



METHANE
GUIDING
PRINCIPLES

甲烷减排指导原则

甲烷减排：最佳实践指南

识别、检测、测量及量化

二〇二〇年九月

翻译：北京市燃气集团有限责任公司
Beijing Gas Group Company Limited

校译：美国环保协会
Environmental Defense Fund

免责声明

本文件由甲烷减排指导原则伙伴关系编写。每篇指南总结了截至发布之日已知的减排措施、成本和现有技术，上述内容可能随时间改变或改进。文中包含信息为作者已知最准确的信息，但不代表甲烷减排指导原则签字方或支持机构的观点或立场，读者需自行对所提供的信息进行评估。SLR国际公司及其承包商、甲烷减排指导原则或其签字方或支持机构对本指南中包含信息的完整性或准确性不提供任何保障。

每篇指南描述了甲烷排放管理的相关措施。指南不包含任何强制性的行动或措施建议，只提供甲烷排放管理的有效办法。在特定的条件或情况下，其他方法可能同样/甚至更加有效。读者的选择通常取决于具体情况、需要管控的特定风险以及适用法律。

译校团队尽量忠实原文并提供准确信息，如有不清楚之处，请参考英文原文。译校团队对本指南中文版中包含信息的完整性或准确性不提供任何保障。

目录

术语.....	2
摘要.....	4
简介.....	5
方法.....	7
持续改进.....	20
案例研究.....	21
检查清单.....	31
附件.....	32
参考资料.....	35

术语

资产 (Asset)

天然气公司所拥有的实物设施，如企业开展天然气生产、加工、运输、储存、输配等工作所配备的相关设备。

检测 (Detection)

使用甲烷传感设备检测潜在的甲烷泄漏源。

下游 (Downstream)

天然气供应链的下游环节/部门，主要负责输配管网，即通过城市燃气干线、支线、计量仪表等向终端用户输送天然气。

新兴技术 (Emerging technology)

新面市的减排技术，或已经问世但尚未广泛应用的技术。技术在不断进步，一些目前被认定为新兴的技术，可能很快获得广泛应用。

识别 (Identification)

基于系统中已知的、设计存在的排放源，以及对无意产生的、非设计范围内的排放源进行勘测，编制系统的排放源清单（在某些情况下也称为“泄漏检测”）。

排放清单 (Inventory)

已知的全部排放源及其排放速率的记录。排放清单提供指定某个时间段内的排放情况汇总。

方法 (Method)

用于检测、测量或量化的一项技术或者一系列技术。

测量 (Measurement)

测量甲烷排放。测量可针对任何变量（体积、浓度、质量、频率等）。

中游 (Midstream)

天然气供应链的中游环节/部门，主要包含天然气长输、储存和LNG接收站。某些情况下，还包括燃气加工厂。

检测下限 (Minimum detection limit, MDL)

检测下限（MDL）指能被可靠检测出的最低浓度或最小排放率。

天然气供应链 (Natural gas supply chain)

天然气从生产到输配，从井口到用户端的全工艺流程。

开路 (Open path)

传感器发出光束，通过光吸收的作用检测光束路径中的燃气。开放路径长度可能从几米到几百米。

被动/主动 (Passive/active)

描述使用电磁频谱检测甲烷的传感器。被动型传感器测量物体存在的自然辐射，而主动型传感器本身带有检测辐射源。

单点式传感器 (Point sensor)

检测某个地点甲烷浓度的感应器。感应器可能是便携式设备的组成部分，也可能是固定在某个地点的设备。

监测方案 (Program)

燃气公司选择用于识别、检测、测量、量化甲烷排放的方法组合。方案可包括几种勘测和测量技术或工艺，还包括各类量化方法，用于确定每个识别出的排放源的排放率。方案描述并跟踪排放情况。

量化 (Quantification)

确定排放率。可以通过直接测量或间接计算或建模对排放进行量化。

排放率 (Rate)

单位时间内的甲烷排放量。

扫描 (Screening)

以识别排放源为主要目的进行的评估。在多数语境下，扫描等同于勘测(Survey)。在部分监管条例中，扫描仅适用于相对宽松或不太灵敏的检测方式，如AVO（听看嗅检测法）。

部门/环节 (Sector/Segment)

天然气供应链的某个部门,其中包括生产、集输、加工、长输、储存、LNG液化及再气化接收站以及输配。

光谱测定法 (Spectrometry)

测量波长以及电磁辐射的强度。

勘测 (Survey)

使用检测设备和测量技术检验资产中是否存在泄漏的迹象。

可调二极管激光吸收光谱 (TDLAS)

可调二极管激光吸收光谱 (TDLAS) – 用于测量某种分子浓度的技术，如测量混合气体中甲烷和水蒸汽的组分。

上游 (Upstream)

天然气供应链的上游部门/环节，包括天然气生产和集输。某些情况下，还包括燃气加工厂。



减少甲烷排放的关键一步是识别和检测排放源。然后对排放源进行测量、量化和记入排放清单，这是安排甲烷减排工作优先次序的起点。

本指南简要描述了识别、检测、测量和量化甲烷排放的方法，并提供了其他详细阐述相关减排技术和方法的资料。识别、检测、测量和量化的最佳实践取决于：

- **设施的特点**
- **排放量级**
- **减排方法的成本效益**

方法的选择也可能取决于监管要求，以及监管规定的减排办法是否可以被替代还是只能通过附加的自愿检测方法进行补充。本报告的案例研究部分介绍了相关机构根据天然气供应链不同环节制定的各类识别、检测、测量和量化程序（IDM&Q程序）。

针对识别、检测、测量和量化排放的流程以及排放清单记录的具体情况，应该定期进行更新改进，纳入新的信息并跟踪减排进展。

通过识别、检测、测量和量化制定甲烷减排最佳实践策略：

- ✓ 识别已知排放源和排放清单中潜在的排放源。
- ✓ 排查已知和潜在的排放源，以检测实际排放情况。
- ✓ 通过直接测量排放率，或使用测量、计算和模型分析综合方法间接量化甲烷排放。
- ✓ 使用量化的信息创建或更新排放清单。
- ✓ 定期更新、完善IDM&Q程序。

