
FESE 基于NO₂卫星遥感观测反演化石燃料CO₂排放

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/31170.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

FESE 基于NO₂卫星遥感观测反演化石燃料CO₂排放。论文标题：Monitoring fossil fuel CO₂ emissions from co-emitted NO₂ observed from space: progress, challenges, and future perspectives

期刊：Frontiers of Environmental Science Engineering

作者：Hui Li, Jiaxin Qiu, Kexin Zhang, Bo Zheng

发表时间：19 Aug 2024

DOI：10.1007/s11783-025-1922-x

微信链接：[点击此处阅读微信文章](#)

FESE

Young Talent Award 2024

摘要

《巴黎气候协定》实施以来，全球履约机制依赖于每五年一次的碳盘点，而2019年《IPCC指南》首次明确将基于自上而下同化反演碳源汇收支纳入可监测、可核查、可支撑的核算方法框架，以解决全球多尺度碳收支核算的透明性和标准化问题。然而CO₂生命周期长达百年，背景浓度高使人为排放引起的局地浓度增强难以被精准测量。为克服这一困难，研究人员提出利用与CO₂同源排放且生命周期短的NO₂作为人为源CO₂排放反演的示踪性气体，这一替代方案近年来得到迅速发展与广泛应用。本综述系统梳理了基于NO₂卫星遥感反演CO₂排放研究进展，分析其研发背景、技术优势和不确定性，展望未来发展路径。这一系统性综述为深化基于NO₂反演人为源CO₂排放的方法奠定科学基础，并为该领域的持续创新提供理论支持与研究指引。

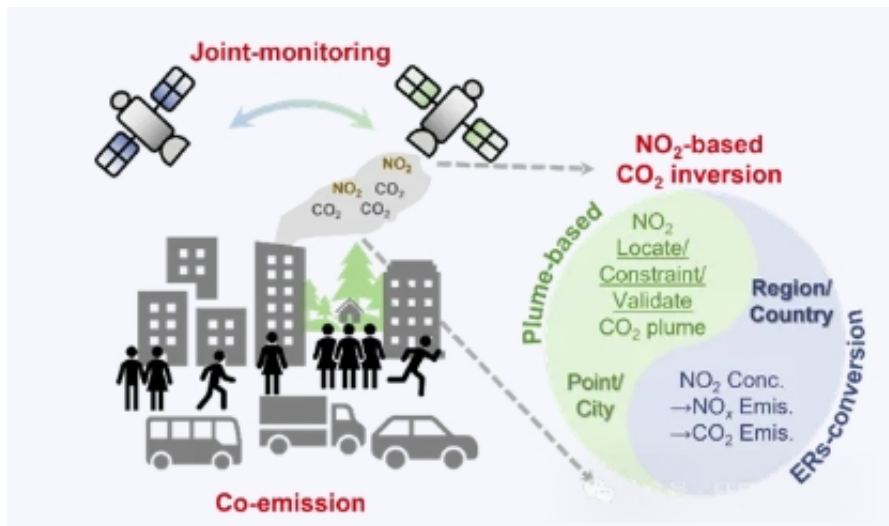


图1 摘要图

1 引言

2019年《IPCC指南》明确将自上而下同化反演碳源汇纳入可监测、可核查、可支撑的核算方法框架，以提升全球多尺度碳收支的透明度和标准化。在全球温升压力下，有效落实气候行动方案、精准核算与校验减排效果并及时调整策略，均依赖于每五年一次的全球碳盘点，而碳排放反演的准确性和时效性是关键的科学基础。尽管研究人员在基于碳卫星的CO₂排放反演方面取得了显著进展，但CO₂的固有特性——生命周期长、自然源通量波动大等，使得通过碳卫星精确识别和捕捉人为源（化石燃料燃烧为主）引起的局地CO₂浓度增强信号面临巨大挑战，成为碳卫星反演CO₂排放的主要瓶颈之一。在此背景下，将与CO₂共排放、寿命短、信号易于捕捉的示踪性气体（如NO₂）融入碳排放反演系统，成为一种新兴的反演思路，受到广泛关注并迅速发展。

