2021). Nationally determined contributions under the Paris Agreement Revised synthesis report by the secretariat, *UNFCCC Bonn*.
- United Nations Environment Programme & Climate and Clean Air Coalition (2021). Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions. *Nairobi: United Nations*

- Environment Programme.*
- United Nations Environment Programme. (2021). Emissions gap report 2020. *UN Environment Programme.*
- United States Environmental Protection Agency. (2019). Global Non-CO₂ Greenhouse Gas Emission Projections & Mitigation Potential 2015 – 2050. *Office of Atmospheric Programs (6207A), Washington, DC 20005.*
- Wu, Z., Zhang, X., Dong, Y., Li, B., & Xiong, Z. (2019). Biochar amendment reduced greenhouse gas intensities in the rice-wheat rotation system: six-year field observation and meta-analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 278, 107625.
- Zhang, Z., Poulter, B., Knox, S., Stavert, A., McNicol, G., Fluet-Chouinard, E., ... & Li, X. (2022). Anthropogenic emission is the main contributor to the rise of atmospheric methane during 1993 – 2017. *National Science Review*, 9(5), nwab200.
- 蔡博峰, 高庆先, 李中华, 吴静, 曹东, & 刘兰翠. (2015). 中国城市污水处理厂甲烷排放因子研究. *中国人口资源与环境*, 25(4), 118-124.
- 何建坤. (2020). 我国中国长期低碳发展战略研究. *中国人口·资源与环境*, 30(11)(2020):1-25.
- 洪晟, 汪小帆, 廖绪昌, & 陈持平. (2021). “中国加速迈向碳中和”油气篇：油气行业碳减排路径. *麦肯锡系列报告*.
- 联合国欧洲经济委员会. (2010). 有效抽采及利用煤矿区煤层气最佳实施方案指南. *欧洲经济委员会能源系列第 31 号文件*. 纽约.
- 绿色创新发展中心, & 全球甲烷行动. (2021). 中国城市生活垃圾和市政污泥处理良好实践指南——温室气体减排视角. 北京.
- 马翠梅, 戴尔阜, 刘乙辰, 王亚慧, & 王芳. (2020). 中国煤炭开采和矿后活动甲烷逃逸排放研究. *资源科学*, 42(2), 311-322.
- 马占云, 冯鹏, 高庆先, 卢延娜, 刘俊蓉, & 李文涛. (2015). 中国废水处理甲烷排放特征和减排潜力分析. *气候变化研究进展*, 11(5), 343.
- 美国环保协会. (2021). 国内外甲烷排放控制行动与趋势. 北京: 2021 中国甲烷论坛.
- 清华大学气候变化与可持续发展研究院等. (2021). 中国长期低碳发展战略与转型路径研究: 综合报告. 北京: 中国环境出版集团.
- 全球甲烷行动. (2020). 全球甲烷排放及减排机会. www.globalmethane.org.
- 宋然平. (2019). 中国减缓气候变化的机遇: 非二氧化碳类温室气体工作报告. 华盛顿哥伦比亚特区: 世界资源研究所.
- 孙永彪, 张春香, 解东来, 那媛媛, & 张鑫. (2020). 天然气系统甲烷排放测量与估算研究现状. *油气田地地面工程*, 39(10), 30-37.
- 谭灵芝, & 孙奎立. (2019). 我国生活垃圾无害化向减量化处理处置转换路径探析. *中国环境管理*, 11(5), 61-66.
- 魏威, 秦虎, 高霁 & 汪维. (2021). 气候政策驱动下的油气企业上游甲烷减排行动. *环境与可持续发展*(03), 53-59. doi: 10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202103010.
- 亚洲开发银行. (2014). 发展碳融资, 加强中国草原管理: 草原畜牧业的减排方案. 北京: 亚洲开发银行驻中国代表处.
- 颜晓元, & 夏龙龙. (2015). 中国稻田温室气体的排放与减排. *中国科学院院刊*, 30(Z1), 186-193.
- 杨梓诚, 高俊莲, 唐旭, 仲冰, & 张博. (2016). 中国油气行业甲烷逃逸排放核算与时空特征研究. *完整版科学通报*, 3(1), 1-10.
- 晏珍梅, 孙辉, 郭建斌, 鞠鑫鑫, & 董仁杰. 基于沼气工程的稻田甲烷排放减半策略(2022). *中国沼气*, 40(03).

