

高分五号02星高光谱成像仪中美典型甲烷超级排放源遥感反演与分析

李飞^{1,2}, 孙世玮³, 张永光^{1,2,6}, 封晨曦⁴, 陈翠红⁵, 毛慧琴⁵, 刘银年⁷

1. 南京大学国际地球系统科学研究所 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023;
2. 南京大学地理与海洋科学学院 自然资源部国土卫星遥感应用重点实验室 江苏省地理信息技术重点实验室, 南京 210023;
3. 南京气象科技创新研究院 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210041;
4. 南京大学大气科学学院, 南京 210023;
5. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094;
6. 南通智能感知研究院, 南通 226000;
7. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083

摘要: 检测和估算化石燃料生产活动中的甲烷泄漏有助于甲烷减排。星载高光谱成像仪是甲烷排放点源遥感监测的重要技术手段。本研究利用国产高分五号02星 (GF-5 02) 获取的高光谱成像仪 (AHSI) 与欧空局哨兵五号星 (Sentinal-5P) 的对流层观测仪 (TROPOMI) 遥感数据, 基于优化的甲烷柱浓度反演算法和中尺度气象模式, 开展了对中美两国煤矿和油气设施的甲烷排放点源检测、量化以及不确定性评估。实验结果表明: (1) GF-5 02星 AHSI载荷在中美两国甲烷排放热点区域内探测到了4处显著的甲烷点源泄漏排放, 排放速率均大于0.5 t/h。其中, 在二叠纪盆地监测到一处超级排放源, 甲烷排放量高达 11.7 ± 4.4 t/h; (2) 甲烷点源排放通量速率的估算会受到背景气象场的影响, 点源处风速的不确定性贡献最大。研究表明, GF-5 02星高光谱成像仪在全球甲烷点源遥感识别和排放量估算中的应用潜力, 可以为未来全球能源行业的甲烷泄漏检测工作提供重要数据支撑。

关键词: 遥感, 高分五号02星 (GF-5 02), 甲烷反演, 点源排放, 长治, 二叠纪盆地

中图分类号: P2

引用格式: 李飞, 孙世玮, 张永光, 封晨曦, 陈翠红, 毛慧琴, 刘银年. 2024. 高分五号02星高光谱成像仪中美典型甲烷超级排放源遥感反演与分析. 遥感学报, 28(8): 1986-2001

Li F, Sun S W, Zhang Y G, Feng C X, Chen C H, Mao H Q and Liu Y N. 2024. Mapping methane super-emitters in China and United States with GF5-02 hyperspectral imaging spectrometer. National Remote Sensing Bulletin, 28(8):1986-2001[DOI:10.11834/jrs.20232453]

1 引言

甲烷 (CH_4) 是仅次于二氧化碳 (CO_2) 的重要温室气体, 占全球温室气体总量的20%以上 (Saunio等, 2020; Shindell等, 2012)。IPCC第六次评估报告指出, CH_4 对全球变暖贡献率已达25%, 其在20年内与100年内的全球增温潜势分别是 CO_2 的84倍和28倍, 而且它在大气中的停留时间很短 (9 ± 1 年)。因此, 减少 CH_4 排放被认为是

在数十年时间尺度上应对全球气候变化的有效途径之一。

近十年来, 大气甲烷浓度快速增长, 是工业化前水平的近3倍 (Hmiel等, 2020)。这主要是由人类活动排放导致, 例如煤炭、石油和天然气等化石燃料的开采等 (Maasackers等, 2019; Schwietzke等, 2016)。中国是全球人为活动甲烷排放量最大的国家, 能源行业是最大的贡献者 (Chen等, 2022)。中国是世界第一大煤炭开采国, 2020年煤

收稿日期: 2022-09-19; 预印本: 2023-03-07

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2022YFE0209100); 国家自然科学基金(编号:42125105, 42105151); 中国气象科学研究院基本科研业务费专项资金项目(编号:2021Y008)

第一作者简介: 李飞, 研究方向为大气痕量气体监测。E-mail: dg20270016@smail.nju.edu.cn

通信作者简介: 张永光, 研究方向为全球碳循环及高光谱遥感。E-mail: yongguang_zhang@nju.edu.cn

炭产量占世界煤炭总产量的50.7% (<http://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> [2022-09-19])。研究表明, 中国的甲烷排放量从2010年到2015年增加了 110 ± 40 万吨/年, 在很大程度上是来自煤炭开采的贡献 (Miller等, 2019)。而美国是世界最大的石油和天然气生产国, 从2010年至今也一直稳居世界第四大甲烷排放国, 其甲烷年排放量的30%来自于油气, 尤其是页岩气开采。2019年油气产量分别占世界油气总产量的14.7%、23.4% (Looney和Dale, 2021)。Alvarez等 (2018) 发现2015年美国油气行业供应链的甲烷泄漏量高达1300万吨, 比美国环保署当年估算高出78%, 这占据了全球2008年—2017年油气生产领域甲烷排放总量 (6800—9200万吨) 的重要部分。更为重要的是, 美国油气行业甲烷排放量一直在逐年增加。

能源生产活动产生的逃逸甲烷泄漏主要来自化石燃料开采基础设施, 例如油田矿井、收集站、压缩机站、储罐、管道和火炬等 (Lyon等, 2016)。这些逃逸甲烷排放通常以“点源排放”的形式发生, 即小型基础设施排放的羽流含有相对大量的甲烷气体 (Duren等, 2019)。而来自这些点源的逃逸甲烷排放很可能贡献了区域排放总量的一大部分, 呈现显著的重尾分布特征 (Frankenberg等, 2016)。位于晋东南地区的长治是中国重要的煤炭能源基地, Wang等 (2021) 发现山西长治地下矿井开采过程中产生的甲烷排放占当地总排放量的95%以上。在大型化石燃料开采地区, 可能存在数千个这样的排放点源 (Lyon等, 2016)。横跨新墨西哥州和德克萨斯州的二叠纪盆地是美国最大的油气生产盆地, Zhang等 (2020) 发现该地区油气生产过程中产生的甲烷排放量高达 270 ± 50 万吨/年, 这是美国油气产区有史以来报告的最大甲烷排放量。因此, 检测和修复化石燃料生产活动中的甲烷点源泄漏已被视为削减大气中温室气体浓度的重要手段 (Kuylenstierna等, 2021)。详尽地刻画这些重点区域煤矿与油气生产行业的甲烷点源排放动态, 对于弥合自下而上和自上而下的人为甲烷排放估算之间的差距至关重要, 且有助于理解能源行业如何促使大气甲烷浓度快速增长。

卫星遥感为系统监测全球油气生产领域甲烷

点源排放提供了重要的技术手段 (Jacob等, 2016)。高光谱成像光谱仪在晴空下探测到的短波红外范围内 ($\sim 1600\text{--}2500\text{ nm}$) 的后向散射太阳辐射可用于大气甲烷柱浓度 (X_{CH_4}) 反演。例如大气图谱扫描成像吸收光谱仪 (SCIAMACHY) (Frankenberg等, 2011)、温室气体观测卫星 (GOSAT) (Kuze等, 2020) 和对流层观测仪 (TROPOMI) (Zhang等, 2020) 等已经实现了对全球及区域尺度上 X_{CH_4} 的反演, 但这些星载传感器空间分辨率较粗, 限制了其在甲烷排放点源监测中的应用 (Pandey等, 2019; Schneising等, 2020)。

甲烷排放点源监测需要高空间分辨率的高光谱成像仪探测数据, 相应的应用案例展示了其在甲烷羽流遥感反演方面的潜力: 如Thompson等 (2016) 使用Hyperion高光谱数据监测了美国加州阿利索峡谷的甲烷泄漏排放; Guanter等 (2021) 评估了PRISMA卫星在监测和量化全球不同地区来自化石燃料生产活动的甲烷点源排放方面的潜力; 中国的高分五号星 (GF-5) 与资源一号02D星 (ZY1-02D) 搭载的可见短波红外高光谱成像仪 (AHSI) 也已成功用于美国二叠纪盆地区域甲烷点源的排放监测 (Irakulis-Loitxate等, 2021)。加拿大的GHGSat卫星专门设计用于在 $12\times 12\text{ km}^2$ 空间范围内, 以25 m的高空间分辨率来监测甲烷点源 (探测精度 $\sim 1\%\text{--}15\%$) (Jervis等, 2021)。

此外, 多光谱卫星Landsat 8 (Irakulis-Loitxate等, 2022)、Sentinel-2A/2B (Varon等, 2021) 和WorldView-3 (Sánchez-García等, 2022) 最近被证明可用于绘制发生在明亮且均质区域表面上的超级甲烷排放源。但由于光谱分辨率较粗, 多光谱成像仪对甲烷点源的检测极限仍远不如高光谱成像仪。

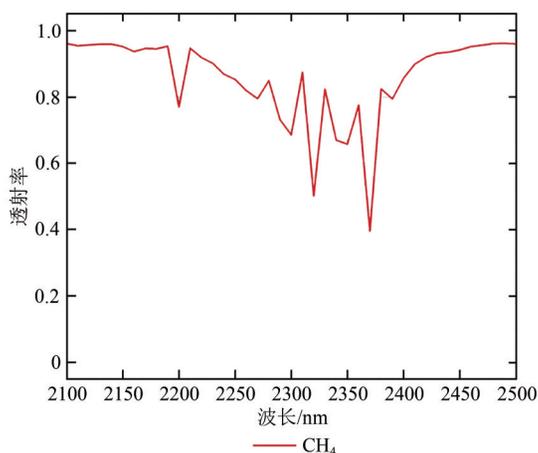
2021年9月7日, 中国在太原卫星发射中心成功发射高分五号02星 (GF-5 02)。卫星搭载的高光谱成像仪载荷 (AHSI) 兼顾宽覆盖、宽谱段并具备高定量化水平, 具有甲烷排放点源监测的潜力。为进一步有效评估GF-5 02星在检测和量化化石燃料生产活动中的甲烷排放点源的应用潜力, 本文利用GF-5 02AHSI数据与欧空局TROPOMI产品对中国山西长治、美国二叠纪盆地的甲烷排放热点区域开展点源排放异常遥感识别和量化, 以期协助能源行业未来的甲烷减排工作。

2 数据与方法

2.1 高分五号02星高光谱与TROPOMI遥感数据

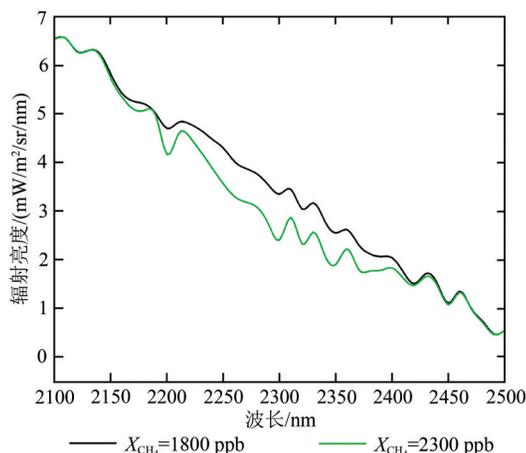
AHSI是GF-5 02星的主载荷之一，可以获得60 km幅宽、30 m空间分辨率以及400—2500 nm光谱范围（光谱分辨率：5—10 nm）共330个光谱通道的地物光谱信息。大气温室气体中的甲烷在

