

卫星遥感测量甲烷排放

石油天然气领域的应用

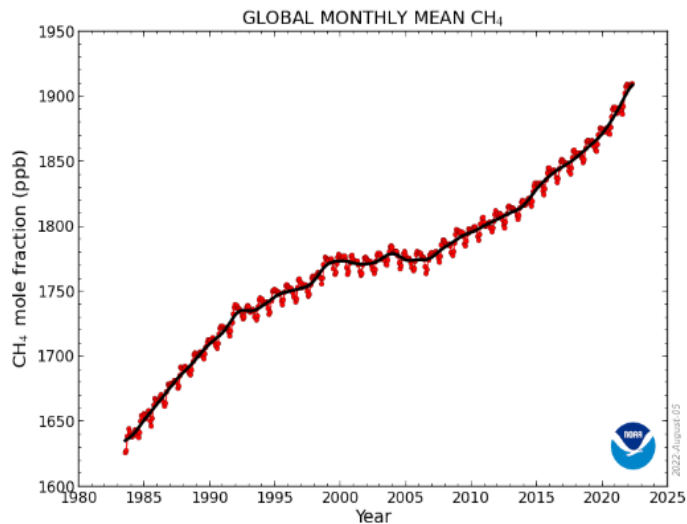
张羽中

zhangyuzhong@westlake.edu.cn

天津 2023. 6. 30

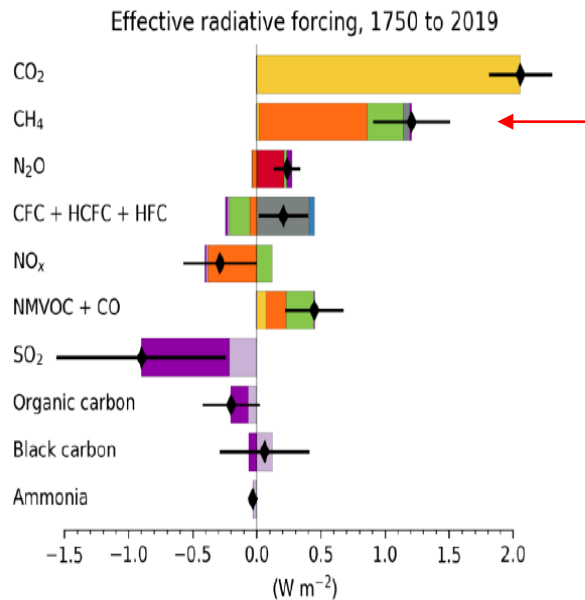
温室气体甲烷

全球甲烷浓度1983-2022



https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/

辐射强迫1750-2019



全球升温潜势
Global Warming
Potential

单位质量甲烷吸收红外能量的能力是二氧化碳的30倍（100年尺度）

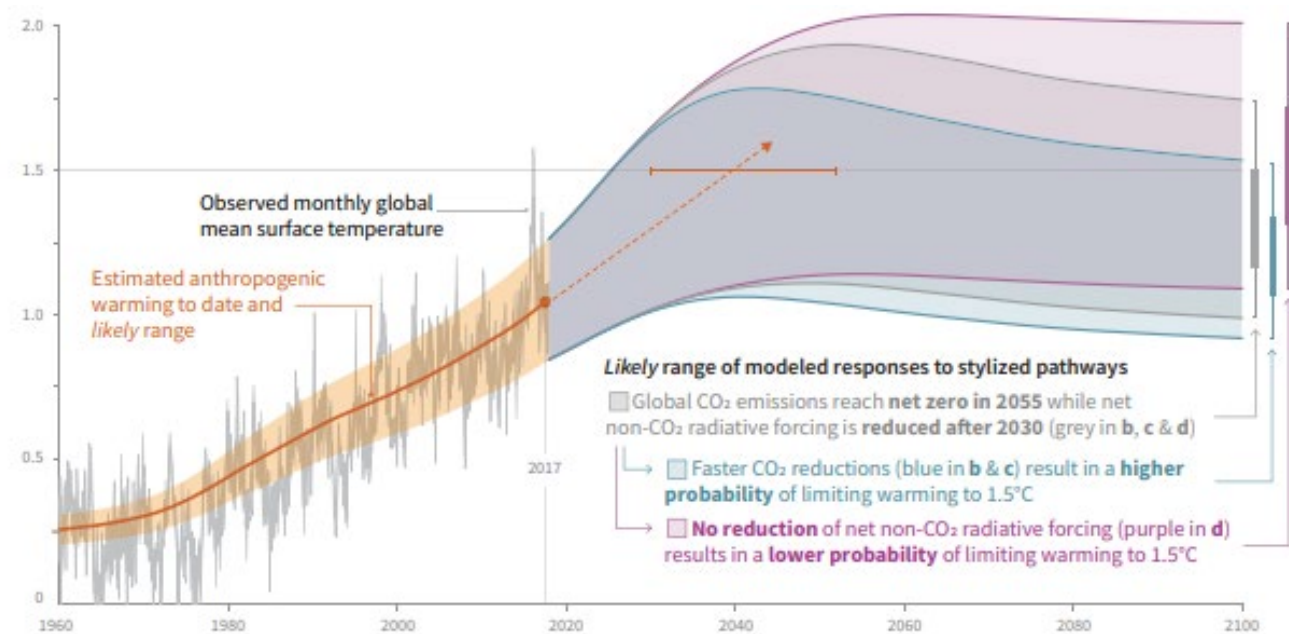
IPCC AR6 2021

甲烷(非CO₂温室气体)减排的必要性

CO₂减排的补充

较强短期气候收益

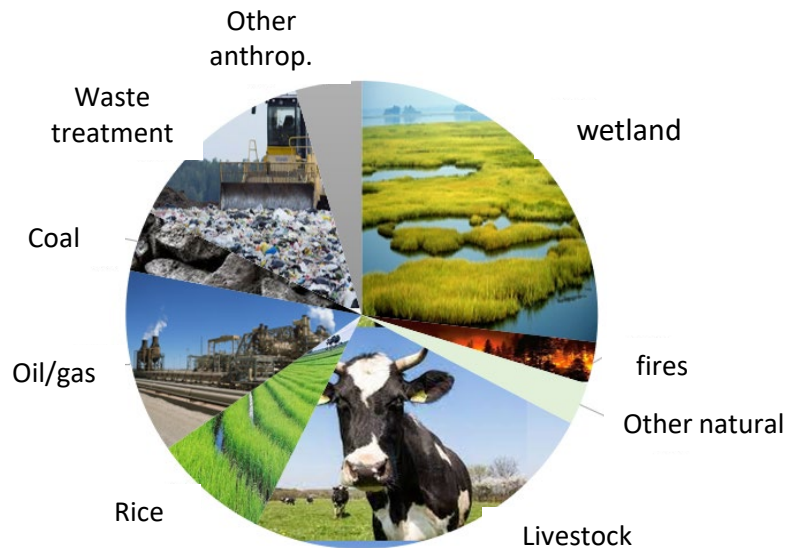
过冲情景



IPCC, 2018

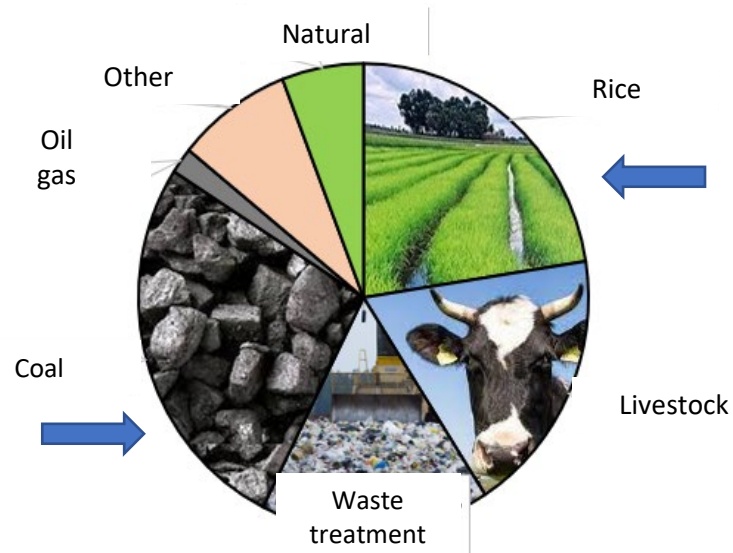
大气甲烷排放来源

全球



$\sim 550 \text{ Tg a}^{-1}$
(百万吨/年)

