

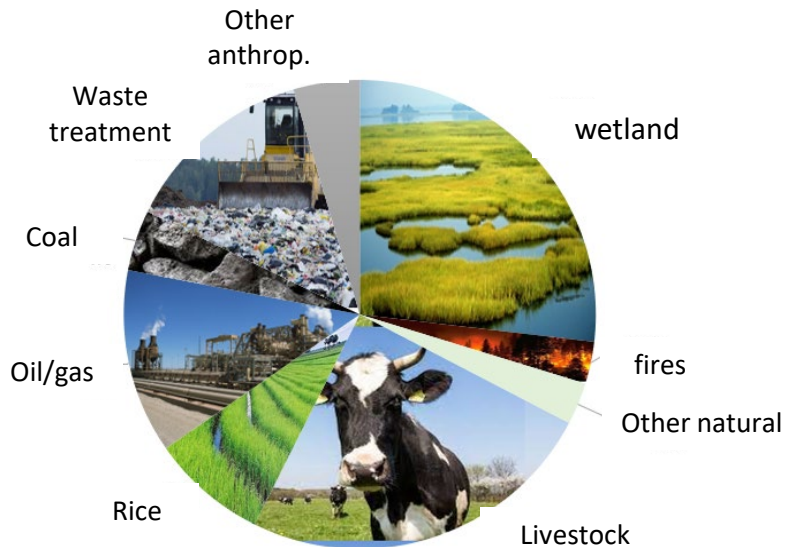
基于大气观测识别和量化 油气甲烷排放

张羽中 梁若思 赵淑韬 赵瑜佳 孙帅

2025. 10. 11

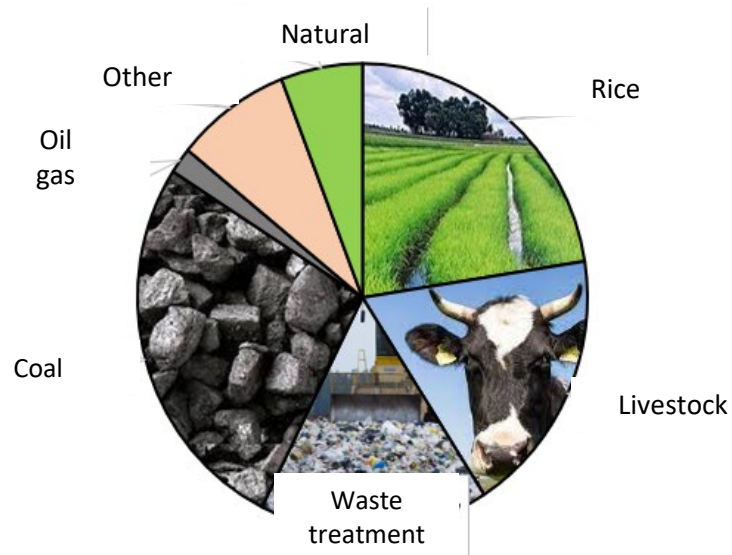
大气甲烷排放来源

全球



~ 550 Tg a⁻¹
(百万吨/年)

