

杜永亮,汪扬,何少林,等.陆上石油天然气开采过程中减污降碳协同管控[J].环境工程技术学报,2024,14(2):371-378.

DU Y L,WANG Y,HE S L,et al.Collaborative control of pollution and carbon reduction in the process of onshore oil and gas exploitation[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2024,14(2):371-378.

陆上石油天然气开采过程中减污降碳协同管控

杜永亮^{1,2},汪扬^{1,2},何少林^{3,4},苑宏英^{1,2,4*},徐薇^{3,4},宋阳^{3,4},刘博^{3,4},徐英俊^{3,4}

1.天津城建大学环境与市政工程学院

2.天津市水质科学与技术重点实验室

3.北京中陆咨询有限公司(中国石油规划总院)

4.国家油页岩生态环境分中心

摘要 石油天然气行业是挥发性有机物(VOCs)排放的重要源头,也是甲烷(CH₄)的最大工业释放源。在石油天然气开采中对VOCs与CH₄进行协同管控,实现减污降碳,对我国大气环境治理和“双碳”目标实现具有重要意义。石油天然气开采过程中大部分VOCs和CH₄释放源具有同根同源性,其中工艺有组织排放和火炬排放分别为最大的VOCs释放源和CH₄释放源;在加入新型网络化监测的协同管控路径基础上,选择适宜的管控措施,可提高污染物协同管控的效率;治理成本效益核算中多污染物成本效益法具有更高的经济效益,吸收法和吸附法是技术成熟度和经济性较高的VOCs治理技术,而减少压缩机和发动机启动次数是最经济的CH₄减排措施。

关键词 石油天然气开采;VOCs;CH₄;协同管控;减污降碳

中图分类号:X51 文章编号:1674-991X(2024)02-0371-08 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20230478

Collaborative control of pollution and carbon reduction in the process of onshore oil and gas exploitation

DU Yongliang^{1,2}, WANG Yang^{1,2}, HE Shaolin^{3,4}, YUAN Hongying^{1,2,4*}, XU Wei^{3,4},
SONG Yang^{3,4}, LIU Bo^{3,4}, XU Yingjun^{3,4}

1.Environment and Municipal Engineering College of Tianjin Chengjian University

2.Tianjin Key Laboratory of Water Quality Science and Technology

3.Beijing Zhonglu Consulting Co., Ltd. (China Petroleum Planning Institute)

4.National Oil Shale Ecological Environment Sub-Center

Abstract The oil and gas industry is an important source of volatile organic compounds (VOCs) emissions and the largest industrial release source of methane (CH₄). The coordinated control of VOCs and CH₄ in oil and gas exploitation to achieve pollution reduction and carbon reduction is of great significance to China's atmospheric environmental governance and the realization of the "double carbon" goal. Most of the VOCs and CH₄ emission sources in the process of oil and gas exploitation have the same root homology, and the organized emission of processes and the torch emission are the largest VOCs emission source and CH₄ emission source, respectively. On the basis of adding the collaborative control path of new networked monitoring, selecting appropriate control measures can improve the efficiency of collaborative control of pollutants. The multi-pollutant cost-benefit method in the cost-benefit accounting of pollution control has higher economic benefits. The absorption method and adsorption method are VOCs treatment technologies with higher technical maturity and economy, and reducing the number of compressor and engine start-ups is the most economical CH₄ emission reduction measure.

Key words oil and gas exploitation; volatile organic compounds (VOCs); methane; coordinated control; reduction of pollution and carbon emissions

收稿日期:2023-06-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFA0705500)

作者简介:杜永亮(1985—),男,讲师,博士,研究方向为污水污泥处理与固废资源化处置,du.smile@163.com

* 责任作者:苑宏英(1974—),女,教授,博士,研究方向为污水污泥处理及资源化,yuanhy_00@163.com

石油和天然气是重要的一次能源,对国家安全和国民经济至关重要。中国的能源需求正经历着从石油到天然气转换的紧要关头,天然气对外依存度呈不断上升趋势。为保证我国能源的油气需求,需加大石油和天然气的开采力度,而石油和天然气开采过程中会产生大量的 VOCs 与 CH₄,带来环境污染风险。《巴黎协定》的签署体现了国际社会在应对气候变化方面的一致意愿和行动,避免了未来严重依赖一次能源所带来的气候变化威胁。《巴黎协定》中明确指出,21 世纪末全球应将升温范围控制在 1.5~2 °C^[1]。我国已将碳达峰、碳中和纳入经济社会发展 and 生态文明建设整体布局。在此背景下,对 VOCs 与 CH₄ 进行协同管控,实现减污降碳,将在环境污染防治和气候变化应对方面发挥积极作用。

协同管控是在充分认识和评估污染物控制效益的基础上,运用协同学原理,以可持续发展为目标,将大气污染物与温室气体协同治理^[2-3]。如果达到相同的管理目标,时间越短或经济成本越低,就可以认为越有效^[4]。陆上石油天然气开采过程中对 VOCs 与 CH₄ 协同管控是一个复杂的过程,应从治理效率和经济角度出发,以协同管控为导向,降低 VOCs 与 CH₄ 排放量。目前,已有多项研究表明,石油天然气开采过程中 VOCs 与 CH₄ 具有同根同源特点^[5],在陆上石油天然气开采过程中进行 VOCs 与 CH₄ 的协同管控,可以在提高污染物排放控制水平的同时,推动产业绿色发展和技术进步,确保国家能源安全。因此,对大气污染物和温室气体的协同管控进行研究具有重要意义。