简介

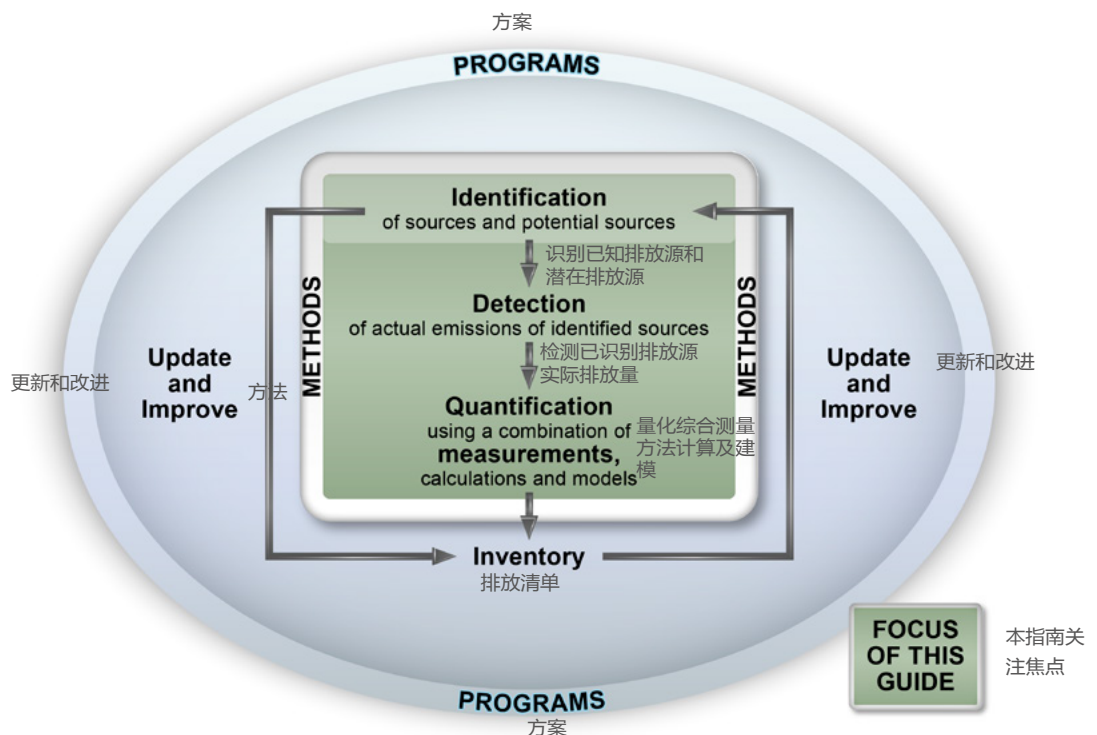
天然气产业链甲烷排放源包括：

- **放空**（将燃气排放至大气中）
- **逃逸性泄漏**（设备泄漏，一般是由于连接处封口，如法兰垫片、螺纹连接、阀门杆盘根等存在缺陷或日常磨损造成的泄漏，或阀门安装不当、聚乙烯管网（输配管网）逸散性泄漏）
- **不完全燃烧**（燃气引擎或燃气涡轮机的废气中含有的未完全燃烧的甲烷）
- **火炬燃烧**（火炬用于燃烧原本被直接排放到大气中的甲烷；不完全燃烧导致甲烷排放）

以上排放源的减排方法在甲烷减排指导原则伙伴关系（MGP partnership）¹最佳实践系列中其他篇章中有详细介绍（详见 <https://methaneguidingprinciples.org/best-practice-guides>），其中关键要素都包含如何识别、检测、测量、量化和跟踪排放情况。

由于天然气产业链中排放源分布广泛，识别、检测、测量、量化排放的方法也不尽相同，尤其是针对跨部门、不同类别的资产。方法的选择也取决于排放信息是用于自愿减排、建立详细的企业排放清单，或者是为了满足某项监管规定而采用的某个具体方法。

图 1.IDM&Q管理的方案及方法



如图1所示，识别、检测、测量和量化排放的方法有助生成全面的排放清单，及清单的定期更新和完善。

本篇指南主要针对图1中深绿色部门内容，对浅绿色内容也有部分涉及。

本指南主要关注识别、检测、测量和量化的方法。术语描述如下：

识别和检测：某些排放源是天然气系统设计中已知存在的排放点。对系统设计的分析即可识别排放源。另一些排放源为非设计排放，通过检测和勘测来识别非设计排放源和确定已知的排放源。

测量和量化：量化排放有多种方法。一般量化的方法有测量工艺过程气体或环境空气中的甲烷浓度，其他测量方法还包括测量工艺过程气流速率与风速对比。排放率量化可以通过直接测量排放源，或者综合运用多种测量、计算、建模的方法实现。

方案：即制定、更新、完善排放清单的过程：全面的方案往往综合运用多种方法来识别、检测、测量和量化排放。获得的信息用于建立排放清单，并对清单进行定期更新和完善。

本指南内容范围：

本指南简要描述了识别、检测、测量和量化甲烷排放的最佳实践及相关方法，提供更多方法的详细介绍链接以及相关案例。简要总结各类方法的优缺点，并对不同部门使用的识别、检测、测量、量化方法的相关报告给出了细节。

案例研究则展示了天然气价值链上的相关机构所制定的适应其需求的各类减排方案。本指南最后提供了IDM&Q方案制定和执行的步骤清单。

方法

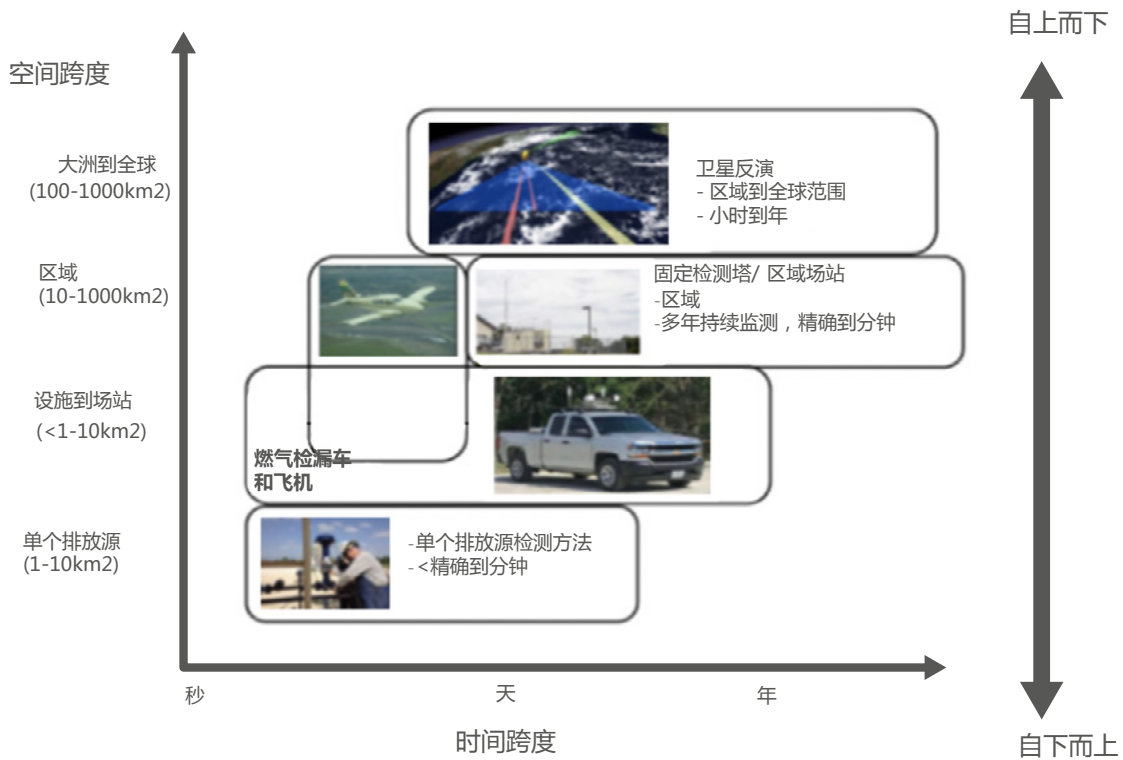
检测、测量和量化方法

检测、测量和量化排放的方法因规模而异，有些检测方案用于单个排放源，有的可能针对区域性或全球性的大规模排放检测，如图2所示。

适用于大规模排放检测、一般针对多个排放源同时实施的测量方法，称为自上而下的排放评估。适用于单个排放源、然后在场站或区域级别进行排放量汇总的检测方法一般称为自下而上的排放评估。自上而下和自下而上的评估都各有优劣。自下而上的评估可以提供单个排放源的详细信息，设备类别和运营情况。这种方法可以支持下一步减排详细计划的制定工作，但是可能会遗漏意料之外、计划外或非典型性的排放源。自上而下的评估一般欠缺单个排放源的详细信息，但是可以提供场站或区域的整体排放信息。自上而下的评估方法根据方案覆盖规模可包含非天然气产业链的甲烷排放量，因此在解读自上而下排放评估结果时，以及与自下而上评估结果对比时需要对其单独考虑。本指南提供了自上而下和自下而上两种评估方式相结合的案例。