中国



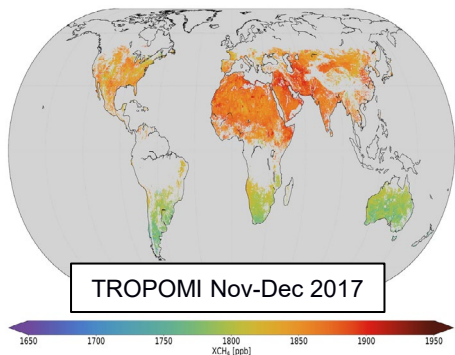
~ 55 Tg a⁻¹

Based on bottom-up inventories

不同空间尺度的监测需求

国家/全球尺度

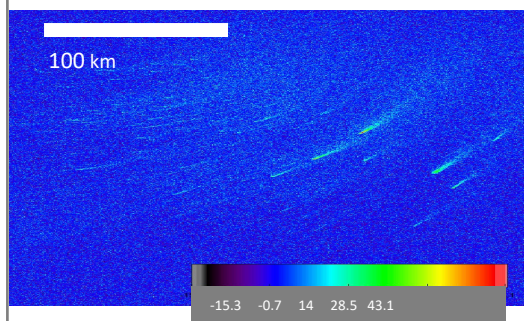
碳盘点



5-10 km 分辨率

区域/盆地尺度

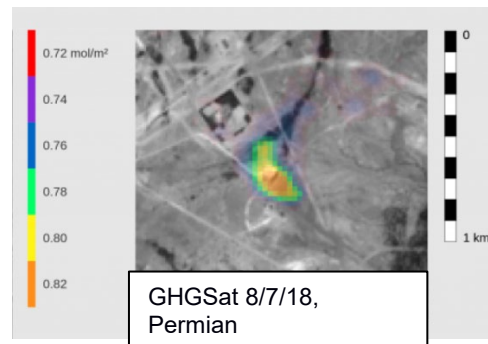
国家管理



~500-1000 m 分辨率

点源尺度

行业管控



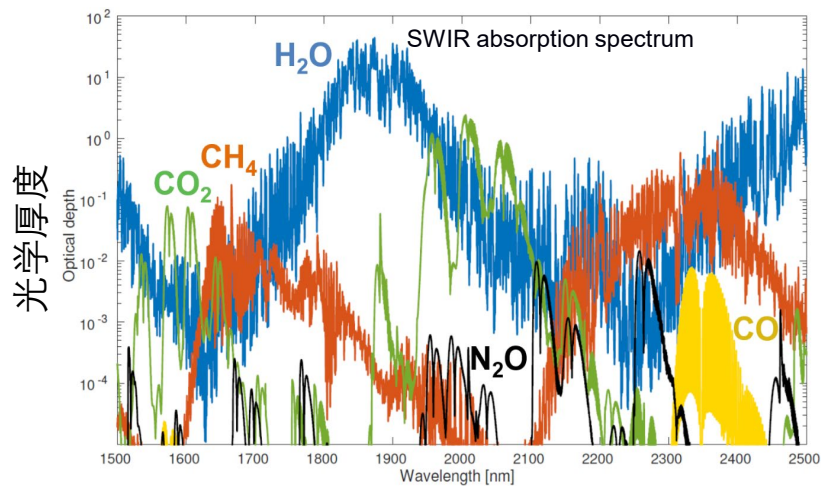
GHGSat 8/7/18,
Permian

~10 m 分辨率