1 石油天然气开采过程中 VOCs 与 CH₄ 释放源分析

大部分 VOCs 具有较强的光化学反应性,会与大气中的氮氧化物(NO_x)及其他化学物质发生光化学反应,生成高浓度的臭氧和其他氧化物,这些产物是导致酸雨和雾霾等恶劣天气的主要原因。CH₄ 作为温室气体,其所产生的温室效应是 CO₂ 的 21 倍^[6]。我国作为世界前十的石油天然气生产大国,开采行业起步较晚,管理制度相对滞后,大部分企业尚未将全部的 VOCs 与 CH₄ 释放源纳入污染防治体系^[7]。

石油天然气开采过程中 VOCs 与 CH₄ 的释放源主要来自于工艺有组织排放、火炬排放、设备动静密封点排放等。根据国内多个石油天然气公司 VOCs 与美国国家环境保护局(US EPA)温室气体排放清单得出石油天然气行业 CH₄ 的排放量占比情

况,见表 1。由于统计、设备、管理水平各不相同,各种释放源的排放量占比可能有所差别,但主要污染源基本为表中所列几种。由表 1 可得出,VOCs 与 CH₄ 的释放源在一定程度上具有同根同源性的特点,这为后续的协同管控提供了可行性。

表 1 石油天然气开采活动过程中 VOCs 与 CH₄ 释放源^[8-15]

Table 1 VOCs and methane release sources in the process of oil and gas exploitation

释放源类型	释放源描述	VOCs 释放量占比/%	CH ₄ 释放量占比/%
工艺有组织排放	各生产工艺生产过程中所排放的气体	43	19
燃烧烟气排放	锅炉、熔炉、内燃机和燃气轮机等燃烧过程中排放的气体	6	14
火炬排放	火炬放空系统在清管、检修和紧急情况下排放的气体	3	38
设备动静密封点排放	设备与管线组件排放的气体	16	8
有机液体储存与调和挥发排放	挥发性有机液体储罐泄漏排放的气体	8	7
有机液体装卸挥发排放	液体有机原料及产品装车、装船、灌装环节排放的气体	5	2
废水集输、储存、处理处置过程排放	集中于废水处理以及废水收集环节排放的气体	4	4
冷却塔、循环水冷却系统排放	冷却塔、循环冷却水系统无组织逸散排放的气体	15	
燃气发动机排放	发动机发动排放的气体		14

近年来,许多国家出台了各种政策法规来控制 VOCs 与 CH₄ 排放。我国也在多部大气污染防治方案中明确要求开展重点工业 VOCs 与 CH₄ 的防治工作^[16-18],并在《中华人民共和国大气污染防治法》^[19]与 GB 39728—2020《陆上石油天然气开采工业大气污染物排放标准》^[20]中指出要协同管控这 2 种气体,这些文件的出台为 VOCs 和 CH₄ 协同管控指引了方向。

2 协同管控技术标准、路径和措施

2.1 管控技术标准

石油天然气行业的污染物排放管控需要从源头削减、过程控制与末端治理等方面来进行综合管控。US EPA 十分注重 VOCs 释放源管制,于 1985 年颁布了《陆上天然气加工厂设备 VOC 泄漏控制标准》^[21]。US EPA 在管控 VOCs 的同时也有意识地对 CH₄ 进行管控,早在 1979 年,US EPA 将石油天然气中的 4 个环节(生产、加工、储运、输配)列为大型释放源类别^[22],2016 年,又在新标准中对原有 VOCs 控制的基础上增加了 CH₄ 控制标准,涵盖压裂井和气泵中的 VOCs 控制以及井场设施中 VOCs 与 CH₄ 泄漏检测与修复(LDAR)^[23]。截至 2021 年,除了输配环节外,US EPA 已经针对油气生产各环

节的 VOCs 与 CH₄ 释放源制定了相应的技术标准(表2)。

表2 US EPA 已出台的油气开采释放源和控制标准^[24]

VOCs与CH ₄ 释放源	释放情况	2016年	2021年
石油和天然气井场	水力压裂完井	√	√
	集中储罐群的压缩机	—	√
	无组织排放	√	√
	井口排液	—	√
	气动控制器	√	√
	气动泵	√	√
	储罐	○	√
天然气集输增压站	油井伴生气	—	√
	压缩机	√	√
	无组织排放	√	√
	气动控制器	√	√
天然气加工	气动泵	√	√
	储罐	○	√
	压缩机	√	√
	无组织排放	—	√
长输和储运	气动控制器	√	√
	气动泵	—	√
	储罐	○	√
	压缩机	√	√

注: ○表示仅涵盖VOCs排放; √表示涵盖VOCs与CH₄排放; —表示标准中未设立对该释放源的管控。

2021年11月15日, US EPA 出台了《新建、重建和改建释放源的性能标准以及现有释放源的排放指南: 石油和天然气部门形势回顾》^[25](表3), 其中关于受控制的释放源以及相应的控制技术标准均有详细介绍。但是, 其对 VOCs 与 CH₄ 的协同管控仅停留在单个释放源的点式控制, 并未形成区域性的联合管控, 这增加了管控的复杂性以及工作量, 极大降低了管控效率。

2.2 管控路径

依据 US EPA 现有的管控技术以及管控策略, 提出一种适用于我国的污染物气体协同管控路径(图1)。该路径加入新型网络化监测, 在网络化监测中包含不同释放源的点式监测, 结合固定翼无人机