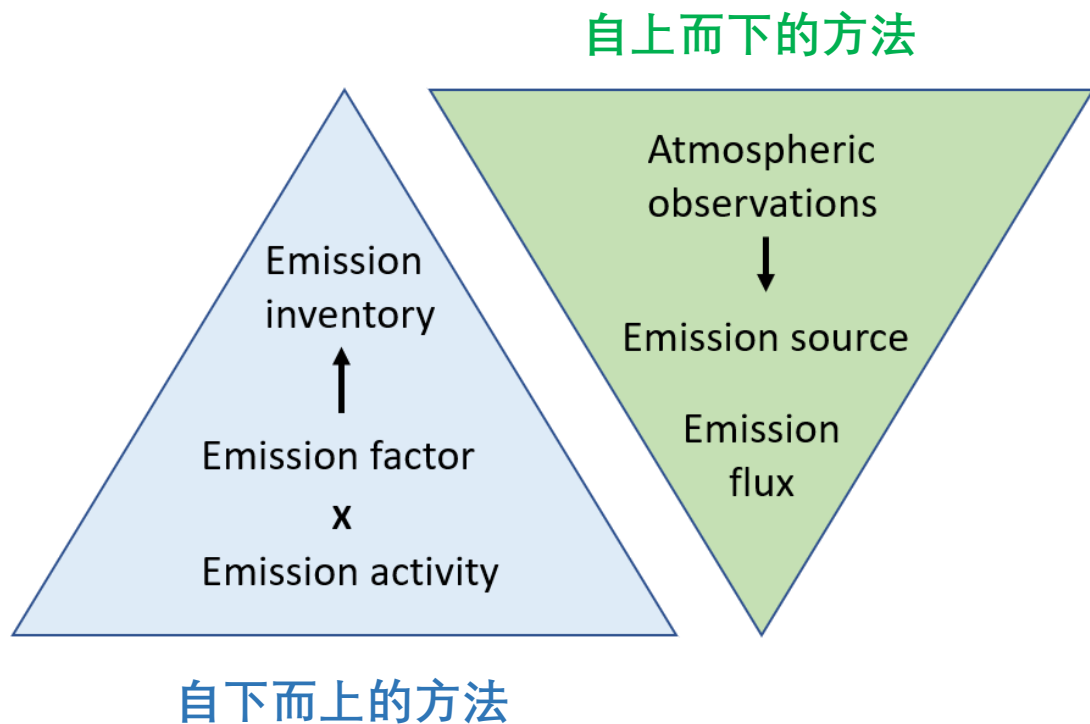
中国



$\sim 55 \text{ Tg a}^{-1}$

Based on bottom-up inventories

大气观测在甲烷排放核算中的重要性



大气甲烷来源复杂

无组织排放
受环境影响因素影响
时空变异大、关系复杂

自下而上方法不确定性大

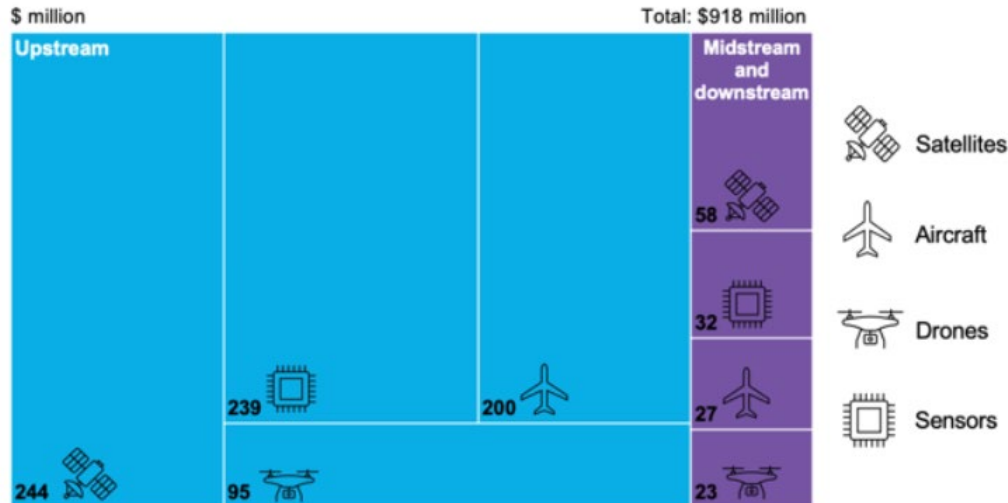
自上而下方法重要性更凸显

大气观测在甲烷排放核算中的重要性

\$918 million by 2025.

Methane Monitoring

Most spending on monitoring methane emissions is set to be in upstream operations in 2025

