



能源行业甲烷排放科学测量 与减排技术

李政 孙铄 董文娟 张丹玮



清华大学气候变化
与可持续发展研究院
INSTITUTE OF CLIMATE CHANGE
AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT
TSINGHUA UNIVERSITY

致谢

“中国甲烷减排合作平台”是由清华大学气候变化与可持续发展研究院发起的研究合作平台，在成立和发展的过程中得到了生态环境部和各方的大力支持，在此表示诚挚的感谢。美国环保协会慷慨地资助了平台下的研究项目和活动，并且依托其在甲烷减排领域的深厚基础，对项目研究提供了大量的支持，我们在此深表谢意。感谢中国计量科学研究院的王池研究员、美国环保协会的资深科学家解东来、国家发展和改革委员会能源研究所的朱松丽研究员、清华大学核能与新能源技术研究院的高级工程师佟庆跟我们分享了他们在该领域内的研究和发现。项目的沙龙和相关研讨会得到了能源企业专家们的大力支持，感谢他们分享企业甲烷排放检测和减排方面的实践和经验。

我们非常荣幸地邀请到北京大学环境科学与工程学院李少萌教授、中国计量科学研究院王池研究员和中国石油天然气集团安全环保技术研究院的高级工程师薛明担任报告的评审专家，感谢他们提出的宝贵建议。感谢来自清华大学的王振博士对报告修改提供了帮助和支持。感谢清华大学气候变化与可持续发展研究院的佟洁琼精心编辑和校对报告文字。感谢同事王彬彬博士作为项目协调人的付出和努力，感谢同事李智辉为项目的顺利开展提供了有力支持。本项目的研究和发布得到了众多同事和同行们的帮助，在此一并致谢。

执行摘要

甲烷是全球第二大温室气体，也是一种重要的短寿命气候污染物。为了达成《巴黎协定》下应对气候变化目标，同时推动二氧化碳减排和短寿命气候污染物减排已经成为全球共识。能源行业（煤炭和油气生产、运输与使用）是重要的甲烷排放源，其甲烷排放具有相对易于回收与利用的特点，在推动甲烷减排的过程中受到了广泛关注。本报告对现有的甲烷测量和减排技术进行研究与总结，展现了这些技术的特点及使用范围，希望能够推动中国的甲烷测量和减排工作。

报告首先从技术原理和技术设备特点两个层次出发对甲烷检测技术进行了归纳。现有的甲烷测量设备多基于光学、化学、声学三种原理设计。光学原理可进一步分为主动式原理和被动式原理，不同原理要求使用不同的激光发射源，适用的被测量对象也不同。在响应速度、可测量范围和测量准确性几个方面，依据光学原理设计的测量设备具有综合优势，获得了越来越广泛的应用。基于化学原理的设备在精密测定甲烷浓度方面具有优势，实际应用中常用

于光学仪器的校正，但是便携性相对较差。基于声学原理的设备主要用于管网泄漏点的定位检测，目前的技术尚不能实现对甲烷泄漏的定量测量。

基于以上原理设计的测量设备适用于不同的测量场景。针对组件、设施的测量往往服务于确定排放因子等活动，测量范围小、对测量精度要求高。手持设备或者固定传感器在此场景中有着广泛应用。而移动地面监测车等方式可以用于设施或地下输气管路泄漏的检测。针对区域甲烷泄漏的测量，常用的技术手段包括移动工作站、传感器网络、无人机等。卫星、飞机等技术手段常用于更大范围的甲烷浓度测量，这类测量活动也被称为“自上而下”的测量，其测量数据可以为基于组件、场站的“自下而上”的测量提供对照。近年来，卫星技术的空间分辨率和温室气体柱浓度精度不断提升，给利用卫星开展定量测量提供了技术可能性。通过上述技术直接测得的为甲烷浓度数据，将这些数据转化为泄漏量数据需要借助一定的数学分析方法。在具体的测量设备之外，以“活动

水平 × 排放因子”为代表的排放因子法在清单编制、科学研究中有着广泛应用，而利用蒙特卡洛方法开展对全流程甲烷排放的估算或某类组件排放分布特点的估算在近几年也受到关注。

在减排技术方面，报告对油气行业和煤炭行业分别进行了总结。油气行业有一些通用减排技术，例如定期检修、换用新的技术设备、泄漏检测与维修等。定期检修旨在降低泄漏发生的可能性，换用如柱塞举升、低排放气动阀、低排放密封的技术；应用蒸汽回收装置等技术可以降低全产业链正常生产过程中甲烷排放；而泄漏检测与维修主要是为了降低意外情况中的甲烷排放。

煤炭行业甲烷减排技术包含两类关键技术。第一类技术可以尽可能回收开采过程前后甲烷的排放，这类技术包括回收风排甲烷、对煤层中甲烷进行预抽采等。对于废弃煤矿，经常采用垂直井网回收彻底淹没之前巷道内的甲烷。对于露天煤矿，可以在开采之前直接采取矿层内的甲烷，以降低开采过程中的甲烷排放。第二类技术是对回收的煤层气依据浓度进行分

级利用。煤层气回收利用的主要难点在于甲烷浓度很低的大量风排瓦斯，目前尚不具备成熟的技术，催化氧化装置具有一定的潜力，乏燃燃气轮机等技术仍处在研发过程之中。

此外，报告通过四个案例具体展示了测量与减排技术在甲烷排放研究和甲烷减排过程中的应用与实践。四个案例分别代表了国内外区域甲烷排放综合测量技术应用、燃气企业甲烷减排实践、低浓度煤层气利用技术、油气企业减排综合战略等内容。

基于以上研究，提出了以下政策建议：

1. 重视甲烷测量，全面推动能源行业甲烷排放清查工作的开展。
2. 紧跟国际技术发展趋势，加强适合中国国情的甲烷测量技术研发。
3. 重点支持甲烷减排技术研发与推广。
4. “十四五”时期重点推进煤炭行业和油气行业甲烷减排。

Executive Summary

Methane is the second largest greenhouse gas in the world and a potent short-lived climate pollutant (SLCP). It has become a global consensus that co-control of emissions of carbon dioxide (CO₂) and SLCPs such as methane, is important to achieve the climate goal under the "Paris Agreement". Fossil fuel energy sector (oil& gas and coal industries) is a major methane emission source. Methane emissions mitigation in this sector has drawn wide attention given the actionability in methane recovery and utilization. This report provides an overview of the existing methane emissions measurement and reduction technologies, describes technical options, features and scope of usage, with the aim to promote measurement and technologies application in China.

Most of the existing methane measurement instruments use optical, chemical and acoustical sensor technologies. Depending on measurement target, optical instruments can be either active or passive, and requires different laser sources. Optical instruments offer faster response speed, wider coverage and better accuracy, and are gaining extensive application. Chemical instruments enjoy advantages in concentration measurement precision, and are often used in optical instrument calibration, though they are not well-known for portability. Acoustic instruments are mainly used for leakage detection in the pipeline network but do not have the capability to conduct quantitative measurement of the emissions.

Different instruments are used for different measurement scenarios and purposes. For example, for component and site-level measurements that aim to identify and improve emissions factors, measurements are conducted in a rather small range with stricter requirements for measurement accuracy. Handheld devices or fixed sensors are widely applied for this purpose. Vehicle-based monitoring method can be used for studying emissions from oil and gas facilities or pipelines. Regional (basin-level) methane emissions measurements are mostly used for emission estimation and source analysis. Monitoring tools deployed include mobile workstations, sensor networks, and unmanned aerial vehicles. Satellites and airplanes are often used to measure methane concentration on a large scale. This type of measurement activity is often referred to as "top-down", in comparison with "bottom-up" measurements (such as emissions factor-based estimation at component and facility-levels). The spatial resolution and column density accuracy of satellites are constantly improving, providing technical possibilities for using satellites to carry out quantitative measurements. The

above-mentioned technologies directly measure the methane concentration at the measured point. Translating these data into emission quantity requires mathematical analysis.

Furthermore, the improvement of instrument measurement accuracy also helps enhance the accuracy of cross-checking using ground measurement data. The mathematical method represented by "activity level \times emission factor" is widely used in inventory compilation and scientific research. Monte Carlo method, used for estimating whole-process methane emissions or for characterizing emissions distribution features of certain categories of components, has also received attention in recent years.

In terms of emission reduction technologies, the report conducts respective studies on the oil and gas industry and the coal industry. Technologies for oil and gas industry vary at different stages of the value chain, including but not limited to regular maintenance, replacement with new equipment, and "leak detection and

repair (LDAR)". Regular maintenance is intended to reduce the possibility of leakage, and the use of technologies such as plunger lifts, low-bleed and no-bleed pneumatic valves, and low-bleed seals, and the application of vapor recovery units can reduce methane emissions along the value chain, while LDAR is mainly for reducing methane emissions in unexpected situations.

For coal industry, there are two categories of methane emissions reduction technologies: The first category helps recover methane emissions before and after the mining process. Such technologies apply to the capture of ventilation air methane (VAM) and pre-extraction of methane in coal seams. For abandoned coal mines, vertical wells are often used to recover methane in the gobs before they were completely flooded. For surface coal mines, methane is taken from mine layers before mining starts to reduce emissions. The second category of technologies utilize the recovered coal mine methane based on different concentration levels. At present, large volume recycling of low-concentration VAM poses a major

challenge. The most promising technology is catalytic oxidation device, while VAM gas turbines are also under research and development.

The report also provides four case studies on methane technology application, shedding insights on regional level methane emissions measurement technologies, city gas company's methane management practices, low-concentration coal mine methane utilization technologies, and integrated strategies for oil and gas companies to control methane emissions.

The report puts forward the following policy recommendations:

- Attach importance to methane emissions measurement and to accelerate the comprehensive accounting and inventory of methane emissions
- Keep in line with international technology development and strengthen research and development (R&D) of methane measurement technologies and tailor the technology development to China's situation.

- Provide key support for R&D and application of methane emissions reduction technologies.
- Focus on advancing methane emissions reduction in coal and oil and gas industries during the 14th Five-Year-Plan period.

目录

1	●	一 背景
5	●	二 能源行业甲烷排放测量技术
		2.1 测量原理
		2.2 测量设备与数据处理方法
17	●	三 能源行业甲烷减排技术
		3.1 油气系统甲烷排放减排技术
		3.2 煤炭生产甲烷排放减排技术
18	●	四 案例介绍：测量与减排技术的应用
		案例一：EDF“二叠纪地图”盆地甲烷测量项目—— 油气行业甲烷排放综合测量技术
		案例二：北京燃气集团甲烷减排行动——燃气行业甲烷监 测及减排技术
		案例三：兴边富民甲烷氧化发电项目——低浓度煤炭甲烷 减排技术及应用
		案例四：中国石油天然气集团甲烷减排行动——企业甲烷 减排综合战略
50	●	五 总结与建议

第一章 背景

甲烷是天然气的主要成分，也是重要的化工原料。自工业化时代以来，全球平均地表甲烷浓度已经从 1750 年的 $722 \pm 25 \text{ppb}^1$ 上升到 2017 年的 $1859 \pm 2 \text{ppb}$ ，并且还在不断上升 (World Meteorological Organization, 2019)。目前，甲烷是全球仅次于二氧化碳的第二大温室气体：1970-2010 年间，全球人类活动造成的甲烷排放（以二氧化碳当量计）占到全世界温室气体排放总量的 20%（依 100 年全球升温潜势为 28 计）(IPCC, 2014)，仅次于二氧化碳排放并显著高于其他非二氧化碳温室气体排放。排放到大气中的甲烷经过 9-15 年即可自然分解为其他产物 (Mahdevari, 2019)，因此甲烷是一类重要的短寿命气候污染物 (Short lived climate pollutant)。根据 IPCC 的第五次评估报告 (Myhre et al., 2013) 中的计算结果，甲烷的 20 年全球升温潜势为 84，也即在 20 年的时间尺度内，每排放 1 千克的甲烷，其温室效应和 84 千克的二氧化碳相当，大量减少甲烷排放就意味着直接消除了这些气体在近 20 年内产生的相对强烈的温室效应，对减少全球升

温具有事半功倍的效果。因此，推动甲烷的减排自然成为减缓气候变化的关键措施。

事实上，通过推动甲烷减排来减缓气候变化已经成为科学研究者和政策制定者关注的对象，迅速推动甲烷减排的必要性逐渐凸显。已有的研究指出，采取短寿命气候污染物减排策略可以有效助力气候变化目标的实现。采取在二氧化碳减排措施的同时采取短寿命气候污染物减排措施的混合减排策略可以助力气候变化目标的实现 (Shoemaker, Schrag, Molina & Ramanathan, 2013)。IPCC 决策者报告对减排路径的估计也揭示了类似的结论：若对非二氧化碳气体的排放不加限制，仅仅要求 2055 年全球二氧化碳净零排放，可能不足以在本世纪末满足 1.5°C 温升目标；而采取更迅速的二氧化碳减排并实现 2030 年后净非二氧化碳气体辐射强迫减少才有可能实现《巴黎协定》目标。(IPCC, 2018)。将此类减排措施作为实现气候变化目标的重要手段的观点已经逐渐成为共识 (Rogelj, et al., 2014)。

推动甲烷减排还可以收获包括经济、公共卫生等领域的协同效益。甲烷是一种重要

• 1. ppb: 十亿分之一浓度 (part per billion)

的燃料和工业原料，直接将甲烷排放至大气中不仅会破坏环境，也造成了可观的经济损失。据美国环保协会估算，每年因甲烷排放产生的直接经济损失达到了三百亿美元 (Yang, 2020)。同时，甲烷在全球引起的温室效应造成了粮食减产、山火等一系列灾害，造成的经济、公共卫生等各领域损失难以估量 (IPCC, 2014)。因此，如果能在甲烷排放到大气之前将其收集并有效利用，不仅可获得气候效益，还可获得可观的经济效益。国际能源署估计，在因油气行业活动排放的甲烷中，通过各种技术可以实现全球累计 5695 万吨的甲烷减排，

达到油气行业甲烷总排放量的 72%。其中，3035 万吨的甲烷减排为净零成本减排，也即全球目前约有 38% 的能源行业甲烷排放减排实际成本小于零 (IEA, 2020)。甲烷减排产生的公共卫生、农业等领域的效益同样可观，在全球层面上，甲烷减排可以使臭氧引起的健康损害减少，全球每减排 1 吨甲烷可以产生 790 美元的短期收益或 1775 美元的长期收益 (Sarofim et al., 2015)。综合考虑甲烷减排的其他社会效益，1993-2013 年间因美国实施的各类政策而减排的 1.28 亿吨甲烷具有相当于 2250 亿美元的收益 (Melvin, Sarofim

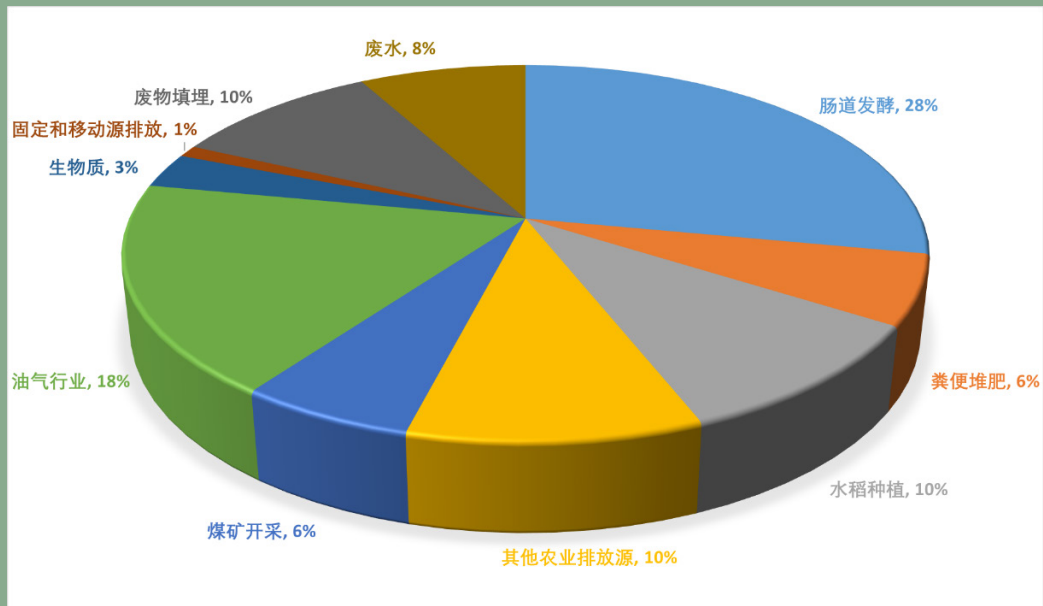


图 1-1 能源活动排放甲烷在由人类活动造成的甲烷排放所占比重

来源: Yusuf, Noor, Abba, Hassan & Din, 2012

& Crimmins, 2016)。综上所述，在当前气候变化严峻形势的挑战下，推动甲烷减排有助于迅速取得减缓气候变化的近期成效，并取得包括经济效益在内的综合社会效益。

在全球因人类活动排放的甲烷中，能源活动排放的甲烷占到重要比例。根据 IPCC《2006 年国家温室气体排放清单编制指南》（以下简称《2006 指南》），能源行业甲烷排放主要包括固体燃料（主要指煤炭）的开采及运输过程，以及油气行业生产、运输、储存和分配过程产生的甲烷排放。这部分甲烷排放在全世界因人类活动造成的甲烷总排放中约占四分之一，如图 1-1 所示。能源行业减排蕴藏着甲烷减排的关键机遇，有望迅速以具有收益的方式实现甲烷减排，因而受到全世界广泛关注。

科学研究的推进使得人们对于能源行业甲烷排放的特点认识更加细致深入。越来越多的研究证实：能源行业甲烷，尤其是油气行业甲烷，其排放在时间和空间上都具有随机性，部分异常工作的设备可能会造成巨量的甲烷泄漏（Balcombe, Anderson, Speirs, Brandon & Hawkes, 2016; Fox, Barchyn, Risk, Ravikumar & Hugenholtz, 2019）。这样的甲烷排放特性也给油气行业传统甲烷减排方式提出了挑战：不同排放源产生的甲烷排放量不同，而针对不同排放源的甲烷减排技术成本也不同，常规的甲烷减排措施可能遗漏少数关键的甲烷排放源，同时低估的甲烷排放量会导致对甲烷减排经济性的评估产生偏误从而导致制定和实际情况不匹配甲烷排放的政策、选取不

