

UNECE

建立国家层面煤矿瓦斯监测、报告、核查和缓解（MRVM）体系的最佳实践指南



UNECE 能源系列



联合国欧洲经济委员会

建立国家层面煤矿瓦斯监测、报告、核查和
缓解体系的最佳实践指南

ECE能源系列71



联合国日内瓦

2021

©2021 United Nations

All rights reserved worldwide

复制摘录或影印请求请发送至 copyright.com 版权许可中心。

有关使用权和许可（包括附属权利）等其他问询请发送至：联合国出版部门，405东区42街，S-09FW001，纽约，美利坚合众国，邮编10017。电子邮件：permissions@un.org；网站：<https://shop.un.org>。

本文的调查结果、解释和结论均为作者观点，并不一定反映联合国、联合国工作人员或成员国的观点。

本文使用的地名和地图呈现的方式并不反应联合国对任何国家、领土、城市、地区、当局的法律地位的解读，也不代表对边界或边界的划定的任何意见。

联合国欧洲经济委员会负责发布本出版物。

图片来源：封面，英国已关闭的 Tower Colliery, Photostock
第 5 页，图 1.2，美国环境保护署
第 11 页，图 2.5，印度某露天矿场，Photostock
第 15 页，图 3.2，德国乔治·阿格里科拉技术学院采矿后研究中心
第 16 页，图 3.3，Belle，2014 年
第 24 页，图 3.5，GHGSat
第 26 页，图 4.1，美国环保署
第 27 页，图 4.2，大卫·克里迪，2021 年
第 31 页，图 4.3，美国环境保护署

ECE/ENERGY/139 S

书号: E.22.II.9

ISBN: 978-92-1-117287-4

eISBN: 978-92-1-001245-4

ISSN: 1014-7225

eISSN: 2412-0022

前言

自然环境的现状令人堪忧。据国际能源署的预测，如果全球温室气体 (GHG) 的年排放量继续以目前速度增长，到 2100 年，地球的平均温度将比工业化前上升约 2.6°C。目前甲烷 (CH₄) 的排放量尚未稳定，如果继续以现在的速度增长，地球将面临人类历史上前所未有的气候灾难，到本世纪末，地球大气层将变暖约 4°C。人类引起的大气变化会造成严重后果，危及水源供应和粮食生产，或将导致大规模移民和社会不稳定。

现在四分之一的气候变化由人类甲烷排放引发。甲烷一种强效温室气体，百年全球变暖潜能值是二氧化碳的28倍。如果以 20 年为周期进行测量，潜能值将升至 84。如果以瞬时值测量，潜能值将升至 120。全球约60%的甲烷排放是人类活动导致，其中8%来自煤矿。

甲烷减排是限制能源部门对气候影响的最具成本效益的方法之一。但如果无法获得有关排放量和来源的详细可靠数据，就无法设计和实施有效的甲烷政策，所以我们迫切需要建立有效且基于可比方法的国家排放监测和报告体系。《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) 缔约国和致力于实现《巴黎协定》目标，也接受碳核算流程。根据公约，缔约国有义务监测、整理和报告所有主要人为源的排放。

在大多数发达国家，采煤排放包含在国家清单中。清单在确定排放规模、规划减排政策和实施有效行动方面发挥着核心作用。地方层面的监测、报告和核查 (MRV) 计划不仅有助于政府更好地了解当地煤炭开采行业对国家整体甲烷和其他温室气体排放的贡献，还有助于确定最有希望的减排机会，但仅有少数地区建立了此类计划。

联合国欧洲经济委员会致力于帮助各国减缓气候变化，并通过与其他组织合作最大限度地提高缓解的成效。在此，我很高兴推介这份与 GMI 合作开发的手册，本手册是设计量化和报告煤矿瓦斯排放的国家层面实用指南。



奥尔加·阿尔加耶罗娃女士

联合国副秘书长，联合国欧洲经济委员会执行秘书

致谢

赞助机构

联合国欧洲经济委员会（UNECE）是联合国五个区域委员会之一，为北美以及西欧、中欧、东欧和中亚 56 国提供了一个共同打造经济合作工具的平台。联合国欧洲经济委员会的主要活动领域包括：经济合作与一体化、环境政策、森林、住房和土地、人口、统计、可持续能源、贸易和运输。该委员会通过政策分析、制定公约、法规和标准以及提供技术援助来实现目标。成员国在可持续能源委员会讨论煤矿开采和煤矿瓦斯等与能源相关的议题。煤矿瓦斯和公正转型专家组作为委员会的附属机构，定期召开会议，讨论各种问题，并推广煤矿开采生命周期中释放的甲烷（CH₄）气体管理、捕获和利用的最佳实践 (www.unece.org/energy/se/cmm.html)。

全球甲烷倡议（GMI）是一个国际性的公私合作伙伴关系，旨在与全球政府机构合作，推动农业运营、煤矿、城市固体废物、油气系统和废水等五个关键甲烷生产领域的项目开发。自 2004 年启动以来，GMI 与包括联合国气候变化框架公约（UNFCCC）在内的其他国际协议协同合作，共同致力于减少温室气体（GHG）排放。与其他温室气体不同，甲烷是天然气的主要成分，可以转化为可用能源。因此，减少甲烷排放是减少温室气体、提高能源安全、促进经济增长、改善空气质量和提高工人安全的一种具有成本效益的方法。GMI 由 44 个伙伴国家和欧盟委员会组成，约占全球人为甲烷排放量的 70%。在煤矿瓦斯方面，GMI 的煤矿小组委员会汇集了煤矿甲烷回收和利用领域的主要专家，通过一系列研讨会、培训、考察和能力建设活动 (<http://www.globalmethane.org>) 分享有关最新技术和实践的信息。

主要人员

本最佳实践指南的起草工作得到了美国环境保护署（美国环保署）通过 GMI 提供的财政、技术和行政支持。

主要作者包括：

- 大卫·克里迪（David Creedy），Sindicatum 可持续资源公司
- 沃尔哈·罗什恰卡（Volha Roshchanka），美国国家环境保护署及全球甲烷倡议煤矿小组委员会联合主席
- 克拉克·塔金顿（Clark Talkington），先进资源国际公司

以下人员在撰写报告的具体章节时贡献了其知识和经验：

- 贾斯蒂娜·斯沃尔金（Justyna Swolkien），波兰克拉科夫 AGH 科技大学
- 布罗迪·怀特（Brody Wight）和阿迪娜·吉莱斯佩（Adina Guillespe），GHGSat
- 斯特凡·莫勒赫姆（Stefan Möllerherm），德国乔治·阿格里科拉技术学院采矿后研究中心
- 梅雷迪德·埃文斯和纳扎尔·霍洛德（Meredydd Evans 和 Nazar Kholod），美国太平洋西北国家实验室

在 GMI 和联合国欧洲经济委员会煤矿瓦斯与公正转型专家组的指导下，以下人员进行了编审：

- 丹尼斯·穆赫兰（Denise Mulholland），美国国家环境保护署/全球甲烷倡议
- C.厄兹根·卡拉坎（C. Özgen Karacan），美国地质调查局
- 雷蒙德·C·皮尔彻（Raymond C. Pilcher），乌鸦岭资源公司，联合国欧洲经济委员会煤矿瓦斯和公正转型专家组主席
- 迈克尔·柯特（Michael Coté），红宝石峡谷环保公司

联合国欧洲经济委员会项目经理：

- 米哈尔·德拉比克（Michal Drabik），联合国欧洲经济委员会煤矿甲烷与公正转型专家组秘书

赞助机构对澳大利亚政府工业、科学、能源和资源部的尼古拉·麦克弗森（Nicola McPherson）和奥利弗·史蒂文（Oliver Steven）以及英国煤炭管理局的运营总监卡尔·班顿（Carl Banton）和项目经理兼燃气专家雷切尔·诺顿（Rachel Norton）所做的贡献表示感谢。

免责声明： 本文件不一定反映作者本人、作者所属机构或上述审查人员和合作伙伴的立场。

目 录

前言.....	iii
致谢.....	iv
缩写.....	x
术语表.....	xi
概述.....	xiii
1. 引言.....	1
1.1 全球煤矿瓦斯排放和信息来源.....	2
1.2 自下而上的国家监测、报告和核查（MRV）体系.....	4
1.3 MRV和减排.....	4
2. 煤矿瓦斯排放的来源.....	7
2.1 瓦斯流量变化.....	7
2.2 地下作业矿井.....	8
2.3 废弃矿井.....	9
2.4 露天矿场.....	10
3. 煤矿瓦斯排放的监测、报告和核查.....	12
3.1 监测与测量煤矿瓦斯排放.....	12
3.1.1 应用于在营矿井煤炭生产的排放因子.....	12
3.1.2 使用衰减曲线测量废弃矿井的排放量.....	13
3.1.3 使用手持仪器进行测量.....	14
3.1.4 使用连续排放监测系统（CEMS）进行测量.....	16
3.1.5 监测频率.....	18
3.1.6 排放监测的其他考虑因素.....	18
3.2 煤矿排放报告.....	19
3.3 排放数据核查.....	22
3.3.1 使用遥感技术核查.....	23
4. MRV如何支持煤矿瓦斯减排.....	26
4.1 作业煤矿减排.....	26
4.2 关闭和废弃矿井减排.....	27
4.3 MRV在减排中的战略地位.....	28
5. 煤矿瓦斯MRV.....	32
5.1 美国温室气体报告计划（GHGRP）.....	32
5.2 美国加州的总量控制与交易制度.....	35
5.3 英国.....	37

5.4 澳大利亚国家温室气体和能源报告（NGER）	39
5.5 中国国家排放报告系统中的煤炭排放.....	42
5.6 哈萨克斯坦.....	43
6.MRV体系设计的考虑因素.....	45
附录.....	51
附录1：煤矿中使用手持设备进行测量.....	51
附录2：ACM0008，联合国气候变化框架公约批准的煤矿瓦斯减排综合方法	53
附录3：估算废弃矿井瓦斯排放的考虑因素.....	54
附录4：观测甲烷排放和浓度的卫星系统(主动传感器).....	58
参考文献.....	59

表格子目录

表1.1	2019年全球十大硬煤生产国	3
表1.2	煤炭生产国向《联合国气候变化框架公约》报告的国家甲烷排放清单数据	3
表3.1	煤矿瓦斯监测频率和考虑因素	18
表3.2	验证技术示例	22
表4.1	MRV提供的支持信息和减排资源	29
表5.1	主要利益相关者的作用	32
表5.2	美国温室气体报告计划的数据报告要求	33
表5.3	美国温室气体报告计划和美国温室气体清单报告2013年至2019年地下矿井量及瓦斯排放量	35
表5.4	《国家温室气体和能源报告法案》规定的报告要求	41
表5.5	2019年煤炭行业甲烷逃逸排放总量（使用AR5全球升温潜能值计算的二氧化碳当量）	42
表5.6	哈萨克斯坦各类煤矿的瓦斯监测和报告分类	43
表6.1	建立MRV体系的立法、监管和行政框架	45
表6.2	MRV利益相关方的作用	46
表6.3	煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯排放源和相应的监测方法	47
表6.4	矿井层面的测量	47
表6.5	MRV中的报告阈值和考虑要素	48
表6.6	MRV的整体结构	49
表A1.1	地下煤矿瓦斯手动监测方法和仪器	52

图片目录

图1.1	美国煤炭开采报告风排瓦斯、抽采系统和减排的门户网站	5
图1.2	美国阿拉巴马州某在营地下矿瓦斯生产井台	5
图2.1	矿井瓦斯抽采系统流量变化图	7
图2.2	矿井通风井中瓦斯浓度变化图	8
图2.3	地下矿瓦斯排放的点源：竖井、平巷和通风口	9
图2.4	废弃矿井的排放源和洪水影响	10
图2.5	印度露天矿场	11
图3.1	干燥与淹水煤矿废弃矿井瓦斯（AMM）排放衰减曲线	13
图3.2	德国某废弃矿井的排气口测量	15
图3.3	主扇管道上安装实时空气流速监测设备	16
图3.4	使用固定测量装置监测地下室中的瓦斯浓度，显示抽采和未抽采时的瓦斯浓度	17
图3.5	2021年3月31日波兰四个在营矿通风口瓦斯浓度高于大气背景值	24
图4.1	波兰Pniówek矿山的瓦斯抽采设备	26

图4.2 使用封装的便携式仪器在英国某废弃矿山的竖井通风口进行监测（前景图）	27
图4.3 通过国家MRV收集数据、提供资源的政府煤层气推广计划.....	31

缩写

ACM	核准的综合方法
AMM	废弃矿井瓦斯
CARB	加利福尼亚空气资源委员会
CDM	清洁发展机制
CEMS	连续排放监测系统
CERs	核证的减排量
CH ₄	甲烷
CBM	煤层甲烷
CMM	正在作业地下矿井的煤矿瓦斯（排放气体和通风瓦斯）
CO ₂	二氧化碳
CO ₂ e	二氧化碳当量
EPA	美国环境保护署
ETS	排放交易计划（欧盟）
GHG	温室气体
GIS	地理信息系统
GMI	全球甲烷倡议
GWP	全球变暖潜能值
IPCC	政府间气候变化专门委员会
Km	公里
kWh	千瓦时
m	米
m ³ /d	每天立方米
m ³ /m	每分钟立方米
m ³ /t	每公吨煤的瓦斯立方米
Mt	百万吨（公制）
MRV	监测、报告和核查
Mtpa	每年百万吨
MW _e	电力容量兆瓦
MWh	兆瓦时
QA/QC	质量保证/质量控制
SMM	露天矿甲烷
scfm	每分钟标准立方英尺
SOCM	国有煤矿
t	吨（公制）– 相当于 1.102 短吨（美国）
t/d	每天吨数
TCVM	乡镇煤矿
UNECE	联合国欧洲经济委员会
UNFCCC	联合国气候变化框架公约
VAM	风排瓦斯
VERs	核实减排量

术语表

在煤炭和煤矿瓦斯行业中，不同地区和司法管辖区之间使用的术语和缩写仍存在混淆。除了此处列出的术语外，联合国欧洲经济委员会还编制了一份完整的《煤矿瓦斯术语和定义词汇表》，重点说明了不同地区术语的用法。

如需了解该术语表，请访问：

<http://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/cmm/cmm4/ECE.ENERGY.GE.4.2008.e.pdf>。

废弃煤矿：所有矿工作业结束、生产活动和矿井通风停止的煤矿，矿井可能已关闭及密封。无论煤矿是否根据适用法律要求关闭，本文件中都称为“废弃”煤矿。同时本文件“废弃煤矿”和“封闭煤矿”的含义相同。“废弃煤矿”不指暂停止煤炭生产，计划重新生产或开工的煤矿，例如暂时闲置的煤矿。

废弃矿井瓦斯 (AMM)：在被采矿作业干扰或截断的空隙、煤层和其他含气地层中保存的废弃煤矿中残留的瓦斯气体，某些情况下由微生物新产生。

煤层气 (CBM)：通用术语，指煤层中自然形成的富含甲烷的气体的总称，通常包括 80% 至 95% 的甲烷 (CH₄)，混合较低比例的乙烷、丙烷、氮气和二氧化碳 (CO₂)。在国际惯例中，该术语指利用地表钻孔从未开采的煤层中回收的甲烷。

煤矿瓦斯 (CMM)：指在正在作业煤矿（也称为活跃煤矿）中，通过地下抽采技术捕集的含瓦斯气体。该气体由甲烷、其他碳氢化合物以及水蒸气的混合物组成。由于采矿导致的裂缝使得空气不可避免地泄漏到瓦斯排放钻孔或坑道中，同时地下管道系统的不完善接缝处也存在空气泄漏，因此含瓦斯气体通常会被空气和相关的氧化产物稀释。在本定义下瓦斯源包括采矿前后排放所有地下矿井和地表采空区。采矿前排放的煤矿瓦斯纯度较高，（本文件外）只有矿井全采时获取的气体才被称为煤矿瓦斯。

封闭矿井：指因任何原因即将关闭，并打算根据适用的法律要求永久停止所有煤炭生产并封闭所有矿井入口的矿井。

排放系数：指每单位活动产生的温室气体排放量或清除量的量化系数。排放系数通常基于一组测量数据的样本，取平均值，以得出在特定操作条件下某一活动水平的代表性排放率（政府间气候变化专门委员会，2006 年）。

瓦斯抽采：指通过捕集煤层自然产生的气体以防止其进入矿井风道的方法。采矿前可使用预抽技术从煤层中抽采瓦斯，也可使用后抽技术从采矿过程中扰动的煤层中抽采瓦斯。如果待采气体主要成分是甲烷，称为甲烷抽采，也称矿井脱气。

长壁开采法 — 一种地下采矿方法，通过机械方式从采煤工作面中开采煤炭，工作面长度通常在 250 至 450 米之间。采煤工作面通常配备一台采煤机，用于切割煤炭并将煤炭装载到沿工作面全长运行的装甲面输送机（AFC）上。采煤面由两条平行巷道进入，这两条巷道负责将开采的煤炭从工作面运走，同时也用于运输材料、提供服务和通风。采煤机每掘进一次，采煤面支护设备顺势前移，采煤工作面后方岩层随之坍塌。长壁开采按一定长度和采煤工作面，形成矩形面开采煤炭。

瓦斯泄漏 — 通常指从法兰、接头和连接处非计划性释放的甲烷，主要来源包括厂房、生产操作、系统和工艺。在某些情况下，地面裂缝和断层处也会导致泄漏。

瓦斯测量 — 测量某一特定时间点的瓦斯浓度、排放量或流速的过程。如果瓦斯与空气混合，浓度测量的典型单位是百万分之一（ppm）、十亿分之一（ppb）或百分比，质量流速可以按每小时千克（kg/h）测量。请注意，了解全球和当地一般的瓦斯浓度对于理解数据至关重要。排放测量可按照单次活动、定期活动或连续活动看展，关键要确保测量应代表典型排放量。

房柱采矿法 — 一种从短工作面开采煤炭的采矿方式，留设支撑地面的煤柱，从而形成煤房和煤柱相互连接的矩阵。在某些情况下，煤柱会逐步移除，通过实现顶板塌陷来提高回收效率。

特定排放 — 瓦斯的特定排放量以每开采一吨煤所排放的立方米（m³）甲烷来衡量，表示为 m³/t。特定排放也可称为相对排放。

露天矿瓦斯（SMM） — 煤炭和周围地层由于露天采矿作业而释放的瓦斯。

层级（政府间气候变化专门委员会温室气体指南） — 层级代表方法学上的复杂程度。通常提供三个层级。层级 1 是基本方法，层级 2 是中级方法，层级 3 是对复杂性和数据要求最高的方法。层级 2 和层级 3 也被称为高层级方法，通常被认为比层级 1 更准确。

风排瓦斯（VAM） — 从煤层和其他含气地层中排放的瓦斯，进入通风系统并以较低的浓度（通常体积比为 0.1% 至 1.0%）从通风竖井排出。

概述

甲烷（CH₄）是仅次于二氧化碳（CO₂）的第二大人为温室气体（GHG），在 100 年的时间框架内，其全球变暖潜能值（GWP）是 CO₂ 的 28-34 倍。煤炭开采是甲烷（瓦斯）排放的主要来源之一，约占全球人为甲烷排放量的 12%（美国环境保护署，2019 年）。大部分排放来自地下煤矿，主要是正在作业矿山，但废弃地下矿山的排放量也在增加。国家监测、报告和核查（MRV）计划不仅有助于各国更好地了解煤炭开采对甲烷和 GHG 总体排放量的贡献，而且还能发现减排机会，包括确定煤矿瓦斯（CMM）、废弃矿井甲烷（AMM）和露天矿甲烷（SMM）减排项目的潜在地点，为煤矿瓦斯、废弃矿井甲烷和露天矿甲烷的政策设计提供信息。

设计针对煤炭行业有效的 MRV 计划需要了解煤炭地质和煤炭开采的概念。煤层中的瓦斯含量因煤阶（即煤炭成熟度的衡量标准）和地质历史的不同而不同。煤阶较高的煤炭瓦斯含量往往较高。采矿对煤炭和中间地层的扰动会导致瓦斯从煤层和伴生含气地层中释放。随着煤矿开采的推进，地质变化、煤层气含量、开采速度以及不同煤层工作面之间开采的相互作用都会导致甲烷流量变化。在设计 MRV 计划的测量和验证要求时，了解甲烷流量的变化及其根本原因至关重要。

其他可能影响煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯排放的重要因素是矿山的类型以及瓦斯如何从开采的煤层和相邻地层中释放出来。矿山通常被分为作业地下矿、废弃地下矿或露天矿。据信，目前全球 90% 的煤矿瓦斯排放来自于正在作业的地下矿。其中约 60-80% 的瓦斯是以极度稀释的形式（瓦斯含量通常低于 1%）通过通风系统排放到大气中，其余则是通过瓦斯抽采系统排放。地下矿都配备有通风系统，但瓦斯抽采系统仅适用于通风系统本身不足以管理瓦斯排放的部分地下矿山。请注意，基于地质和操作条件，瓦斯浓度和流量可能波动颇大，这也会影响矿山安全、瓦斯排放量和减排潜力。

当矿被废弃时，括通风在内的所有服务都将被切断，但瓦斯的产生和排放并未因采矿的停止而停止，瓦斯会继续从煤炭开采扰动的地层中解吸并封存于地下矿，初期的排放量可能偏高，随着时间的推移排量逐渐减少。当地水文地质条件及矿关闭后是否会被地下水淹没也将影响瓦斯的解吸速率和排放量。

在开采过程中，露天矿会释放来自煤层和其他含气地层的瓦斯。但一方面在开采前从露天矿煤层中捕集瓦斯的案例有限，另一方面个别露天矿很少出现大量瓦斯排放，有也很难捕获。

要减少瓦斯排放，需要在国家、省/州和地方各级对排放源有充分的了解。只有以可靠的排放数据为基础，政策制定者才能制定出有效的温室气体政策，评估减排机会，履行国际气候承诺。MRV 可以为政府、行业和公众提供更准确的煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯排放、减排和减缓潜力的评估。

国家清单量化了采矿过程中及采矿后加工、储存和运输活动中的排放量。MRV 计划支持收集可靠的数据，数据有助于确定一个国家煤矿瓦斯排放的总规模，确定并实现煤炭开采的减缓潜力，并通过适当的政策支持减排。MRV 有助于评估和跟踪气候政策的有效性，如减少项目开发的障碍等。MRV 还有助于跟踪减排行动及影响。MRV 与减排之间的联系尤为重要。一些国家已经出台了政策，鼓励对煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿晚上减排项目进行投资，但多数情况下，由于缺乏可靠的数据支持，这些政策并未能有效实现所需的减排程度。

MRV 的三个要素和而不同，每个要素与其他两个要素相辅相成，互相依赖。监测包括排放数据的测

量，监测排放的方法多种，不同方法的准确度各不相同。迄今为止采用的方法包括排放因子、手持仪器进行点测量，及连续排放监测系统（CEMS）。通过尽可能多整合经测量的煤矿层面数据，MRV 系统则被认为更稳健。人们普遍认为，高频次或高采样的数据收集能提供更精确的结果，因为这类数据可以检测到由昼夜温差、气压变化及操作因素所带来的各种变动，同时还能应对平均值附近的统计变化和抽样误差。这类估算瓦斯排放量的方法被称为“自下而上”的方法。当然，即使是最全面、最详细的监测方法也需要有熟练和专业的操作人员，负责关键和核心监测点设备的校准和维护，监测频率的设定，及根据测量点的实际情况对结果进行准确解读。

大多数用户可能难以理解报告的原始数据。因此，一个有效的报告系统有助于准确、迅速地汇报和提炼数据，将数据转换为报告机构和数据用户能够理解的格式。报告系统允许利益相关者（包括排放机构）跟踪排放和减排随时间的变化，用户还可以了解到可能影响个别机构或采矿业排放的具体运营或商业条件。总之，良好的实践要求尽可能详细地报告数据。

核查是确保报告数据真实、一致和合规的最终且不可或缺环节。核查的重要性体现在能够增强政策制定者的信心，促使决策者依据数据制定政策，同时也有助于提升公众对数据的认可度。核查可以采取多种形式，但通常包括数据接收方（如政府机构或独立的第三方）对数据的审查和确认。核查的程度在很大程度上取决于可用资源和核查的目的，除了文件审查或现场访问外，还可以包括遥感，如航空或卫星调查。

鉴于煤炭行业对全球甲烷排放总量的显著影响，及有效的 MRV 机制在准确量化排放量和促进甲烷减排方面的核心作用，本文件旨在提供实际建议，协助各国构建能够准确量化和报告煤矿瓦斯排放的系统。本文件的重点是监测、报告和核查正在运营和已废弃煤矿排放，适用于地下矿和露天矿。地下矿一般矿井深、瓦斯浓度高、长壁开采中对多层煤层扰动多，地下矿被视为更大的甲烷排放源。所以本文将给地下矿给予更多关注。地下矿不仅本身有利于减排，在监测和减缓瓦斯排放方面我们有关地下矿的经验也更多。

政策制定者必须考虑系列因素来确定特定管辖范围内最合适和最有效的 MRV，包括政策优先事项、经济影响、文化影响、物流等。全球 MRV 的现有经验表明，核心因素包括：

- MRV 与现有政策框架（如法律法规或行政指令）一致；
- 明确相关利益相关者的角色；
- 了解煤炭行业排放的性质和来源，监测排放源的方法；
- 制定煤矿级别监测和核查测量的标准；
- 确定煤炭行业内的子目标：运营中、已废弃或露天矿；
- 选择报告阈值（根据煤矿类型、规模，排放规模或其他标准）；
- 明确 MRV 结构和管理（报告频率、平台、记录、发布）。

系统设计取决于国情，如治理体系、政策目标、政府能力以及具体预算。理想情况下，MRV 系统可以稳健落地，提供可靠数据，促进瓦斯利用，实现煤炭行业减排。通过对煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯的良好核算有助于明确需采取哪些及时有效的措施，应对全球甲烷排放。

1.引言

要点

- 全球煤矿产生大量甲烷排放。在能源转型期间，提供良好的政策支持能减缓气候变化。
- 通过 MRV 量化当前排放和减排措施的影响，对于决策者设计和评估 MRV 行动计划至关重要。
- 在量化排放方面，测量法无可替代，测量法比经验法提供的国家排放估值更精确详尽。

甲烷（CH₄）是仅次于二氧化碳（CO₂）的第二大人为温室气体（GHG），在 100 年的时间框架内，其全球变暖潜能值（GWP）是 CO₂ 的 28-34 倍（政府间气候变化专门委员会, 2014）。相较于工业革命前夕的 1750 年左右，大气中的甲烷浓度因人类活动的影响已经翻了一番多，目前大约达到了每十亿分之 1800 的水平（政府间气候变化专门委员会，2014 年）¹。美国国家海洋和大气管理局（NOAA）全球监测实验室最近的大气测量结果表明，2020 年，由于新冠肺炎（COVID-19）疫情引起的经济放缓，CO₂ 排放量低于预期，而同年大气中的甲烷含量却跃升至创纪录水平，这是有记录以来最大的年度增幅（NOAA，2021 年）。鉴于甲烷是一种强效温室气体，自工业化之前以来约 30% 的变暖由甲烷造成，因此全球经济各行业都需要减少甲烷排放，以避免对自然和人类社会造成灾难性影响。

联合国环境规划署（UNEP）的最新报告重申，如果不解决甲烷排放问题，就不可能在本世纪上半叶实现气候效益，而减少 CO₂ 排放是实现长期气候稳定的关键（联合国环境规划署/气候和清洁空气联盟（CCAC），2021 年）。甲烷在大气中的寿命很短，这意味着立即采取行动可以在短期内迅速减少人类对气候的影响。如果在不久的将来不减少排放，未来几十年地球气候的快速变化将限制人类和自然系统的适应能力（联合国环境规划署/气候和清洁空气联盟，2021 年）。这对贫穷和边缘化社区来说尤为棘手，因为这些社区更容易受到气候变化的冲击。

甲烷还会促成地面臭氧的形成，从而危害人类和生态系统的健康。减少甲烷排放可以同时降低气候风险并减少地面臭氧污染。每减少一百万吨甲烷排放，就有助于减少因哮喘发作而住院的人数、减少因呼吸系统和心血管疾病导致的过早死亡，还可以避免经济损失和重要农作物的减产（联合国环境规划署/气候和清洁空气联盟，2021 年）。

在 2021 年 11 月于英国格拉斯哥举行的第 26 届联合国气候变化大会（COP26）之前，世界各国领导人呼吁就甲烷问题采取行动。国际能源署最近对各国政策和承诺的分析表明，到目前为止，全世界还未能达到共同的可持续性目标，包括将全球变暖幅度控制在 1.5 摄氏度之内，一旦超出该范围，人类将面临极端天气、海平面上升和农作物歉收等最严重的影响（国际能源署，2021 年）。应对气候变化的紧迫形势，需要政策制定者、行业和个人都展现出雄心壮志。减少甲烷排放无疑是最易实施且成本效益最高的措施之一。

监测、报告和核查（MRV）排放量，包括煤炭开采产生的甲烷，是履行《巴黎协定》背景下国际气候承诺的重要组成部分。随着各国制定国家自主贡献（NDC），《巴黎协定》第十三条呼吁建立一个“加

¹ 百年全球变暖潜能值（GWP）是基于气体在 100 年内吸收的能量来衡量。另一种衡量方法是考虑气体在 20 年内的影响，并测量 20 年内吸收的能量，即 20 年 GWP。甲烷寿命较短，20 年的 GWP 为 84-87，远高于百年 GWP。

强行动和支持的透明度框架”。这一框架 对于评估各国在全球气候减缓目标方面所做的努力和取得的集体成果具有至关重要的作用。

什么是MRV?