检测、测量、量化排放的方法还会因时间而异。一些检测排放的方法只提供甲烷排放的“快照”（Snapshot），其他检测方法则可能提供重复发生和持续的检测结果。“快照”在验证减排活动效果时较为适用，例如检验消除排放源的减排效果（如，用压缩空气替代燃气气动设备的减排措施）。一些排放源可能是间歇性和/或重复性排放，因此增加检测频率和修复可以改善检测结果，并大量减少排放。最佳的检测、测量和量化排放的频率实践取决于某个设施排放源的特点、方法的成本效益和监管要求。

图 2. 多种空间和时间跨度的排放检测、测量、量化方法（根据参考文献2改编）



检测

表1总结了检测排放源的方法，包括手持设备、车载设备、无人机或飞机、卫星搭载设备等，通过在固定点或在开放路径上使用被动传感器或主动传感器进行检测，有的还可能涉及成像。这些检测方法使用一系列传感技术。某些方法适用于天然气价值链上每个环节，而某些方法则更有针对性。本指南不对每种方法进行详细描述并阐释其优缺点，但是在附件中提供了相应文献的链接。

评估这些方法的单位为专业机构或行业组织如美国州际技术监管理事会(ITRC)，³ MARCOGAZ（欧洲天然气行业技术协会），⁴ 以及美国全国公用事业监管理事协会(NARUC)。此外，检测方法测试中心信息链接，⁶ 美国国家科学、工程和医学科学院(NASEM)² 等机构的信息摘要也包含在内。

表1中列举的部分检测技术为新兴技术，尚未得到广泛应用。

表1: 甲烷排放检测方法

勘测类型（以及部署方式）	检测方法	主要功能	是否能量化排放率	检出的可能性	使用该方法的部门
人工步行勘测，用于单个排放源	开路	检测泄漏及放空排放	可能	高	全产业链各部门
	单点式传感器		可能	高	全产业链各部门
	(羽流成像 (气体光学 (被动式)		可能，但需要辅以其他工艺	高	全产业链各部门
	皂膜检漏		否	在已知大致泄漏位置的情况下检测可能性高	全产业链各部门
	超声成像		否	中	全产业链各部门
定点检测仪（围栏式检测法）	开路	检测非常规事件（有可能识别排放源）	可能	高	上游和中游（对中游部门而言，这种检测方法是新兴技术）
	定点检测		可能	高	上游和中游（对中游部门而言，这种检测方法是新兴技术）
定点检测仪（地区或区域）	开路	检测非常规事件（有可能识别排放源）	可能	中	上游和中游（对中游部门而言，这种检测方法是新兴技术）
	定点检测		可能		

方法

勘测类型（以及部署方式）	检测方法	主要功能	是否能量化排放率	检出的可能性	使用该方法的部门
检测车勘测	开路	检测场站的总排放量	是	中	全产业链各部门
	单点式传感器	检测场站的总排放量	可能	中到高	全产业链各部门
	羽流成像	识别排放源	可能，但需要辅以其他工艺	高	全产业链各部门
无人机勘测（无人机，一种小型飞机，通过远程或机上载有的计算机控制）	开路	替代步行勘测	可能	中	全产业链各部门（对上游和中游部门而言，这种检测方法是新兴技术）
	单点式传感器	替代步行勘测	是	中到高	上游和中游（对中游部门而言，这种检测方法是新兴技术）
	羽流成像	识别排放源	可能，但需要辅以其他工艺	高	全产业链各部门（对下游部门而言，这种检测方法是新兴技术）

勘测类型（以及部署方式）	检测方法	主要功能	是否能量化排放率	检出的可能性	使用该方法的部门
飞机勘测	开路	识别排放源	可能	高	上游
	单点式传感器	识别排放源	可能，取决于所使用的技术	高(不同技术检测限不同)	全产业链各部门 (对中下游而言，这种方法是新技术)
	羽流成像	识别排放源	可能，但需要辅以其他工艺	高	全产业链各部门 (对中下游而言是新技术)
卫星勘测	羽流成像	检测某一区域总排放	可能，但需要辅以其他工艺	待定；最低检出阈值高	全产业链各部门 (对于全产业链各部门而言均为新兴技术)

测量及量化

表2总结了测量和量化排放源排放率的相关方法。其中有些与检测方法相关联，量化是检测勘测的一部分。另外有些方法使用了独立的量化技术，与检测勘测方法和技术没有任何关联。独立量化的例子如使用 Hi Flow™ Sampler 设备，在识别排放源后用该设备量化排放。

表2中对列举的量化方法的评估工作是由美国州际技术监管理事会（ITRC）、MARCOGAZ、NASEM 三家机构共同承担。²⁻⁵其他信息来源请见附件。

表2列举了与表1同样类型的检测勘测方法，从步行勘测到卫星监测。但是表1中部分检测方法不能用于测量排放率，因此没有纳入表2。表格中还说明了每种测量量化方法的常见优缺点。企业应该根据具体应用场景来评估减排工艺是否适用。

检测和量化方法使用一系列传感技术，在报告附件表格提到的研究报告里有说明，但没有任何一篇报告选择单个最佳实践或多个推荐的减排措施。各类传感技术的详细信息不在本指南覆盖范围内。

表2: 排放源的测量和量化

勘测类别（部署方式）	技术	测量/量化方法	准确度	优缺点	适用部门
人工手持设备 步行勘测，用于单个排放源	嗅探采样器，例如火焰离子检测器 (FID) 或高灵敏度的半导体,探测空气中甲烷浓度	间接。通过公式从浓度得出排放率，或将浓度与速率关联或通过使用泄漏/无泄漏排放因子	中到高	优点：有诸多记录在册的检测方法，如模型/关联因子 EN15446, 都属于间接量化方法 缺点：需要勘测后进行计算和公式推导	任何部门的地面设施
	流量采样器（Hi Flow是一种吸入全部排放气体直接得出泄漏率的仪器）	直接	高	优点：实时排放率 缺点：Hi Flow™ Sampler(HFS) 已停产；已知存在技术问题；耗时长	所有部门，但是对于许多小型输配系统泄漏量化灵敏度不足

方法

勘测类别（部署方式）	技术	测量/量化方法	准确度	优缺点	适用部门
人工手持设备 步行勘测，用于单个排放源	光学气体成像技术，结合实时成像处理技术（OGI+QOGI）（一项新兴量化技术）	间接	低到中	优点：实时排放率估测 缺点：置信度低；高度依赖环境条件；极端大规模泄漏量化效果差；需对人员进行专门培训	所有部门 但通常灵敏性不能满足小规模输配系统的泄漏检测
	质量流量计，毕托管，或其他流量计。插入排放源气流，如排气管	直接	高	优点：直接流量测量 缺点：往往存在如何安全接入排放源的问题	具有排气管的任何工艺部门
	气体采样袋	直接	高	优点：材料价格低、测量准确度高 缺点：耗费时间、人力	如果泄漏规模满足条件，则适合所有部门

勘测类别（部署方式）	技术	测量/量化方法	准确度	优缺点	适用部门
人工手持设备 步行勘测，用于 单个排放源	质量流体采样箱 （一种覆盖在泄 漏管道外部的采 样箱，通过抽取 采样箱内部空气 从而检测浓度）	直接	中	优点：不需要依赖 大气模型 缺点：仅能量化覆 盖范围内的排放； 消耗人力；假设除 去土壤吸收的甲 烷，所有泄漏气体 都被捕获和测量	长输和输配中 地下管道泄漏
	超声成像（对 所有部门而言都 是一种新兴技术）	间接	未知， 可能是中等	优点：实时、快 速 缺点：新技 术，仍在评估 过程中；需要一 定程度降压；针 对甲烷的软件 仍在开发阶段。	所有部门
定点检测仪围 栏式检测法	开路光吸收	只能间接。可 以结合建模 和气象信息	中	优点：现有技 术 缺点： 价格昂贵	在人口密集 地区运营地 面设施的上 游和中游部门
	单点式传感器（对 于所有部门都 是一种新兴检测 方法）		中	在研发中	

