

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立 40 周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战	王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)
河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险	王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)
海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展	袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)
环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测	李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)
环境水体中无机砷现场分析方法研究进展	薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)
海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展	黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展	骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)
水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制	王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876)
中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物	史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)
中国油气系统甲烷逸散排放估算	陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)
2015 ~ 2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征	李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)
九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征	程宏, 陈荣 (4924)
厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征	姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)
九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制	戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)
福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制	杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)
厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制	潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)
改性生物炭固定床对模拟湖水体中 Mn^{2+} 的吸附	赵洁, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)
基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测	徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)
紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯	徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 譙杨 (4992)

研究报告

2019 年秋季海南省 4 次臭氧污染过程特征及潜在源区分析	符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)
伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制	陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)
城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性	齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)
南京北郊 BTESX 特征及健康风险评估	冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)
我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估	孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奔, 马长文, 叶建锋 (5040)
东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析	陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)
长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析	刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)
青藏高原湖泊水环境特征及水质评价	刘智琦, 潘保柱, 韩谔, 李刚, 王韬轶 (5073)
基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素	查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)
丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系	贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)
铜沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能	王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)
基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群	章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)
寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析	杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)
中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析	田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾立新 (5131)
硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析	刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)
不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响	邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 张广林 (5149)
不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N_2O 排放的影响	唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)
基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征	刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)
基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析	高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)
基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析	张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)
老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 Cd^{2+} 的影响	王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)
磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响	芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)
牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响	赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)
磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和锌镉累积的影响	帅祖华, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)
重庆开州区农地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估	方林发, 叶萃萃, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)
基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应	侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)
黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征	许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263)
土壤多功能性对微生物多样性降低的响应	陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)
氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响	苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)
碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比	李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)
中国能源消费碳排放的空间化与时空动态	郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波 (5305)
京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO_2 协同减排效益评估	杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束轲 (5315)
我国塑料污染防治政策分析与建议	李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)

中国油气系统甲烷逸散排放估算

陈春赐^{1,2}, 吕永龙^{1,3*}, 贺桂珍^{1,2}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 厦门大学环境与生态学院, 近海海洋环境科学国家重点实验室, 滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 厦门 361102)

摘要: 为实现碳达峰碳中和目标, 中国正致力于推动能源低碳化转型, 这促进能源由煤炭向油气资源的转变. 因此, 中国石油和天然气系统(油气系统)的甲烷(CH_4)排放日益受到关注. 逸散排放包括设备泄漏、排空和火炬燃烧, 涉及油气资源的开发、生产、运输、储存和分配等过程. 但目前油气系统 CH_4 逸散排放缺乏统一的核算方法, 逸散排放量亦未被纳入国家温室气体清单统计之中. 基于相关方法, 评估了 1980~2020 年中国油气系统的 CH_4 逸散排放. 结果表明, 油气系统的 CH_4 逸散排放随着油气资源的生产和消费增长而快速增加, 由 1980 年不足 60 万 t 增长至 2020 年的超过 260 万 t. 石油系统和天然气系统在 2020 年的 CH_4 逸散排放分别达到约 60 万 t 和 200 万 t, 是 1980 年的 1.38 倍和 16.6 倍. 油气系统的 CH_4 逸散主要源于天然气生产、石油生产、天然气分配、天然气运输和储存, 分别占总排放的 41%、20%、18% 和 13%. 天然气管道是主要的逸散设施. 相比于常规油气资源开发, 非常规油气资源开发的排放强度更高. 研究完善了 CH_4 逸散排放清单, 可为 CH_4 减排提供重要科学数据支持.

关键词: 甲烷排放; 逸散排放; 油气系统; 气候变化; 甲烷排放清单

中图分类号: X16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)11-4905-09 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202204176

Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China

CHEN Chun-ci^{1,2}, LÜ Yong-long^{1,3*}, HE Gui-zhen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Key Laboratory of the Ministry of Education for Coast and Wetland Ecosystems, College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: To achieve its carbon peaking and carbon neutrality objectives, China is committed to promoting a decarbonized energy transition, which has strengthened the shift from coal to oil and gas resources. As a result, methane (CH_4) fugitive emissions from China's oil and gas systems are of increasing concern. Fugitive emissions include equipment leaks, venting, and flaring and involve exploration, production, transportation, storage, and distribution of oil and gas resources. However, there is no uniform accounting method for methane fugitive emissions from oil and gas systems, and fugitive emissions have not been included in the national greenhouse gas inventory statistics. Using the relevant methods, methane fugitive emissions from China's oil and gas systems were estimated for the period from 1980-2020. The results showed that CH_4 fugitive emissions from oil and gas systems increased rapidly with the growth of production and consumption of oil and gas resources, from less than 0.6 million tons in 1980 to more than 2.6 million tons in 2020. CH_4 fugitive emissions from oil and gas systems reached approximately 0.6 million tons and 2.0 million tons, which were 1.38 and 16.6 times larger than those in 1980, respectively. Fugitive emissions from oil and gas systems originated primarily from gas production, oil production, gas transportation, and storage, accounting for 41%, 20%, 18%, and 13% of total emissions, respectively. Gas pipelines were the main fugitive facilities. The emission intensity of unconventional oil and gas resource exploration was higher compared to conventional resource exploration. This study improved the CH_4 fugitive emission inventory, which could provide solid scientific data for CH_4 reduction.

Key words: methane emissions; fugitive emissions; oil and gas system; climate change; methane emission inventory

甲烷(CH_4)是工业化时代以来造成全球气候变化的第二大温室气体,对全球温室效应的贡献为 25%^[1]. 与二氧化碳(CO_2)相比, CH_4 的寿命更短(只有 12 a),但其 100 a 的全球变暖潜能值(global warming potential, GWP)是 CO_2 的 28 倍^[2]. 目前,大气中约三分之一的 CH_4 来自于能源部门的逸散排放,达到 1.0~1.8 亿 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[3,4]. 逸散排放通常被描述为未经监测的、无意的或不受控制的气体释放到大气中^[5]. 据世界能源署(IEA)估计,2019 年全球油气系统共排放了 0.82 亿 t CH_4 (约合 20.5 亿 t CO_2),造成的经济损失达 340 亿美元. 因此,将 CH_4 排放作为一项气候政策控制目标能够在短期内极大促进温室气体下降,并在长期内为应对全球气候变

化和人类健康带来好处^[6~9].