甲烷卫星观测

覆盖全球、连续运行

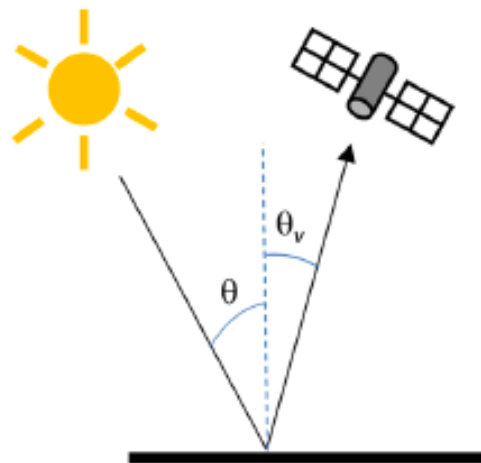
短波红外波段



↑
1.65 μm

↑
2.3 μm

太阳光后向散射



光程中的吸收
→ 甲烷浓度

区域型 vs. 点源型卫星

区域型

TROPOMI GOSAT

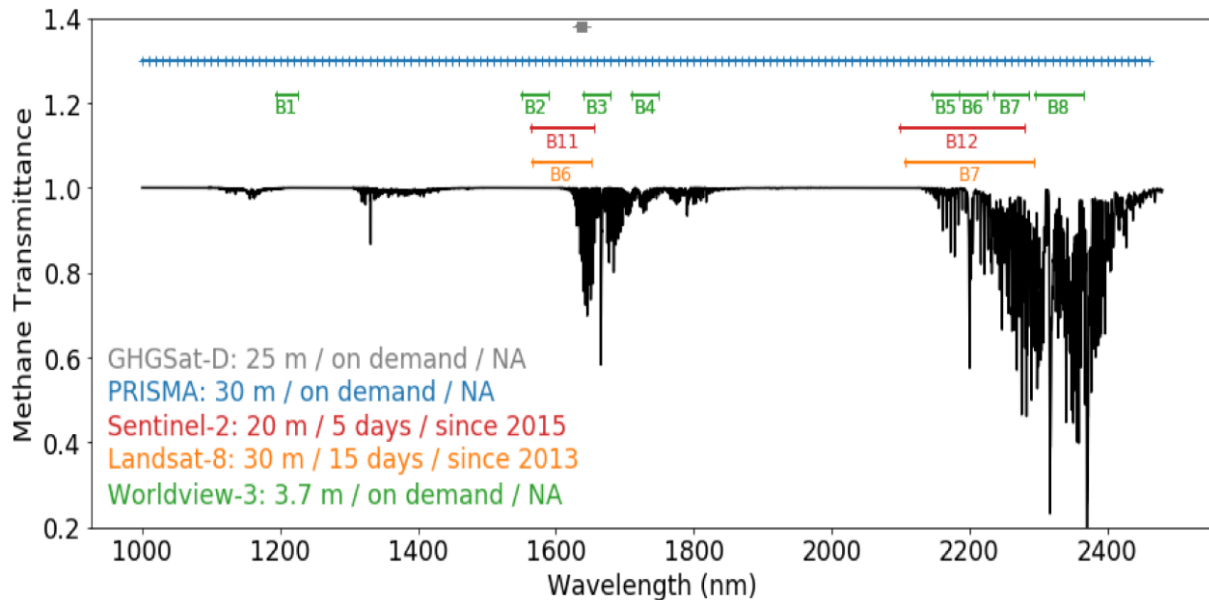
超高光谱 浓度精确
空间分辨率低（几公里）

点源型

Sentinel-2 Landsat

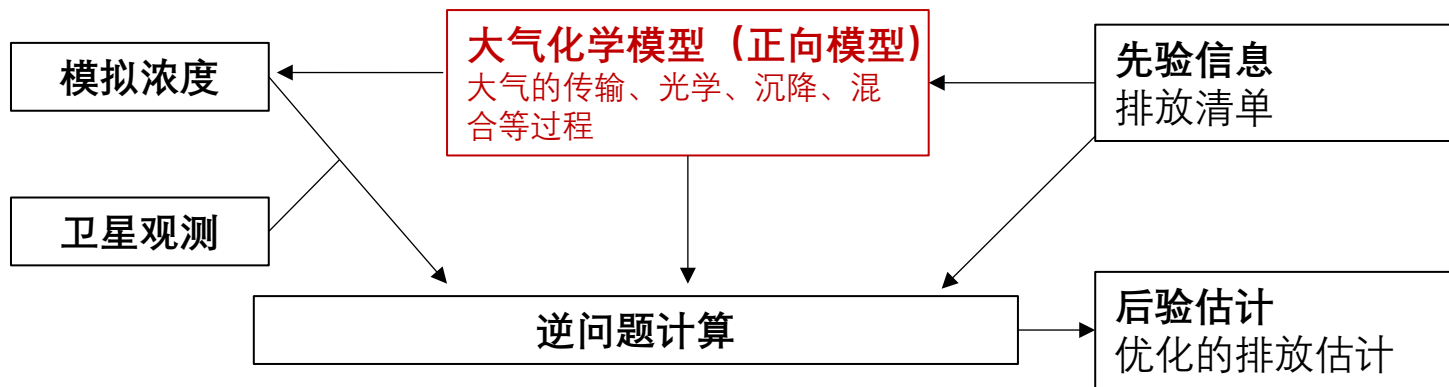
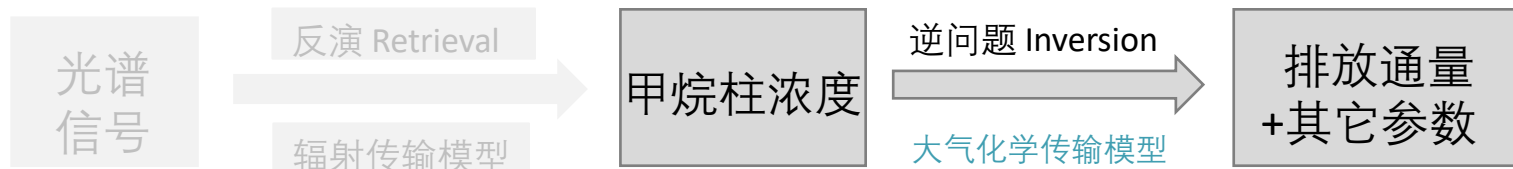
高分5号 EMIT GHGSat