监测、报告和核查（MRV）指国家或机构为收集和确认有关排放和减排数据而采取的措施，三部分各不相同、相互关联。

监测是指根据既定指南和议定书，如政府间气候变化专门委员会（IPCC）指南、经核准用于监管或自愿项目的方法或议定书，对排放量和减排量进行直接测算或估算，过程涉及使用设备进行直接测量，或通过简易方法或复杂模型进行估算。

报告指旨在向相关方提供信息的文件，内容包括相关方法、假设和数据。报告内容因管辖区而异，有的要求提供详细报告以证实全部排放数据，有的要求提供一般摘要和关键性数据。

核查是指验证方法的适用性、数据和估算的质量的特定流程或专家评审。核查可以是内部核查也可以是外部核查。

资料来源：改编自联合国欧洲经济委员会（2019年），《石油和天然气行业甲烷有效管理最佳实践指南：监测、报告和核查（MRV）及减排措施》，ECE能源系列第65号和ECE/ENERGY/129。

<https://unece.org/sustainable-energy/methane-management/best-practice-guidance-effective-methane-management-oil-and>

许多国家层面的清单不够详细，不具备特定数据源，可靠性不足，无法为政策制定、确定减排机会或明确优先行动提供有效信息。对甲烷采取行动需要对国家、省/州和地方各级的排放源有充分的了解。只有拥有可靠的排放数据，决策者才能设计出有效的温室气体政策，评估减排机会，履行国际气候承诺。

一致、可靠、透明和可核查的 MRV 方法将有助于提高清单的准确性，并在地方、国家和国际层面做出更有效的决策。本文旨在为设计国家系统提供实用建议，系统性量化和准确报告煤矿瓦斯排放情况，各章节涵盖现营和废弃矿井在国家层面上的排放监测、报告和核查，也可应用于地下和露天煤矿。人们认为，由于地下矿井瓦斯含量较高，存在多煤层扰动，对甲烷排放的贡献更大；同时，在监测和减缓地下矿井瓦斯排放方面，实践经验更多，所以地下矿井受到了更多关注。项目层面的监测、报告和核查对于碳市场的形成至关重要，不过本文仅对此进行了简介，以更好探讨国家和项目层面 MRV 之间的重叠部分。

1.1 全球煤矿瓦斯排放和信息来源

全球估算图大致展示了煤矿瓦斯（CMM）、废弃矿井瓦斯（AMM）和露天矿瓦斯（SMM）的排放情况和排放源。煤矿约占全球人为甲烷排放量的 12%（美国环境保护局，2019 年），其中大部分来自地下矿井。2015 年的数据显示，在中国，与煤炭开采相关的甲烷排放量占该国总人为甲烷排放量的 46%，而在印度，煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯排放量占甲烷排放量的 4%；在澳大利亚占 26%；在俄罗斯占 7%；在哈萨克斯坦占 41%；在波兰占 35%（美国环境保护局，2019 年）。以上信息有助于了解煤炭生产国的减排方案（见表 1.1）。

表 1.1 2019 年全球十大硬煤生产国

国家	硬煤产量 (千吨)
中国	3,469,817
印度	718,625
澳大利亚	433,601
俄罗斯	335,721
美国	312,522
南非	253,569
哈萨克斯坦	98,976
印度尼西亚	96,924
哥伦比亚	82,065
波兰	61,623

资料来源：国际能源署，2021 年

煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯的全球排放数据来自多个国际评估，包括美国环境保护署（U.S. EPA）、全球大气研究排放数据库（EDGAR）和国际能源署（IEA）的评估（美国环境保护署，2020 年；欧盟联合研究中心，2020 年；国际能源署，2020 年）。评估内容主要来自各国向《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）提交的数据（见表 1.2）。该公约对附录 1 国家和非附录 1 国家在提交频率和方法学方上曾有不同的报告要求。

《联合国气候变化框架公约》的全部签约国都编制了年度温室气体排放和吸收清单。政府间气候变化专门委员会（IPCC）制定了三级清单方法学，从第一级（一般排放因子）到第二级（使用国家或流域特定排放因子），再到详细的第三级（基于现场特定测量，即自下而上）。表 1.2 列出了五大煤炭生产国最近提交的煤炭行业排放数据，及用于报告煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯数据的方法学级别（如提交国所述，可能与政府间气候变化专门委员会对方法学的定义不完全一致）。

表 1.2 煤炭生产国向《联合国气候变化框架公约》报告的国家甲烷排放清单数据†

国家	最新煤矿甲烷数据年份	最新提交年份	国家提交资料中所声明的使用层级
中国	2010 2014	2019 – NC3 2019 – BUR2	地下煤矿：2 级方法；露天煤矿：1 级方法；采矿后活动：2 级方法；废弃煤矿：2006 年 IPCC 指南中的 1 级方法
印度	2000 2016	2012 – NC2 2021 – BUR3	2 级和 3 级
澳大利亚	2019	2021 – NIR*	2 级和 3 级
俄罗斯	2019	2021 – NIR*	2 级，但露天矿采矿后活动为 1 级；假设废弃矿山不是排放源
美国	2019	2021 – NIR*	地下煤矿：3 级方法；露天煤矿：2 级方法；采矿后活动：2 级方法；废弃煤矿：2 级方法

注：

(†)截止本出版物发布之日。

(*) NIR：国家清单报告，由附录1缔约方每年提交；NC：非附录1缔约方提交的国家信息通报（NC3表示第三次提交）；BUR：非附录1缔约方提交的两年期更新报告。

资料来源：联合国气候变化框架公约，<https://unfccc.int/non-annex-I-NCs>；<https://unfccc.int/BURs>；<https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2020>

上述方法代表了国家层面每年（最佳频率）的排放估值。估值整合了多源排放数据，或基于有限测量、结合排放因子、活动数据/设备量进行计算。多项研究指出（Barkley 等人，2019 年；Miller 等人，2019 年），全球或国家估值还可以基于大气中排放气体的实测浓度或遥感测量，但遥感测量法尚未被决策者广泛应用，也未纳入温室气体排放的官方报告。

为了制定有效的政策和计划，决策者需要获得甲烷排放源的可靠量化信息。企业也需要获得准确、经测煤矿层面的数据，以评估减排措施、实施减排活动、降低资本和运营成本，确保安全运营。将地质概念、采矿实践和排放量化相结合，可以增强对报告数据的信心，助力决策者为煤炭行业设计合理的 MRV 体系，从而在国家和企业层面可靠地量化排放。量化还有助于评估减缓潜力和减排工作的进展。

1.2 自下而上的MRV体系

与提交给联合国气候变化框架公约的全球估值和国家清单不同，国家 MRV 体系应尽可能多地基于实测的煤矿数据（也被定义为政府间气候变化专门委员会第 3 级方法）进行编制。依赖实测煤矿数据制定的国家 MRV 不确定性低、空间分辨率高、清单类别更细，更可能提高清单的整体质量和准确性（政府间气候变化专门委员会，2011）。这种估算甲烷排放的方法称为“自下而上”法，与减排措施的关系最为紧密，因为减排措施是在煤矿层面实施的。煤矿级数据能够捕捉到在不同地点采取减排措施后获得甲烷排放和减排的细微差别。除测量功能外，自下而上的 MRV 还可以在必要时对单个排放源进行建模，并使用排放因子、活动数据和基于过程的模型进行计算。随着数据和信息量的增加，我们可以进一步完善建模和计算过程；诚然，对煤矿排放进行测量仍然具有无可比拟的优势，因为能够提供更准确、更详细的国家排放估算数据，反过来又可以帮助煤矿管理者和决策者制定相关政策和评估减排机会。

在通过测量监测排放时，关键要测量与排放源甲烷流量和浓度的变化有关的时间和空间尺度。获取测量数据的另一个关键点是设立标准，确保测量设备的校准及设备的良好工作状态。第 2 章将探讨煤矿瓦斯流量和浓度的变化，现营、废弃矿、露天和地下矿（包括通风和抽采）排放的特点。

理想的排放监测报告应通过用户友好的报告系统来提交，系统应便于机构提交报告，同时也能生成包含经核实、易于利益相关者理解的数据输出。第 5 章包括了在现有国家层监测、报告和核查框架示例中关于报告系统的描述。

核查可以在不同层面汇总，具体方法参见第 3 章。此外，遥感和空中测量为验证现有数据提供了可行的方法，进一步的研究有助于这些技术调整后广泛应用于核查工作。

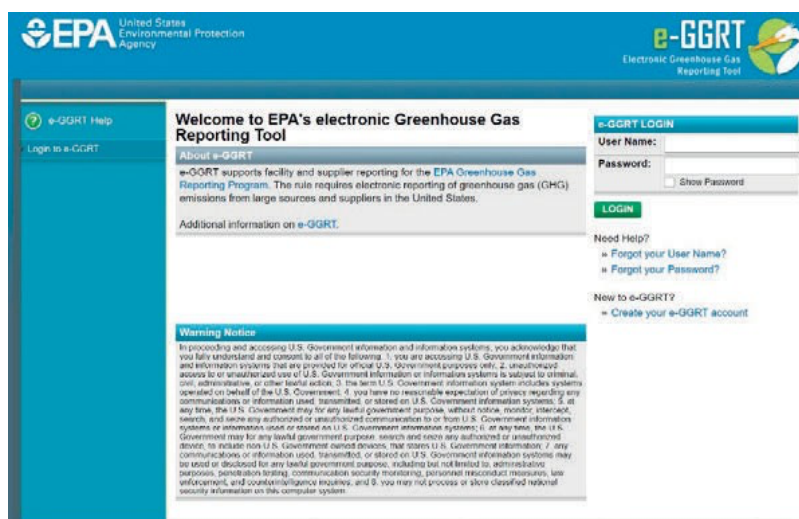
最后，煤炭行业甲烷监测、报告和核查的一个重要方面是，出于安全、税收或所有权等方面的考虑，不同监管机构可能会同时收集相似或相关数据。决策者应全面考虑给煤矿带来的数据采集负担，确保政府机构间建立了协调机制，促进煤矿收集数据。煤矿或已出于安全原因收集了瓦斯流量和浓度的数据，并将数据用于清单报告和减排工作。

1.3 MRV和减排

减排通常是 MRV 的最终目标，而依赖煤矿数据的 MRV 最适合支持减排措施。煤矿层面的 MRV 数据还可以通过突出特定的减排机会并为潜在的项目开发者提供数据，确保减排措施的成本效益最高。

矿场和公司层面的 MRV 和减排实践与国家层面开发的实践相互联系，尤其当自下而上的测量有助于国家清单时。以美国为例，温室气体清单的制定依赖对风排、瓦斯抽采系统排放的测量数据，及对富含瓦斯的地下矿采取减排措施的相关数据，数据要求符合美国温室气体报告计划（见图 1.1）。对于非报告矿，美国清单依赖美国矿山安全与卫生管理局（MSHA）采集的实测通风数据。澳大利亚的温室气体清单也依赖实测和报告的煤矿瓦斯、风排瓦斯、地面矿瓦斯数据。国家实践也可能受国际指南和承诺的影响，如政府间气候变化专门委员会和联合国气候变化框架公约下制定的有关指南和承诺，主要是第三级方法受影响，有时也涉及第二级方法。

图 1.1 美国煤炭开采报告风排瓦斯、抽采系统排放和减排的门户网站



该门户网站由美国环境保护署维护，符合温室气体报告计划的要求，网址为 <https://ghgreporting.epa.gov>。

MRV 对政策设计至关重要，因为对排放进行可靠量化是监测合规性和评估减排工作进展的基础。MRV 数据还可用于促进设计自愿推广或能力建设方案，方案可以减少减缓行动在信息、制度或其他方面的障碍。如，全球甲烷倡议（GMI）、由美国环境保护署管理的煤层气推广计划（CMOP）、中国煤炭信息研究院、印度煤层气信息中心以及位于波兰和中国的国际卓越煤矿瓦斯治理中心（ICE）等。

图 1.2 美国阿拉巴马州某在营地地下矿甲烷生产井台



资料来源：美国环境保护署

因此，对采矿部门的甲烷排放量进行准确核算是建立强有力温室气体清单的基础，同时也有助于实现公共政策和工业减排目标，提高矿山安全，并确定需要加强哪些减缓政策以实现国家温室气体减排目标。部分国家已经出台了相关政策，以减少障碍并鼓励对煤矿瓦斯减排项目投资，但政策有时未能达到减排预期，大量高成本效益的减排措施未得到实施。

2. 煤矿瓦斯排放的来源

要点

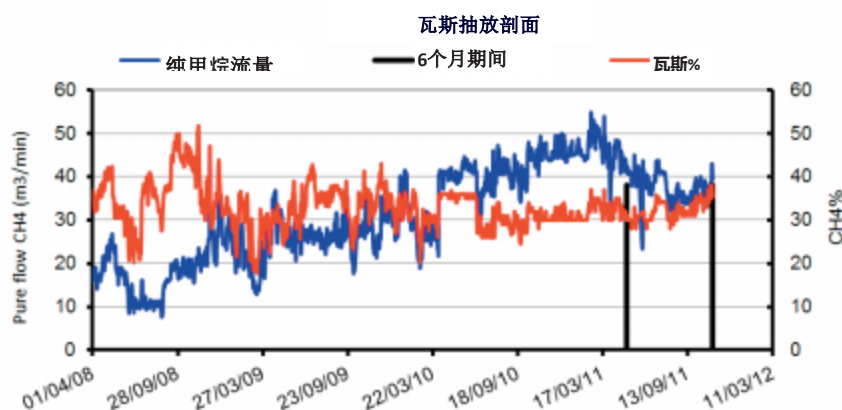
- 在设计监测系统时，认识瓦斯浓度和流量的固有变化。
- 煤矿瓦斯排放是煤炭开采的必然结果。在其他条件相同的情况下，煤炭开采速度越快，排放越快。
- 开采过程中排放的瓦斯量取决于矿床的地质和煤炭开采方法。
- 当采矿停止时，瓦斯仍然会继续排放，废弃地下矿或将成为重要排放源。

2.1 瓦斯流量变化

在设计排放监测和报告时，了解瓦斯浓度和流量的固有变化很重要。随着煤矿开采的进行，地质变化、煤层瓦斯含量、开采速度及不同煤层间作业面的相互作用都会导致瓦斯流量和浓度的变化。流量和浓度的变化也会受到断裂地层和管道系统泄漏的影响。图 2.1 和图 2.2 展示了抽采瓦斯和风排瓦斯浓度的变化。

煤层煤阶（即成熟度）和地质史的差异导致瓦斯含量不同。除了少数特例，甲烷是煤层中主要气体。煤的甲烷含量从每吨煤少于 1 立方米（ m^3/t ）到 20 立方米（ m^3/t ）不等。高阶煤瓦斯含量往往较高，但也有由于地质事件出现的瓦斯气体损失。采矿对煤层和间层的扰动会导致煤层和含气地层中的瓦斯释放。单位时间内扰动的煤层和含气地层体积越大，排放量越高。换言之，如果其他条件不变，瓦斯排放速率在很大程度上与煤炭生产率成正比。如顶板中煤层变薄，或煤阶降低，或由于强桥接层导致顶板未完全坍塌，排放速率可能会降低。生产的中断和恢复也会导致瓦斯排放速率的变化，变化的细节可在高频监测数据中观察到。

图 2.1 矿井瓦斯抽放系统流量变化图

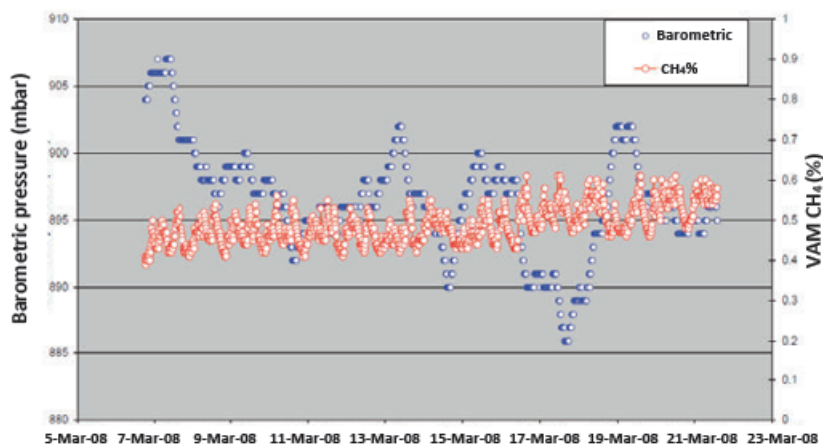


资料来源: *Sindicatum* 可持续资源公司

煤层的瓦斯含量越高，矿井的排放量往往越大。一般来说，地下长壁矿井的瓦斯排放量比其他类型的矿井都要多，因为长壁开采和地层塌陷不仅会扰动开采煤层，而且还可能使采煤工作面上方高达 150 米和下方深达 50 米的煤层和其他含气地层解除应力，导致瓦斯释放。该层段被称为长壁瓦斯涌出区。实际解除应力的垂直范围，即瓦斯涌出区的大小，取决于长壁盘区尺寸、矿井深度和地层特性（联合国欧洲经济委员会，2016 年）。当采矿停止，瓦斯排放量会持续递减。一般房柱式矿井对地层的扰动很小，但

由于地层瓦斯含量高和自然渗透率高，关闭后仍会释放出瓦斯。采后的煤炭在装卸、加工、运输和储存过程中也会继续释放瓦斯，这类排放在国家清单中被统称为“采后排放”。

图 2.2 矿井通风井中瓦斯浓度的变化



资料来源: *Sindicatum* 可持续资源公司

报告中与煤炭开采相关的瓦斯排放通常按以下排放源分类:

- 地下作业矿井（煤矿瓦斯，包括抽采甲烷和风排瓦斯）
- 废弃（地下）矿井（AMM）
- 露天矿（SMM）
- 采后排放（采矿后煤炭排放，如加工、储存、运输过程中的排放）。

2.2 地下作业矿井

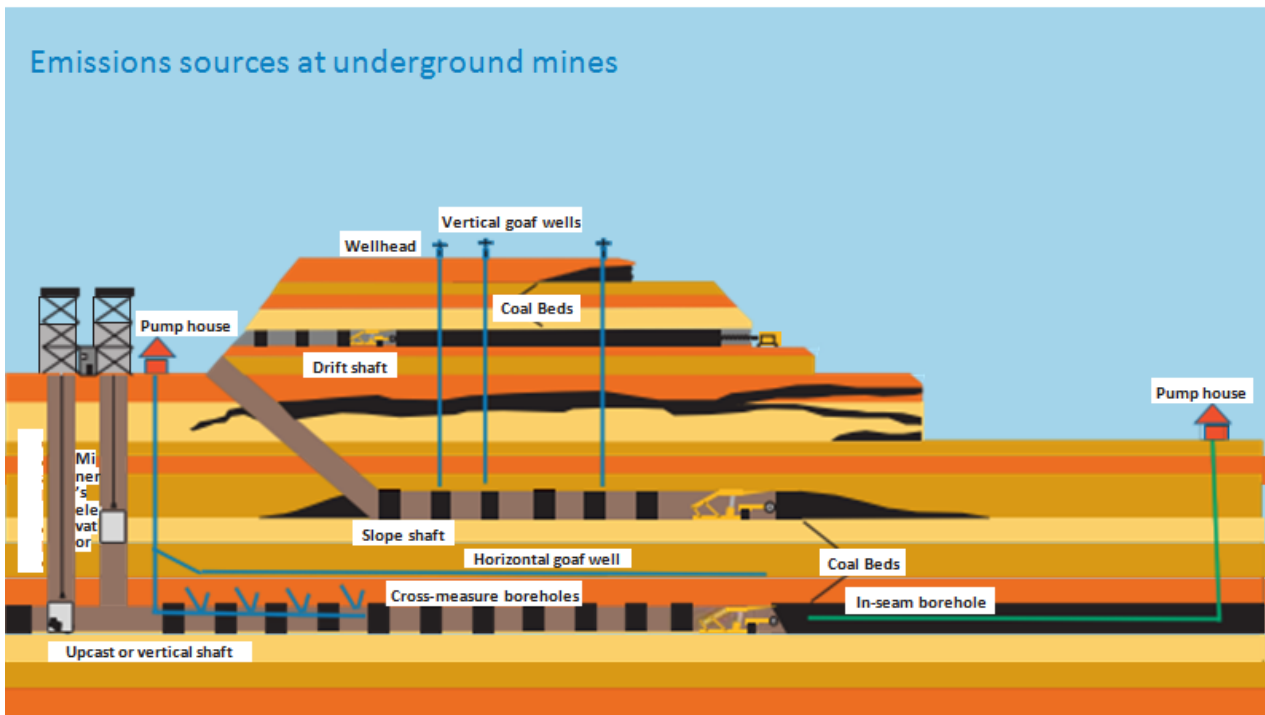
尽管数据存在一定不确定性，但据信，地下作业矿占全球煤矿瓦斯排放的 90%，其中约 60-80%的瓦斯是以稀释态（含量低于 1%）进行风排（联合国欧洲经济委员会，2016 年）。地下采煤主要有两种方法，长壁采煤法和房柱采煤法，两种方法也有不少变体。长壁法在地下矿瓦斯排放中占主导地位，在相同的地质条件下，房柱法的瓦斯涌出量比长壁法少，因为房柱法每开采一吨煤扰动的地层更少。当采矿进入最后阶段需要拆除矿柱时，拆除了支护后顶板可自然塌陷，增加了地层扰动，还可能会出现瓦斯释放。

矿井瓦斯控制旨在尽可能防止在爆炸范围 5-15%内出现瓦斯-空气混合物。出于安全原因，通风是地下作业中清除瓦斯的主要控制系统，矿井必须提供足量空气，确保在井下工作区中瓦斯可以被稀释到最大允许限度下，根据国家和实践要求，范围在 1%到 2%间。流程一般是：空气被注入井下，流经工作区稀释甲烷，并通过“上行”竖井（垂直矿井入口）或平巷（倾斜矿井入口）排出。然而即使在低浓度下，通风井排出的大量空气（可能超过 500 m³/s）也会导致短期产生大量甲烷。例如，在美国，部分大型地下矿向美国环境保护署温室气体报告计划提交的报告指出，每年风排瓦斯接近或达到 100,000 吨（美国环境保护署，2019 年）。

若仅靠通风无法以将瓦斯浓度稀释至法定限值，则需要使用瓦斯抽采系统在瓦斯进入井下作业区前进行拦截。瓦斯抽采有两种方法。第一种是采矿前通过钻入煤层的钻孔抽采瓦斯，称为采前抽采；第二种是从扰动地层中抽采瓦斯，称为采后抽采。第一种方法抽采的瓦斯质量高、适合利用，第二种方法抽

采的瓦斯（见图 2.1）可能质量不稳，需要谨慎管理、减少空气稀释，避免管道中形成潜在的爆炸性混合物。抽采瓦斯或加以利用，或燃烧或空排。作业地下矿不同的排放点称为点源，点源包括负责风排瓦斯的竖井、抽采瓦斯的排放口，及密封区内的排放钻孔，以上点源测量相对便利。在部分国家，采后抽采钻孔从地表钻入，瓦斯直接排放到大气中或作抽气泵的燃料。有时富余的瓦斯会直接燃烧以减少瓦斯排放。以上也是点源，需要在单个钻孔处而非中央集气站进行监测。如果瓦斯的质量和数量足够，还可以管道收集利用。

图 2.3 地下矿瓦斯排放的点源：竖井、平巷和通风口



资料来源：改编自美国肯塔基大学肯塔基地质调查

在不存在特殊地质条件的情况下，采后抽采可以捕集长壁区总瓦斯量的 50%至 80%。在现实中，通常可以从矿井中捕集 30%到 50%的瓦斯。除最具挑战的采矿条件外，采后抽采系统一般能达到 30%及以上的瓦斯浓度。使用采前抽采法应能达到 60%及以上的甲烷浓度。