油气系统的 CH_4 逸散主要源于生产、加工、运输和分配过程中的泄漏、排空和燃烧,不同油气设施的排放差异较大^[10],而且排放量随着不同的技术处理、时间变化和活动类型而发生很大变化^[11~14],即使是现场测量,得出的数据也可能因测量工具的不同而产生差异^[15~18]. 由于油气资源开发技术在过去 10 a 发生了重大变革,页岩气、煤层气和致密油

收稿日期: 2022-04-14; 修订日期: 2022-07-22

基金项目: 国家自然科学基金重点国际合作项目(71761147001); 中国科学院国际大科学计划培育项目(121311KYSB20190029)

作者简介: 陈春赐(1992~),男,博士研究生,主要研究方向为气候变化与政策分析, E-mail: 519480718@qq.com

* 通信作者, E-mail: yllu@rcees.ac.cn

等非常规油气资源的开发增加了 CH_4 核算的困难性. 因此, CH_4 逸散排放结果不确定性也较大. 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 提供 3 种方法^[17]. 方法 1: 采用全球平均的逸散排放因子, 并使用适用于国家或地区的部门能源活动数据进行核算, 这将导致一个数量级以上的差异. 方法 2: 采用特定国家的排放因子, 而非缺省值开展核算. 方法 3: 基于自下而上的数据进行核算, 这些数据来自于生产设施和装备的监测. 此外, 许多研究基于油气设施监测和测量方法开展核算, 特别是在美国和加拿大^[19~27], 结果对清单核算的结果提出了质疑, 多数研究认为排放清单低估了油气系统的 CH_4 排放^[28~31]. 例如 Alvarez 等^[29]的研究发现 2015 年美国油气系统 CH_4 逸散排放为 1 300 万 t, 比环境保护局的清单估计值高出 60%. Balcombe 等^[31]的研究指出天然气系统存在着“超级排放者”. Tyner 等^[32]的研究结果是加拿大清单估计值的 1.6 ~ 2.2 倍. 由于缺乏数据, 中国的核算通常基于方法 1 和方法 2 进行, 基于场地监测的研究较少. 例如 Zhang 等^[33]、Peng 等^[34]和 Schwietzke 等^[35]的研究采用了 IPCC 的排放因子进行, Chen 等^[36]的评估基于场地数据监测, 而 Höglund-Isaksson 等^[37]的研究基于物料平衡法开展, 中国国家温室气体清单基于方法 3 编制. 由于不同研究采用的方法和排放因子不同, 各研究结果存在差异^[38]. 尽管中国油气系统 CH_4 逸散研究已取得一定进展, 但相关研究主要采用陈旧的排放因子, 在时间尺度上缺乏涵盖 2015 年以来的年份.

在全球气候变化的背景下, 中国的碳排放问题受到了国际社会的广泛关注, 相比之下, 油气系统 CH_4 逸散排放引起的关注较少. 中国的油气生产和消费在近年来有了极大提升, 特别是 2017 年中国实施了“煤改气”政策, 使天然气产量在过去 5 a 增加了 43%. 因此, 中国油气系统 CH_4 排放总量估算对确定油气生产和消费产生的隐藏排放具有重要作用. 基于此, 本研究建立时间序列的排放因子, 采用 IPCC 方法 2 来评估 1980 ~ 2020 年间油气系统 CH_4 逸散, 并探讨了影响结果差异的因素.

1 材料与方法

1.1 研究方法

为了完善国家温室气体清单编制, 提升清单的准确性和合理性, IPCC 于 2019 年更新了油气系统 CH_4 逸散源和排放因子, 方法 2 的核算为各逸散过程的能源活动水平乘以其排放因子之和^[17], 公式为:

$$E_{\text{fugitive emission}} = A_{\text{industrial activity}} \times EF_{\text{fugitive emissions}} \quad (1)$$

$$E_{\text{total emissions}} = \sum E_{\text{fugitive emission}} \quad (2)$$

式中, $E_{\text{fugitive emission}}$ 为油气系统 CH_4 逸散排放; $EF_{\text{fugitive emission}}$ 为排放因子; $A_{\text{industrial activity}}$ 为油气资源开采、加工、运输和分配的活动水平; $E_{\text{total emissions}}$ 为油气系统所有过程的排放.

1.2 能源活动数据和来源

石油系统逸散过程包括常规和非常规石油勘探开发、陆地和海上石油生产、石油运输 (管道、铁路和油轮)、石油精炼和加工. 天然气系统逸散过程包括常规和非常规天然气勘探开发、天然气生产 (生产、集输和煤层气)、天然气加工、天然气运输、储存和天然气分配. 油气系统的能源活动水平数据包括基础设施数量、产量或吞吐量 (表 1), 数据源于文献 [39, 40]. 数据收集的时间范围为 1980 ~ 2020 年, 尚缺中国港澳台统计数据. 除非特别说明, 核算的结果以 $10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 表示.

1.3 逸散排放因子

IPCC 在文献 [17] 中更新了油气系统 CH_4 逸散过程, 几乎所有排放因子都得到修改, 核算清单完整性更加全面, 基于技术类型提供了排放因子, 能够更符合实际情况, 例如石油运输分为管道和铁路等方式. 本研究基于 IPCC 提供的排放因子, 假设 1980 ~ 2000 年和 2000 ~ 2020 年中国的减缓措施使排放因子每年降低 0.5% 和 1%, 这一假设与美国环保署 (USEPA) 评估全球非二氧化碳排放中对新兴经济体的减排假设接近^[41]. 采用的排放因子见表 1, 对于天然气系统中管道集输、运输和分配过程的排放, 本研究采用基于管道长度的排放因子 (表 1), 因为这最能反映管道的逸散排放, 也是较其他研究更为完善的地方. Chen 等^[36]基于场地监测的数据认为 IPCC 没有充分考虑中国油气实际生产情况 (生产方式和技术进步等), IPCC 高估了开发过程的逸散因子. 因此, 本研究基于低排放情景 (有回收或火炬燃烧) 核算非常规石油开发的 CH_4 排放.