合理的甲烷减排技术，不能取得很好的甲烷减排效果。煤炭行业产生的甲烷减排主要面临的则是开采和分浓度梯级利用的问题，从煤层中直接抽采高浓度甲烷具有技术难度，而风排瓦斯（Ventilation Air Methane, VAM）中过低的甲烷浓度又给有效利用风排瓦斯带来挑战。为了全面、有效、经济地实现甲烷减排，充分了解甲烷排放特点并开发、使用新的减排技术迫在眉睫。

目前，全球各国和一部分企业已经积极行动起来，制定了能源行业甲烷减排的策略，开展了能源行业甲烷减排的实践，并取得了一定的效果。这些减排实践建立在以下基础之上：一是强化对甲烷排放的测量，二是加强甲烷测量与减排技术的研发与推广。以国际能源署（IEA）绘制的油气行业减排量 - 技术经济性曲线为例（如图 1-2 所示），这一曲线综合展示了不同排放源的甲烷排放量以及采取某种减排技术的实际收益，为减排战略制定者提供了丰富的信息参考，而减排技术经济性曲线的绘制基础是详实的甲烷排放数据和对各种技术特点的充分评估，详细的甲烷排放数据的获得与细致的测量和分析密不可分。其他有效的甲烷减排行动中，对甲烷排放的测量与估计并使用先进的甲烷减排技术也扮演着重要的角色。

中国的甲烷减排工作起步较晚，但中国的有关部门正在逐渐增强对这项工作的重视。目前，中国正在制定国家减排战略，逐渐完善温室气体排放国家监管体系，为更为详尽具体的甲烷减排行动建立支撑。中国在战略层面越发

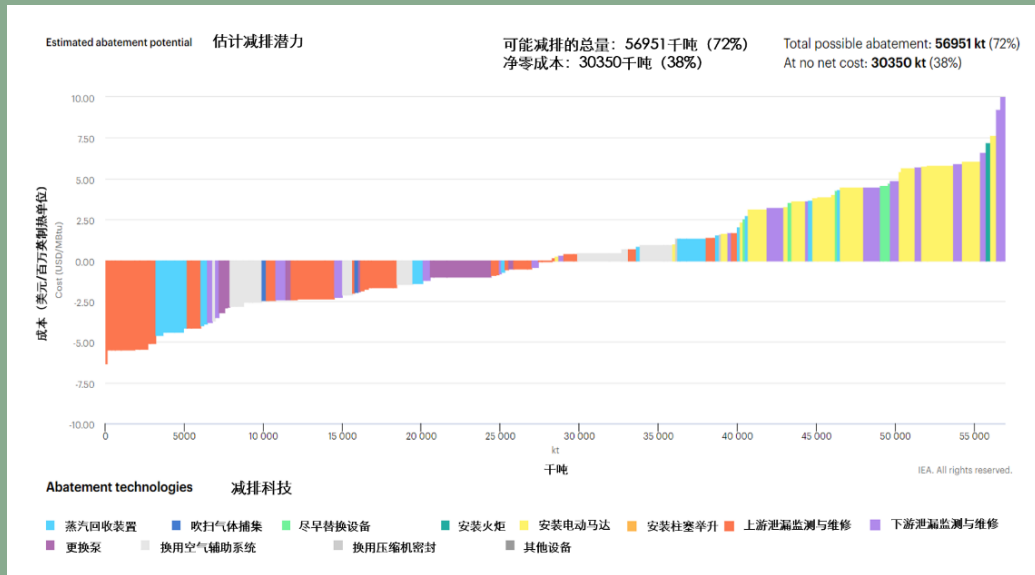


图 1-2 甲烷减排的技术经济性曲线

来源: IEA, 2020.

重视能源行业甲烷减排工作的布局。中国政府编制了《煤层气开发利用“十二五”规划》，提出了鼓励提高煤矿瓦斯利用和地面煤层气开发、减少煤炭开采领域的甲烷排放的总体规划，

同时通过财政政策加快煤层气的开发利用。《“十三五”控制温室气体排放工作方案》明确提出加强放空天然气和油田伴生气的回收利用(中华人民共和国, 2018)。统计与核算方面，

表 1-1 中国甲烷排放情况 (单位: 亿吨二氧化碳当量)

	1994	2005	2010	2012	2014
能源	1.97	4.97	5.64	5.79	5.2
工业	NE	NE	0	0	0
农业	3.61	4.31	4.71	4.81	4.67
废弃物	1.62	0.81	0.92	1.14	1.38
土地	NE	0.37	0.37	0	0.36
总量	7.2	10.09	11.27	11.74	11.25

含 LULUCF 总量	7.2	10.46	11.63	11.74	11.61
占温室气体排放总量比 (%)	17.75	12.59	10.69	9.87	9.1
占含 LULUCF 总量比 (%)	19.73	14.43	12.18	10.37	10.64

注：LULUCF：土地利用变化及森林（Land Use, Land Use Change and Forest）

中国已经初步建立了国家、地方、企业温室气体统计与核算体制（中国国家发展和改革委员会，2014）。

但是，中国甲烷排放的测量和甲烷减排工作仍有进步空间。中国甲烷排放的基础数据仍不完善，能源行业甲烷的逸散排放是中国温室气体国家清单中不确定性最大的部分，使用的排放因子、活动水平数据不能与当前中国的实际情况相符（朱松丽，2019；薛明等，2019）。因此，急需建立甲烷逸散排放检测体系，开展系统的测量活动，以提高甲烷排放测量数据的精度。我国减排技术研发与国际仍有一定差距，在甲烷测量、检测与减排的关键技术领域内，我国并不具备国际话语权，使用的技术尚不具备国际领先性。同时，甲烷减排技术并未在全国有效推广，部分企业在实践中积累总结的减排经验也有待于进一步在全国范围内推广，以推动甲烷的减排工作。因此，基于中国甲烷减排工作开展的现状和未来发展需求，以下两项工作将对进一步推动中国甲烷减

排提供重要支撑：增强对甲烷排放的测量核算并建立甲烷排放基础数据库；总结已有的减排技术和工作经验并向全国推广。

为了支持中国甲烷排放测量核算工作和减排技术推广，学习和总结世界范围内甲烷减排和测量技术，了解和评述其目前的发展现状和未来发展趋势是十分有意义且必要的。因此，本报告试图对世界上主要的甲烷测量和减排技术进行梳理，说明这些技术的特点和适用范围；同时通过总结国内外甲烷测量与减排工作的几个典型案例，进一步介绍甲烷测量和减排工作经验，希望为中国甲烷测量与减排工作的进一步开展提供有益参考。本报告共包括五章，第一章是背景，第二章、第三章分别就甲烷测量技术和数据处理方法以及甲烷减排技术进行整理；第四章选取了四个中外甲烷测量和减排工作开展的典型案例，展示国内外甲烷减排工作的经验；第五章结合前述内容，总结这些经验并提出基于本文的政策建议。



第二章 能源行业甲烷排放测量技术

甲烷是天然气的主要成分，是油气生产的目标产物之一。在油气生产过程中，甲烷排放可以发生在油气钻探、产品处理、运输、分配、使用等所有环节之中，排放源分布广泛，排放量规律复杂。因零件工作固有特性（如由天然气驱动的气动阀门工作时会产生排放）、工作检修流程（检修管道造成的甲烷放空）产生的有组织排放是过去甲烷排放测量与估算的重点。而近几年有研究指出，非正常工况中的意外泄漏造成的甲烷排放可能被严重低估，计入因泄漏产生的甲烷排放后，全美国的甲烷排放量将从全年产量的 1.4% 跃升至 2.3% (Alvarez et al.,2018)，因而甲烷泄漏的估计和减排也日益受到关注。和油气行业分布广泛的甲烷排放源相比，煤炭生产产生的甲烷排放源相对集中。布设在煤矿矿井中的传感器网络主要用于监控甲烷浓度，确保其不超过安全工作所要求的上限 (Muduli, Mislira & Jana et al.,2018)。本章重点关注油气行业甲烷排放的测量技术，首先介绍甲烷测量的几类基本原理，之后对主要的甲烷测量方法和数据处理方法进行概述。

2.1 测量原理

甲烷测量的技术设备十分丰富，从小型传感器到卫星，其测量范围、精度各异。但是总体而言，现在广泛使用的甲烷测量技术设备主要基于以下三种测量原理研制而成：光学原理、化学原理、声学原理。

2.1.1 光学原理

利用光学原理来测量甲烷浓度，可选的具体手段可以分成两类：一种为主动式测量，一种为被动式测量。大气可见度会影响光学手段的灵敏度。主动式测量和被动式测量原理的综合比较见表 2-1。

(一) 主动式测量

主动式测量主要依据 Beer-Lambert 定律开展，其内容可以简单描述如下：甲烷分子可以吸收特定波长的光，透射光强和入射光强存在定量关系 (金光贤, 孟辉, 贾光辉, 2018)，通过测定特定波长入射光强和透射光强，即可分析出测量区域内甲烷的含量 (Lu et al.,2020)。因甲烷的较强的吸收峰位于红外区，利用吸收光谱测定甲烷含量的技术也可称为红外吸收光谱。主动式测量需要自带发射源。窄带吸收光谱通常采用激光器作为发射源，如采用可调谐二极管激光器的直接吸收光谱 (Diode Laser Absorption Spectroscopy,

DAS) 和波长调制光谱 (Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS)、腔衰荡光谱 (Cavity Ring-down Spectroscopy, CRDS)、腔增强吸收光谱 (Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy, CEAS), 以及采用中红外量子级联、带间级联激光器的吸收光谱技术; 宽带吸收光谱通常采用如热光源、等离子体光源的等宽带光源作为发射源, 宽带光谱技术的代表有傅里叶红外光谱、差分吸收光谱、非分散红外光谱。主动式测量多需要反射平面, 否则不能开展测量;

基于开放腔的腔衰荡光谱仪不需要反射平面, 这类仪器将被测气体取样至仪器内进行测量。主动式测量得到的结果一般是被测方向上的气体柱内甲烷平均浓度, 也称柱密度; 对测量进行成像需要借助扫描仪器。主动式测量仪器的测量空间范围跨度范围大, 仪器种类繁多。有测量小空间或所在点甲烷浓度的盒式测量仪器 (戚良矿, 2010), 有可以测量 50 米以内

目标甲烷排放量的手持仪器 (Haugland, 2019), 也有可以搭载于飞机上进行大范围测量的设备。卫星搭载的测量设备也多据主动式原理设计。中国计量科学院团队对光腔衰荡光谱技术进一步开展研究, 实现了对技术测量精准度水平四个数量级的改善。据此, 计量科学院研发了可以替代美国 Picarro 公司设备的光腔衰荡光谱仪 (如图 2-1 示), 测量范围 0-20ppm, 灵敏度 0.3~1 ppb, 测量不确定度 2~5 ppb, 测量速率 1~100 Hz。两者测量



图 2-1 中国计量科学院设计的光腔衰荡光谱仪设备

• 2. ppm 指百万分之一浓度 (part per million), ppb 指十亿分之一浓度 (part per billion)

指标相当，而价格预期会降至 Picarro 公司设备的一半。

（二）被动式测量

被动式测量依据的是 Beer-Lambert 定律或者待测对象的热辐射性质。被动式测量设备不搭载专门的激光器，而是利用自然光或者物体自身的热辐射开展测量，因而不需要反射平面。被动式测量设备多采用阵列式探测器，因而被动式测量多可以直接生成多像素的图像，可以更直观地看出甲烷泄漏点和甲烷泄漏的大致浓度分布，需要定量计算待测甲烷浓度时，这一目标可以结合数学手段反演实现，但是反

演计算过程需要很多数学假设，使得反演总体上为半定量方法。直接依据被测气体热辐射信息进行测量的即为热成像技术。热成像技术的典型代表产品包括美国 FLIR 系统公司生产的 GasFindIR 系列气体成像仪和法国 Bertin 技术公司生产的 Second Sight 系列气体成像仪等。这类设备结构相对简单，维护成本低，但是要求被测气体和背景之间存在相对温度差（Li et al.,2014）。采用自然本底光为辐射源，测量路径上的甲烷吸收强度也是一种测量甲烷浓度的光学方法，但是因为需要良好的自然本底光作为测量参照，这种方法的测量结

表 2-1 光学原理技术的对比

	主动式测量	被动式测量
原理	主要依据 Beer-Lambert 定律开展	Beer-Lambert 定律，热辐射特性等
测量结果	激光光路上的甲烷柱密度，扫描需要借助辅助机构	多采用阵列式探测器，因而可直接生成多像素图像
是否需要发射源	窄带吸收光谱通常采用激光器作为发射源 宽带吸收光谱通常采用如热光源、等离子体光源的等宽带光源作为发射源	以自然光为参照，或者需要被测对象和周围有温度差，不需要自带发射源
是否需要反射平面	大多需要，光腔衰荡不需要	不需要
典型技术	腔衰荡光谱（CRDS）、腔增强吸收光谱（CEAS）、傅里叶红外光谱等	热成像仪等

果会受到温度、风和湿度的明显影响（Fox et al.,2019）。

2.1.2 化学原理和声学原理

利用化学原理进行监测的方法包括：利

用甲烷在火焰中燃烧时产生的特异基团对甲烷进行识别，利用甲烷在紫外线照射下电离产生的正离子对甲烷的存在进行识别，和利用甲烷可以参与的电化学反应识别并测定甲烷含

量等等。依据前两种方法制成的火焰离子检测器 (Flame Ionization Detector, FID) 和光离子检测器 (Photoionization Detector, PID) 目前具有广泛应用; 依据电化学反应对甲烷的检测可以通过燃料电池或生物燃料电池反应实现 (Haugland, 2019; Lawrence, 2006)。依据化学原理制成的仪器设备可以实现便携化, 但是便携化后的仪器测定的物理范围和含量范围均有限, 而在极端低温条件下, 化学方法不能正常使用。需要点火的化学测量设备不能用于封闭空间甲烷浓度的测量。大型的化学分析仪器 (如实验室常用的气体分析仪) 多使用火焰离子检测器, 这些仪器可以用于对采样得到的样本气体进行组分的精确测定, 据此对甲烷传感器进行标定; 但是由于其体积巨大, 目前还不便于实验室外使用。可以实现便携化的有机气体检测器的检测速度和光学检测相比不具备优势。

通过分析甲烷泄漏时产生的声音信号, 获取甲烷泄漏点和泄漏量信息的方法即为声学方法。直接分析靠管道介质传递的声音信号来推测管道泄漏点是声学方法中较为基础的一种。通过在管道外布设声音传感器, 捕获泄漏点在管道外产生的声音信号, 也可以实现对管道泄漏点的分析, 这种方法可用于探测埋设于地下的管道的泄漏点。长距离油气管道泄漏可以利用超声波在管道中形成的特殊波形进行探测, 水下管道泄漏可以利用声呐进行探测 (Lu et al., 2020)。声学方法可用于探知甲烷泄漏点的位置, 但是利用声学方法开展测量需要依靠

管网系统, 测量距离十分有限; 而且仅能实现对管道泄漏点位置的探测, 难以得到甲烷泄漏量的数值。同时, 声学方法提出了对信号处理能力的较高要求, 容易受到管网噪声的干扰。

2.1.3 其他原理

还有其他原理可以用于甲烷泄漏的检测和定量。利用管道上下游甲烷流量差来估计管道的甲烷泄漏量也是一种常见的技术选项。这种检测甲烷泄漏的方法依托于对甲烷流量的精确测量, 使用的测量设备是各式气体流量计, 基于不同的设计原理, 流量计的测量范围和精度都不同, 可以根据实际要求选取。在实际应用中, 流量计的准确性会直接影响利用这一方法对甲烷泄漏量的估计结果。用肥皂泡也可以对管道进行检漏, 该方法不需要复杂的机械设备即可实现, 但是大面积使用该方法需要高昂的人力成本; 同时肥皂泡检验必须紧邻泄漏点操作, 容易威胁操作人员的人身安全 (Haugland, 2019)。

2.2 测量设备与数据处理方法

实际的测量过程按照其目的, 可以分为侧重点不同的两类。一类侧重于确定被监测的范围内是否存在甲烷, 也称检测; 另一类要求明确给出被监测范围内甲烷的含量值, 也称量化。有时也据此将测量设备分为检测 (定性) 技术和量化 (定量) 技术。两者有区别而又有联系。量化技术可以给出明确的甲烷浓度值, 测量结果本身即可作为甲烷存在与否的判据, 也就是

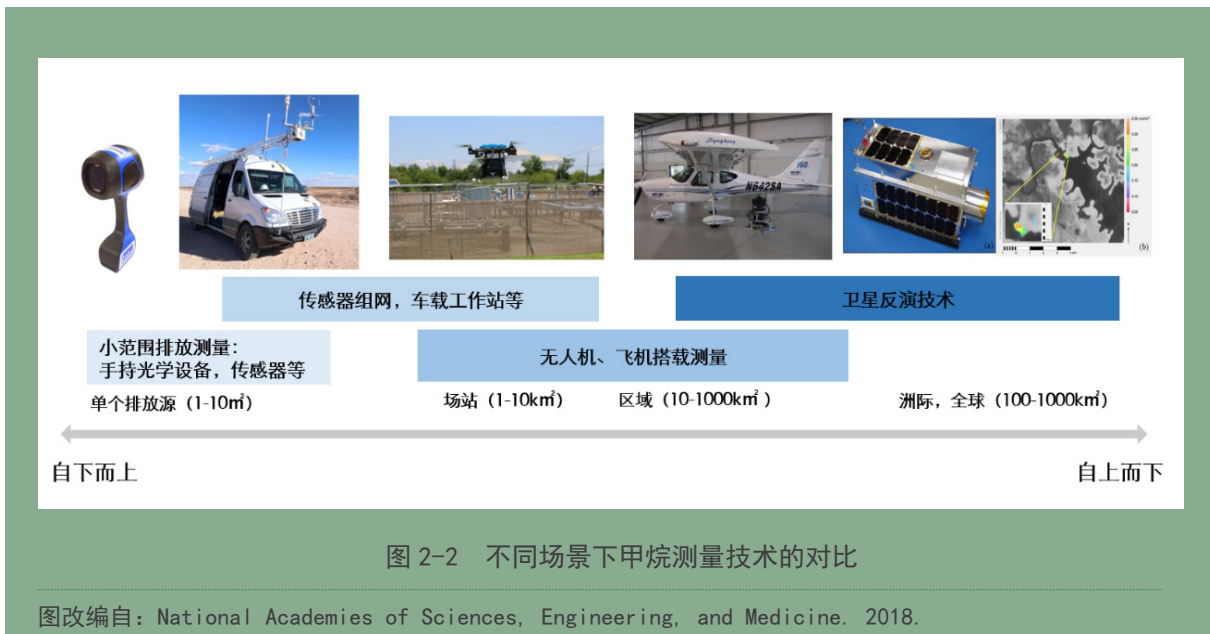
说，量化技术本身可以用于甲烷检测。灵敏的量化技术更是扩大了检测范围，在需要低甲烷浓度的安全工作场合，灵敏的传感器作为报警器的核心部件使用十分广泛。检测技术虽不能给出甲烷的具体含量，却可以给出甲烷相对浓度的大小，在寻找大范围内的甲烷泄漏点并精确测量甲烷泄漏速率时，先以检测手段确定甲烷泄漏的大致方位之后精确测定小范围内甲烷浓度，可以降低工作量。