方法

勘测类别 (部署方式)	技术	测量/量化方法	准确度	优缺点	适用部门
	点式 单 ž				
				方法	
				↑ ↑	所有部门，但是主要在上游和中游使用。

勘测类别（部署方式）	技术	测量/量化方法	准确度	优缺点	适用部门
<p>无人机勘测 （无人机，一种小型飞机，通过远程或机上载有的计算机控制）</p> <p>（有诸多不同无人机检测技术，但是只有少数几种方式可以提供量化结果。因此，未纳入本表）</p>	质量平衡模型（飞行路径覆盖排放源的逆风和顺风点进行测量）	直接	低	<p>优点：相比更大规模自上而下的方法价格便宜</p> <p>缺点：供应商少；需要适宜的大气条件</p>	上游和中游

方法

勘测类别（部署方式）	技术	测量/量化方法	准确度	优缺点	适用部门
飞机勘测	飞行路径覆盖顺风 和逆风点，使用 质量平衡模型	直接	中（如果整个 场站都能在飞 行路径中覆 盖，则准确度 高）	优点：同行审议认 可的方法 缺点：价格昂贵； 需要良好的大气条 件；供应商少	所有部门 输配部门 较少使用
	被动式光吸收	间接 使用羽流成像 建模	低	优点：有数个供应 商 缺点：最低检出阈 值高；不确定性高	所有部门
	主动式光吸收	间接 使用羽流成像 建模	中	优点：经证实的技 术 缺点：供应商少	所有部门

勘测类别（部署方式）	技术	测量/量化方法	准确度	优缺点	适用部门
卫星勘测（其他可检测甲烷的卫星已经排上发射日程）	光谱测定法 TROPOMI （参见脚注）	间接。 羽流成像建模	中	缺点：需要对于卫星采集到的信息进行大量处理，才能估算出排放量	所有部门
	光谱测定法 MethaneSAT甲烷监测卫星将于2022年发射 （对于所有部门都是新兴技术）	间接 涉及大量数据处理	未知	优点：免费、频繁更新，为公益目的（仅MethaneSAT） 缺点：暂未发射；需要对于卫星采集到的信息进行大量处理，才能估算出排放量。 预期排放率数据将有延时	所有部门
	光谱测定法（WAF-P广角影像泊罗分光仪）GHGSat （对所有部门都是新技术）（其他可检测甲烷的卫星计划发射，如其他GHGSat系列，以及GOSAT-3, GeoCarb, MERLIN, EarthCARE, CarbonSat, GEO-CAPE 以及 Metero 系列卫星）	间接 量化数据或许在分析后增加	未知	优势：已经在役 缺点：付费使用；目前轨道上微型卫星有限；最低检出阈值高	所有部门

译者注：搭载在Sentinel-5 Precursor (S5P) 卫星上的对流层监测仪，是第一个大气组分监测仪。卫星于2017年10月13日发射，计划飞行时间7年。

持续改进

通过对甲烷排放识别、检测、测量、量化建立起设施、企业、区域的排放清单。排放清单定期更新，反映出设备及运营的变化等相关新的信息。

新信息的出现有利于更新和改善自下而上评估方法的内容，包括新的检测方法、更新设备平均排放速率（排放因子）、评估排放新模式等新研究和创新。具备改良信息后，又可以相应的更新排放清单。

自上而下的评估信息可以用于对排放清单进行周期性的更新和改进。大量测量研究显示，天然气供应链上一小部分场站或一小部分某类设施导致了绝大部分的排放。根据美国经验，5%的排放源贡献了总排放量的50%^{2,7}。上述排放源被称为超级排放源，有时并没有在排放清单中体现出来。随着卫星监测和其他自上而下的评估方法日益常规化，可以比对自下而上方法建立起来的排放清单和独立的自上而下量化结果。虽然这可能具有一定的挑战性，但是可以为甲烷排放清单的持续改进提供指导。

案例研究

本指南中的案例研究来自天然气价值链的不同部门，代表当前的操作实践并说明一系列识别、检测、测量、量化的方法。

部分案例包含了多种技术。表3总结了案例研究适用的部门及勘测类别。案例经过筛选，以确保全面覆盖各个部门以及不同勘测类别。

表3: 各部门和勘测类别的案例研究

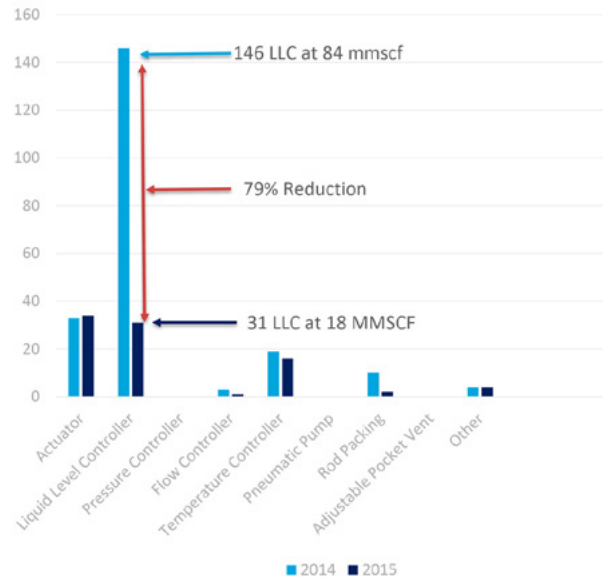
勘测类别	工业部门			
	上游	长输及储存	输配	LNG 接收站
步行	案例 1	案例 4 和案例 5	案例 6	案例 7
定点勘测	案例 2			
检测车	案例 2		案例 6	
无人机	案例 2			
飞机	案例 3 和 案例8	案例 8	案例 8	
卫星	案例 8	案例 8	案例 8	

案例 1:上游 (生产和集输)

案例研究: 美国西南能源公司(SWN) ‘智能 LDAR’ ——比监管要求更上一层楼



通过使用Hi Flow™采样器，公司实现了减排量化。还减少了其他设备的逃逸性泄漏，但减排量相对小很多。



项目描述： 应美国联邦法规(NSPS 0000a)的要求，西南能源公司自2014年开始对新建及改建后的井场和集输压缩站使用光学气体成像 (OGI) 技术进行勘测。西南能源公司在监管规定的基础上，额外增加以下要求：

- **勘测范围包含所有现有的场站，监管条例中不包含此项要求**
- **在光学气体成像泄漏勘测中增加以下内容：**
 - 用附加的开路激光仪器进行重复勘测
 - 针对识别的泄漏点，使用HiFlow™采样器对其排放速率进行量化
 - 气动控制器纳入勘测范围

成效： 西南能源公司成功识别出产生故障的气动液位控制器 (LLC) ，在一年内将此类设备排放量减少了79%，相应排放量减少了1.15亿标准立方英尺/年。

成本： 西南能源公司每年在监管要求以外新增的减排支出约为50万美元。每年节省的燃气价值约为25万美元，因此该项目的回报率为负。

经验： 西南能源公司员工分为两个小组——一个组负责井场，另一个组负责中游集输站。每年都对场站进行实地勘测。西南能源公司认为这项投资产生了许多其他非货币回报，并认为使用开路式激光作为补充检测方法极大地增加了泄漏点识别的数量、泄漏的验证，以及团队效率。