2 结果与讨论

2.1 石油系统 CH_4 逸散排放

2.1.1 石油开发和生产排放

石油开发分为陆地和海上开发, 开发的石油类型分为常规石油和非常规石油, 海上开发活动产生的排放忽略不计, 而且勘探过程的排放因子不可获得^[17]. 因此, 石油开发排放包括陆地常规石油和非常规石油的排放. 由于开发技术和减排措施不同, 非常规石油开发的逸散因子的范围更大^[38]. 中国石油开发在过去 40 a 有了长足发展, 产量由 1 亿 t 增长

表 1 油气系统 CH₄ 逸散过程和排放因子

Table 1 Methane fugitive processes and emission factors of oil and natural gas systems			
油气系统	逸散过程	能源活动水平	排放因子(以 CH ₄ 计)
石油系统	石油开发	常规石油开发;常规原油产量	0.02 kg·m ⁻³
		非常规石油开发;非常规原油产量	0.06 ^a 和 1.64 ^b kg·m ⁻³
	石油生产	陆地生产;陆地原油产量	2.91(1980 年)~2.38 ^c (2020 年) kg·m ⁻³
		海上生产;海上原油产量	2.46 kg·m ⁻³
	石油运输	油轮;油轮运输量 铁路;铁路运输量 管道;管道运输量	0.040 kg·m ⁻³ 0.025 kg·m ⁻³ 0.005 4 kg·m ⁻³
	石油加工	石油加工;石油加工吞吐量	0.03 kg·m ⁻³
天然气系统	天然气开发	常规天然气开发;常规天然气产量	0.14(1980 年)~0.06(2020 年) g·m ⁻³
		非常规天然气开发;非常规天然气产量	0.08 ^d 和 2.52 ^e g·m ⁻³
	天然气生产	天然气生产;天然气生产量	3.12(1980 年)~2.54(2020 年) g·m ⁻³
		煤层气;煤层气产量	1.95 g·m ⁻³
		集输;天然气生产量	3.93(1980 年)~3.20(2020 年) g·m ⁻³
	天然气加工	天然气加工;天然气加工吞吐量	0.75(2020)~0.92(1980) g·m ⁻³
	天然气运输和储存	天然气运输;运输管道长度	2.55(1980 年)~2.08(2020 年) t·km ⁻¹
		天然气储存;天然气消费量 液化天然气进出口;接收站数量	0.67(1980 年)~0.29(2020 年) g·m ⁻³ 1 660 ^f t·station ⁻¹
	天然气分配	城镇天然气分配;管道长度	0.58 t·km ⁻¹
		短期储存;天然气消费量	0.003 g·m ⁻³

1) a 和 b 分别为含火炬燃烧和回收和不含火炬燃烧和回收情形下排放因子, c 为来源于 EDGAR5.0, d 和 e 分别为含火炬燃烧和气体捕集和不
含火炬燃烧和气体捕集, f 为液化天然气接收站(Station)数量的排放因子

至 2.15 亿 t. 随着石油开发活动规模的扩大, CH₄ 排放量也在逐年上升. 常规石油开发的 CH₄ 排放由 1980 年的约 0.3 万 t·a⁻¹ 增长至 2020 年的 0.45 万 t·a⁻¹. 非常规石油开发的 CH₄ 排放 2020 年为 0.14 万 t·a⁻¹.

石油生产分为陆地和海洋石油生产, 2020 年海上石油生产约占总产量的 28%. 石油生产是石油系统主要的逸散源, CH₄ 排放量由 1980 年的 42.85 万 t·a⁻¹ 增长至 2015 年的 61.05 万 t·a⁻¹, 随后下降至 2020 年的 54.35 万 t·a⁻¹ (图 1). 其中, 2020 年陆地和海上石油生产 CH₄ 排放分别达到 38.71 万 t·a⁻¹ 和 15.64 万 t·a⁻¹, 而且海上石油生产活动产生的

CH₄ 排在逐步增长. Zang 等^[42] 调查发现, 渤海海上油气生产平台 CH₄ 排放量 (2.6 ± 1.7) 万 t·a⁻¹ (占 2012 年油气系统逸散的 2.3%), 这也是造成开采平台附近大气 CH₄ 背景值升高的主要原因. Höglund-Isaksson 等^[37] 的研究, 排放因子是所有研究中最高的 (5.70 ~ 7.62 kg·m⁻³, 以 CH₄ 计, 下同), 认为 2012 年中国石油系统的 CH₄ 排放接近 140 万 t. Zhang 等^[33] 认为石油生产的排放因子为 1.18 kg·m⁻³. 总体而言, 石油生产过程排放因子差别较大, 因此不同的研究之间核算的结果差异显著.

2.1.2 石油运输和精炼排放

石油运输包括铁路、管道和油轮运输. 本研究

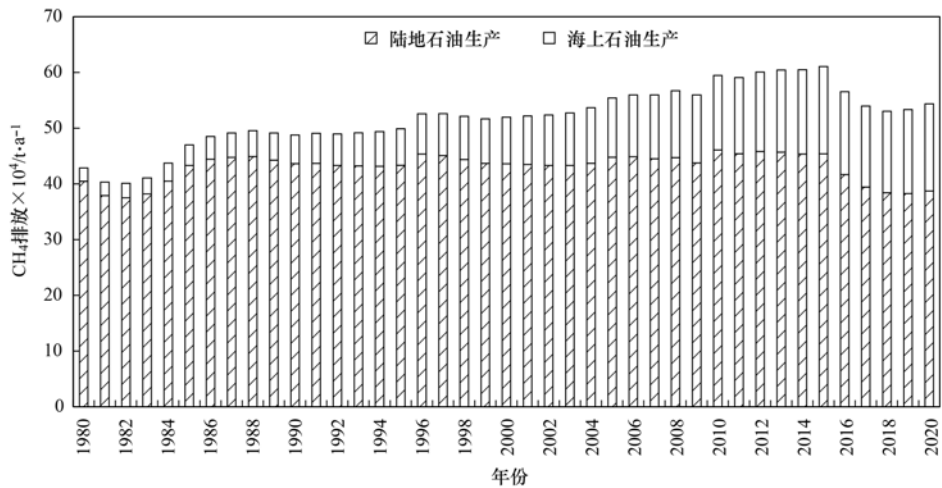


图 1 1980 ~ 2020 年石油生产过程 CH₄ 逸散排放

Fig. 1 Methane fugitive emissions of oil production from 1980 to 2020

假设陆地生产原油通过铁路和管道运输,海上生产和进口原油都通过油轮或铁路运输. 结果表明,2020 年石油运输的 CH_4 逸散排放总量达到 $2.20 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$,其中铁路、管道和油轮运输 CH_4 排放分别为 0.32 、 0.12 和 $1.76 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$. 中国石油精炼产能在过去 40 a 快速提升,由 1978 年的 0.9 亿 t 上升至 2020 年的约 9 亿 t ,2020 年的原油精炼吞吐量达到 6.52 亿 t . 与此同时,精炼过程的 CH_4 排放也呈现上升趋势,由 1980 年 $0.26 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 增长至 2020 年的 $2.41 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$. 考虑到中国石油需求和成品油出口置换原油,未来石油精炼产能将进一步提升^[43],这一过程的排放将会相应增加.