多/高光谱 浓度不精确
空间分辨率高（几米）



Sánchez-García et al., 2021

区域型卫星监测应用技术关键



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

先验信息

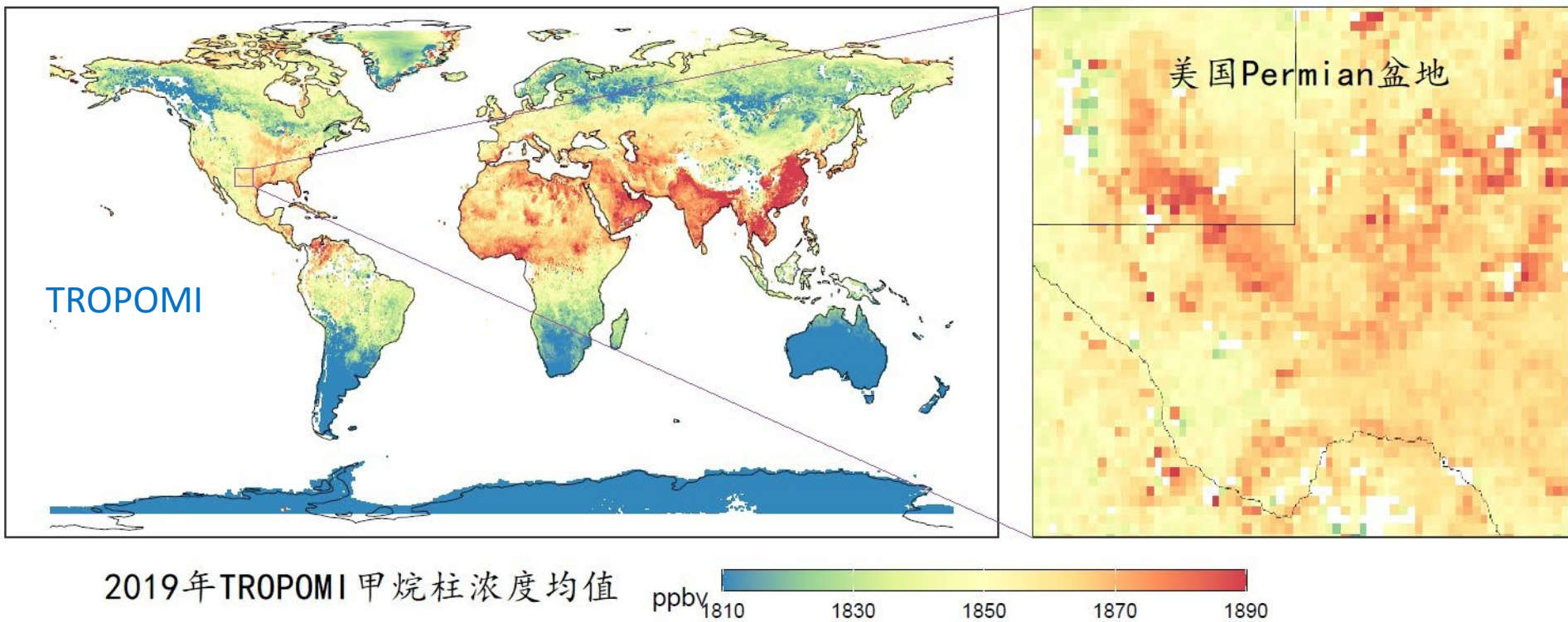
先验信息的不确定度

卫星观测

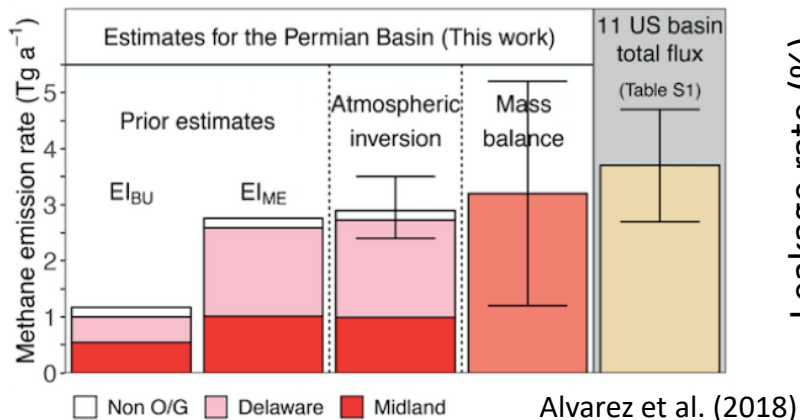
观测和模型的不确定度

正向模型: 观测对排放的敏感度

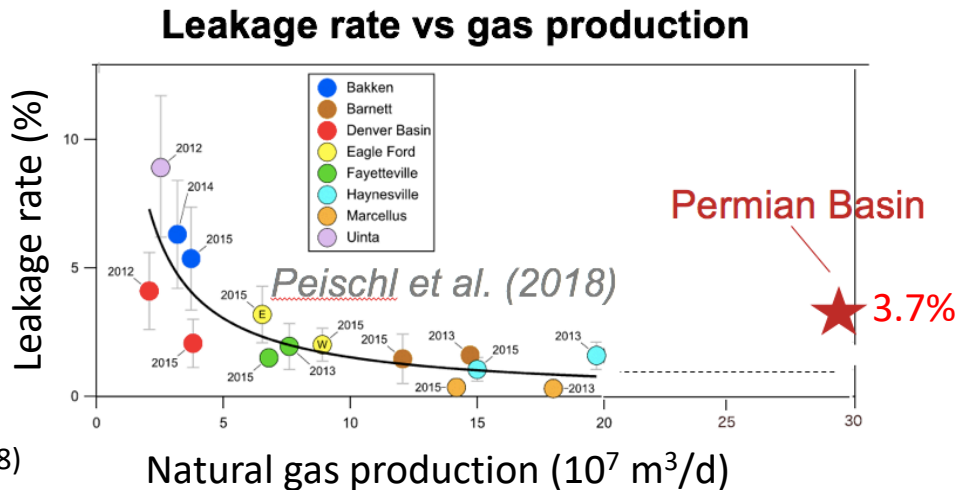