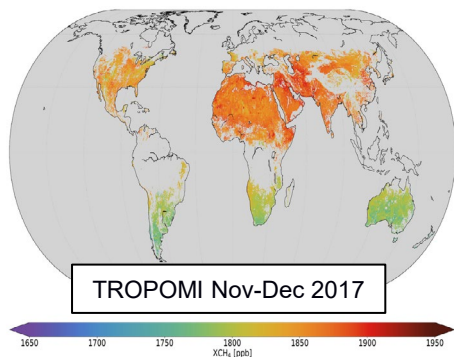


BloombergNEF

不同空间尺度的监测需求

国家/全球尺度

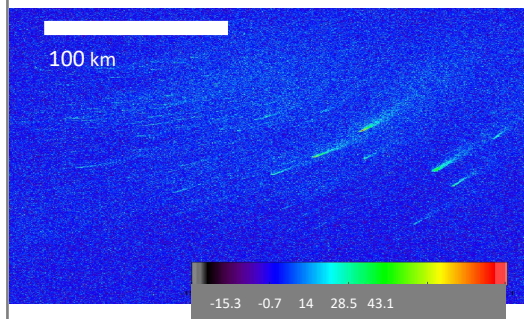
碳盘点



5-10 km 分辨率

区域/盆地尺度

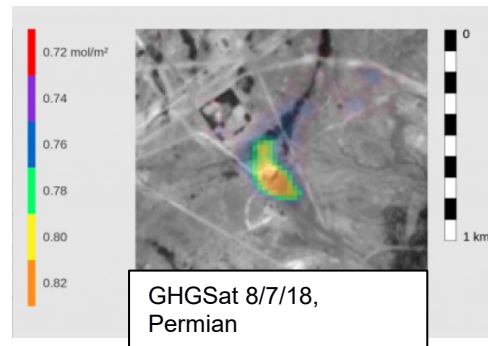
国家管理



~500-1000 m 分辨率

点源尺度

行业管控

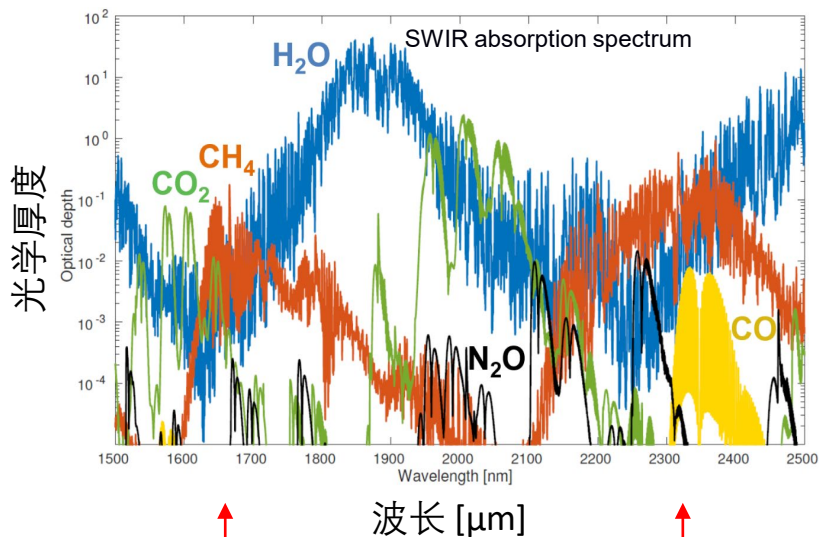


~10 m 分辨率

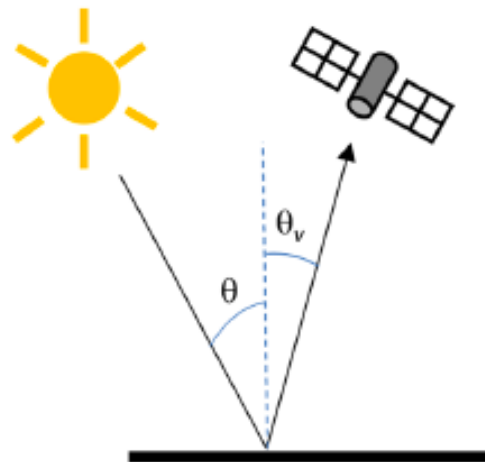
甲烷卫星观测

覆盖全球、连续运行

短波红外波段

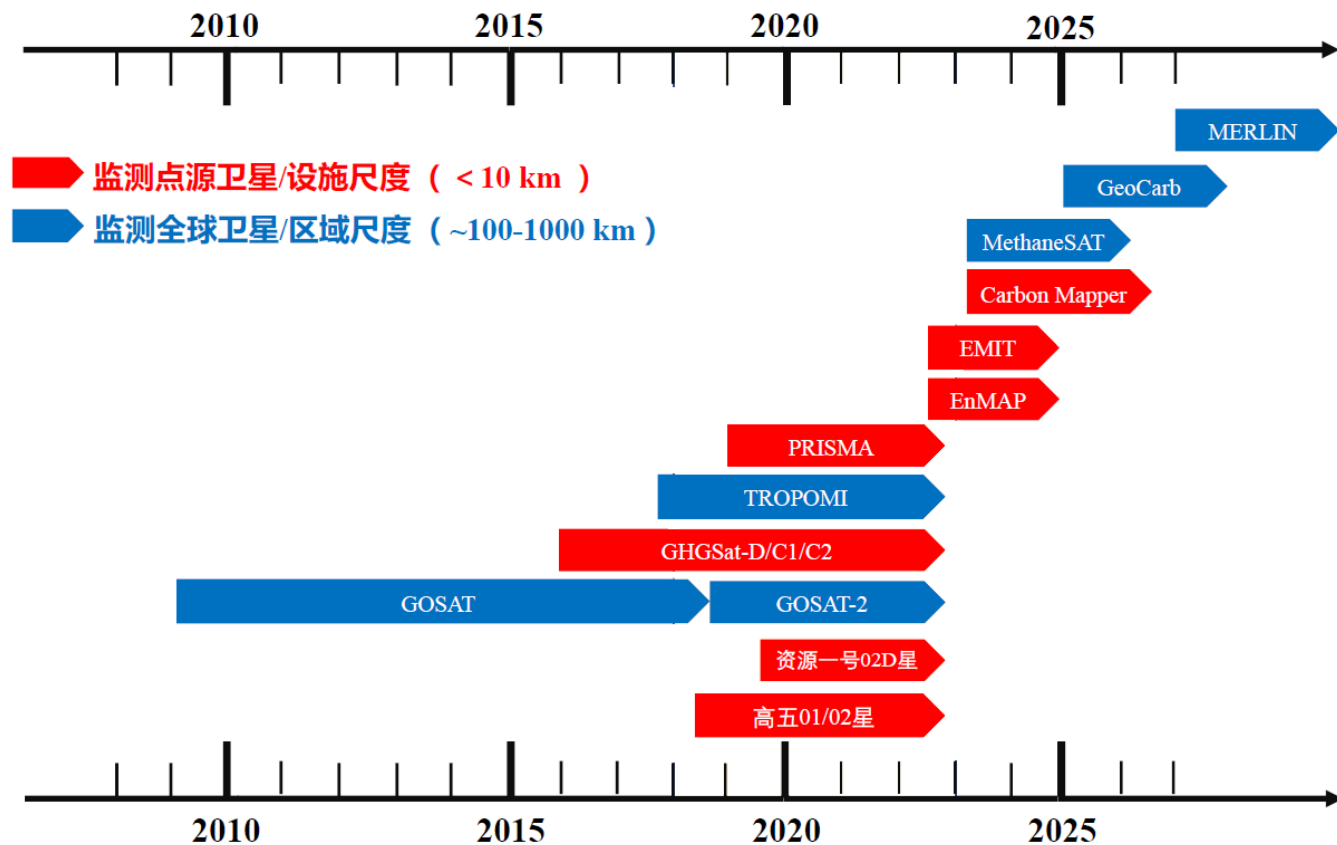


太阳光后向散射



光程中的吸收
→ 甲烷浓度

甲烷卫星观测



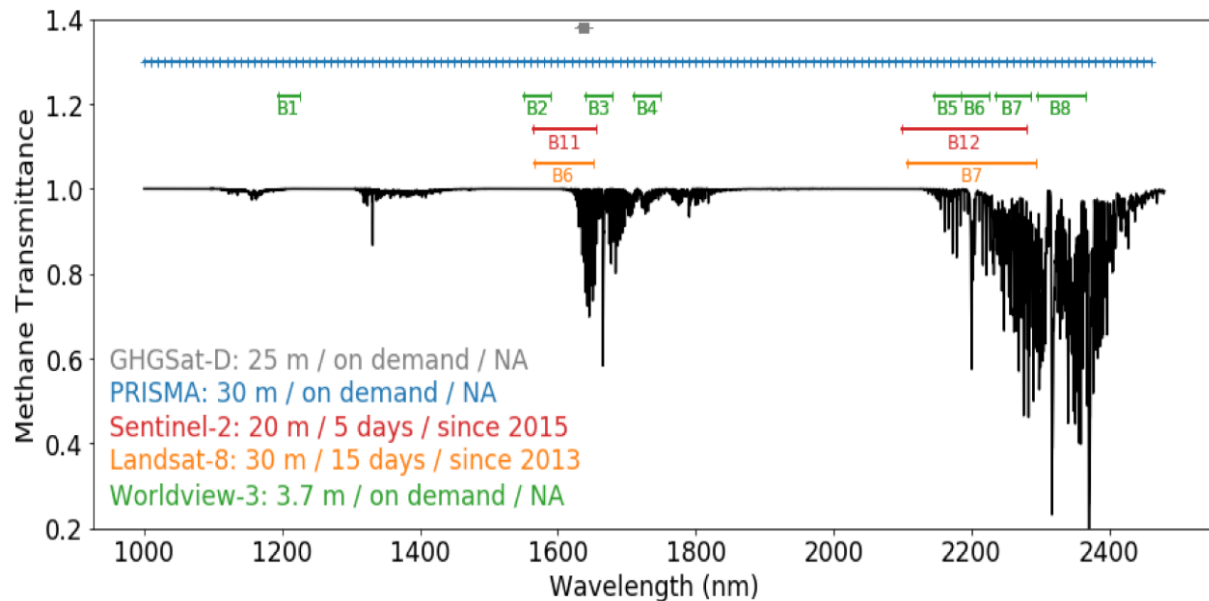
区域型 vs. 点源型卫星

区域型

超高光谱 浓度精确
空间分辨率低（几公里）

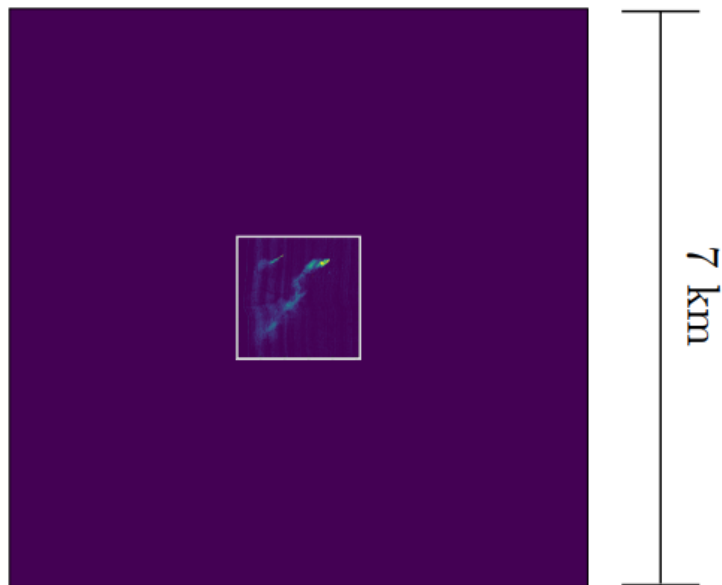
点源型

多/高光谱 浓度不精确
空间分辨率高（几米）



Sánchez-García et al., 2021

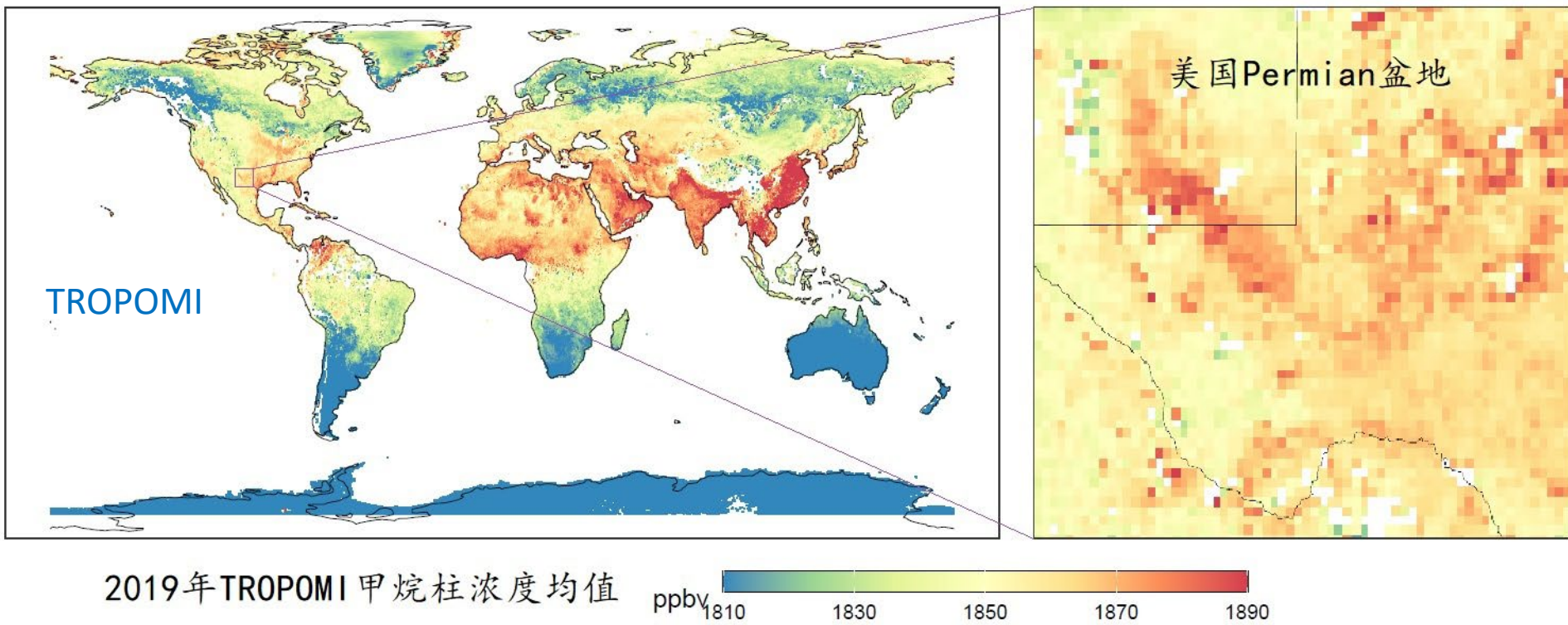
区域型 vs. 点源型卫星



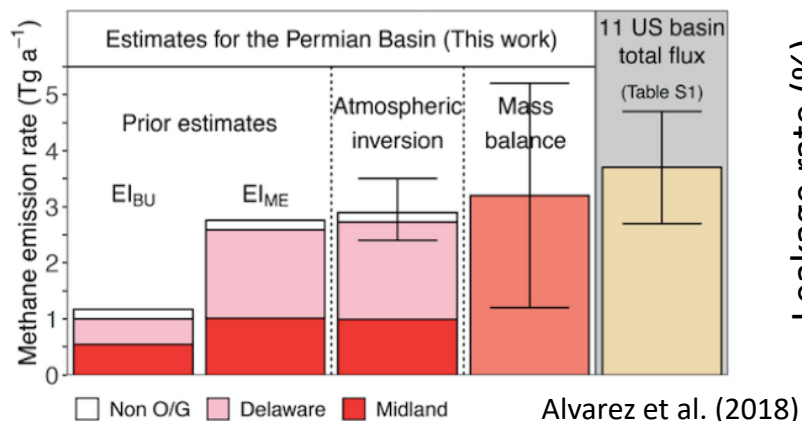
TROPOMI pixel

	区域型	点源型
用途	碳盘点 区域管理 政策评估	行业监管 减排措施
测量精度	0.1–1%	1–5%
空间分辨率	1–10 km	10–100 m
幅宽	~ 1000 km	10 km
仪器	TROPOMI	GHGSAT 高分5号