短波红外范围内的吸收特征由MODTRAN中的大气辐射传输模拟得到，如图1(a)所示。同时，还基于MODTRAN模拟了GF-5 02AHSI在短波红外区域中当 $\Delta X_{\text{CH}_4}=500$ ppb时的大气顶层辐射亮度变化，如图1(b)所示。甲烷在2300 nm附近呈现出较强的吸收特征，而GF-5 02AHSI的2100—2450 nm窗口对 X_{CH_4} 变化较为敏感，如图1(c)中红线所示。本文使用该窗口波段反演甲烷点源柱浓度。



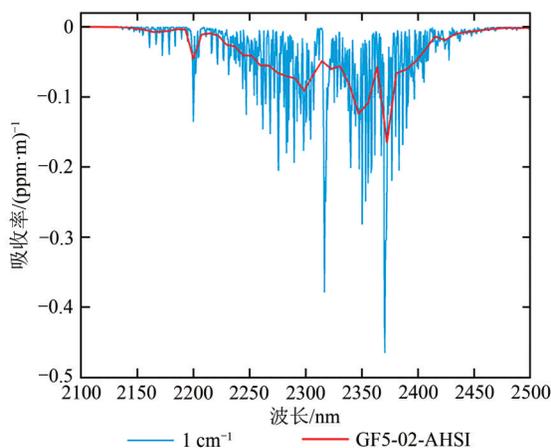
(a) 短波红外范围内 CH_4 的透射率

(a) Transmittance of methane in the SWIR part of the spectrum



(b) 当 $\Delta X_{\text{CH}_4}=500$ ppb时，模拟GF-5 02AHSI在短波红外范围内观测的大气顶层辐射亮度变化

(b) Simulated top-of-atmosphere radiance spectra in the SWIR as measured by GF-5 02AHSI, for different methane levels ($\Delta X_{\text{CH}_4}=500$ ppb)



(c) ΔX_{CH_4} 反演中将单位甲烷吸收光谱 s 作为目标信号

(c) Example of a unit methane absorption spectrum s used as target signature by ΔX_{CH_4} retrieval

图1 GF-5 02AHSI短波红外谱段对甲烷探测的敏感性

Fig. 1 Sensitivity of GF-5 02AHSI shortwave infrared (SWIR) measurements to methane

搭载在“哨兵5号”先驱卫星(S5P)的TROPOMI载荷具有2600 km幅宽、星下点 $7 \times 3.5 \text{ km}^2$ 空间分辨率(2019年8月6日起为 $5.5 \times 3.5 \text{ km}^2$)，其本地赤道过境时间约为13:30 pm，时间分辨率

为1天。基于氧A波段(Oxygen-A, 760 nm)和短波红外区域(SWIR)的吸收特征，TROPOMI可以反演获取大气 X_{CH_4} ，从而监测全球 X_{CH_4} 高值地区。TROPOMI的 X_{CH_4} 产品与全球总碳柱观测网站

(TCCON) (Wunch 等, 2011) 的地基观测结果比较显示出良好的一致性, 其平均偏差为-4.3 ppb, 站点间的变异性为7.4 ppb (Hasekamp 等, 2019)。

为识别全球甲烷排放热点区域, 本研究首先基于谷歌地球引擎平台 (GEE), 选择经过转换处理的 TROPOMI OFF/L3_CH₄ 产品, 以 QA>0.5 的标准对数据进行筛选, 并以年度为时间单位进行均值合成 (2021 年 1—12 月)。然后, 参照 Zhang 等 (2022) 的做法, 以研究区内 X_{CH₄} 合成结果的中值来定义甲烷背景浓度 (X_b), 在年度合成结果中减去该背景浓度来提取 X_{CH₄} 异常高值区域。

2.2 甲烷点源柱浓度反演

利用 GF5-02-AHSI 数据与优化的匹配滤波算法开展甲烷点源柱浓度反演。匹配滤波算法已成功用于机载和星载高光谱的甲烷点源柱浓度反演 (Duren 等, 2019; Thompson 等, 2015; Thorpe 等, 2020; Foote 等, 2020)。该算法的核心思路是: 每个输入光谱辐射值都可以表示为单位面积 (或像元) 无甲烷增强的背景环境辐射亮度加上其因甲烷浓度增量变化而引起的辐射扰动。这被建模为所谓的目标光谱辐射, 它代表单位面积甲烷吸收的辐射增量转移信号。甲烷点源反演的目标参量是甲烷点源柱浓度 X_{CH₄} 相对于周围背景 X_b 的逐像元增强, 即 ΔX_{CH₄}=X_{CH₄}-X_b (单位: ppb)。具体计算形式如下:

$$\hat{\alpha}_i = \frac{(L_i - \boldsymbol{\mu})^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{t}}{\mathbf{t}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{t}} \quad (1)$$

式中, L_i 是输入的观测辐射值, $\boldsymbol{\mu}$ 和 \mathbf{C} 是背景辐射的均值和协方差, \mathbf{t} 是目标光谱辐射扰动量, 表示由于甲烷浓度增强引起的相对于背景辐射信号的扰动值, T 表示转置。目标光谱辐射扰动量 \mathbf{t} 由单位甲烷吸收光谱 \mathbf{s} 与背景辐射均值 $\boldsymbol{\mu}$ 相乘获得。单位甲烷吸收光谱 \mathbf{s} 则使用 MODTRAN 中的大气辐射传输模拟得到 (Berk 等, 2014), 如图 1 (c) 中蓝线所示。

目前各种改进的匹配滤波算法中, 例如 Foote 等 (2020) 的算法仅考虑了理想地形条件下低反照率的优化问题, 未考虑到高度异质、地势起伏较大等复杂地形条件对甲烷反演带来的干扰。在复杂地形条件下, 随着地表反照率的降低, 以绝对辐射表征的吸收信号也会随之减弱, 更难检测到甲烷柱浓度增强的信号。因此, 鉴于复杂地形

条件会妨碍真实甲烷羽流的检测并影响羽流的检测极限水平 (Guanter 等, 2021), 本研究在 Foote 等 (2020) 的算法基础上, 通过校正第 i 个像素地表反照率因子结构项 (r_i) 中卫星观测的辐亮度 (L_i) 以及基于重加权的 L2 范数 (reweighted- ℓ_2) 构建目标函数, 发展了 Foote 等 (2020) 的反演算法, 优化了背景信号的估算, 有效抑制了复杂地形条件对反演的干扰。算法优化细节具体如下:

由于真实地表是非朗伯体的, 地表二向反射特性明显 (林兴稳 等, 2020)。引入经验的 Minnaert 系数 k 来对地表的二向反射特性进行描述, 当 $k=1$ 表示地表是朗伯体, k 值的减小表示地表各向异性增加 (Colby, 1991; Smith 等, 1980)。

$$L_H = L_T \left(\frac{\cos \theta_s}{\cos \gamma_s} \right)^k \quad (2)$$

式中, L_H 为平坦地表下观测辐亮度, L_T 为山区地表下观测辐亮度。cos θ_s 是太阳入射天顶角余弦, cos γ_s 为太阳相对入射天顶角余弦。

标量反照率因子 r_i 由背景辐射均值 $\boldsymbol{\mu}$ 和平坦地表下观测的第 i 个像素的辐亮度 L_{Hi} 计算:

$$r_i = \frac{L_{Hi}^T \boldsymbol{\mu}}{\boldsymbol{\mu}^T \boldsymbol{\mu}} \quad (3)$$

然后, 基于标量反照率因子 r_i 构建目标函数 $\hat{\alpha}_i^p$:

$$\hat{\alpha}_i^p = \operatorname{argmin} \left(\mathbf{d}^T \mathbf{C}^{p-1} \mathbf{d} + r_i \omega_i^p \|\alpha_i^p\|_2 \right) \quad (4)$$

$$\mathbf{d} = L_{Hi} - r_i \alpha_i^p \mathbf{t}(\boldsymbol{\mu}^p) - \boldsymbol{\mu}^p \quad (5)$$

本文使用 reweighted- ℓ_2 ($\|\alpha_i^p\|_2$) 解决上述优化问题。其中, 用于第 p 次迭代的正则化权重 ω_i^p 为

$$\omega_i^p = \frac{1}{\alpha_i^{p-1} + \epsilon} \quad (6)$$

基于 reweighted- ℓ_2 的逐像元 $\hat{\alpha}_i^p$ (ΔX_{CH_4}) 为

$$\hat{\alpha}_i^p = \max \left[\sqrt{\frac{\left((L_i - \boldsymbol{\mu}^p)^T \mathbf{C}^{p-1} \mathbf{t}(\boldsymbol{\mu}^p) - \omega_i^p \right)^2}{\left(\mathbf{t}(\boldsymbol{\mu}^p) \right)^T \mathbf{C}^{p-1} \mathbf{t}(\boldsymbol{\mu}^p)}}}, 0 \right] \quad (7)$$

$$\sqrt{\frac{\left((L_i - \boldsymbol{\mu}^p)^T \mathbf{C}^{p-1} \mathbf{t}(\boldsymbol{\mu}^p) - \omega_i^p \right)^2}{\left(\mathbf{t}(\boldsymbol{\mu}^p) \right)^T \mathbf{C}^{p-1} \mathbf{t}(\boldsymbol{\mu}^p)}}}$$

式中, \mathbf{C}^p 和 $\boldsymbol{\mu}^p$ 会每次重加权迭代重新计算。

2.3 甲烷羽流检测

利用半自动方法可检测得到甲烷点源羽流。首先, 使用高斯滤波对 ΔX_{CH_4} 图像进行平滑去噪处

理, 以滤波结果的中值作为阈值来分割 ΔX_{CH_4} 图像, 去除背景干扰。然后, 将去除背景的 ΔX_{CH_4} 图像叠加在高分辨率遥感影像上, 目视判读选取具有典型气体羽流形状的地方, 即高 ΔX_{CH_4} 值从点源处逐渐顺风降低。再将确定的候选甲烷羽流与 2100—2400 nm 范围内光谱辐射亮度的 PCA 变换分量进行比较, 通过掩膜将候选羽流与地表人工构筑物等干扰带来的假信号进行分离。最终, 将提取的候选羽流与该区域的风速风向数据、高分辨率遥感影像共同配准。如果候选羽流与风向大致一致, 并且从高分辨率的遥感影像中找到了排放基础设施, 则提取的候选羽流被认为是真实的甲烷点源排放。其中, 风速风向数据取自美国宇航局 GEOS-FP 和欧空局 ERA5 气象再分析产品 (1-h 平均 U_{10} 数据集), 空间分辨率分别为 $0.25^\circ \times 0.3125^\circ$ 和 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。高分辨率遥感影像来自谷歌地球与高分二号影像数据。