表3 US EPA《新建、重建和改建释放源的性能标准以及现有释放源的排放指南: 石油和天然气部门形势回顾》中受控制释放源相关控制技术方法

受控制的释放源	控制技术方法
增压站和井场的无组织排放	每2个月采用先进技术排查, 每年进行光学气体成像(OGI)检测
往复压缩机	开展年检, 如排放率超过0.056 m ³ /min, 则替换盘根或将气体在负压状态下导入封闭系统
天然气加工厂气动泵	更换零排放隔膜和活塞气动泵
完井: 非初探井、非定界井	保证现场配有分离器, 将返排液导入储罐或储蓄池进行气液分离, 最后需要将气体回收利用或回注地下
完井: 初探井、定界井、低压井	保持持续燃除或导入集中分离器处理燃除, 不要求现场配有分离器
天然气加工厂设备泄漏	每2个月进行OGI检测
油井伴生气排放	回收利用

巡航、雷达监测和信访举报等监测技术, 可提高污染物协同管控的效率和精度。具体管控流程分为监测、分析、管控策略制定、实施管控措施以及监测和评估5个方面。在对监管区域实行全面监测后, 需要将监测数据传输到控制中心, 并进行分析处理, 确定污染源和污染物的种类, 结合其他环境参数对监测结果进行综合分析评价, 由点到面最终形成全区域的管控策略。全区域的管控策略制定并实施后, 应定期对污染物排放量与管控效果进行监测和评估。从空间、排放量、环境风险、资源利用4个维度列出优化清单, 最后总结协同管控的技术路径和管理建议并进行优化完善。需要注意的是, VOCs 与 CH₄ 协同管控工艺流程需要综合考虑多个因素, 例如设备和生产过程的特点、控制策略的可行性和成本效益等因素。因此, 制定合适的管控措施和策略需要综合考虑多方面因素, 并在实践中不断优化和改进^[26-28]。

2.3 管控措施

在协同管控流程框架建立完成的基础上, 如何从 VOCs 与 CH₄ 的排放源头实施管控措施是重中之重。张博等^[31]分析了我国 CH₄ 排放现状与现有控排政策行动中存在的问题, 进而提出了新时期我国 CH₄ 控排的对策。薛明等^[32]提出建立源头绿色化、过程清洁化、废物资源化的融合发展机制, 明晰石油石化领域的环境影响和控制机制。汤玉平等^[33]通过研究油气勘探和微泄漏, 从油气泄漏引起的 CH₄ 排放方面探索其控制方法。李向阳等^[11]结合油气田

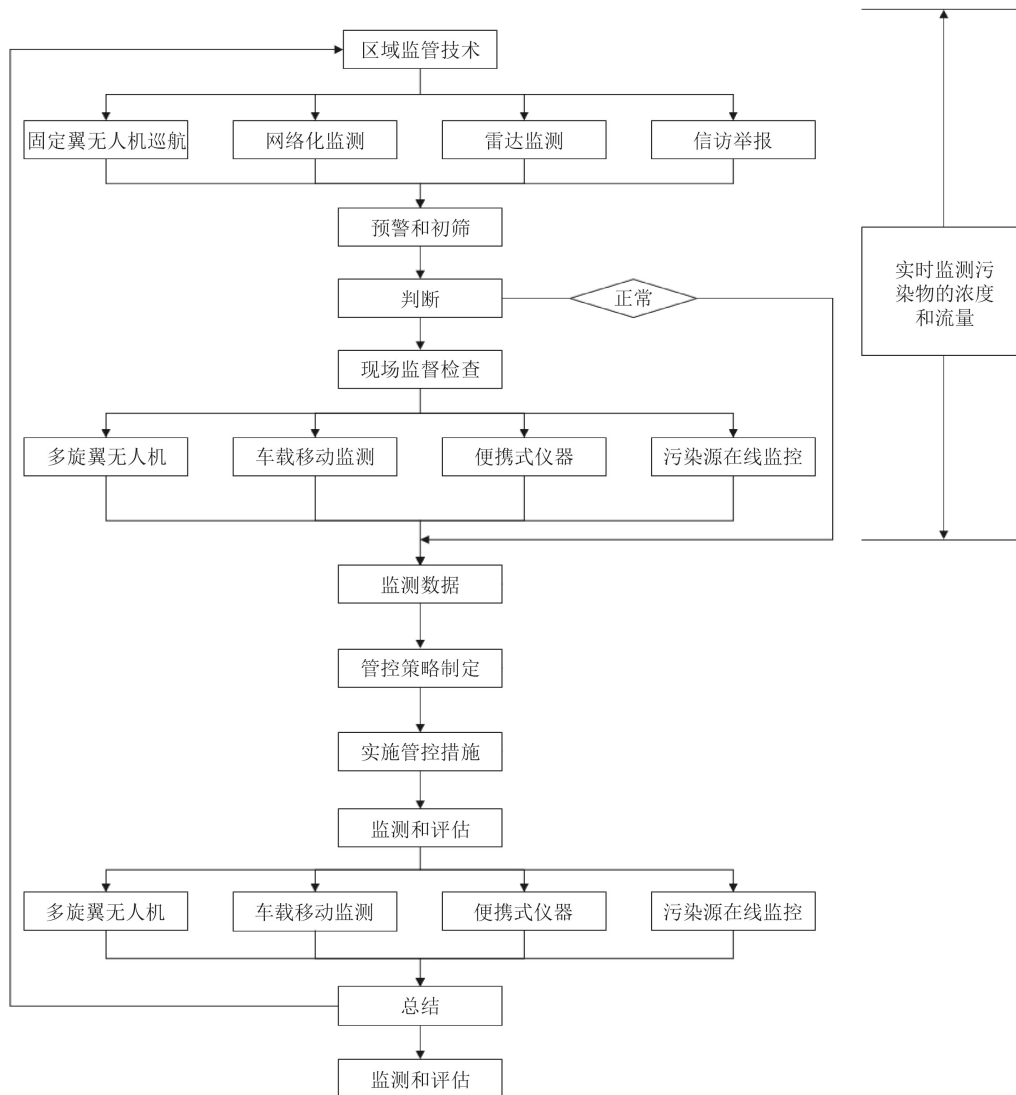


图 1 协同管控路径流程^[29-30]