然而，目前对于这一新兴反演系统的发展背景、研究现状、技术优势和现有局限等方面，尚缺乏系统的梳理与经验总结。本综述系统地梳理了基于氮卫星反演CO₂排放的研究进展，深入分析其背景、技术优势和现存不确定性，并展望未来的发展路径。

2 基于碳卫星遥感反演CO₂排放

2.1 CO₂观测卫星

过去二十余年，碳卫星技术快速发展，为基于碳观测反演CO₂排放提供了坚实的数据支撑。2002年，欧洲航天局发射搭载SCIAMACHY的环境卫星，实现多种大气成分同步观测。2009年和2018年，日本先后发射GOSAT及GOSAT-2，通过先进传感器减少云和气溶胶对CO₂反演的干扰，提升CO₂观测精度。美国航空航天局于2014年和2019年分别发射OCO-2和OCO-3卫星，提高了对城市CO₂排放羽流的捕捉能力。我国碳卫星（TanSat）自2016年发射后，通过光谱校准与算法优化，达到与国际先进水平相当的观测精度，为全球CO₂观测提供支持。

2.2 基于数据/模型的碳排放反演方法

基于碳卫星的CO₂排放反演主要分为数据驱动方法和模型驱动方法。数据驱动方法通过处理卫星XCO₂柱浓度数据与局地风场信息，在假定排放处于稳态条件下，通过烟羽形状和强度拟合（如

高斯烟羽模型、散度计算等)定位排放源并估算排放量,广泛应用于大型点源(如电厂)和孤立城市的排放估算。模型驱动方法则主要基于欧拉模型(如WRF-Chem)和拉格朗日模型(如X-STILT),针对城市或区域尺度的CO₂排放进行反演。这类方法通过模拟大气中CO₂的传输过程,建立排放与浓度之间的关联关系,结合卫星观测数据实现CO₂排放的反演估算。

2.3 点源或城市尺度排放反演应用

基于碳卫星的CO₂排放反演主要聚焦于点源与城市尺度的量化表征。点源排放(如火电厂)因其地理位置明确、排放量稳定且背景干扰较小,适合采用数据驱动方法,通过卫星CO₂柱浓度(XCO₂)图像与局地风场信息实现高效分析与定量估算。相比之下,城市尺度排放涉及多样化的来源(如交通、生活及工业),呈现显著的时空变异性和复杂性。模型驱动方法通过模拟大气中CO₂的传输过程,整合多种排放源信息,构建区域内CO₂浓度与排放的动态响应关系,并结合卫星观测数据实现城市级排放反演。

2.4 大尺度碳排放反演面临的挑战

尽管碳卫星在点源和城市尺度CO₂排放量化方面具有较强潜力,其在区域和全球尺度应用仍面临挑战:(1)卫星观测局限:扫描带宽窄、重访周期长,以及云层和气溶胶干扰,限制了大范围CO₂浓度信号的准确观测。现有极轨卫星仅获取过境时刻数据,难以反映全天浓度变化,影响排放反演的动态准确性;(2)反演方法不足:数据驱动方法假设大气条件稳定、地形平坦,在复杂环境中适用性有限;模型驱动方法计算成本高,且模拟本身存在不确定性,难以准确表征实际大气的浓度-排放关系;(3)CO₂特性限制:人为排放引起的CO₂浓度波动远低于背景场浓度和自然碳汇信号,常落入卫星观测误差范围。在新冠疫情期间,尽管人为排放显著下降,卫星观测仍未能捕捉到大范围的CO₂浓度变化,反映出碳卫星在CO₂观测上的局限性。

3 基于NO₂卫星的CO₂排放反演

3.1 NO₂卫星及NO_x排放反演

近年来,NO₂卫星遥感观测技术迅速发展,从1995年GOME实现全球NO₂观测到EMI(高分5号卫星)和TROPOMI等高分辨率卫星的发射,观测空间分辨率提升至公里级。地球同步轨道卫星(如TEMPO)可提供小时级观测能力,极大增强了基于NO₂反演NO_x排放的时空分辨率和精度。