来源： 西南能源公司向美国环保署提交的报告，详见：https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-11/documents/15.jordan_2017aiw.pdf

案例2：上游（生产和集输）

案例研究： 甲烷检测技术现场试验（XTO/埃克森美孚）



项目描述： 随着泄漏检测与修复项目（LDAR）的扩大，改进场站覆盖率、数据跟踪、响应速度和总成本效益的新技术日益受到关注。新兴技术的开发者研发了数个新的甲烷排放检测、测量和量化系统，以此作为回应。埃克森美孚公司自愿实施了一个高于监管要求的泄漏检测与修复项目。他们在进行常规勘测和下风向测量的同时，试验了三种不同的检测技术(车载、无人机和固定位置系统)。

成效： 使用无人机载传感器、定点下风向传感器、车载传感器和移动下风向探测器来估算排放。针对德克萨斯州东部干气生产地区的几个作业井区，将以上排放探测和量化结果与使用光学气体成像方法检测的结果进行对比。尽可能在同一时间收集不同方法取得的检测量化结果，并使用Hi Flow™仪器在试点地区对排放进行量化，以验证上述检测方法。对甲烷排放检测、定位(溯源)和量化技术进行了比较。



成本： 未报道。

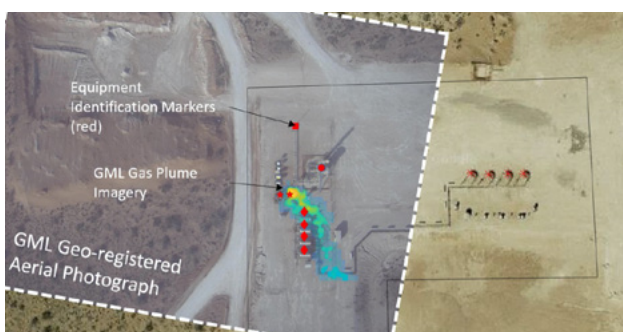
经验： 无人机检测、下风向检测和常规检测及量化方法所记录的排放分布一致。新兴的中高频监测技术能更快检测和分析出排放趋势，在识别排放源方面往往优于光学气体成像技术。下风向取样可以识别场站的排放，无人机技术可以精准定位产生排放的设备并进行量化。但光学气体成像技术仍然在识别泄漏部件方面发挥着重要作用。



来源： 甲烷检测技术实测观察（‘Insights from a field trial of methane detection technologies’），美国地球物理联合会年会，旧金山 – 作者：EE Tullos, S Aminfard, FJ Cardoso-Saldaña, D Allen, I Mogstad, L DeWitt, B Flowers, SC Herndon, A Scott, S Elms, and B Smith - 2019年12月

案例分析3：上游（生产和集输）

案例研究： 航空甲烷探测技术实地测试
(XTO/埃克森美孚)



项目描述： 2019年，埃克森美孚公司使用飞机搭载LiDAR™（一种主动式开路检测技术）气体检测装备，对二叠纪盆地(西德克萨斯州和新墨西哥州东南部)进行了一项航空勘测，旨在了解目标地区甲烷排放的频率和排放量。

成效： 将拍摄的排放图像与机载摄影机拍摄的505个井垫设备的识别和定位照片进行叠加，通过分析航拍照片中的设施类型，建立排放与设备类别的关联，例如储罐、油气井、火炬、分离器、压缩机和其他（未列出类别）的设施。最终分析结果为所识别出来的每个排放源都进行了量化估算，并溯源到各设备。

成本： 未报道

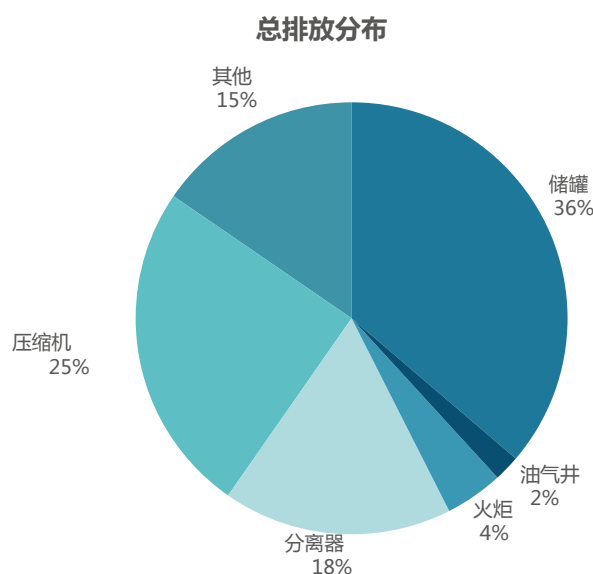
经验： 这种扫描式勘测法可以快速识别泄漏，在24小时内得出初步结果，一周内估算排放。有些识别出的排放源，如压缩机，是可预见的；而有些排放源如火炬燃烧等则在意料之外。另外，需要进一步对储罐排放进行分类，因为安装有效蒸气控制系统的储罐不应产生排放；对于那些允许不采取排放控制的储罐，其排放已经在预期内。

结果还显示，在勘测区域内，非埃克森场站的储罐系统在总排放中所占的比例要比埃克森美孚场站大得多（非埃克森美孚排放占78%，埃克森美孚占36%）。

资料来源： EE Tullos, ExxonMobil, 2020年5月

设备	泄漏设备计数	% 泄漏设备在同类设施中的占比
储罐	512	7.4
油气井	313	1
火炬	65	6.2
分离器	310	6.1
压缩机	39	64.1
其他*	33	100

* ‘其他’ 只包括发现泄漏的设备中未分类的部分，不是场站中所有其他设备。



案例4：中游（长输、地下储气库、LNG接收站）

案例研究： Snam 的“排放识别和量化的最佳实践”

项目描述： Snam与燃气研究院（Gas Research Institute）以及美国环境保护署

（Environmental Protection Agency）共同开发排放识别量化方法。并与美国Radian公司合作完成对Snam资产和有代表性的管网进行实地测量。从2018年开始，Snam启动管网泄漏勘测，在2019到2020年期间完成了大量勘测工作。勘测主要方式是使用火焰电离检测器（FID）嗅探设备进行检测，并对某些排放采用HiFlow采样器（HFS）对排放率进行量化。估算汇报逸散泄漏时使用了关联系数。还使用了气袋法，以及鼓风机速率和FID测量相结合的方法进行测量。

成效： Snam以实地测量为基础，改进了排放核算系统。两年共检测15万余个部件。根据这些数据，Snam更新了排放因子。在此基础上，正在开展新一轮实地测量。

成本 Snam年均花费20万欧元开展上述活动。

经验： SNAM更好地了解其资产中的主要排放源，并制定了减排计划，替换特定部件。Snam还开展LDAR项目，识别甲烷泄漏并规划维修维护。结果如下：

- 通过持续实施管网减压站安装/更换球阀项目，减少管网泄漏造成的排放(2019年减少排放0.8Mcm)。项目减少了由于排污阀内部气密性不足造成的减压站过滤排污系统甲烷逸散。该方案于2017年至2020年实施，四年内改造351个减压站，共计节省2.5 Mcm的天然气；
- 减少减压系统尤其是储气设施中的甲烷排放；
- 2020年新计划开展应用LDAR技术的减排项目。

资料来源： Snam自2019年起的年度气候变化报告，《Snam in the Task Force on Climate-related Financial Disclosure》。了解更多详情，请参见SNAM网站：

https://www.snam.it/en/Sustainability/strategy_and_commitments/task_force_CFD.html