2.4 甲烷点源排放通量速率估算

甲烷排放通量速率采用综合质量增强 (IME) 方法对检测到的甲烷羽流进行计算。由于从单个点源处探测到的甲烷瞬时羽流相对较小, 很多点源无法遵循高斯行为从而使得高斯羽流反演通量速率存在较大误差。IME 方法将总羽流质量与点源排放速率联系起来 (Varon 等, 2018), 该方法取决于羽流的有效风速和羽流的特征大小, 其误差较小。基于 IME 模型和羽流中的 ΔX_{CH_4} 值计算甲烷排放通量速率 Q (单位: kg/h)。具体计算过程如下:

$$\text{IME} = k \sum_{i=1}^{n_p} \hat{\alpha}(i) \quad (8)$$

式中, n_p 是甲烷羽流中的像元数目, $k=5.155 \times 10^{-3}$ kg/ppb, k 是通过考虑阿伏伽德罗定律 (1 mol $\text{CH}_4 = 0.01604$ kg)、GF-5 02AHSI 数据的空间分辨率 (30 m) 以及假设大气层的厚度 (8 km) 计算获取的。排放通量速率 Q 的具体计算公式如下:

$$Q = \frac{U_{\text{eff}} \cdot \text{IME}}{L} \quad (9)$$

式中, L 是甲烷羽流覆盖区域面积的平方根, U_{eff} 是有效风速, 根据可测量的 10 m 风 U_{10} 计算得出:

$$U_{\text{eff}} = a \cdot U_{10} + b \quad (10)$$

U_{eff} 与 U_{10} 的关系是基于 GF-5 02AHSI 数据的空间分辨率和 ΔX_{CH_4} 反演精度而执行中尺度气象模式 (WRF) 耦合大涡模拟 (LES) 得出。此处 WRF-LES 采用三层单向嵌套技术, 由 ERA5 气象再分析产品驱动, 甲烷以惰性气体的方式添加 (Nottrott 等, 2014; Nunalee 等, 2014; Varon 等, 2018)。模拟区域的内层水平网格分辨率为 30 m (与 GF-5 02AHSI 一致), 垂直分辨率在近地为 20 m, 到高空逐步拉伸至 200 m。通过 3 小时以上的模拟预热使得大气湍流充分发展, 得到符合实际的三维甲烷羽流, 将其进行垂直积分和变量转换得到二维的羽流仿真图像。模拟中排放通量速率 Q 已知, U_{eff} 通过式 (9) 变形求得, U_{10} 由模式输出得到。与 Cusworth 等 (2019) 使用的对数模型不同, 线性模型在这种情况下得到了最佳拟合, 中国山西长治、美国二叠纪盆地的 10 m 风速与有效风的关系具体如图 2 所示。

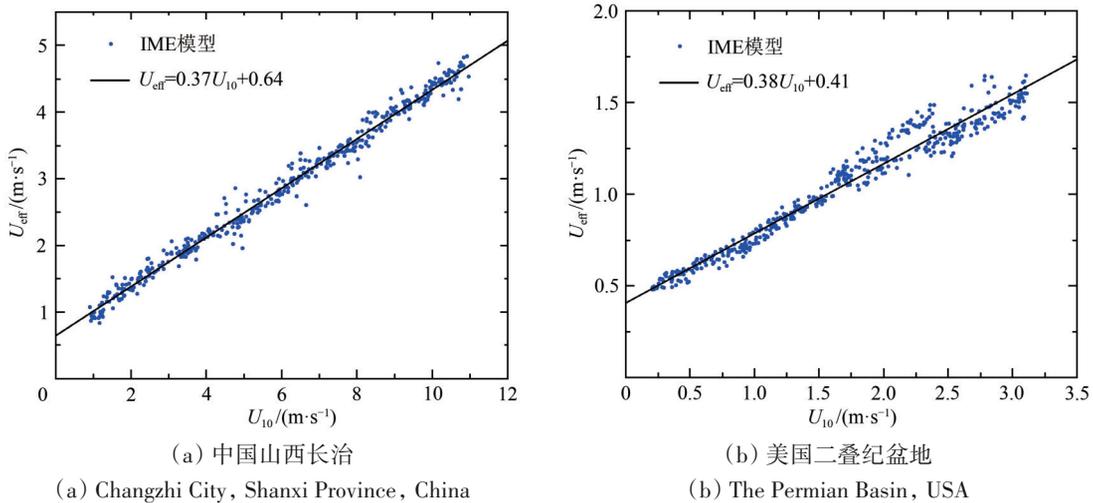


图 2 10 m 风 (U_{10}) 与有效风 (U_{eff}) 的散点关系图

Fig. 2 Scatter plots relating the 10-m wind speed (U_{10}) and effective wind speed (U_{eff})

2.5 甲烷点源排放通量速率的不确定性评估

为了估计排放通量速率 Q 的不确定性，采用Cusworth等(2020)的方法，将IME和 U_{10} 中的随机误差传播到通量速率 Q 中($1-\sigma$ 精度误差)， U_{10} 是主要的误差贡献。假设GEOS-FP U_{10} 和ERA5 U_{10} 数据的风速随机误差为50%，与Varon等(2020)假设的风速中约1.5 m/s标准偏差一致。使用式(9)、(10)以及IME和L的真实值，将对应于50%随机误差 U_{10} 值的随机分布转换为 Q 值的分布。 U_{10} 误差贡献与来自IME的标准误差以生成最终的 Q 随机误差。

此外，由于缺少 X_{CH_4} 及甲烷排放通量的地面观测数据，通过使用WRF-LES进行基于模拟的研究，间接评估了甲烷点源柱浓度以及排放通量速率的反演精度。

3 监测结果与分析

3.1 中美典型甲烷排放热点区域识别

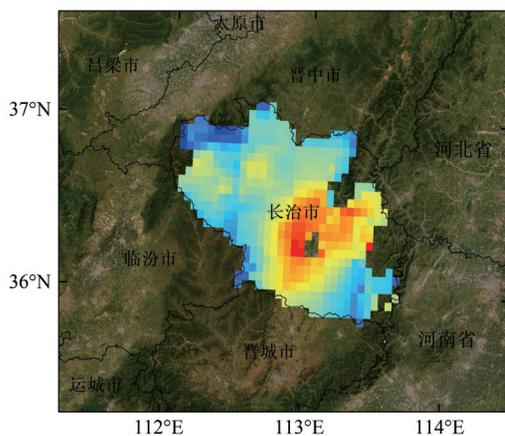
2021年，TROPOMI监测到中国山西长治与美国二叠纪盆地均存在显著的 X_{CH_4} 异常区域，如

图3(a)和3(b)所示。作为中国的十大煤炭城市之一，2021年山西长治 X_{CH_4} 异常区域主要位于潞州区、潞城区、上党区、屯留区与长子县，相对于周围背景其 ΔX_{CH_4} 高达约40 ppb。图3(a)的结果表明山西长治当地在地下开采过程中以及在矿后活动中回收利用瓦斯发电时产生了大量甲烷泄漏。

作为美国最大的油气生产地区，2021年二叠纪盆地 X_{CH_4} 异常区域大致位于新墨西哥州与德克萨斯州交界处的特拉华子盆地和米德兰子盆地，其 ΔX_{CH_4} 也高达约40 ppb。图3(b)结果表明这两处子盆地在油气开采到集输、长输、储存和供应等过程中的甲烷泄漏量很大。

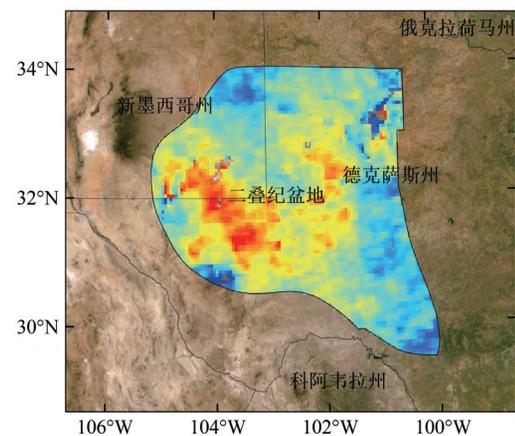
3.2 热点区域甲烷点源柱浓度反演结果

尽管TROPOMI能够探测到中国山西长治与美国二叠纪盆地存在 X_{CH_4} 显著增强的区域，但未能成功检测到具体的甲烷点源排放设施。基于GF-5 02AHSI数据，在中国山西长治与美国二叠纪盆地成功地探测到了4处排放点源，其排放速率均大于500 kg/h，具体结果如下。



(a) 长治甲烷柱浓度增强年均值空间分布
(2021年1月—12月)

(a) Spatial distribution of annual average methane column enhancement in Changzhi (from January to December in 2021)



(b) 二叠纪盆地甲烷柱浓度增强年均值空间分布
(2021年1月—12月)

(b) Spatial distribution of annual average methane column enhancement in Permian Basin (from January to December in 2021)

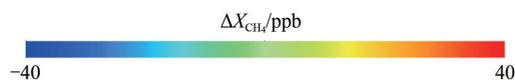


图3 TROPOMI在长治和二叠纪盆地监测到的2021年 ΔX_{CH_4}

Fig. 3 ΔX_{CH_4} derived from TROPOMI observations over Changzhi and Permian Basin in 2021

2021年11月9日，GF-5 02星AHSI载荷监测到山西省长治市沁源县的两处甲烷异常排放点源，如图4所示。两处点源分别位于山西马军峪常信煤

矿和山西通洲集团安达煤矿，两处点源设施的甲烷异常浓度梯度分别高达25—560 ppb。通过谷歌地球影像及高分二号卫星影像数据分析表明，监

测到的甲烷点源泄漏排放来自于这两处煤矿附近的瓦斯发电厂。两处排放量分别高达 4.5 ± 2.0 t/h (4455 ± 1957 kg/h)、 2.7 ± 1.2 t/h (2685 ± 1182 kg/h)。与 Guanter 等 (2021)、Sánchez-García 等 (2022)