2.1.3 石油系统排放

2020 年石油系统的 CH_4 排放约 $60 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$,其

中陆地石油生产占比 65%,海上石油生产占比 23%,石油开发和炼制过程的排放量较小(图 2). 因此,未来石油系统的 CH_4 逸散排放控制应以生产过程为主. 从时间变化趋势来看,石油系统的 CH_4 逸散排放总量在 1980 ~ 1990 年间由约 $43 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 增长至约 $50 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$,在 1990 ~ 2015 年间呈波动上升趋势,2015 年达到约 $65 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$,2015 之后 CH_4 逸散排放呈现下降趋势,这主要由原油生产量下降引起. 尽管废弃油井可能是重要的 CH_4 排放源,但受限于数据可得性,核算并未涵盖此过程. 已有的研究没有区分各阶段的排放,而是将石油系统视为整体,采用基于产量的排放因子($2.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)进行核算^[34, 35]. 目前,石油系统 CH_4 逸散核算因排放因子、核算方法和范围的不同而存在差异.

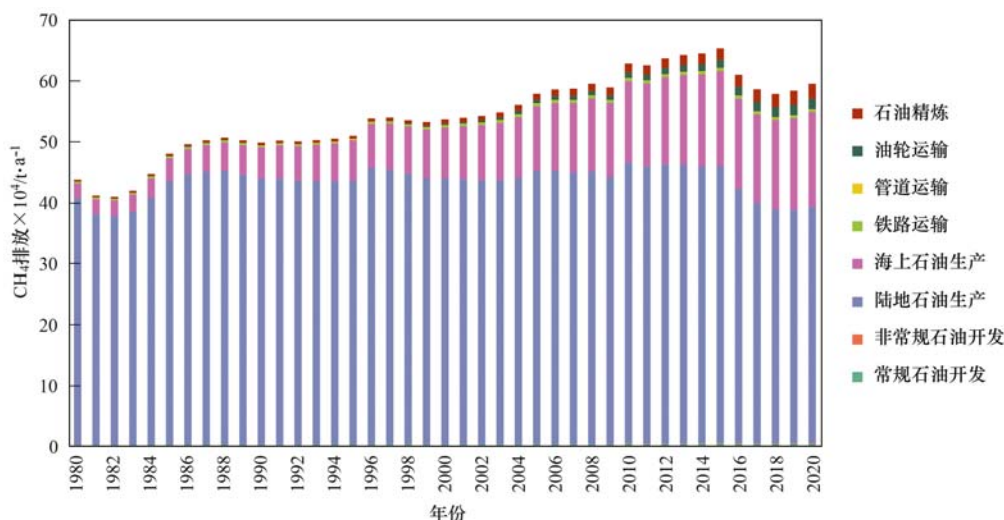


图 2 1980 ~ 2020 年石油系统 CH_4 逸散排放变化

Fig. 2 Methane fugitive emissions of oil system from 1980 to 2020

2.2 天然气系统 CH_4 逸散排放

2.2.1 天然气开发和生产排放

常规天然气和非常规天然气开发具有不同的排放特征. 其中,常规天然气开发 CH_4 逸散排放较少,由 1980 年的 $0.20 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 增长至 2020 年的 $1.15 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$,2006 年后增长速度明显加快. 非常规天然气开发 CH_4 逸散排放因子高于常规天然气,在有回收或火炬燃烧条件下 2020 年排放为 $0.65 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$,而在无回收或火炬燃烧的条件下 2020 年的排放则高达 $20.52 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$. 已有的研究很少考虑天然气开发的 CH_4 排放,Chen 等^[36] 基于场地测量结果提供了常规天然气开发的逸散因子($0.08 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$),和文献^[17] 提供的排放因子($0.06 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$)接近. 2015 年以来,中国非常规天然气开发规模日益扩大,2020 年非常规天然气生产约占 17%. 未来非常规天然气的开发将增加至约 1200 亿 m^3 ^[44]. 随着非常规天然气

逐渐成为天然气增长的主力,需要加强非常规天然气开发 CH_4 排放监测能力,减少 CH_4 逸散排放.

生产过程是天然气系统主要 CH_4 逸散源,2020 年排放占天然气系统的约 67%. 从时间变化上来看,天然气生产 CH_4 逸散排放呈现不同的变化趋势(图 3): ① 1980 ~ 2000 年间, CH_4 逸散排放较低而且增长缓慢,由 $10.12 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 增长至 $15.51 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$; ② 2001 ~ 2020 年间, CH_4 逸散排放较高而且增长迅速,由 $16.67 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 增长至 $112.50 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$. 过去 40 a 间,天然气生产 CH_4 逸散排放增加了近 10 倍. 其中,天然气集输的逸散排放占生产过程排放的 55%,其 CH_4 排在 2020 年达到 $61.60 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$; 煤层气生产中 CH_4 逸散排放较低.