案例分析5: 中游 (长输, 地下储气库、LNG接收站气化设施)

案例研究: Enagás是西班牙的天然气基础设施公司, 运营12,000公里的天然气管网, 19个压缩站, 493个调压计量站, 三个地下储气库和四个LNG气化厂。自2013年以来, Enagás自愿开展年度碳足迹的计算和核证, 其中包括甲烷排放量。



项目描述: 2013年之前, Enagás甲烷减排主要出于安全要求。由于甲烷逸散泄漏是碳足迹的重要组成部分, Enagás决定在2013-2015年开展首次 LDAR减排行动。该行动覆盖所有LNG接收站、地下储气库, 和一个作为样本的长输管网基础设施。项目开展得到了外部支持。

Enagás最初使用两种不同的技术对逸散泄漏进行测量—HFS (Hi Flow™ 采样器) 和高灵敏度半导体传感器的便携式检测器。在后来的减排行动中, Enagás决定改用便携式探测器测量排放, 因为HFS非常耗时。目前使用便携式检测器和OGI (光学气体成像) 相机进行泄漏检测和测量。量化则依照标准EN15446, 通过使用便携式设备读数中的相关系数来估算每处检测到的泄漏的排放率。



成效: 根据首次LDAR项目中获得的经验, Enagás 在过去几年中又开展了几项其他减排项目。2019年, Enagas通过维修设备, 减少了140吨的排放。自2013年以来, 逸散泄漏减少了47%。

为提高减排频率, Enagás现在将LDAR作为内部维护项目的组成部分 (即对西班牙境内运营设施每年开展一次LDAR), 并持续改进。

成本：开展LDAR项目的费用约为每年20万欧元。

经验：从LDAR项目中得到的经验如下：

- **测量技术、排放因素和相关系数仍然存在很大的不确定性**，也尚不存在标准的方法体系。
- **实地测量是当前最有效可靠的技术，适用于**泄漏检测，量化排放和减排措施。
- **开展LDAR项目的频率也是减少逸散泄漏的决定性因素**，对于需要在温度变化幅度较大的环境下工作的设备尤其如此。

资料来源： Enagás2019年度报告，参见：
https://www.enagas.es/stfls/ENAGAS/Documentos/Annual%20Report_2019.pdf

案例研究6：下游（输配）

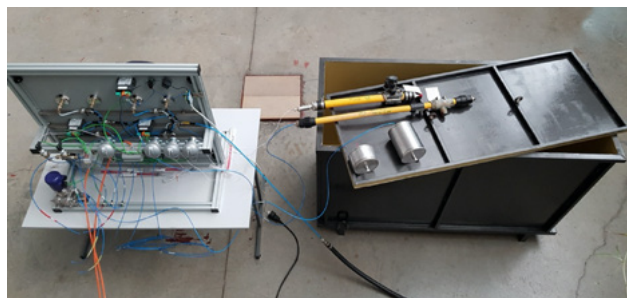
案例研究： NEDGA（一家西班牙燃气输配公司）与SEDIGAS（西班牙燃气协会）合作开发了一套量化常规勘测检测到的地下天然气泄漏流量的方法。

项目描述： 泄漏检测调查通常由车载探测仪或工作人员徒步进行泄漏探测，或同时进行。泄漏检测通常分阶段进行。首先，工作人员在允许的最接近泄漏的地下管道附近步行检测，采集泄露处地面空气样本，以定位泄漏位

置。然后，在检测到气体的区域边缘进行钻探，逐步延伸到区域的另一边，从而确定大致的泄漏位置。钻孔须足够深，穿透路面和混凝土，再将甲烷探测器探头伸入钻孔中。所使用的便携式甲烷检测器配备高灵敏度（0至9,900ppm）的热导传感器，可以检测出0至100%浓度的甲烷，响应时间为20秒。探针必须具有圆锥盖或其他适用的封闭系统，以防止探针进入钻孔后，通过吸入点带入外部空气。



识别出的泄漏会通过研究设定的程序进行量化，该程序用于计算燃气管网各部分排放因子。项目对钻孔中泄漏产生的气体流量进行计算，但未考虑泄漏的气体如何到达地面。他们将部分泄漏管道从地下挖出，在实验室条件下进行压降实验，实验条件设定为管道实地运营的压力和温度，以确定净泄漏速率。采集的实物样本是全部泄漏点的一部分，但是通过仔细选择样本，可以代表发生泄漏的各种管道建设和运行条件，如运行压力，设备材料，设备尺寸和泄漏部位（管道，阀门，联轴器，焊接处等）。



成效：SEDIGAS创建了泄漏部件及其特征的数据库，并将部件按照类别及运行条件与平均泄漏率进行关联。因此，一旦检测到泄漏，可以直接从该数据库中调取泄漏率数据。

成本：SEDIGAS 计划为本项目投入15万欧元。

经验：整个管网可以更好地实现泄漏量化，为输配运营商量化排放提供合适的排放因子。结果还表明，管网中某些部件（例如连接和接头），需要进行维护。

来源：由NEDGA和SEDIGAS发布的报告《燃气输配管网的逸散排放评估报告》（Evaluation of fugitive emissions in gas distribution networks）。

案例7：LNG系统

案例研究：Enagás LNG 接收站运营商 – 甲烷排放管理和减排。

项目描述：管理和减少甲烷排放是Enagás企业文化的组成部分，体现在公司管理的所有层级。Enagás目前运营和维护三个LNG再气化工厂。

Enagás将甲烷排放分为三类：逸散泄漏、放空和不完全燃烧。Enagás在LNG接收站的日常运营、LNG装卸等活动结束、设备启动及维护活动中，采用 Sensit便携式探测器（单点式传感器）进行排放检测。

根据排放类别、相关的设施类型确定LNG接收站的具体量化方法和减排方式。

• 识别逸散泄漏

泄漏检测和测量是通过便携式探测器和OGI摄影机实现的。自2020年起，Enagás每年都对西班牙境内（巴塞罗那、カタ赫那、韦尔瓦）所有LNG接收站采用满足欧标EN 15446 的LDAR技术实施减排项目。逸散泄漏在LDAR项目实施中同步得到修复。对于无法立即修复的泄漏，则纳入设施维护计划，并在年底前进行修复，除非修复工程量巨大。

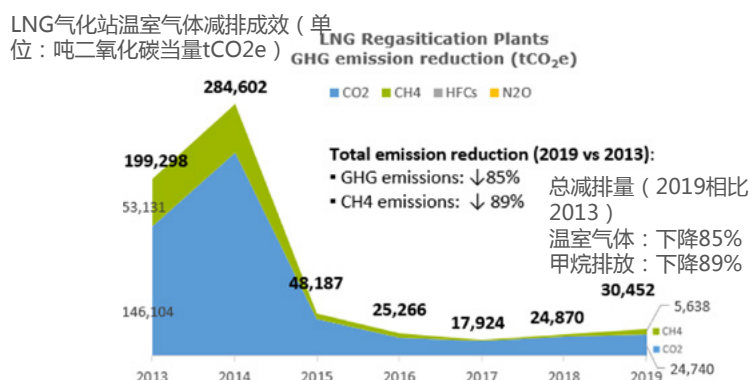
• 量化放空

技术设备，如燃气分析仪的甲烷排放计算过程中考虑燃气的组分、总技术设备数量、以及气体放空总量。在运营和维护放空的情况下，甲烷排放在放空口通过超声流量计进行测量。

• 场站级别测量技术

Enagás开展了一系列场站排放测量相关的合作项目，包括使用车载检测、无人机检测、卫星监测等，旨在将场站直接测量结果与现有不同排放源排放信息进行对比。

成效：2013年起，LNG接收站逸散性排放减少55%，放空排放减少了98%，甲烷排放总量减少89%。还开发了网页版应用程序，专门用于监测和注册LDAR项目中得到的相关信息。该应用程序可估测年度排放率和年度减排量，并根据排放情况优先推荐泄漏修复点。