随着测量技术的发展，“检测”和“定量”的差异可以通过技术的测量范围、测量空间精度、测量浓度精度等指标的差异具体展现。实际应用中则根据测量目标的侧重选取合适的测量设备，制定合适的测量手段，采用匹配的数据处理方法。基于此，本文按照技术测量范围对甲烷测量设备进行简单分类，在每一类别中分别简述不同技术设备的空间精度、浓度精度

等特点。而数据处理作为处理测量所得原始数据，并估计甲烷排放量的重要环节，其方法将在本节末尾加以简述。

2.2.1 甲烷测量设备

按照测量对象和范围对测量设备进行分类，可以主要分成三类。第一类是对组件、设施的甲烷泄漏进行筛查与测量，此类测量活动的范围较小，对精度要求高。第二类是针对一个地区，如具有多个井口的油气生产盆地的甲烷排放进行测量，此类测量活动常用于初步筛选区域内的甲烷排放源，随着测量精度的逐步提升，初步筛选过程可以更快更准确的定位排放源位置，并且对排放量的估计也越来越准确。最后一类测量则针对一个省、一个州甚至洲际范围内的甲烷含量开展测量。在具体的甲烷泄漏测量工作中，三种测量手段通常会相互补充，



测量结果也会相互对照，以实现甲烷排放的更准确的估计。

(一) 第一类：组件、井场、设施的甲烷泄漏测量

针对组件和设施的泄漏点定位及泄漏量测量活动，涉及的空间范围虽然小，但是对测量的空间精度、浓度精度要求都很高。因此，此类测量多采用手持设备或者小范围布设的固定传感器开展，快速而精确的测量有助于迅速定位可能发生泄漏的组件，测量得到的数据用于估计甲烷泄漏量，也可作为清单编制排放因子计算的重要参考。

较为传统的针对组件和设施甲烷排放的测量方式中，美国环境保护署 (USEPA) 开发的 method21 测量方法较为典型。其基本原理是利用高度灵敏的气体成分测量仪，通过对待测管路进行扫描式的检测，可以发现其泄漏点；在此基础上利用数学模型可以估计其泄漏量 (USEPA, 1993)。

手持设备基于光学原理、化学原理或者声学原理开展测量。基于化学原理的设备需要不断对气体进行采样，测量速度较慢 (Haugland, 2019)。基于光学原理的激光测量设备测量范围相对更广，使用方便，便携性不断提高，目前使用较为广泛。例如，德国竖威 (Sewerin) 公司研制的 RMLD-CS 多用途激光甲烷遥测仪、武汉安耐捷与美国 YJ 公司等单位合作开发的 YJ-LZ-01 激光甲烷遥测仪等均已经实现轻量化，方便手持；设备配有光学瞄准装置，可以对 120 米左右的目标进行测量；整合了数

据记录功能、远距离甲烷泄漏监测 (Remote Methane Leak Detector, RMLD) 设备甚至整合了 GPS 定位功能和摄像功能。手持设备赋予了测量活动较高的灵活性，但是需要人工运行，因此需要付出较高的人工成本；同时手持设备的成本还可以进一步降低。

固定传感器普遍基于光学原理，但是基于化学原理的固定传感器近几年也取得了一定发展。固定传感器可以取代人工，布置在一些存在危险性较高的场所，对固定范围内的甲烷泄漏进行实时测量和监控，特别适合布置在具有高组件密度的区域。合理布置的固定传感器网络是实现高质量泄漏检测与修复的重要方法，而现在这一方案面临的较大推广障碍是总成本过高，需要通过扩大传感器的检测范围或者降低传感器成本来降低这一方案的总成本。ARPA-E 监测计划资助了数个研发项目，试图将传感器布网成本降到每个传感器 300 美元，测量精度达到 1ppmv (Fox et al., 2019)。

埋设于地下的输气管路是一类特别的待测设备，也是一类需要管理的重要排放源。有研究案例指出，有机材料制成的中压输气管路产生的甲烷泄漏中，因事故泄漏产生的排放占到全部泄漏的 99% 之巨 (Virmaux, 2018)。对地下埋设管道的泄漏检测有以下几种方法。一是通过管道上下游油气流量的差值进行监测，当流量差出现反常波动时，提示管道出现泄漏。利用流量差也可以估计泄漏量大小，这种估计方法存在因气体被盗或流量计测量不准等原因导致准确度降低甚至丧失的可能性，但

仍可作为监测泄漏量的重要参考。移动地面监测车等也可以作为检测地下管道泄漏点和测量泄漏量的方法，通过经验公式可以建立地面检测到的甲烷浓度最大值和甲烷泄漏速率的关系 (von Fischer et al., 2017)。经管道火炬燃烧的气体总量可以通过安装在管路上的气体流量计进行直接测量。

(二) 第二类：区域甲烷排放测量

此类测量采用的技术主要有：固定传感器组网分析技术、移动工作站技术、小型无人机技术。第二类测量活动难以做到在线检测，大多为异地检测，受到测量位置和测量手段的限制，测量数据多用于排放量估计和排放源分析。

固定传感器组网分析是指在待测区域内布设若干传感器，通过对多个传感器数据的综合分析，得出待测区域内甲烷排放源和排放量。这一技术需要对待测区域内传感器布网方案进行设计，并建立数学模型开展数据分析，分析所需数据除了传感器测量得到的数据之外，还需要包括风速、温度、大气稳定度等会对测量结果和模型建立产生影响的数据。因此，这一技术不仅要求传感器符合一定要求，建立合适的数学模型并选取合适的反演算法更为关键。校正数学模型需要模型估计值与确定排放源之后的小范围测量结果对照验证。目前，中国计量科学院王池团队在郑州依照这种技术建立了城市区域的甲烷排放检测网络，初步实现了对城市甲烷排放的实时监测。煤矿井下的甲烷测量也往往采用布设传感器网络的方法 (Muduli, Mislira & Jana, 2018)。

移动工作站是将测量设备固定于汽车、电动车等运载工具，通过运载工具的移动扩大甲烷测量设备的实际测量范围，之后运用数据处理技术对所测量数据进行分析，基于对排放源地点的假设推断排放量，或基于对排放量的假设推断排放源的方法。实际应用中，既可以将车辆改装成专门用于甲烷泄漏检测的检测车；也可以将仪器安装在其他不专门用于甲烷检测的车辆（如出租车）上，通过车辆走测获取更大范围的甲烷浓度的空间分布信息 (Fox et al., 2019)，此类信息有助于甲烷泄漏源头的分析。

小型无人机技术类似移动工作站，将测量设备搭载于无人机上，即可以通过无人机实现对一定范围内甲烷含量的检测。无人机和移动工作站相比，不受路况条件的约束，可以在三维空间内实现甲烷含量的测量，因而有望获得更丰富的甲烷在空间中的浓度分布信息，供后续分析泄漏速率使用 (Fox et al., 2019)。但是同时，无人机的载重和续航时间有限，很多精密但是沉重的仪器不能通过无人机搭载；同时无人机的航行受到天气条件的限制。这些限制成为无人机技术的发展障碍。目前，无人机技术可通过搭载高分辨率激光成像仪，对一个区域内的甲烷含量进行测量，测量误差较大。

(三) 第三类：更大范围的甲烷测量

针对更大范围的甲烷测量，常采用的技术有：有人驾驶的飞机搭载测量设备、甲烷监测卫星。这两种技术测量范围更大，但是测量精

度更低。大范围测量常用于甲烷排放的监测。

有人驾驶的飞机可以搭载气体采样检测设备或者光学成像设备，快速大范围地测量甲烷含量。气体采样设备可以检测飞机飞过区域内的甲烷含量，光学成像设备则可以对地面附近的甲烷含量进行远距离测量。相比于无人机和移动工作站，用飞机搭载测量设备的测量速度更快（因为飞机飞行更快）、检测范围更大；而和卫星相比，飞机的检测精度高。但是，飞机养护的高成本使得这种测量方式成本高昂，同时禁飞区、最低飞行高度等限制条件也使得此技术的可测范围受到限制。云层、地面反射性质、飞机飞行速度也都会影响光学成像实际的测量精度（Fox et al., 2019）。

利用甲烷监测卫星是一种典型的“自上而下”估算甲烷排放的方法，卫星测量所得数据配合数学模型可以对地面甲烷排放量进行估算。目前，有德国、荷兰、比利时联合研制的 SCIAMACHY 卫星，由日本研制的 GOSAT 卫星，由欧洲研制的 TROPOMI（对流层检测仪）、GHGSat 卫星等先后在轨工作，还有 MERLIN、COOL、MethaneSAT 等卫星或监测计划正在研发进程之中。以上卫星搭载的设备包括扫描成像式吸收光谱仪、碳观测用热红外与近红外传感器 - 傅里叶变换光谱仪、推扫式成像光谱仪、法布里 - 珀罗成像光谱仪、成像光栅光谱仪等（岳桢干，2020a,2020b,2020c），基本依据短波红外线反射技术（SWIR），其中 MERLIN 卫星利用自带激光器产生红外信号，其他则采用太阳

光作为自然本底信号（Jacob et al., 2016）。Jacob 等总结了这些技术的基本参数，列于表 2-2 之中。总体上，卫星测量的空间分辨率和柱浓度精度不断提升，部分卫星测量精度已经可以和地面开展的测量达到同一水平（Pandey et al., 2019）EDF 计划于 2022 年发射升空的 MethaneSAT 可以达到在 1km*1km 范围内 1.8ppb 的测量水平，这意味着原本计划用于监测甲烷排放的卫星已经可以用于高精度的甲烷浓度定量。卫星可以长时间对大范围内甲烷排放进行持久监测，但是卫星不能区分甲烷排放的具体来源，同时测量会受到云层和地面辐射性质的影响。总而言之，随着测量和数据分析技术的发展，采用卫星对甲烷进行监测仍存在发展潜力。

2.2.2 数据分析方法

测量设备测得的区域甲烷浓度并不能直接反推出排放源位置和排放率等信息。例如，利用小型飞机搭载的甲烷测量仪测得的只是飞行路线上的甲烷浓度信息，从这些信息还不能直接获知一个平面区域内排放源排放速率的大小；测得单个气动阀门的排放量也不能据此直接求出一个油气生产场站中因气动阀门造成的甲烷排放总量，由单个阀门排放量估计场站中因阀门造成的甲烷排放总量的过程有赖于一系列假设与。要从第一手的测量数据中反推出更丰富的甲烷排放信息，需要数据分析方法的帮助。

现有的数据分析方法主要包括两种：模型

表 2-2 几种卫星的测量参数

设备	设计单位	数据跨度	光谱跨度 (nm)	像素尺寸 (平方千米)	全球扫描用时	精确度
SCIAMACHY	ESA	2003-2012	1630-1670 (1.4)	30×60	6 天	1.5%
GOSATi	JAXA	2009-	1630-1700 (0.06)	10×10	3 天	0.7%
TROPOMI	ESA,NSO	2017-	2310-2390 (0.25)	7×7	1 天	0.6%
GHGSat	GHGSat, Inc.	2016-	1600-1700 (0.1)	0.05×0.05		1-5%
GOSAT-2	JAXA	2018-	1630-1700,2330-2380 (0.06)	10×10	3 天	0.4%
CarbonSat	ESA	计划中	1590-1680 (0.3)	2×2	5-10 天	0.4%
IMG	MITI	1996-1997	7100-8300 (0.7)	8×8	沿程	4%
AIRS	NASA	2002-	6200-8200 (7)	45×45	0.5 天	1.5%
TES	NASA	2004-2011	7580-8850 (0.8)	5×8	沿程	1.0%
IASI	EUMETSAT	2007-	7100-8300 (1.5)	12×12	0.5 天	1.2%
CrIS	NOAA	2011-	7300-8000 (1.6)	14×14	0.5 天	1.5%
MERLIN	DLR/CNES	2020-	1645.552/1645.846	pencil	沿程	1-2%
GEO-CAPEp	NASA	计划中	2300nm 波段	4×4	(洲域) 1 小时	1.0%
GeoFTS	NASA	计划中	1650nm 和 2300nm 波段	3×3	(洲域) 2 小时	<0.2%
geoCARB	NASA	计划中	2300nm 波段	4×5	(洲域) 2-8 小时	1.0%
G3E	ESA	计划中	1650nm 和 2300nm 波段	2×3	(洲域) 2 小时	0.5%

单位说明: ESA 欧洲航天局 (European Space Agency); JAXA 日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency); NSO 荷兰航天局 (Netherlands Space Office); MITI 日本通产省 (Japan Ministry of International Trade and Industry); NASA 美国国家航空航天局 (US National Aeronautics and Space Administration); EUMETSAT 欧洲气象卫星应用组织 (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites); DLR 德国宇航中心 (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, German Aerospace Center); CNES 法国国家空间研究中心 (French National Center for Space Studies). GHGSat, Inc. 加拿大私人企业。

来源: Jacob, et al., 2016.

方法和蒙特卡洛方法。

（一）模型方法

模型方法是指通过建立数学模型，综合测量所得的原始数据，推算甲烷排放源分布和甲烷排放量的方法。显然，实际测量过程中不可能通过对某个国家内的油气生产设施开展组件级的实时监测（这未必不可能，但是会付出难以承受的经济成本，因而实现可能性极低）来获取油气生产设施的甲烷排放总量数据。数学模型被用来对典型排放情况开展测量与分析，并在此基础上合理地推算总体排放情况。为了更精确地对甲烷排放情况进行估计，研究者不断结合物理过程开发新的数学模型，拓展模型的使用范围。现在，数学模型在甲烷排放测量中应用非常广泛。

最简单的一类数学模型是在温室气体清单编制中使用的“排放量 = 排放因子 × 活动水平”模型，此类方法又称为排放因子法。此类模型建立在全部排放源广义排放率（单位设备的排放量，也就是排放因子）一致的前提之上，通过选取典型设备测量其排放因子，乘以活动水平，即得到排放总量。但是，这一模型对实际排放情况做出了过多的简化，大部分影响实际排放的因素都被包含在排放因子之中，排放因子选取和活动水平测量成为影响甲烷排放量估计值准确性的重要因素。一旦排放因子选取不当或者活动水平测量失准，利用这一模型推算出的排放总量就不能反映真实情况（朱松丽，2019；薛明等，2019）。为了解决这一问题，一个思路是按照甲烷排放发生的物理过程对

“排放量 = 排放因子 × 活动水平”模型进行修正。例如，中国发改委发布的《中国石油天然气生产企业温室气体排放核算方法与报告指南（试行）》中，给出了不同排放源甲烷排放因子更精细的算法。对油气储运业务的甲烷逃逸排放，排放因子可以通过公式 $\sum (Num_j \times EF_j)$ 来计算， Num_j 为天然气输送过程中产生逃逸排放的设施 j （包括天然气输送环节中的压气站/增压站、计量站/分输站、管线逆止阀等）的数量， EF_j 为每个设施 j 的甲烷逃逸排放因子（中国国家发展和改革委员会，2014）。这一修正即是将储运过程每个排放环节的排放因子单独计算，以实现储运过程甲烷排放更精细的估计。

更为复杂的模型更细致地模拟了甲烷排放和扩散的物理过程。在美国环保协会（EDF）开展的二叠纪盆地甲烷排放地图项目中，研究人员结合大气传输模型（WRF-CHEM）和油气井开采设施分布情况相结合，模拟了一个被测区域内部甲烷分布的可能情况，并和实测分布数据相对照，检验设施排放率估计的准确性。根据物理过程开展的数学建模在估计煤矿蕴藏的甲烷总量的过程中也有很好的应用（Sander & Connell, 2012）。

数学模型有繁有简，因而由数学模型计算出的估计值不确定度也有高有低。考虑哪些因素设计怎样的数学模型，需要参考数据来源、运作成本等诸多因素确定。总体而言，模型法的精确程度取决于模型的特点，也受到初始数据的影响。

(二) 蒙特卡洛方法

蒙特卡洛方法 (Monte-Carlo Method, 简称 MC 方法) 是基于统计学原理对目标量分布进行估算的方法。例如, 若已知一个油气生产环节中完井、井底排液、检修排空等环节的甲烷排放分布及这些设施的数量, 蒙特卡洛方法便可以用于估算上述环节产生的甲烷总排放量。与模型法不同, 蒙特卡洛方法不需要考虑

建立模型过程中的现实因素 (如风向的影响、气体的流体力学性质等), 只要有一个数据集, MC 方法就可以利用这些数据进行估计。但是, MC 方法也因此较为依赖原始数据的可信度, 同时 MC 方法很难直接揭示现象背后的物理规律, 基于物理规律解释数据呈现的特点的工作需要另行展开。MC 方法现逐渐成为分析某一较长流程中甲烷排放总量及不确定度的有力工具。

表 2-3 数据处理方法之间的比较

	模型方法	蒙特卡洛方法
原理	通过建立数学模型, 综合测量所得的原始数据, 推算甲烷排放源分布和甲烷排放量的方法	基于统计学原理对目标量分布进行估算的方法。
分类	<ul style="list-style-type: none"> • 简单模型: “排放量 = 排放因子 × 活动水平” • 改进模型: “$\sum (Num_j \times EF_j)$” • 复杂模型: 大气传输模型等 	<ul style="list-style-type: none"> • 估计全产业链排放 • 利用组件数据估计场站排放
特点	结合物理过程建立, 反映出过程的物理特性	利用组件数据估计场站排放
应用	目前普遍应用的方法	利用典型排放源特性估计生产全流程甲烷排放