分别基于 PRISMA 和 WorldView-3 卫星在长治市屯留区地下矿井检测到的甲烷点源的排放量相当 (图 6 (a))。

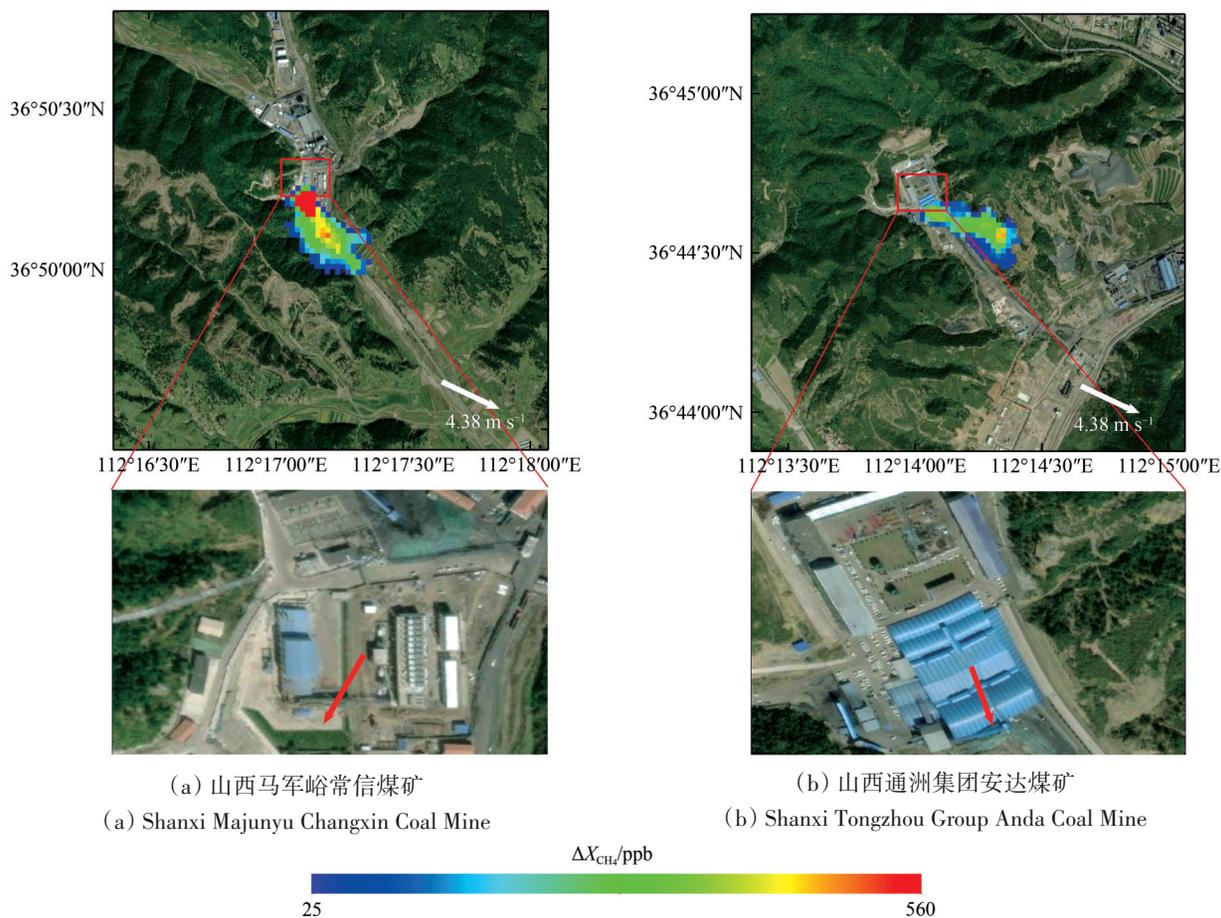


图 4 在长治沁源县检测到的甲烷羽流

Fig. 4 Methane plumes detected in Qinyuan County, Changzhi City

2022年2月9日, GF-5 02星 AHSI 载荷监测到美国二叠纪盆地的两处典型甲烷排放点源, 如图 5 所示。两处点源分别位于新墨西哥州埃迪县的 EOG 页岩气井和 Matador 压缩机站, 两处点源设施的甲烷异常浓度梯度分别高达 25—350 ppb。其中, EOG 页岩气井产生了大量甲烷泄漏 (图 5 (a)), 排放量高达 11.7 ± 4.4 t/h (11746 ± 4401 kg/h)。相比 Irakulis-Loitxate 等 (2021) 在二叠纪盆地的特拉华子盆地基于 GF5-01 星的甲烷点源监测结果 (图 6 (b)), 这是迄今为止在此地区发现的最大甲烷泄漏源。Matador 压缩机站的排放速率相对小 (图 5 (b)), 仅为 0.6 ± 0.2 t/h (629 ± 162 kg/h) (图 6 (b))。

3.3 甲烷点源排放强度估算

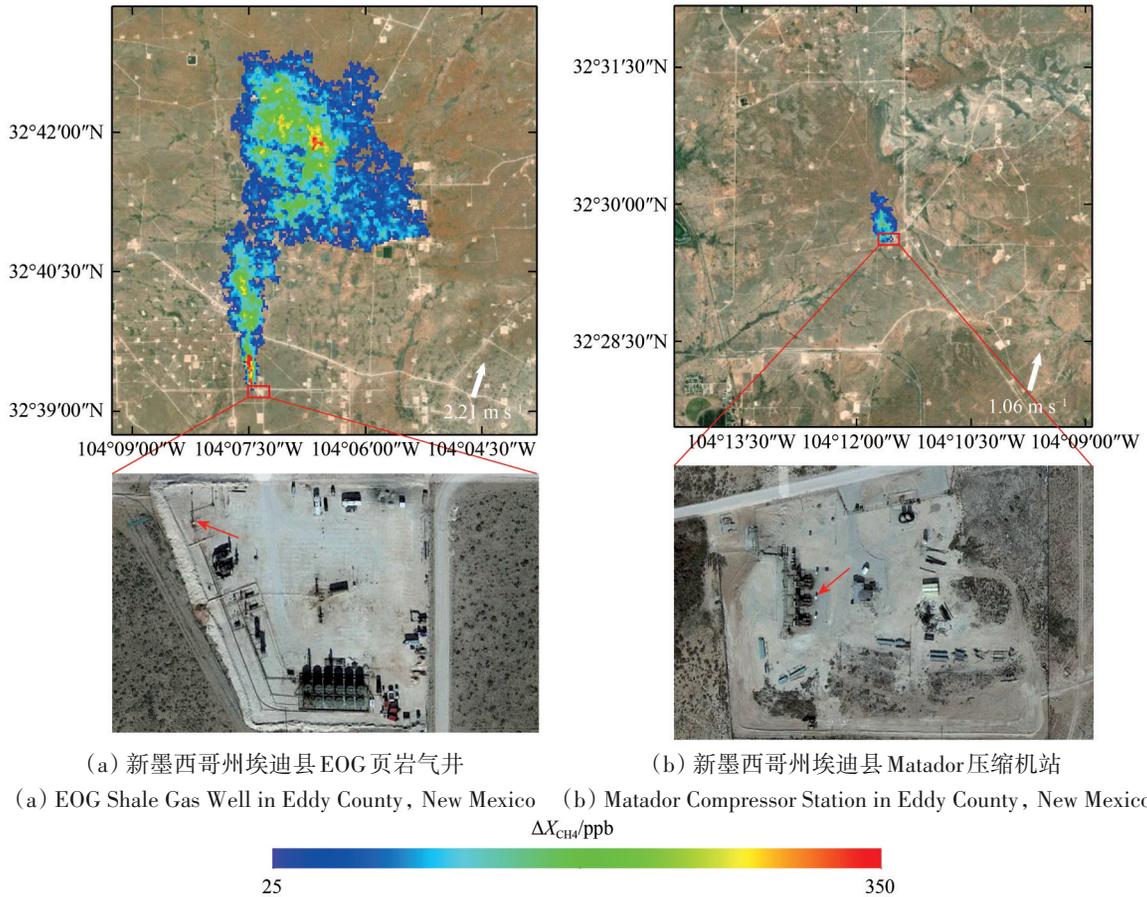
研究检测到的甲烷点源仅代表卫星过境时排

放强度高于 500 kg/h 的甲烷羽流快照。如图 7 和图 8 所示, 探测到的甲烷点源与 Worden 等 (2022) 和 Zhang 等 (2020) 基于自上而下方法所估算的高甲烷通量区域相匹配, 但与全球自下而上的排放清单 (Scarpelli 等, 2022) 的一致性较差。由于化石燃料开采活动中的点源排放大多是间歇性的, 假设检测到的点源代表了区域大型排放源的抽样统计, 进而可以汇总升尺度到具有代表性的年度估计 (逐小时到年排放量估算), 可与已有结果在相同的基础上进行比较。

将 GF-5 02 星在山西长治检测到的甲烷点源与利用 PRISMA (Guanter 等, 2021) 和 WorldView-3 (Sánchez-García 等, 2022) 卫星的检测结果进行比较, 可以发现 9 个甲烷点源分别位于长治屯留区和沁源县, 其中 8 个点源的排放速率均大于 1000 kg/h,

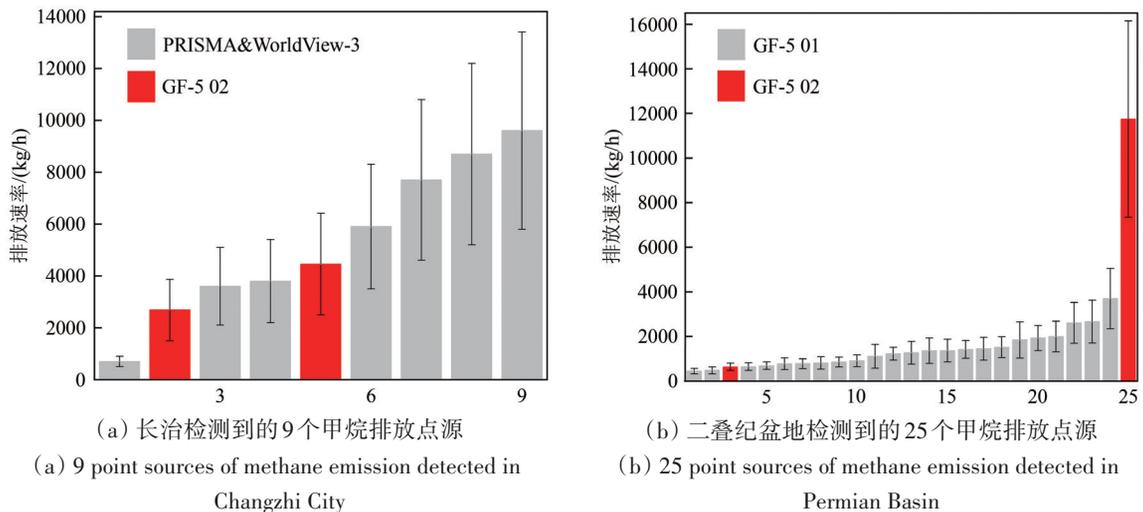
如图6(a)所示。山西长治地区有60多座煤矿，相比之下，卫星在当地检测到的甲烷点源数量较少。此外，煤矿矿井在生产与检修时监测到的 X_{CH_4} 差异显著，矿井的甲烷排放速率会随时间变化发生较大波动。因此，根据这些点源排放量进行汇总升尺度估算（逐小时到年排放量估算）的结果

可能存在较大不确定性。但在逐小时尺度内，来自这些点源设施的逃逸甲烷排放量高达46.8 t，对山西省煤炭甲烷排放总量（2021年为1310万t）的贡献仍不容忽视。同时，山西长治的 X_{CH_4} 异常区域监测结果也表明当地在煤炭开采以及矿后活动中产生了大量的甲烷泄漏。



(a) 新墨西哥州埃迪县 EOG 页岩气井 (b) 新墨西哥州埃迪县 Matador 压缩机站
 (a) EOG Shale Gas Well in Eddy County, New Mexico (b) Matador Compressor Station in Eddy County, New Mexico
 $\Delta X_{CH_4}/ppb$