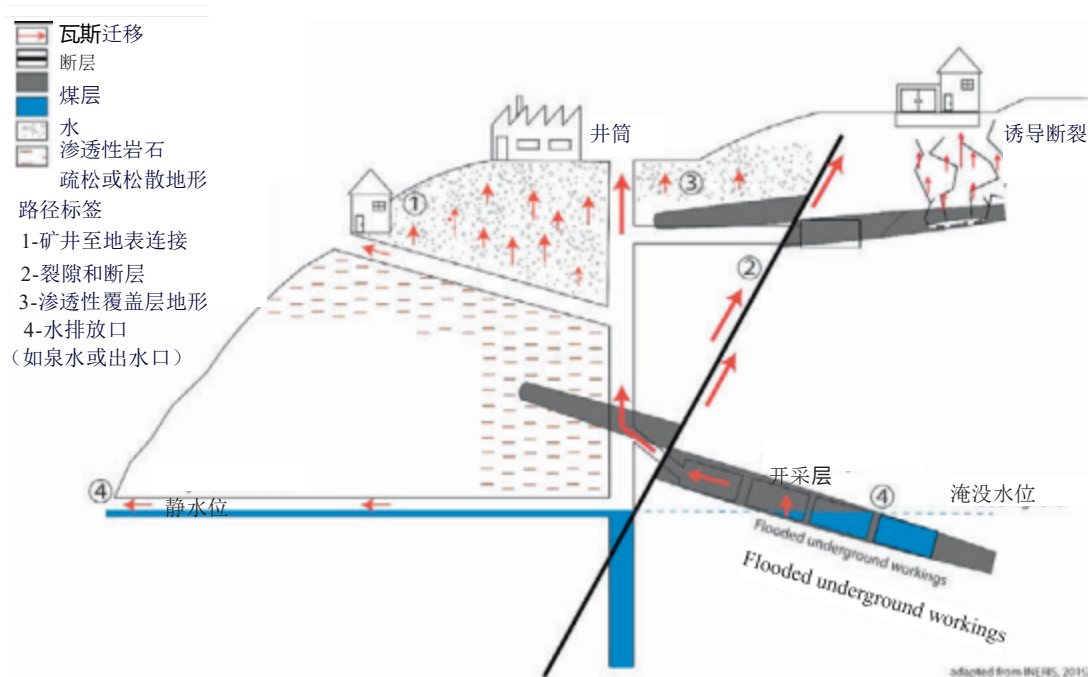
有关矿井通风和瓦斯抽采的更多信息，请参阅《煤矿有效瓦斯抽采和利用最佳实践指南》（ECE Energy Series No. 47 和 ECE/ENERGY/105）及 GMI 煤矿瓦斯项目预可行性研究互动培训课程的第 5 模块和第 6 模块（UNECE，2017 年；GMI，2021 年）。

2.3 废弃矿井

矿井废弃后，包括通风在内的所有业务都会终止，之前被抽采系统和通风系统分离的瓦斯会融合，初始排放量可能高启，但随着排放源衰减，排放量会逐渐下降。多数情况下，地下水会逐渐淹没矿井，减少废弃矿井的瓦斯排放量。根据不同地区的水文地质和采矿条件，矿井完全淹没可能需要几年到几十年不等。虽然废弃矿井通常会被封闭，但瓦斯可能会排放到大气中。在理想情况下，排放可以通过减压排气口进行控制，但通常瓦斯不受控，会通过井筒和巷道封闭处、露头、浅层作业面上方的破碎地表或与其他废弃矿井旧作业区的地下连接处泄漏。不受控排放甚至会在地表产生，造成严重的公共危害，需

要采取补救措施。此类排放源可能难以确定，在特定情况下或将影响大片区域。

图 2.4 废弃矿井的排放源和洪水影响



资料来源：《废弃矿井瓦斯有效回收与利用的最佳实践指南》（联合国经济委员会，2019年）

尽管废弃矿井可能会带来安全、健康和环境风险，这些风险可以在矿井关闭时通过系列措施来降低，包括设计更优良的密封工程、安装瓦斯减压排气口及使用废弃矿井甲烷（AMM）抽采系统。若未采用矿井关闭的最佳实践来缓解未受控的瓦斯排放风险，那么废弃矿井瓦斯排放的控制和精确测量可能会出现问题。要了解更多有关废弃矿井、废弃矿井的瓦斯资源及从废弃矿井中回收瓦斯的信息，请参阅《废弃矿井瓦斯有效回收与利用的最佳实践指南》（联合国经济委员会，2019年）。

2.4 露天矿场

露天矿在开采过程中会释放来自煤炭和含气层的瓦斯。据报道，美国、哥伦比亚、哈萨克斯坦和其他国家的露天矿都存在瓦斯排放情况（美国环境保护署，2014年；美国环境保护署，2008年）。尽管有些露天矿场拥有丰富的瓦斯资源，但单个矿场大规模排放瓦斯的情况并不常见。总体来说，与地下矿的排放相比，露天矿的甲烷排放总体要低得多，且更为分散。从全球范围来看，露天矿的瓦斯排放量不大，可以通过新兴的机载和卫星遥感系统更准确了解露天矿的排放规模。与地下矿类似，露天开采的煤炭燃烧时也会排放大量二氧化碳。

图 2.5 印度露天矿场



资料来源: Photostock

3. 煤矿瓦斯排放的监测、报告和核查

要点

- 地下矿瓦斯排放成点源化，易量化，准确性取决于测量方法和测定频率。
- 矿井废弃后，由于不同潜在源的未受控排放可能难以定位，监测变得更为复杂。
- 露天矿场的排放量通常较低且分散，可采用间接方法监测。
- 报告和核查对于确保政策和缓解措施有可靠依据至关重要。

3.1 监测与测量煤矿瓦斯排放

本节将介绍已用于或可用于测量在营和废弃矿的瓦斯排放方法，以及不同方法的优缺点。同时还将讨论监测频率、位置对监测、报告和核查（MRV）系统和实践的影响及其他考虑因素。监测位置的选择和测量频率应参考第 2 章中描述的瓦斯流量的时空变化。

为监测温室气体排放，有多种方法可用于监测煤矿瓦斯（CMM），包括风排瓦斯（VAM）和矿井瓦斯抽采、废弃矿井瓦斯（AMM）和露天矿瓦斯（SMM）排放，及减排情况。具体方法包括使用排放因子、递减曲线、手持仪器测量或连续排放监测系统。

3.1.1 应用于运营矿井煤炭生产的排放因子

最简单的监测方法是将排放因子应用于煤炭生产。这种方法仅用于估算在营矿井的排放量或建立排放基线，不适用于估算废弃矿井的排放量。

排放因子通常表示为每公吨开采煤炭的瓦斯体积，例如每公吨开采煤炭的立方米（m³/吨）或立方英尺（ft³/吨，美国标准）。一般从历史数据中计算出因子后应用于煤炭生产总量，得出排放估算值。

排放因子在许多工业领域中被用于排放量估算，在煤炭开采中，被广泛用于估算国家煤矿瓦斯（CMM）和废弃矿井瓦斯（SMM）的排放量，以编制排放清单。在尚未实施监测、报告和核查（MRV）计划或排放量相对较小且难以测量的国家（如露天矿场和采后排放），排放因子的使用尤为常见。在历史瓦斯排放数据质量不高的情况下，人们会利用来自其他具有相似地质和岩土工程特性煤层的矿山或国家（类比数据）的数据来制定排放因子。但如果后续缺乏本地观测对因子进行验证，这种方法可能会导致数据不准确。所以应采取额外措施提高估算的可靠性。

排放因子也可应用于区域（或盆地）和特定矿场。人们认为，特定煤矿盆地的排放因子比国家排放因子更为准确。在地下矿中，可通过风排测量数据获得特定排放因子，同时结合来自脱气系统的可用数据，包括排气系统收集的瓦斯或排气系统的收集效率。特定盆地的排放因子也可以通过建模得出的定量关系来推导，该模型考虑了开采煤层及受采矿影响的周围岩层的含气量。

特定矿场的排放因子是指矿场中所有来源（包括长壁、废弃区、掘进区和传送带上的煤炭）释放的瓦斯总量，释放总量通过矿井风排测量（VAM）。风排量与抽采量相加，得出整个矿场的综合排放量。一般通过至少一个月的测量来确定矿场的排放因子，一个月内应避免假期中断，以确保因子的长期稳定性。除非矿场结构发生重大变化（如有应进行新的测量），因子确定后每 3-5 年复核一次即可。

优点：

- 可以根据国家、区域或特定矿场制定排放因子。
- 确定排放因子后进行的计算可以迅速并以最低成本完成。
- 使用的测量单位（例如立方米/吨）是采矿业熟悉的单位，采矿业一般用类似单位测量瓦斯“特定”（或“相对”）排放量。

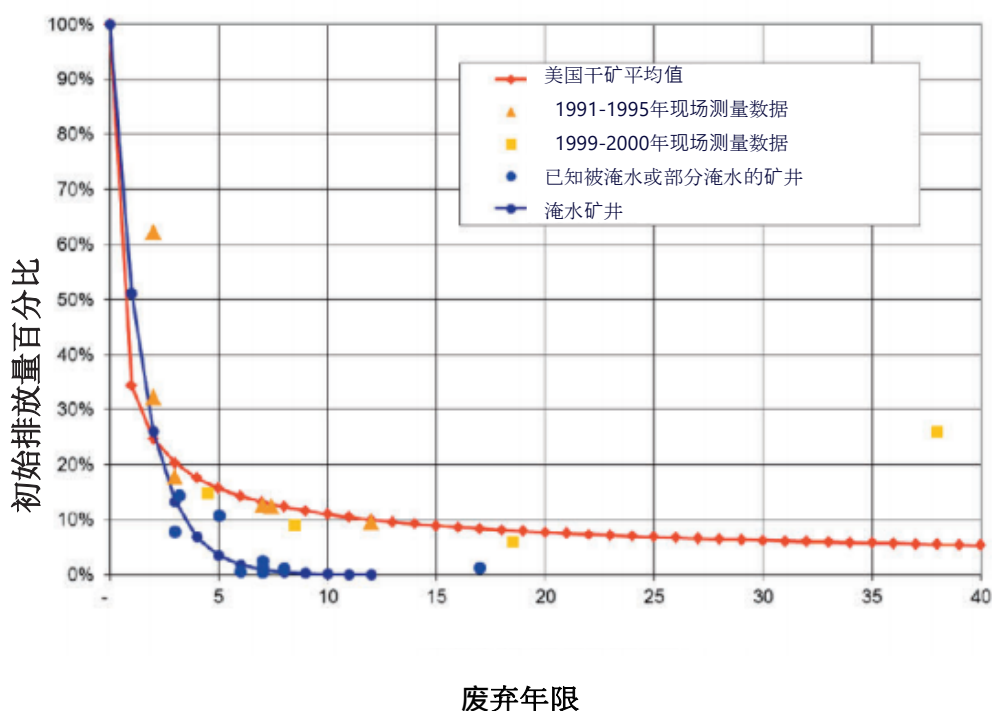
缺点：

- 作为一种监测方法，排放因子的准确性不及直接测量，且在某些情况下，排放因子已证明非常不准确，导致对国家总排放量的显著高估和/或低估。
- 排放因子一般不考虑不同的采矿类型，尤其是在地下矿中，长壁开采和房柱式开采产生的排放量可能差异显著。
- 排放因子基于历史数据，历史数据可能无法反映当前或未来的作业。
- 国家和区域排放因子基于所有矿山开采的煤炭具有相似的含气量，通常与现实不符。
- 通过使用排放因子估算的排放量可能不适用制定政策或指导减排。

3.1.2 使用衰减曲线测量废弃矿井的排放量

估算废弃煤矿的瓦斯排放量需要从废弃时起算到清单年。煤层向空隙的瓦斯流量最初取决于矿井的作业排放量，随后取决于矿井被水淹或密封的程度。废弃前的瓦斯排放速率反映了煤层的含气量、煤炭开采速率以及矿井的运输能力。随着气层逐渐耗尽，煤层及周围岩层产气井或矿井随时间推移瓦斯产量会进一步递减。

图 3.1 干燥与淹水煤矿废弃矿井瓦斯（AMM）排放衰减曲线



资料来源：《废弃矿井瓦斯有效回收与利用的最佳实践指南》（联合国欧洲经济委员会，2019年）。

气藏的枯竭将遵循一个可预测的模式，主要取决于气藏所受各种自然物理条件的相互作用。气藏的枯竭通常用数学方程建模，绘制成类型曲线，也称衰减曲线。根据废弃矿井排放的有限数据表明，排放通常遵循双曲线型衰减。

衰减曲线最好根据特定盆地或地区开发，可用于估算废弃矿井的瓦斯产量。对于特定的矿井，衰减曲线也适用计算废弃时的瓦斯排放速率。

如，英国（Kershaw，2005）和澳大利亚（Lunarzewski 和 Creedy，2006）利用衰减曲线变体在瓦斯流量预测中纳入洪水这一变量。

优点：

- 公认估算废弃矿井瓦斯（AMM）排放的方法，被政府间气候变化专门委员会（IPCC）、美国环境保护署（U.S. EPA）和澳大利亚清洁能源监管机构所使用。
- 有研究采用历史匹配法，证明了双曲线的准确性。
- 一旦类型曲线确认，可以相对便利在大量矿井中普及。计算起点是矿井关闭时的排放量，未来的排放量遵循曲线发展。

缺点：

- 测量和确认废弃矿井排放的经验有限。
- 国家或地区曲线的准确性难以确定。
- 废弃矿井需三选一：封闭且干燥、未封闭且干燥或被水淹。但任何深埋的废弃地下矿几乎都会随着时间的推移被水淹。不被水淹的预测曲线准确未来排放量可能不准确。

3.1.3 使用手持仪器进行测量

作业地下矿井

在作业地下矿井风排和抽采系统中，获取气流测量值的常见方法包括通过手持仪器。手持测量必须根据安全法规经由专业、有资质的人员按流程进行。如果数据采集自不同生产班次，还可以用于温室气体监测。当然，安全监测的目的是检查矿下安全是否满足预设标准，排放监测的目的是准确量化瓦斯流量和浓度，所以两类检测最好进行单独开展。排放监测可以引入待验证的方法。虽然两种检测采用类似的测量技术，且都由专业人员操作，但排放监测的细节、频率和位置可能与常规安全监测不同。

风排瓦斯可以通过对流量和浓度的即时读数获取：

- 在风井底部
- 或在向风井的回风巷中
- 连接地面主扇的风道中

测量过程涉及多风速计的遍历测量、多甲烷计读数，或在已知尺寸的气道横截面上采集样本。在地面主扇处，由于风道中瓦斯流速高，皮托管读数更切实，最简单的方法是在主扇风道中测量流量和浓度。

手动测量一般采用差分流量设备结合气体采样，数据可用于实验室分析气体成分；或使用校准过的高读数甲烷计进行直接读数，读数会调整到标准的温度和压力条件。

附录 1 中总结了可用于收集矿山瓦斯排放量的最常见仪器类型和测量流程。

手持式仪器适用于每天、每月、每季度或每年的低频测量。由于地层特性变化、煤炭生产率和其他矿山活动的变化会促使瓦斯流量变化，所以测量频率越高，准确性越高。

废弃矿井

由于没有采矿活动产生新的气源，废弃矿井的瓦斯流量会随时间推移而减少。瓦斯流量测量有助于确定和细化衰减曲线；一般使用区域性曲线作为测量起点。

如果配有专用排气烟囱或开放式钻孔，也可以在废弃矿山进行手持式测量，由于大气压力的变化，测量结果变化可能明显。使用手持设备测量抽采系统排放量的短板在废弃矿山同样可见。有时健康和安全管理机构或负责采后的部门可能要求定期监测废弃矿山排气口的瓦斯排放量，尤其是当废弃矿山改建楼宇或瓦斯排放到人口稠密区。这些测量值也可用于估算废弃矿山的瓦斯排放量。在维护和检查排气口、阻火器和安全检查的同时可以进行手动现场测量（例如见图 3.2）。但如果工作面到地表的排放路径种未绘制潜在瓦斯排放源，那么排气口测量值不一定能反映全部排放量。

图 3.2 德国某废弃矿井的排气口测量



资料来源：德国乔治·阿格里科拉技术高等学院采矿后研究中心

露天矿

通过在爆破钻孔或任何地表裂缝中使用甲烷计可以检测露天矿中的瓦斯，但要进行定量监测并不切实。

优点：

- 较低的采样频率对人力、设备和实验室分析的成本不高，费用实惠。
- 健康和法规要求煤矿行业使用，监测瓦斯的经验和专业知识可以迁移到监测温室气体排放上。
- 可以为确定瓦斯缓解机会提供有用的数据。

缺点：

- 高频采样不切实，人力负担大且成本高昂。
- 依赖于专业人员进行正确测量和取样。
- 必须妥善保养和校准仪器，否则采样易产生误导性的结果。
- 在非正常操作条件下进行测量也可能产生误导性的结果。

3.1.4 使用连续排放监测系统 (CEMS) 进行测量

地下作业矿井

连续排放监测系统 (CEMS) 可以提供风排和抽采系统瓦斯排放的最准确测量，但实施成本也偏高。目前大多数现代地下煤矿已经配备了连续环境监测系统，为现场和远程监测站（如矿山办公室、瓦斯抽采泵站）提供实时管理信息，这套系统给矿山管理和运营安全带来的好处远超成本。系统提供的数据包括地下关键点和风机瓦斯流量和浓度，及瓦斯抽采量、压力和温度。有效的矿山监测系统需要按计划维护和校准，因为抽采管道和风排气道可能携带大量的煤尘、其他矿物颗粒和水分，干扰传感器并扭曲读数。地下矿使用的速率仪和甲烷传感器也必须符合安全和防爆所需的电气标准。标准用实验室气体分析仪可以在地表使用，如红外分析仪。气体样本可以从矿山的“管束”中抽取，或从地表风道抽采到附近指定低风险区。大多数矿山监管系统都设定了允许通过风机的最大安全瓦斯浓度。因此，对地表主扇的瓦斯浓度进行连续监测具有重要的安全效益。

图 3.3 主扇管道上安装实时空气流速监测设备



资料来源: Belle, 2014年

管束气体监测系统包括一个由管道组成的网络，通过管道从关键位置抽取样本到地表进行气体分析 (Belle, 2013)。抽样时间和分析时间存在滞后，但可估算。该系统的主要用于监测自燃风险，以及在连续甲烷监测器因火灾或爆炸损坏时，协助进行甲烷监测。Belle (2013) 报告指出，尽管测量值可能无法准确反映地下不断变化的情况（对保障安全至关重要），但测量结果相当准确。

还需注意，进入或释放到工作面的瓦斯中可能含有重质烃，如乙烷或丙烷。烃会扭曲常规红外气体检测系统的响应，导致瓦斯测量不准确。应选择能够校正非甲烷烃的监测设备，以确保准确测量 (UNECE, 2016)。实验室气相色谱法用于通过使用在矿山中采集并密封在特殊容器中的瓦斯样本来进行全面的烃类分析。

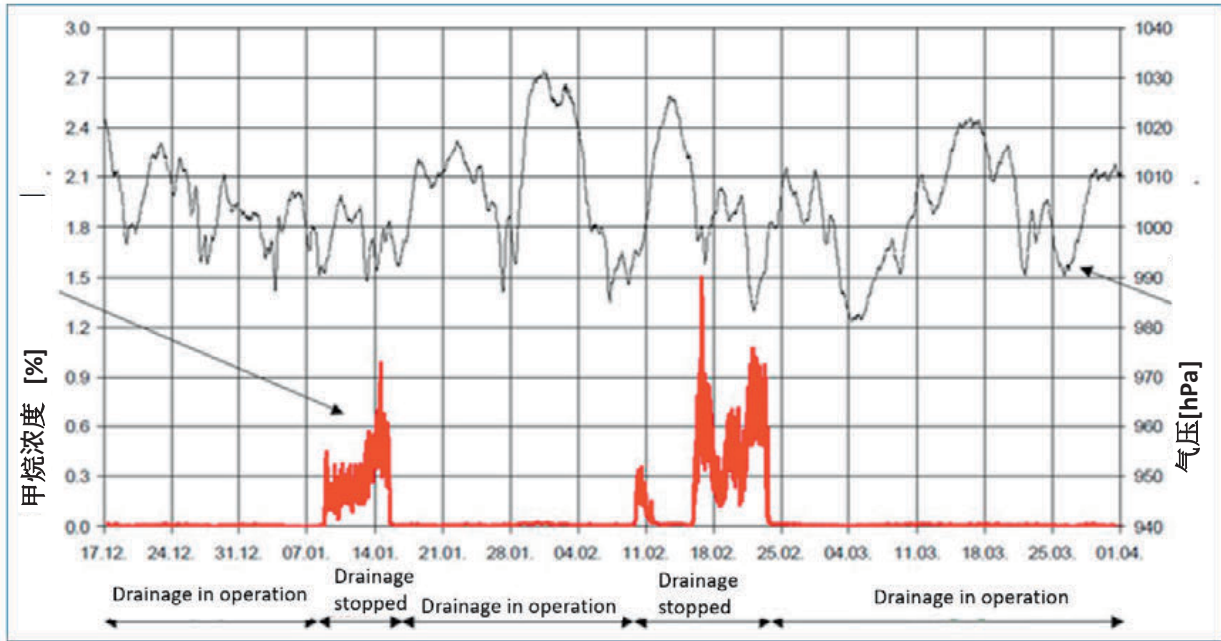
废弃矿

在废弃矿确定的地表排放点安装连续排放监测系统颇具难度，废弃矿一般没有供电，缺少照明和支持部门（如办公室和设备房）。如果废弃矿可以接入电网或有独立发电机供电，连续排放监测系统就能

良好运行。如，在将废弃矿项目用于热电联产工厂确保连续监测的电力。

德国在实施废弃矿连续排放监测系统方面拥有丰富经验，尤其是在管理煤矿瓦斯不受控排放到公共建筑对公众带来风险方面。为了确保公众安全，煤矿监管机构可以要求在受影响的建筑物中安装连续监测系统（见图 3.4），并实施瓦斯控制措施，如对建筑物下方的旧巷道进行瓦斯抽采（Möllerherm, 2021）。

图 3.4 使用固定测量装置监测地下室中的瓦斯浓度，显示抽采和未抽采时的瓦斯浓度



资料来源: Möllerherm, 2021

即使没有外部电源，仍然运行连续排放监测系统，一般会选用电池供电的流量和甲烷浓度监测设备作为替代方案，数据通过存储备份和遥测技术来传输。备用设备有时用于收集数据以评估为受控的排放风险，或作为废弃矿瓦斯利用可行性研究的一部分。

优点:

- 比定期采样或使用排放因子更准确。
- 许多矿已出于安全目的采用了连续监测系统。
- 无需大量人力投入管理。
- 可用于评估特定矿的减排机会。
- 对数据质量要求高的排放交易行业来说，连续检测系统是唯一可接受的技术选择。

缺点:

- 与其他方法相比成本高昂。如果仅出于 MRV 的目的（如果仅出于监测目标），成本可能会超过收益。
- 依赖人员正确解读数据的能力。

注意事项:

- 仪器的妥善维护和校准是关键，否则很可能会产生误导性的结果。
- 必须制定标准和合规流程，确保维护和校准作业。

- 因瓦斯排放而收取的碳费或碳税需要根据准确排放数据作为税费基础，所以连续排放监测系统可能是唯一可接受的监测方法。

3.1.5 监测频率

监测频率会极大地影响测量结果，且会根据辖区和 MRV 体系的目标而变动。确定监测频率和重要考虑因素见下表 3.1。

表 3.1 煤矿瓦斯监测频率和考虑因素

监测频率	考虑因素
连续监测	使用连续排放监测系统，这可能涉及在采矿区域布置带有传感器的管网或特定位置的传感器，将信息传递到中央单元 根据仪器采样频率和数据的固有变异性来确定“连续”频率，例如每分钟、5 分钟、10 分钟等 在正确校准和使用的前提下，这是最准确的方法 最有利于实时直接向相关机构传输数据 与其他可用方法相比，成本最高 需要对仪器进行定期校准，以及严格的操作设备培训和数据解读培训
每日监测	使用手持仪器进行定点测量（某些情况下可以使用 24 小时卫星遥感） 测量应在正常操作条件下进行 费用较高，因为需要全职技术人员每天进行测量和解读 产生大量可能并不必要的的数据，可能和政策目标无关 需要对仪器进行定期校准，及严格的操作培训和数据解读培训
每周监测	使用手持仪器进行定点测量 测量必须在正常操作条件下进行 每周检测可能是定点测量的最佳频率，相较每日测量更经济，仅占技术人员 20% 的时间，待管理的数据量也有利于矿山工作人员、公众、政府机构和其他利益相关者编制和审查 需要对仪器进行定期校准，及严格的操作培训和数据解读培训
每月监测	使用手持仪器进行定点测量 测量必须在正常操作条件下进行 与更频繁的测量相比，每月检测对报告矿山或实体机构的负担不重，每月数据不具代表性 需要对仪器进行定期校准，以及严格的操作培训和数据解读培训
季度监测	使用手持仪器进行定点测量 测量必须在正常操作条件下进行 与更频繁的测量相比，季度监测数据不具代表性 对报告矿山或实体机构的负担小 需要对仪器进行定期校准，以及严格的操作培训和数据解读培训
年度监测	使用手持仪器进行定点测量 测量必须在正常操作条件下进行 对报告矿山或实体机构负担极低 需要定期校准仪器并进行严格的操作培训和解读数据的培训 准确度非常低，且由于测量可能不具有代表性，收益存疑

3.1.6 排放监测的其他考虑因素

地下作业矿

地下煤矿活动包括出于运营和安全原因对甲烷浓度、气流和瓦斯抽采进行监测，数据可能来自手动和连续监测来源。数据收集可能利于温室气体估算，但收集过程可能会遇到障碍，如机构的保密文化。保密文化或出于对安全监管机构惩罚性行动的恐惧、对政府设定不切实际的瓦斯浓度目标的担忧（尤其对国有煤炭企业而言）或由于公司间的竞争而产生。将矿山排放纳入国家或地方温室气体报告的规定有助于获得更好的决策数据，确保制定切实政策，减少长期执行阻力。同时要求通过独立的第三方检查确保排放数据可信、可量化。

考虑矿井空气和抽采系统中甲烷浓度的变化，需要清洁发展机制（CDM）和联合履行（JI）下排放减

少量（CERs）认证，或其他排放交易计划认证时需要借助连续排放监测系统（CEMS）。为了确保信息完整性，项目开发方需要单独安装、操作和维护监测和数据管理设备及系统（独立于矿井操作和安全信息系统）。此外，项目开发方还要确保设备遵循严格的监测协议，如《联合国气候变化框架公约》批准的“煤矿瓦斯减排”综合协议（附录 2）。定期监测本身并不能为排放交易计划提供严格和可信数据，但能满足于国家温室气体报告计划的要求，因为温室气体报告要求的方法一般不尽严格。