区域型卫星的应用



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）



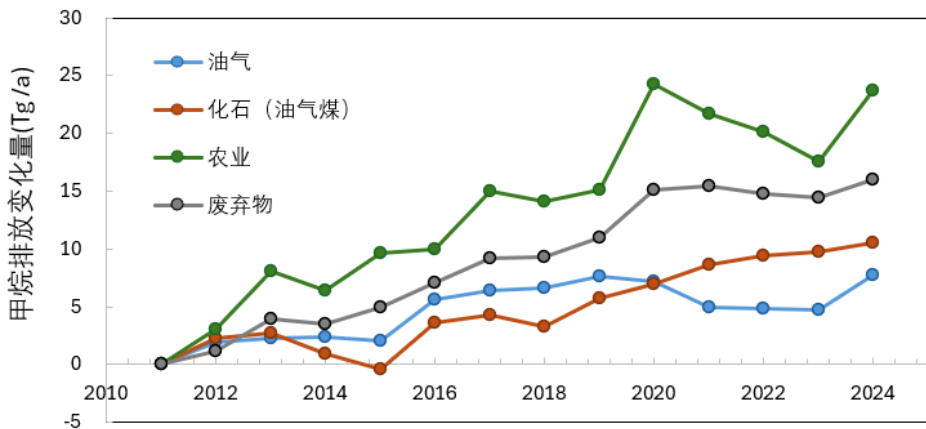
高天然气产量 & 高泄漏量

Zhang et al., Science Advance, 2020

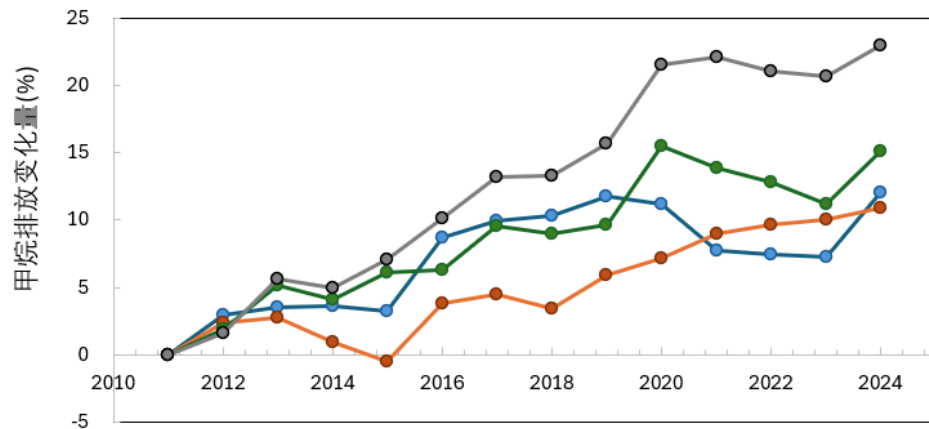
大气观测显示的全球甲烷排放变化趋势

相比农业、废弃物部门，油气部门排放**增长较缓**，与行业重视程度、减排措施有关