Fig.1 Flow chart of collaborative control path

VOCs 排放标准, 提出 VOCs 污染管控措施, 并针对某油田 VOCs 排放实际情况, 提出相应治理方案。何少林等^[34] 对美国油气田 VOCs 管控要求、排放系数、可行技术及相关治理费用进行梳理总结, 为我国油气田 VOCs 治理提供借鉴。刘广哲^[35] 对石化企业 VOCs 的排放源以及排放量进行计算, 对重点排放点进行控制措施研究。但目前多为针对 VOCs 或 CH₄ 的独立管控研究, 缺乏对二者的协同管控研究^[36-37]。本文按照不同的释放源, 分别归纳总结了在石油天然气开采过程中对 VOCs 与 CH₄ 释放源的协同管控措施(表 4)。

3 协同管控治理成本效益核算

成本效益分析分为单一污染物成本效益法和多污染物成本效益法 2 种, 其优缺点和适用性见表 5。

根据美国 2021 年进行的一项成本效益研究显示, 如果只管理 1 种污染物, 对于 CH₄ 排放超过 3 t/a 的油气场站来说, 管控 CH₄ 比管控 VOCs 成本效益更高^[44]; 而对于多种污染物治理, 将控制成本按污染物比例均分的核算方式更具有经济效益。

在全流程的 VOCs 与 CH₄ 协同管控中, 对污染物的处理技术进行监测与评估部分成本效益核算占比最高。因此, 本文根据实际案例进行该部分成本效益核算评估。表 6 是浙江省 77 家化工企业的 VOCs 治理技术对比, 从优缺点以及适用范围对 VOCs 治理技术进行了分析和评价; 表 7 列举了不同 VOCs 治理技术的相关经济指标。根据表 6、表 7 综合考虑, 吸收法和吸附法的技术成熟度较高, 并且投入与运行成本最低。

国内对于石油天然气行业 VOCs 的控制技术以

表 4 协同管控策略^[38-43]

Table 4 Coordinated control strategies

释放源或释放过程	协同管控策略
储罐	使用具有极高安全性的封闭燃烧系统进行处理, 废气用作直接燃烧的燃料
压缩机	1) 更换往复压缩机活塞杆组合件; 2) 在负压状态下通过封闭排气系统将尾气排放到回收装置
气动阀	1) 更换大流量气动阀, 使用低流量气动阀; 2) 使用仪表风来替换气动阀
气动泵	1) 用电能、太阳能、仪表空气装置代替天然气气动泵; 2) 收集废气并注入石油和天然气回收系统或燃烧系统中
设备泄漏及逸散	1) 在油气处理站采用 LDAR 技术; 2) 在油气转接站采用 OGI 技术进行无组织排放的定性检测, 如果检测到泄漏, 使用氢离子火焰探测器再次进行定量检测
挥发性有机液体储存	用固定顶罐代替不稳定的原油罐和应急油罐, 对于 2 号稳定轻烃, 若使用固定顶罐, 应采取氮气密封
挥发性有机液体装载	1) 在罐装过程中采用底部或顶部浸入, 在接受顶部浸入装载时, 输出管口距离罐(槽)底部高度应小于 200 mm; 2) 密闭装载天然气凝析油、液化气和 1 号稳定轻烃, 灌装设备的气相管线必须与储罐的气相管路连接
废水集输与处理系统排放	1) 通过封闭管道收集和运输所有废水, 进水口和出口应采取与环境空气隔离措施, 以避免无组织排放; 2) 如果敞开液体表面排放的 VOCs (包括 CH ₄) 浓度 ≥ 100 μmol/mol, 通过加盖收集废气
有组织排放	1) 采用物理回收方法, 如冷凝、吸附和吸收等; 2) 通过生化反应(如燃烧和生物方法), 将废气氧化分解为无毒或低毒物质
无组织排放	1) 对于控制设备和管道部件的无组织排放, 采用更新设备的方式, 例如使用双轴密封(或无轴密封)设备组件, 并加强对无组织排放组件的筛选、测试和维护; 2) 对于挥发性有机液体的储运过程, 要优化设备操作流程(如在液体顶端使用罐体密封)和污染控制系统(如安装蒸汽收集系统并将其排放到废水处理厂或蒸汽平衡系统中)
其他排放	1) 实现气田内气井和采出井产物的收集、处理和运输过程的全密闭; 2) 将天然气净化处理厂安全阀放出的易燃有毒气体密闭输送到火焰系统中进行统一处理; 3) 提取油气田释放的天然气, 并对可以燃烧但不能回收或难以使用的气体, 按照生产安全要求进行燃烧后释放, 对未燃烧直接排放的, 应该通知生态环境主管部门登记; 4) 对于伴生气体和套管气量, 通过压缩天然气和发电等方式回收

表 5 协同管控治理成本效益法

Table 5 Cost-benefit method of coordinated control

定义	原理	优点	缺点
单一污染物成本效益法	所有减排成本分配给 1 种污染物	容易实施监测且管理成本较低; 可与其他措施相结合	无法考虑不同污染物的综合影响
多污染物成本效益法	控制成本按污染物比例均分	提高控制效率和经济效益; 实现资源的有效利用; 减少管理的复杂性	技术投资高, 需协调多个部门和机构的合作与利益