经验：Enagás综合应用识别、监测、测量、量化的方法，实现了良好的收益。

来源：Enagás。

案例8：匹配自上而下和自下而上的估算方式

案例研究：将自下而上的排放清单与自上而下的测量匹配并实现平衡的方式多种多样又因规模而异。上游生产活动中，可以在单个设施或者在区域或油气盆地范围内进行两种检测方式比较。针对中游地面设施，如压缩站、燃气加工厂、大型计量和调压站等，一般需要在设施级别进行。而对下游输配系统而言，一般需要在区域范围内进行比较，但分析过程中很难区分天然气产业链的排放和其他来源的甲烷排放，也很难区分输配系统内部排放和燃气经计量输送至客户以后产生的排放。

项目描述：比对需求来源于持续改进排放清单的需要，或企业兑现自愿减排的需要。

成效：有案例对自下而上和自上而下的估算方法进行比对。然而，绝大部分相关分析都是北美地区研究的结果。以下主要总结经同行审议后发表的科学论文案例分析。美国国家科学、工程和医学研究院 (US National Academy of Sciences, Engineering and Medicine) 报告中发表过一篇摘要。²

• 上游生产场站和集输压缩站

自上而下估测值一般比自下而上的估测值大。在不同规模上对两种方式进行了比较，包括：

- 自上而下，场站级别测量数百个生产和集输场站。⁸⁻¹¹
- 自上而下的测量方式使用飞机在整个油气田盆地范围内进行测量。^{12, 13} 尽管一些分析认为自上而下比自下而上的得出的测量数值大¹³，也一些分析报告仔细计算排放清单中的间歇不规律排放（尤其是油气井排液卸载时），发现两种方法测量的结果近似。¹²
- 卫星测量服务已经面市，可以检测的区域面积最小可达50 km²。^{14,15} 计划2020年以后发射的卫星预期在空间和时间精度上都会有明显提升。

• 地面长输系统和储气设施下风向测量

显示部分自下而上的排放估算比自上而下的测量数值大，但也有得出排放更小的其他研究。排放量大的场站贡献了绝大多数的排放量。^{16,17}

• 输配

- 管网显示出大量排放特点——城镇里易腐蚀受损的输配管网排放量相比输配管网材质现代化程度高的区域排放量高出25倍。¹⁸
- 对于地下储气库单井密封失效发生的极大型泄漏，研究采用了多种自上而下的测量技术。¹⁹

经验：

- **自上而下验证**：可以发现自下而上评估方法未定性或估算不足的排放。
- **自上而下估测**：应该与自下而上的评估进行比对，两种方法对比的基础是评估时间和空间范围一致。
- **高排放设施集群**：在天然气供应链总排放中可占非常大的比例。如果是由于故障或非正常运营导致的高排放源，在自下而上的估测中往往无法预计。
- **绝大多数自上而下的测量方法目前都仅提供排放快照**：这种方式受空间规模所限，并且价格昂贵。但随着卫星监测、航测勘测、地面监控系统的出现，这种状况将发生改变。

检查清单

以下检查清单用于评估识别和量化方面甲烷减排的进展。

活动	是否完成	该项活动覆盖的场站的占比
✓ 识别排放已知来源，并且对计划外或须避免的排放进行勘测		
✓ 量化已知和已经识别的排放源，直接测量其排放率，或通过结合测量、计算和模型等方式对排放量进行估算		
✓ 用以上信息创建或者更新排放清单		
✓ 定期对排放识别和量化方案进行更新和改进		
a. 将排放源的量化结果与大规模测量结果进行比较		
b. 考虑测试使用可提高识别或量化或降低成本的新兴技术		
c. 使用可能缩短泄漏发生与初次检测的时间间隔的技术		

附件

评估检测、测量和量化技术的研究报告。

研究报告名称	发表时间	涉及部门	主要结论
提升美国人为甲烷排放特征描述 ²	2018	全部	<ul style="list-style-type: none">第3章（甲烷排放测量和监测方法）描述了不同规模的量化方法。第6章（应对甲烷排放特征描述的挑战）提纲挈领地对自上而下和自下而上两种方式比对提出了建议。
创新甲烷检测技术评估 ³	2018	全部	<ul style="list-style-type: none">第4章（应用）讨论了技术的实用性。第5章（评估指南与原则）讨论了在对具体方法进行评估以前，须明确系统目标。针对多项甲烷传感技术的评估摘要以及对18种传感技术对比评估表。
长输和输配系统运营商甲烷排放评估指南 ⁴	2019	长输和输配	<ul style="list-style-type: none">建议针对泄漏、运营排放和事故开展数据搜集活动。第7章提供了18种甲烷泄漏测量与量化的方法对比表。提供了工程估算方法。
燃气行业为甲烷减排作出贡献的方法：马德里论坛报告 (2019年6月5-6日) ²⁰	2019	全部	<ul style="list-style-type: none">••• <p>+%%</p>

研究报告名称	发表时间	涉及部门	主要结论
甲烷排放检测技术样本及天然气输配基础设施检测实践 ⁵	2019	输配	<ul style="list-style-type: none"> 梳理了现有和新兴的泄漏检测技术及操作实践。 制定27种技术对比表（附件A）但该表不提供任何建议指导也不包含全部技术。 是一本“各州能源监管者入门手册”
甲烷检测技术对比单盲试验——斯坦福/EDF移动监测的挑战项目结果汇总 ²¹	2019	全部，但重点在生产	<ul style="list-style-type: none"> 通过现场测试对10种地面或机载检测方法进行对比。 使用单盲控制试验显示全部技术基本都可以有效检测泄漏，10项技术中6项正确地检测出了90%的泄漏。然而，上述技术只在50%的场景下可以识别出泄漏具体设备。 排放量化有进一步改进的必要性，因为绝大部分技术通常只能在排放量极高的情况下进行估算。
替代泄漏检测和修复项目甲烷减排换算量换算框架 ²⁵	2019	全部，但重点在生产	<ul style="list-style-type: none"> 本文提出五阶段的框架，以展示所有新检测技术的相似性。方法包括控制试验法、仿真建模、现场试验。

研究报告名称	发表时间	涉及部门	主要结论
油气上游甲烷逸散排放近距离全覆盖扫描技术评审 ²²	2019	上游	<ul style="list-style-type: none"> 对比了LDAR中使用的六种不同技术：手持设备、定点感应器、移动式地面实验室（MGLs）、无人机（UAVs）、飞机以及卫星。 技术检测阈值从美国环境保护署（EPA）方法21中推荐设备的$<1\text{gh}^{-1}$到GOSAT卫星$7.1 \times 106\text{gh}^{-1}$不等。 在LDAR项目中引入全覆盖扫描式勘测-确认方法，又称为综合监管项目。目前，全覆盖扫描式技术包含定点传感器、MGLs、无人机、飞机等，但是其表现必须在不同环境和运营条件下进行评估后，才能提高检测有效性。
技术指南2号文件：逸散部件和设备泄漏 ²³	2017	全部	<ul style="list-style-type: none"> 列出了五种扫描式泄漏勘测技术。 列出了六种直接测量技术。
油气行业甲烷管理最佳实践指南 ²⁴	2019	全部	<ul style="list-style-type: none"> 在更广层面上讨论技术，如： 自上而下相对自下而上测量方法对比以及测量规模。 推荐检测方法、规划以及减排措施，但是不涉及具体某种检测、测量或量化技术。