第三章 能源行业甲烷减排技术

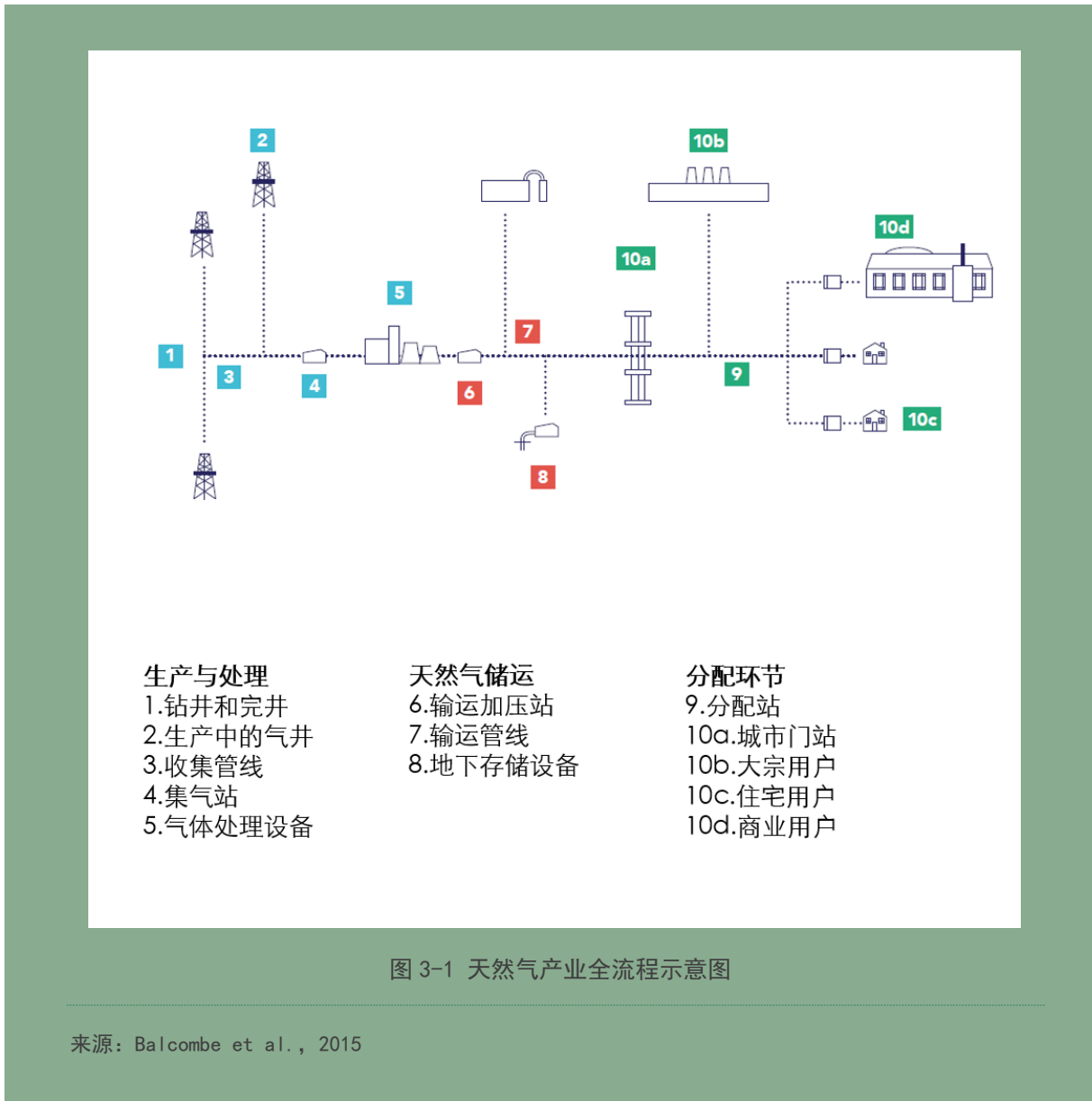
定期检修、更换老化设备或换用排放量更低的新技术设备是油气行业甲烷减排的重要措施，降低甲烷泄漏的重要手段则是加强泄漏检测与修复（Leakage detection and repair, LDAR）。煤炭行业甲烷减排则面临煤层气（包含瓦斯气）开采和根据甲烷浓度对煤层气开展分级利用两个挑战。若不对煤层甲烷进行预先收集，这些甲烷会大量涌入工作区，给矿井通风系统造成较大压力，带来煤矿生产安全隐患；同时，从煤层逸出的高浓度的甲烷经过通风系统的稀释变成目前难以利用的风排瓦斯，造成资源的浪费。而蕴藏于煤层中的甲烷含量受包括地层特性、煤质特点等在内的一系列复杂因素的影响，这些因素在影响煤炭甲烷总量的同时，也会影响煤炭甲烷的开采手段。换言之，不同矿区的特点决定了可选的煤层甲烷开采技术，而开采出的甲烷浓度影响了甲烷利用技术的选择。基于油气行业和煤炭行业甲烷减排技术特点的不同，本文将分别介绍和阐述油气行业和煤炭行业的甲烷减排技术。

3.1 油气系统甲烷排放减排技术

油气系统造成的甲烷排放并不是沿着生产流程均匀分布的，部分环节对甲烷总排放量有

着巨大贡献。Balcombe 等指出，在天然气生产链中，完井、井底排液、气动设备、压缩机是几个重要的排放源，其中少数的设备产生了巨量的甲烷排放，这部分设备称为“超级排放源”（Balcombe, et al., 2015）。有研究表明，在美国得克萨斯州沃斯堡盆地的巴涅特页岩带（Barnett shale）地区，超级排放源产生了约 75% 的当地天然气生产排放量（Zavala-Araiza et al., 2015）。Daniel Zavala-Araiza 等人关于超级排放源的研究进一步说明，超级排放源的产生不仅仅与组件有关，还和生产过程中非正常（事故）状态有关。储存箱控制系统失效、分离器泵阀堵塞、分离器压力过高等事故状态在高排放组件的基础上进一步加剧了甲烷排放，催生了“超级排放源”（Zavala-Araiza et al., 2017）。

有组织排放的减排以技术改进为主，包括定期检修、更换新一代排放量更小的设备等。泄漏检测与维修（LDAR）是降低甲烷泄漏减排的重要手段，现已成为甲烷减排的重要技术之一。不同生产环节产生的有组织排放可采取不同的减排技术，以下按照排放源分别叙述其减排技术手段；而甲烷泄漏发生在油气行业储运配全流程中，故 LDAR 在专门的一节中单独



介绍。

（一）完井

完井环节是油气生产正式开始前的重要环节。管道系统和储层在完井环节中连通，此后开始生产。在非常规油气田中，完井环节还涉及到压裂，而压裂反排液中混杂着水、沙和储

层释放的部分油气物质。传统的做法是将这部分液体直接排入一个储罐，收集其中的沙、水、部分液态碳氢化合物，而气体中的甲烷则直接排空，造成大量的甲烷排放。

采用“低排放完井技术”（Reduced emission completion, REC）或者“绿色完

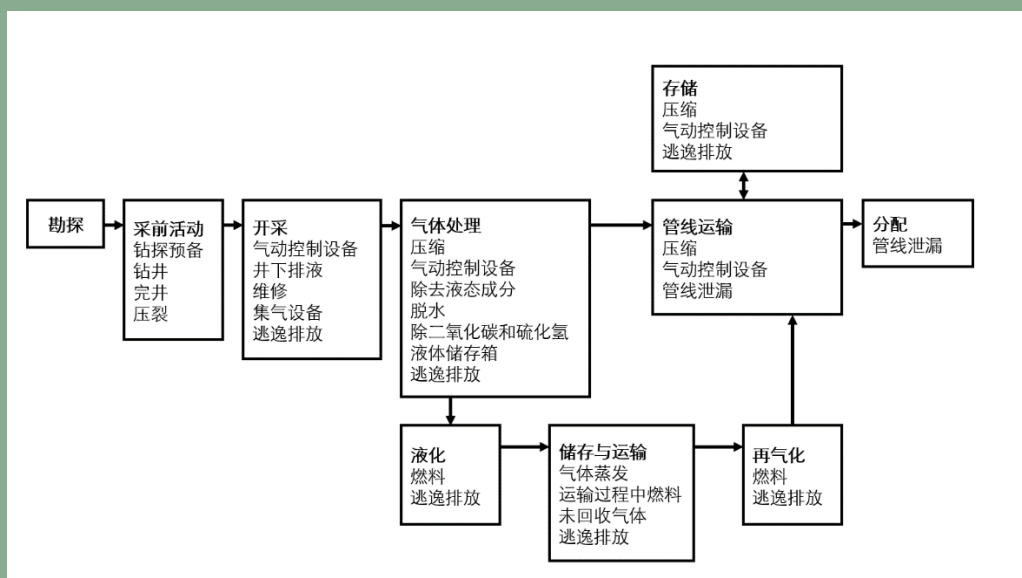


图 3-2 天然气行业全过程中产生甲烷排放的环节

来源: Balcombe et al., 2015

井技术”可以对完井过程中排放的甲烷进行回收利用。图 3-3 是低排放完井技术设备的示意图。通过这项技术，完井过程中排出的甲烷可以被回收利用，产生经济效益。USEPA 主导的天然气之星项目中，项目合作企业在 2000-2009 年间通过 REC 技术减排的甲烷从 566 万立方米增长到 61.7 亿立方米，获得了 15 亿美元的额外收入 (USEPA, 2011)。直接通过火炬燃烧完井过程返排气体中的甲烷也有望大幅降低完井过程的甲烷排放。

(二) 排液

油气井内存在一定量的可凝物质，如地层水和液态烃。以天然气井为例，在最开始的生产过程中，高压、快速排出的天然气可以将液

体带出气井；随着生产过程的进行，天然气压力下降，流出速度下降，液体开始在井下聚集并因为天然气流速下降难以排出而逐渐积累，使得天然气产率进一步下降。为了解决这个问题，通常采取的措施是封闭气井使其增压，加压至一定水平后打开气井，高压气体喷出时会带出井下积累的液体；或者用泵将液体直接抽出井下。这个过程即称为排液，在天然气生产过程中会反复进行，若不对排液环节产生的气体排放加以控制，反复进行的井下排液会导致大量的甲烷排放 (USEPA, 2006)。

为了降低排液环节造成的甲烷排放，安装如图 3-4 示的柱塞举升系统是一个很好的选择。正常工作的柱塞举升系统可以使井下蓄积

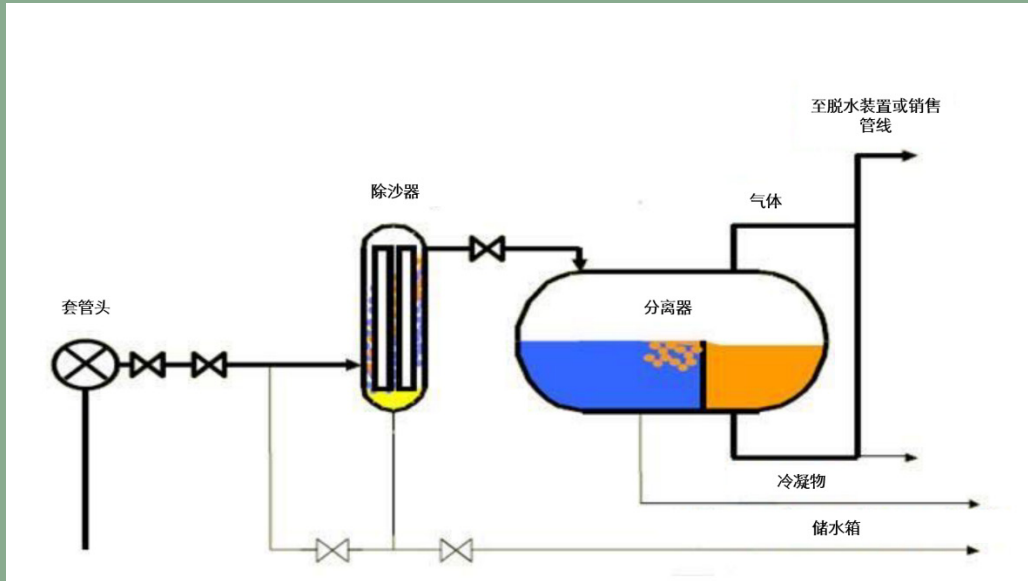


图 3-3 REC 设备示意图

来源: Balcombe et al., 2015

的液体流向分离器，此时排液过程不产生甲烷排放；而在某些情况下柱塞举升系统中的液体会通过旁路流向和大气连通的低压罐，这个过程会产生甲烷排放。因此，柱塞举升系统实际上并不能完全消除单次井下排液过程的甲烷排放。考虑柱塞举升系统的出发特点，其甲烷减排效果需要进一步审视。有研究针对柱塞举升技术能实现的减排效果进行了估计，结果表明，安装了柱塞举升系统实现了单次排液过程甲烷排放量的明显下降。同时，实际总排放量不仅与单次排放量有关，还受到排液操作次数的影响 (Allen et al., 2015)；具有低单次排放量但是每年排放操作次数众多的设备，每年产生的总排放量仍可能是不安装柱塞举升的设备的

数倍之多 (Allen et al., 2015)。换言之，单纯安装柱塞举升系统不一定能够实现排液环节甲烷总排放的下降，对自动触发式排液系统的优化也需要引起关注。Paul 等指出，根据井下压力、井深等特征优化的自动控制柱塞举升系统有望大幅降低本环节排放水平 (Balcombe et al., 2015)。在没有条件安装柱塞举升系统的地点，优化排液周期也是一种降低甲烷排放的可选方案。其他可能的手段包括：加入成泡剂使得井下液体更易成泡排出；安装可以提升气体速度的速度套管等。

(三) 其它设备排放

天然气生产和供应链上的脱水设备、气动控制设备、压缩机等设备在运行过程中会造成

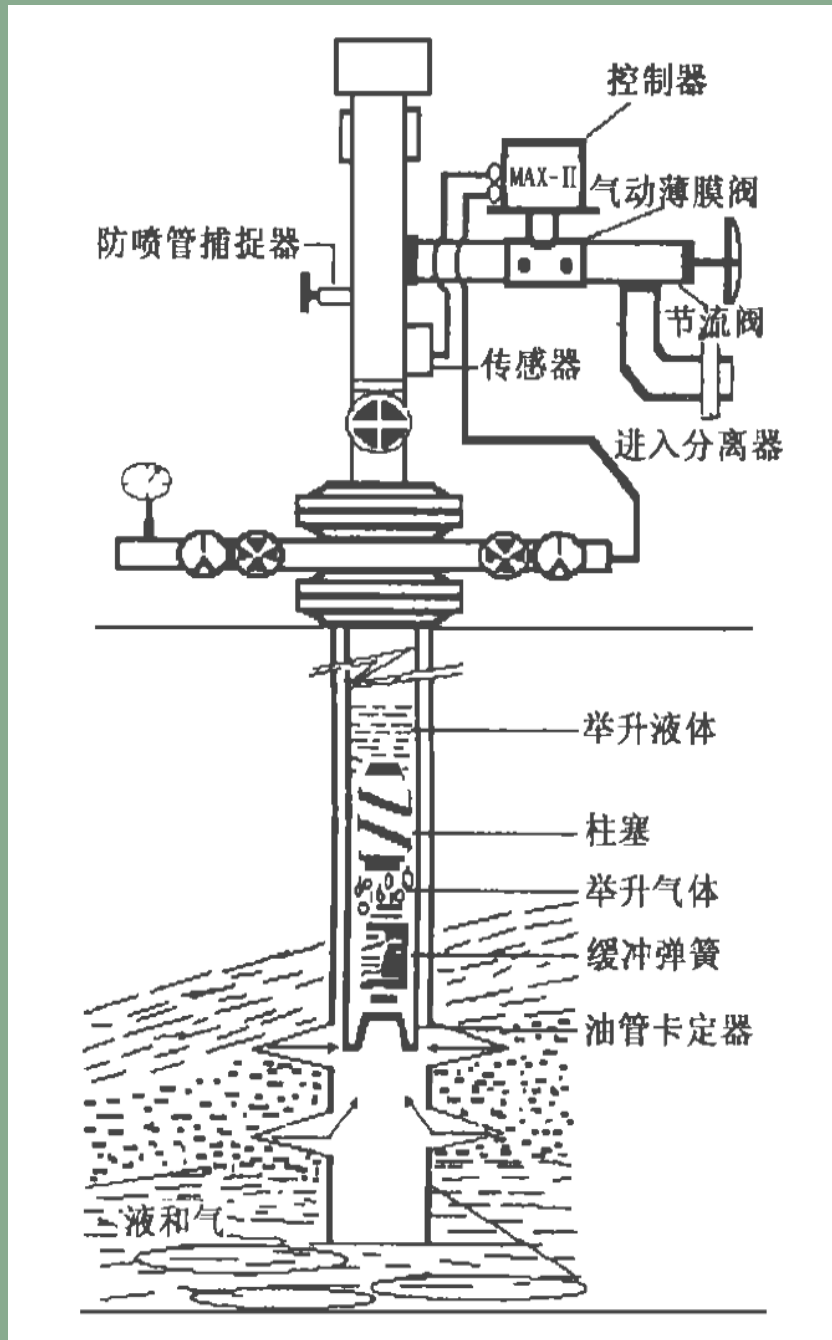


图 3-4 柱塞举升系统

来源：王贤君，盖德林，张琪，2000

一定的甲烷排放。脱水设备的排放源自储罐闪蒸和再生器的排气，气动泵等的甲烷排放来自于气动泵使用的高压甲烷排放，压缩机的排放来自于密封泄漏（密封油导致甲烷溶解并泄漏）以及压缩机内部气体的放空排放。尽管单个设备产生的排放可能不大，但是考虑到储运配全流程中的此类设备数量众多，因此由这些设备带来的甲烷排放量可能非常可观。USEPA 估计，气动设备造成了 2012 年美国天然气供应链 14% 的甲烷排放，压缩机造成了 20% 的排放。针对上述设备排放，减排措施包括以下几类。第一类是换用新设备，例如将由管道高压天然气驱动的气动泵更换为压缩空气驱动的气动泵或者电动泵，将现在在役的普通脱水设备更换为零甲烷排放的脱水设备，将压缩机更换为排放更小的离心式压缩机等。第二类是对旧有设备进行改造调整，如将压缩机中引起甲烷排放的油密封更换为干密封。第三类是引入火炬燃烧器或者闪蒸气回收装备（Vapor Recovery Unit, VRU），将排放的甲烷直接燃烧或者通过 VRU 进行回收。以上技术选项有望实现原水平 90% 的甲烷减排率（Haugland, 2019）。

（四）操作流程排放

对生产线的检修、对储罐的清洗、对设备的更换等操作流程要求对管路、储罐、待更换设备等进行排空，这类排空会将设备内部的甲烷排放到大气中。使用 VRU 对排空气体中的甲烷进行回收或者将排空气体通过火炬燃烧是降低此类甲烷排放的有效手段。储罐气体减排