2.2.2 天然气加工、运输和储存

天然气加工过程 CH_4 逸散排放较低,加工设施的监测和维修状况决定其逸散排放的大小. 在高排

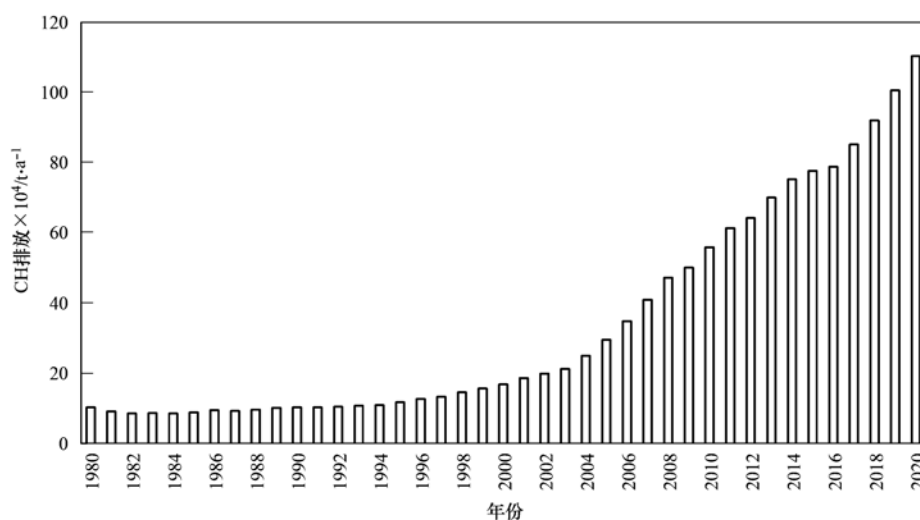
图3 1980~2020年天然气生产过程CH₄逸散排放

Fig. 3 Methane fugitive emissions of natural gas production from 1980 to 2020

放情景下(低频率监测和维修),天然气加工CH₄逸散排放由1980年的0.20万t·a⁻¹增长至2020年的12.39万t·a⁻¹;而在低排放情景下(高频率监测和维修),天然气加工CH₄逸散排放由1980年的0.08万t·a⁻¹增长至2020年的5.08万t·a⁻¹.

天然气运输和储存逸散源包括管道运输、储存和液化天然气(LNG)进出口.2020年天然气运输和储存CH₄逸散排放达到36.12万t·a⁻¹,其中管道运输排放占63%(图4).从时间变化来看,管道运输的CH₄逸散排放量在1980~2000年期间缓慢增加,由1.04万t·a⁻¹增长至2.57万t·a⁻¹;2001年后,随着中国天然气管网设施规模不断扩大,CH₄逸散排放量迅速增加,由2.86万t·a⁻¹增长至22.88万t·a⁻¹.天然气储存CH₄逸散由1980年的0.96万t·a⁻¹增长至9.59万t·a⁻¹.LNG进出口接收站产生的CH₄逸散排放在过去10a迅速增加,由0.66万t·a⁻¹增长至3.65万t·a⁻¹.有研究基于天然气运输

量的排放因子来核算运输过程的CH₄排放,排放因子介于0.41~2.16 g·m⁻³之间^[37,38].

2.2.3 天然气分配排放

天然气分配CH₄逸散排放包括管道分配和短期储存.城镇天然气管道是将天然气分配至居民和企业用户的主要载体,中国城镇天然气消费逐年升高,供气总量由2012年的795亿m³增长至2020年的1564亿m³.居民生活部门成为天然气消费的最大部门(38%),与此同时,工业、电力和化工部门对天然气的需求也日益增加.因此,天然气分配过程的CH₄逸散排放逐年增加,由4.33万t·a⁻¹增长至49.43万t·a⁻¹.相比之下,短期储存的CH₄逸散排放较低,在2020年不足0.10万t·a⁻¹.在天然气分配过程,不同研究采用的排放因子差异较大,例如Höglund-Isaksson等^[37]和Yuan等^[45]采用的排放因子分别为3.05 g·m⁻³和0.35 g·m⁻³.

2.2.4 天然气系统排放

结果显示,天然气系统CH₄逸散排放主要源于生产(53%)、分配(23%)、运输和储存(17%),其他过程占7%.从时间变化来看,天然气系统CH₄逸散在2000年之前排放量较低而且增长缓慢;2001年之后,随着中国社会经济发展对天然气需求增加,CH₄的排放量也在增加,由约50万t·a⁻¹增长至约200万t·a⁻¹(图5).近年来,随着交通部门对天然气需求增加、输气设施规模扩张和“煤改气”“大气污染防治”“蓝天行动计划”等政策推行,促使天然气消费增长,预计2030年天然气消费将占能源消费的14%^[46].因此,中国致力于提升天然气产量,尤其是非常规天然气,天然气系统CH₄逸散排放将进一步增加.由于数据有限,本文并未核算天然气消费过程产生的排放,例如居民部门和燃气电厂等.除了采用

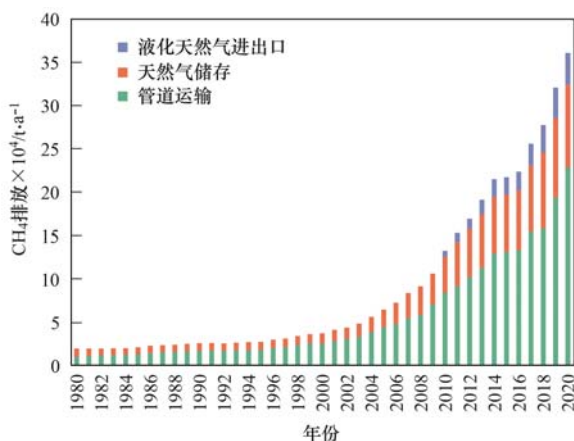
图4 1980~2020年天然气管道输送和储存CH₄逸散排放

Fig. 4 Methane fugitive emissions of natural gas transmission and storage from 1980 to 2020

IPCC 提供的排放因子, Peng 等^[34]和 Schwietzke 等^[35]的研究基于逸散排放率(fugitive emission ratio FER),即天然气逸散至大气中的比例来评估天然气系统的 CH_4 逸散排放,两者采用 FER 范围分别为 2.0%~4.6% 和 3.1%~4.3%,本研究的结果为 1.3%~3.7%,与全球的平均水平(1.6%~5.5%)相当^[47]. Zhang 等^[33]和 Chen 等^[36]基于产量的排放因子核算天然气系统的 CH_4 逸散. 国家温室气体清单基于 IPCC 提供的方法 3 进行核算,涵盖天然气生产、传输和分配过程. 总体而言,天然气系统 CH_4 逸散因核算方法和排放因子的不同,核算结果差异显著.