图5 在二叠纪盆地检测到的甲烷羽流
 Fig. 5 Methane plumes detected in Permian Basin



(a) 长治检测到的9个甲烷排放点源 (b) 二叠纪盆地检测到的25个甲烷排放点源
 (a) 9 point sources of methane emission detected in Changzhi City (b) 25 point sources of methane emission detected in Permian Basin

图6 在长治和二叠纪盆地检测到的甲烷点源排放量对比
 Fig. 6 Comparison of methane point source emissions monitored in Changzhi and Permian Basin

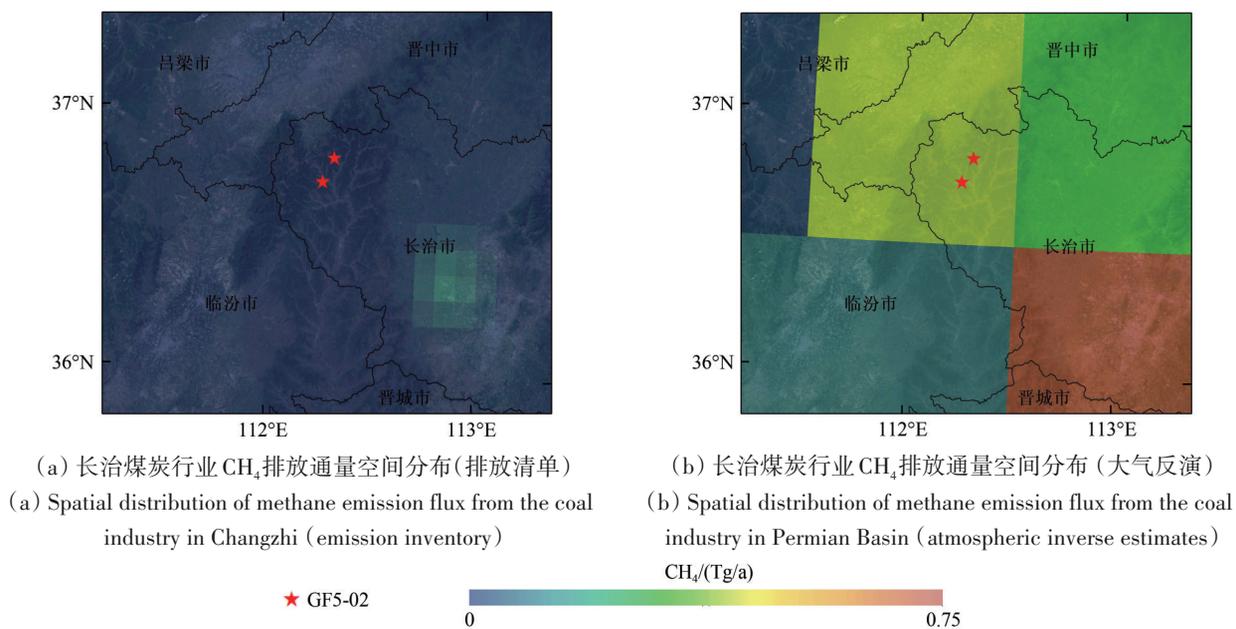


图7 长治地区卫星探测到的甲烷点源与全球燃料利用清单的自下而上估计、GOSAT观测的自上而下排放估算的共同定位对比

Fig. 7 Satellite-detected methane point sources over Changzhi co-located with the bottom-up emission inventory from the Global Fuel Exploitation Inventory, and top-down emission estimate from GOSAT observations

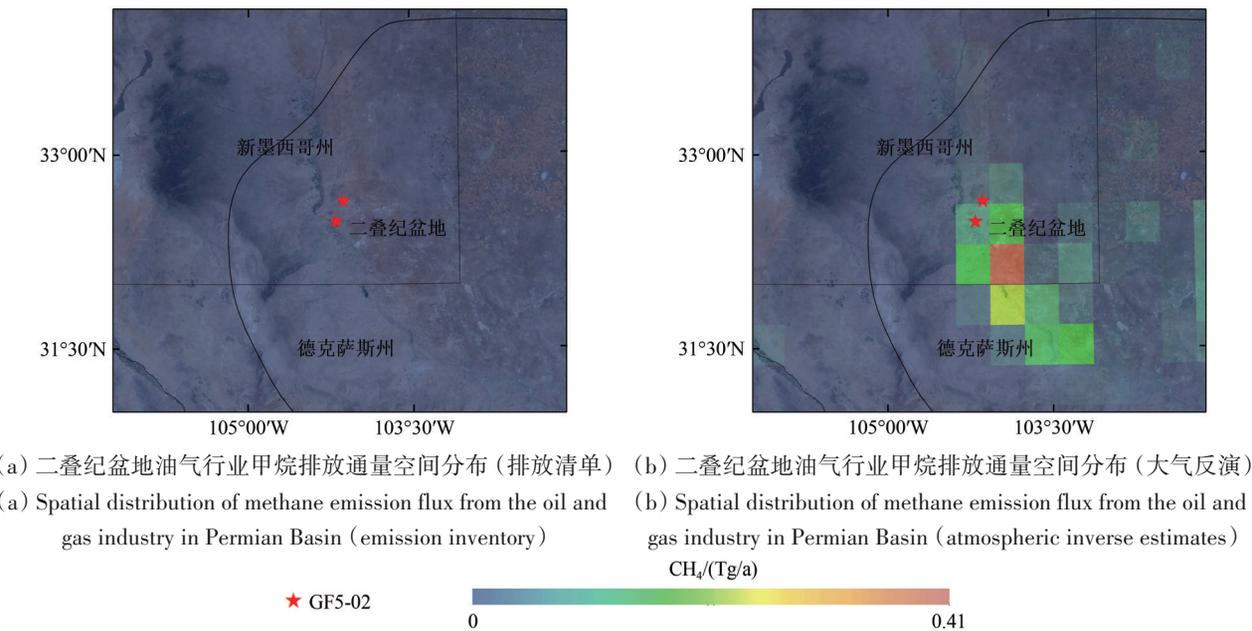


图8 二叠纪盆地地区卫星探测到的甲烷点源与全球燃料利用清单的自下而上估计、TROPOMI观测的自上而下排放估算的共同定位对比

Fig. 8 Satellite-detected methane point sources over Permian Basin co-located with the bottom-up emission inventory from the Global Fuel Exploitation Inventory, and top-down emission estimate from TROPOMI observations

通过比较发现, GF-5 01星 (Irakulis-Loitxate等, 2021) 与GF-5 02星在二叠纪盆地检测到的25个甲烷点源均位于特拉华子盆地, 其中15个点源的排放速率均大于1000 kg/h, 如图6 (b) 所示。与已有研究对比发现, 二叠纪盆地东部的巴内

特页岩盆地内, 17400个井场中仅有5个井场的排放速率超过300 kg/h (Lyon等, 2015; Zavala-Araiza等, 2017)。而美国四角地区检测到的250个甲烷点源中仅有7个点源的排放速率大于1000 kg/h (Frankenberg等, 2016)。因此, 基于GF-5星的监

测结果表明，特拉华子盆地甲烷点源排放速率的幅度远远高于巴内特页岩盆地和四角地区监测到的点源排放。进一步，我们利用GF-5 01星与GF-5 02星分别在2020年2月8日和2022年2月9日检测到的甲烷羽流，对其排放通量速率进行汇总升尺度估算（逐小时到年排放量估算）。通过与Frankenberg等（2016）给出的四角地区年度排放通量进行直接比较发现，二叠纪盆地甲烷点源的排放通量分别为28万 t/年和11万 t/年，GF-5 01的估算结果最接近四角地区的30万 t/年，而GF-5 02星的估算结果占四角地区的三分之一。相比于四角地区检测到的排放点源，GF-5卫星在二叠纪盆地检测到的点源数量虽然少，但甲烷排放量异常大，这凸显了目前二叠纪盆地区域显著的油气设施甲烷泄漏情况。此外，根据Irakulis-Loitxate等（2021）在二叠纪盆地自上而下的区域综合排放估算结果（73万 t/年）来看，GF-5 01星与GF-5 02星监测的点源排放量分别占该区域甲烷排放量

的38%和15%，体现了油气设施甲烷逃逸排放的重尾分布特征（Alvarez等，2018；Brandt等，2016）。

3.4 甲烷点源排放强度的不确定性

基于GEOS-FP和ERA5气象再分析风速产品，评估了GF-5 02星检测到的甲烷排放点源通量速率（ Q ）、相对误差与绝对不确定性（ $1-\sigma$ ）。如表1所示，本文检测到的点源的相对精度误差范围在25%—48%，主要来自于 U_{10} 不确定性的贡献（23%—40%），而IME模型计算中反演噪声的不确定性贡献通常在2%—7%。本研究中 U_{10} 与反演噪声的不确定性贡献范围与Varon等（2020）的研究大致接近（ U_{10} 贡献16%—27%，反演贡献7%，总误差40%—45%）。不同风速下，甲烷排放点源通量速率 Q 之间的差异范围在11%—21%，大致接近 Q 估算的相对精度误差范围的下限（25%）。因此，本文利用GF-5 02星反演甲烷点源排放通量速率的不确定性主要由卫星过境期间点源处的风速变化所引起。

表1 GF5-02星在长治和二叠纪盆地监测到的甲烷点源排放速率

Table 1 Emissions rates for the methane point sources detected over Changzhi and Permian Basin with GF5-02 imaging spectroscopy

编号	GEOS-FP/(m/s)	ERA5/(m/s)	IME/GEOS-FP Q /(kg/h)	IME/ERA5 Q /(kg/h)
图4(a)	4.38	5.88	4455±1957	5633±2663
图4(b)	4.38	5.88	2685±1182	3394±1656
图5(a)	2.21	1.98	11746±4401	10505±3789
图5(b)	1.06	1.57	629±162	765±248

此外，查询了长治在GF-5 02星过境邻近时间点（2021-11-09 03:17:32 UTC）的地面气象站逐小时观测资料（表2），并与GEOS-FP和ERA5再分析产品的提取结果做了对比。对比结果表明，基于再分析产品提取的点源设施处风向信息与地面气象站逐小时观测结果基本吻合，风速偏差小于20%，低于通量速率（ Q ）估算中 U_{10} 不确定性的贡献度（23%—40%）。这也表明本研究使用的欧美全球再分析产品适用于研究区域，带来的风速偏差在可控范围。模型计算需要点源附近的流场信息，对此气象站点观测与大气再分析数据均存在误差：气象站数据精确度高、瞬时性强，但空间代表性较差，复杂地形条件下变量值在观测站点与在排放点有较大变化，存在不确定性；气象再分析数据可以反映流场在地形附近的变化，但其本身是气象模型融合观测的产物，且受制于空间分辨率难以

准确对应具体空间点。

表2 长治沁源县地面风速风向观测数据

Table 2 The observed wind speed and wind direction in Qinyuan County, Changzhi City

站点编号	站名	时间 (UTC)	2分钟平均风向	2分钟平均风速/(m/s)
B7586	赤石桥	02:00	NNW	4.7
		03:00	N	5.6
		04:00	NNW	5.7
B7590	聪子峪	02:00	NNE	4.2
		03:00	NNE	5.2
		04:00	NNE	3.9