废弃矿

废弃矿山的排放可在已安装减压排气口处监测，排气口流量根据大气压变化而变化。来自密封不良的矿井入口、未知的矿井入口、未密封的采空区井及地表渗流（有时覆盖大面积）的排放一般不易确定。逃逸排放虽会造成滋扰和危害，但废弃矿的逃逸排放量一般小于在营矿。根据递减曲线估算，澳大利亚废弃矿的排放量占该国煤炭行业年排放量的 4%，美国废弃矿的排放量占本国煤炭行业年排放量的 11%（澳大利亚 DISER，2021 年；美国环境保护署，2021 年）²。

许多国家在量化废弃矿国家瓦斯排放量方面面临挑战。虽开展了针对废弃矿的监测，但监测活动尚未普及。各国家机构（如美国环境保护署、英国环境食品与乡村事务部（Kershaw，2005）、澳大利亚清洁能源监管机构）已开发出评估废弃矿瓦斯排放量的方法。这些方法基于模型假设或模型预测，结合排气口测量数据。当弃矿后，地下水抽取停止，工作面逐渐淹没。合适量化方法还应考虑地下水的恢复情况。有关当前废弃矿瓦斯排放量化方法的详细内容见附录 3。

露天矿

露天矿排放呈现大面积上扩散特点，测量瓦斯排放量颇具挑战性。虽然有相关技术，但露天矿很少直接测量，一般用一级排放因子（政府间气候变化专门委员会方法）测量。与深井矿相比，露天矿排放量往往较低，所以哪怕排放数不确定影响不大。获得可靠结果的方法涉及测量开采或扰动煤层（从勘探钻孔岩心中取样）的瓦斯含量，并假定瓦斯 100 % 会排放。这种测量法或将排除孔隙和裂缝间的瓦斯低估排放量，但可以通过校正因子调整。采后排放量也可以通过总瓦斯含量来计算。直接测量露天矿山平均甲烷浓度的另一种方法是使用长光程红外仪器或类似仪器，但这种方法通常作为研究项目进行。

3.2 煤矿排放报告

报告是任何监测活动的重要辅助和补充工具。报告可以帮助利益相关者（包括排放机构）便捷、有效追踪排放和减排随时间的变化。报告数据的使用者还可以了解特定的运营或商业条件，以及这些条件如何对个别煤矿和煤矿业产生的广泛影响。

报告分为两种类型：（1）全国或地区性清单报告和（2）煤炭层面报告。清单报告者一般是政府机构或其他实体，负责收集、计算和分析监测数据，以备国家清单。国家温室气体清单会向联合国气候变化框架公约报告，而次国家级清单则向国家或省级相关机构报告。

在煤矿层面，报告者通常是在营矿、废弃矿或减缓项目的所有者/经营者。煤矿层面的排放和减排数据可报告给：

- 环境监管机构

² 基于递减曲线的估算或被低估，有实例表明，实际抽采的气体值比递减曲线预测值要高。

-
- 矿山健康和安全管理部門
 - 自愿或监管性的排放交易项目
 - 非政府实体，如行业协会，或
 - 煤矿公司内部负责跟踪温室气体排放或管理环境、社会和治理目标的办公室或部門。

报告系统有助于接收和处理报告数据，主要发挥两个作用：（1）将大量测量或计算的数据汇编成简洁、有代表性的报告，（2）为提交和接收报告提供结构化和可靠的框架。这两个功能确保不同报告项目间的透明度。理想情况下，用户应接受适当的培训，正确访问和使用报告系统，落实正确和一致报告流程，同时减少报告者的时间和成本负担。

报告系统将通过监测和测量获得的原始数据编译成易于理解的格式，供报告煤矿、国家清单编制人员、监管机构、决策者、公众和其他利益相关者有效使用。这是一个关键作用，因为排放数据通常收集在大量复杂的数据集中，数据集以不同格式存储，以不同单位记录，并采用不同的时间序列。在缺乏上下文的情况简单传输原始数据对编制者和用户来说价值甚微。因此，有效的报告通常提供了一个良好的模板或报告表，以确保报告一致性。

煤矿瓦斯/废弃矿瓦斯/露天矿瓦斯排放报告的良好实践要求模板或报告表：

- 报告者、报告接收者和其他用户易理解
- 便于报告者导航和完成
- 内容全面，涵盖重要煤矿信息和关键排放数据
- 准确展示支持排放估算的数据集
- 内容完整，涵盖煤矿整体净排放值，理想状态下能确定减缓活动涉及的全部排放途径和减排量
- 内容清晰，可轻松识别定量方法和排放因子，同时可识别潜在数据差

现有的煤矿瓦斯、废弃矿瓦斯和露天矿瓦斯排放报告和报告表格包括《联合国气候变化框架公约》ACM0008 项目设计文件和监测报告³及美国温室气体报告计划针对地下煤矿的报告表格⁴。

报告的目标各不相同，由此报告的详细程度也会有所不同，以满足授权方制定报告参数的要求。报告可以包括单一年度瓦斯排放值或煤炭生产量乘以排放因子，或根据既有规定或绩效要求，提供计算方法和矿内所有点源在多个测量期的瓦斯浓度、流速和其他因素的详细数据。

一般大家倾向获取更多数据。但大量数据不易管理，尤其涉及纸质表格。建议平衡计划的总体目标和获取、编译和数据的负担，同时考虑增加数据细节获得的附加价值。还要有效利用数据，佐证报告方在获取和报告数据方面承受的负担是合理的。如果仅要求报告数据而不进一步利用数据，会让人觉得计划是浪费而非增值。

如果报告目前无需纳入大量数据，可以要求报告煤矿保留数据记录以供不时检查，对记录进行良好跟踪和核查直接影响报告的可信度。

³ 案例参见：杜尔平煤矿瓦斯利用项目（<https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-SUED1214838535.8/view>）

⁴ 子部分 FF 报告表格参见：<https://ccdsupport.com/confluence/display/help/Reporting+Form+Instructions>

报告框架应该具备良好结构，以支持数据传输。系统可以接受纸质或电子版，以不同的频率提交（如每季、每年）进行报告，通常监测频率高于提交频率。报告方或将持续或每天监测排放量，但每年只报告一次。无论监测属性如何，有效的检测都将建立用于准备、认证、提交和接受报告的流程和系统。认证是提交过程中的一个重要步骤，认证要求所有者/经营者或其他法律责任方确认审查并理解报告的数据，并证明数据的准确性。认证还要求报告者默认或明示数据获取以及排放测量和计算过程合规。

在线温室气体报告系统的案例包括美国温室气体报告计划（USGHGRP）的电子温室气体报告工具（e-GGRT），工具用于美国境内煤矿报告。⁵报告需经煤矿所有者/经营者指定代表认证后方可视为正式提交，代表须先前得到计划管理方批准。

在建立报告计划或系统时，还需考虑其他因素，包括：

- **报告负担：**考虑所需信息是否目的明确且不会给报告者带来过重负担，这直接影响报告者的接受度。所以政府机构应该自问：
 - 额外的信息颗粒度和人力投入是否达到了报告计划的目标？
 - 投入资源后是否产出可信的排放数据，并能深入了解煤矿、区域或全国瓦斯排放？
- **报告门槛：**并非所有煤矿都富含瓦斯，所以政府机构应考虑是否要求所有矿都报告，还是只关注排放量大的矿，这取决于报告的目标。如果目标是制定煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯排放的综合清单，那么可以要求任何含瓦斯矿报告排放。如果目标是了解主要排放源或减排源，那么设定报告门槛是最有效的政策工具。如，美国温室气体报告计划设定的报告门槛为每年 3650 万立方英尺瓦斯（~1.03 Mm³）或约 17,025 吨二氧化碳当量。排放量低于这个水平的地下矿无需报告。通过设立门槛，2019 年 226 个在营地下矿中只有 67 个提交了报告，67 个矿的排放量占当年美国地下矿瓦斯总排放量的 92%（Talkington, 2021）。
- **适用的全球变暖潜能值：**甲烷的全球变暖潜能值（GWP）随每次政府间气候变化专门委员会（IPCC）评估报告（AR）的发布而变化。在评估报告 3 中，全球变暖潜能值为 21，在评估报告 4 中为 25，在评估报告 5 中的 100 年时间框架内为 28-34。⁶ 由于甲烷相对二氧化碳在大气中的存续时间较短，所以在较短时间框架内甲烷的全球变暖潜能值更高。全球变暖潜能值的变化导致不同的排放评估、预测和减排估算值，所以需要明确适用的评估报告（AR）并阐明更新 GWP 值。
- **间接排放、减排量和非甲烷有机化合物：**报告减排量时需明确仅关注甲烷，还是包括非甲烷有机化合物（NMOCs）及燃烧甲烷（及 NMOCs）产生的二氧化碳。报告计划还可以考虑煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯减排项目带来的间接减排效益，如替代燃煤发电或实现热力供暖。
- **与其他计划协调数据收集：**报告可能为报告方提供收集多项目相关数据的机会。如基础排放数据，如气流和甲烷浓度数据，或将有利于矿山安全和环境监管机构。

⁵ 美国环境保护署电子温室气体报告工具（e-GGRT）：<https://ghgreporting.epa.gov/ghg/login.do>

⁶ 与二氧化碳相比

3.3 排放数据核查

作为内部政策和流程的一部分，报告方应开展正式的质保/质控（QA/QC），确保在正式提交前对排放或减排报告进行独立审查。通过内部 QA/QC 对报告进行自证，报告方有责任确认数据准确性。但数据错误不可避免，有时还存在数据差距。所以需要引入非报告方对数据进行验证，所以验证是 MRV 的第三个关键组分。

验证是确保报告数据真实，确保与报告要求一致和合规的关键步骤，有利于公众接受数据，有利于决策者增强制定政策的信心。

验证有多种途径，一般涉及数据接收方或独立第三方对数据进行审查和确认，以证实报告数据准确。第三方包括认证机构，目的是审查和验证报告（法定或自愿），第三方可能是从事煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯减排项目的利益相关方，如双边或多边融资机构。第三方还可能是公众代表，如公共利益团体或非政府组织。

验证的级别在很大程度上取决于可用资源和验证目的。在法定或自愿排放交易中，减排报告的验证通常由独立、授权的第三方机构进行。验证应完整、合规，通常包括对煤矿的现场访视和记录核实。第三方验证完成后，验证报告或将由监管机构复验。通过碳抵消计划、温室气体排放上限和交易计划、碳税或其他碳费，减排可能带来巨大财务价值。所以通过详尽验证来确保减排目的符合公众利益，验证本身会产生大量成本，成本一般由报告方承担。

对于省级、地区或国家层面上大规模的排放报告，报告数据的验证通常在提交报告后由负责 MRV 的政府部门负责。由于预算、政策和流程考虑，完成所有报告验证的时间有限，所以需要集中关注报告子集或特定数据。表 3.2 列出了典型验证技术。

表 3.2 验证技术示例

验证技术	详细信息
汇总数据比较	<ul style="list-style-type: none">• 对照已知数据基准，如煤炭产量的变化• 对照企业前几年报告数据• 在同一报告年，对比报告企业的排放量与其他企业的排放量• 比较报告数据与其他企业、区域数据
数据和计算核查	<ul style="list-style-type: none">• 根据行业平均水平，核查报告中排放量、人口数量或活动数量的异常值• 根据指定或标准化计算，独立进行数据计算，评估报告数据的准确性• 访问企业核查记录，确认报告数据或进行独立测量
独立核查	<ul style="list-style-type: none">• 要求经认证的第三方验证机构对各企业的数据进行核查• 利用航空和卫星调查获得的遥感数据（见 3.3.1 节）

验证核查的详尽程度或不如排放交易计划的核查，开展层次也不如国家级报告，但作为尽职调查的一部分，核查人员与报告人员之间很可能出现额外沟通，可能导致对原始报告的修改，包括对排放量和减排量的上调或下调。

验证完成后，公布报告数据也意味进一步打开验证核查敞口，如对数据的公开验证。

3.3.1 使用遥感技术核查

遥感技术（如卫星和航空技术）尚未用于量化国家监测煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和地面矿瓦斯排放，但使用遥感技术估算特定地点的煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和地面矿瓦斯已取得一定进展，推动了遥感技术应用在验证地面测量和估算上。遥感技术在核查方面的潜力巨大，并已在多项研究中得到证实（参见 Barkley, 2019; Miller, 2019; Varon 等人, 2018, Varon 等人, 2019）；不过对国家清单进行验证来说，采用遥感技术是一个新兴课题。

遥感技术最易从地下作业矿中获取排放数据，特别是从排气系统中获取，因为排气系统中瓦斯浓度更高。遥感也可用于露天煤等扩散气源、地下作业矿通风井中的稀释瓦斯及废弃矿瓦斯的严重渗漏等。还需考虑到瓦斯浓度和流量的变化，因为通过遥感获得的排放值可能与不同时间点地面测量的排放值不匹配。

瓦斯浓度可以就地测，也可以通过卫星测。两种测量都需要将成像传感器（检测瓦斯排放）安装在卫星、飞机或其他沿预定轨迹行驶的车辆上。成像传感器分被动式和主动式两类。被动式传感器通过量化阳光吸收和反射（周期性），主动式传感器量化目标激光的吸收和反射（光检测和测距，或激光雷达）。

解读收集的数据、将数据表达为排放量或排放率的过程涉及诸多因素，如选择公式、算法来对吸收辐射差异进行分类。每种方法都有特有不确定性，这些不确定性尚未完全理解或量化。

卫星观测

卫星在排放监测方面有诸多优势，如能够独立于排放源进行追踪，能在较大区域内重复估算。最初卫星用于监测大型泄漏，泄漏事故一般会在特定时间点释放大量瓦斯，近期在传感器和卫星图像分析方面的发展已经能够用卫星来获取排放速率和排放源特征。大多数研究都关注油气基础设施的瓦斯排放，油气基础设施一般在地面，易于卫星追踪，在过去五年内煤矿瓦斯排放也受到卫星关注。

利用卫星估算排放估算的优势应卫星类型而异。卫星可以提供全球、区域和特定覆盖范围（附录 4 罗列了观测瓦斯排放的卫星系统）。覆盖范围、空间分辨率、时间尺度和成本之间需要权衡，一般地球卫星的分辨率（像素大小）不高，而定向卫星可能无法提供全球范围的图像，或需考虑频繁往返，或需部署定向卫星系统。

卫星通过像素从地表和空气柱捕获数据，每个像素包含特定定量属性，表示地表与大气之间的**反射率差异**，即与地球接收到的太阳辐射（已知的周期性数据）相比，沿电磁光谱反射与吸收的光量有多少。大气层中甲烷密度越高，像素在地球表面检测到的辐射就越少，这是其中一个指示高排放的因素。

通过分析**算法或指标**组合解释像素属性是量化甲烷浓度的重要步骤。算法旨在突出不同波长反射的差异，并消除部分要素（如云层、建筑物和水体）的影响，这类要素可能导致像素值异常。除分析像素属性外，量化还依赖**空气污染扩散/传输模型**来了解甲烷的运动和来源。常见模型是高斯羽流反演和像素质量平衡模型，此外还有其他模型提供更高精度，包括综合质量增强模型（IME）。

校准卫星观测与地面监测数据可以提高卫星数据的准确性。数据处理公司声称已在卫星地理空间数据的自动解释方面取得了进展，结合卫星数据与其他公私信息可以以区分煤矿瓦斯和其他来源的瓦斯（如石油和天然气作业瓦斯），以实现区域排放评估和大规模泄漏检测（Barré 等人, 2020）。

对于企业层排放，最近的高分辨率商业卫星可覆盖目标区域并收集瓦斯排放数据。如 GHGSat 目前有三颗高分辨率卫星，正扩展为一个由十颗卫星组成的星座，目的是提供煤矿层面的信息（见图 3.5）。其他非营利组织和公司或将发射用于瓦斯监测的卫星（例如环境保护基金、Bluefield、Carbon Mapper），各组织卫星处于不同的开发阶段。

利用最佳高分辨率卫星可对地下作业矿的空排和抽采进行独立验证和抽查（Varon 等人，2018）。随着卫星运营商持续改进和扩展星座，卫星的能力和容量将增加，可以进一步涵盖更多地表矿和废弃矿。现在煤矿可以每周监测一次，预计到 2022 年底，卫星可对煤矿瓦斯排放进行每日测量。

图 3.5 2021 年 3 月 31 日波兰四个在营矿通风口瓦斯浓度高于大气背景值



资料来源: GHGSat

要认可遥感技术验证煤矿瓦斯、废弃矿瓦斯和露天矿瓦斯排放，增强对遥感技术的信心，需要对数据采集和处理进行全面评估，包括评估不确定性，并将模型数据与地面观测数据进行匹配（Varon 等人，2019）。研究人员持续解读和量化以下几种不确定性来源，包括：

- **排放可变。**煤矿瓦斯排放，特别是抽采系统的排放存在极大的时间可变性。排放率可能在一小时内发生变化，变化取决于生产率、地质情况、大气压等。不确定性也与地面观测有关，可以通过高频和定期的观测次数来减少不确定性。
- **探测不确定。**当卫星检索甲烷羽流的柱浓度时，垂直灵敏度取决于大气散射和太阳辐射的吸收。晴朗的天空和低风速会提高甲烷的探测效果。排放源速率超过 10,000 千克/小时的高排放单位（例如石油和天然气设施）也更易探测，所以需要灵敏的仪器来探测煤矿低浓度空排，哪怕空排源浓度很低，但由于总量大，仍能在空气中检测到。
- **煤矿位置不确定。**由于矿场的位置通常未知，特别是地下或已关闭的矿场，因此可能难以精确识别和确定排放源。
- **排放源不确定。**瓦斯排放难以追溯给具体煤矿，瓦斯可能有多个源头。煤矿通常位于石油和天然气田附近，如阿巴拉契亚地区。典型案例是 Kayrros 数据公司对澳大利亚博文盆地的瓦斯排放量的估算。Kayrros 在 2021 年 6 月 21 日在博文盆地上空发现两大片甲烷云，每片云的可见范围超过 30 公里。羽流呈扩散状，来源存在较大不确定性，当时 Kayrros 将羽流归因于煤炭开采。昆士兰州环境与科学部表示并未收到煤矿瓦斯排放的通知（Bloomberg, 2021）。为减少这类不确定性，可以结合高分辨率的定向卫星和高频测量获得结果。

- **量化不确定。**为了量化点源的瓦斯排放量，研究人员需要利用不同技术将卫星上太阳辐射的反射率和吸收率转化为瓦斯浓度和体积。目前，GHGSat 已证明拥有用于检测和量化煤矿瓦斯排放的最精密仪器。有研究表明，研究空气污染扩散的最佳模型可根据仪器精度（GHGSat 仪器 1-5%），结合使用综合质量增强（IME）模型推断出源速率，误差为每小时 0.07-0.17 吨+5-12%，使用横截面通量（CSF）的误差为每小时 0.07-0.26 吨+8-12%（Varon，2020 年）。

总之，卫星勘探的煤矿排放数据结合连续排放监测系统在内的其他数据，能有效提高人们对卫星数据的信心。

航空勘测

航空勘测具备许多与卫星观测相似的特性和局限性。航空勘测常用于量化较小规模的排放源，因为航空能提供精细的分辨率和报告细节，并能区分看似连续的排放源。航空数据可以弥补卫星测量和自下而上清单的中间环节，也可用于煤矿抽采、风排和露天矿瓦斯排放的独立评估。

航空勘测在煤矿的应用已涵盖主被动传感器。利用被动传感器进行瓦斯航空勘测由 MAMAP（甲烷机载 MAPper）（Krings 等人，2013）首创。MAMAP 甲烷柱观测可以准确将观测到的通量分配给约 20 个单独点源的小集群。MAMAP 是一种光栅光谱仪，在飞行过程中记录从地面反射的太阳辐射（短波红外），飞行位置位于排放源所在层上。收集到的吸收辐射数据解释为瓦斯排放量。MAMAP 的精度足以调查点源高度集中的瓦斯排放区，如抽采口和风排口等少量排放区。对于煤矿甲烷通量估算，MAMAP 需要从不同位置部署的风激光雷达系统获得风速和风向信息。图像机载检测和量化瓦斯排放的优势在于，大气瓦斯分布图像可以检测出意外泄漏的位置，缺点是只能在晴朗的白天使用。

与被动遥感相比，使用激光雷达（光检测和测距）的主动遥感使用激光作为光源，不受阳光影响。通常，测量排放量的方法是垂直穿过排放羽流，并将信号增强与排放源上风处或羽流位置以外的飞行航段进行比较。机载 瓦斯激光雷达系统主要用于检测管道或石油和天然气设施的逃逸排放。德国航空航天中心 (DLR) 运营的激光雷达系统 CHARM-F（Amediek 等人，2017 年；Fix 等人，2020 年）已针对波兰某煤矿对瓦斯排放量进行了量化。研究发现，从 6 公里以上的飞行高度可以轻松检测到每年约 9 千吨的瓦斯排放量。研究同时发现，要准确测量柱中的瓦斯浓度，需要精确的风信息来降低总体不确定性（Wolff 等人，2021 年）。激光雷达的优点是不受飞行高度上方云层的影响，白天和晚上都可以使用。激光雷达最好始于排放羽流源头附近，以区分相邻排放源。

要使用航空勘测数据量化排放，最常用的是质量平衡法，包括对目标源上下游的观测，并计算排放量差异作为瓦斯净通量。质量平衡法曾用于独立评估波兰上西里西亚煤田的瓦斯排放量（Fiehn 等，2020）。Kostinek 等人（2021）最近使用相同的现场收集数据展示了质量平衡技术的替代方法，包括飞机现场测量同时结合拉格朗日粒子扩散模型，这种方法可用于远程量化煤矿排放。

航空勘查比卫星更准确量化排放和确定点源，包括风排和抽采。考虑到煤矿上瓦斯浓度和流量的变化，航空测量可以与同期地面测量相结合。为进行常态可信验证，应定期进行航空勘查。请注意，考虑到时间成本和管理要求，航空勘查可能受限。

航空勘查需要煤矿运营方提供精准临时排放数据（按月或更高频）。解决方案包括设立独立机构定期进行航空勘查，或使用无人机进行地面测量。事实证明，将多台无人机部署在指定位置进行临时观测非常有用。目前，航空勘查发展迅速，需要更多研究来了解航空勘察评估 MRV 数据的潜力。

4. MRV 如何支持煤矿瓦斯减排

要点

- 目前的减排技术覆盖了开采中和废弃的地下矿，大幅增加减排项目的空间很可观。
- MRV 对减排至关重要，MRV 可为决策者、投资方和行业提供准确信息，以明智决策。
- 可根据 MRV 确定的减排机会进行专项沟通，可借助工具支持项目开发人员启动减排项目，获得进一步减排收益。

4.1 作业煤矿减排

MRV 通过提供可靠数据，可以确定国家层面上煤矿瓦斯排放的全局，有利于评估减缓潜力，并为制定针对性和支持性的政策奠定基础。此外，MRV 还便于跟踪减排行动及影响。

地下作业矿减排

富含瓦斯的地下作业矿具有最大减排潜力，地下作业矿占煤炭开采行业排放大头，瓦斯排放可以通过通风系统或瓦斯抽采系统释放。

图 4.1 波兰 Pniówek 矿山的瓦斯抽采设备



资料来源：美国环保署。

矿井通风空气甲烷的排放量较大，通常占总体积的 70-80%，但其中的甲烷浓度非常低，通常低于 1%，这使得减排措施的成本高昂。当前的减缓技术使用一种设备，通过氧化甲烷生成二氧化碳、水和热量，从而去除主排风扇排出的一部分通风空气甲烷。在一些矿山中，产生的热量已通过蒸汽轮机用于发电，但需要额外的抽放瓦斯来维持稳定的甲烷流速和浓度。在少数情况下，电力的高销售价格可能足以维持矿井通风空气甲烷项目，但总体而言，矿井通风空气甲烷项目需要碳定价或专项财政激励措施的支持才能实现经济可行。

另外，甲烷浓度达到 25% 及以上的抽采可达成最具成本效益的减缓项目。安装煤矿瓦斯抽采系统和/或提高抽采效率可增加高浓度瓦斯的比例，高浓度甲烷更容易进行减缓处理。MRV 可以在国家和/或煤矿

层面提供用于减缓的抽采比例信息，与风排相比，抽采是更具成本效益的选择。

从地下抽采并输送到地面泵站的瓦斯非常适合加工利用，前提是按照最佳实践保持瓦斯纯度。最常见的利用包括瓦斯通过管道运输到当地工业区或居民区供暖，或使用燃气发动机进行瓦斯发电。未用的瓦斯可以进行空燃，随着美国加州总量控制与交易计划的实施，空燃日益普及，但在全球范围内，除非有碳定价或法规要求，空燃并不常见。

理论上，风排与抽采综合利用可以实现煤矿瓦斯近零排放。采后可能会出现逸散排放，如煤炭处理和加工过程中释放的瓦斯。

露天矿的减排

露天煤矿瓦斯减排的机会有限。少数情况下可通过采前预钻的钻孔进行预抽采，达到可观的减排量。但据报道，全球几乎没钻孔预先抽采的有商业案例，迄今为止，大多数国家并不会专门考虑露天矿的减排。但随着对温室气体减排，特别是瓦斯减排的日益重视，碳税或排放交易平台可能会提供足够的价格信号激起对露天矿开采煤层的预抽产生兴趣。

4.2 关闭和废弃矿井减排

关闭煤矿是实现矿山生命周期瓦斯排放最小化的策略。MRV 可以追踪关闭矿井时排放量和煤炭产量的下降情况，及煤矿是否按监管要求关闭，如确认废弃矿井竖井的封闭情况及风排瓦斯的减排措施。MRV 还可以支持量化煤矿废弃后的持续排放量。

关闭后的废弃矿仍能提供瓦斯利用商机。前提是政府部门和立法机构需要确定一个责任机构，可以有效处理煤矿关闭后的责任，涉及 MRV、瓦斯排放许可证和瓦斯减排措施。

图 4.2 使用封装的便携式仪器在英国某废弃矿山的竖井通风口进行监测（前景图）



资料来源: D. Creedy, 2021

废弃矿井的减排

废弃矿井瓦斯的利用可以参考抽采瓦斯。但并非所有废弃煤矿都适合开展再利用项目。有关如何识

别、评估废弃矿井瓦斯潜力可以参考 GMI 在线培训课程及联合国欧洲经济委员会（UNECE）发布的最佳实践指南（UNECE，2019）。

有时，煤矿瓦斯联合发电厂在矿井关闭后继续利用废弃煤矿瓦斯，如，在德国北莱茵-威斯特法伦州的鲁尔区煤矿曾有上百个联合发电厂，不少发电厂在德国煤矿全部关闭后仍以废弃矿井瓦斯为燃料运营（Moellerherm，2021）。