NO_x排放反演方法主要包括质量平衡(MB)法、四维变分(4D-Var)法和集合卡尔曼滤波(EnKF)法。MB法通过化学传输模型建立NO₂柱浓度与NO_x排放的非线性关系,适用于区域日尺度估算,但在高分辨率下受大气传输和非线性化学限制。4D-Var和EnKF方法通过数据同化优化观测与模型间的误差,精度高但计算复杂。为提高效率,简化模型如指数修正高斯(EMG)和散度(Div)法被提出。这些方法结合风场和NO₂柱浓度空间分布,可在月或年尺度实现高空间分辨率NO_x排放反演。

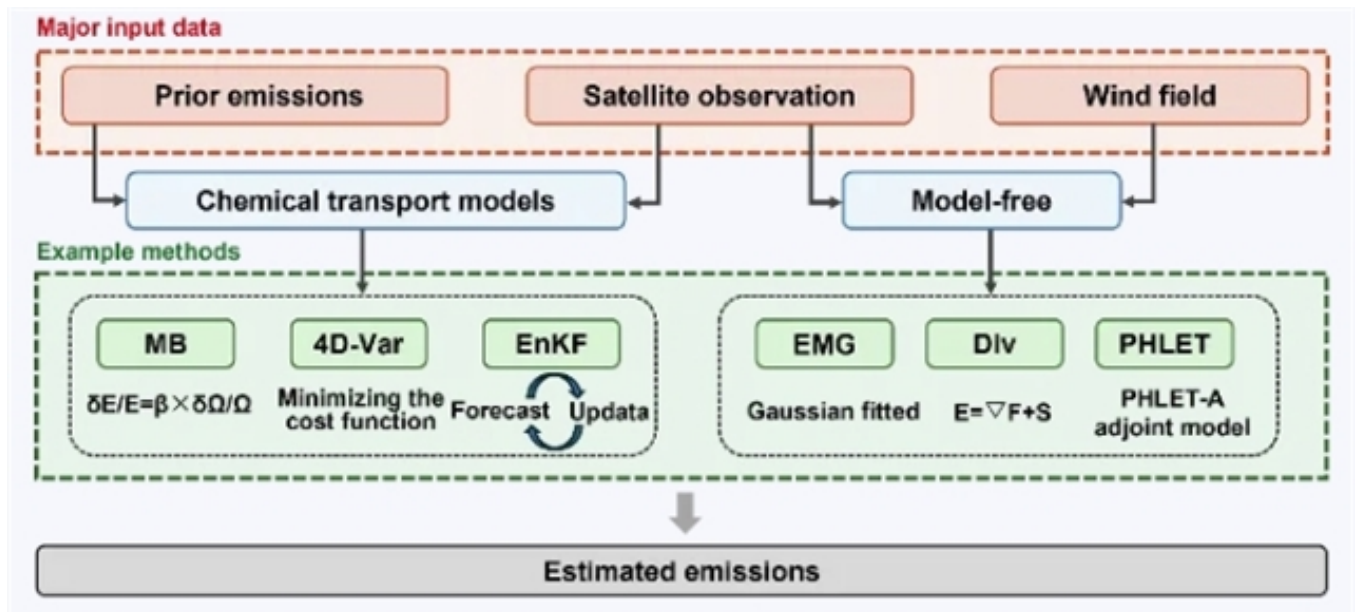


图2 NO_x排放反演方法

3.2 CO₂和NO_x在化石燃料燃烧中的同源性

化石燃料燃烧过程中，CO₂和NO_x呈现同源性。CO₂主要来源于化石燃料燃烧，而NO_x则由燃料中氮的氧化及高温条件下大气N₂的氧化分解产生。这一共排放特性为温室气体与空气污染物的协同观测与治理提供了新视角，为应对气候变化和改善空气质量双重挑战提供了重要契机。CO₂与NO_x的排放比（ERs）因行业特性差异显著，受燃料类型、氧化效率、燃烧条件和后处理技术等多重因素影响。例如，火电行业因煤炭的高消耗量和烟气脱硝技术的广泛应用，其ERs相对较高；而交通运输行业主要依赖石油燃料，ERs则明显较低。由于实地测量CO₂和NO_x排放因子复杂且成本高，全面覆盖难以实现。近年来，卫星遥感技术的快速发展，为基于CO₂与NO₂浓度观测约束排放比提供了新可能，为区域和行业层面的排放研究提供了重要支持。