相比2011年变化 - 绝对量



相比2011年变化 - 相对量



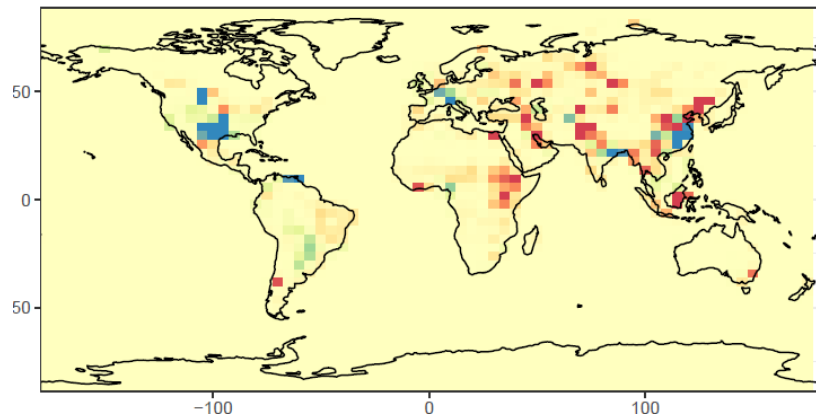
基于GOSAT卫星+NOAA地面站点观测的2011-2024全球反演

大气观测显示的全球甲烷排放变化趋势

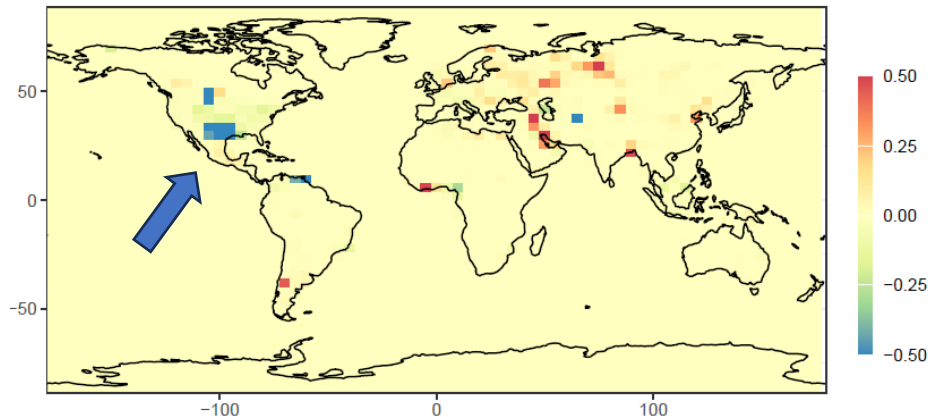
油气部门甲烷排放降低以北美最为显著；俄罗斯呈增长趋势

2022-2024 减去 2017-2019

人为源总排放



石油天然气部门

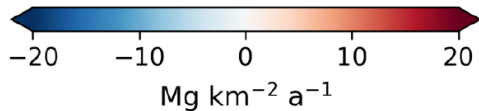