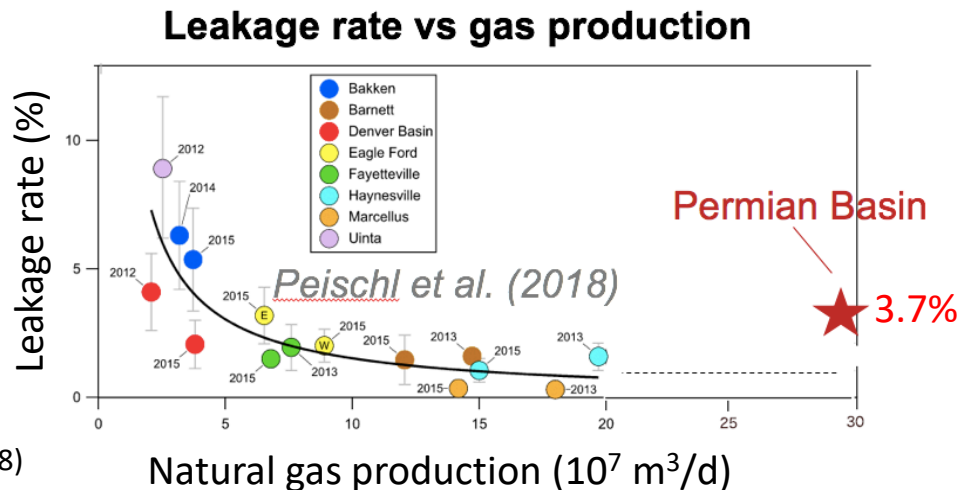
区域型卫星的应用



迄今报道的甲烷排放量最大的油气盆地



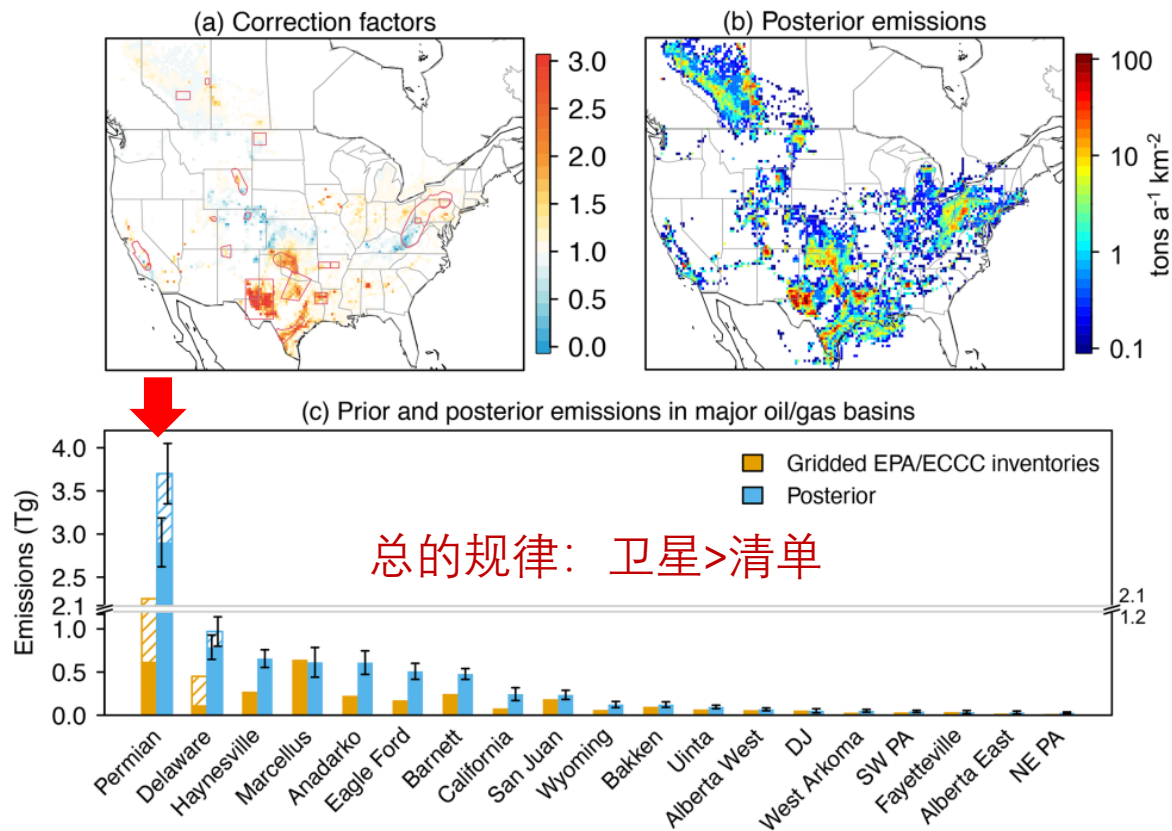
- >2倍于EPA的清单估计
- 4倍于当时报道排放量最大的Eagle Ford
- 与11个盆地总量相当（基于飞机、地面观测）



高天然气产量 & 高泄漏量

美国油气盆地甲烷排放量测算

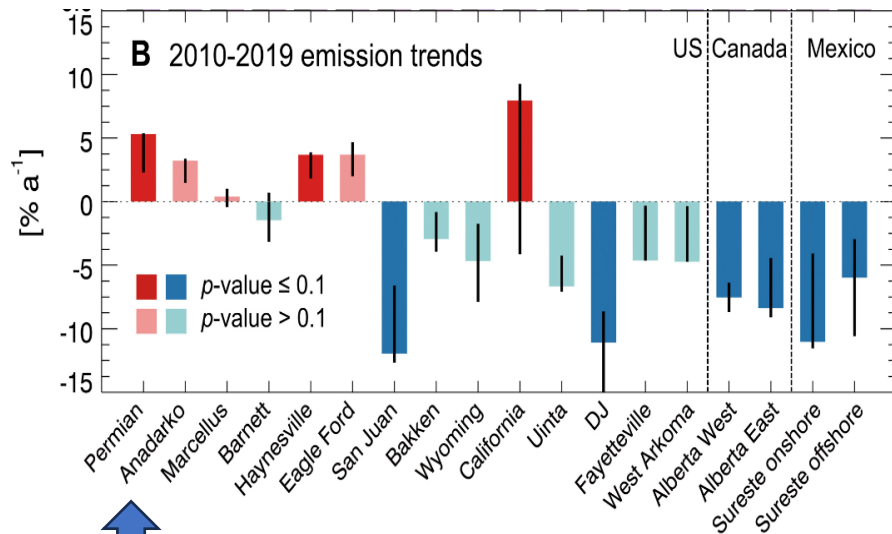
Corrections to gridded O/G EPA and ECCC inventories from TROPOMI inversion



北京大学 沈路路
Shen et al., 2022

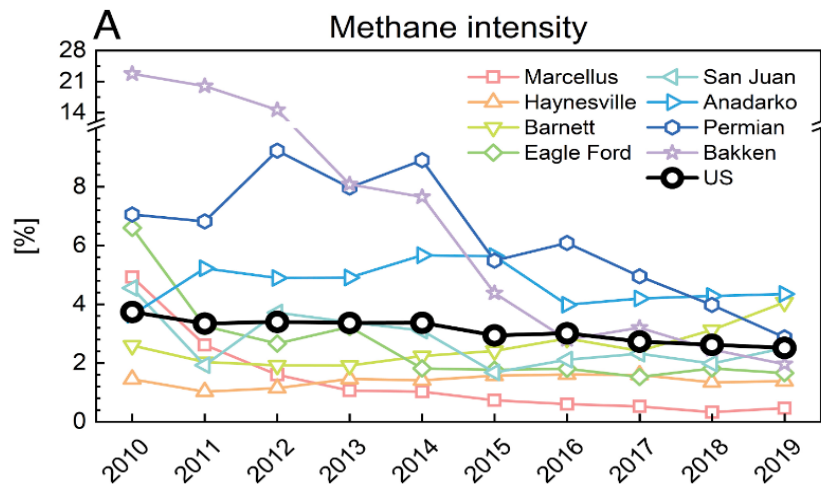
美国油气盆地排放变化趋势

2010-2019排放变化趋势



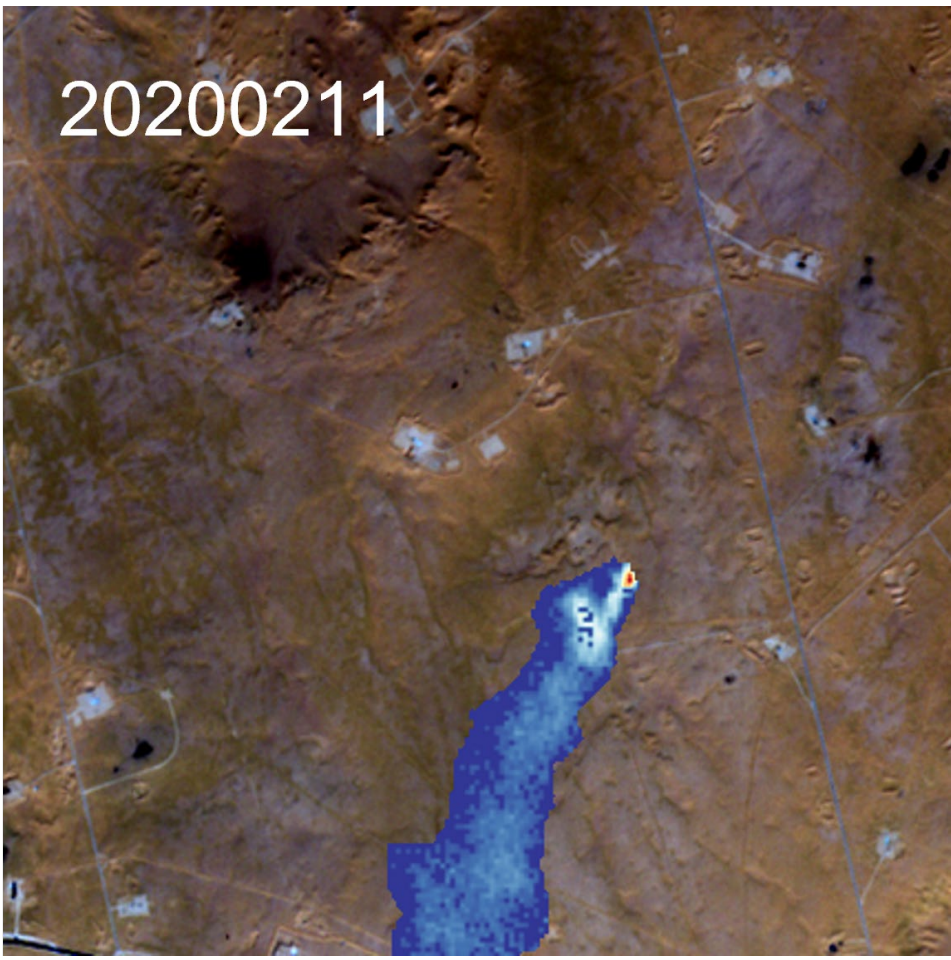
结合GOSAT卫星和地面、飞机观测

排放强度(排放量/天然气产量)