最后，为验证甲烷点源柱浓度反演精度，我们比较了GF5-02星的反演结果与卫星过境邻近时刻基于WRF-LES/ERA5的模拟结果，如图9、图10所示。可以看出，山西长治两处甲烷羽流的模拟

形态呈屋脊型，甲烷异常浓度最高达 560 ppb，朝东南方向扩散，蔓延距离分别为 0.6 km、0.7 km；二叠纪盆地两处甲烷羽流的模拟形态呈扇形，甲烷异常浓度最高达 350 ppb，朝东北方向扩散，蔓延距离分别为 6.9 km、1.1 km。上述 4 处点源模拟结果的扩散方向与卫星过境时刻的当地风向一致，而且模拟的甲烷羽流形态及柱浓度梯度的空间分布特征与卫星反演结果接近，表明基于 GF5-02 星的甲烷点源柱浓度反演具有较高精度。同时，为评估

甲烷点源排放通量速率的反演精度，统计了卫星过境前后 15 分钟内模拟结果的通量速率，如表 3 所示。使用模拟羽流估算的通量速率比使用 IME 方法的估算结果低约 22%—37%，甲烷点源位置处的风速差异可能是造成 GF-5 02 星遥感估算通量速率与模拟估计值之间差异的主导因素。这进一步表明由风速不确定性引起的甲烷点源排放通量速率估算值中存在 25%—48% 的相对精度误差是可靠的。

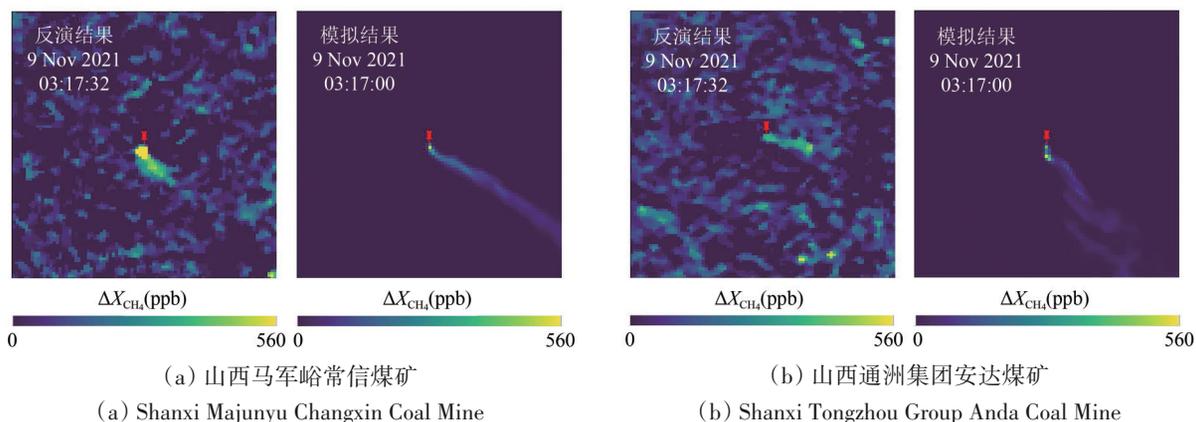


图9 长治沁源县反演结果与模拟结果对比

Fig. 9 Comparison of retrievals and simulation results in Qinyuan County, Changzhi City

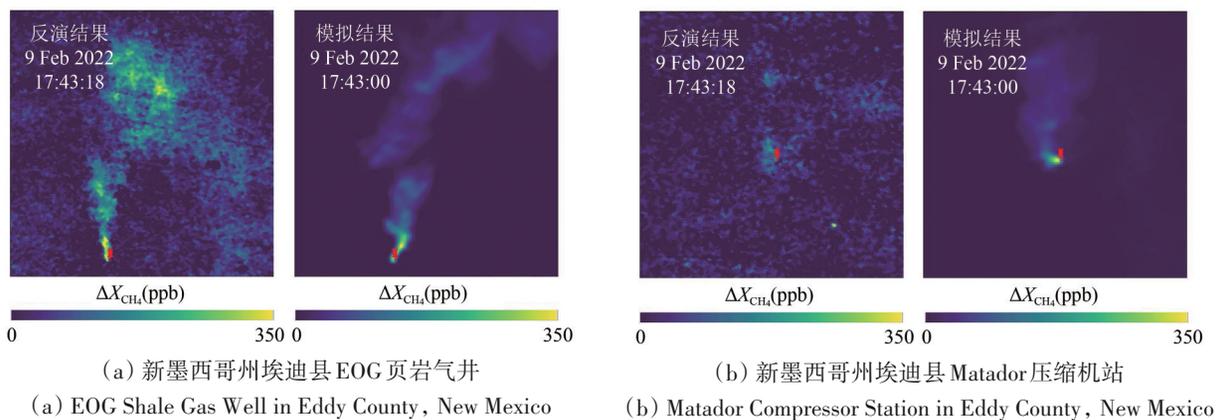


图10 二叠纪盆地反演结果与模拟结果对比

Fig. 10 Comparison of retrievals and simulations in Permian Basin

表3 本研究中使用IME方法与WRF-LES/ERA5模拟的点源排放速率对比

Table 3 Comparison of emission rate estimates (Q) from the IME-based method used in this study and the WRF-LES/ERA5 simulations

编号	WRF-LES/ERA5 Q/(kg/h) [95% CI]	IME/ERA5 Q/(kg/h)
图4(a)	4220[3880,5240]	5633±2663
图4(b)	2150[1990,2560]	3394±1656
图5(a)	8300[7900,10600]	10505±3789
图5(b)	500[480,610]	765±248

4 结 论

本文以国产GF-5 02AHSI遥感影像与欧空局TROPOMI产品为数据源,对中美两国典型甲烷排放热点区域及其点源开展了甲烷柱浓度遥感监测及排放量遥感估算。研究表明:

(1) GF-5 02星在中美两国典型甲烷排放热点区域内探测到了4处显著的甲烷点源泄漏排放以及相应的排放设施,排放速率均大于0.5 t/h。其中,二叠纪盆地监测到一处超级排放源,排放量高达 11.7 ± 4.4 t/h,是迄今为止在此地区发现的最大甲烷泄漏源。

(2) 根据全球不同气象再分析产品估算的甲烷点源排放通量速率,其差异范围在11%—21%。点源排放通量速率的估算会受到背景气象场的影响,点源设施处风速的不确定性贡献最大。

尽管GF-5 02星高光谱成像仪具有较高灵敏度和探测精度,在甲烷点源遥感识别和排放量估算中展现了巨大应用潜力,但由于复杂气象条件的干扰以及通量反演存在较大不确定性,GF-5 02星在甲烷点源遥感反演、甲烷羽流信号检测以及排放量化等方面仍存在较多问题,亟需进一步研究。综合目前的研究状况和存在的问题,甲烷点源排放遥感监测领域有以下几点展望:

(1) 目前,国内外在轨运行的陆地高光谱和多光谱成像仪在甲烷点源遥感监测及排放量化中展现出了巨大应用前景,但仍需充分挖掘国内外与GF-5 02星具有相似特征的卫星高光谱载荷的甲烷点源排放监测潜力。例如均搭载有高光谱成像仪的国产环境减灾二号A/B卫星(HJ-2A/2B)与资源一号02D/02E星(ZY-1 02D/02E);欧美地区在轨运行的GHGSat(Jervis等,2021)、PRISMA(Cogliati等,2021)和EnMAP(Guanter等,2015),以及未来几年将陆续发射的CHIME(Rast等,2021)、Planet-Tanager(<https://www.planet.com/pulse/hyperspectral-satellites/>[2022-09-19])、Carbon Mapper(<https://carbonmapper.org/>[2022-09-19])、EMIT(Green等,2020)和SBG(Turpie等,2023)等卫星。结合TROPOMI与2023年即将发射升空的MethaneSAT(<https://www.methanesat.org/>[2022-09-19])卫星载荷的每日高精度观测,还有如GF-5 01/02-VIMS、Sentinel-2A/2B、Landsat 8/9和WorldView-3等一系列对甲烷敏感性较弱但能在明

亮和均质区域表面获得长时间序列观测的星载多光谱载荷数据作为补充。基于上述这些星载高光谱或多光谱成像仪,对油气生产运输以及煤炭开采过程中的甲烷排放点源进行动态精准监测,可为中国能源部门、生态环境部门提供观测范围广、现势性强、精度可靠的甲烷点源柱浓度及排放估算结果,从而为改进自下而上的甲烷排放清单和制定更具针对性的甲烷减排行动计划提供强有力的技术支撑与理论依据,进一步推进中国自主的天基甲烷监测体系与应用技术的发展建设,助力生态文明建设,推动实现“双碳”国家重大战略目标。

(2) 薄云和气溶胶所带来的散射效应会干扰反演(Huang等,2020)。因此,后续需要提升星载成像光谱仪的观测性能,优化甲烷点源柱浓度反演算法,减小复杂气象状况给反演带来的干扰。

(3) 由于边界层条件(湍流和风速)的变化、光谱干扰的存在以及通量反演对复杂羽流结构的敏感性,将观测到的瞬时柱浓度转换为具有平均属性的通量速率仍然存在很大不确定性(Duren等,2019)。因此,未来需要优化背景气象场(点源处风速)的模拟,减小甲烷点源排放速率量化的不确定性。

参考文献(References)

- Alvarez R A, Zavala-Araiza D, Lyon D R, Allen D T, Barkley Z R, Brandt A R, Davis K J, Herndon S C, Jacob D J, Karion A, Kort E A, Lamb B K, Lauvaux T, Maasakkers J D, Marchese A J, Omara M, Pacala S W, Peischl J, Robinson A L, Shepson P B, Sweeney C, Townsend-Small A, Wofsy S C and Hamburg S P. 2018. Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain. *Science*, 361(6398): 186-188 [DOI: 10.1126/science.aar7204]
- Berk A, Conforti P, Kennett R, Perkins T, Hawes F and Van Den Bosch J. 2014. MODTRAN® 6: a major upgrade of the MODTRAN® radiative transfer code//2014 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS). Lausanne: IEEE: 1-4 [DOI: 10.1109/WHISPERS.2014.8077573]
- Brandt A R, Heath G A and Cooley D. 2016. Methane leaks from natural gas systems follow extreme distributions. *Environmental Science and Technology*, 50(22): 12512-12520 [DOI: 10.1021/acs.est.6b04303]
- Chen Z C, Jacob D J, Nesser H, Sulprizio M P, Lorente A, Varon D J, Lu X, Shen L, Qu Z, Penn E and Yu X Y. 2022. Methane emissions from China: a high-resolution inversion of TROPOMI satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(16): 10809-10826 [DOI: 10.5194/acp-22-10809-2022]
- Cogliati S, Sarti F, Chiarantini L, Cosi M, Lorusso R, Lopinto E, Miglietta F, Genesio L, Guanter L, Damm A, Pérez-López S, Scheffler