及投资费用的研究较多, 而关于 CH₄ 的研究相对较少, 因此需借鉴发达国家 CH₄ 的减排经验。表 8 简要列举了 US EPA 石油天然气行业天然气之星计划

表 6 VOCs 处理技术评估对比^[45-48]

Table 6 VOCs treatment technologies evaluation and comparison

处理技术	技术成熟度	优点	缺点	适用范围
等离子体法	较高	低能源消耗, 易于安装, 占地面积小	难以完全去除某些有机物, 容易导致二次污染	高浓度稳定的无氯有机废气
吸附法	高	可以有效处理几乎所有的有机物, 投资成本适中, 且能够实现高效去除 VOCs	一次性吸附操作成本高, 使吸附剂必须作为固体废物单独处理	稳定且具有平均沸点的中低浓度有机废气
吸收法	高	在水中溶解度好, 投资成本低, 耐冲击, 运行成本低, 易于维护和控制在, 安全性好	净化效率中等, 不能提纯水溶性差的物质, 容易氧化, 易与酸碱反应	低至中浓度的有机废气
直接燃烧法或蓄热式催化燃烧(RTO)法	中	清洁效率高, 可处理对象范围广	运行成本高	无氯有机废气

表 7 VOCs 处理技术相关经济指标^[49-53]

Table 7 Related economic indicators of VOCs treatment technologies

处理技术	设备名称	风量/ (m ³ /h)	经济指标/万元	
			投入资金	运行资金
等离子体法	低温等离子体反应器	28 000	150	50
		20 000	34	25
吸附法	吸附罐	4 000	20	37
	吸附塔	10 000	31.1	31
吸收法	吸附器+再生器	1 000	6	2
	碱性吸收塔	20 000	20	10
	碱性吸收塔+尾气塔	20 000	10	8
	吸收塔	37 000	20	12
直接燃烧法	燃烧炉	15 000	15	10
		20 000	200	320
蓄热式催化燃烧(RTO)法	RTO	30 000	560	240

中对减少 CH₄ 排放的推荐措施、资金成本、预计回报时间、适用环节的最新评估。

由表 8 可知, 减少压缩机/发动机启动次数是减少 CH₄ 排放最经济的措施; 减少脱水机 CH₄ 排放, 应该减少不必要的设备系统; 加强定期检查和维护是防止设备泄漏造成 CH₄ 排放最经济的方式; 对于管道减少 CH₄ 排放来说, 使用惰性气体和清扫器进行吹扫最为经济有效。

表 8 US EPA 天然气之星计划减少 CH₄ 排放的推荐措施^[54-57]

Table 8 Recommended technologies for the US EPA Gas Star Program to reduce methane emissions

释放源	措施	资金成本/美元	预计回报时间/a	适用环节
压缩机/发动机	安装湿式密封油脱气回收系统	33 000(1台压缩机), 90 000(4台压缩机)	0~1	生产、采集加工、传播、分配
	用空气或者氮气代替气体启动机	<1 000	0~1	生产、采集加工、传播
	减少压缩机和发动机启动及点火次数	<1 000	0~1	生产、采集加工、传播、分配
	安装电动机起动机	1 000~10 000	1~3	生产、采集加工、传播
	将排污气体注入低压电源或燃气系统	1 000~10 000	1~3	传播、分配
脱水机	用甲醇注射液取代乙二醇脱水装置	1 000~10 000	0~1	生产、采集加工、传播
	减少不必要的设备系统	1 000~10 000	0~1	生产、采集加工、传播、分配
	将气动装置转换为机械控制装置	1 000~10 000	1~3	生产、采集加工、传播、分配
设备泄漏	在远程站点进行定向检查和维护	<1 000	0~1	传播、分配
	对闸门站和地面设施进行定期检查和维护	1 000~10 000	0~1	传播、分配
	对压缩机进行定向检查和维护	10 000~50 000	0~1	传播、分配
	对气体加工厂和增压站进行定向检查和维护	10 000~50 000	1~3	采集加工
管道	采用无泄漏管道的复合包装	1 000~10 000	0~1	传播、分配
	在管道更换期间执行阀门泄漏修复	1 000~10 000	0~1	传播、分配
	使用惰性气体和清扫器进行管道吹扫	0	1~3	生产、采集加工、传播、分配

4 结论与展望

通过分析石油天然气开采过程中 VOCs 与 CH₄ 的释放途径, 得出二者的释放源具有同根同源性, 可对其进行协同管控, 实现减污降碳。以 US EPA 现有的管控技术标准 and 路径结合新型网络控制等监测技术, 由点至面建立了全区域协同管控的流程框架, 从空间、排放量、环境风险、资源利用 4 个维度实时监测与评估, 并对所建立的全流程协同管控路径进行调整与优化。通过分析和整理国内外石油天然气行业 VOCs 与 CH₄ 的协同管控策略以及成本效益核算, 得出在成本效益核算中监测与评估部分的影响量最大, 因此选取这部分进行成本效益分析。根据美国一项成本效益研究显示, 陆上石油天然气开采过程中对 VOCs 与 CH₄ 进行协同管控最经济有效的方式是多污染物成本效益管控。建议未来从以下几个方面深入开展石油天然气行业减污降碳研究。