还可以通过调整操作系统和储罐压力等措施实现（Haugland, 2019）。

（五）泄漏检测与维修（LDAR）

法兰、阀、压缩机密封以及储罐等的失效，火炬的非正常工作均会引起难以发现但是巨量的甲烷泄漏，这类泄漏排放贡献了巨大的甲烷排放量。其中，EPA 的研究指出，阀和连接件造成的泄漏排放占到设备泄漏的 90% 以上，而阀的排在总排放中占据六成（USEPA, 2007）。此类排放的排放源不固定，除定期检修更换损坏设备，加强对管道的防腐层管理等设备保养措施之外，加强对组件泄漏的检测与维修同样是降低此类排放的重要措施。

USEPA 总结了良好 LDAR 实践的五个基本要素：组件识别系统、定义泄漏标准、组件监测、组件修复和记录保存。对以上五个要素的实践指导，USEPA 在其《泄漏监测与维修：最佳实践指南（Leak detection and repair: a best practices guide）》中给出了详尽的说明（USEPA, 2007）。

监测处于 LDAR 过程中相对核心的位置。在 USEPA 《泄漏监测与维修：最佳实践指南》给列出的七个的 LDAR 项目存在的问题中，有关泄漏组件监测的问题占到了五个，说明了监测这一环节十分重要又相对困难。监测的周期、监测的范围等均会影响监测方案的效果，良好的监测方案可以及时发现泄漏点，辅以迅速的维修工作即可将甲烷泄漏降至最低。过去的 LDAR 检测周期更长，主要采取 EPA 制定的 Method21 方法；现阶段，光学成像设备

(OGI) 已经展现出传统 Method21 不具备的易用性、安全性、易存档等优点, 使用范围不断扩大 (Trefiak, 2015)。目前, 很多企业已经采用了 LDAR 加强本企业的减排, 而有关 LDAR 的研究和优化也在不断进行, 以实现更大范围的低成本监测。

(六) 火炬

通过火炬将甲烷燃烧避免其直接排放进入大气, 是降低甲烷排放的常见手段。但是同时, 火炬的不完全燃烧可能造成严重的甲烷排放, 结果让一项意在降低甲烷排放的技术失去原来的效果。近年来, 降低火炬燃烧中的甲烷排放得到越来越多的重视。可采取的措施有提升火

炬的燃烧效率, 以及降低路径上火炬的使用量。道达尔在近年的实践中, 成功将常规火炬燃烧减少了 80% (OGCI, 2018)。

3.2 煤炭生产甲烷排放减排技术

煤炭的生成过程也会产生甲烷, 产生的甲烷储存于煤炭多孔的结构之中。在煤炭开采的过程中, 挖掘工作对煤层产生了直接的破坏, 储存在被直接破碎煤炭中甲烷会被释放到挖掘巷道内。同时, 挖掘通道四壁也都是被破坏的煤炭层, 这些煤炭中储存的甲烷也会释放到巷道内。最后, 由于挖掘改变了地层结构, 地层受力变化会导致挖掘区域上下的地层都出

表 3-1 传统监测技术和可选技术的对比

	传统方法	可选方法
设备	手持检测装置, 检测百万分之一浓度级别的可挥发有机物	光学成像设备, 生成可挥发有机物的可视化图像
天气因素限制	大雨、大风、高湿度环境下不适用	雨、雾、风和极端寒冷条件下不适用
检测浓度范围	500-10000ppm	不能量化
检测空间范围	有拓展探针的条件下可达 3m	有透镜帮助下可达 30m
准确性	仪器本身具有高准确性, 可能产生技术操作错误和定位错误 (探针位置偏移 1cm 即有 57% 的概率错过一个真实的泄漏点)	实际泄漏处可见时具有高准确性 浓度低于 1500ppm 时准确性低
检测效率	每天 250-600 个组件	每天 5000-15000 个组件
检测频率	每月一次或每季度一次或每年一次	每两个月一次或每年一次
成本	高	约低 15-30%

来源: Trefiak, 2015.

现破坏，内部结构发生破坏的地层也会将其中储藏的甲烷释放出来。这部分甲烷可能会通过地层裂缝释放到大气中，或者释放到巷道内。以类似天然气开采形式进行开发的多称为煤层气 (coalbed methane)、煤层气 (coal seam methane)，而如风排瓦斯等多视为煤矿开采副产物的称为煤矿瓦斯 (coalmine methane)。本文以下统称煤炭甲烷。

回收煤炭甲烷的动机可以大致归结为三点：一、甲烷易燃易爆，降低工作作业区甲烷含量对于提升煤矿开采安全性至关重要；二、高浓度甲烷也会影响井下开采工作进度，回收煤矿甲烷一方面可以创造额外收入，另一方面可以确保井下作业时长，提升了煤矿开采效率，提升煤矿经济性；三、甲烷是一种温室气体，回收煤炭甲烷有利于减缓气候变化 (Karacan, Ruiz, Cotè & Phipps, 2011)。

国内外开展了很多针对煤炭甲烷储量及采取利用方式的研究。从总量上看，煤炭甲烷储量受到地层性质、煤炭种类、煤矿深度、采掘方式、产煤效率以及矿后是否淹水等诸多因素影响，很多研究采用建模或者实证分析的方法探究煤炭甲烷储量与上述因素的定量关系，也取得了一定的成果 (Karacan et al., 2011)。采取的煤层气成因复杂，影响因素众多 (Moore, 2012)。影响煤层气后续回收利用的最关键因素是煤层气甲烷含量，优质的高甲烷浓度的煤层气甚至可以直接注入商用天然气管道，而低甲烷浓度的煤层气利用较为复杂，直接排空又会造成巨大的甲烷排放。例如，有研

究指出，风排瓦斯造成的甲烷排放占全球井工煤矿造成的甲烷排放的 64% (Karacan, Ruiz, Cotè & Phipps, 2011)。而影响煤层气甲烷含量的一个重要因素是煤层气开采方式。综上，本文将首先介绍目前经常采用的煤层气开采方式，再对不同甲烷含量的煤层气的分级利用方法加以介绍。

3.2.1 煤层气的开采

通风并回收风排瓦斯是处理煤矿巷道内甲烷最主要的措施。为保证煤矿工作区甲烷浓度低于 1%，每开采一吨煤通常需要在通风系统中通 10 吨空气 (Mahdevvari, 2019)，这也直接导致了风排瓦斯中甲烷的低浓度。为了降低工作区甲烷由于局部高温点火爆燃的危险，通风风速也会被纳入通风系统的设计考虑之中。

除此之外，还可以通过在煤层中布设管路，直接抽吸具有高浓度甲烷的煤层气。此类管路可分为三种类型：水平管网、垂直管网、跨地层管网。

水平管网多以煤矿挖掘过程中的巷道总管为基础，水平向煤层中延伸。水平管网实现的目标主要是抽取未开采区域煤层中的甲烷，以及抽取临近煤层中的煤炭甲烷。利用水平管网抽取煤层中的甲烷可以降低开采过程中巷道内的甲烷浓度。早期的水平管网最初只延伸到工作面前方 25-40 米左右处 (Zheng, Jiang, Xue, Chen & Li, 2019)，现在随着技术的发展，部分煤矿的水平网络可以延伸至 700 余米远 (Karacan, Ruiz, Cotè &

Phipps,2011)。影响水平管网抽取甲烷效果的因素包括管网布置方式、管网工作时间还有煤层性质等一系列因素，其中较为关键的是煤层透气性，Palmer对此有深入的论述(Palmer, 2010)。

跨地层管网和水平管网通常配合使用，水平管网通常只在一个水平煤层中铺展，而跨地层管网会穿过多个岩层钻探至目标煤层，

故此得名。跨地层管网可以用于抽取因应力变化造成的开采区上下地层开裂释放的甲烷，也可以用于抽取未开采煤层中的甲烷。跨地层管网的总管和水平管网可以共用，管路与水平成20-60度。但是跨地层管网使用的地层性质复杂，钻探难度更大。为了保证跨地层管网和水平管网的高效安全生产，套管露出煤层部分的密封技术十分重要。

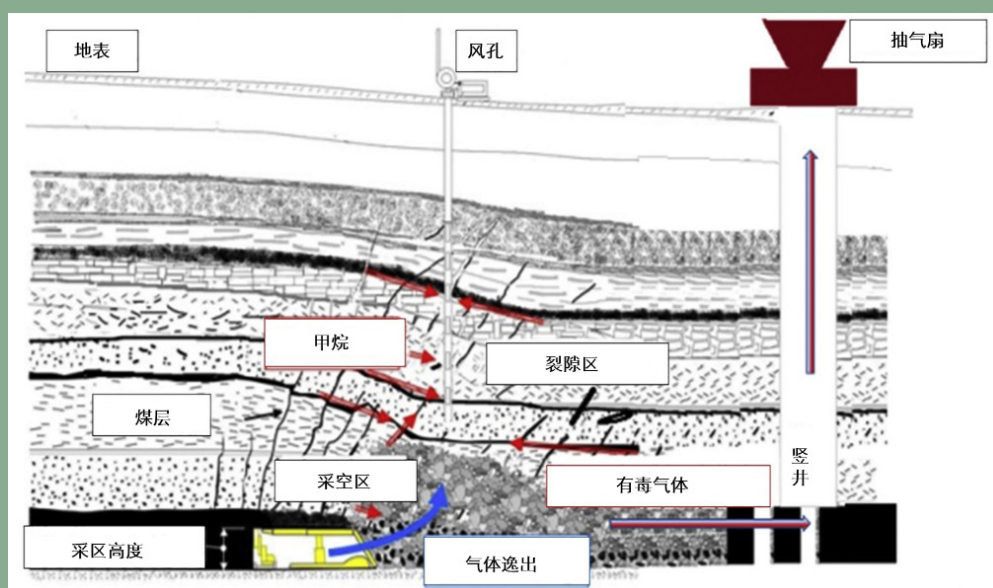


图 3-5 开采对地层的破坏以及几类排气管网布置方式的示意图

来源: Karacan & Warwick, 2019.

严格的讲，垂直管网也是一种跨地层的管网。但是垂直管网的总管通常布设于地面上，其功能和跨地层管网亦有所不同，因此分别介绍。在部分文献中，垂直管网也被称作采空区排气管网，起到辅助通风系统排空采空区甲烷

的作用。几类排气管网的布置方式如图 3-5 示意。

通常情况下，垂直管可以在开采前挖掘完成，此时的垂直管可以预先抽取采区上方地层中的甲烷。随着开采工作的推进，采区上方的

地层发生破碎，同时垂直管路与采空区连通，此时的垂直管网在进一步抽取采区上方地层中的甲烷时，也可以抽取采空区内的部分气体，降低采空区甲烷浓度。合理利用采空区管网也是降低废弃煤矿甲烷排放的重要手段。选择具体的管型、布网方案和压裂方案等开采方案需要综合考量煤层透气性、地层特点等一系列因素。

综合运用以上手段可以实现开采前对煤矿甲烷的预采取，降低开采过程矿内甲烷浓度的同时还可以直接获取高浓度的煤层气。合理布置的预开采工作可以抽取煤矿甲烷总量的 90%，所得气体甲烷浓度均在 90% 以上 (Mahdevari, 2019)。

废弃煤矿和露天煤矿同样会产生煤炭甲烷排放。废弃煤矿产生的甲烷多通过垂直井进行采取。露天煤矿的煤层接近地表，因此不需要在地下开采，而其中所含的煤层甲烷可以通过在地面钻探垂直井网开采得到 (USEPA, n.d.)。

3.2.2 不同甲烷浓度煤层气的分级利用

开采所得的煤层气可能具有迥异的甲烷浓度，而不同甲烷浓度的煤层气必须采用不同的回收利用方法。以下从技术手段出发，介绍煤矿甲烷的分级利用方法。

高浓度的煤层气可以直接注入天然气管道。此时甲烷浓度需要达到 90% 以上，直接抽采自煤层中的煤层气基本可以满足这一标

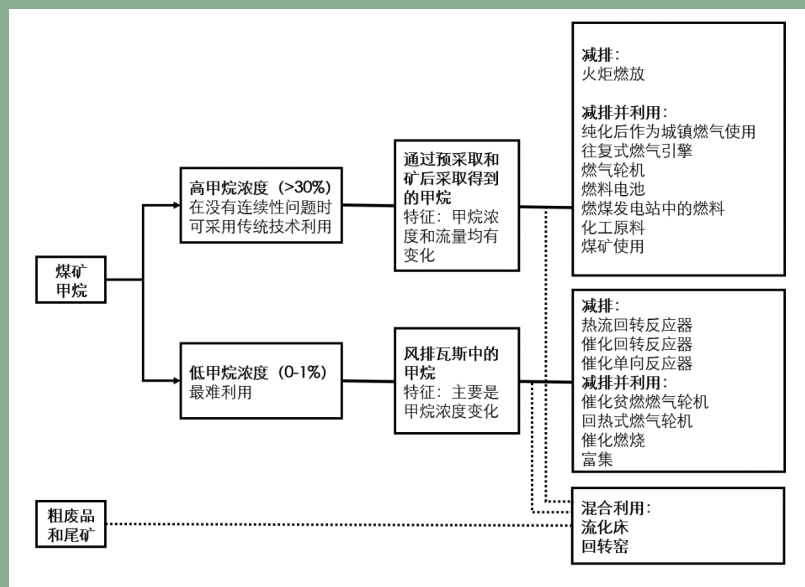


图 3-6 煤层气分级利用示意

来源：Su et al., 2005

准。抽采出的高浓度煤层气若含有杂质，经过一定的处理并满足商用标准之后也可以作为商用天然气出售。需要的处理有：除氮、除氧、除二氧化碳、脱水等。部分文献对除氮过程可用的技术进行了总结（Su, Beath, Guo & Mallett, 2005）。

浓度没有达到 90%，而提升浓度的经济成本过高时，将煤层气用于发电是一个可选项。用于发电的煤层气不需要达到管网天然气

的质量，煤层气热值达到一定水平即可用于发电，同时电能可以直接用于矿上设备运转，节省运营成本。传统的燃气轮机要求甲烷浓度大于 30%，含催化装置的燃气轮机可以利用甲烷浓度在 1% 以上的煤层气进行发电。煤层气也可以作为辅助燃料用于普通热电厂发电，或者经过处理后用于燃料电池发电。煤层气用于发电的一个不足之处是煤层气流量可能不稳定，对发电设备的可调节性提出较高要求。浓度高

表 3-2 不同催化氧化技术之比较

特征	MEGTEC 热流回转反应器	CANMET 催化回转反应器	CSIRO 催化单向反应器
运转特点	存在回转流	存在回转流	单向流
催化剂	无	无	有
自点火温度	1000°C	350-800°C	500°C
周期长度	短	长	连续运转无周期
最低甲烷浓度	0.20%	0.10%	0.40%
回收余热发电的可能性	需要添加燃料，提升甲烷浓度	需要添加燃料，提升甲烷浓度	需要添加燃料，提升甲烷浓度
所需甲烷浓度的变化	可变	可变	可变
设施尺寸	巨大	大	小
操作复杂程度	复杂	复杂	简单
设备生命周期			大于 8000 小时（催化剂寿命）
氮氧化物排放	无	低	低
一氧化碳排放	低	低	低

来源：Su et al. 2015.

于 30% 的煤层气就地用于民用也是一个可行选择。将这部分气体直接用作当地热水锅炉的燃料为居民供热，或者在某些场合直接做燃料燃烧，可以在避免甲烷排放的同时节约燃料用煤，不失为煤层甲烷利用的一个可选技术手段。

在煤矿甲烷中，总量巨大而甲烷含量稀薄的 VAM 占比突出，而同时其中小于 1% 的甲烷浓度难以维持稳定的燃烧，对其中的甲烷进行富集成本又巨大，以上各个因素都导致 VAM 利用较为困难。目前，催化氧化技术是一个具有发展前景的解决方案。催化氧化技术包括热流回转氧化技术、催化热流回转氧化技术、催化单体氧化反应器技术。其中，催化

热流回转技术是在热流回转基础上加装催化剂，因而能降低反应温度；单体氧化技术则不会使反应气流方向在反应器中发生回转，催化氧化反应会在设备中连续进行。由于技术特点不同，三种催化氧化设备可以反应的气体最低甲烷浓度也不同，表 3-2 展示了几项技术的差异。蓄热氧化技术 (Regenerative Thermal Oxidizer, RTO) 也是一种类似的氧化技术，可以使用甲烷浓度大于 1.2% 的煤层气，图 3-7 是蓄热氧化技术的原理示意。以上氧化装置得到的热量可以用于发电。以水为工质时可以直接作为汽轮机的循环热源，以空气为工质时热量通常作为燃气轮机循环的预热热源。发电余

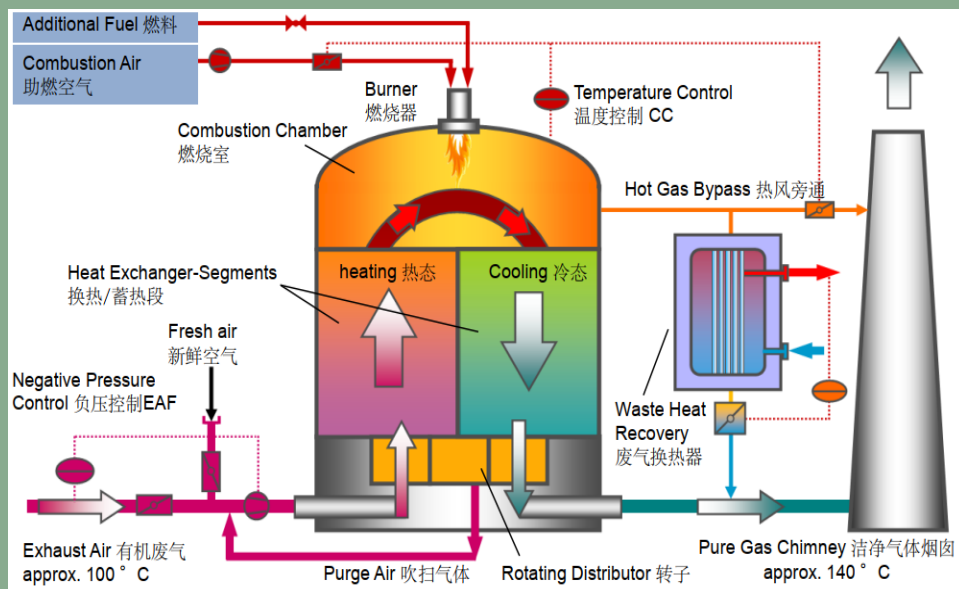


图 3-7 煤层气分级利用示意

热还可以继续梯级利用，进一步提高系统的热效率。

针对低甲烷浓度煤层气的利用，还有一些正在开发的技术值得人们注意：（1）甲烷富集器，将甲烷浓度提升至便于利用的水平，为各浓度的煤层气利用均提供了可能的备选项。基于流化床原理的富集设备被认为具有较好的发展前景。（2）贫燃料燃气轮机可以将低甲烷浓度的风排瓦斯作为燃料，或者可以将风排甲烷作为其他燃料的辅助燃料。此类燃气轮机包括：增碳燃气轮机、带催化燃烧器的贫燃料燃气轮机、贫燃料催化微型燃气轮机、混合燃料燃气轮机。