- D, Tagliabue G, Panigada C, Rascher U, Dowling T P F, Giardino C and Colombo R. 2021. The PRISMA imaging spectroscopy mission: overview and first performance analysis. *Remote Sensing of Environment*, 262: 112499 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112499]
- Colby J D. 1991. Topographic normalization in rugged terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(5): 531-537
- Cusworth D H, Duren R M, Thorpe A K, Tseng E, Thompson D, Guha A, Newman S, Foster K T and Miller C E. 2020. Using remote sensing to detect, validate, and quantify methane emissions from California solid waste operations. *Environmental Research Letters*, 15(5): 054012 [DOI: 10.1088/1748-9326/ab7b99]
- Cusworth D H, Jacob D J, Varon D J, Chan Miller C, Liu X, Chance K, Thorpe A K, Duren R M, Miller C E, Thompson D R, Frankenberg C, Guanter L and Randles C A. 2019. Potential of next-generation imaging spectrometers to detect and quantify methane point sources from space. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(10): 5655-5668 [DOI: 10.5194/amt-12-5655-2019]
- Duren R M, Thorpe A K, Foster K T, Rafiq T, Hopkins F M, Yadav V, Bue B D, Thompson D R, Conley S, Colombi N K, Frankenberg C, McCubbin I B, Eastwood M L, Falk M, Herner J D, Croes B E, Green R O and Miller C E. 2019. California's methane super-emitters. *Nature*, 575(7781): 180-184 [DOI: 10.1038/s41586-019-1720-3]
- Foote M D, Dennison P E, Thorpe A K, Thompson D R, Jongaramrungruang S, Frankenberg C and Joshi S C. 2020. Fast and accurate retrieval of methane concentration from imaging spectrometer data using sparsity prior. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(9): 6480-6492 [DOI: 10.1109/tgrs.2020.2976888]
- Frankenberg C, Aben I, Bergamaschi P, Dlugokencky E J, Van Hees R, Houweling S, Van der Meer P, Snel R and Tol P. 2011. Global column-averaged methane mixing ratios from 2003 to 2009 as derived from SCIAMACHY: trends and variability. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D4): D04302 [DOI: 10.1029/2010JD014849]
- Frankenberg C, Thorpe A K, Thompson D R, Hulley G, Kort E A, Vance N, Borchardt J, Krings T, Gerilowski K, Sweeney C, Conley S, Bue B D, Aubrey A D, Hook S and Green R O. 2016. Airborne methane remote measurements reveal heavy-tail flux distribution in Four Corners region. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(35): 9734-9739 [DOI: 10.1073/pnas.1605617113]
- Green R O, Mahowald N, Ung C, Thompson D R, Bator L, Bennet M, Bernas M, Blackway N, Bradley C, Cha J, Clark P, Clark R, Cloud D, Diaz E, Ben Dor E, Duren R, Eastwood M, Ehlmann B L, Fuentes L, Ginoux P, Gross J, He Y T, Kalashnikova O, Kert W, Keymeulen D, Klimesh M, Ku D, Kwong-Fu H, Liggett E, Li L L, Lundeen S, Makowski M D, Mazer A, Miller R, Mouroulis P, Oaida B, Okin G S, Ortega A, Oyake A, Nguyen H, Pace T, Painter T H, Pempejian J, Garcia-Pando C P, Pham T, Phillips B, Pollock R, Purcell R, Realmuto V, Schoolcraft J, Sen A, Shin S, Shaw L, Soriano M, Swayze G, Thingvold E, Vaid A and Zan J. 2020. The earth surface mineral dust source investigation: an earth science imaging spectroscopy mission//2020 IEEE Aerospace Conference. *Big Sky: IEEE: 1-15* [DOI: 10.1109/AERO47225.2020.9172731]
- Guanter L, Irakulis-Loitxate I, Gorroño J, Sánchez-García E, Cusworth D H, Varon D J, Cogliati S and Colombo R. 2021. Mapping methane point emissions with the PRISMA spaceborne imaging spectrometer. *Remote Sensing of Environment*, 265: 112671 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112671]
- Guanter L, Kaufmann H, Segl K, Foerster S, Rogass C, Chabrillat S, Kuester T, Hollstein A, Rossner G, Chlebek C, Straif C, Fischer S, Schrader S, Storch T, Heiden U, Mueller A, Bachmann M, Mühle H, Müller R, Habermeyer M, Ohndorf A, Hill J, Buddenbaum H, Hostert P, Van der Linden S, Leitão P, Rabe A, Doerffer R, Krusemann H, Xi H Y, Mauser W, Hank T, Locherer M, Rast M, Staenz K and Sang B. 2015. The EnMAP spaceborne imaging spectroscopy mission for earth observation. *Remote Sensing*, 7 (7): 8830-8857 [DOI: 10.3390/rs70708830]
- Hasekamp O, Lorente A, Hu H L, Butz A, de Brugh J and Landgraf J. 2019. Algorithm theoretical baseline document for Sentinel-5 Precursor methane retrieval. Netherlands Institute for Space Research
- Hmiel B, Petrenko V V, Dyonisius M N, Buizert C, Smith A M, Place P F, Harth C, Beaudette R, Hua Q, Yang B, Vimont I, Michel S E, Severinghaus J P, Etheridge D, Bromley T, Schmitt J, Faïn X, Weiss R F and Dlugokencky E. 2020. Preindustrial ¹⁴CH₄ indicates greater anthropogenic fossil CH₄ emissions. *Nature*, 578(7795): 409-412 [DOI: 10.1038/s41586-020-1991-8]
- Huang Y X, Natraj V, Zeng Z C, Kopparla P and Yung Y L. 2020. Quantifying the impact of aerosol scattering on the retrieval of methane from airborne remote sensing measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(12): 6755-6769 [DOI: 10.5194/amt-13-6755-2020]
- Irakulis-Loitxate I, Guanter L, Liu Y N, Varon D J, Maasackers J D, Zhang Y Z, Chulakadabba A, Wofsy S C, Thorpe A K, Duren R M, Frankenberg C, Lyon D R, Hmiel B, Cusworth D H, Zhang Y G, Segl K, Gorroño J, Sánchez-García E, Sulprizio M P, Cao K Q, Zhu H J, Liang J, Li X, Aben I and Jacob D J. 2021. Satellite-based survey of extreme methane emissions in the Permian basin. *Science Advances*, 7(27): eabf4507 [DOI: 10.1126/sciadv.abf4507]
- Irakulis-Loitxate I, Guanter L, Maasackers J D, Zavala-Araiza D and Aben I. 2022. Satellites detect abatable super-emissions in one of the world's largest methane hotspot regions. *Environmental Science and Technology*, 56(4): 2143-2152 [DOI: 10.1021/acs.est.1c04873]
- Jacob D J, Turner A J, Maasackers J D, Sheng J X, Sun K, Liu X, Chance K, Aben I, McKeever J and Frankenberg C. 2016. Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(22): 14371-14396 [DOI: 10.5194/acp-16-14371-2016]
- Jervis D, McKeever J, Durak B O A, Sloan J J, Gains D, Varon D J, Ramier A, Strupler M and Tarrant E. 2021. The GHGSat-D imaging spectrometer. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(3): 2127-2140 [DOI: 10.5194/amt-14-2127-2021]
- Kuylenstierna J C I, Michalopoulou E and Malley C. 2021. Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions. Stockholm Environment Institute
- Kuze A, Kikuchi N, Kataoka F, Suto H, Shiomi K and Kondo Y. 2020. Detection of methane emission from a local source using GOSAT target observations. *Remote Sensing*, 12(2): 267 [DOI: 10.3390/rs12020267]
- Lin X W, Wen J G, Wu S B, Hao D L, Xiao Q and Liu Q H. 2020. Ad-