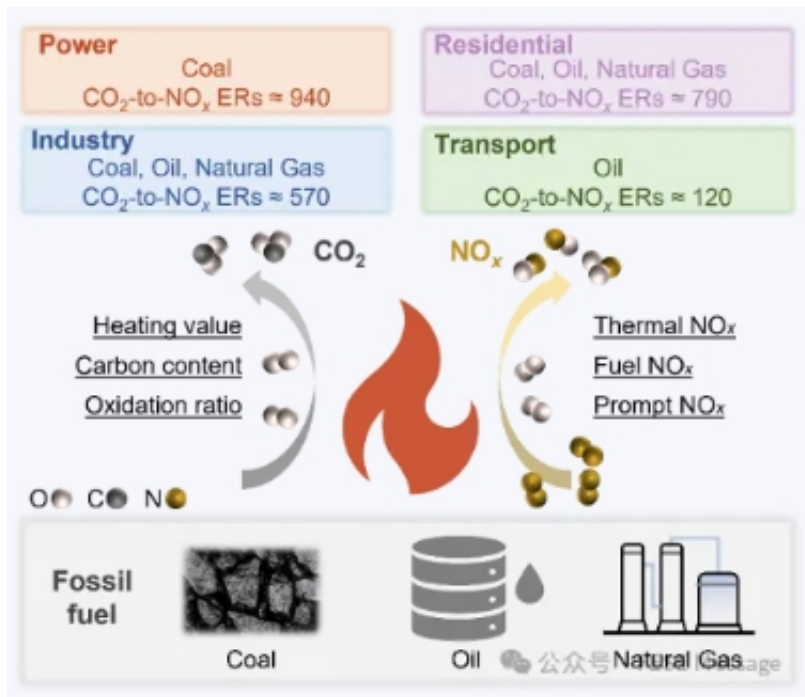


图3 CO₂和NO_x在化石燃料燃烧过程中的共排放特性

3.3 基于NO₂观测反演CO₂排放

(1) 基于NO₂观测反演CO₂排放的优势

化石燃料CO₂与NO_x的共排放特性为基于NO₂反演CO₂排放提供前提条件。相比CO₂，NO₂浓度信号更易识别，且其短生命周期（数小时）使其对排放源变化更敏感。此外，NO₂主要源于人为排放，受生物源影响较小。研究表明，卫星观测NO₂羽流可覆盖约92%的CO₂排放。

(2) 基于NO₂观测反演CO₂排放的两类方法

目前，基于卫星NO₂数据反演CO₂排放的方法包括羽流法和排放因子比值转化法。羽流法主要用于点源或城市尺度的排放反演，利用NO₂观测数据定位、约束或验证CO₂羽流。通过NO₂柱浓度观测，可以定位排放源并为CO₂羽流提供形状约束。由于NO₂信号易于检测，此方法可避免直接对CO₂羽流进行大范围扫描，克服了CO₂信噪比低及扫描带宽较窄的问题，从而提高计算的准确性和效率。此外，NO₂观测还可用于验证局地排放源引起的CO₂浓度增强。

排放因子比值转化法是基于ERs的反演方法，先通过NO₂观测约束NO_x排放量，再利用CO₂/NO_x排放比将其转化为CO₂排放量，适用于区域或国家尺度的排放估算。建立NO₂浓度与NO_x排放量之间关系的方法已相对成熟，但CO₂/NO_x排放比的获取较为困难，常依赖现有排放清单中的不同部门排放比值信息。