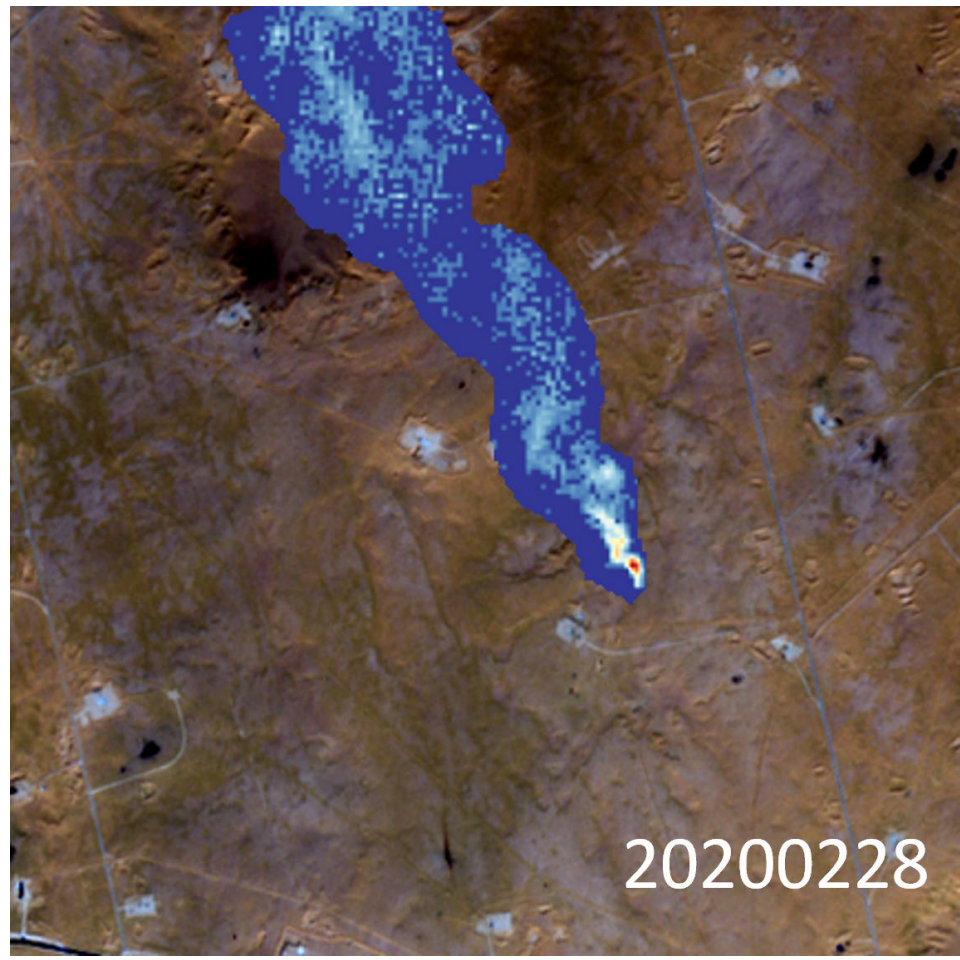


点源型卫星的应用

20200211

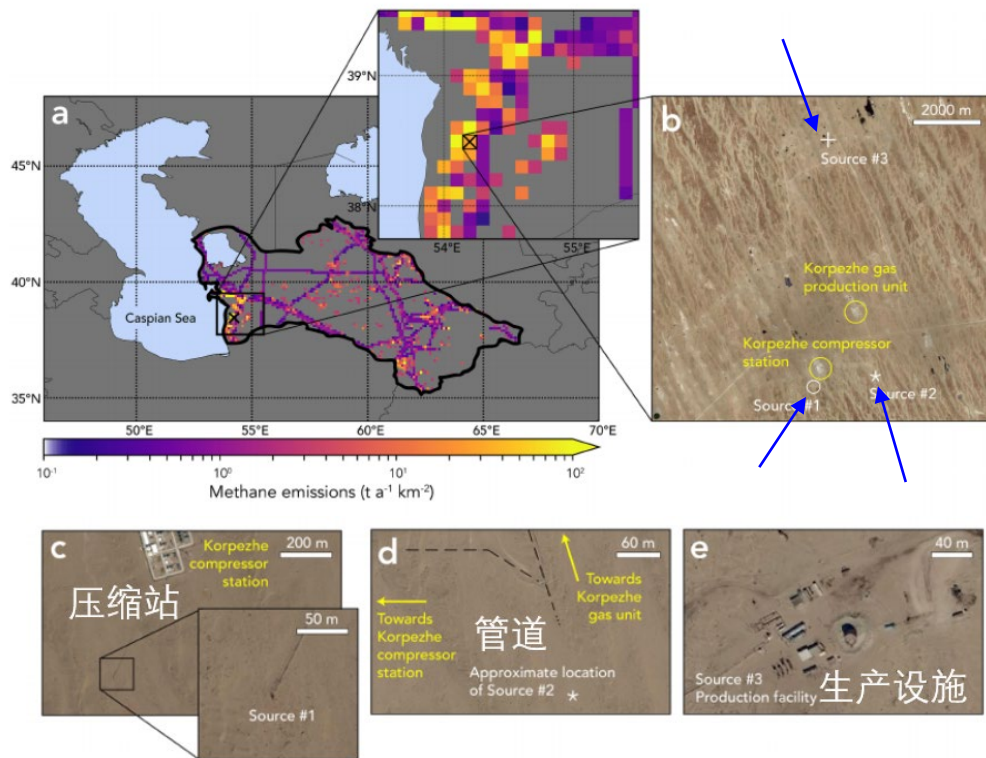


20200228

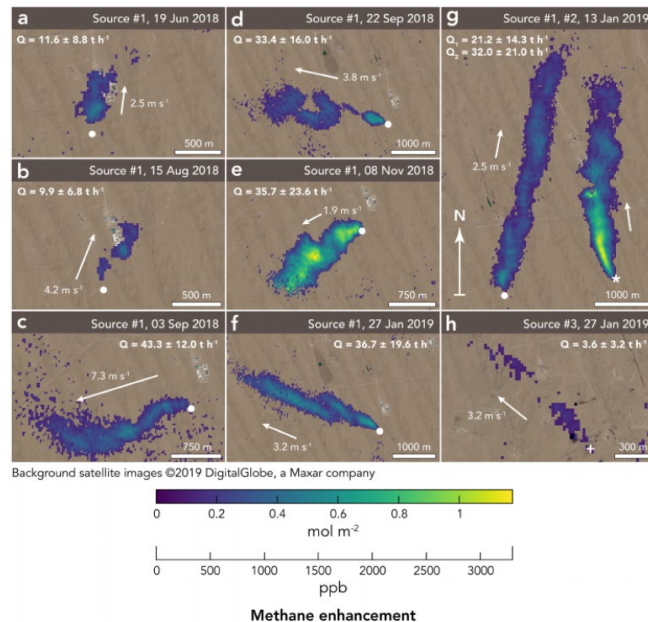


中亚油田大点源的探测

GHGSat: 商业公司

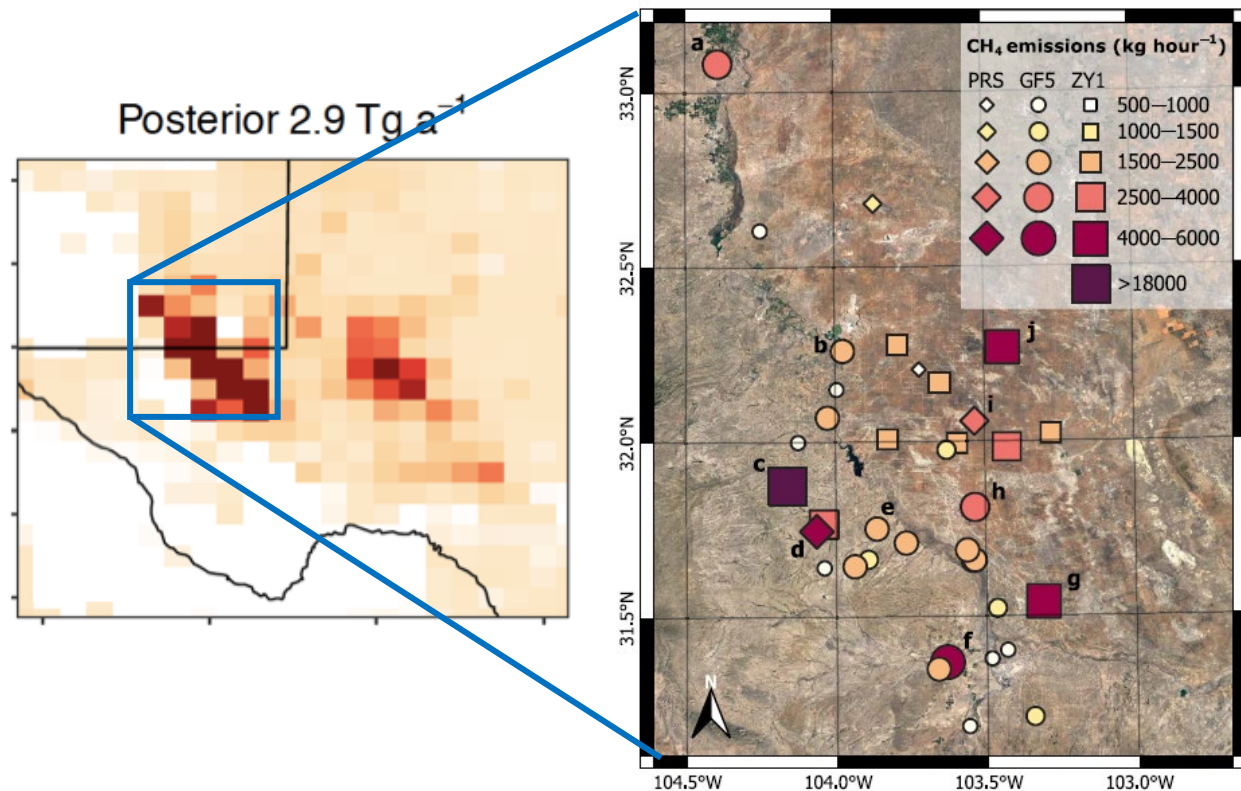


发现三个点源 排放量4-40 t h⁻¹



Varon et al., 2019

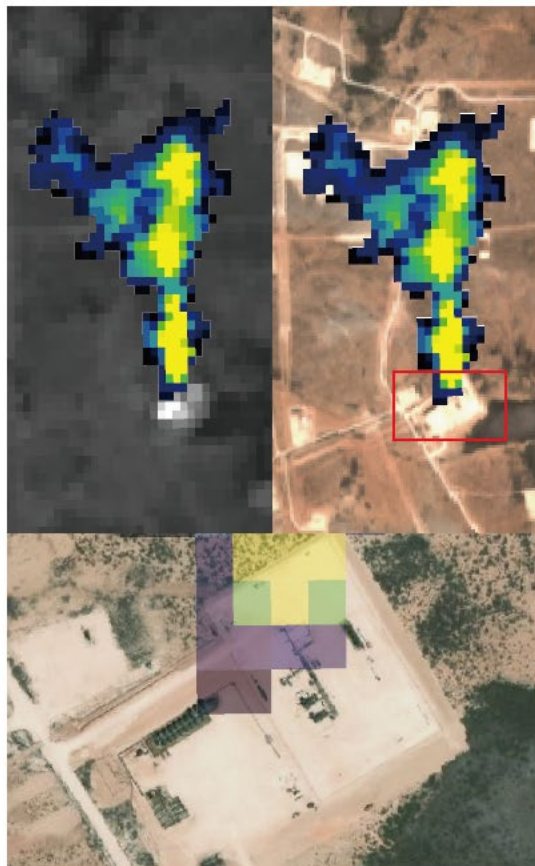
Permian Basin 点源探测



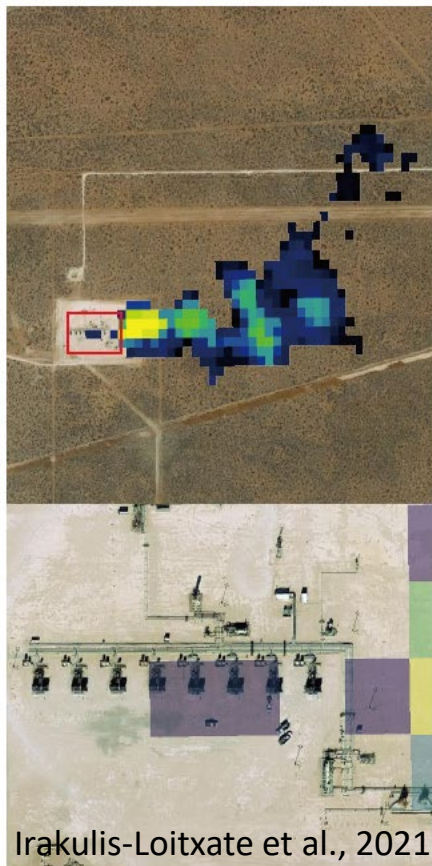
- PRISMA
- 高分5号
- 资源1号
- 19个点源
- >500 kg/hr
- 区域总量的30%–50%

Permian Basin 点源探测

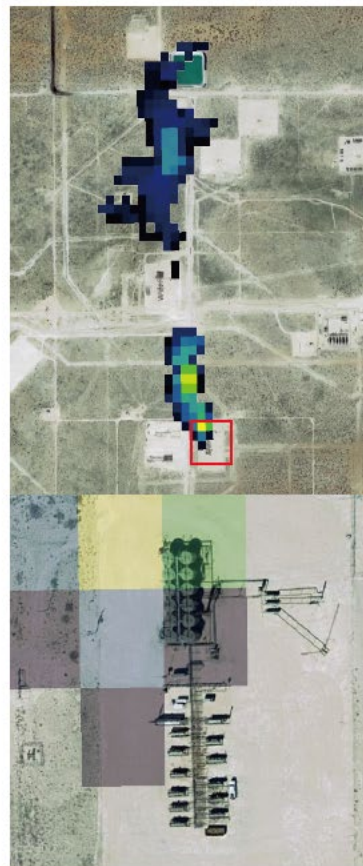
Flaring emission



Compressor emission