- 岳波, 林晔, 黄泽春, 黄启飞, 王琪, 张维, & 刘学建. (2010). 垃圾填埋场的甲烷减排及覆盖层甲烷氧化研究进展. *生态环境学报*, 19(8).
- 张卫建, 江瑜, 钱浩宇, 张艺, 邓艾兴 & 张俊. (2020). 水稻丰产与甲烷减排的协同机制与实现途径. (eds.) *第十九届中国作物学会学术年会论文摘要集* (pp.85).
- 张相锋, 肖学智, 何毅, 陈家军, & 杨志峰. (2006). *垃圾填埋场的甲烷释放及其减排* (Doctoral dissertation).
- 赵由才, 赵天涛, 韩丹, 王莉, & 梅娟. (2009). 生活垃圾卫生填埋场甲烷减排与控制技术研究. *环境污染与防治*, 31(12), 48-52.
- 郑有飞, 周渭, 尹继福, 周兴, & 朱晶晶. (2013). 填埋场甲烷排放因素分析及甲烷减排研究进展. *南京信息工程大学学报: 自然科学版*, 5(4), 296-304.
- 中国《联合国气候变化框架公约》国家联络人. (2021). 中国落实国家自主贡献成效和新目标新举措.
- 中国环境与发展国际合作委员会项目组 (2015). 应对气候变化与大气污染治理协同控制政策研究——聚焦短寿命气候污染物和非道路移动源. *中国环境与发展国际合作委员会 2015 年年会*. 北京.
- 中华人民共和国财政部. (2001). 农村小型公益设施建设补助资金管理试点办法. 财办农 [2001] 74 号.
- 中华人民共和国国家发展和改革委员会 & 国家能源局. (2011). 煤层气 (煤矿瓦斯) 开发利用“十二五”规划. 发改能源 [2011] 3041 号
- 中华人民共和国国家发展和改革委员会. (2019). 绿色债券支持项目目录 (2021 年版). 发改环资 [2019] 293 号.
- 中华人民共和国国家能源局. (2016). 煤层气 (煤矿瓦斯) 开发利用“十三五”规划. 国能煤炭 [2016] 334 号.
- 中华人民共和国生态环境部. (2018). 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告.
- 仲冰, 张博, 唐旭, 高俊莲, & 孙旭东. (2021). 碳中和目标下我国天然气行业甲烷排放控制及相关科学问题. *中国矿业*.

北京绿色金融与可持续发展研究院简介

北京绿色金融与可持续发展研究院(以下称“研究院”)是为中国和全球绿色金融与可持续发展提供政策、市场、产品研究以及国际合作平台的智库。作为一家非盈利机构,研究院的目标是在绿色金融、自然资本融资、低碳发展和能源转型等领域成为有全球影响力的智库,为改善全球环境和应对气候变化做出实质性贡献。研究院现下设五个研究中心,分别是绿色金融国际合作研究中心、能源与气候变化研究中心、ESG 投资研究中心、绿色科技研究与投资促进中心以及自然资源与投融资中心。研究院的重点工作领域包括:为中国有关部门和中央及地方政府、“一带一路”沿线国家以及国际组织提供绿色金融和低碳发展的政策研究与规划设计;为金融机构开发服务于环境改善和低碳发展的绿色金融产品、方法和分析工具;支持 GIP 秘书处北京办公室及其指导委员会、NGFS、IPSF 以及中英、中法、中欧绿色金融合作机制的工作;为发展中国家的金融监管机构和银行、证券、资管等金融机构提供能力建设和交流平台;与英国碳信托 (Carbon Trust) 合作管理绿色科技研究与投资促进中心。

高瓴产业与创新研究院简介

高瓴产业与创新研究院是高瓴旗下基于宏观经济和产业与技术变革等要素进行分析研究的专业性研究机构,是高瓴自主、专业、深度研究能力的智识分享平台。依托高瓴在科技创新与科技赋能、气候变化与新能源、医疗健康、新基建、先进制造等领域产业生态的深入布局和研究,高瓴产业与创新研究院敏锐洞察和捕捉技术发展趋势和产业变革方向,为社会经济发展持续输出高品质研究成果。

高瓴成立于 2005 年,专注于长期结构性价值投资,发现价值,创造价值。作为中国人创立的国际化创新型投资机构,依靠深度研究基因、高效资源配置,坚持重仓中国,积极推动原发创新与产业变革,持续创造经济、社会价值。作为具有全球视野的长期价值投资者,高瓴以创造可持续的长期增长为目标,寻找最优秀的企业家和管理团队,通过科技创新、独立自主的研究、行业专长和世界级的运营及管理能力,协助企业不断提升战略及运营管理水平,充分挖掘并发挥企业家潜能,共同创造价值。

绿色创新发展中心 (iGDP) 简介

绿色创新发展中心(注册名:北京绿色伙伴咨询有限公司)是专注绿色低碳发展的战略咨询机构,通过跨学科、系统性、实证性的政策研究、梳理、比较和评估,推动低碳环境解决方案的精细化,提升可实施度。我们与多样的合作伙伴和利益相关方合作,共同推动实现零排放的未来;立足本土,讲述中国绿色低碳发展故事。绿色创新发展中心关注以下领域的研究、咨询和交流:

- 能源转型
- 绿色经济
- 气候战略
- 可持续城市
- 策略传播

报告作者：

胡 敏 北京绿色金融与可持续发展研究院副院长

梁 红 高瓴产业与创新研究院院长

陈美安 绿色创新发展中心项目总监、高级分析师

吴宛忆 高瓴产业与创新研究院研究员

耿浩淼 高瓴产业与创新研究院研究员

致谢：

马 骏 北京绿色金融与可持续发展研究院院长

滕 飞 清华大学能源环境经济研究所副所长

董仁杰 中国农业大学教授

刘 晓 德国国际合作机构项目执行主任

申晋鸣 中国国际卓越煤矿瓦斯治理中心副理事长