煤矿的关闭方式会影响瓦斯回收和利用的潜能。煤矿所有者、经营者与合作项目开发商可以提前准备，待矿井关闭后持续回收瓦斯。废弃矿井瓦斯项目的生命周期和产能主要取决于瓦斯储量规模、瓦斯衰减速度，以及随着地下水恢复后巷道的淹没速度。

如果废弃矿出现快速淹水或加速淹水⁷，瓦斯减排将迅速减少，形成自然而然的低成本减排策略，比如海平面下的巷道通过地表钻孔可被迅速淹没。

如果废弃矿井瓦斯暂时没法商业化，可通过火炬燃烧处理，但需要政策支持，防止气权所有者间发生所有权纠纷。

4.3 MRV 在减排中的战略地位

MRV 可以为政府、行业和公众提供准确的煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯排放量、减排量和减排潜力的评估。MRV 有利于政策制定，以应对气候变化的迫切需求、追踪政策影响。MRV 还可以追踪、评估项目开发的问题（如气权）和解决问题后的收益。

MRV 在项目开发中的作用

煤矿瓦斯和废弃矿井瓦斯的利用⁸或销毁项目的成功依赖于全面准确 MRV。虽然国家或地区当局可能为了实现公共政策目标而进行 MRV，但煤矿瓦斯或废弃矿井瓦斯项目的开发者的主要目标是设计最优规模的项目，保持项目在商业规模上的运营，并创造能够推动盈利的收入。

一个稳健的 MRV 计划需要设立清晰的瓦斯可利用基线，并记录瓦斯流速及浓度的变化，在此基础上确定项目最佳规模目，衡量煤矿瓦斯、风排瓦斯或废弃矿井瓦斯的减排成效，实现 MRV 的开发目标。透明、详尽的 MRV 也有利于通过市场将减排量转化为现金流，在某些情况下，市场化是项目主要甚至唯一的收入来源。

为支持煤矿瓦斯和废弃矿井瓦斯项目的有效规划与开发，进一步增加项目数量，增强减排效果，MRV 应提供以下信息：

- 告知煤矿瓦斯和废弃矿井瓦斯的减排机会。
- 告知第三方和其他利益相关方提供有关煤矿所有者/经营者、煤矿位置、当前和历史运营数据、瓦斯平衡情况、矿井通风能力和排放量、瓦斯抽采系统的容量和吞吐量、现有项目等。

表 4.1 概述了 MRV 提供的信息，包括煤矿瓦斯和废弃矿井瓦斯的排放量、减排的潜在价值等。

⁷ 加速淹水指通过工程手段增加水流加速淹水，如通过钻孔连接已淹和未淹水工作面。加速淹水并非故意引水入淹矿，引入入矿或将污染地表水和地下水。

⁸ 露天矿瓦斯利用理论可行，但尚未有实践经验。因为缺乏商业案例，这部分内容没有涉及露天矿瓦斯。

表 4.1 MRV 提供的支持信息和减排资源

信息类型	支持煤矿甲烷减排的数据	支持废弃矿井甲烷减排的数据
排放地点	<p>作业矿井中特定点源：</p> <ul style="list-style-type: none"> • 通风井 • 瓦斯抽采口 • 瓦斯抽采井 	<p>特定排放点源：</p> <ul style="list-style-type: none"> • 通风管 • 不当堵塞和废弃的瓦斯排放井 • 废弃的竖井和漂移通风口 <p>扩散源：</p> <ul style="list-style-type: none"> • 露头 • 工作面上方的破裂地面 • 记录、未记录的未密封矿井入口
排放速率和量级	<ul style="list-style-type: none"> • 矿井和点源瓦斯排放 • 瓦斯排放速率(m³/m) • 瓦斯浓度 • 煤炭开采率 	<ul style="list-style-type: none"> • 矿井关闭时的总排放量（最初较高，假设随着时间推移排放量减少） • 透水率 • 气压对矿井排放的影响
测量方法	<ul style="list-style-type: none"> • 直测：在点源、缓解项目中使用校准仪器定期或连续测量（政府间气候变化专门委员会第 3 级方法） • 使用煤矿或盆地特定排放因子（政府间气候变化专门委员会第 2 级方法） 	<ul style="list-style-type: none"> • 间接测量涉及地质、采空区、水流和衰减曲线建模（政府间气候变化专门委员会第 2/3 级方法） • 直接测量包括直接监测点源排放和缓解项目的通风口
评估量的不确定性	<ul style="list-style-type: none"> • 直接测量的不确定性低 • 使用排放因子的不确定性中等 	<ul style="list-style-type: none"> • 建模的可靠性高，但需要可靠数据支持 • 直接测量的不确定性低到中等。
报告实体	<ul style="list-style-type: none"> • 煤矿所有者 • 减排项目所有者 	<ul style="list-style-type: none"> • 煤矿关闭后环境责任的继任机构（例，英国煤炭管理局） • 缓解项目所有方
验证	<ul style="list-style-type: none"> • 合格的独立三方 • 政府部门或授权代理机构 	<ul style="list-style-type: none"> • 合格的独立三方 • 政府部门或授权代理机构 • 需同行评审
影响减排潜力的因素	<ul style="list-style-type: none"> • 用于风排和抽采项目的竖井和收采点的数量 • 潜在减排项目的平均体积流量和甲烷浓度 	<ul style="list-style-type: none"> • 可用于废弃矿井甲烷项目的通风口数量 • 瓦斯总资源量 • 活跃或密封通风口的体积流量和甲烷浓度
	<ul style="list-style-type: none"> • 潜在可用关于流量和浓度波动的时序数据 <p>采煤作业会增加瓦斯资源，所以在煤矿生命周期内瓦斯供应可以保持动态平衡。</p>	<p>瓦斯资源逐步衰减，有些项目周期可能偏短</p>
减排机会	<p>根据瓦斯资源的质和量评估减排前景：</p> <p>抽采瓦斯</p> <ul style="list-style-type: none"> • 发电/热电联产（CHP） • 气体传输/分配 • 直接热能利用 • 空燃 • 汽车燃料 - 压缩天然气/液化天然气 • 原料生产 <p>风排瓦斯氧化后：</p> <ul style="list-style-type: none"> • 销毁 • 供暖 • 热电联产（CHP） 	<p>根据瓦斯质、量和捕集量评估减排前景</p> <ul style="list-style-type: none"> • 发电/热电联产（CHP） • 直接热能利用 • 空燃
煤矿所有权、位置和气权	<ul style="list-style-type: none"> • 注明煤矿所有权和位置 • 注明煤矿瓦斯所有权和许可证，为保证安全，瓦斯开采权一般为煤矿所有 	<ul style="list-style-type: none"> • 注明煤矿所有权和位置 • 注明废弃矿井瓦斯所有权和许可证。权证有国别差，如英国政府具备所有权，并根据石油和天然气勘探与开发政策发放许可证
减排投资风险	<p>有助于评估煤矿瓦斯减排项目的瓦斯资源风险</p> <ul style="list-style-type: none"> • 瓦斯利用的风险中至低 • 在稳健的碳价下，空燃减排的风险低 	<p>评估废弃矿井甲烷缓解项目瓦斯资源风险的主要依据</p> <ul style="list-style-type: none"> • 瓦斯利用的风险中至高 • 在稳健的碳价下，空燃减排的风险低
信息详情请见	<p>煤矿有效抽采和利用瓦斯的最佳实践指南，第二版，联合国欧洲经济委员会，日内瓦，瑞士，</p>	<p>废弃煤矿中有效回收和利用瓦斯的最佳实践指南，联合国欧洲经济委员会，日内瓦，瑞士，</p>

	2016。	2019。
--	-------	-------

MRV 有助于确定具体减排机会，前提是项目开发方能获得煤矿排放的数据。政府还可以通过加强宣传、提供资源来支持减排工作，包括开发工具和资源支持项目开发方和煤矿完成项目启动所需的步骤，包括：

- 了解煤矿背景
- 确定项目机会
- 评估煤矿瓦斯和废弃矿井瓦斯资源
- 评估煤矿瓦斯市场
- 分析项目现金流或资金流
- 开发和运营项目。

美国环境保护署实施了煤层气推广计划（CMOP）⁹，计划旨在为上述步骤提供工具和资源（见图 4.3）。煤层气推广计划根据国家 MRV 数据提出了减排机会地图，随图附有一份报告和表格。附录介绍了美国 35 个瓦斯含量最大的煤矿，表格包含了其他有瓦斯抽采作业的矿井。推广计划还组织召开了现行瓦斯技术的网络研讨会，通过会议与感兴趣的利益相关者结成关系网。推广计划属于自愿计划，可以看作是 MRV 的延伸，目的是帮助行业克服减排障碍，加速减排技术部署。

⁹ 参见美国环境保护署官网：<https://www.epa.gov/cmop>

图 4.3 通过国家 MRV 收集数据、提供资源的政府煤层气推广计划

Coalbed Methane Outreach Program (CMOP)



EPA's Coalbed Methane Outreach Program (CMOP) is a voluntary program with the goal of reducing methane emissions from coal mining activities.

Our mission is to promote the profitable recovery, utilization, and mitigation of coal mine methane (CMM), a potent greenhouse gas that contributes to climate change when emitted into the atmosphere. Since 1994, we have cooperated with the coal mining sector in the United States to reduce CMM emissions.

Coal mining activities release methane, which is stored in the cleats and micropores of coal, when coal bearing seams are disturbed. In coal mines, methane is a mining hazard because it is explosive at certain concentrations and its accumulation can result in a mine atmosphere deficient in oxygen. When released, methane is a precursor to ground-level ozone, a harmful pollutant that can irritate the airways. In the atmosphere, methane is a powerful greenhouse gas that is more powerful than carbon dioxide. Technologies can help capture methane from coal mining before it is released and use it as an energy source.

Learn about CMM



- [About CMM](#)
- [Sources of CMM](#)
- [Benefits of capturing CMM](#)

Mitigation Resources



- [Identify opportunities](#)
- [Assess methane and revenue](#)
- [Develop and operate projects](#)

Program Information



- [CMOP accomplishments](#)
- [Upcoming events](#)
- [International activities](#)

资料来源：美国环境保护局（U.S. EPA）。

5. 煤矿瓦斯MRV

要点

- 计划启动或扩展 MRV 的国家可以直接采用或调整现有其他国家计划来加速这一进程。
- 本章提供了美国、英国、澳大利亚、中国和哈萨克斯坦案例，涵盖不同的监管环境。

5.1 美国温室气体报告计划 (GHGRP)

美国温室气体报告计划 (GHGRP) 属于强制性的温室气体报告计划，计划开启于 2010 年，由美国环境保护署 (U.S. EPA) 负责。美国温室气体报告计划在美国全国范围内实施，要求报告矿上最大的直接温室气体排放源。本计划仅涉及报告本身，并不要求排放控制。自 2011 年以来，煤炭行业每年都会根据温室气体报告计划进行报告。

法律基础和监管结构

美国温室气体报告计划背靠总统签署的两项法案，由美国国会通过。法案授权美国环境保护署颁布实施计划法规：（1）美国《清洁空气法》授权环保署制定条例，监测和控制空气污染物；（2）《2008 财年综合拨款法案》，美国国会特别授权并为初建、维持美国温室气体报告计划提供资金 (H.R. 2764, 2008)¹⁰。拨款法案陈述了建立美国温室气体报告计划的目的：

- 1) 更好地了解特定行业及行业内各主体的相对排放量；及
- 2) 更好地了解影响温室气体排放率的因素及各主体可采取的减排行动。

在获得授权后，美国环境保护署于 2009 年¹¹ 月最终确定实施美国温室气体报告计划 (40 CFR 第 98 部分, 2010)，2010 年是第一个实施日历年。计划要求“报告来自美国大型温室气体排放源、燃料和工业用气及二氧化碳注入点的温室气体数据等。”报告方分为 41 个类别，包括地下作业矿。

利益相关者 (监管机构、煤矿所有者/经营者、煤矿瓦斯/废弃矿瓦斯/露天矿瓦斯减排项目所有者、公众) 的作用

美国法规制定公开透明，公众可以审查和评论拟议的法规。公众评论结束后，联邦机构会审查评论并公布最终法规。之后终版法规编入《美国联邦规则汇编》，正式成为法律。根据地下煤的报告要求，主要利益相关者的作用汇总见表 5.1。

表 5.1 主要利益相关者的作用

利益相关者	作用
美国环境保护署 (U.S. EPA)	美国环境保护署是管理温室气体报告计划 (GHGRP) 的环境监管机构。美国环境保护署向行业和公众通报监管要求，制定和实施报告计划，审核和验证年度报告，汇编和发布数据，确保符合要求，并按需更新法规。温室气体报告计划的数据也为美国政府准备的美国温室气体排放清单做出了贡献。
美国矿山安全健康管理局 (MSHA)	美国矿山安全健康管理局在温室气体报告计划的管理中没有正式分工。但矿山安全健康管理局每季度在风井中测量瓦斯体积和流量，向温室气体报告计划报告的煤矿所有者/经营者或将在报告中使用的某些测量数据。
矿山所有者/经营者	受约束的地下矿所有者/经营者必须向温室气体报告计划注册矿井，进行测量，并提交年度报告。

¹⁰ H.R. 2764; 公共法110-161。拨款法案要求美国环境保护署“制定并公布法规，要求强制报告美国所有经济部门中超过适当阈值的温室气体 (GHG) 排放情况”。

¹¹ 《美国联邦规则汇编》第 40 篇第 98 部分

	告。他们还负责在规定的记录保存期限内保存记录，并按需提供记录以供检查。
煤矿瓦斯/废弃矿瓦斯/露天矿瓦斯减排项目所有者	煤矿瓦斯/废弃矿瓦斯/露天矿瓦斯减排项目所有者可以利用公开的数据来确定回收及项目开发机会，如瓦斯抽采系统的瓦斯的体积和浓度数据。 另外，如果减排项目的法定边界与矿山分离，且燃烧产生的排放量超过每年 25,000 吨二氧化碳当量，那减排项目所有者/经营者需遵守温室气体报告计划的固定燃烧报告要求。供参考，这相当于燃烧约 470 MMcf (13.3 Mm ³) 的纯甲烷或足够供应 6 兆瓦电力项目瓦斯量。 ¹²
公众	公众（公民、纸媒和广播媒体、非营利组织、学术组织、研究人员等）访问和分析数据，以更好地了解煤矿业的瓦斯排放，强化减排机会。

一般报告阈值，包括数据类型、报告频率和报告系统

并非所有煤矿都要遵守美国温室气体报告计划的报告要求。美国环境保护署只要求年“释放”至少 3650 万立方英尺（103.4 万立方米）的地下在营矿提交报告，瓦斯气体来自风井和排气系统。根据法规中的定义，“释放”是指“在采矿过程中从煤和周围岩层中释放出来的瓦斯。包括通风系统排放的瓦斯和从排气系统中排出的瓦斯”(40 CFR 第 98.6 条)¹³。但“释放”不等于排放，因为部分“释放”的瓦斯可能被使用或销毁。排放量是通风和排气系统“释放”的瓦斯量与使用销毁瓦斯量间的净差额，美国温室气体报告计划主要使用质量平衡方程来确定排放量。

排放量低于报告阈值的作业地下矿、露天矿和废弃地下矿无需向美国温室气体报告计划提交报告。

必向美国环境保护署报告的数据类型见表 5.2。

表 5.2 美国温室气体报告计划的数据报告要求

数据类型	监测点	监测频率	获批的监测方法			备注
			MSHA 季度检查报告	矿山工作人员手工采样	连续排放监测	
矿山安全与卫生管理局 ID						矿山安全与卫生管理局 ID 用于检查运营状态和煤炭生产情况
排气系统描述						制造商、容量、井数、表面积、运营时间
通风系统释放的瓦斯 (公吨甲烷)	单个排风井	季度	☑	☑	☑	基于瓦斯百分比和体积流量进行监测
排气系统释放的瓦斯 (公吨甲烷)	单井或集中监测点	每周	N/A	☑	☑	基于瓦斯百分比和体积流量进行监测
现场销毁/外送的瓦斯 (公吨甲烷)	单个销毁设备或外送点	每周	N/A	N/A	☑	基于瓦斯百分比和体积流量进行监测
净瓦斯排放量 (公吨甲烷)	全矿	季度				通风系统释放的瓦斯加上排气系统释放的瓦斯，减去销毁或转移的瓦斯

¹² 假设生产 1 兆瓦需要 4.2 立方米/米的甲烷。

¹³ 《美国联邦规则汇编》第 40 篇第 98.6 节。网址：https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title40/40cfr98_mai_n_02.tpl

二氧化碳排放量（现场销毁/无能源回收）（公吨二氧化碳）	全矿	季度		火炬燃烧，销毁风排瓦斯
二氧化碳排放量（现场销毁/无能源回收）（公吨二氧化碳）	全矿 （按单位类型分）	年度		根据子部分 C 报告燃烧排放

各煤矿需在前报告年后的第二年 3 月 31 日前向美国环境保护署提交年度监测报告。如 2020 年报告的截止日期为 2021 年 3 月 31 日。美国温室气体报告计划（GHGRP）的报告必须通过安全的在线门户“电子温室气体报告工具（e-GGRT）”提交。有意进行报告的煤矿必须通过 e-GGRT 注册，注册网址为 <https://ghgreporting.epa.gov/ghg/login.do>，并在注册时提供煤矿相关信息，包括实际地址和官方代表。根据行业部门的不同，美国温室气体报告计划的报告者可以直接在 e-GGRT 的网络表格中输入数据，或将数据添加到规定的 MS Excel® 表格后上传至 e-GGRT。地下煤矿需使用 Excel® 表格进行报告，报告表格的示例见：<https://ccdsupport.com/confluence/display/help/Reporting+Form+Instructions>。

报告验证与数据发布

美国温室气体报告计划是一个企业自证的报告计划，报告方在正式提交报告时须证明所报告的数据准确。尽管是企业自证，美国环境保护署会审查所有报告，以识别数据中潜在错误、不一致和异常。美国环境保护署还或将对照检查其他来源的公开数据。

验证于每年 7 月结束，报告的数据于同年 10 月发布在多个网站上，包括：

- 美国环境保护署煤矿温室气体信息工具（FLIGHT）

网址：https://ghgdata.epa.gov/ghgp/main.do?site_preference=normal

- 美国环境保护署 Envirofacts 温室气体搜索

网址：<https://www.epa.gov/enviro/greenhouse-gas-customized-search>

FLIGHT 提供了一个交互式地图，用户可以通过地图访问各煤矿的报告。Envirofacts 提供了涵盖所有报告煤矿的全行业综合数据，用户可下载 CSV 表获取数据，这些数据表更便于进行数据分析。

有关计算方法和报告要求的法规更新

美国环境保护署会定期审查美国温室气体报告计划，以确定法规变化可以适应技术调整，提高数据质量，阐明计算方法、报告要求，最终变更法条。自 2010 年法规首次确定以来，有关地下煤矿的法条已更新数次。

统计数据

表 5.3 展示了根据美国温室气体报告计划和美国温室气体清单报告，2013 年至 2019 年间地下矿的数量及瓦斯排放量。尽管只有约 30% 的地下矿向美国温室气体报告计划提交报告，但这些矿井占全美地下矿甲烷排放量的 90% 以上。

表 5.3 美国温室气体报告计划和美国温室气体清单报告 2013 年至 2019 年地下矿井量及瓦斯排放量

数据来源	地下矿井与排放						
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
向 GHGRP 报告矿数量	131	130	125	95	79	75	67
纳入美国温室气体清单(GHGI)的矿数量	205	178	220	163	162	164	167
美国地下作业矿数量	395	345	305	253	237	236	226
GHGRP 报告的总甲烷排放量(MMTCO _{2e})	41	41	44	39	38	36	34
GHGI 报告的总甲烷排放量(MMTCO _{2e})	46	46	45	41	41	39	34.5
GHGRP 排放量覆盖率	89%	89%	98%	95%	93%	92%	99%
GHGRP 煤矿覆盖率与 GHGI 比较	64%	73%	57%	58%	49%	46%	40%
GHGRP 煤矿覆盖率与所有地下作业矿比较	33%	38%	41%	38%	33%	32%	30%

注：MMT=百万吨（Mt）。

资料来源：美国能源信息署（USDOE EIA），2019年；美国环境保护署（U.S. EPA），2019年；美国环境保护署（U.S. EPA），2021年。

5.2 美国加州的总量控制与交易制度

加州的总量控制与交易计划是美国最大的碳合规市场。尽管本计划涵盖了加州经济大面（按某些指标衡量，加州经济规模位居世界第五），但煤炭行业并不属于加州受监管的工业部门，因为加州没有在营煤矿。目前计划的执行机构是加州空气资源委员会（CARB），委员会通过煤矿瓦斯捕集（MMC）协议允许加州以外的市场主体通过煤矿瓦斯、废弃矿瓦斯和露天矿瓦斯回收和利用项目产生的抵消额进入总量控制与交易市场。

法律基础和监管结构

加州总量控制与交易计划的授权法案《议会法案 32》（AB32）于 2006 年由加州议会通过。AB32 设立了加州 2020 年温室气体减排目标，要求加州空气资源委员会为实现目标制定界定碳市场范围，并授权加州空气资源委员会设立总量控制与交易计划。AB32 还规定，减少温室气体的政策必须具备成本效益和技术可行性，且不得对环境公平社区的居民产生过大影响。

2016 年后的法条规定了到 2030 年将温室气体减少到比 2020 年水平低 40%的目标。新法条还重新授权了总量控制与交易计划时限，并计划延长到 2030 年。时限延长的同时在立法上减少了允许进入市场的抵消额总量。合规实体可使用 ARB 抵消额度满足 2020 年最多 8%的合规排放义务，满足 2021-2025 年 4%的合规排放义务；及 2026-2030 年 6%合规排放义务。此外，2016 年法条规定了加州外项目的贡献的上限。从 2021 年开始，加州以外项目的排放量抵消额不得超过一半。¹⁴

除总量控制与交易计划外，AB32 还设立了温室气体排放强制报告计划，强制计划适用于某些经济部门，包括发电、工业、燃料供应和电力进口。强制报告实施条例于 2010 年首次通过，随后约每两年修订一次至 2018 年。报告数据每年公布一次，用于支持总量控制与交易计划中的政策制定，并纳入加州温室

¹⁴ 要求一半以下的补偿来自非加州直接环境效益（DEBS）项目。加州内的项目自动视为提供直接环境效益；但加州以外的项目可以通过提交效益证明文件向加州空气资源委员会证明提供的直接环境效益。参考：<https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/compliance-offset-program/direct-environmental-benefits>

气体清单。加州没有在营或废弃煤矿，所以煤矿行业不受加州强制报告计划的约束。美国其他州的煤矿不受加州总量控制与交易计划及计划中排放上限或报告要求的约束，但其他州煤矿可以交易抵消额度，参与总量控制与交易计划。

利益相关者（监管机构、煤矿所有者/经营者、煤矿瓦斯/废弃矿瓦斯/露天矿瓦斯减排项目所有者、公众）的作用

加州空气资源委员会负责为总量控制与交易计划的监管和执行机构，负责制定规则、批准抵消协议。总量控制与交易计划本质是一个合规市场，加州空气资源委员会向监管内行业主体发放排放配额。行业主体可以通过拍卖、有限的免费额度（针对符合条件的实体）及与计划中其他实体进行交易获得配额。

加州空气资源委员会根据委员会批准的六项合规抵消协议向合格项目发放 ARB 额度，实现温室气体以减排或封存。总量受控行业中可使用额度来部分抵消总量。完成公众审查和评论流程后，加州空气资源委员会还根据每种授权项目采用不同的抵消协议，包括煤矿瓦斯协议。

抵消协议全称合规抵消计划，是总量控制与交易计划中一环，目的是成本控制和灵活合规。合规抵消额度是可交易的信用额度，表示经验证的温室气体减排量，减排源不受总量控制与交易计划中约束。

附加抵消¹⁵按合规行为确定额度，遵守协议即可确认附加抵消，无需进行项目评审。《联合国气候变化框架公约》清洁发展机制执行理事会的 ACM0008 煤矿瓦斯抵消方法（包括废弃矿瓦斯和露天矿瓦斯）则要求按项目对附加抵消额进行独立评审。

项目向加州控制与交易计划出售抵消额前，需要在独立抵消登记处登记（加州空气资源委员会批准）公示。公示完成后，项目提交抵消项目数据报告，列出产生的抵消额度。报告随后由第三方机构验证。验证报告经过登记处审批后将发布到登记处网站，随后加州空气资源委员会发放抵消额度。一加州合规抵消额（CCO）相当于一公吨二氧化碳。

加州空气资源委员会于 2014 年 4 月通过了矿山瓦斯捕集协议，协议自 2014 年 7 月 1 日起生效。协议以矿山命名的原因是不仅涉及煤矿瓦斯减排，还包括天然碱矿（即苏打灰矿）项目。

符合条件的项目包括地下作业煤矿和地下碱矿、废弃的地下煤矿或碱矿，及露天作业煤矿。包括发电、火炬燃烧和工业等在内的下游项目都能获取抵消额度，唯一不合规的项目是地下作业煤矿开展的天然气管道售气项目，因为在美国地下作业矿中，管道销售是抽采后常规操作，被视为“常规业务”，不具备附加属性。加州空气资源委员会允许废弃煤矿的天然气管道销售项目参与，前提是矿井关闭前项目就开始。

矿山瓦斯捕集协议关注矿山瓦斯减排量量化，同时考虑瓦斯燃烧产生的二氧化碳排放。协议提供了入选资格、量化方法、抵消项目监测说明及编制抵消数据报告的流程。同时，所有项目每年必须接受第三方验证，验证由 ARB 审核的机构完成。

其他主要利益相关者包括获批的项目登记处、项目验证方、项目运营商（项目开发人员）及抵消额度买方。

目前有三个项目登记处获批：美国碳登记处、气候行动储备中心和 VERRA。登记处由非营利组织运

¹⁵ 抵消项目通过超常业务来实现减排。

营，主要负责项目公示、监督、验证。减排量经核实后项目在登记处网站公布，此时加州空气资源委员会发放抵消额。

验证机构是经加州空气资源委员会认可的独立第三方组织，负责验证抵消项目及相关减排量。目前有 16 个获批验证机构，机构验证员也必须获得加州空气资源委员会认证。

项目开发方负责项目筹资、建设和运营。有时，开发方也是矿山所有者/经营者，通常开发方是具有设计和开发项目经验的专业公司，有的公司独立拥有项目所有权，有的与矿山所有者共享所有权。截至目前，参与加州市场的项目包括热电联产、电力生产、火炬燃烧、废弃矿的天然气销售和风排甲烷销毁。项目开发方拥有项目抵消额，将抵消额作为加州合规抵消额出售给买家。