煤层气火炬燃放是颇有争议的技术选项。将不具备利用条件的煤层气燃放可以减少甲烷排放，封闭火炬和露天火炬相比具有更高的燃烧效率。有些机构也建议推动将火炬作为各种甲烷减排措施的“保底选项”，当其他技术暂时不可用或者失效时可以利用火炬实现减排。但是有些国家质疑火炬燃放的安全性，认为火炬可能回火造成矿内爆炸。目前，在中国、澳大利亚等国家有火炬正常运作的案例，而美国等国家煤矿火炬并不常见，但是 EPA 的封闭式巷道气火炬设计等计划也保留了利用火炬实现甲烷减排的可能性（Karacan et al., 2011）。



第四章 案例介绍：测量与减排技术的应用

全球很多国家、企业通过各种方式支持甲烷减排技术的研发与推广，在实践中积累了丰富的甲烷排放检测与减排的经验。例如，由全球众多油气企业组成的油气气候联盟（Oil and Gas Climate Initiative, OGCI）通过设立投资基金，支持了包括甲烷卫星在内的多种甲烷检测与分析技术的研发，并制定了到2025年成员企业上游天然气和石油业务的总体平均甲烷排放强度降低到0.25%的目标（基线为2017年的0.32%），推动成员企业积极采用先进的减排技术。包括美国环境保护署（USEPA）在内的政府机构则与众多研究机构合作开展分析技术的研究。在技术的推广层面，企业联盟通过制定目标促进了技术推广，联合国也有相关机制促进先进的减排技术在国家间交流分享（OGCI, 2018）。

下面将要介绍的四个案例有的侧重于甲烷测量，有的因地制宜地开发了甲烷利用技术，有的则从企业出发展示了企业如何综合利用测量和减排技术降低生产过程中的甲烷排放，履行其社会责任。四个案例分别为：EDF“二叠纪地图”甲烷测量项目，北京燃气集团甲烷减排行动，兴边富民公司风排甲烷利用项目和中

石油甲烷减排行动计划。

案例一：EDF“二叠纪地图”盆地甲烷测量项目——油气行业甲烷排放综合测量技术

位于美国得克萨斯州西部、新墨西哥州南部的二叠纪盆地是世界最大的油气产区之一。在这片区域内汇聚了大量油气生产企业，因而也伴随着生产流程产生了大量甲烷排放。二叠纪盆地面临的甲烷泄漏不仅来自于常规的排放源，因大量火炬产生的甲烷排放也十分可观。为了检测并估计二叠纪盆地中的甲烷排放量，从2019年秋天起，EDF发起的“二叠纪地图”项目（以下简称“地图”项目）运用多种技术追踪了二叠纪盆地的甲烷排放源、估计其排放量并通过地图这一可视化形式呈现，为进一步明确企业责任，推动甲烷减排提供了重要支撑。绘制“二叠纪甲烷地图”涉及到两个关键过程，一个是数据的获取，另一个则是数据的分析。以下分别说明该项目所采用的数据获取和数据分析方法。（EDF,2020）

（一）数据获取

目前，EDF 开展了对特拉华盆地 (Delaware Basin) 的测量，此区域内共有 100 多家企业运行的 11000 余座油气井。“地图”项目运用了如下的技术手段：来自固定于五座塔上的甲烷传感器、一辆移动甲烷测量车、一台红外摄像机、TROPOMI 卫星、一百天的飞机测量。同时，数据分析还运用了来自德州铁路协会、恩维鲁斯 (Enverus) 咨询公司、笛卡尔实验室 (Descartes Labs)、美国环境保护署 (USEPA) 的数据。

飞机飞行采集到的数据是本项目中重要的数据部分。数据由一辆装备了 Picarro 光腔衰荡光谱仪的飞机，在被测区域上空反复飞行测量而得。飞行测量一共有四种模式：局域质量平衡模式、区块质量平衡模式、设备丛质量平衡模式以及火炬燃烧效率测量模式。这四种测量模式各有侧重，适用于不同的测量情境：

- 当被测区域风况连续、方向稳定时，由泄漏带来的甲烷分布相对恒定，容易分析，此时可以让飞机覆盖全部被测区域进行长距离飞行，即采取局域质量平衡模式进行测量。

- 当风向不稳定，甲烷的空间分布随时间发生明显变化，此时将被测区域分成小区块，由飞行器针对每一个小区块分别进行飞行测量，之后对被测区域进行整体分析，此为区块质量平衡测量模式。

- 基于区块的测量结果，飞行测量可以进一步缩小范围。将区块划分成更小的子块，筛选出分布着设备丛的子区块并随机选择若干区块，之后以选定的设备丛为中心，以 1-2 千米

为半径螺旋上升飞行，测量从近地面区域到垂直上方的甲烷浓度数据，进行更为精细的质量平衡分析。这种测量模式为设备丛质量平衡模式。

- 为测量火炬燃烧效率，令飞机直接飞过火炬燃烧尾气流，测量气流中的甲烷与二氧化碳之比，即可估计火炬燃烧效率。

实际测量区域为 100×100km 的方形区域，采取第二种模式分割出的区块大小 20×20km，共 25 块；第三种模式选取的子块大小为 2×2km。除火炬效率测量外，第一种测量模式只对天气条件适宜的情况适用，第二三种则相对普适，第三种最为精细，而在实际的测量中，第三种测量模式被执行次数最多。

地面测量基于 USEPA 开发的 OTM33A 测量原理和横断面测量原理开展。EPA 的 OTM33A 方法是一整套用来通过车辆测量、分析临近驾驶路线的气体污染源的方法，是大气污染地理测量 (Geospatial measurement of air pollution, GMAP) 方式的一种 (USEPA,2014)。本项目应用的 OTM33A 方法通过布置在排放源下风向的风速仪和甲烷传感器开展连续 20 分钟的测量，之后将风速数据和甲烷浓度数据与既有的经验分布对比，得到被测量设备排放率数据。横断面测量原理要求同一测量车在排放源下游和风向 (甲烷气流) 垂直的道路上反复多点测量，和 OTM33 的静止测量相比，此方法测量误差限相对更小。在本项目中，怀俄明大学承担了地面测量的任务，他们采用 Picarro CRDS 和 PTR-TOF-MS 设

备作为测量仪器，并用 FLIR 相机对被测地点进行远距离测量，同时取样分析被测气体的挥发性有机化合物含量，作为对 PTR-TOF-MS 设备测量结果的补充。

(二) 数据分析

在本项目中，宾夕法尼亚大学利用飞机采得的两个横断面的数据，利用质量平衡法和大气运输模型法两种方法对被测的 10000 平方千米区域的甲烷排放率进行了估算。大气运输模型的估算基于现有的排放估计、测得的已知

排放源的空间分布信息和气象数据开展。在本研究中，大气运输模型基于 EPA 统计的设施数据和排放数据估算得到的排放量 (54000kg/小时) 和质量平衡法估算的数据 (~160000 kg/小时) 相差将近三倍，但是利用质量平衡估计出的横断面甲烷分布和实际飞行测得的数据更为接近。将大气运输模型的估算结果整体放大三倍，则此时的横断面估算结果和实际符合的很好。

这一结果说明了被测区域的实际排放率约为 160000 kg/hr，以及用多种方法相互对照

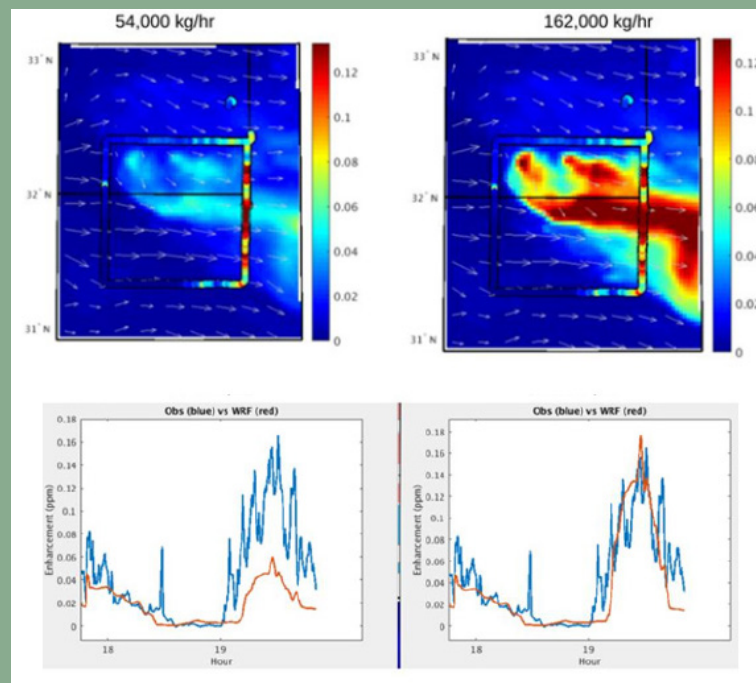


图 4-1 对大气运输模型修正前后的区域甲烷浓度估算结果。左边为排放量 54000kg/hr 时的甲烷分布模拟结果，右侧为排放量 162000kg/hr 时的甲烷分布模拟结果。

来源：EDF, 2020

是开展估算研究的可选办法；同时也说明 EPA 目前的清单数据存在低估甲烷排放量的可能性。基于以上的估计结果计算得到的区域平均设施排放率（3.5%）也显示，现有的全国排放率估计结果（EPA 的 1.1% 或 Alvarez 等人估计的 2.3%）不能反映二叠纪盆地的真实甲烷排放水平。

案例二：北京燃气集团甲烷减排行动—— 燃气行业甲烷监测及减排技术

中国经济的发展和社会建设观念的变化，推动了中国天然气行业的发展，居民用气方面的变化尤为突出。三十年来，中国的城市居民炊事气化率已经从 16.5% 提高到 96%，用气人口从 5000 万增长到 6 亿，全国 600 多个城市大部分已用上天然气，城市天然气消费量从 1988 年的不到 60 亿立方米增长到 2017 年的 1230 亿立方米。按用气人口计算，天然气在城市燃气中所占的比重接近 70%，按热值计算则接近 90%。

作为有着巨大人口数的中国首都，北京市燃气消耗量巨大。截至 2019 年末，北京燃气集团天然气年供应量 173 亿立方米，是全球第二大天然气消费城市。天然气供应过程中，设施的运营与维修会产生甲烷排放，而负责北京市燃气供应的北京市燃气集团有限责任公司（以下简称“北京燃气集团”）采取有效措施，努力减少甲烷排放。在燃气输配和供应的全过程中，甲烷的排放主要来自于新用户设备安装、

设备检修、隐患排除、应急抢修中的各种工作等生产作业中的主动降压放散，以及设施不正常工作状态下的泄漏。作业过程中的不降压作业不会产生甲烷泄漏。因此，针对以上原因产生的甲烷排放，北京燃气集团采取了四个方面的措施加以管控。其中，减少降压作业次数、优化降压作业方案可以减少降压作业流程产生的甲烷排放；强化管网预防性管理、优化漏点检测与修复可以降低设施不正常工作带来的甲烷泄漏。

（一）根据燃气设施的不同特点，采取针对性措施减少甲烷排放次数

燃气输配与供应管网主要由调压站箱、管线和闸井组成。其中，调压站箱的检修、管线的手工作业和闸井内燃气设施更换需要进行降压放散。减少降压作业的次数可以降低因降压工作引发的甲烷排放。北京燃气集团针对调压站箱、管线和闸井采取了不同的措施以减少降压工作的次数。

针对调压站箱，北京燃气集团采用预警式管理方案，减少站箱燃气设施的检修频次。传统的检修理念是计划检修或故障检修，这种理念容易造成检修过度或检修不足，其中的检修过度造成了检修频次的增加，从而增加了降压放散次数。为了避免检修过度，北京燃气自主开发了高压调压器故障预警系统和在中低压调压器故障预警系统，建立了预警系统在线监控平台。通过这一套预警系统，燃气集团可以根据预警值实现靶向检修，增强检修针对性，减少

设备检修频次。同时，针对高压调压器采取了“工厂化”检修模式，大大提高了检修质量，延长了检修周期。

针对管线，北京燃气集团尽量采用带压作业的方式，在保持管道内一定压力的情况下利用开孔、封堵、电焊等机械设备进行带气开孔、带气封堵、带气焊接等作业，避免降压放散。在引进国外先进设备的基础上，北京燃气集团大胆创新开发，形成了一套完整的城镇燃气带压作业设备，涵盖 4.0 兆帕以下，公称直径 50 毫米 (DN50) 到 700 毫米 (DN700) 的各种管线，与此同时，针对应急状态下的快速响应，协同设备厂商开发了一套小型便携式带压快速封堵设备和柱塞式封堵设备，能够实现中低压管线的快速封堵和放散阀门的带压快速更换，应急响应速度和响应能力大幅提高。2018 年，集团公司共发生作业 326 次，其中机械作业 274 次，机械作业占总作业次数的 84%，带压更换放散阀门 62 台。

针对阀门井，北京燃气强化阀门井维护，避免阀门更换。阀门井多位于地下，最主要的受损方式为锈蚀，而阀门更换必须降压放空管道气体才可以保障安全，因此重视阀门维护是降低维修次数，减少降压作业的最关键措施。阀门井维护主要包括三个方面：一是防水，针对地下阀门井的进水通道采取有效措施防止进水，改善井内环境；二是防锈，通过水喷砂除锈和涂装聚氨酯防锈；三是定期维护阀门传动机构，保障其完好。

（二）优化降压作业方案，减少甲烷放散量

在降压作业不可避免的情况下，通过优化降压作业方案可以减少甲烷放散量。此时，放散量受到压力和管容量影响，因此合理控制压力和管容量即可控制甲烷放散量。

中压以上的燃气管网，因管内压力较大，降压作业采取“先降压，后放散”的措施。通常采用的操作方法为：通过下游管网逐步降压，尽量将作业区降至低压状态再对空放散。当作业区下游不能为作业提供降压条件时，则扩大降压范围，使下游有管网能够接收或消耗作业区内燃气；待管网压力降至尽可能的低点时，将作业区从降压区隔离，对作业区进行放散，并对非作业区恢复工况正常运行。

中低压燃气管网存在可以不降压的作业区，进一步降低压力又可能对用户用气造成影响。为了兼顾降压作业要求和用户的正常使用需求，北京燃气采取了对作业区进一步划分并形成放散区和保压区的方法。这样，保压区既能满足局部用户供应，也能为放散区的作业提高微正压保障。

（三）强化管网预防性管理，防止管网泄漏

管网泄漏指管网处于不正常状态引起的泄漏，避免管网泄漏不仅可以降低因泄漏本身造成的排放，还可以降低泄漏维修带来的降压作业次数。管网泄漏的两大原因是设备本体损坏或者外力损坏，其中设备本体损坏主要包括腐

蚀漏气和管道开焊，而外力破坏主要包括地质变化或第三方施工造成的管道漏气。对以上两种破坏原因，北京燃气集团采取了不同的针对性措施，从源头上杜绝产生破坏，防止管线泄漏。

为了防范管道本体损坏，北京燃气加强了预防性的管理，主要包括防腐层管理、阴极保护管理和杂散电流管理。防腐层管理即通过给管道加防腐层，防止管道内外介质的化学、电学以及微生物的作用对管道造成的侵蚀。阴极保护管理是指通过给被保护的管道段加一定直流电流使之成为电化学的阴极，防止管道在土壤等介质中发生电化学腐蚀。杂散电流管理则是在检测、分析管道附近存在的杂散电流及其对阴极保护的影响的基础上，采取排流措施防止杂散电流对管道产生腐蚀。

外力破坏最主要的来源是施工单位的盲目施工，其引起的管道泄漏同时会产生很大的爆燃危险。发现施工迹象是防止管网外力破坏最主要的手段。北京燃气集团目前采取以下三种手段发现可能存在危险的施工迹象：一是通过政府公共平台了解施工信息；二是通过对主要施工方和地勘方建立对接机制通报施工信息；三是通过员工每日的巡视发现施工迹象。

（四）采取先进的技术手段，优化漏点检测与修复的措施

调压站箱、管线和闸井都可能漏气。漏气问题一直存在，并且随着管网的铺展和时间的推移，漏气现象会更加普遍易发。因此，及时

找到并修复漏点能有效提升管网的运行安全性并降低甲烷排放。针对不同设施的漏气特点，北京燃气集团不断更新泄漏检测和监测理念，大胆创新漏点修复措施，建立了一套完整的泄漏检测和漏点修复管理程序，提高了漏点发现的及时性，并减少了漏点修复过程中的甲烷排放。

调压站箱漏气点多，容易发现，容易修复。北京燃气设置了视频激光监测系统和燃气（浓度）报警系统，可以对站箱内甲烷浓度进行实时监测并对站箱漏点进行实时筛查。同时，北京燃气按排定周期到现场对各接口进行检测，进一步强化泄漏检测的有效性。发现泄漏点后，北京燃气采取对站箱局部管道降压放散，利用在不带气状态下更换密封件的方法对漏点及时修复。

管线泄漏和调压站相比，隐蔽性强，修复难度大。北京燃气这几年在泄漏检测方面不断采用新技术，先后采用激光检测仪、高精度激光检测车等检测设备，检测精度从1‰提升到1ppb；采用地面检测和管线5米线范围内的市政井检测结合的方式，管线漏气的自行发现率达到95%。针对地下管线的漏点定位，北京燃气综合利用防腐层破损点检测技术、示踪剂技术和北斗定位技术对漏点的位置进行预判，提高了漏点定位的准确性，为漏点修复提供了支撑。漏点修复采取不降压修复和降压修复两种措施。其中不降压修复指不对管道内燃气进行放散，保持管道原有运行压力修复漏点，技术可选项包括带压焊接技术和钢带捆扎技术。

降压修复指利用降压、放散等措施，将管道内燃气降至微正压，实现微正压状态下的带气焊接，修复管道漏点。

阀门井内泄漏容易发现，但是修复难度大，安全风险大。阀门井内漏点的检测主要采取人工井上检测或下井检测结合的方式，部分阀门井试点性地采用了窄带通讯的燃气泄漏报警系统。目前北京燃气集团正在研发移动式井下智能巡检装置，力图用井下摄像和激光检测等技术实现不下井巡检。漏点的修复采取注脂密封技术和不带气更换密封件技术。注脂密封技术主要用于漏气阀杆，可以实现不降压作业；不带气更换密封件需要对局部管网进行放散，需要优化降压放散方案，尽量减少甲烷排放。