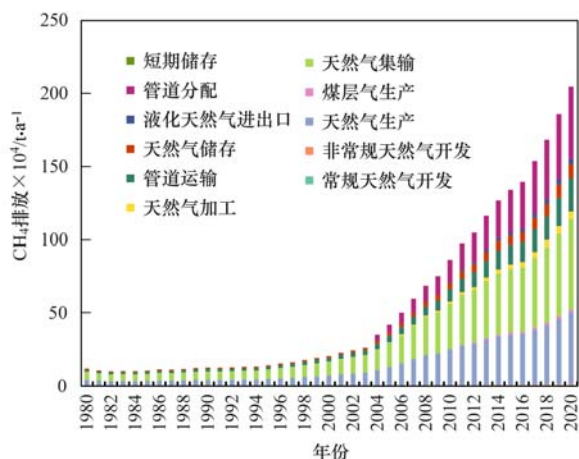


图5 1980~2020年天然气系统 CH_4 逸散排放变化

Fig. 5 Methane fugitive emissions of natural gas system from 1980 to 2020

2.3 中国油气系统 CH_4 逸散规模

结果表明,油气系统 CH_4 逸散排放由 1980 年的 56.04 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 增长至 2020 年的 262.89 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$. 从时间变化来看, CH_4 逸散在 1980~2006 年间增长缓慢, 2006 年后快速增加. 其中天然气生产、石油生产、天然气分配、天然气运输和储存分别占总排放的 41%、20%、18% 和 13%, 其他过程约占 7%. 随着中国能源转型和政策驱动, 中国能源消费增长以油气资源和可再生能源为主, 天然气是能源低碳化的“桥梁燃料”, 油气系统的 CH_4 逸散排放将继续增加. 与其他研究对比发现(图 6), 油气系统 CH_4 逸散排放呈上升趋势, 平均值由 1980 年的 73.45 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 增长至 2015 年的 217.17 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$, 几乎增加了 2 倍. Zhang 等^[33]和美国环保署^[41]的结果与全球大气研究排放数据库(EDGAR5.0)^[48]、Höglund-Isaksson 等^[37]和 Schwietzke 等^[35]的数据几乎相差了一个数量级. EDGAR5.0^[48]的结果显示油气系统 CH_4 逸散排放 2015 年超过 310 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$, 而 Höglund-Isaksson 等^[37]和 Schwietzke 等^[35]研究指出

油气系统 CH_4 在 2010 年分别达到约 240 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 260 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$. Peng 等^[34]认为油气系统 CH_4 逸散排放由 1980 年的约 60 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 增长至 2010 年的约 160 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$. 国家温室气体清单^[49]和美国环保署^[41]的结果接近, 2014 年的排放分别为 112.7 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 116.7 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$. 本研究的结果介于 Peng 等^[34]和国家温室气体清单^[49]结果之间, 天然气系统的 CH_4 排放量高于石油系统, 分别达到约 203 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 60 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$. Zhang 等^[33]的研究表明, 油气系统 CH_4 逸散排放由 1980 年的约 22 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 增长至 2007 年的 63 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$. Chen 等^[36]忽略了石油加工、天然气储存和分配过程, 因此结果较小. 对比分析发现, 不同研究结果之间差异较大, 结果差异显著的原因是核算范围和排放因子选取不同.

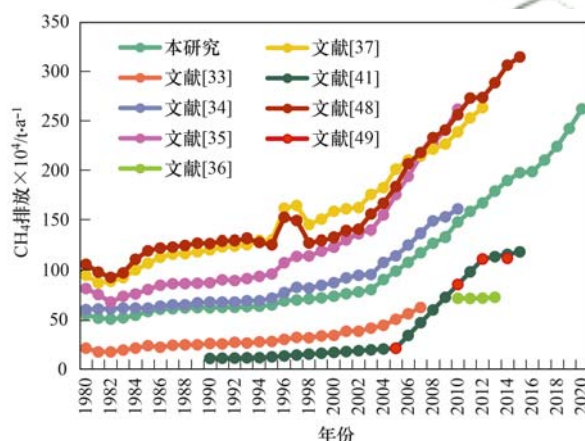


图6 1980~2020年油气系统 CH_4 逸散排放

Fig. 6 Methane fugitive emissions of oil and gas systems from 1980 to 2020

2.4 不确定性分析

结果的不确定性来源有 3 个方面. 首先是清单的完整性, 本研究核算涵盖了 IPCC 在文献[17]中列出的大多数活动(表 2), 在清单完整性上有所改善. 然而受限于数据的可得性, 本文并未核算废弃油井和天然气终端使用的 CH_4 逸散排放. 其次是能源活动水平的数据质量, 其不确定性主要来自不同年份统计标准的变化. 本研究采用文献[39,40]的最新年份数据, 避免了因统计口径调整引起的变化. 第三是排放因子选取, 这是对核算结果影响最大的因素. 尽管逸散排放因子主要由美国、加拿大、德国和挪威等国家提供, 数据监测比较完善, 文献公开透明, 但并没有建立完整的时间序列数据, 这对中国的 CH_4 逸散排放可能产生有偏估计^[50]. 不同研究之间的差异原因除了数据准确性和清单完整性, 还与核算方法相关. 大多数研究采用 IPCC 提供的方法 1 和方法 2 进行, 国家温室气体清单采用的是方法 3, 基于场地监测的研究很少. 随着车载监测、无人机、

飞机和卫星等新兴移动监测平台的出现和应用,有助于 CH₄ 排放源识别,减少核算不确定性^[51,52].

表2 石油和天然气系统 CH₄ 逸散排放完整性¹⁾

Table 2 Completeness of methane fugitive emissions of oil and natural gas system						
项目	本研究	文献[17]	文献[33]	文献[34]	文献[36]	文献[49]
石油开发	✓	✓		✓	✓	✓
石油生产	✓	✓	✓	✓	✓	✓
石油运输	✓	✓	✓			✓
石油炼制	✓	✓	✓			✓
废弃油井		✓				
天然气开发	✓	✓				✓
天然气生产	✓	✓	✓	✓	✓	✓
天然气加工	✓	✓	✓	✓	✓	✓
天然气运输和储存	✓	✓	✓	✓	✓	✓
天然气分配	✓	✓	✓			✓
天然气使用		✓				

1) 改自文献[38]; ✓表示纳入核算,空白表示未纳入核算

3 结论

(1)中国油气系统 CH₄ 逸散排放随着油气资源生产和消费增长而快速增加,由 1980 年的不足 60 万 t·a⁻¹增长至 2020 年的超过 260 万 t·a⁻¹. 从时间变化来看,CH₄ 逸散排放 在 1980 ~ 2006 年间增长缓慢,2006 年的排放约 100 万 t; CH₄ 逸散排放 在 2006 ~ 2020 年间增长迅速,年均增长 10.20 万 t·a⁻¹. 结果表明,2020 年油气系统的 CH₄ 逸散排放 约合 6 500 万 t·a⁻¹,这部分排放需要被纳入国家温室气体清单,增加了中国减排的压力.