包括时限、报告频率和报告系统在内的一般报告阈值

认证、公示或出售加州空气资源委员会发放的抵消额没有最低阈值要求。项目必须在开始后一年内完成登记，在 10 个报告期（一个额度期）内产生抵消额。加州空气资源委员会要求验证 12 个月的报告期，首尾报告期除外，首尾两个报告期时长从 6 个月到 24 个月不等。抵消报告必须在报告期结束后的 4 个月内提交，认证必须在报告期结束后的 11 个月内完成。虽然对单个项目没有额度上限，但可用于加州计划的抵消总额有上限，如前所述，加州每年发行抵消总额也有上限。

报告认证和数据发布

减排量和协议合规通过正式审计来验证。减排量在认证声明中确认和重申，声明发布在登记处官网，认证报告细节不对外公开。

统计数据¹⁶

- 加州空气资源委员会批准的矿山瓦斯捕集项目数量：24 个
- 已发放的抵消信用额：8,686,882 吨二氧化碳当量
- 已发放抵消信用额最大的项目：1,902,272 吨二氧化碳当量
- 已发放抵消信用额最小的项目：2,236 吨二氧化碳当量
- 公示未认证的矿山瓦斯捕集项目：12 个

5.3 英国

英国煤矿瓦斯排放监测和报告始于 1991 年，由国有煤炭生产企业英国煤炭公司发起，每周按班次在出风井进行瓦斯流量和浓度的现场计数，同时计算瓦斯抽采量。统计结果用于计算特定排放因子，以便根据实际或计划产煤量预测未来排放，煤炭运输过程中排放的瓦斯也纳入计算范围。露天矿和小型矿的排放量统计后未纳入国家清单，因仅占煤矿总排放量的 1% 左右。计算方法被纳入《瓦特能源委员会关于甲烷排放的独立报告》（1993 年），以支持英国政府推动政府间气候变化专门委员会工作。

1994 年英国煤炭行业私有化后，煤炭公司开始向煤炭管理局报告监测结果，煤炭管理局是政府负责管理煤炭资产并继承负债的机构。届时，所以深井都配备了连续排放监测系统。英国最后一个大型深井

¹⁶ 矿山瓦斯捕集项目数据来自加州总量控制与交易计划和登记处，数据截止日期为 2021 年 10 月 27 日。网址：<https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/compliance-offset-program>

煤矿于 2015 年 12 月关闭，之后与煤矿相关的排放都来自废弃矿井。

废弃矿井瓦斯排放

20 世纪 90 年代英国的煤炭开采衰退，矿井逐渐关闭，当时大家不了解废弃煤矿瓦斯排放和减排意义。为进一步明确和了解瓦斯减排量和价值，英国政府委托相关方进行研究，目的是量化废弃矿的瓦斯排放规模。初步研究后开发的方法（Kershaw, 2005a）包括利用采空区大小计算地下水回收的模型和用于估算扰动未开采煤中残余瓦斯量的残气储量模型。地下水不断上升会逐渐淹没瓦斯源，再计算可利用的甲烷储量。研究覆盖了八个矿废弃矿井排放口，瓦斯流量测量和地表通量测量显示与井底瓦斯储量趋势一致。综合数据集表明，每年井层气藏的排放量为 0.74%。排放值被用来反推 1990 年 52 千吨到 2004 年的 45 千吨的废弃矿瓦斯排放量。算法中额外增加了一个阶段（Kershaw, 2005b），使用双曲线衰减曲线计算新关闭的气矿的高初始排放量。假设矿井关闭一年，通过减排（利用）措施，原排放量超过 0.5 吨/年的废弃矿井瓦斯排放将减少 70%。预计废弃矿井瓦斯排放量将从 2005 年的 5.9 万吨降至 2050 年的 1.6 万吨。按政府间气候变化专门委员会的划分标准，英国采取的是第 2 级和 3 级混合法。

随着英国大规模深井采煤的停止，英国所有煤田的矿井水回收工作正在进行或已完成，实现了废弃矿井减排。

报告编制

英国能源和气候变化部（现已并入商业、能源和产业战略部）向英国国家大气排放清单（NAEI，负责英国温室气体清单）报告了废弃矿井瓦斯的大气排放估算值。2018 年，废弃矿井瓦斯排放量约占英国人为甲烷排放量的 1.5%，占英国温室气体总排放量的 0.17%。废弃矿井瓦斯方法复杂，不确定性在±20%至±40%间。当时还用不同的估算方法进行排放值对照，也进行了第三方审查，但没有进行正式的结果验证（Fernando, 2011）。

煤炭管理局目前对瓦斯排放和计算方法进行委托审查，以获得最新情况和当前数据。

英国商业、能源和产业战略部负责向联合国气候变化框架公约提交英国温室气体信息。其他政府部门和机构也参与数据收集。从 2019 年 4 月 1 日起，英国政府要求本国大企业在董事会报告中公开能源使用和碳排放情况，但当时已无符合条件的煤炭开采公司。（符合条件的公司指在上一财政年至少满足以下三个条件中的两个：年营业额 3600 万英镑；资产负债表总额 1800 万英镑；250 名员工）。

排放交易

英国于 2001 年建立了欧洲首个多部门排放交易体系，引入碳定价概念以激励碳减排。企业可以自愿参与减排交易，参与的企业通过完成强制性减排目标可以换取政府补贴。减排计划还为欧盟排放交易体系（EU ETS）提供了天然试点，后来英国交易体系并入了欧盟交易体系。在英国试点计划下，部分作业煤矿开发了抽采瓦斯项目和空燃项目，项目减排量纳入了英国排放清单。

英国在 2021 年 1 月 1 日推出了新的英国排放交易系统（UK ETS），取代了原有的欧盟排放交易系统（EU ETS）。随着最后一个深矿井关闭，废弃矿井瓦斯排放仅有逃逸性排放的风险。

减排措施

在作业矿中，煤矿瓦斯减排主要通过抽采进行发电和供热来实现。火炬燃烧在自愿减排计划下曾短暂实施，由于缺乏长期融资机制后中断，目前风排瓦斯销毁技术也仍在项目示范阶段，尚未商业落地。

英国首次记录利用废弃矿井瓦斯是在 20 世纪 50 年代，当时从关闭煤矿中抽采瓦斯为邻近作业矿的热水瓶提供燃料。1994 年，Coalgas（英国）有限公司（后来的 Alkane Energy 公司，现已被 Infinis Energy 收购）开始对废弃矿井瓦斯的全面开采和利用。随后其他公司陆续加入。有的公司想效仿德国，将废弃矿井瓦斯归为“可再生能源”，吸引相关优惠政策，但未能成功。在矿井关闭后，一般进行多点开发废弃矿井瓦斯利用，目的主要是发电，发电量在 10-15 兆瓦。少数项目提供中等质量的瓦斯供直接使用。Alkane Energy 公司于 2017 年被 Infinis Energy 收购，收购前 Alkane 覆盖 32 个矿点，总发电量为 160 兆瓦当量，管理当时规模最大的废弃矿井瓦斯投资组合。部分矿点由于煤矿枯竭和透水，可用的瓦斯量骤降，矿点发电站转而使用天然气发电，补充电网高峰用电需求，实现短期盈利。Infinis 收购 Alkane 后继续运营 15 个矿点，总发电量为 44 兆瓦当量，每年瓦斯减排超过 40,000 吨（100 万吨二氧化碳当量）。¹⁷

目前，英国废弃矿井瓦斯勘探和开发受石油和天然气管局的油气许可制度监管。

5.4 澳大利亚国家温室气体和能源报告（NGER）

2007 年的《国家温室气体和能源报告法》要求澳大利亚煤矿和其他工业部门报告年度逸散排放。报告法通过设立国家框架，要求报告、公布企业层面的温室气体排放、能源生产和能源消耗情况。NGER 由澳大利亚清洁能源监管机构负责，煤炭公司从 2009 年开始报告，自 2011 年起要求对地下矿井的排放进行直接监测。除了报告制度外，《国家温室气体和能源报告法》2014 年修订后建立了“保障机制”，要求排放大户将净排放量控制在基线下或排放限额内。

国家温室气体和能源报告计划通过收集排放信息，有利于

- 向澳大利亚政府政策制定和公众提供信息
- 澳大利亚履行国际义务，衡量履行国际气候变化承诺的进展
- 协助澳大利亚联邦、州和领地政府开展相关项目和活动
- 避免各州和领地报告要求重复。¹⁸

法律基础和监管结构

《国家温室气体和能源报告法》推动实施温室气体报告制度，报告制度根据法案制定了若干监管工具。2008 年，《国家温室气体和能源报告条例》进一步规定了报告的义务和流程，同年，《国家温室气体和能源报告（测算）决定》¹⁹ 详述了估算温室气体排放、能源生产和消耗的计算方法²⁰（NGER，2021）。2015 年，《国家温室气体和能源报告（保障机制）规则》为实施保障机制制定了合规流程，包括为每年一类²¹排放超过 10 万吨二氧化碳当量的大型煤矿设定了排放限制或基线²²。（NGER，2021）。

《国家温室气体和能源报告法》简化了国家层面的报告要求。报告法出台前，各公司需要向联邦和地政府报告类似信息。目前，煤矿公司仍需向各领地报告与安全相关信息，领地有责任 and 权力管理煤矿

¹⁷ <https://www.infinis.com/generation-activities/captured-mineral-methane>

¹⁸ 澳大利亚政府，清洁能源监管机构，2021 年报告数据 <https://www.cleanenergyregulator.gov.au/NGER/National%20greenhouse%20and%20energy%20reporting%20data>

¹⁹ 澳大利亚政府，联邦立法登记册 <https://www.legislation.gov.au/Details/F2020C00600>

²⁰ 澳大利亚政府，清洁能源管理局。2020 年。立法。 <http://www.cleanenergyregulator.gov.au/NGER/Legislation>

²¹ 一类排放是指逃逸源的直接排放、燃料燃烧、废弃物处置和工业过程中的排放。

²² 澳大利亚政府。2020 年。保障机制。

安全。

包括能源基线、报告频率和报告系统在内的一般报告阈值

如果各类煤矿（包括地下作业和地面煤矿及废弃地下煤矿）的排放量、能源产量或能源消耗超过阈值，就必须向清洁能源监管机构报告排放量。有两类阈值决定公司的报告义务：单矿阈值和煤矿集团阈值。截至 2021 年，煤矿阈值包括：

- “温室气体（二氧化碳当量）排放达到或超过 2.5 万吨（1 类和 2 类²³排放）
- 能源产量达到或超过 100 太焦耳，或
- 能源消耗达到或超过 100 太焦耳。

公司集团阈值如下：

- 温室气体（二氧化碳当量）排放达到或超过 5 万吨（1 类和 2 类²³排放）
- 能源产量达到或超过 200 太焦耳，或
- 能源消耗量达到或超过 200 太焦耳（国家温室气体和能源报告，2021 年²⁴）。

如果单矿未达到报告阈值，集团达到阈值时公司仍需进行报告。目前以上两类阈值涵盖了所有煤矿公司。

澳大利亚测量手册确定了四种方法估算排放量：

- 方法 1 最简单，一般参考活动数据和特定排放因子来估算。
- 方法 2 针对特定煤矿，需要进行瓦斯建模，企业可以根据澳大利亚或国际标准补充采样和测量，在煤矿层获得更准确的估算。如澳大利亚煤炭协会研究计划（ACARP）发布了补充采样和测量标准。
- 方法 3 与方法 2 类似，但要求使用《国家温室气体和能源报告测量手册》里规定的采样标准，不使用澳大利亚煤炭协会研究计划的标准。
- 方法 4 涉及对排放系统进行直接监测，包括连续监测或定期监测，过程涉及海量数据。

采矿方法和类型决定了估算排放量的方法。地下煤矿公司必须使用方法 4，不管用连续监测还是定期监测瓦斯和二氧化碳，排放变化需要根据测量时间表报告。无通风的废弃矿必须使用排放衰减曲线报告气矿和非气矿的排放量（取决于透水要素）。露天矿可选择方法 1、2 或 3 来估算瓦斯排放量。如果使用方法 2 或 3，露天矿还必须报告二氧化碳排放量。2019 年，49%的能源部门瓦斯排放量使用方法 4 测量，12%的排放量使用方法 2 和 3 估算的（2019 年澳大利亚国家清单报告）。

报告年从每年 7 月 1 日开始，到第二年 6 月 30 日结束，与澳大利亚财年一致，报告提交截止日期为每年 10 月 31 日。报告必须通过排放和能源报告系统提交，网址如下：<http://www.cleanenergyregulator.gov.au/OSR/EERS/The-Emissions-and-Energy-Reporting-System>。

需提交国家温室气体和能源报告的公司可向监管机构申请，将报告责任转移给运营煤矿的另一家公司。

²³ 2类排放指煤矿发电、供热制冷或蒸汽产生的直接排放，排放不属于煤矿自身。

²⁴ 澳大利亚政府。2020年。煤矿和煤矿集团阈值。<http://www.cleanenergyregulator.gov.au/NGER/Reporting-cycle/Assess-your-obligations/Reporting-thresholds>

负责为某煤矿提交报告的公司 A 可以向监管机构申请将报告责任转移给代表煤矿运营的公司 B。

根据《国家温室气体和能源报告法》，通常需要报告表 5.4 中列出的数据：

表 5.4 《国家温室气体和能源报告法案》的数据报告要求

活动	典型重大煤矿 NGER 数据	其他所需的煤矿 NGER 数据
地下矿的逸散排放	矿井回风中的气流和浓度 瓦斯抽采和火炬燃烧的瓦斯气流、浓度、压力（用于审计） 停用地下矿的排放	瓦斯温度、压力 气矿采矿后排放
露天矿的逸散排放	原矿（ROM）煤炭产量 根据现场采样和瓦斯建模得出的含气层瓦斯（如使用方法 2 或 3）	
能源生产	待售煤炭量	捕集现场燃烧、空燃或转移到矿外的瓦斯（如注入管道） 现场发电（如超过报告阈值）
燃料燃烧/能源消耗和排放	重型采矿设备中的柴油消耗量 捕获用于现场燃烧或火炬燃烧的气体（如果注入管道） 购买的电力消耗	其他燃料燃烧，如轻型车柴油或汽油 消耗的油和油脂 非柴油，如絮凝剂或炸药
其他数据或排放	不确定性评估 原煤产量（待定项（MBTI）），报告为原矿煤	六氟化硫（SF6）排放（如适用）

资料来源：澳大利亚政府，清洁能源监管机构。“煤炭开采排放量和能源估算指南”。2021 年。

<http://www.cleanenergyregulator.gov.au/DocumentAssets/Documents/Estimating%20emissions%20and%20energy%20from%20coal%20mining%20guideline.pdf>

国家温室气体和能源报告计划不包括农业、土地使用、土地使用变更、林业、私人交通和住宅排放。

澳大利亚政府同时提了大量关于报告流程、报告方法及网站使用的视频培训材料，所有视频可通过以下链接访问：

<http://www.cleanenergyregulator.gov.au/OSR/EERS/Tools-to-assist-you/Training-videos>。

供

报告认证与数据发布

清洁能源监管机构有合作审计员名册²⁵，审计员负责认证报告义务是否履行。审计员会根据指示、指南和模板开展审计工作。

经认证的数据由清洁能源监管机构汇总发布。公司可以申请不予公布全部或部分排放、能源生产和消耗，但澳大利亚政府会公示煤炭行业以下排放信息²⁶：

- 公司排放和能源数据：年度 1 类排放、年度 2 类二氧化碳当量排放及净能耗。
- 国家温室气体和能源登记册：列出特定报告年内注册或注销的报告公司，及保障机制下的

²⁵ <http://cleanenergyregulator.gov.au/Infohub/Audits/register-of-auditors#:~:text=The%20Register%20of%20Greenhouse%20and%20Energy%20Auditors%20is,must%20demonstrate%20that%20they%20satisfy%20the%20eligibility%20requirements>

²⁶ 请参阅以下数据集：

<http://www.cleanenergyregulator.gov.au/NGER/National%20greenhouse%20and%20energy%20reporting%20data/Data-highlights/2019-20-published-data-highlights>

最大排放者清单。

- 保障机制下煤矿报告的排放量。²⁷

国家温室气体和能源报告计划的制定初衷是与政府间气候变化专门委员会的清单提交指南兼容，帮助企业简化编写过程。2019 年年度清单报告可见：<https://www.industry.gov.au/data-and-publications/national-greenhouse-accounts-2019>。

最新数据可见：<https://ageis.climatechange.gov.au/>。

统计数据

- 最新报告年（2019 年）煤炭行业瓦斯总逃逸排放量见表 5.5，单位为千吨（=Kt）。
- 根据国家温室气体和能源报告，煤矿业报告者数量：58 家公司。
- 地下矿数量：41 座。
- 保障机制下煤炭开采行业的报告者数量：约 60 个煤矿。

表 5.5 2019 年煤炭行业甲烷逃逸排放总量（使用 AR5 全球升温潜能值计算的二氧化碳当量）

煤炭开采总量	25,149.36
地下矿井	17,653.81
废弃地下矿井	979.8
采矿活动	15,526.34
采后活动	1,147.68
地表矿	7,495.55

资料来源：澳大利亚政府。网址：<https://ageis.climatechange.gov.au/>

5.5 中国国家排放报告系统中的煤炭排放

多年来，中国政府一直要求所有煤矿向原国家矿山安全监察局（现隶属应急管理部）报告瓦斯排放量进行安全评估，因此，省级监管部门已收集多年瓦斯排放信息，但是排放因子和产量不是强制报告内容（Sheng 等人，2019）。

2011 年，国家矿山安全监察局的数据库涵盖了中国大陆 26 个产煤省的 10,963 个煤矿。每个煤矿在年度安全评估期间（2-3 个月）通过持续监测通风和除气系统来测量排放量。2011 年的总排放量为 53,000 立方米/米，总捕获量为 15,000 立方米/米。

Gao 等人（2020）回顾了中国自下而上的排放清单后指出，由于地下煤矿使用的排放因子存在范围和可变性的明显差异，因此需要开展更多工作来提高结果的准确性。由于煤矿是中国主要的瓦斯排放源，所以需要建立更可靠的煤矿瓦斯清单，更系统地实施瓦斯减排措施，并纳入废弃煤矿的排放。

经过约十年的酝酿，中国国家排放交易体系于 2021 年正式投入运营，但当前仅涵盖电力部门。国家政府认为，建立排放交易体系有利于实现 2030 年碳达峰和 2060 年碳中和的双碳目标。MRV 是实现双碳目标的重要工具。

在格拉斯哥举行的 COP26 气候峰会上，中美发表联合声明，表示两国准备加强瓦斯排放测量和控制

²⁷ 请参阅以下数据集：

<http://www.cleanenergyregulator.gov.au/NGER/National%20greenhouse%20and%20energy%20reporting%20data/safeguard-facility-reported-emissions/safeguard-facility-emissions-2019%E2%80%9320>

方面的合作。

两国计划合作加强瓦斯排放测量；两国交流加强瓦斯管理和控制方面的政策和项目；推进联合研究，直面瓦斯减排挑战。²⁸

5.6 哈萨克斯坦

哈萨克斯坦制定了多项政策要素，以监测、认证和报告煤炭开采过程中的瓦斯排放。哈萨克斯坦《环境法》要求监测瓦斯排放，并对空气污染行为处以罚款，但 2013 年建立的国家排放交易体系并未包括煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和地表矿瓦斯。哈萨克斯坦向联合国气候变化框架公约报告了煤炭开采过程中的瓦斯排放量，排放量计算结合了第 1 级、第 2 级和第 3 级方法。

法律基础和监管结构

自苏联以来，煤矿公司出于安全原因一直监测瓦斯排放。近期，哈萨克斯坦进一步完善了煤炭行业的安全立法。基础法包括《危险生产煤矿工业安全法》（2002 年）、《技术规范法》（2004 年）和《哈萨克斯坦共和国国家控制和监督法》（2011 年）。

《技术规范法》规定了煤炭生产过程中瓦斯安全的关键原则，具体技术规范在《工业安全规则》中得到了进一步完善。如《工业安全规则》规定，矿山经营者必须为每个地下矿制定专门的安全规则和流程手册。手册需包含有关矿井空气成分、瓦斯排放量、矿井通风参数及各种应急详情。

哈萨克斯坦于 2013 年建立了二氧化碳排放交易体系，哈萨克斯坦能源部、生态地质与自然资源部以及 Zhasyl Damu 参与哈萨克斯坦排放交易体系的实施。哈萨克斯坦的排放交易体系涵盖包括采矿在内的六个经济部门。国家分配计划为参与单位（包括采矿业的 24 个矿）的年度排放量设定上限²⁹。2021 年 1 月，政府决定从当年 7 月开始改变原有分配法，转用基准法。但瓦斯并未包括在排放上限中，因为计划通过内部项目来实现瓦斯减排。

哈萨克斯坦作为附件一国家，自 2009 年始向联合国气候变化框架公约报告温室气体排放量。包括环境保护部（2009-2014 年）和能源部（2014-2019 年）在内的部委参与了国际报告的编制。自 2019 年以来，生态地质与自然资源部负责编制关于温室气体排放的国家报告。Zhasyl Damu 是生态地质与自然资源部的下属企业，自 2010 年以来负责收集和分析数据并进行国际报告。

一般监测要求和瓦斯报告规则

根据国家排放报告计划，每个煤矿都要配备一个瓦斯测量和排放核算登记册。登记册包括瓦斯浓度、排放核算、二氧化碳浓度升高以及甲烷突出事件。

煤矿根据每开采一吨煤产生的相对瓦斯排放量（以立方米为单位）被分为五类。**表 5.6** 展示了各类煤矿的瓦斯监测和报告措施。煤矿应按天在每班开始和结束时记录瓦斯浓度，还应及时报告甲烷突出事

²⁸ 美国国务院，2021 年。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

²⁹ 哈萨克斯坦政府，2021。2021 年全国温室气体排放配额分配计划。网址：<https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2100000006>。(俄语)。

故。为确保安全，部分煤矿会在关键区域（如矿面、甲烷抽采和通风系统）持续监测甲烷浓度。如果配备了持续监测瓦斯的设备，煤矿应在测量和排放核算登记册中记录测量值。

表 5.6 哈萨克斯坦各类煤矿的瓦斯监测和报告内容

矿山类别 (按瓦斯排放)	相对瓦斯排放量 (m ³ /t)	瓦斯浓度检查频率 (无连续监测)	空气成分检查频率	独立组织检查通风系统频率
I 类矿山	<5	每 6 小时/班, 检查 2 次	每月 1 次	每 3 年 1 次
II 类矿山	5-10	每 6 小时/班, 检查 2 次	每月 1 次	每 3 年 1 次
III 类矿山	10-15	每 6 小时/班, 检查 3 次	每月 2 次	每 2 年 1 次
超类别矿山	>15	每 6 小时/班, 检查 3 次	每月 3 次	每 2 年 1 次
易爆矿山	瓦斯和煤尘爆炸	每 6 小时/班, 检查 3 次	每月 3 次	每 2 年 1 次

资料来源: 《煤矿危险生产煤矿工业安全规程》汇编

地下煤矿向工业和基础设施发展部报告瓦斯排放量，并向紧急情况部报告瓦斯相关的事故。但以上报告未纳入国家温室气体报告，所以报告的煤矿瓦斯排放量未经验证。此外，哈萨克斯坦各煤矿还向国家经济部统计局和能源部报告煤炭生产数据。

计算方法

为向《联合国气候变化框架公约》报告煤矿排放量，Zhasyl Damu 使用按煤田划分的煤炭产量和排放系数³⁰或能源部核准的各煤矿数据。

为计算 2017 年前的煤矿瓦斯排放量，哈萨克斯坦采用每开采一吨煤产生 24-34 千克甲烷 (kg/t) 的隐含排放系数 (IEF)，同时将系数修订为 16 千克/吨。哈萨克斯坦露天矿采用了高 IEF 值 (7-8 kg/t)，超过其他所有报告方，也远高于政府间气候变化专门委员会的默认范围 (0.2-1.34 kg/t)³¹。在向《联合国气候变化框架公约》提交 2021 年国家清单数据的通用报告格式 (CRF) 中，哈萨克斯坦将露天矿的排放系数更新为 0.87 kg/t，并开始报告废弃矿的排放量 (IEF 为 0.25 kg/t)。

³⁰ 哈萨克斯坦政府，2010 年。《地下煤矿的煤炭开采和加工企业温室气体排放计算指南》。网址：https://www.egfintd.kz/ru/s/page/ME_RK.html (俄语)。

³¹ 《联合国气候变化框架公约》，2014 年。《哈萨克斯坦 2012 年提交的清单提交个别审查报告》。网址：<https://unfccc.int/resource/docs/2013/arr/kaz.pdf>

6. MRV体系设计的考虑因素

要点

- 监测煤矿瓦斯排放的 MRV 是为了量化排放，为决策者和利益相关方提供识别减排机会、确减排效果的手段。
- 本章为负责制定国家 MRV 体系的决策者提供指导，MRV 通常包括国家温室气体报告和监测系统。

决策者需要根据管辖范围，综合考虑利好政策、经济影响、文化影响、物流水平和其他因素，制定合理、有效而非完美的 MRV。总体上看，关键因素包括：

- MRV 的政策框架，包括立法、监管和行政方法
- 利益相关相关方
- 煤炭行业排放源和对放源的监测方法
- 煤矿层面上的瓦斯监测和测量验证
- 确定煤炭行业内的子目标部门（作业煤矿、废弃矿井和露天矿）
- 报告阈值（煤矿类型或大小、排放量大小）
- 量化方法（符合国际标准）
- MRV 结构（报告频率、报告平台、记录保存、数据发布）

首先，MRV 体系必须背靠一套完整的法律、法规和行政框架（表 6.1），并根据政策目标确定 MRV 类别和实施计划的权限。监管结构主要取决于国家现有的治理体系。

表 6.1 建立 MRV 体系的立法、监管和行政框架

政策框架	方法	关键考虑因素
政策目标	明确 MRV 政策目标	提供详细的温室气体排放数据以编制温室气体清单 加深对排放源的理解，促进减排活动开展
		确保遵守温室气体排放上限 确保合规或自愿性排放交易计划 支持国家自主贡献中的减排承诺 确保透明度
法律授权	采用新法规或修订现有法律	需要政治行动 以最少的细节展现总体权威 如果了解立法过程、时间表，且相关利益相关方参与，则最为有效
	制定明确法规	需要相关机构（通常为政府机构）制定和实施法规 完善技术和行政要求 制定详细的 MRV 标准和要求 针对不合规和补救措施制定政策和流程 如果了解立法过程、时间表，且相关利益相关方参与，则最为有效
	发布行政命令	参考未经立法或监管授权的行政活动（在某些司法管辖区，行政活动的权威不及立法和监管授权活动） 完善技术和行政要求 制定详细的 MRV 标准和要求 针对不合规和补救措施制定政策和流程
	发布指南	制定不具备法律约束力的文件、工具、培训材料或其他相关资料和计划 补充立法、法规和行政命令 为受监管的社区和公众提供支持，改进规、监管的执行情况和合规性
监管基础设施	确定主要执行机构	授权主要部委、机构、部门或其他执行单位来制定和实施计划 确保资源充足，以保障和留住员工，管理预算，为有效实施和运营 MRV