(1) 在我国石油天然气开采过程中进行 VOCs 与 CH₄ 逸散监测调查, 定期开展全站监测, 确定重点释放源, 并重新核定排放因子。

(2) 开发适合于我国石油天然气实际开采的 VOCs 与 CH₄ 排放清单的核算方法, 完善法律法规, 开展全自动监测, 有针对性地建立排放清单, 统筹管理。

(3) 在减少 VOCs 与 CH₄ 排放的同时, 也需要重视二者的回收再利用。从技术管理方面来看, 要提

高 VOCs 协调控制技术, 全方位提升在石油天然气开采行业中 CH₄ 排放管控水平。

参考文献

- [1] 张楠, 吕连宏, 王斯一, 等. 基于文献计量分析的碳中和研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(2): 464-472.
ZHANG N, LÜ L H, WANG S Y, et al. Analysis of research progress in carbon neutrality based on bibliometrics [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 464-472.
- [2] 姜晓群, 王力, 周泽宇, 等. 关于温室气体控制与大气污染物减排协同效应研究的建议 [J]. 环境保护, 2019, 47(19): 31-35.
JIANG X Q, WANG L, ZHOU Z Y, et al. Suggestions on Co-benefits between GHG emission control and air pollutant reduction [J]. Environmental Protection, 2019, 47(19): 31-35.
- [3] 谭琦璐, 温宗国, 杨宏伟. 控制温室气体和大气污染物的协同效应研究评述及建议 [J]. 环境保护, 2018, 46(24): 51-57.
TAN Q L, WEN Z G, YANG H W. Review and recommendations on the Co-benefit effects of controlling greenhouse gases and atmospheric pollutants [J]. Environmental Protection, 2018, 46(24): 51-57.
- [4] 宋丽容. “双碳”目标下消耗臭氧层物质与温室气体协同管控的法治路径 [J]. 江苏大学学报(社会科学版), 2022, 24(4): 80-91.
SONG L R. On the legal path for coordinated control of ozone depleting substances and greenhouse gases under the goals of "carbon peaking and carbon neutrality" [J]. Journal of Jiangsu University (Social Sciences Edition), 2022, 24(4): 80-91.
- [5] 刘海艳, 于会彬, 王志刚. 粤港澳大湾区温室气体和大气污染物协同控制现状分析 [J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(2): 455-463.
LIU H Y, YU H B, WANG Z G. Analysis of the present situation