- vances in topographic correction methods for optical remote sensing imageries. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 24(8): 958-974 (林兴稳, 闻建光, 吴胜标, 郝大磊, 肖青, 柳钦火. 2020. 地表反射率地形校正物理模型与效果评价方法研究进展. *遥感学报*, 24(8): 958-974) [DOI: 10.11834/jrs.20209167]
- Lyon D R, Alvarez R A, Zavala-Araiza D, Brandt A R, Jackson R B and Hamburg S P. 2016. Aerial surveys of elevated hydrocarbon emissions from oil and gas production sites. *Environmental Science and Technology*, 50(9): 4877-4886 [DOI: 10.1021/acs.est.6b00705]
- Lyon D R, Zavala-Araiza D, Alvarez R A, Harriss R, Palacios V, Lan X, Talbot R, Lavoie T, Shepson P, Yacovitch T I, Herndon S C, Marchese A J, Zimmerle D, Robinson A L and Hamburg S P. 2015. Constructing a spatially resolved methane emission inventory for the barnett shale region. *Environmental Science and Technology*, 49(13): 8147-8157 [DOI: 10.1021/es506359c]
- Maasakkers J D, Jacob D J, Sulprizio M P, Scarpelli T R, Nesser H, Sheng J X, Zhang Y Z, Hersher M, Bloom A A, Bowman K W, Worden J R, Janssens-Maenhout G and Parker R J. 2019. Global distribution of methane emissions, emission trends, and OH concentrations and trends inferred from an inversion of GOSAT satellite data for 2010-2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(11): 7859-7881 [DOI: 10.5194/acp-19-7859-2019]
- Miller S M, Michalak A M, Detmers R G, Hasekamp O P, Bruhwiler L M P and Schwietzke S. 2019. China's coal mine methane regulations have not curbed growing emissions. *Nature Communications*, 10(1): 303 [DOI: 10.1038/s41467-018-07891-7]
- Nottrott A, Kleissl J and Keeling R. 2014. Modeling passive scalar dispersion in the atmospheric boundary layer with WRF large-eddy simulation. *Atmospheric Environment*, 82: 172-182 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.10.026]
- Nunalee C G, Kosović B and Bieringer P E. 2014. Eulerian dispersion modeling with WRF-LES of plume impingement in neutrally and stably stratified turbulent boundary layers. *Atmospheric Environment*, 99: 571-581 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.09.070]
- Pandey S, Gautam R, Houweling S, Van Der Gon H D, Sadavarte P, Borsdorff T, Hasekamp O, Landgraf J, Tol P, Van Kempen T, Hoogeveen R, Van Hees R, Hamburg S P, Maasakkers J D and Aben I. 2019. Satellite observations reveal extreme methane leakage from a natural gas well blowout. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(52): 26376-26381 [DOI: 10.1073/pnas.1908712116]
- Rast M, Nieke J, Adams J, Isola C and Gascon F. 2021. Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment (Chime)//2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. Brussels: IEEE: 108-111 [DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553319]
- Sánchez-García E, Gorroño J, Irakulis-Loitxate I, Varon D J and Guanter L. 2022. Mapping methane plumes at very high spatial resolution with the WorldView-3 satellite. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(6): 1657-1674 [DOI: 10.5194/amt-15-1657-2022]
- Saunio M, Stavert A R, Poulter B, Bousquet P, Canadell J G, Jackson R B, Raymond P A, Dlugokencky E J, Houweling S, Patra P K, Ciais P, Arora V K, Bastviken D, Bergamaschi P, Blake D R, Brailsford G, Bruhwiler L, Carlsen K M, Carrol M, Castaldi S, Chandra N, Crevoisier C, Crill P M, Covey K, Curry C L, Etiope G, Frankenberg C, Gedney N, Hegglin M I, Höglund-Isaksson L, Hugelius G, Ishizawa M, Ito A, Janssens-Maenhout G, Jensen K M, Joos F, Kleinen T, Krummel P B, Langenfelds R L, Laruelle G G, Liu L C, Machida T, Maksyutov S, McDonald K C, McNorton J, Miller P A, Melton J R, Morino I, Müller J, Murguía-Flores F, Naik V, Niwa Y, Noce S, O'Doherty S, Parker R J, Peng C H, Peng S S, Peters G P, Prigent C, Prinn R, Ramonet M, Regnier P, Riley W J, Rosentretter J A, Segers A, Simpson I J, Shi H, Smith S J, Steele L P, Thornton B F, Tian H Q, Tohjima Y, Tubiello F N, Tsuruta A, Viovy N, Voulgarakis A, Weber T S, van Weele M, Van Der Werf G R, Weiss R F, Worthy D, Wunch D, Yin Y, Yoshida Y, Zhang W X, Zhang Z, Zhao Y H, Zheng B, Zhu Q, Zhu Q A and Zhuang Q L. 2020. The global methane budget 2000-2017. *Earth System Science Data*, 12(3): 1561-1623 [DOI: 10.5194/essd-12-1561-2020]
- Scarpelli T R, Jacob D J, Grossman S, Lu X, Qu Z, Sulprizio M P, Zhang Y Z, Reuland F, Gordon D and Worden J R. 2022. Updated Global Fuel Exploitation Inventory (GFEI) for methane emissions from the oil, gas, and coal sectors: evaluation with inversions of atmospheric methane observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(5): 3235-3249 [DOI: 10.5194/acp-22-3235-2022]
- Schneising O, Buchwitz M, Reuter M, Vanselow S, Bovensmann H and Burrows J P. 2020. Remote sensing of methane leakage from natural gas and petroleum systems revisited. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(15): 9169-9182 [DOI: 10.5194/acp-20-9169-2020]
- Schwietzke S, Sherwood O A, Bruhwiler L M P, Miller J B, Etiope G, Dlugokencky E J, Michel S E, Arling V A, Vaughn B H, White J W C and Tans P P. 2016. Upward revision of global fossil fuel methane emissions based on isotope database. *Nature*, 538(7623): 88-91 [DOI: 10.1038/nature19797]
- Shindell D, Kuylenstierna J C I, Vignati E, Van Dingenen R, Amann M, Klimont Z, Anenberg S C, Müller N, Janssens-Maenhout G, Raes F, Schwartz J, Faluvegi G, Pozzoli L, Kupiainen K, Höglund-Isaksson L, Emberson L, Streets D, Ramanathan V, Hicks K, Oanh N T K, Milly G, Williams M, Demkine V and Fowler D. 2012. Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security. *Science*, 335(6065): 183-189 [DOI: 10.1126/science.1210026]
- Smith J A, Lin T L and Ranson K J. 1980. The Lambertian assumption and Landsat data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46(9): 1183-1189
- Thompson D R, Leifer I, Bovensmann H, Eastwood M, Fladeland M, Frankenberg C, Gerilowski K, Green R O, Kratwurst S, Krings T, Luna B and Thorpe A K. 2015. Real-time remote detection and measurement for airborne imaging spectroscopy: a case study with methane. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(10): 4383-4397 [DOI: 10.5194/amt-8-4383-2015]
- Thompson D R, Thorpe A K, Frankenberg C, Green R O, Duren R, Guanter L, Hollstein A, Middleton E, Ong L and Ungar S. 2016. Space-based remote imaging spectroscopy of the Aliso Canyon CH₄ superemitter. *Geophysical Research Letters*, 43(12): 6571-6578 [DOI: 10.1002/2016GL069079]
- Thorpe A K, Duren R M, Conley S, Prasad K R, Bue B D, Yadav V, Foster K T, Rafiq T, Hopkins F M, Smith M L, Fischer M L,

- Thompson D R, Frankenberg C, McCubbin I B, Eastwood M L, Green R O and Miller C E. 2020. Methane emissions from underground gas storage in California. *Environmental Research Letters*, 15(4): 045005 [DOI: 10.1088/1748-9326/ab751d]
- Turpie K R, Casey K A, Crawford C J, Guild L S, Kieffer H, Lin G, Kokaly R, Shrestha A K, Anderson C, Ramaseri Chandra S N, Green R, Hook S, Lukashin C and Thome, K. 2023. Calibration and Validation for the Surface Biology and Geology (SBG) Mission Concept: Recommendations for a Multi-Sensor System for Imaging Spectroscopy and Thermal Imagery. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 128(9): e2023JG007452 [DOI: 10.1029/2023JG007452]
- Varon D J, Jacob D J, Jervis D and McKeever J. 2020. Quantifying time-averaged methane emissions from individual coal mine vents with GHGSat-D satellite observations. *Environmental Science and Technology*, 54(16): 10246-10253 [DOI: 10.1021/acs.est.0c01213]
- Varon D J, Jacob D J, McKeever J, Jervis D, Durak B O A, Xia Y and Huang Y. 2018. Quantifying methane point sources from fine-scale satellite observations of atmospheric methane plumes. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(10): 5673-5686 [DOI: 10.5194/amt-11-5673-2018]
- Varon D J, Jervis D, McKeever J, Spence I, Gains D and Jacob D J. 2021. High-frequency monitoring of anomalous methane point sources with multispectral Sentinel-2 satellite observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(4): 2771-2785 [DOI: 10.5194/amt-14-2771-2021]
- Wang K, Zhang J J, Cai B F and Liang S. 2021. Estimation of Chinese city-level anthropogenic methane emissions in 2015. *Resources, Conservation and Recycling*, 175: 105861 [DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105861]
- Worden J R, Cusworth D H, Qu Z, Yin Y, Zhang Y Z, Bloom A A, Ma S, Byrne B K, Scarpelli T, Maasackers J D, Crisp D, Duren R and Jacob D J. 2022. The 2019 methane budget and uncertainties at 1° resolution and each country through Bayesian integration Of GOSAT total column methane data and a priori inventory estimates. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(10): 6811-6841 [DOI: 10.5194/acp-22-6811-2022]
- Wunch D, Toon G C, Blavier J F L, Washenfelder R A, Notholt J, Connor B J, Griffith D W T, Sherlock V and Wennberg P O. 2011. The total carbon column observing network. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1943): 2087-2112 [DOI: 10.1098/rsta.2010.0240]
- Zavala-Araiza D, Alvarez R A, Lyon D R, Allen D T, Marchese A J, Zimmerle D J and Hamburg S P. 2017. Super-emitters in natural gas infrastructure are caused by abnormal process conditions. *Nature Communications*, 8(1): 14012 [DOI: 10.1038/ncomms14012]
- Zhang J X, Han G, Mao H Q, Pei Z P, Ma X, Jia W J and Gong W. 2022. The spatial and temporal distribution patterns of XCH₄ in China: new observations from TROPOMI. *Atmosphere*, 13(2): 177 [DOI: 10.3390/atmos13020177]
- Zhang Y Z, Gautam R, Pandey S, Omara M, Maasackers J D, Sadavarte P, Lyon D, Nesser H, Sulprizio M P, Varon D J, Zhang R X, Houweling S, Zavala-Araiza D, Alvarez R A, Lorente A, Hamburg S P, Aben I and Jacob D J. 2020. Quantifying methane emissions from the largest oil-producing basin in the United States from space. *Science Advances*, 6(17): eaaz5120 [DOI: 10.1126/sciadv.aaz5120]

Mapping methane super-emitters in China and United States with GF-5 02 hyperspectral imaging spectrometer

LI Fei^{1,2}, SUN Shiwei³, ZHANG Yongguang^{1,2,6}, FENG Chenxi⁴, CHEN Cuihong⁵, MAO Huiqin⁵, LIU Yinnian⁷

1. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;
2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographical Information Science and Technology, Key Laboratory for Land Satellite Remote Sensing Applications of Ministry of Natural Resources, School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;
3. Key Laboratory of Transportation Meteorology of China Meteorological Administration, Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210041, China;
4. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;
5. Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China;
6. Nantong Academy of Intelligent Sensing, Nantong 226000, China;
7. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China

Abstract: Rapid identification of anomalous methane sources in the fossil fuel industry would enable action to reduce greenhouse gas emissions. Spaceborne hyperspectral imaging spectrometers have recently been shown to be instrumental for this mission. In this study, we utilize the rapid development of spaceborne imaging spectroscopy technology and data processing methods to perform a satellite-based

large-scale and high-resolution survey of methane super-emitters in China and the United States. Our dataset is acquired by the Advanced Hyperspectral Imager (AHSI) onboard domestic GF-5 02 satellite (i.e., GF-5 02AHSI) and TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) onboard European Space Agency's Sentinel-5 Precursor satellite (Sentinel-5P). Our core objective is to identify, quantify, and assess uncertainty of methane point emissions from coal mines and oil/gas facilities in China and the United States, with the overarching motivation of assisting future emission reduction efforts.

Major steps include the following: (1) We retrieve methane concentration enhancements (i.e., increments above background levels in the amount of methane present in the atmospheric column, ΔX_{CH_4}) using the optimized matched-filter algorithm applied to GF-5 02AHSI spectra in the 2300 nm shortwave infrared spectral region. (2) Emission plumes in the ΔX_{CH_4} maps are detected based on a semi-automatic method. (3) We estimate the source rate (Q) for individual methane plume using the integrated mass enhancement (IME) method. (4) We estimate uncertainties in Q by propagating random errors in IME and U_{10} to a 1- σ precision error in Q. A 50% random error in wind speed is assumed for U_{10} data, which is consistent with the approximately 1.5 m/s error standard deviation in wind speed. (5) We further assess the magnitude of our estimated plume-level emission rates through a simulation-based study with the weather research forecast model coupled with large eddy simulation.

Major findings include the following: (1) GF-5 02AHSI has detected four significant methane point source leak emissions in methane hotspot regions of China and the United States, with the emission rates greater than 0.5 tons per hour. A super-emitter is detected in the Permian Basin, and the emission amount is 11.7 ± 4.4 tons per hour. (2) The estimation of methane point source emission flux rate is affected by the background meteorological field, and the uncertainty of wind speed at the point source has the largest contribution.

Findings demonstrate the potential of GF-5 02AHSI in remote sensing identification and estimation of global methane point emissions, which can provide important data support for future methane leak detection in the global energy industry.

Key words: remote sensing, GF-5 02, methane retrieval, point source emissions, Changzhi, Permian Basin

Supported by National Key Research and Development Program (No. 2022YFE0209100); National Natural Science Foundation of China (No. 42125105, 42105151); Basic Research Fund of China Academy of Meteorological Sciences (No. 2021Y008)