		提供基础设施
	建立数据报告流程	确定数据报告的格式 制定管理流程，完善机密数据的留存、保护和发布 制定政策，区分报告数据是公开还是保密 制定政策和流程，向公众提供已报告的非保密数据
	考虑建立激励和合规计划	识别合规障碍 制定并实施计划，消除障碍，或促进激励措施合规 通过定期线上线下培训、在线资源和热线等落实可及有效的合规辅助 对不合规行为处以罚款
	持续改进计划	需要规划和建立持续改进的流程 寻求所有利益相关者的意见 进行自我评估或寻求第三方评估 根据需要计划更新监管规定 完善和改进指导、工具和其他支持机制 与其他 MRV 计划进行交流，以学习和完善最佳实践 提供有关程序要求、测量协议和实践以及报告变化的初步培训和进修培训

如表 6.2 所示，当 MRV 能明确不同利益相关方（如公众、政府、环境监管机构、煤矿所有者、独立核查人员及减排项目开发和投资方）的职责时效力最大。

表 6.2 MRV 利益相关方的作用

利益相关方类型	利益相关方的作用
监管机构	<ul style="list-style-type: none"> 解释依法授权或法令，实施监管计划 起草 MRV 的监管要求 接收、审查、汇编、核实和发布数据 确保合规，并依法整治不合规行为 协助支持合规 向立法或行政机关报告 确保报告负担与 MRV 数据价值相称
在国际上报告国家温室气体排放的机构	<ul style="list-style-type: none"> 按照国际标准汇编年度数据 开发和改进全国排放估算方法 准备和发布温室气体清单 向联合国气候变化框架公约提交清单
煤矿所有者/运营商	<ul style="list-style-type: none"> 进行监测和报告，达到法律要求 提供支持数据和记录，包括支持监管机构或授权方的现场检查 遵守因不合规导致的处罚、罚金或其他安排 确保煤矿运营和温室气体减排项目符合矿山安全和其他相关监管要求 在公司报告、网站或其他媒体上发布数据，突出温室气体排放、MRV 合规和温室气体减排行动 参与立法或监管流程，对立法草案和拟议法规提出建议
煤矿瓦斯/废弃矿井瓦斯/露天矿瓦斯项目所有/运营方	<ul style="list-style-type: none"> 使用公开 MRV 数据确定减排项目，包括抽采瓦斯、风排瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯等 设计、融资、建造、调试和运营减缓项目，包括抽采瓦斯、风排瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯等 与主矿、矿产权所有者、土地所有者或其他交易对手合作，安装和运营项目
	<ul style="list-style-type: none"> 遵守所有监管要求，包括：温室气体管理和报告、空气质量、水质、废物管理、其他环境、施工、运营和矿山安全的要求 监测并报告特定减排项目（一个或多个）的温室气体排放和减排情况，或将与主矿合作完成 如需减排验证，确保验证机构的服务质量 在公司报告、网站或其他媒体上发布数据，突出温室气体排放、MRV 合规性和温室气体减排行动 参与立法或监管流程，对立法草案和拟议法规提出建议
第三方验证机构	<ul style="list-style-type: none"> 审查并验证排放和减排报告，满足合规性或排放交易计划的要求 参加培训和认证，成为经授权的验证人员

抵消项目登记处	<ul style="list-style-type: none"> 根据煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯的项目协议登记减排项目减排量 根据公开清单登记合规的煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯项目 审批或否决项目的减排验证报告
温室气体公共登记处	<ul style="list-style-type: none"> 列出项目、排放量和减排量 为汇总和发布验证的温室气体数据提供平台
公众	<ul style="list-style-type: none"> 参与立法或监管流程，对立法草案和拟议法规提出建议 公开评论项目登记协议、项目登记清单和核实报告 追踪和解释已发布的 MRV 数据，并在私人或公共平台进行数据分析

在设计 MRV 体系时，必须考虑煤炭生产方法和排放源（煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯或露天矿瓦斯），并针对每个排放源确定相应的监测方法。表 6.3 列出了各种监测方法和最佳实践。

表 6.3 煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯排放源和相应的监测方法

瓦斯源	MRV 体系下的监测方法	基于当前科学认知和实践的最佳选项
正在作业煤矿	<ol style="list-style-type: none"> 在国家层面应用的煤炭生产排放因子 在区域或特定矿井应用的煤炭生产排放因子（完成了本地验证） 在矿区层面测量风排和抽采瓦斯 <ol style="list-style-type: none"> 使用手持设备进行周期性点测 连续排放监测（监测设备和现场测量结合，数据通过远程传输和分析） 卫星或航空勘测提供现场读数，需经评估和验收 	3b
露天矿	<ol style="list-style-type: none"> 在国家层面应用的煤炭生产排放因子 在区域或特定矿井应用的煤炭生产排放因子，并完成本地煤层气测量 	2
	<ol style="list-style-type: none"> 基于地面开放路径红外监测或类似技术，提供点测量。 在特定时间和地点使用卫星或航空勘测，技术需经评估和验收 	
废弃矿山	<ol style="list-style-type: none"> 以关矿时瓦斯流量为基线，采用一般下降曲线。 以关矿时瓦斯流量为基线，采用特定区域下降曲线。 以关矿时瓦斯流量为基线，采用区域确定的下降曲线（经煤矿抽采瓦斯流量校正） 以关矿时瓦斯流量为基线（考虑透水率），采用煤矿抽采瓦斯校正的区域下降曲线。 	4
采后活动	<ol style="list-style-type: none"> 根据采后煤残留瓦斯量确定排放因子，应用于储存、加工和运输过程中的排放。 	1

有效的政策制定和减排行动离不开良好的数据支持。所以一个准确完整的 MRV 能夯实行动基础，带来可测结果。在条件允许的情况下，MRV 首选矿井层面的测量，因为矿井层面能提供更精确数据，这些数据可以按需汇总到其他级别的数据中。矿井层面的采集适合地下作业矿（见表 6.4）。废弃矿井排放监测适合混合法，结合了直接测量和基于区域下降趋势的评估。同理，认证流程应涵盖煤矿层面全部测量要素。

表 6.4 矿井层面的测量

矿井监测和报告		认证
测量	测量频率	周期性点测的频率可以根据瓦斯流量的变化从每天到每年不等连续测量（采样率为 1-10 分钟不等）是首选
	数据处理	根据用户技术规范进行数据预处理和统计分析 超出范围/失败状态的数据处理

		缺失数据处理	
	原始数据管理	远程传输和存储	确保数据备份和安全措施到位
		车载存储	
	测量仪器的安装和操作	位置灵敏度	检查测量仪器的安装
		全天候防护	
		参数样本调节	
		参数测量频率	
		维护	
	传感器的正确操作	校准	检查传感器的校准日期和证书
		准确度	确保测量系统符合标准
		性能限值	
		故障特征	
	测量变量	监测每个既定参数	确保监测所需参数
结果	计算	根据技术标准规范计算和结果	检查是否符合监测方法
		整合相关参数输出所需结果	检查算法中的公式
	存档	编撰并存储全部数据、支持信息、计算过程和结果，在约定时间内完成备份	供回顾性检查
报告	在报告系统中记录结果	记录任何问题	检查报告的完整性和正确性（见第 3.3 章）

MRV 的总体结构必须与国家政策目标保持一致，需要有利于国家排放目标的实现。为确保报告者顺利执行，MRV 无需过度复杂，需要在确保准确的前提下考虑煤矿监测和报告的实际工作量和负担（表 6.5 和表 6.6）。建议根据煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯的排放量大户，及可减缓排放源来确定报告方的优先级。在平衡报告负担和 MRV 颗粒度间，请思考以下问题：

- 报告者的工作负担和政府及公众期待的颗粒度间是否取得平衡？
- 煤矿是否具备正确监测、测量和报告数据的技能和经验？
- 监测和报告背后的成本是否报告数据收益相称？

请见表 6.5 罗列的报告阈值和考虑因素。

表 6.5 MRV 的报告阈值和考虑要素

报告阈值类型	选项	考虑要素
按煤矿类型划分	煤矿瓦斯	<ul style="list-style-type: none"> • 瓦斯排放的最大来源：在瓦斯富裕的作业矿井中，煤矿瓦斯是减排首选 • 工作矿有员工在现场进行监测和报告 • 为落实矿井安全，已进行部分监测和测量 • 一般能使用手持仪器进行现场测量或连续监测 • 常见两种排放途径，风排和抽采 • 煤矿瓦斯减排项目倾向使用连续监测
	废弃矿井瓦斯	<ul style="list-style-type: none"> • 某些国家的废弃矿井瓦斯排放见涨 • 废弃矿井瓦斯排放量大的国家可以使用衰减曲线将这部分排放纳入温室气体清单 • 与在营矿井相比，MRV 很难覆盖对废弃矿井，因为废弃矿井责任方难以明确，可能是土地所有者 • MRV 可适用于废弃矿井瓦斯减排项目；MRV 需要严格核查特定时间段内的减排量
	露天矿瓦斯	<ul style="list-style-type: none"> • 仅限于部分盆地 • 使用排放因子监测足矣 • 应纳入温室气体清单 • 如果露天矿的瓦斯排放量大，强制性的 MRV 可以覆盖露天矿的所有者/经营者

按排放量划分	绝对排放量	<ul style="list-style-type: none"> 绝对排放量最合适，直接与温室气体排放量挂钩 瓦斯排放量或瓦斯排放量（按年、按日算等） 区域全国排放比率
	特定排放量	<ul style="list-style-type: none"> 开采每吨煤炭的瓦斯最低排放量（立方米） 与煤炭产量、煤层含气量和煤炭等级相比，特定排放量可能更高
按煤矿规模划分	煤炭产量	<ul style="list-style-type: none"> 年度原煤产量 年度待售煤炭产量（除非煤矿业年产量与年排放量直接挂钩，否则不建议用）
其他类型	煤阶和市场	<ul style="list-style-type: none"> 要求仅开采特定等级煤炭的矿报告 可能会排除一些矿井，如褐煤矿井（次烟煤和褐煤矿井） 不建议使用，因为已知有气量大的地下褐煤矿井
	煤层含气量	<ul style="list-style-type: none"> 煤矿煤层的最小平均含气量（不建议用，因为除了含气量之外，还有其他因素影响煤矿排放量）

MRV 还应包括表 6.6 所述的结构要素，包括报告频率、报告平台、核查、记录和数据发布选项。

表 6.6 MRV 整体结构

MRV 的结构要素	选项	考虑因素
报告频率	年度	<ul style="list-style-type: none"> 便于相关管理部门进行管理 降低报告单位负担
	与监测频率相同	<ul style="list-style-type: none"> 高频报告负担很重，尤其每日、每周或每月报告 职能部门接收和管理数据、报告者编制和提交数据背后成本高企 为职能部门或公众提供额外收益的概率不高
报告平台	在线	<ul style="list-style-type: none"> 职能部门创建和管理在线门户用于数据报告 可以使用网络表格输入数据，或采用其他格式（如微软 Word Excel、.pdf、.jpeg 等）的报告 便于快速提交、审查报告，数据汇编、分析 可以即可创建电子记录 初始成本较高，长远来看具有成本效益
	纸质	<ul style="list-style-type: none"> 纸质提交 开始简单、成本低 纸质文件的管理和记录保存成本较高 需要数字化或数据输入来汇编数据，成本高昂
	自动化	<ul style="list-style-type: none"> 实时向职能部门传送数据 仅适用于使用连续监测的煤矿
报告、报告验证与记录保存	需要报告的数据	<ul style="list-style-type: none"> 取决于管辖区域和项目目标，但报告内容至少包括： <ul style="list-style-type: none"> 报告日期 煤矿名称、地址、联系方式 所有者/经营者 瓦斯总排放量 矿井通风系统的瓦斯排放量（地下作业矿） 矿井瓦斯抽采系统的甲烷排放量（地下作业矿） 废弃矿井的瓦斯排放量（如相关） 露天矿的甲烷排放量（如相关） 瓦斯减排量 利用煤矿瓦斯/废弃矿井瓦斯/露天矿瓦斯产生的二氧化碳排放量
	报告验证	<ul style="list-style-type: none"> 第三方验证 自我认证 相关机构自动手动验证报告 与外部数据源比较
	记录保存与记录留存	<ul style="list-style-type: none"> 基础数据应在报告提交后的既定时间段内（3 年、5 年或 10 年）进行保存在煤矿或数据库中 在回应相关机构要求或现场检查时提供数据 为数据提供安全、独立的存储
数据发布	数据发布门户	<ul style="list-style-type: none"> （可发布的）在线数据应该便于公众访问 按需发布数据
	数据摘要	<ul style="list-style-type: none"> 主流网站或汇总了数据亮点，MRV 可从中获益

	公开数据与机密数据	<ul style="list-style-type: none"> • 公开数据：排放数据、排放方程（数据输入及其他数据，包括排放源、采煤方法和煤炭生产） • 制定计划保护机密数据。某些数据不适合公开，包括或将泄露商业机密或其他专有信息数据 • 在不损害数据质量情况下，尽可能多公开数据，如发布汇总数据或发布煤矿数据
--	-----------	--

本章提出了在国家层面设立 MRV 体系的框架，框架细节以前几章的内容为基础。MRV 的最终落地与国情相关，包括国家治理体系、政策目标、政府能力、报告能力，及预算安排。理想的 MRV 体系应该足够稳健，能提供可靠的数据，以促进缓解行动，实现煤炭行业的减排。也能鼓励煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯开展核算，为全球减排做出快速贡献和响应。

决策者在制定 MRV 时，应全面考虑政治环境。如果报告方都是企业，都愿意开展 MRV，那么 MRV 成功概率更高。所以执行方应该积极鼓励行业参与，并与利益相关方建立正式和非正式的协商机制。

另一个重要考量是，其他现有政策是激励报告还是阻碍报告。部分国家针对超过既定排放予以罚款，报告者会刻意报。所以在设计体系时，应尽量减少罚款等负面政策。相反，可以建立友好流程确保报告方准确报告，或通过设计让准确报告本身有益于报告者，如通过系统默认系数偏高。

切记，无论温室气体排放清单本身多么详尽和完整，除非与减排行动一致并被用于监测缓解行动，否则就不是一个有效的工具。

附录

附录1. 煤矿中使用手持设备进行测量

确定矿井风道中纯瓦斯流量的最常见方法是利用手持式风速计测空气流速，结合专用真空瓶，“Gresham 管”或采样袋采集空气样本进行瓦斯测量。也可以结合皮托管和差压表测量瓦斯流量，温度计和压力表分别测温度和压力。美国矿山安全与健康管理局在检查期间曾使用 10 毫升（ml）真空瓶采集空气样本。手持式校准甲烷计也可测量瓦斯测，但空气样品的实验室分析或将得到更可信的测量值。

气流测量值通常以体积速率表示，如每分钟立方英尺（ft³/m），每小时立方米（m³/hr）或每秒立方米（m³/s）。气流数据也可用实际测量值、标准化测量值或标准化测量值表示。

测量美国地下矿通风点一般在出风井（“通道”）底部的回风巷，气流和瓦斯浓度测量点在回风与出风井交汇处。测量人员一般不进入出风井底部，防止掉落碎片造成人身伤害。通风系统一般在正压（罕见且不适合瓦斯矿井）或负压（瓦斯矿井标准做法）下运行，所以在出风井的回风道中进行测量可以为竖井瓦斯排放量提供合理可靠的估算。有时会出现多个回风口通向一个出风井。当出现两个或以上回风口通向出风井时，总气流体积速率是所有回封口气流测量值的和。井中瓦斯浓度是每个回风口瓦斯浓度读数的加权平均值。

现场测量可按天、周、月或季度开展，煤矿所有者/经营者可通过定期的通风调查获得每月测量值。

上述测量方法是美国矿山健康和安全管理规程常见的流程，但上述方法在温室气体监测仍面临挑战。从地面到出风井耗时偏长，单井可能需要 2-4 个小时。与为了健康和安全管理而进行的通风调查频率相比，长时耗或将限制矿主/操作人员进行高频温室气体排放采样次数。此外需要考虑甲烷计（通常在网格点上取读数）和风速计（用遍历法来计算平均气流）的位置。位置不正确会造成测量不准确。许多矿会标记测量站以保证位置一致。风速和甲烷浓度在回风巷道的横截面中发生变动。美国矿山安全与健康管理局（MSHA）建议，测量应在离地面、屋顶和侧壁至少 12 英寸（305 毫米）的位置进行，测量设备良好放置后在入口横截面处进行横向或中心线读数（美国矿山安全与健康管理局，2013 年；美国矿山安全与健康管理局，2019 年）。^{32 33} 此外，瓦斯浓度测量应在常规煤炭生产时间进行，不应该在换班或停产时进行。

可以用相同或相似设备（根据孔板压差）直接收集样本测量抽采系统瓦斯，测后瓦斯一般直接排入大气。瓦斯浓度可以通过袋装或管装样本测量，但手持式甲烷计的结果准确度低，因为手持式测量一般在开放环境中进行，会稀释测量结果。气流测量可以通过风速计来完成，但流量计比手持式风速计的结果更准确。瓦斯抽采系统一般借助真空泵将气体抽至地表，流量计或孔板一般安装在管道中。

如果单井使用单个真空泵进行地表通风，通风口可能不装流量计，因此需要风速计或皮托管来测量流量，并进行气体密度校正。煤矿运行一周后可能会在接下来的两周内关闭，瓦斯测量需要比通风量更频繁，如果只采第 1 周，不对第 2 周和第 3 周进行调整，瓦斯估量会产生偏差。

³² 美国矿山安全与健康管理局（U.S. MSHA）2013年发布的《煤矿安全和健康通用检查程序手册》。手册编号：PH13-V-1。2013年2月。

³³ 美国矿山安全与健康管理局（U.S. MSHA）2019年发布的《煤矿安全和健康通用检查程序手册》。手册编号：PH19-IV/V-1。2019年12月。

表 A1.1 总结了各种手动瓦斯流量监测方法。

表 A1.1 地下煤矿瓦斯手动监测方法和仪器

地点	测量内容	方法	设备	限制
出风井	出风井排出的气流和瓦斯浓度（风排）	测量速度和气体浓度（详情如下）	风速计或皮托管和甲烷计或气体采样设备（详情如下）	由于高风速和灰尘负荷，风速计的遍历可能存在很大困难
地下回风巷道	通往上行井的每条地下回风巷道中的气流和甲烷浓度	在已知横截面内进行四次风速计遍历的平均值，加上在横截面内六个等距点的甲烷点采样或用甲烷计感测	适用的风速计、当前校准图表、秒表、卷尺、笔记本校准过的甲烷计或采样管以及 Gresham 泵、Tedlar 采样袋或其他空气采样容器	标准的采矿实践，但仅提供点读数，并且由于材料的移动以及通风门的打开和关闭，气流可能会有所变化
甲烷抽采站	矿山中甲烷的总排放流量	测量已知尺寸的孔板两侧的压力差	差压表、管路。校准过的高读数甲烷计或气体采样管和泵	只要正确知道孔板尺寸并且管道中没有障碍物，就相当准确
地面渣油井	从被动排气口或泵输出排气口排出的气体	固定点速度读数，应用位置因子和密度校正	皮托管或小直径风速计和高读数甲烷计	除非安装了校准的连续流量计和气体监视器，否则准确度低
煤矿瓦斯利用厂	使用前清洁干燥的瓦斯	经第三方校准并在客户界面密封的认可测量仪器	流量、甲烷浓度、压力和温度监视器	通常不接受手动监视

附录2：ACM0008，联合国气候变化框架公约批准的煤矿瓦斯减排综合方法

ACM0008 为清洁发展机制（CDM）和联合履约（JI）项目的设计与开发（PDD），用于工作面和地下煤矿及废弃煤矿。联合国气候变化框架公约的审查流程允许 ACM0008 不断改进。利益相关方可以提交对方法的补充和改进，方法的修订则由联合国气候变化框架公约执行理事会（EB）讨论并纳入。

ACM0008 详细而严谨，以确保由此产生的经核证的减排量（CERs）可信，ACM0008 的一般原则同样适用于国家 MRV 体系：

- 标准化基线场景符合安全法规
- 明确适用范围和排除条款
- 计算抽采的煤矿瓦斯、矿井通风空气瓦斯、露天矿瓦斯、煤层气和废弃矿井瓦斯的排放和减排量
- 包括一种相对简单的方法来估算废弃矿井瓦斯排放量（有不确定性风险）
- 额度期（报告期）结束后数据存档至少两年
- 使用校准设备测量

利益相关方在项目设计中担任咨询角色，ACM0008 包括对煤矿瓦斯的具体要求。指定经营实体（DOE），即合格的第三方，获得东道国批准后，负责项目验证和申请注册。申请结果可能是要求项目核查或注册。项目参与方负责按获批方法对项目进行监测。验证由指定经营实体负责，根据验证结果判断减排量是否按计划达标。达标后由指定经营实体颁发书面证明。联合国气候变化框架公约秘书处会进行完整性检查，检查报告由秘书处和执行理事会复核。如无复核要求，直接发放 CERs。清洁发展机制登记册负责记录 CERs 持有量。

ACM0008 流程耗时耗钱，只适用于大型项目。一方面，ACM0008 适配中国环境，清洁发展机制也极大促进了煤矿瓦斯利用和销毁项目的发展。但 CERs 的价格取决于欧盟排放交易系统（EU ETS）对抵消额度的需求，需求受限于向实体发放的配额，长久的市场失衡问题未能解决，导致碳价暴跌，严重损害了碳市场的投资信誉。

在 MRV 的开发背景下，ACM0008 提供了以下可借鉴内容：

- 协助设计煤矿瓦斯、废弃矿井瓦斯和露天矿瓦斯排放监测方案
- 确定缓解措施
- 了解潜在的排放核算问题

附录3：估算废弃矿井瓦斯排放量的实际考虑因素

许多国家在量化废弃矿井甲烷方面遇到挑战。估算废弃煤矿瓦斯涉及预测矿井从废弃时到目标盘查年的排放量。目前也只有少量废弃矿井进行了监测。各国相关机构，包括美国环境保护署、英国环境食品与乡村事务部和澳大利亚的清洁能源监管机构，已开发了评估废弃矿井瓦斯排放量的方法。方法包括模型预测或模型预测结合矿井通风口测量的混合方法。

废弃前的瓦斯排放率反映了煤层瓦斯含量、采煤率以及矿井瓦斯流量。一旦采矿停止就没有新的排放源，瓦斯流动将减少。废弃矿排放的有限数据表明，瓦斯排放通常遵循双曲线型衰减，针对特定盆地或地区开发的衰减曲线可用于预测废弃矿瓦斯排放。对于特殊矿井，衰减曲线适用于矿井废弃时的甲烷排放率。

2019年，政府间气候变化专门委员会对指南进行了修改，纳入估算国家废弃矿井瓦斯排放量的方法，类似于估算作业矿排放量1至3级方法致。此外，估算废弃矿井瓦斯排放还必须考虑地下开采的方法，比如崩落对其他含气层的影响，导致长壁矿井废弃后继续排放瓦斯概率较大。同时，数据的可用性和质量部分也取决于关矿年限、是否出于安全、环境或再利用原因安装了监测系统。所以可以考虑用实地调查补充现有数据。还要尽可能准确评估地下水恢复和透水的影响。每个煤田区域应设立一个截止日期，超过日期后的估算量暂时不计。废弃年限越长，透水概率就越大。计算排放量和减排潜力还需要开发类型曲线来估算矿井关闭后的瓦斯量，以下段落将详述以上要素。

政府间气候变化专门委员会方法

2019年修改的政府间气候变化专门委员会指南包括估算国家废弃矿井瓦斯排放的方法。原则将在下文概述，完整内容请见原始文件（政府间气候变化专门委员会，2019）。

弃矿井瓦斯排放清单1级方法由美国环境保护署开发（Franklin等人，2004），方法根据特定时间间隔内废弃的煤矿总数，并根据瓦斯分数调整（作业时每年超过2,800至14,000立方米/天，或700至3400吨）。每年会得到一个排放因子，排放因子随时间推移减小。

1级方法提出可以忽略水淹矿井的排放，同时建议，如果不知道水淹情况，则假定全部矿井未被水淹。由于很难出现全部矿井未淹，所以排放量可能高估。一级方法还提供了每个关闭时间间隔含瓦斯矿井百分比的默认高值和低值。

2级方法与1级方法类似，但使用了特定煤盆地或国别信息，如关闭前的作业矿井排放量。在没有任何测量数据的情况下，以默认值为准。

3级方法涉及更多细节，包括：

- 建立全国范围内的煤矿关闭数据库，包含采煤、地质和水文信息，及矿井通风停止的日期
- 关闭前后测量的排放量，及/或用排放模型估算排放量
- 如果没有测量数据，使用衰减曲线或模型计算露天矿、封闭矿或被水淹矿的排放量。使用特定衰减方程、模型及废弃到盘查年间的年数计算各矿排放因子或排放量，也被视为二三级混合法。
- 同其他方法一样，计算废弃煤矿排放量总和，提交年度排放清单。

1级方法不等于权威方法，所以同时开发了2级3级方法，关键要了解煤田和区域水文特征来确定透

水率（Kershaw，2005年）。

合理准确的排放清单能促进缓解政策制定和行动落地。收集清单信息需要和煤矿经营方、矿山规划、水文和地质资料库及当地煤矿专家保持密切联系，还需要开展实地考察，最终考察结果有利于预防错误预测，也有利于制定缓解策略。

采煤方法的影响

地质条件相同时，房柱式的瓦斯排放比长壁采煤少得多。所以国家的废弃煤矿排放清单主要涉及废弃的长壁采煤地下深矿。

废弃煤矿数据可及和质量

数据可及和质量取决于煤矿关闭的时间，及是否出于安全、环境或再利用考虑安装了监测系统：

1. 已关闭矿山：档案中可能保存有限的瓦斯和水数据、矿山平面图，可能记录废弃煤矿数量。
2. 近期关闭的矿山：可能提供有限、中等质量数据。
3. 在通风口设有瓦斯监测设备的废弃矿山：直接测量的数据有利于计算衰减曲线，但如果有未识别的排放口（如未密封的旧煤矿入口）可能低估排放量。
4. 如果废弃矿井正在进行甲烷捕集、利用或空燃，大概率是通过连续监测收集的高数据质量。数据可用于生成局部/区域衰减曲线，由于数据是机械提取，排放量或将高估。
5. 未来计划关闭的矿山：作业矿山会收集大量信息，其中绝大部分信息会在关闭后销毁。应在信息可及时进行收集。如果有可行性研究展示了商业可行性，可以考虑在关矿过程中监测瓦斯和水，同时设计废弃矿井瓦斯的利用/减排项目。