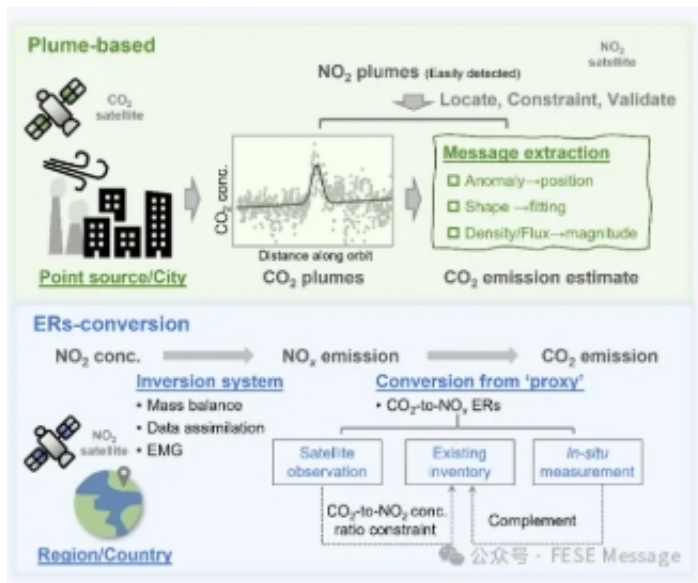


图4 基于NO₂观测反演CO₂排放的两种主要方法

3.4 从点源到国家尺度的应用

基于氮卫星的CO₂排放反演技术已在点源、城市及国家尺度得到广泛应用，展现出较大应用潜力。在点源尺度，通常采用羽流法结合高分辨率卫星观测数据，精确估算电厂和工业设施的CO₂排放。通过利用NO₂观测约束CO₂羽流形状，有效提升排放估算的精度与效率。在城市尺度，先利用NO₂观测数据反演城市范围内的NO_x排放，再结合ERs完成CO₂排放的量化。这一方法适用于交通、工业等多种排放源的复杂场景，为城市排放特征的精准评估提供支持。在国家尺度，排放因子比值转化法较为常用，通过结合卫星观测与排放清单，在反演NO_x排放的基础上推算CO₂排放。这些研究充分证明了NO₂在CO₂排放反演中的实用性，为多尺度排放观测和评估提供了重要的科学支撑与技术保障。

4 不确定性来源

4.1 结构不确定性

尽管基于NO₂观测的CO₂排放反演技术取得了显著进展，但仍存在结构性和数据层面的多重不确定性。结构性不确定性主要包括：（1）方法假设的局限性。例如，羽流法通常假定CO₂与NO₂羽流形状和覆盖范围一致，但这一假设在实际中难以完全满足；质量平衡法则易受水平输送引起的拖尾效应干扰；（2）观测时间代表性不足。卫星观测时间通常为特定时刻，但浓度与排放的昼夜变化不同步性削弱了观测的时间代表性。此外，多颗卫星的观测时间不一致也导致数据整合困难；（3）归因挑战。区分生物源与人为排放并归因至具体部门仍存在技术难题。羽流法易受局地背景浓度波动影响，而排放因子比值转化法对人为部门归因依赖先验清单。未来借助更精细排放清单和先进的卫星技术，排放源识别与归因的精度有望进一步提升。