(2)准确而完善的核算是实现控制 CH₄ 排放的前提,本研究的核算范围较已有研究更加完善. 其中,石油系统 CH₄ 逸散过程包括开发、生产、运输和精炼等 4 个过程;天然气系统 CH₄ 逸散过程包括开发、生产、加工、分配、运输和储存等 5 个过程. 天然气生产、石油生产、天然气分配、天然气运输和储存分别占总排放的 41%、20%、18% 和 13%,其他过程约占 7%.

(3)2020 年,石油系统 CH₄ 逸散排放约 60 万 t·a⁻¹,主要源于石油生产过程(91%),其中陆地和海上石油生产分别占石油系统 CH₄ 逸散排放的 65% 和 26%. 与此同时,天然气系统 CH₄ 逸散排放 在 2020 年达到约 200 万 t·a⁻¹,这一数值是 1980 年的 16.6 倍. 天然气的 CH₄ 逸散主要源于生产、分配、运输和储存,分别占天然气系统 CH₄ 逸散排放的 53%、23% 和 17%. 天然气管道是主要的逸散设施. 非常规油气资源开发的 CH₄ 逸散排放强度高于常规油气资源开发过程.

(4)核算结果的不确定性主要来源于两方面,包括清单完整性和排放因子. 由于油气系统 CH₄ 逸散源复杂,因此,不同研究核算清单的完整性并不相

同. 因为排放因子难以准确衡量和监测,排放因子的选取对结果的影响较大. 如何获取实时或近实时排放因子,构建一个完整的排放核算清单,将是下一步继续研究的重点内容.

参考文献:

[1] Hmiel B, Petrenko V V, Dyonisius M N, *et al.* Preindustrial ¹⁴CH₄ indicates greater anthropogenic fossil CH₄ emissions[J]. *Nature*, 2020, **578**(7795): 409-412.

[2] Floerchinger C, McKain K, Bonin T, *et al.* Methane emissions from oil and gas production on the North Slope of Alaska[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **218**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116985.

[3] Zhang Y Z, Gautam R, Pandey S, *et al.* Quantifying methane emissions from the largest oil-producing basin in the United States from space[J]. *Science Advances*, 2020, **6**(17), doi: 10.1126/sciadv.aaz5120.

[4] Jackson R B, Saunio M, Bousquet P, *et al.* Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, **15**(7), doi: 10.1088/1748-9326/ab9ed2.

[5] Brereton C A, Johnson M R. Identifying sources of fugitive emissions in industrial facilities using trajectory statistical methods[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **51**: 46-55.

[6] Yusuf R O, Noor Z Z, Abba A H, *et al.* Methane emission by sectors: a comprehensive review of emission sources and mitigation methods[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, **16**(7): 5059-5070.

[7] Bousquet P, Ciais P, Miller J B, *et al.* Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability[J]. *Nature*, 2006, **443**(7110): 439-443.

[8] West J J, Fiore A M, Horowitz L W, *et al.* Global health benefits of mitigating ozone pollution with methane emission controls[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, **103**(11): 3988-3993.

[9] Rogelj J, Popp A, Calvin K V, *et al.* Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5°C[J]. *Nature Climate Change*, 2018, **8**(4): 325-332.

[10] Saunio M, Stavert A R, Poulter B, *et al.* The global methane budget 2000–2017[J]. *Earth System Science Data*, 2020, **12**(3): 1561-1623.