参考文献

1. Methane Guiding Principles (MGP), Best Practices Guides (2020). Available at: www.methaneguidingprinciples.org/best-practice-guides/
2. US National Academies of Science, Engineering and Medicine (NASEM), 'Improving Characterization of Anthropogenic Methane Emissions in the United States', National Academies Press, Washington, DC (2018). Available at: www.nap.edu/catalog/24987/improving-characterization-of-anthropogenic-methane-emissions-in-the-united-states
3. Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC), 'Evaluation of Innovative Methane Detection Technologies', 2018. Available at: methane-1.itrcweb.org/
4. MARCOGAZ, 'Assessment of methane emissions for Gas Transmission and Distribution system Operators'. Available at: www.marcogaz.org/app/download/8161672063/WG_ME-485-Assessment+of+methane+emissions+for+gas+Transmission+and+Distribution+system+operator.pdf?t=1588852446
5. National Association of Regulatory Utility Commissioners (NARUC). 'Sampling of Methane Emissions Detection Technologies and Practices for Natural Gas Distribution Infrastructure', an Educational Handbook for State Energy Regulators, 2019.
6. Final Report to US Department of Energy, ARPA-E MONITOR (Methane Observation Networks with Innovative Technology), 2018
7. AR Brandt, GA Heath and D Cooley, 'Methane leaks from natural gas systems follow extreme distributions', Environ Sci Technol, Environ. Sci. Technol. 2016, 50, 22, 12512–12520, doi: 10.1021/acs.est.6b04303
8. D Zavala-Araiza, RA Alvarez, DR Lyon, DT Allen, AJ Marchese, DJ Zimmerle and SP Hamburg, 'Abnormal process conditions required to explain emissions from natural gas production sites', Nature Communications, 8, 14012, doi: 10.1038/ncomms14012, 2017
9. Environmental Defense Fund, PermianMap. Available at: www.permianmap.org
10. CS Bell, TL Vaughn, D Zimmerle, SC Herndon, TI Yacovitch, GA Heath, G Petron, R Edie, RA Field, SM Murphy, AM Robertson and J Soltis, comparison of methane emission estimates from multiple measurement techniques at natural gas production pads, Elementa-Science of the Anthropocene 5. DOI: 10.1525/Elementa.266
11. TL Vaughn, CS Bell, TI Yacovitch, JR Roscioli, SC Herndon, S Conley, S Schwietzke, GA Heath, G Petron and D Zimmerle, comparing facility-level methane emission rate estimates at natural gas gathering and boosting stations, Elementa-Science of the Anthropocene 5. DOI: 10.1525/Elementa.257, 2017

12. TL Vaughn, CS Bell, CK Pickering, S Schwietzke, GA Heath, G Pétron, D Zimmerle, RC Schnell and D Nummedal, 'Temporal variability largely explains top-down/bottom-up difference in methane emission estimates from a natural gas production region', *Proceedings of the National Academy of Sciences* Nov 2018, 115 (46) 11712-1717; DOI: 10.1073/pnas.1805687115
13. RA Alvarez, D Zavala-Araiza, DR Lyon, DT Allen, ZR Barkley, AR Brandt, KJ Davis, SC Herndon, DJ Jacob, A Karion, EA Kort, BK Lamb, T Lauvaux, JD Maasakkers, AJ Marchese, M Omara, SW Pacala, J Peischl, AL Robinson, PB Shepson, C Sweeney, A Townsend-Small, SC Wofsy, and SP Hamburg, 'Assessment of Methane Emissions from the US Oil and Gas Supply Chain', *Science* DOI: 10.1126/science.aar7204, 2018
14. JA de Gouw, JP Veefkind, E Roosenbrand, B Dix, JC Lin, J Landgraf and PF Levelt, 'Daily Satellite observations of Methane from oil and Gas production Regions in the United States', *Scientific Reports*, (2020) 10:1379, doi: 10.1038/s41598-020-57678-4
15. Y Zhang, R Gautam, S Pandey, M Omara, JD Maasakkers, P Sadavarte, D Lyon, H Nesser, MP Sulprizio, DJ Varon, R Zhang, S Houweling, D Zavala-Araiza, RA Alvarez, A Lorente, SP Hamburg, I Aben and DJ Jacob, 'Quantifying methane emissions from the largest oil-producing basin in the United States from space', *Sci. Adv.* 6, eaaz5120 (2020)
16. R Subramanian, LL Williams, TL Vaughn, D Zimmerle, JR Roscioli, SC Herndon, TI Yacovitch, C Floerchinger, DS Tkacik, AL Mitchell, MR Sullivan, TR Dallmann and AL Robinson, 'Methane Emissions from Natural Gas Compressor Stations in the Transmission and Storage Sector: Measurements and Comparisons with the EPA Greenhouse Gas Reporting Program Protocol', *Environmental Science & Technology* 49(5):3252-3261. DOI: 10.1021/e35060258, 2015
17. DJ Zimmerle, LL Williams, TL Vaughn, C Quinn, R Subramanian, GP Duggan, B Willson, JD Opsomer, AJ Marchese, DM Martinez, and AL Robinson, 'Methane Emissions from the Natural Gas Transmission and Storage System in the United States', *Environ Sci Technol* 49(15): 9374–9383 doi: 10.1021/acs.est.5b01669, 2015
18. JC von Fischer, D Cooley, S Chamberlain, A Gaylord, C J Griebenow, SP Hamburg, J Salo, R Schumacher, D Theobald and J Ham, 'Rapid, Vehicle-Based Identification of Location and Magnitude of Urban Natural Gas Pipeline Leaks', *Environmental Science & Technology* 51(7):4091-4099. DOI: 10.1021/acs.est.6b06095, 2017

19. S Conley, G Franco, I Faloon, D.R Blake, J Peischl, and TB Ryerson, 'Methane emissions from the 2015 Aliso Canyon blowout in Los Angeles, CA', *Science*, 351, 1317-1320, doi: 10.1126/science.aaf2348, 2016
20. 'Potential ways the gas industry can contribute to the reduction of methane emissions' GIE and Marcogaz, June 2019. Available at: <https://www.gie.eu/index.php/gie-publications/methane-emission-report-2019/27786-gie-marcogaz-report-for-the-madrid-forum-potential-way-gas-industry-can-contribute-to-the-reduction-of-methane-emissions/file>
21. AP Ravikumar, S Sreedhara, J Wang, J Englander, D Roda-Stuart, C Bell, D Zimmerle, D Lyon, I Mogstad, B Ratner and AR Brandt, 'Single-blind inter-comparison of methane detection technologies – results from the Stanford/EDF Mobile Monitoring Challenge', *Elem Sci Anth*, 7(1), p.37. DOI: <http://doi.org/10.1525/elementa.373>, 2019
22. TA Fox, TE Barchyn, D Risk, AP Ravikumar, and CH Hugenholtz, 'A review of close-range and screening technologies for mitigating fugitive methane emissions in upstream oil and gas', *Environ Res. Lett.* 14 053002, 2019
23. Climate and Clean Air Coalition's (CCAC) Oil and Gas Methane Partnership (OGMP) 'Technical Guidance Document Number 2: Fugitive Component and Equipment Leaks', modified March 2017
24. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) 'Best Practice Guidance for Methane Management in the Oil and Gas Sector', January 2020
25. Fox et al, 'A methane emissions reduction equivalence framework for alternative leak detection and repair programs', *Elementa*, 2019. Available at www.doi.org/10.1525/elementa.369.



METHANE
GUIDING
PRINCIPLES