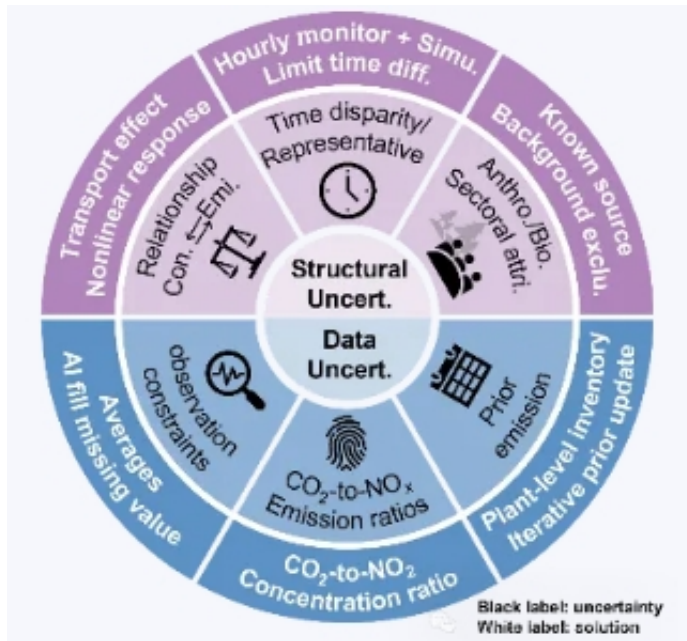


图5 基于NO₂观测反演CO₂排放方法的不确定性来源

及潜在应对方法

4.2 数据不确定性

数据层面不确定性主要来源于：（1）观测约束：遥感数据在从光谱信号到浓度值的转换中受云量、气溶胶、地表反照率等影响，且时空覆盖不足以支持高分辨率排放反演。现有研究多用均值或滑动平均值减少随机误差；（2）CO₂/NO_x排放比：作为排放因子比值转化法中的关键参数，其准确性受限于清单因子或经验外推，无法全面反映污染控制、能源结构变化带来的波动。部分研究通过CO₂与NO₂同步观测优化排放比值，未来多种大气成分协同观测卫星有望显著提升排放比值约束能力；（3）排放清单：自下而上排放清单因活动水平和排放因子数据局限性存在偏差，特别在空间分配时易影响排放归因和后验估算。现有研究可通过迭代更新清单、建立设备级排放清单和多源数据融合逐步优化先验清单，降低先验不确定性对反演精度的影响。

5 未来研究展望

5.1 下一代卫星发展

未来卫星系统应具备以下能力：同步观测CO₂和NO₂浓度、逐小时观测、高信噪比和高空间分辨率，以及更广的覆盖范围。多种大气成分同步观测可有效解决时空不一致问题，提升排放比值的约束与验证能力；逐小时观测（如静止轨道卫星）可捕捉昼夜变化特征，弥补当前采样时效的局限性；高信噪比和高分辨率有助于精确识别局地排放源引起的浓度增强；更广的覆盖范围支持对大尺度羽流的精准刻画。部分即将发射的卫星已具备上述特性，例如计划于2026年发射的CO₂M卫星，其分辨率达4 km × 4 km，覆盖宽度250公里。此外，多卫星星座为实现宽广覆盖、近实时高分辨率观测提供了新的可能性，有望在CO₂排放反演领域发挥重要作用。

5.2 反演技术方法发展

当前反演方法在时间、空间分辨率及部门归因等方面存在数据精度的权衡和取舍。未来研究应整合多种方法的优势，提升全维度反演精度。针对卫星数据量快速增长和实时反演需求，数据科学和人工智能技术提供了强大的支持。例如，利用数据融合技术将多源卫星观测、排放清单和模型模拟相结合，不仅能够优化基于NO₂的CO₂排放反演，还可提升数据的准确性和完整性。此外，机器学习和深度学习算法的引入，有助于更高效地处理大规模数据并改进反演模型。

5.3 维护与共享数据

反演排放数据的发布需附加详细说明，包括不确定性估计、数据适用范围、使用示例以及持续更新计划，类似IPCC报告或卫星用户手册的形式，以帮助用户准确解读数据并避免误用。数据管理与共享需坚持透明性、科学性和实用性原则，明确数据的适用范围和局限性。目前，反演数据的管理框架尚不完善，可借鉴排放清单领域的成熟经验，逐步构建科学高效的数据共享体系。这一体系的建立将促进研究协作、提升数据利用效率，并支持决策制定与政策评估。