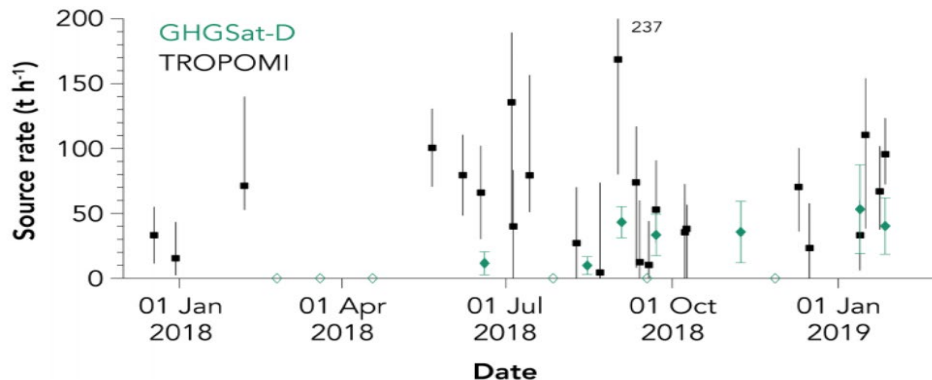
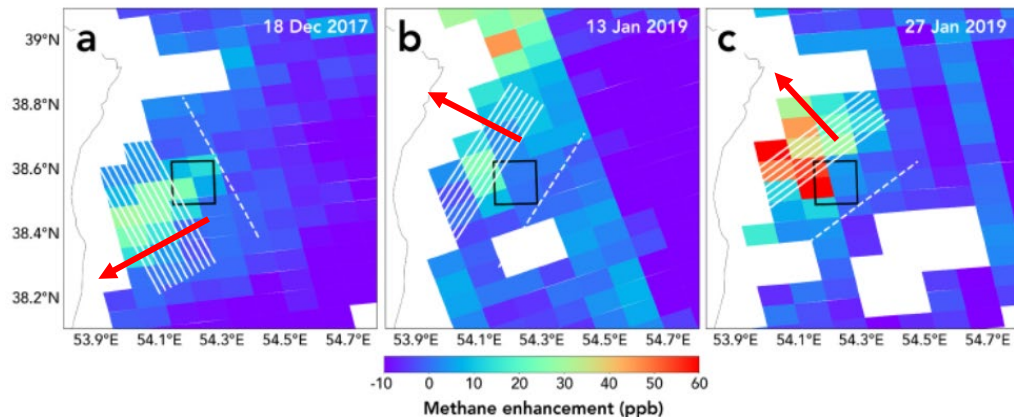
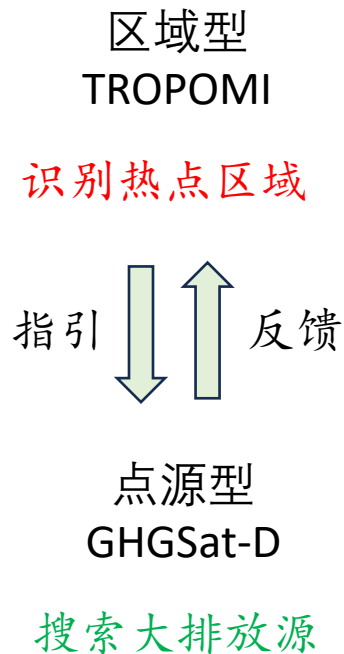


Tank battery emission

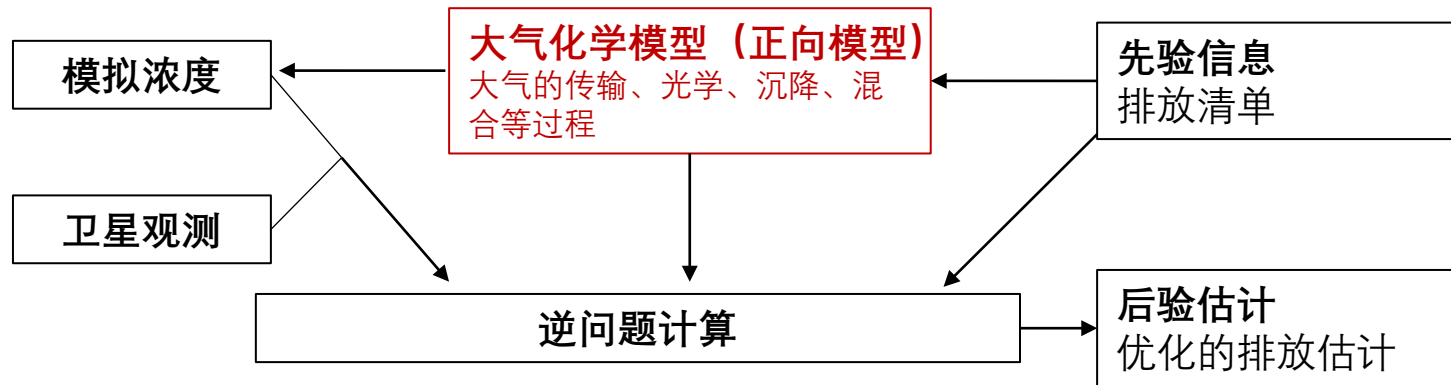


Irakulis-Loitxate et al., 2021

点源与区域观测卫星联用



卫星甲烷排放监测技术要点 - 区域通量



$$J(\mathbf{x}) = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a)^T \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a) + \gamma (\mathbf{y} - \mathbf{K}\mathbf{x})^T \mathbf{S}_0^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{K}\mathbf{x})$$