调查和实地工作

可以使用有限数据建模估算排放量，但如果缺乏对采煤、瓦斯和水文环境的全面了解，模型可能会产生较大误差。基础的实地调查有助于确定排放位置，了解现场压力、测量瓦斯流量和浓度，如果可行还能监测地下水。为预防废弃矿井瓦斯的大量排放，需要良好设计和监测减排措施。总之，现场检查是调查工作中不可或缺的第一步。

地下水恢复的影响

废弃矿井瓦斯排放控的重点是地下水回收。在使用长壁塌陷开采的深井中，地下水和含水层通常受到了扰动。地层水或被抽出矿井，或被泵入已废弃的较低工作面。矿山关闭时抽水停止，水在工作面中上升，逐渐隔离瓦斯源并自然减排。但某些地区可能继续从竖井或钻孔中抽水，以保护邻近矿井免受突水危害，以保护含水层或防止酸性矿井水排放到地表。

废弃矿井瓦斯排放估算和预测应考虑以下因素：

- 矿井水已回收地区，但仍有部分工作面位于恢复的水位之上。如果工作面很少且瓦斯含量低，则可以忽略不计。请计算水位以上的瓦斯资源并/或监测排放口，检查排放情况并调查异常情况。
- 矿井水已回收且水位以上没有矿井工作面的地区，则假设没有明显瓦斯排放，除非检查结果相左，此时需要调查瓦斯源。
- 矿井水仍在继续恢复的地区需要加速排放曲线的衰减。排放持续的时间取决于水回收的速率和高度，需要计算水位以上的瓦斯资源随时间的变化并/或监测通风口。

- 矿井水回收受制于矿井水泵水，目的是保护现有矿井或防止含水层或地表水体污染。此类排放可能会持续较长时间，需要计算水位以上的瓦斯资源量，并/或监测排放口。

矿井水回收率可以通过两种方式确定：

1. 通过应用渗透函数来减少流入矿井的水量，具体取决于未被淹没的工作面体积。英国对露天竖井和钻孔研究的水位数据表明，矿井废弃后的水回收遵循可预测的指数曲线，与含水层抽水后的回收率类似（Kershaw, 2005）。

2. 通过使用基于各开采煤层填充采空区的几何模型，模型源自矿井规划图和残余采空区假设。简单的操作是根据采煤期测量的抽水量假设线性透水率，减去为采煤过程引入的用水量，如用于抑制粉尘的用水量。

废弃日期

每个煤田区域都应设置一个截止日期，超过后的排放应不予估算。矿山废弃时间越长，淹水的概率越大。所以在某个日期之后，平均排放量可忽略不计。在地下水回收迅速的采煤区，截止日期可能短至关闭后 5 年或 10 年。对于特定地区或煤田，应实地考察明确哪些关闭矿仍有排放。有些地方可能有特例，特例需要单独监测。

量化潜在可用瓦斯

要量化排放或利用的废弃矿井甲烷需要利用地质、采煤和残余瓦斯数据。储层边界由长壁作业卸压区的范围定义，瓦斯资源是长壁作业扰动的未开采煤层中剩余的瓦斯。

瓦斯的排放或利用取决于作业矿井的互通性、入口密封标准和透水速率。透水速率根据每个煤层实测/预测的水流速率及采空区计算，所以，废弃矿井甲烷储量是透水深度的函数（AMM BPG）。

衰减曲线的推导

废弃矿井瓦斯排放的估算和预测依赖经验衰减曲线，曲线的准确性仅与生成数据相关。外推数据预测本身存在极大不确定性，所以应不断收集数据生成准确的衰减曲线。除采用矿井关闭时和关闭后的瓦斯流量数据外，还可以利用以下数据构建衰减曲线：

1. 废弃矿井通风口的监测数据
2. 维护良好且无产煤作业的深井实测数据
3. 因地质、技术、安全、财务、长期劳工纠纷导致长期停工的在役深井
4. 实测已采和利用的瓦斯（数据直接应用在其他未采地区，结果或将高估，因为水淹前，抽采瓦斯排放量更大）
5. 实测已采和燃烧的瓦斯。当抽水速率较低，排放一般不会高估。

简化国家废弃矿井瓦斯排放清单的数据采集

检查煤田或其他区域单元采煤、地下水回收和煤矿残留瓦斯量。设计方法时应考虑以下因素：

- 如可行，建议逐个确定废弃矿井瓦斯排放。
- 最近和即将关闭的含瓦斯矿井是主要排放源，强烈建议在此收集瓦斯资源和排放速率详情。
- 水文研究很关键。在快速透水的地区，作业超过 10 年以上的煤矿排放可忽略不计。

-
- 煤层瓦斯含量较低地区，或史上采煤活动频繁、煤层瓦斯开采殆尽的煤层排放量可能极低。
 - 在采煤频繁的浅层作业区，瓦斯可能来自不易测量的扩散源。建议通过大气取样、机载或卫星收集表面通量估值。

附录4：观测瓦斯排放和浓度的卫星系统(主动传感器)

下表中卫星和卫星系统配备了能够检测瓦斯排放的传感器。卫星系统的覆盖范围从全球范围到特定位置不等。部分卫星由企业运行，大部分卫星由公共资金运营，使用主动传感器定期监测大气。国际地球观测卫星委员会(CEOS)计划建立一个“虚拟星座”，目的是协调卫星开展大气监测，包括监测大气中的二氧化碳和甲烷(CEOS, 2018年)。

“额定检测阈值”指系统能够检测和量化的最小泄漏率。“像素大小”指卫星能检测到地球上的最小区块。像素组合会形成图像。像素越大，图片分辨率越低，像素越小，分辨率越高。

覆盖范围	仪器(机构)	发射年份	额定检测阈值(kg/小时)	像素大小(km x km)
全球	SCIAMACHY (ESA)- 已退役	2003年	68,000	30 x 60
	GOSAT (JAXA)	2009年	7,100	10 x 10
	TROPOMI (ESA, NSO)	2017年	4,200	5.5 x 7
	GOSAT-2 (JAXA) (即“IBUKI-2”)	2018年		10 x 10
	Sentinel-5 (ESA)	2022年	4,000	7 x 7
	CO2M (ESA)	2026年	1,000	2 x 2
	GeoCarb (仅观测美洲) (NASA)	2024年	4,000	10 x 10
地区	MethaneSat (环境保护基金/ESA)	2022年	500-1,000	0.1 x 0.4
特定	GHGSat-D ("Claire")	2016年	1,000	0.05 x 0.05
	GHGSat-C1 ("Iris")	2020年	110	0.025 x 0.025
	GHGSat-C2 ("Hugo")	2021年	110	0.025 x 0.025
	GHGSat (另外3颗卫星)	2022年	110	0.025 x 0.025
	MethaneSat (环境保护基金/ESA)	2022年	500-1,000	0.1 x 0.4
	TANGO (Copernicus)	2024年	500-1,000	0.3 x 0.3
	甲烷遥感激光雷达任务(MERLIN)	2024年		

资料来源：采用Elkind等人，2020，日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)，Crisp等人，2018，GHGSat，2021。

参考文献

- AMEDIEKA, G. EHRET, A. FIX, M. WIRTH, C. BÜDENBENDER, M. QUATREVALET, C. KIEMLE, 和 C. GERBIG, (2017) 。《CHARM-F——一种新型机载综合路径差分吸收激光雷达，用于二氧化碳和甲烷观测：测量性能和强点源排放量化》，应用光学 56, 5182–5197, 2017。
<https://doi.org/10.1364/AO.58.000616>
- 澳大利亚政府，清洁能源监管机构，(2021)。《国家温室气体和能源报告数据》2021年2月。
<http://www.cleanenergyregulator.gov.au/NGER/National%20greenhouse%20and%20energy%20reporting%20data>
- 澳大利亚政府，清洁能源监管机构，(2020)。国家温室气体和能源报告。《煤矿和煤矿集团门槛》。2020年。
<http://www.cleanenergyregulator.gov.au/NGER/Reporting-cycle/Assess-your-obligations/Reporting-thresholds>
- 澳大利亚政府，清洁能源监管机构，(2020)。国家温室气体和能源报告。立法网页。2021年2月。
<http://www.cleanenergyregulator.gov.au/NGER/Legislation>
- 澳大利亚政府，清洁能源监管机构。国家温室气体和能源报告。《保障机制》。
<http://www.cleanenergyregulator.gov.au/NGER/The-safeguard-mechanism>
- 澳大利亚政府，清洁能源监管机构，(2021)。“估算产煤排放和能源指南”。2021年7月。
<http://www.cleanenergyregulator.gov.au/DocumentAssets/Documents/Estimating%20emissions%20and%20energy%20from%20coal%20mining%20guideline.pdf>
- 澳大利亚政府，工业、科学、能源和资源部 (澳大利亚DISER), (2021)。国家清单报告第一卷。2021年4月。
<https://unfccc.int/documents/273478>
- 另见
<https://ageis.climatechange.gov.au/>
- 澳大利亚政府，联邦立法登记处，(2008)。国家温室气体和能源报告(测量)。2008年。
<https://www.legislation.gov.au/Details/F2020C00600>
- BARKLEY, Z., T. LAUVAUX, K. DAVIS, A. DENG, A. FRIED, P. WEIBRING, D. RICHTER, J. WALEGA, J. DIGANGI, S. EHRMAN, X. REN, 和 R. DICKERSON, (2019) 。《估算宾夕法尼亚州西南部地下煤矿和天然气生产瓦斯排放》。地球物理研究快报。第46卷，第4531-4540页。2019年4月29日。
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019GL082131>
- BARRÉ, M., C. GIRON, M. MAZZOLINI, AND A. D'ASPREMONT, (2020)。使用Wasserstein重心平均大气气体浓度数据。arXiv: 2010.02762
- BELLE, B. (2019) 。《矿山中实时空气流速监测——管理矿山主要健康和安全隐患的关键设计参数》，载于Naj Aziz和Bob Kininmonth(编辑)。2013年煤炭经营者会议论文集，采矿工程，伍伦贡大学。2019年2月。
<https://ro.uow.edu.au/coal/454>
- BELLE, B., (2014) 。《地下煤矿风排瓦斯 (VAM)监测——澳大利亚在实现“准确性”方面的探索》。

2014年。第14届煤炭经营者会议，伍伦贡大学，澳大利亚采矿与冶金学会和澳大利亚矿山经理协会，2014年，第230-242页。

<https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=2179&context=coal>

BLOOMBERG, (2021)。澳大利亚煤矿附近发现强效瓦斯气体羽流。Bloomberg新闻。由雅虎新闻转载，
<https://www.yahoo.com/now/plumes-potent-methane-gas-spotted-210011614.html>。

CEOS, (2018)。从太空监测二氧化碳和甲烷的星座体系。大气成分虚拟星座温室气体团队。2018年11月。

https://ceos.org/document_management/Virtual_Constellations/ACC/Documents/CEOS_AC-VC_GHG_White_Paper_Publication_Draft2_20181111.pdf。

CREEDY, D. P., (1993)。《英国煤炭来源的甲烷排放：开发新方法》。Chemosphere。第26卷。第1-4期，第419-439页。培格曼出版社。大不列颠。1993年。

CRISP, D., Y. MEIJER, R. MUNRO, K. BOWMAN, A. CHATTERJEE, (2018)。从太空监测二氧化碳和甲烷的星座体系。地球观测卫星委员会。

https://ceos.org/document_management/Virtual_Constellations/ACC/Documents/CEOS_AC-VC_GHG_White_Paper_Version_1_20181009.pdf。

ELKIND, J., E. BLANTON, H. DENIER VANDER GON, R. L. KLEINBERG, A. LEEMHUIS, (2020)。无处可藏：卫星甲烷检测对政策、行业和金融的影响。哥伦比亚：全球能源政策中心。

<https://www.energypolicy.columbia.edu/research/commentary/nowhere-hide-implications-policy-industry-and-finance-satellite-based-methane-detection>。

欧洲委员会 (EC), (2020)。联合研究中心数据目录。全球大气研究排放数据库(EDGAR)。2020年。

<https://data.jrc.ec.europa.eu/collection/EDGAR>

FERNANDO, S., (2011)。《英国废弃矿井瓦斯排放量估算更新》。能源和气候变化部报告，WSP。伦敦，英国。2011年5月。

FIEHN, A., J. KOSTINEK, M. ECKL, T. KLAUSNER, M. GAŁKOWSKI, J. CHEN, C. GERBIG, T. RÖCKMANN, H. MAAZALLAHI, M. SCHMIDT, P. KORBEŃ, J. NEŃKI, P. JAGODA, N.

WILDMANN, C. MALLAUN, R. BUN, A.-L. NICKL, P. JÖCKEL, A. FIX和A. ROIGER, (2020)。《使用机载质量平衡方法估算上西里西亚煤田采煤和工业活动的甲烷、二氧化碳和一氧化碳排放》。大气化学与物理，20，12675–12695，2020年。

<https://doi.org/10.5194/acp-20-12675-2020>

FIX A., A. AMEDIEK, C. BÜDENBENDER, G. EHRET, C. KIEMLE, M. QUATREVALET, M. WIRTH, S. WOLFF, H. BOVENSMANN, A. BUTZ, M. GAŁKOWSKI, C. GERBIG, P. JÖCKEL, J. MARSHALL, J. NEŃKI, K. PFEILSTICKER, A. ROIGER, J. SWOLKIEN, M. ZÖGER和彗星小组, (2020)。

《2018CoMet机载IPDA激光雷达测量甲烷和二氧化碳》。EPJ网络会议，237，2020，03005，2020。

<https://doi.org/10.1051/epjconf/202023703005>

FRANKENBERG, C., J. F. MEIRINK, M. VAN WEELE, U. PLATT和T. WAGNER, (2005)。《全球空载观测评估甲烷排放量》，科学，第308卷，第5724期，第101-1014页，2005年5月13日。

GAO, J., C. GUAN, B. ZHANG, (2020)。《中国煤矿瓦斯排放：对当前自下而上清单的综述》。总体环境

-
- 科学。第725卷。爱思唯尔。2020年7月。
- GHGSAT, (2021)。 GHGSat直接提供的信息。
- 全球甲烷倡议(GMI), (2021)。《煤矿甲烷项目预可行性研究培训》。2021年。
<https://www.globalmethane.org/training/coalminetraining.aspx>
- 政府间气候变化专门委员会(IPCC), (2019)。2006年《国家温室气体清单指南》修订版。第2卷, 能源, 第4章-散逸性排放, 2019年。
- 政府间气候变化专门委员会(IPCC)。《气候变化2014: 综合报告》。政府间气候变化专门委员会第一、第二和第三工作组对第五次评估报告的贡献[核心撰写团队, R.K. Pachauri和L.A. Meyer(编辑)]。政府间气候变化专门委员会, 瑞士日内瓦, 第151页。
- 政府间气候变化专门委员会(IPCC), (2011)。《温室气体清单中使用模型和煤矿层面数据》(政府间气候变化专门委员会专家会议关于温室气体清单中使用模型和测量的报告。2010年8月9日至11日, 澳大利亚悉尼)。2011年。编辑: Eggleston H.S., Srivastava N., Tanabe K., Baasansuren J., Fukuda M., 日本IGES出版社 2011年。
https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/meeting/pdffiles/1008_Model_and_Facility_Level_Data_Report.pdf
- 国际能源署(IEA), (2020)。《世界能源模型》。2020年。
<https://www.iea.org/reports/world-energy-model>
- 国际能源署, (2020)。《2021年世界能源展望》。
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- 日本宇宙航空研究开发机构(JAXA),关于温室气体观测卫星-2“IBUKI-2”(GOSAT-2)的介绍。日本宇宙航空研究开发机构,
<https://global.jaxa.jp/projects/sat/gosat2/>。
- KERSHAW. S., (2005)。《英国废弃矿井瓦斯排放估算方法的发展》。DEFRA, WYG报告。英国诺丁汉。2005年。
- KERSHAW, S., (2005) 。《英国废弃煤矿瓦斯排放预测》。DEFRA, WYG报告。英国诺丁汉。2005年。
- LUNARZEWSKI, L., D. CREEDY, (2006) 。《澳大利亚已关闭矿山的瓦斯预测》。ACARP C14080。2006年9月。
- MILLER, S., A. MICHALAK, R. DETMERS, O. HASEKAMP, L. BRUHWILER, 和S. SCHWIETZKE, (2019) 。《中国煤矿瓦斯法规未能遏制日益增长的瓦斯排放》。自然通讯。第10卷, 第303条。2019年1月29日。
<https://www.nature.com/articles/s41467-018-07891-7>。
- MOELLERHERM, S., (2021), 个人通讯, 德国波鸿采矿后研究中心。2021年5月。
- 美国国家海洋和大气管理局(NOAA), (2021)。《新冠致使经济放缓, 但2020年二氧化碳和甲烷的排放激增》。2021年。
<https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2742/Despite-pandemic-shutdowns-carbon-dioxide-and-methane-surged-in-2020>
- 自然资源保护委员会(NDRC), (2014)。《中华人民共和国国家温室气体清单》。中国北京。环境出版社。

2014年。

- PANDey, S., R. Gautam, S. Houweling, H. D. van der Gon, P. Sadavarte, T. Borsdorff, O. Hasekamp, J. Landgraf, P. TOL, T. van Kempen, R. Hoogeveen, R. van Hees, S. P. Hamburg, J. D. Maasakkers和I. Aben, (2019) 。《卫星观测揭示天然气井喷导致的极端甲烷泄漏》。美国国家科学院院报, 116, 第26376-26381页, 2019年
<https://doi.org/10.1073/pnas.1908712116>
- PENG, S., S. PIAO, P. BOUSQUET, P. CIAIS, B. LI, X. LIN, S. TAO, Z. WANG, Y. ZHANG, F. ZHOU, (2016) 。《1980至2010年中国大陆人为甲烷排放清单》。大气化学与物理学, 16, 第14545–14562页。2016年
- PITT, J. R., G. ALLEN, S. J.-B. BAUGUITTE, M.W. GALLAGHER, J. D. LEE, W. DRYSDALE, B. NELSON, A. J. MANNING, AND P. I. PALMER, (2019) 。《利用飞机测量和扩散模型评估伦敦的二氧化碳、甲烷和一氧化碳排放》。大气化学与物理, 19, 第8931–8945页, 2019年。
<https://doi.org/10.5194/acp-19-8931-2019>
- Saunois, M., R. B. Jackson, P. Bousquet, B. poulter, J. G. Canadell, (2016) 。《甲烷在人为气候变化中日益重要的作用》。环境研究快报11, 第120207页。2016年
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/120207>
- SAUNOIS, M., A. R. STAVERT, B. POULTER, P. BOUSQUET, J. G. CANADELL, R. B. JACKSON, P. A. RAYMOND, E. J. DLUGOKENCKY, S. HOUWELING, P. K. PATRA, P. CIAIS, V. K. ARORA, D. BASTVIKEN, P. BERGA MASCHI, D. R. BLAKE, G. BRAILSFORD, L. BRUHWILER, K. M. CARLSON, M. CARROL, S. CASTALDI, N. CHANDRA, C. CREVOISIER, P. M. CRILL, K. COVEY, C. L. CURRY, G. ETIOPE, C. FRANKENBERG, N. GEDNEY, M. I. HEGGLIN, L. HÖGLUND-ISAKSSON, G. HUGELIUS, M. ISHIZAWA, A. ITO, G. JANSSENS-MAENHOUT, K. M. JENSEN, F. JOOS, T. KLEINEN, P. B. KRUMMEL, R. L. LANGENFELDS, G. G. LARUELLE, L. LIU, T. MACHIDA, S. MAKSYUTOV, K. C. MCDONALD, J. MCNORTON, P. A. MILLER, J. R. MELTON, I. MORINO, J. MÜLLER, F. MURGUIA-FLORES, V. NAIK, Y. NIWA, S. NOCE, S. O'DOHERTY, R. J. PARKER, C. PENG, S. PENG, G. P. PETERS, C. PRIGENT, R. PRINN, M. RAMONET, P. REGNIER, W. J. RILEY, J. A. ROSENTERETER, A. SEGERS, I. J. SIMPSON, H. SHI, S. J. SMITH, L. P. STEELE, B. F. THORNTON, H. TIAN, Y. TOHJIMA, F. N. TUBIELLO, A. TSURUTA, N. VIOVY, A. VOULGARAKIS, T S. WEBER, M. VAN WEELE, G. R. VAN DER WERF, R. F. WEISS, D. WORTHY, D. WUNCH, Y. YIN, Y. YOSHIDA, W. ZHANG, Z. ZHANG, Y. ZHAO, B. ZHENG, Q. ZHU, Q. ZHU和 Q. ZHUANG, (2020) 。《全球甲烷预算2000-2017》。地球系统科学数据, 12, 第1561–1623页, 2020年。
<https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- SHENG, J., S. SONG, Y. ZHANG, R. G. PRINN, G. JANSSENS-MAENHOUT, (2019) 。《中国煤矿瓦斯排放自下而上估算: 网格化清单、排放因子和趋势》。环境科技快报, 2019年, 6, 8, 473-478, 2019年5月31日。
- TALKINGTON, C., (2021) 。《美国温室气体报告计划: 美国煤矿瓦斯》。煤炭行业甲烷排放测量与减缓监管方法研讨会。欧洲委员会。比利时布鲁塞尔, 2021年5月15日。
- 美国联邦规则汇编第40篇第98部分: 环境保护—强制性温室气体报告。

https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title40/40cfr98_main_02.tpl

美国联邦规则汇编第40篇第98.6节

https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=3422d570772a6baaa198238640f9c6a9&mc=true&node=se40.23.98_16&rgn=div8

联合国欧洲经济委员会(UNECE)(2016年)《煤矿有效抽采和利用瓦斯的最佳实践指南》。第二版。第27页。联合国。ISSN: 1014-7225。2016年12月。

https://unece.org/DAM/energy/cmm/docs/BPG_2017.pdf

联合国欧洲经济委员会 (UNECE) (2019年)《废弃煤矿中有效回收和利用瓦斯的最佳实践指南》。欧洲经济委员会能源系列第64号。联合国。ISSN: 1014-7225。2019年。

https://unece.org/DAM/energy/images/CMM/CMM_CE/Best_Practice_Guidance_for_Effective_Methane_Recovery_and_Use_from_Abandoned_Coal_Mines_FINAL_with_covers_.pdf

联合国欧洲经济委员会(UNECE), (2019年)。《石油和天然气行业甲烷有效管理的最佳实践指南: 监测、报告和核查(MRV)及减排措施》。欧洲经济委员会能源系列第65号。ISSN: 1014-7225。2019年。

https://unece.org/DAM/energy/images/CMM/CMM_CE/Best_Practice_Guidance_for_Effective_Methane_Management_in_the_Oil_and_Gas_Sector_Monitoring_Reporting_and_Verification_MRV_and_Mitigation- FINAL_with_covers_.pdf

联合国环境规划署(UNEP)和气候与清洁空气联盟(CCAC), (2021年)。《全球甲烷评估: 减少甲烷排放的效益与成本》。内罗毕: 联合国环境规划署。2021年5月。

<https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>

美国国会, (2008年)。H.R. 2764: 公法110-161。《综合拨款法》。2008年。

<https://www.congress.gov/bill/110th-congress/house-bill/2764>

美国能源部能源信息管理局(USDOE EIA), (2019)。《煤炭报告》2019年。

<https://www.eia.gov/coal/annual/>

美国环境保护局(U.S. EPA), (2014)。《案例研究: 美国露天矿瓦斯回收》2014年。

<https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/cmop-methane-recovery-surface-mines-march-2014.pdf>

美国环境保护局(U.S. EPA), (2019)。《2011-2019年向美国温室气体报告计划子部分FF报告的数据》。环境事实, 2019年。

<https://www.epa.gov/enviro/greenhouse-gas-customized-search>

美国环境保护局(U.S. EPA), (2020)。《全球非二氧化碳温室气体排放预测与减排: 2015-2050》。2020年。

<https://www.epa.gov/global-mitigation-non-co2-greenhouse-gases>

美国环境保护局(U.S. EPA), (2021)。《美国温室气体排放和吸收: 1990-2019》。美国环境保护局430-R-21-005, 2021年。

<https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks>

https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/cmm_recovery_opps_surface.pdf

美国环境保护局(U.S. EPA), (2008)。《美国露天煤矿瓦斯回收的项目机会》。2008。

https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/cmm_recovery_opps_surface.pdf

美国矿山安全与健康管理局(U.S. MSHA), (2013)。《矿山安全与健康一般检查程序手册》。手册编号：PH13-V-1，2013年2月。

美国矿山安全与健康管理局(U.S. MSHA), (2019)。《矿山安全与健康一般检查程序手册》。手册编号：PH19-IV/V-1，2019年12月。

VARON, D. J., D. J. JACOB, D. JERVIS, J. MCKEEVER, (2020)。利用GHGSat-D卫星观测量化单个煤矿通风口的平均甲烷排放。《环境科学与技术》54期，第10246-10253页。

VARON, D. J., D. J. JACOB, J. MCKEEVER, D. JERVIS, B. O. A. DURAK, Y. XIA, Y. HUANG, (2018)。利用精细尺度卫星观测大气甲烷羽流来量化甲烷点源。《大气测量技术》，第11卷，第5673-5686页，2018年。Varon等人。

<https://amt.copernicus.org/articles/11/5673/2018/>

VARON, D. J., J. MCKEEVER, D. JERVIS, J. D. MAASAKKERS, S. PANDEY, S. HOUWELING, I. ABEN, T. SCARPELLI, 和 D. J. JACOB, (2019)。《卫星发现石油/天然气生产中异常大的甲烷点源》，《地球物理研究快报》，第46卷，第13507-13516页，2019年。

<https://doi.org/10.1029/2019gl083798>

WOLFF, S., G. EHRET, C. KIEMLE, A. AMEDIEK, M. QUATREVALET, M. WIRTH 和 A. FIX (2021)。《使用机载激光雷达确定CO点源的排放率》。大气测量技术，第14卷，第2717-2736页，2021年。

<https://doi.org/10.5194/amt-14-2717-2021>

甲烷（CH₄）是仅次于二氧化碳（CO₂）的第二大人为温室气体（GHG），甲烷的全球变暖潜能值（GWP）是二氧化碳的28-34倍。煤炭开采是甲烷排放的主要来源之一，约占全球人为甲烷排放总量的12%。大部分排放来自地下作业煤矿，但废弃煤矿的排放量也在增加。

管理甲烷需要对国家、省/州和地方各级排放源有充分的了解。只有拥有可靠的排放数据，决策者才能制定出有效的温室气体政策，评估减缓机会，并履行国际气候承诺。

国家监测、报告和核查（MRV）计划不仅有助于各国更好地了解煤炭开采对整体甲烷和温室气体排放的贡献，而且还能发现减缓机会。MRV可以帮助评估和跟踪已采纳的气候政策的有效性。在《巴黎协定》的背景下，建立高效的MRV计划对于履行国际气候承诺十分重要。