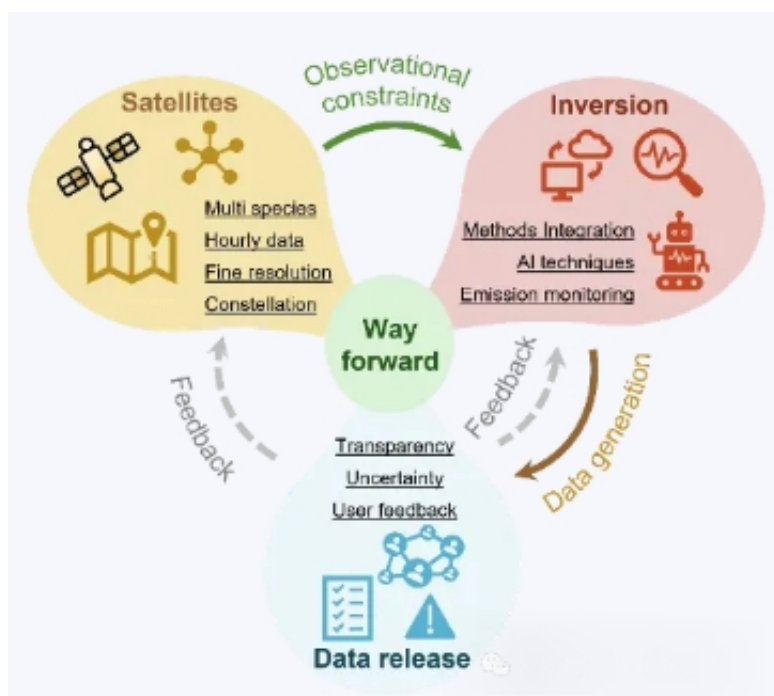


图6 未来研究展望



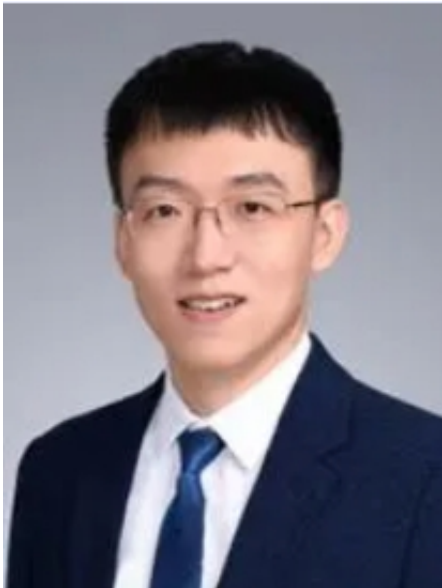
本文内容来自FESE期刊2025年第19卷第1期发表的综述文章 Monitoring fossil fuel CO₂ emissions from co-emitted NO₂ observed from space: progress, challenges, and future

perspectives。通讯作者为清华大学深圳研究生院的郑博副教授。

引用格式：Hui Li, Jiaxin Qiu, Kexin Zhang, Bo Zheng. Monitoring fossil fuel CO₂ emissions from co-emitted NO₂ observed from space: progress, challenges, and future perspectives. *Front. Environ. Sci. Eng.*, 2025, 19(1): 2 <https://doi.org/10.1007/s11783-025-1922-x>

Special Issue—Young Talent

作者简介



郑博，清华大学深圳国际研究生院副教授，主要研究方向为大气痕量气体源汇定量表征。近5年以一作/通讯（含共同）发表Science（1篇）、Science Advances（3篇）、Nature Communications（1篇）、One Earth（1篇）等。Google Scholar全部论文引用超过3万次，H指数70。2024年国家自然科学奖二等奖（个人排名第4）；入选2023年度中国生态环境十大科技进展（个人排名第3）；2024年获中国环境科学学会青年科学家奖；2021年入选中国科协青年人才托举工程；2020–2024年连续入选科睿唯安全球高被引科学家。

期刊简介

Frontiers of Environmental Science Engineering是由高等教育出版社、中国工程院和清华大学共同主办的环境领域综合学术期刊，聚焦环境领域前沿问题与研究成果，重点关注开创性、跨学科的研究，致力于打造具有国际影响力的高水平学术交流平台，是中国工程院院刊系列期刊、中国科技期刊卓越行动计划入选期刊。

主编：曲久辉院士，John Crittenden院士

期刊官网1（国内免费获取）

<http://journal.hep.com.cn/fese>

期刊官网2

www.springer.com/journal/11783

欢迎关注

来源：Frontiers of Environmental Science & Engineering

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://www.iikx.com)转发