先验信息

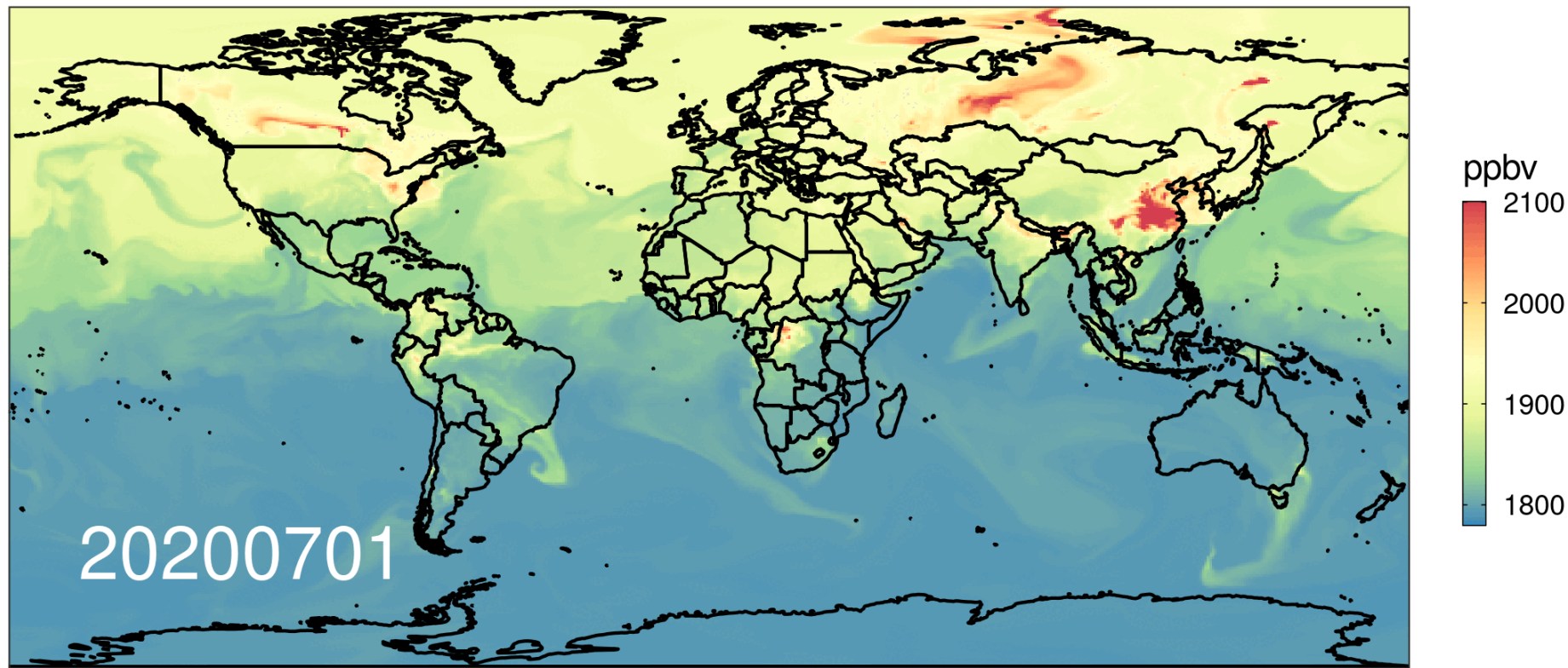
先验信息的不确定度

卫星观测

观测和模型的不确定度

正向模型: 观测对排放的敏感度

大气传输模拟



全球甲烷高分辨率模拟

卫星甲烷排放监测技术要点 – 点源排放

1. 计算甲烷浓度的变化量 (ΔXCH_4)

从光谱信号中提取甲烷浓度信息

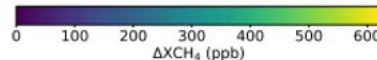
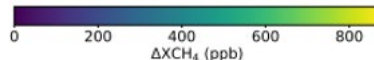
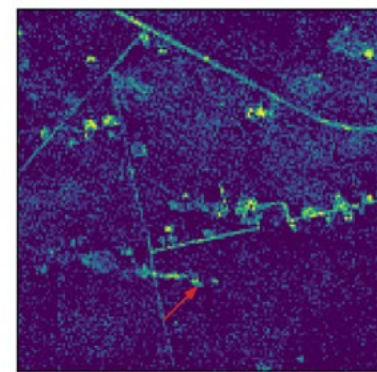
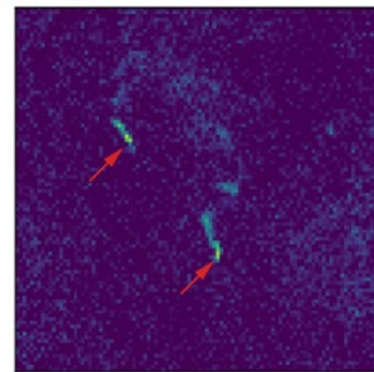
2. 识别甲烷烟羽

从甲烷浓度场中分辨出有效信号、定位排放源位置

3. 排放源判定

利用辅助信息判断排放源

4. 排放通量估算



卫星甲烷监测的局限

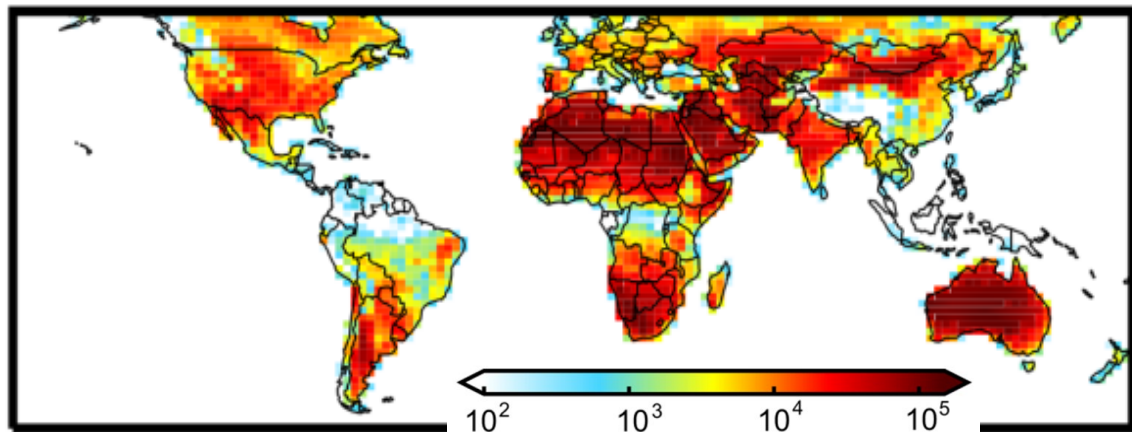
数据覆盖有限

幅宽、重访周期

云、冰雪、气溶胶、
地形

观测精度和分辨率有限

TROPOMI 2019年有效观测数量



高纬度、赤道多云区域观测少；海上观测很少

Qu et al., 2021

卫星甲烷监测的局限

数据覆盖有限

观测精度和分辨率有限



检测能力有限

点源排放检测限 (kg/h)

Instrument	Detection threshold (kg h ⁻¹)
TROPOMI	25 000 ^b
Sentinel-2, Landsat-8/9	1800–25 000 ^c
PRISMA	500–2000 ^d
<i>MethaneSAT</i>	500
GHGSat-D	1000–3000
GHGSat-C1, C2	100–200 ^e
<i>Carbon Mapper</i>	50–200 ^f
WorldView-3	< 100
AVIRIS-NG (aircraft) ^g	2–10 ^h