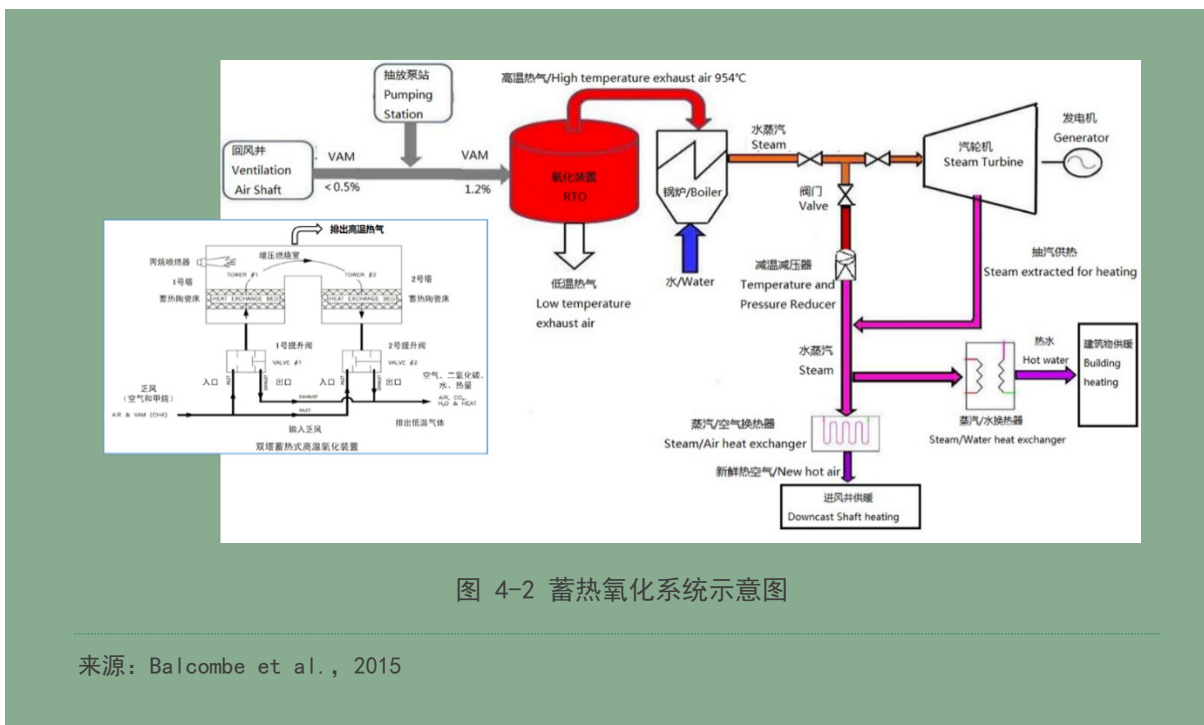
案例三：兴边富民甲烷氧化发电项目——低浓度煤炭甲烷减排技术及应用

中国 51% 的地下煤矿是多气矿藏 (Feng et al., 2016)，煤层气储量丰富。近年来，中国对煤层气利用的重视程度逐渐上升，煤层气从原来开采的危险因素逐渐转变为一种可以利用的资源，各种政策措施取得了一定的减排成效。2017 年，我国煤层气（煤矿瓦斯）抽采量 178 亿立方米，其中地面煤层气产量约 50 亿立方米，煤矿井下瓦斯抽采量 128 亿立方米；煤层气（煤矿瓦斯）利用量 93 亿立方米，其中地面煤层气利用量 44 亿立方米，煤矿井下瓦斯利用量 49 亿立方米，相当于减排二氧化碳 1.4 亿吨（郝海金，陈召英，鲁博，

2019）。但是同时，中国的煤层具有高压、强吸附性和低透气性的特点 (Zhou et al., 2016)，这给煤层气的进一步开采开发带来了挑战，也呼唤着新的煤炭甲烷开采和利用技术。兴边富民（北京）清洁能源技术有限公司是一家清洁能源技术及节能服务提供商，公司专注于乏风及低浓度煤层气利用的节能服务，将在山西投资建设和运营煤矿乏风氧化综合利用项目，发展乏风氧化热电联供分布式清洁能源系统。本案例介绍的是兴边富民公司在山西阳泉开展的一个乏风氧化发电项目（马立波，2020）。

在中国，风排瓦斯每年折合纯量 150 亿立方米，甲烷浓度低于 0.75%，利用难度大，基本全部排空。而泵站抽放的瓦斯虽然浓度稍高，但是现有技术仍然难以利用甲烷浓度低于 8% 的煤矿瓦斯，因此泵站抽放瓦斯也面临着放空问题。为解决这一问题，兴边富民公司选取了氧化发电技术。基于煤矿甲烷氧化发电工程实施及设计改进，公司研发了利用煤矿乏风及抽采瓦斯掺混氧化发电工艺系统专利技术。

此项技术的原理是：将回风井排出的乏风（甲烷浓度低于 0.5%）和抽放泵站抽取的煤矿瓦斯（浓度较高）经过配比混合，混合成甲烷浓度为 1.2% 的混合气体，通入蓄热式氧化装置中。甲烷在装置中催化氧化得到高温热气，将高温热气通入锅炉即可实现对水的加热。得到的高温水蒸气可以进一步梯级利用：首先将蒸汽用来发电，余热乏汽既可以用于矿区建筑物供暖，也可以用于进风井供暖。通过这



样的方式，部分乏风甲烷和煤矿瓦斯甲烷可以实现就地利用，同时避免了低浓度瓦斯输送过程中的安全隐患。该项技术入选国家安监总局“2016年安全生产重大事故防治关键技术科技项目”。

依据此项技术开展的阳煤集团二矿桑掌乏风氧化发电项目于2017年10月土建基础开工，2019年6月完成了72小时并网试运行。项目共建设6套蓄热氧化装置，1台54t/h余热锅炉和1台15MW空冷凝汽式汽轮发电机组，试运行期间乏风利用率40%，抽采瓦斯全部利用，每年可以销毁折纯甲烷5184万立方米的甲烷，相当于每年减排二氧化碳83万吨。分析证明，乏风收集系统对煤矿通风系统基本不产生额外负担，对煤矿瓦斯在生产过程中的

甲烷浓度、压力、流量等参数波动适应性强，可最大程度避免煤矿甲烷排空造成资源浪费，保护大气环境。

该项目也通过了相关测试。2018年9月，第三方检测机构SGS对蓄热氧化系统进行运行性能检测，得出：在单台氧化装置入口掺混乏风的甲烷浓度1.2%、流量90000立方米/小时的工况下，甲烷氧化销毁率可达99.92%，氧化装置输出热风温度为982°C，氧化装置输出热风流量24,416 Nm³/h。次年八月，环保机构到场对烟囱排放口进行气体采样检测，检测得出氮氧化物、二氧化硫浓度均低于仪器检出限，颗粒物浓度小于1mg/m³。事实证明，煤矿甲烷氧化技术可以销毁乏风残留的煤矿颗粒，又可以实现大规模的排空甲烷减排；

控制甲烷氧化温度低于一千摄氏度可以避免氮氧化物的生成防止二次污染；热电联供则大大提高系统的能量利用效率，总体上产出了巨大的环保效益。此项目在 2019 年 9 月得到山西省电视台的专题报道。2019 年 12 月 12 日，

全球甲烷行动倡议组织（Global Methane Initiative, GMI）及美国环保署在第 19 届北京国际煤层气大会闭幕后考察阳煤桑掌项目现场，对安全高效销毁利用煤矿排空甲烷给予高度评价。



图 4-3 阳煤二矿乏风瓦斯氧化利用工程鸟瞰图

案例四：中国石油天然气集团甲烷减排行动——企业甲烷减排综合战略

中国石油天然气集团(以下简称“中石油”)是一家国有企业，是中国国内主要的油气供应商之一。2017 年，中石油的国内生产原油产量占到全国总产量的 54%，炼制原油占到全国 27%，天然气占到全国 70%。中石油也是世界范围内重要的油气生产企业之一，在 2017

年石油情报周刊（Petroleum Intelligence Weekly）给出的全球五十家最大油企的榜单中，中石油综合排名第三。

作为一家在中国和全球都享有盛誉和巨大影响力的油气生产企业，中石油重视天然气业务的可持续发展。2012 年，中石油提出了《绿色发展行动计划》，突出了绿色低碳的发展理念，而发展天然气是绿色低碳发展的重要组成部分。在此理念的指导下，中石油天然气

产量不断提升，2017年中石油天然气产量第一次突破1000亿立方米。照此趋势，中石油2020年的国内天然气产量将达到企业年油气折合生产总量的50%。同时，根据中石油研究院的预测，到2050年，天然气将成为全球和中国消耗占比最大的一次能源，届时天然气的重要性将更加凸显，而中石油也将在其中扮演更为重要的角色。在此发展的大趋势下，为了和发展目标相适应，中石油建立了一套企业甲烷减排的综合战略，其中包括：建立科学的低碳发展战略决策体系，重视减排技术的研发与推广，做好未来战略规划（周爱国，2018）。

（一）建立碳排放核算与管理体系

绿色低碳发展要求在天然气开采与供应的同时降低天然气泄漏量，因此控制甲烷泄漏也

成了中石油发展中关注的重要问题。中石油建立了一套评估低碳发展现状、挖掘低碳发展潜力、制定低碳发展目标和战略的决策支撑系统。其中要求：为决策管理提供基本数据支撑、制定一系列低碳发展技术标准、研究低碳发展的理论工具等。中石油建立了碳管理平台，包括石油及石油化工产品碳足迹的计算系统，低碳发展综合分析系统，能效基准发布系统和污染物减排量评估系统。以此为指导，中石油在盘点甲烷泄漏数据、采取甲烷减排措施、研发甲烷减排技术等方面发力，并卓有成效。

（二）重视检测与减排技术研发

技术研发方面，中石油开展的伴生气回收、套管气回收、煤层气逸散甲烷回收中的技术研发取得成效。



图 4-4 长庆油田伴生气回收利用示范装置

● **伴生气**：中石油自 2001 年起开展油田伴生气回收工作。2005 年前实现伴生气在天然气电站中回热环节的利用，实现了过程核心部件的国产化，伴生气平均回收率达到 35%。2010 年前发展了连续压力阀回收技术和挥发性碳氢化合物回收技术，平均回收率达到 65%。接下来的五年，实现了套管气的加压回收，回收核心设备国产化，伴生气平均回收率达到 90%。近年来，中石油正努力实现井群密封和来源于多用途场站的伴生气的利用，努力使伴生气回收率达到 100%，利用率达到

95%。并且，2000-2020 的 20 年间，伴生气回收成本从每立方米 0.4 元人民币降至 0.25 元人民币，大幅降低回收成本。

● **井口套管气**：井口套管气回收方面，中石油开发了油气混抽泵，经过实地测试，被测试的八口井每天可以回收 2653 立方米的套管气，井口甲烷排放减少了 85%。

● **煤层气逸散甲烷回收**：设计的甲烷回收装置实现了高于 95% 的甲烷回收率。在华北油田的一项测试中，此技术可以每天回收 156 立方米的气体。

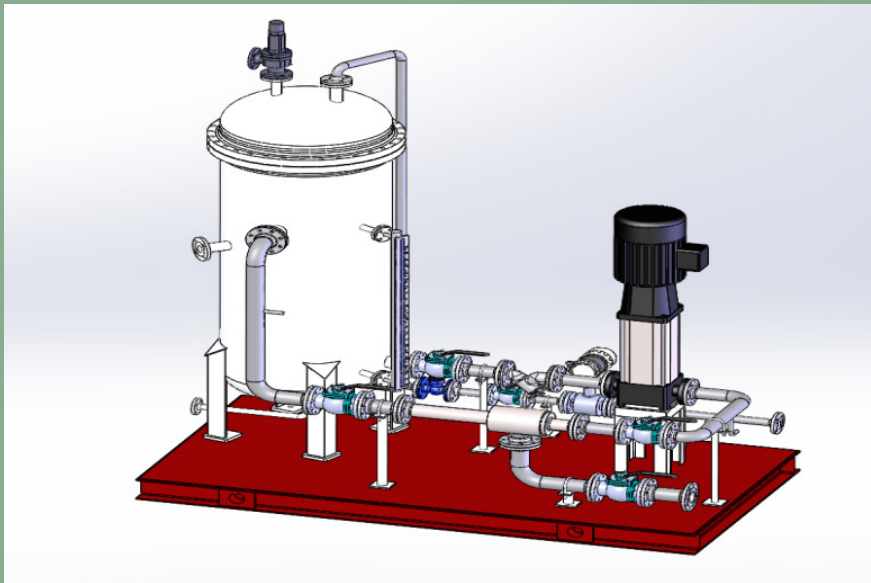


图 4-5 煤层气逸散气回收装置示意图

在泄漏监测与维修 (LDAR) 方面，中石油自 2006 年起与美国全球甲烷联盟 (Global

methane initiative) 和加拿大合作，开展了甲烷泄漏在场监测，并不断完善 LDAR 计划。

2007年，中石油在长庆油田开展了第一次外场测试，对11座设施、39类排放源进行了泄漏监测。2008年，中石油基于在西南油气田的测试结果改进了检测方法学，为中石油企业甲烷控制标准的制定做了准备。2009年中石油在塔里木油田和辽河油田的外场测试中扩大了泄漏监测范围，并实现对锅炉、脱水器、火炬、套管气、储存箱、压缩机的全面泄漏检测与处置。2010年中石油年在新疆油田实现了对9座设施和48个排放源的检测。同时，中石油实现了在全国14个省份的15座油田的LDAR中利用相关性分析，通过检测结果估计了甲烷泄漏总量并开展了全过程挥发性有机化合物密封和火炬燃烧甲烷排放控制，取得了良好的减排效果。

（三）未来战略规划

在未来，中石油将继续着力推动需求侧结构转型，并规划了包括以下四方面的甲烷控制方案：一是建立甲烷泄漏监测和报告系统，开展甲烷减排技术的研究与测试，积极参与国内相关标准的制定，提升中国油气行业控制甲烷排放的综合能力；二是协同推进LDAR和挥发性有机化合物排放控制，学习精炼和化工设施开展类似工作的先进经验，推广油气生产设施中甲烷和其它挥发有机物的泄漏监测；三是积极推广绿色筑井、柱塞举升、油气混运、伴生气回收、不停机环钻等技术，改进三相电机的自动控制水平，在生产和运输环节中着力降低甲烷排放；四是强化排空和火炬燃烧活动管理，推动路径上火炬的全面取缔，提升火炬燃烧的安全性和效率。



第五章 总结与建议

本报告对能源行业甲烷排放测量与减排技术进行了研究综述。得出的基本结论可以总结如下。

（一）测量技术

现有的甲烷测量技术设备多基于光学、化学、声学三种原理设计。依据光学原理设计的测量设备具有综合优势，目前获得了越来越广泛的应用。化学原理在精密测定甲烷浓度方面具有优势但是便携性相对不突出。声学原理主要用于管网泄漏点的定位式检测，目前的技术不能实现对甲烷泄漏量的定量测量。

基于以上原理设计的不同测量设备适用于不同的测量场景。针对组件、设施的测量得到的是甲烷排放量分析的基础数据，此场景中测量的范围小、对测量精度要求高。手持设备或者固定传感器在此场景中有着广泛应用。针对区域甲烷泄露的测量使用的技术手段包括移动工作站、传感器网络、无人机等。卫星、飞机等常用于更大范围的甲烷浓度测量，这类测量活动也常被称为自上而下的测量，测量数据为以组件、场站为基础的自下而上的测量提供了对照。而卫星等技术空间分辨率和柱浓度精度不断提升，给利用卫星开展定量测量提供了技术可能性。

上述技术直接测得的为被测点甲烷浓度，将这些数据转化为泄漏量数据需要借助一定的数学分析方法。在具体的测量设备之外，以“活动水平 * 排放因子”为代表的排放因子法在清单编制、科学研究中有着广泛应用，而利用蒙特卡洛方法开展对全流程甲烷排放的估算或某类组件排放分布特点的估计在近几年也受到研究人员的关注。

甲烷测量可能将在技术手段革新和综合测量方案革新两个方向上取得突破。技术手段方面，以光学原理为基准的测量技术因其操作方便、准确度高发展迅猛；而随着技术成本的不断降低，在未来，光学测量技术可能得到更大范围的应用。综合测量方案方面，随着油气行业甲烷减排的注意力更多地投向甲烷泄漏的检测与设备维修，基础性的泄漏检测将成为甲烷测量技术发展的重心，而这将推动快速、准确、低成本的大范围甲烷泄漏综合检测方案的发展，这既要求了甲烷测量基础技术的发展，也对包括数据处理方法在内的技术整合方法提出了要求。目前，有三种测量方案已经付诸实践，证实了自身的可行性：传感器网络和数学模型反演配合、基于OTM33的测量方案、卫星监测。在未来，更低成本、更准确的传感器和更精确

的数学模型可能赋予前两种方案更大的实践可行性，但是 MethaneSAT 等卫星监测技术的发展空间也很大。针对甲烷排放的进一步估算工作也在持续开展，技术的发展提供了不同测量方案相互对照并相互补充的可能性。

（二）减排技术

油气行业减排技术因油气产业链上的不同环节而异，主要包括定期检修、换用新的技术设备、泄漏检测与维修等。定期检修意在降低泄漏发生的可能性，换用如柱塞举升、低排放气动阀、低排放密封的技术，应用蒸汽回收装置等技术可以降低全产业链正常生产过程中甲烷排放，而泄漏检测与维修主要是为了降低意外情况中的甲烷排放。

煤炭行业甲烷减排技术包含两类关键技术。回收风排瓦斯、对煤层中甲烷进行预采取等是第一类技术，此类技术可以尽可能回收开采过程前后煤层释放的甲烷。废弃煤矿常用垂直井网回收彻底淹没之前巷道内的甲烷，而露天煤矿可在开采之前直接采取矿层内的甲烷。第二类技术是对回收的煤层气依据浓度进行分级利用。利用甲烷浓度低的大量风排瓦斯是煤层气利用的难点问题。目前具有潜力的设备是催化氧化装置。

油气行业、煤炭行业采用的甲烷减排技术呈现出不同的发展方向。随着对油气行业甲烷排放特点的进一步深入研究，以维护为主的甲烷减排方案可能被更多油气生产、运输、销售企业所采用，这一方面意味着泄漏监测与维修