[11] Lavoie T N, Shepson P B, Gore C A, *et al.* Assessing the

- methane emissions from natural gas-fired power Plants and oil refineries[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51** (6): 3373-3381.
- [12] Weller Z D, Hamburg S P, Von Fischer J C. A national estimate of methane leakage from pipeline mains in natural gas local distribution systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(14): 8958-8967.
- [13] Lamb B K, Edburg S L, Ferrara T W, *et al.* Direct measurements show decreasing methane emissions from natural gas local distribution systems in the United States [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49** (8): 5161-5169.
- [14] Zavala-Araiza D, Alvarez R A, Lyon D R, *et al.* Super-emitters in natural gas infrastructure are caused by abnormal process conditions[J]. *Nature Communications*, 2017, **8**(1), doi: 10.1038/ncomms14012.
- [15] Allen D T, Pacsi A P, Sullivan D W, *et al.* Methane emissions from process equipment at natural gas production sites in the United States: pneumatic controllers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(1): 633-640.
- [16] Allen D T, Torres V M, Thomas J, *et al.* Measurements of methane emissions at natural gas production sites in the United States[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**(44): 17768-17773.
- [17] Calvo B E, Tanabe K, Kranjc A, *et al.* 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Switzerland: IPCC, 2019. 38-47.
- [18] Johnson M R, Grosland B M, McEwen J D, *et al.* Estimating fugitive methane emissions from oil sands mining using extractive core samples[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **144**: 111-123.
- [19] Vaughn T L, Bell C S, Pickering C K, *et al.* Temporal variability largely explains top-down/bottom-up difference in methane emission estimates from a natural gas production region [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, **115**(46): 11712-11717.
- [20] Lueken R, Klima K, Griffin W M, *et al.* The climate and health effects of a USA switch from coal to gas electricity generation[J]. *Energy*, 2016, **109**: 1160-1166.
- [21] Peters J C. Natural gas and spillover from the US clean power plan into the Paris Agreement[J]. *Energy Policy*, 2017, **106**: 41-47.
- [22] Peischl J, Eilerman S J, Neuman J A, *et al.* Quantifying methane and ethane emissions to the atmosphere from central and western U.S. oil and natural gas production regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(14): 7725-7740.
- [23] Plant G, Kort E A, Floerchinger C, *et al.* Large fugitive methane emissions from urban centers along the U. S. east coast [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(14): 8500-8507.
- [24] Moussa S G, Staebler R M, You Y, *et al.* Fugitive emissions of volatile organic compounds from a tailings pond in the oil sands region of Alberta [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(19): 12831-12840.
- [25] Englander J G, Bharadwaj S, Brandt A R. Historical trends in greenhouse gas emissions of the Alberta oil sands (1970–2010) [J]. *Environmental Research Letters*, 2013, **8**(4), doi: 10.1088/1748-9326/8/4/044036.
- [26] Johnson M R, Tyner D R, Conley S, *et al.* Comparisons of airborne measurements and inventory estimates of methane emissions in the Alberta upstream oil and gas sector [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(21): 13008-13017.
- [27] Pandey S, Gautam R, Houweling S, *et al.* Satellite observations reveal extreme methane leakage from a natural gas well blowout [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(52): 26376-26381.
- [28] Omara M, Sullivan M R, Li X, *et al.* Methane emissions from conventional and unconventional natural gas production sites in the Marcellus Shale basin [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(4): 2099-2107.
- [29] Alvarez R A, Zavala-Araiza D, Lyon D R, *et al.* Assessment of methane emissions from the U. S. oil and gas supply chain[J]. *Science*, 2018, **361**(6398): 186-188.
- [30] Caulton D R, Shepson P B, Santoro R L, *et al.* Toward a better understanding and quantification of methane emissions from shale gas development [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111** (17): 6237-6242.
- [31] Balcombe P, Anderson K, Speirs J, *et al.* The natural gas supply chain: the importance of methane and carbon dioxide emissions[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, **5**(1): 3-20.
- [32] Tyner D R, Johnson M R. Where the methane is—insights from novel Airborne LiDAR measurements combined with ground survey data[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55** (14): 9773-9783.
- [33] Zhang B, Chen G Q, Li J S, *et al.* Methane emissions of energy activities in China 1980–2007 [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **29**: 11-21.
- [34] Peng S S, Piao S L, Bousquet P, *et al.* Inventory of anthropogenic methane emissions in mainland China from 1980 to 2010 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(22): 14545-14562.
- [35] Schwietzke S, Griffin W M, Matthews H S, *et al.* Global bottom-up fossil fuel fugitive methane and ethane emissions inventory for atmospheric modeling [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2014, **2**(8): 1992-2001.
- [36] Chen G J, Yang S, Lv C F, *et al.* An improved method for estimating GHG emissions from onshore oil and gas exploration and development in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 707-715.
- [37] Höglund-Isaksson L. Bottom-up simulations of methane and ethane emissions from global oil and gas systems 1980 to 2012 [J]. *Environmental Research Letters*, 2017, **12**(2), doi: 10.1088/1748-9326/aa583e.
- [38] Gao J L, Guan C H, Zhang B. Why are methane emissions from China's oil & natural gas systems still unclear? A review of current bottom-up inventories [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **807**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151076.
- [39] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [40] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- National Bureau of Statistics. China energy statistical yearbook 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [41] USEPA. Global non-CO₂ greenhouse gas emission projections & marginal abatement cost analysis: methodology documentation [R]. Washington: Climate Change Division, 2019. 12-13.

- [42] Zang K P, Zhang G, Wang J Y. Methane emissions from oil and gas platforms in the Bohai Sea, China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114486.
- [43] 费华伟, 高振宇. 中国炼油工业“十三五”回顾及“十四五”展望[J]. *国际石油经济*, 2021, **29**(5): 39-46.
Fei H W, Gao Z Y. Review of China's refining industry in the 13th Five-Year period and the outlook for the 14th Five-Year period[J]. *International Petroleum Economics*, 2021, **29**(5): 39-46.
- [44] 贾爱林, 何东博, 位云生, 等. 未来十五年中国天然气发展趋势预测[J]. *天然气地球科学*, 2021, **32**(1): 17-27.
Jia A L, He D B, Wei Y S, *et al.* Predictions on natural gas development trend in China for the next fifteen years[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, **32**(1): 17-27.
- [45] Yuan Z Y, Ou X M. Life cycle analysis on liquefied natural gas and compressed natural gas in heavy-duty trucks with methane leakage emphasized[J]. *Energy Procedia*, 2019, **158**: 3652-3657.
- [46] 李洪兵, 张吉军. 中国能源消费结构及天然气需求预测[J]. *生态经济*, 2021, **37**(8): 71-78.
Li H B, Zhang J J. China's energy consumption structure and forecast on natural gas demand[J]. *Ecological Economy*, 2021, **37**(8): 71-78.
- [47] Yuan Z Y, Ou X M, Peng T D, *et al.* Life cycle greenhouse gas emissions of multi-pathways natural gas vehicles in China considering methane leakage[J]. *Applied Energy*, 2019, **253**, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113472.
- [48] Crippa M, Oreggioni G, Guizzardi D, *et al.* Fossil CO₂ and GHG emissions of all world countries[R]. Luxembourg: Office of the European Union, 2019.
- [49] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中国温室气体清单研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [50] 蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 等. 《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读[J]. *环境工程*, 2019, **37**(8): 1-11.
Cai B F, Zhu S L, Yu S M, *et al.* The interpretation of 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[J]. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(8): 1-11.
- [51] Fox T A, Hugenholtz C H, Barchyn T E, *et al.* Can new mobile technologies enable fugitive methane reductions from the oil and gas industry? [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, **16**(6), doi: 10.1088/1748-9326/ac0565.
- [52] Lauvaux T, Giron C, Mazzolini M, *et al.* Global assessment of oil and gas methane ultra-emitters [J]. *Science*, 2022, **375**(6580): 557-561.



CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University	 HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review	 LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary	CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach	YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay	QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province	 YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen	PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn ²⁺ by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters	ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS	XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes	XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019	FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley	 CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM _{2.5} Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas	QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing	FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China	SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed	CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season	 LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau	LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope	 ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir	HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation	WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems	 ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions	 DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis	 TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis	 LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China	 SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N ₂ O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions	TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis	LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model	 GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS	ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd ²⁺ Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area	WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils	 LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil	ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L.	SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing	FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios	 HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity	CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes	SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction	 LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China	HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings	 YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China	LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)