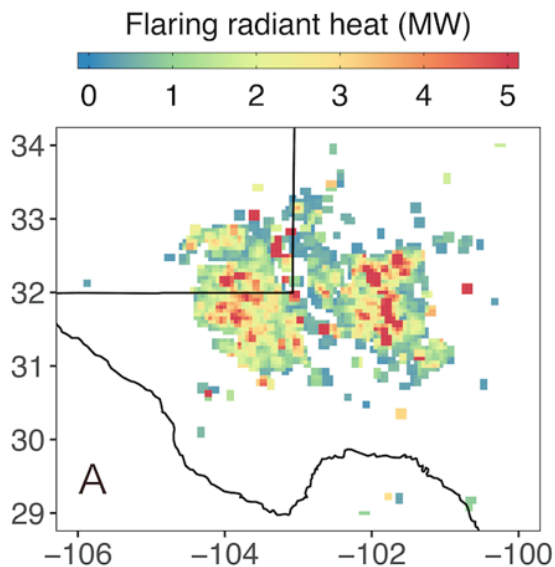
机载遥感

Jacob et al., 2022

卫星火炬燃烧观测

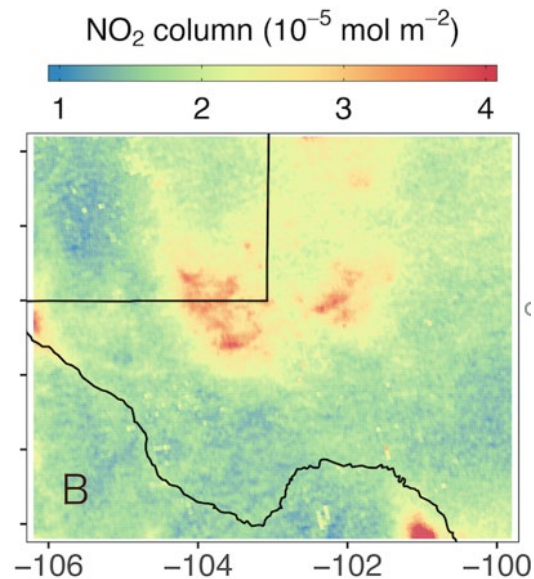
美国Permian盆地

红外热辐射



火炬燃烧放出热辐射

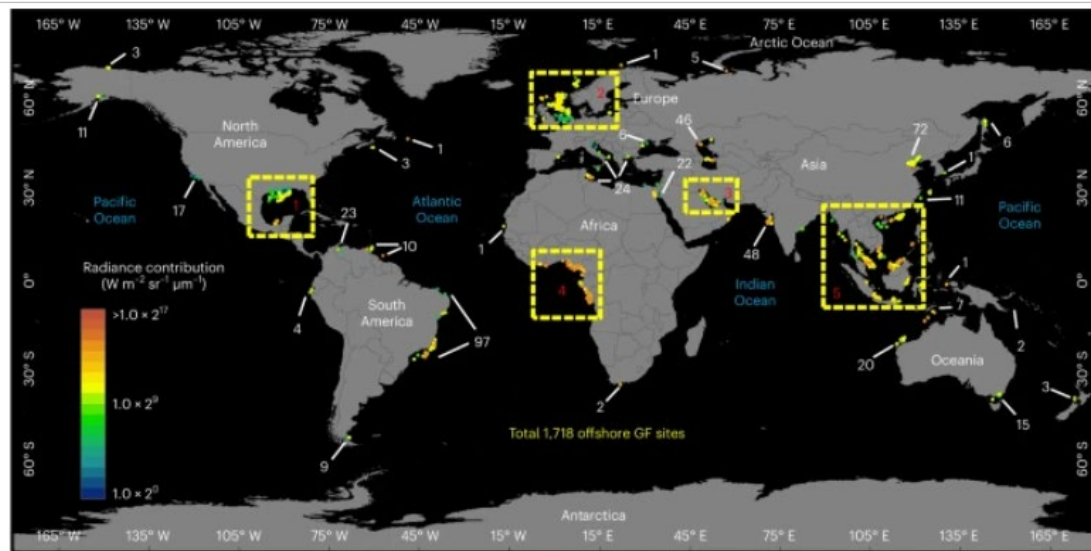
NO₂柱浓度



火炬燃烧、内燃机工作排放氮氧化物

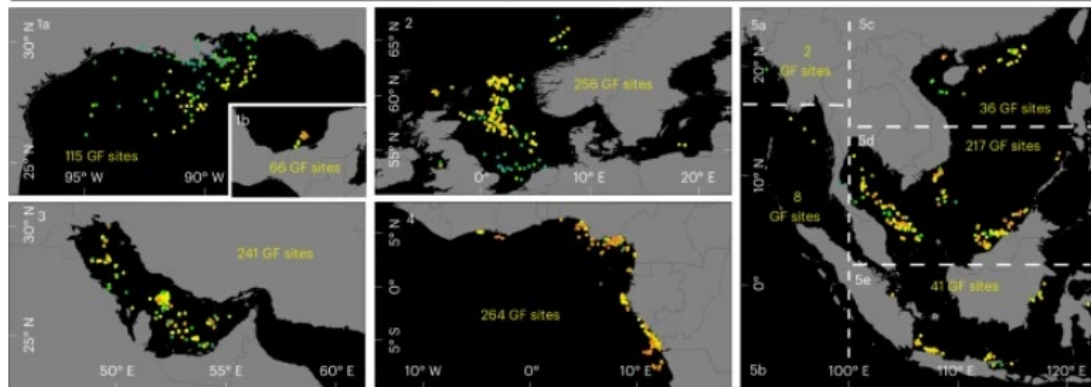
Zhang et al., 2021

利用热辐射信号监测火炬燃烧



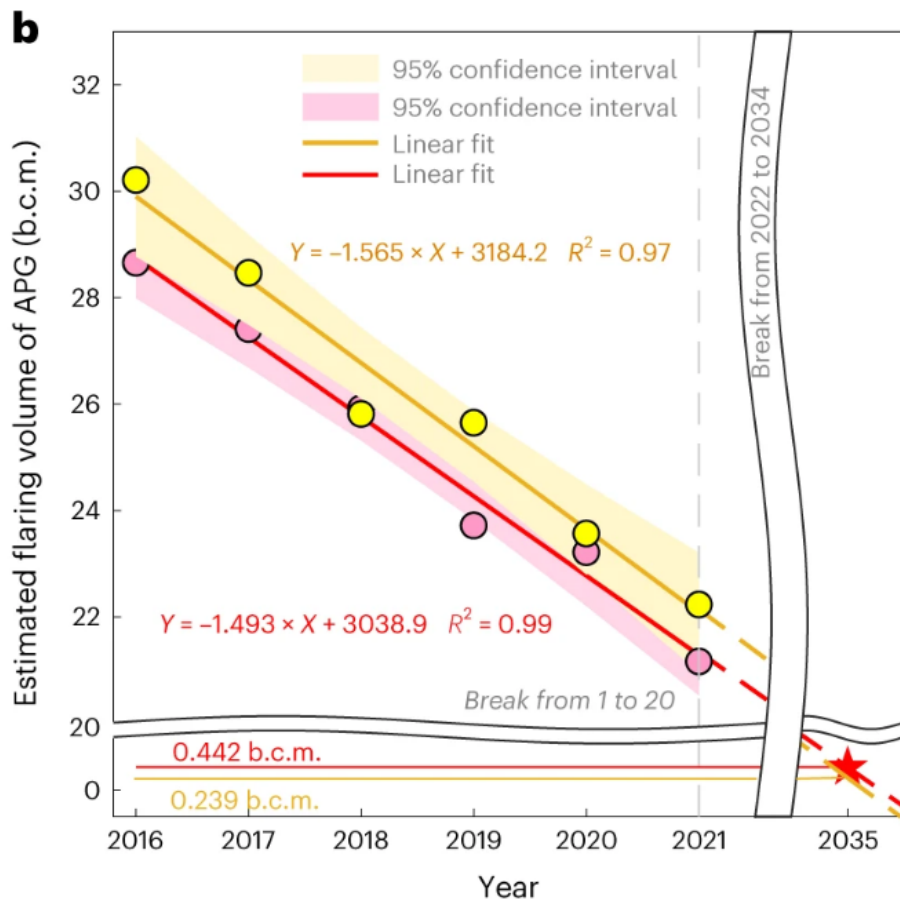
基于Sentinel-2卫星
2016-2021

全球 1718个火炬燃烧点



南京大学 刘永学
Liu et al. (2023)

全球离岸火炬燃烧量逐年下降但慢于预期



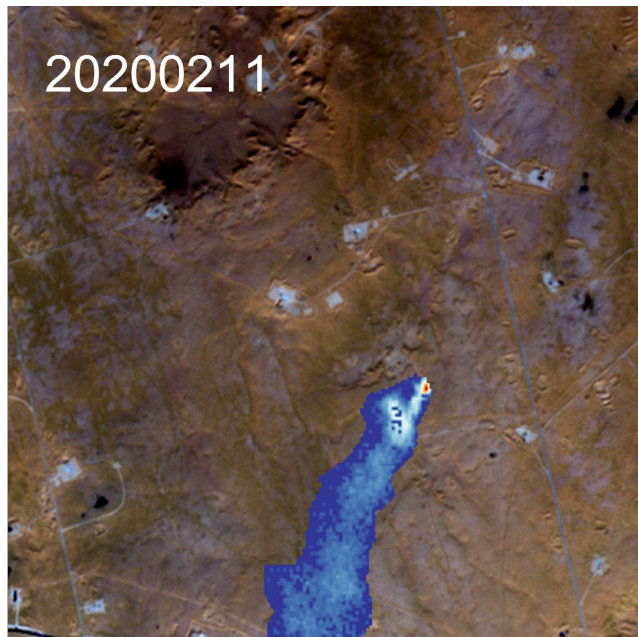
THE
WORLD
BANK



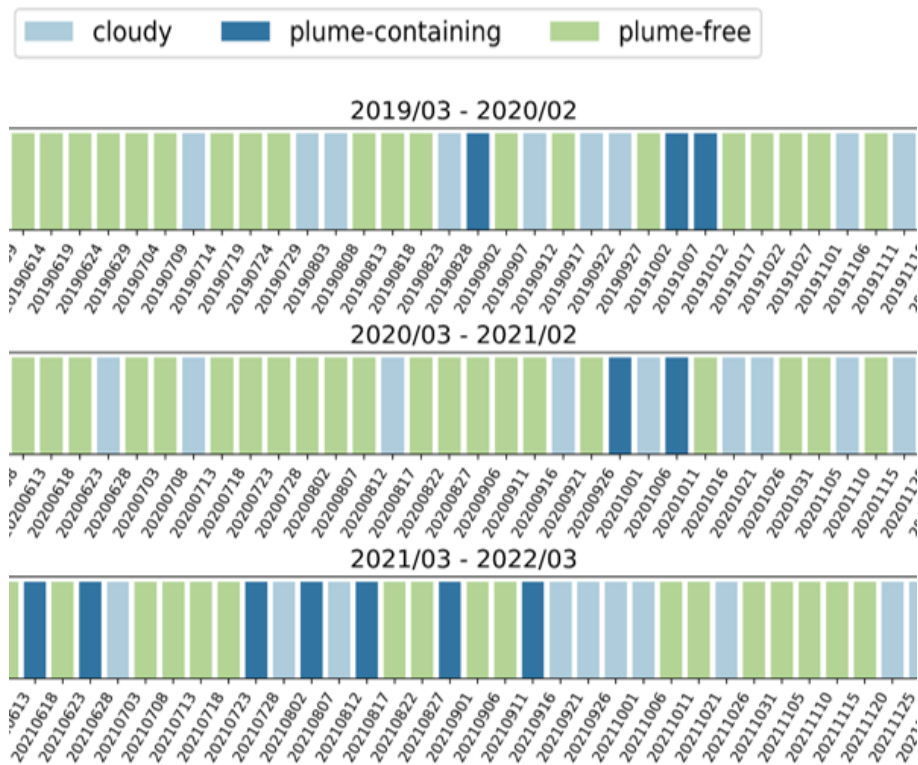
目标：2030年零常规火炬燃烧
现实：落后计划5年

南京大学 刘永学
Liu et al. (2023)

火炬燃烧 vs. 放空



卫星甲烷点源探测



总结

- 卫星甲烷观测发展迅速。在监测甲烷排放、为减排提供信息方面有很强的应用前景。
- 区域型和点源型卫星观测应用于不同目的的油气甲烷排放的监测。
- 区域评估和高排放点源探测都已有若干研究案例。
- 卫星应用技术门槛较高。业务化、产品化仍需探索。