将得到更高的重视，另一方面推动了具有更低排放的设备组件、基础设备的研发与生产。煤炭行业甲烷减排给开采技术和利用技术都提出了新的要求。低透气性煤层甲烷的开采可能成为接下来需要攻克的技术难点，低甲烷浓度气体的利用潜力也有待进一步挖掘。兴边富民煤矿提供了催化氧化技术用于低浓度甲烷减排的一个方案，但未必是唯一的选择；如乏燃燃气轮机发电在内的其他技术目前也在研究之中。

在中国，甲烷也是仅次于二氧化碳的第二大温室气体。其中能源行业产生的甲烷排放又占到人类活动产生的甲烷排放总量的大部分：以中国第二次两年更新报告数据为例，在能源活动造成的 2475.7 万吨（二氧化碳当量）甲烷排放中，能源行业逃逸排放为 2214.2 万吨（二氧化碳当量），占到总量的 89%。而在逃逸排放中，固体燃料的逃逸排放总量为 2101.5 万吨，占到绝对多数。这与中国重煤炭的一次能源比例相符合，也意味着煤炭行业甲烷排放将成为中国甲烷减排的重点。中国的煤层具有高压、强吸附性和低透气性的特点，开采难度高，这更对中国煤炭行业甲烷减排提出挑战。

基于此，本文对中国甲烷减排工作提出以下建议：

一、重视甲烷测量，全面推动甲烷排放家底清查工作的开展

第一章已经提及，中国温室气体排放的基础数据并不齐全，公开性也有待提升。在中国的历次国家信息通报中，甲烷排放清单的最细

层级区分了油气行业甲烷排放和煤炭行业甲烷排放，更为精细的数据并未公开。对于技术研发者，不明确的关键排放源信息无法给出明确的技术研发方向。对于实际承担甲烷减排责任的企业，他们出于对经济效应的考量并不具备清查企业甲烷排放的动力，在不了解企业甲烷排放实际情况的前提下，企业很难选择合适的甲烷排放技术方案，这既造成了甲烷资源的浪费，也导致中国甲烷减排的进度进一步延滞。

无论是对于油气行业还是煤炭行业，开展更为细致的甲烷排放清查都是有意义的工作。开展清查可以从以下几个方面着力。一是制定更为精细的企业甲烷排放清查手册和规章，更为细致地划分排放源，并给出每种排放源对应的甲烷排放量估计方法，同时制定更明确的清单报送规范。二是推动科研机构开发新的针对中国的数据整理和分析方法，建立符合中国特点的甲烷排放估算模型。三是加强数据公开，研究机构可以利用更权威准确的中国甲烷排放数据，估计中国甲烷排放情况；并以此为基础绘制中国的甲烷减排技术经济性曲线，指导中国的甲烷减排工作。

二、紧跟国际技术发展趋势，加强适合中国国情的甲烷测量技术研发

以光学原理为基础的测量设备可能成为未来测量技术研发的重点。中国可以结合国家科研体系的优势，在光学测量设备上重点发力，并且兼顾其他种类测量设备的研发。首先应重视对科研院所的支持，鼓励科研院所在测量设备使用的基础原理上取得新的进展，并在关键

技术上有所突破，对我国测量技术和测量设备发展提供稳固支撑。其次应重视支持设备生产企业，鼓励企业和科研院所加强合作，并逐渐发展出自身的设备研发力量，研制出适应中国国情的先进测量设备，打造完善的科研成果落地体系。最后应重视数据处理方法的发展与完善，鼓励科研院所和煤炭、油气生产销售企业开展合作，及时更新甲烷排放数据并在此基础上形成适应中国国情的数学模型。

三、重点支持甲烷减排技术研发与推广

对甲烷减排技术的研发与推广正受到重视，未来应进一步加强对技术研发的支持。对油气行业，支持重点油气企业加强技术研发，鼓励油气企业提高研发投入，并在企业内部不断推广新的甲烷减排技术。对煤炭行业，加强新开采煤矿的管理，要求新开采煤矿采用合理的煤层气采取措施预先回收煤矿甲烷；继续推进风排瓦斯的合理利用，促进催化氧化等风排瓦斯利用技术在更多的煤矿推广；通过试点的方式推进废弃煤矿矿井甲烷的勘测、回收与利用；支持如兴边富民集团等技术研发企业的发展，以此推动煤矿甲烷利用新技术的研发与应用。

四、建议“十四五”时期重点推进煤炭行业和油气行业甲烷减排

甲烷减排起步晚、潜力大，应该作为“十四五”时期减缓气候变化的工作重点之一。目前已经有的政策措施都是以鼓励引导类为主，“十四五”时期应以更有力的措施加强对煤炭行业和油气行业甲烷减排的控制。从煤炭

生产行业来看，应该严格控制煤炭产量；支持煤层气高效抽采和梯级利用工程，实现高浓度煤层气直接利用，中低浓度煤层气浓缩提纯利用，建设低浓度瓦斯发电系统；推广应用矿井乏风氧化利用供热或发电技术，建立煤矿瓦斯抽采利用示范工程专项资金等。控制油气行业甲烷排放的措施包括：限制油气生产系统甲烷放空行为，推广油气系统甲烷放空回收再利用技术，减少油气系统设备 / 组件甲烷泄漏，开展油气系统甲烷泄漏监测和甲烷回收利用试点示范工程等（徐华清，2019）。除了以上控制措施，政府可以牵头制定甲烷测量与减排技术工具箱，为相关部门和企业提供标准化甲烷检

测和测量方法，制定甲烷减排或回收利用的标准化方案；推动成立独立机构并开展对上述政策和方法执行的督查。

参考文献

- Allen, D. T., Sullivan, D. W., Zavala-Araiza, D., Pacsi, A. P., Harrison, M., Keen, K., Fraser, M. P., Daniel Hill, A., Lamb, B. K., Sawyer, R. F., & Seinfeld, J. H. (2015). Methane emissions from process equipment at natural gas production sites in the United States: liquid unloadings. *Environmental science & technology*, 49(1), 641–648. <https://doi.org/10.1021/es504016r>
- Alvarez, R. A., Zavala-Araiza, D., Lyon, D. R., Allen, D. T., Barkley, Z. R., Brandt, A. R., Davis, K. J., Herndon, S. C., Jacob, D. J., Karion, A., Kort, E. A., Lamb, B. K., Lauvaux, T., Maasackers, J. D., Marchese, A. J., Omara, M., Pacala, S. W., Peischl, J., Robinson, A. L., Shepson, P. B., Sweeney, C., Townsend-Small, A., Wofsy, S. C., & Hamburg, S. P. (2018). Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain. *Science*, 361 (6398) , 186-188. DOI: 10.1126/science.aar7204
- Balcombe, P., Anderson, K., Speirs, J., Brandon, N., & Hawkes, A. (2015). Methane and CO₂ emissions from the natural gas supply chain. Imperial College, London, UK.
- Balcombe, P., Anderson, K., Speirs, J., Brandon, N., & Hawkes, A. (2017) The Natural Gas Supply Chain: The Importance of Methane and Carbon Dioxide Emissions. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*.5(1),3-20. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b00144
- USEDf. (2020). Methodology: Permian Methane Analysis Project (PermianMAP). From <https://www.permianmap.org/#map-section> [Version: Last Updated April 5, 2020]
- USEPA. (2006). Installing plunger lift systems in gas wells, lessons learned from natural gas STAR partners. Washington D.C.: Environment Protect Agency.
- USEPA. (2007). Leak detection and repair: a best practices guide. Washington D.C.: Environment Protect Agency.
- USEPA. (2011). Reduced Emissions Completions for Hydraulically Fractured Natural Gas Wells. Lessons Learned from Natural Gas STAR Partners. Washington D.C.: Environment Protect Agency.
- EPA. (2014). Draft Other Test Method 33 v1.2: Geospatial Measurement of Air Pollution, Remote Emissions Quantification. Washington D.C.: Environment Protect Agency.
- USEPA. Methane Recovery at Surface Mines in the U.S. From <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/cmop-methane-recovery-surface-mines-march-2014.pdf>
- Feng, G., Hu, S., Li, Z., Jiang, H., Zhang, Y., Xu, G., Wang, Z., & Lixun Kang. (2016). Distribution of methane enrichment zone in abandoned coal mine and methane drainage by surface vertical boreholes: a case study from China. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 34, 767-778.

Fox, T. A., Barchyn, T. E., Risk, D., Ravikumar, A. P., & Hugenholtz, C. H. (2019). A review of close-range and screening technologies for measuring fugitive methane emissions in upstream oil and gas. *Environmental Research Letters*, 14, 053002.

Haugland, T. (2019). *Best Practice Guidance for Effective Methane Management in the Oil and Gas Sector*.

IEA. (2020). Methane policy and regulation database. Methane Tracker 2020. <https://www.iea.org/reports/methane-tracker-2020>. [Accessed April 2, 2020]

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC. (2018). Summary for Policymakers. In: *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* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In press.

Jacob, D. J., Turner, A. J. , Maasackers, J. D. , Sheng, J. , Sun, K. , Liu, X. , Chance, K., Aben, I., McKeever, J., & Frankenberg, C. (2016). Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(22), 14371–14396.

Karacan, C. Ö., Ruiz, F. A., Cotè, M., & Phipps, S. (2011). Coal mine methane: a review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction. *International Journal of Coal Geology*, 86(2-3), 121-156.

Karacan, C. Ö., & Warwick, P. D. (2019). Assessment of coal mine methane (CMM) and abandoned mine methane (AMM) resource potential of longwall mine panels: example from northern appalachian basin, USA. *International Journal of Coal Geology*, 208, 37-53.

Lawrence, N. S. (2006). Analytical detection methodologies for methane and related hydrocarbons. *Talanta*, 69(2), 385-392.

Li, J., Jin, W., Wang, X., Jin, M., Dun, X., & Chen, J. (2014). Review of gas leak infrared imaging detection technology. *Infrared Technol.* 36, 513–520.

Lu, H. , Iseley, T. , Behbahani, S. , & Fu, L. (2020). Leakage detection techniques for oil and gas pipelines: state-of-the-art. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 98, 103249.

Mahdevari, S. (2019). Coal mine methane: Control, utilization, and abatement. In

Joseph Hirschi(Ed.), *Advances in Productive, Safe, and Responsible Coal Mining* (pp.179-198). Woodhead Publishing.

Melvin, A. M., Sarofim, M. C., & Crimmins, A. R. (2016). Climate Benefits of U.S. EPA Programs and Policies That Reduced Methane Emissions 1993 – 2013. *Environmental Science & Technology* 50(13), 6873 – 6881. DOI: 10.1021/acs.est.6b00367

Moore, T. A. (2012). Coalbed methane: a review. *International Journal of Coal Geology*, 101.36–81.

Muduli, L., Mislira, D. P., & Jana, P. K. (2018). Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines: a systematic review. *Journal of network and computer applications*, 106, 48-67.

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., & Zhang, H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

OGCI. (2018). *At work: Committed*

to climate action, a report from the oil and gas climate initiative. From https://vklb72qn0p747zkmy18w0m8g-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2018/09/OGCI_Report_2018.pdf

Palmer, I. (2010). Coalbed methane completions: a world view. *International Journal of Coal Geology*, 82(3-4), 184-195.

Pandey, S., Gautam, R., Houweling, S., van der Gon, H. D., Sadavarte P., Borsdorff, T., Hasekamp, O., Landgraf, J., Tol, P., van Kempen, T., Hoogeveen, R., van Hees, R., Hamburg, S. P., Maasackers, J. D., & Aben, Ilse. (2019). Satellite observations reveal extreme methane leakage from a natural gas well blowout. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116 (52), 26376-26381. DOI: 10.1073/pnas.1908712116

Rogelj, J., Schaeffer, M., Meinshausen, M., Shindell, D. T., Hare, W., Klimont, Z., Velders, G. J., Amann, M., & Schellnhuber, H. J. (2014). Disentangling the effects of CO2 and short-lived climate forcer mitigation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(46), 16325–16330. <https://doi.org/10.1073/pnas.1415631111>

Sander, R., & Connell, L. D. (2012). Methodology for the economic assessment of enhanced coal mine methane drainage (ECMM) as a fugitive emissions reduction strategy. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 8, 34-44.

Sarofim, M. C., Waldhoff, S. T., & Anenberg, S.

C. (2017). Valuing the ozone-related health benefits of methane emission controls. *Environmental and Resource Economics*, 66(1), 45-63.

Shoemaker, J. K., Schrag, D. P., Molina, M. J., & Ramanathan, V. (2013). What role for short-lived climate pollutants in mitigation policy? *Science*, 342(6164), 1323-1324.

Su, S., Beath, A., Guo, H., & Mallett, C. (2005) An assessment of mine methane mitigation and utilization technologies. *Progress in Energy and Combustion Science*. 31.123–170.

Trefiak, T. (2015). LDAR Case Study Comparison of Conventional Method 21 vs Alternative Work Practice (Optical Gas Imaging). From

<https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-04/documents/20trefiak.pdf>

Virmaux, G. (2018). DSO' s METHANE EMISSIONS CALCULATION METHODOLOGY GRDF METHOD PER EVENT, World Gas Conference, 2018.6. Washington D.C., USA

von Fischer, J. C., Cooley, D., Chamberlain, S., Gaylord, A., Griebenow, C. J., Hamburg, S. P., Salo, J., Schumacher, R., Theobald, D., & Ham, J. (2017). Rapid, Vehicle-Based Identification of Location and Magnitude of Urban Natural Gas Pipeline Leaks. *Environmental science & technology*, 51(7), 4091–4099. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06095>

World Meteorological Organization. (2019).

WMO statement on the state of the global climate in 2018. Switzerland: Geneva.

Yang, H. (2020). Methane Risks Disclosure – Investor' s Reference. China methane forum. China: Beijing.

Yusuf, R. O. , Noor, Z. Z. , Abba, A. H. , Hassan, M. A. A. , & Din, M. F. M. (2012). Methane emission by sectors: a comprehensive review of emission sources and mitigation methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5059-5070.

Zavala-Araiza, D., Lyon, D., Alvarez, R. A., Palacios, V., Harriss, R., Lan, X., Talbot, R., & Hamburg, S. P. (2015). Toward a Functional Definition of Methane Super-Emitters: Application to Natural Gas Production Sites. *Environmental science & technology*, 49(13), 8167–8174. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00133>

Zavala-Araiza, D., Alvarez, R. A., Lyon, D. R., Allen, D. T., Marchese, A. J., Zimmerle, D. J., & Hamburg, S. P. (2017). Super-emitters in natural gas infrastructure are caused by abnormal process conditions. *Nature communications*, 8, 14012. <https://doi.org/10.1038/ncomms14012>

Zheng, C., Jiang, B., Xue, S., Chen, Z., & Li, H. (2019). Coalbed methane emissions and drainage methods in underground mining for mining safety and environmental benefits: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 127, 103–124.

Zhou, F., Xia, T. , Wang, X. , Zhang, Y. , Sun,

Y. , & Liu, J. . (2016). Recent developments of coal mine methane extraction and utilization in china: a review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* .437-458.

郝海金, 陈召英, 鲁博. (2019). 我国煤层气(煤矿瓦斯)抽采利用现状及对其发展的思考. *山西煤炭* ,4, 1-9.

金光贤, 孟辉, 贾光辉. (2018). 激光甲烷传感器在瓦斯抽放管道在线监测的应用. *山东煤炭科技* , 219(11), 59-61.

马立波. (2020). 煤矿甲烷减排及氧化发电. *中国甲烷论坛*, 北京, 2020年1月3日.

戚良矿. (2010). 红外甲烷传感器在瓦斯抽采计量中的应用. *淮南职业技术学院学报* , 10(35), 46-48.

王贤君, 盖德林, 张琪. (2000). 气井柱塞举升排液采气优化设计. *石油大学学报(自然科学版)* ,24, 36-39.

徐华清. (2019). 我国非二氧化碳温室气体排放现状及“十四五”控制思路. *江西南昌: 全国低碳日甲烷减排论坛*, 2019-06-19.

薛明, 翁艺斌, 刘光全, 李兴春, 李湘, 于胜民, 崔翔宇, 宋磊. (2019). 石油与天然气生产过程甲烷逃逸排放检测与核算研究现状及建议. *气候变化研究进展* , 15(2), 187-196.

薛生. (2020). 中国煤矿甲烷利用技术进展. *中国甲烷论坛*, 北京, 2020年1月4日.

岳桢干. (2020a). 国外天基二氧化碳和甲烷监测能力及近期计划(上). *红外* , 40(4).42-48

岳桢干. (2020b). 国外天基二氧化碳和甲烷监测能力及近期计划(中). *红外* , 40(5).43-48

岳桢干. (2020c). 国外天基二氧化碳和甲烷监测能力及近期计划(下). *红外* , 40(9).17-48
中国国家发展和改革委员会. (2014). 关于印发第二批4个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)的通知. From https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201502/t20150209_963759.html

中国国家发展和改革委员会. (2014). 中国石油天然气生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行). 中国, 北京.

中华人民共和国. (2018). 中华人民共和国第三次国家信息通报. 中国, 北京.

周爱国. (2018). 中石油公司在生产运行中控制甲烷排放的最佳实践分享. 钓鱼台国宾馆: “甲烷排放与低碳减排在中国”论坛. 北京. 2018年11月20日.

朱松丽. (2019) 能源系统甲烷排放的核算和报告. 北京, “中国甲烷减排合作平台”研究沙龙, 2019年11月29日.

机构介绍

清华大学气候变化与可持续发展研究院成立于 2017 年 10 月，由中国气候变化事务特别代表解振华担任创始院长。气候院致力于打造跨学科研究、人才培养和政策交流协同创新平台，整合国内外优质资源，为应对全球气候变化与实现可持续发展提供智慧和方案。气候院的工作内容包括对话与交流、战略研究、教育与培训三大板块，已经成功打造“气候变化大讲堂”、“巴黎协定之友”、“世界大学气候变化联盟”等品牌旗舰项目，开展了“中国低碳发展及转型路径”、“气候与环境协同治理”等战略研究，搭建了“甲烷减排合作平台”和“应对气候变化的基于自然解决方案”合作平台，并组织了两期南南气候合作培训班。经过近三年的成长，已经形成了国际品牌影响力、国内外资源整合能力和专业研究实力三大优势，成长为领域内知名智库。



扫码关注
ICCSd公众号



清华大学气候变化
与可持续发展研究院
INSTITUTE OF CLIMATE CHANGE
AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT
TSINGHUA UNIVERSITY

www.iccsd.tsinghua.edu.cn