- of greenhouse gases and air pollutants co-control in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(2): 455-463.
- [6] 赵玉杰, 王伟. 垃圾填埋场甲烷气的排放及减排措施[J]. *环境卫生工程*, 2004, 12(4): 217-219.
ZHAO Y J, WANG W. Emission of methane from landfill site and its mitigation measures[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2004, 12(4): 217-219.
- [7] 刘峰. 石油天然气开采行业挥发性有机物排放控制技术概述[J]. *石油化工安全环保技术*, 2018, 34(1): 57-60.
LIU F. Overview of emission control technology of volatile organic compounds in oil and gas exploitation industry[J]. *Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology*, 2018, 34(1): 57-60.
- [8] 梁林佐, 马滢, 毋勇, 等. 陆上石油天然气开采中 VOCs 与 CH₄ 的协同控制[J]. *油气田环境保护*, 2022, 32(2): 1-6.
LIANG L Z, MA Y, WU Y, et al. Co-control of VOCs and CH₄ on air pollutants for onshore oil and gas exploitation and production industry[J]. *Environmental Protection of Oil & Gas Fields*, 2022, 32(2): 1-6.
- [9] 杨罕玲, 赵一炜. 美国油气行业国家温室气体清单和报送体系[J]. *油气田环境保护*, 2022, 32(1): 1-8.
YANG H L, ZHAO Y W. National greenhouse gas inventory and reporting system for U. S. oil and gas industry[J]. *Environmental Protection of Oil & Gas Fields*, 2022, 32(1): 1-8.
- [10] 宋磊, 翁艺斌. 中国油气行业甲烷排放管控政策研究[J]. *世界石油工业*, 2021, 28(2): 25-30.
- [11] 李向阳, 高飞, 廖健, 等. 油气田 VOCs 排放管控途径探索与实践[J]. *油气田环境保护*, 2022, 32(6): 68-71.
LI X Y, GAO F, LIAO J, et al. Exploration and practice of VOCs emission control approaches for oil and gas field development enterprises under the low carbon background[J]. *Environmental Protection of Oil & Gas Fields*, 2022, 32(6): 68-71.
- [12] 崔伟, 谷梅霞, 赵凤杰, 等. 油田站场 VOCs 排放量核算及减排措施建议[J]. *安全、健康和环境*, 2022, 22(9): 17-22.
CUI W, GU M X, ZHAO F J, et al. Calculation of volatile organic compound emissions and suggestions on emission reduction measures for oil fields[J]. *Safety Health & Environment*, 2022, 22(9): 17-22.
- [13] 王鹏. 石化企业挥发性有机物排放源及排放量估算探讨[J]. *石油化工安全环保技术*, 2013, 29(1): 59-62.
WANG P. Discussion on emission sources and emission estimation of volatile organic compounds in petrochemical enterprises[J]. *Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology*, 2013, 29(1): 59-62.
- [14] 江梅, 张国宁, 魏玉霞, 等. 工业挥发性有机物排放控制的有效途径研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(12): 3487-3490.
JIANG M, ZHANG G N, WEI Y X, et al. Emission control way of volatile organic compounds in industry[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2011, 32(12): 3487-3490.
- [15] 王教凯. 油气处理厂 VOCs 排放特征及综合管控对策研究[J]. *石油石化绿色低碳*, 2020, 5(6): 40-44.
WANG J K. Analysis on VOCs emission and control in oil & gas processing plant[J]. *Energy Conservation and Emission Reduction in Petroleum and Petrochemical Industry*, 2020, 5(6): 40-44.
- [16] 国务院. 大气污染防治行动计 [A/OL]. [2022-02-07]. http://www.gov.cn/zw/gk/2013-09/12/content_2486773.htm
- [17] 生态环境部. 2020 年挥发性有机物治理攻坚方案 [A/OL]. [2022-02-07]. http://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/202006/t20200624_785827.html
- [18] 栾志强, 王喜芹, 郝郑平, 等. 有机废气治理行业 2017 年发展综述[J]. *中国环保产业*, 2018(6): 13-24.
LUAN Z Q, WANG X Q, HAO Z P, et al. Development report on organic waste-gas treatment industry in 2017[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2018(6): 13-24.
- [19] 第十三届全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国大气污染防治法 [A/OL]. (2018-11-13)[2022-02-07]. https://www.mee.gov.cn/yw/gz/fgbz/fl/201811/t20181113_673567.shtml.
- [20] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 陆上石油天然气开采工业大气污染物排放标准: GB 39728—2020[S/OL]. [2023-06-07]. <https://www.mee.gov.cn/yw/gz/fgbz/bz/bzwb/dqjh/bh/dqgdwr/ywrwptbz/202012/W020201225551948738018.pdf>.
- [21] US EPA. Standards of performance for equipment leaks of VOC from onshore natural gas processing plants for which construction[S/OL]. (2012-08-16)[2022-02-07]. <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?node=sp40.7.60.kkk>.
- [22] US EPA. Priority list and additions to the list of categories of stationary sources[A/OL]. (1979-08-21)[2022-02-07]. <https://www.loc.gov/item/fr044163/>.
- [23] US EPA. Actions to reduce methane and VOC emissions from the oil and natural gas industry: final rules and draft information collection request[A/OL]. (2016-05-01)[2022-02-07]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/documents/epa-oilandgasactionsmay2016_presentation.pdf.
- [24] US EPA. Table of covered sources, 2012, 2016 and proposed for 2021[A/OL]. [2022-02-07]. <https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-11/table-of-covered-sources-2012-2021.pdf>.
- [25] US EPA. Standards of performance for new, reconstructed, and modified sources and emissions guidelines for existing sources: oil and natural gas sector climate review[S/OL]. (2021-11-15)[2022-02-07]. <https://www.federalregister.gov/documents/2021/11/15/2021-24202/standards-of-performance-new-reconstructed-and-modified-sources-and-emissions-guidelines-for>.
- [26] 郑逸璇, 宋晓晖, 周佳, 等. 减污降碳协同增效的关键路径与政策研究[J]. *中国环境管理*, 2021, 13(5): 45-51.
ZHENG Y X, SONG X H, ZHOU J, et al. Synergetic control of environmental pollution and carbon emissions: pathway and policy[J]. *Environmental Conformity Assessment*, 2021, 13(5): 45-51.
- [27] 姜华, 高健, 阳平坚. 推动减污降碳协同增效建设人与自然和谐共生的美丽中国[J]. *环境保护*, 2021, 49(16): 17-19.
JIANG H, GAO J, YANG P J. Promote co-control of air pollutants and GHGs to build a beautiful China with harmonious coexistence between human and nature[J]. *Environmental Protection*, 2021, 49(16): 17-19.
- [28] 于雷, 牛勃, 薛强, 等. “三线一单”减污降碳协同管控的基本思路与建议[J]. *环境影响评价*, 2022, 44(2): 28-33.
YU L, NIU R, XUE Q, et al. Fundamental considerations and suggestions of synergetic control of the "three lines one permit" and pollution and carbon reduction[J]. *Environmental Impact Assessment*, 2022, 44(2): 28-33.
- [29] 刘兆香, 王树堂, 王京, 等. 美国大气环境多污染物协同控制的经验与启示[J]. *环境保护科学*, 2020, 46(1): 53-59.

- LIU Z X, WANG S T, WANG J, et al. Experience and inspiration of the cooperative control of multiple pollutants in the atmospheric environment in United States[J]. *Environmental Protection Science*, 2020, 46(1): 53-59.
- [30] 孙彩萍, 孙启宏, 王维, 等. 固定源大气污染物监管技术框架及应用研究[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(6): 741-747.
- SUN C P, SUN Q H, WANG W, et al. Technical framework and application of site-inspection and enforcement for air pollutants from stationary sources[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(6): 741-747.
- [31] 张博, 李蕙竹, 仲冰, 等. 中国甲烷控排面临的形势、问题与对策[J]. *中国矿业*, 2022, 31(2): 1-10.
- ZHANG B, LI H Z, ZHONG B, et al. The situation, problems and countermeasures for the controls of China's methane emissions[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(2): 1-10.
- [32] 薛明, 卢明霞, 张晓飞, 等. 碳达峰、碳中和目标下油气行业绿色低碳发展建议[J]. *环境保护*, 2021, 49(17): 30-32.
- XUE M, LU M X, ZHANG X F, et al. Suggestions for green and low-carbon development of oil and gas industry under the targets of carbon peak and carbon neutrality[J]. *Environmental Protection*, 2021, 49(17): 30-32.
- [33] 汤玉平, 顾磊, 许科伟, 等. 油气微生物勘探机理及应用[J]. *微生物学通报*, 2016, 43(11): 2386-2395.
- TANG Y P, GU L, XU K W, et al. Research and application of microbial exploration for oil and gas[J]. *Microbiology China*, 2016, 43(11): 2386-2395.
- [34] 何少林, 陈辉, 于景琦, 等. 油气田挥发性有机物管控源项及排放系数研究[J]. *油气田环境保护*, 2020, 30(1): 24-27.
- HE S L, CHEN H, YU J Q, et al. Study on source term and emission coefficient of volatile organic compounds in oil and gas fields[J]. *Environmental Protection of Oil & Gas Fields*, 2020, 30(1): 24-27.
- [35] 刘广哲. 石化企业 VOCs 管理与控制措施研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2018.
- [36] 崔翔宇, 刘光全, 薛明, 等. “碳中和”目标下我国油气行业甲烷管控的挑战与应对[J]. *油气与新能源*, 2021(2): 43-45.
- CUI X Y, LIU G Q, XUE M, et al. "Carbon Neutrality" targeted regulation of methane in petroleum industry[J]. *Petroleum Planning & Engineering*, 2021(2): 43-45.
- [37] 张岑, 李伟. 欧美甲烷减排战略与油气行业减排行动分析[J]. *国际石油经济*, 2021, 29(12): 16-23.
- ZHANG C, LI W. Analysis of methane emission reduction strategies in Europe and America and actions of oil and gas industry[J]. *International Petroleum Economics*, 2021, 29(12): 16-23.
- [38] HUANG R J, ZHANG Y L, BOZZETTI C, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 2014, 514(7521): 218-222.
- [39] 孟凡伟, 周学双, 童莉, 等. 油气田开发挥发性有机物排放来源及控制措施[J]. *油气田环境保护*, 2015, 25(3): 32-34.
- MENG F W, ZHOU X S, TONG L, et al. Study on the emission and control measures of volatile organic compounds from oil and gas field industry[J]. *Environmental Protection of Oil & Gas Fields*, 2015, 25(3): 32-34.
- [40] 丁德武, 贾润中, 高少华, 等. LDAR 技术在石化企业应用中常见问题解析[J]. *安全、健康和环境*, 2016, 16(11): 39-42.
- DING D W, JIA R Z, GAO S H, et al. Analysis of problems on LDAR technology application in petrochemical enterprises[J]. *Safety Health & Environment*, 2016, 16(11): 39-42.
- [41] 刘峰. LDAR 技术在 VOCs 综合治理中的应用[J]. *安全、健康和环境*, 2017, 17(12): 1-4.
- LIU F. The application of LDAR technology in the comprehensive management of VOCs[J]. *Safety Health & Environment*, 2017, 17(12): 1-4.
- [42] 国内外甲烷排放控制行动与趋势: 2021 中国甲烷论坛背景报告 [EB/OL]. (2021-03-29)[2022-02-07]. www.cet.net.cn/uploads/soft/202103/1_29104647.pdf.
- [43] 李建伟, 刘新宇, 修光利. VOCs 无组织排放估算方法和控制标准初探[J]. *化学世界*, 2010, 51(10): 632-634.
- LI J W, LIU X Y, XIU G L. Estimation models and control standard for fugitive emission of volatile organic compounds[J]. *Chemical World*, 2010, 51(10): 632-634.
- [44] US EPA. Actions to reduce methane and VOCs emissions from the oil and natural gas industry: final rules and draft information collection request[EB/OL]. (2016-05-01)[2022-02-07]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/documents/epa-oil-and-gas-actions-may-2016-presentation.pdf>.
- [45] 刘思佳, 汪鹏, 王学海, 等. 石化行业小分子烃类吸附分离研究进展[J]. *广东化工*, 2022, 49(19): 102-104.
- [46] 中国环保产业协会. 2022 年 VOCs 减排控制行业发展评述和展望 [EB/OL]. [2023-01-05]. <https://huanbao.bjx.com.cn/topics/vocszljs/>.
- [47] 赫洁. 大气污染区域联防联控中 VOCs 的控制研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- [48] 孙先武, 汤崢玉. 化工企业 VOCs 治理现状及发展前景[J]. *安徽化工*, 2021, 47(3): 4-10.
- [49] 王妍. 基于可变模糊优选模型的工业 VOCs 处理方案技术经济性评价[J]. *化工管理*, 2022(16): 66-69.
- WANG Y. Technical and economic evaluation of industrial VOCs treatment based on variable fuzzy optimization mode[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2022(16): 66-69.
- [50] 刘剑文. 生物法净化处理工业废气的研究进展[J]. *建材与装饰*, 2016(15): 129-130.
- [51] 21 省市 VOCs 排污费标准汇总 [EB/OL]. (2017-11-28)[2023-01-05]. <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20171128/864291.shtml>.
- [52] 武宁. 河南省典型行业 VOCs 排放控制技术体系与成本-效益研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [53] 李文娟, 董事壁, 滕富华, 等. 化工园区企业 VOCs 排放治理技术的评价分析[J]. *化工设计通讯*, 2017, 43(9): 197-199.
- [54] US EPA. 全球甲烷减排在行动, 美国篇之甲烷排放费简析 [EB/OL]. (2022-01-07)[2023-01-07]. https://www.ideacarbon.org/news_free/56680/?pc=pc#:~:text=.
- [55] US EPA. Natural gas star program, contact us recommended technologies to reduce methane emissions[EB/OL]. (2022-05-18)[2023-01-07]. <https://www.epa.gov/natural-gas-star-program/recommended-technologies-reduce-methane-emissions>.
- [56] IEA. Methane Tracker 2021[R/OL]. [2023-01-07]. <https://www.iea.org/reports/methane-tracker-2021>.
- [57] IEA. Curtailing methane emissions from fossil fuel operations[R/OL]. [2023-01-07]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/585b901a-e7d2-4bca-b477-e1baa14dde5c/CurtailingMethaneEmissionsfromFossilFuelOperations.pdf>. □