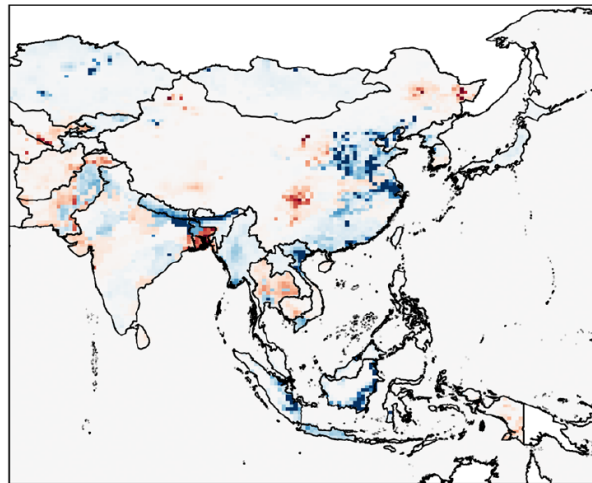


基于GOSAT卫星+NOAA地面站点观测的2011-2024全球反演

基于卫星观测定量中国油气甲烷排放

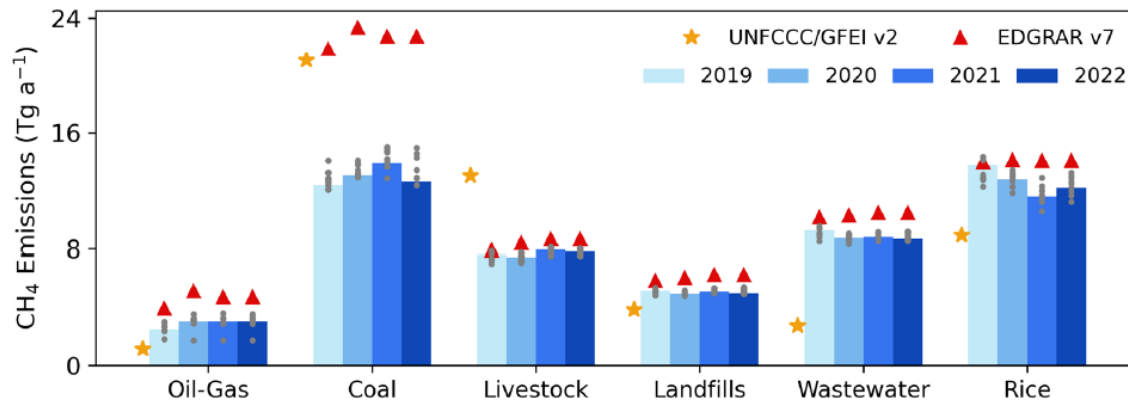
TROPOMI卫星的2019-2022东亚反演

(a) Posterior – prior emissions



油气部门以国家清单总量作为先验估计
GFEI做空间分配

(b) 2019-2022 Anthropogenic CH_4 emissions by sectors



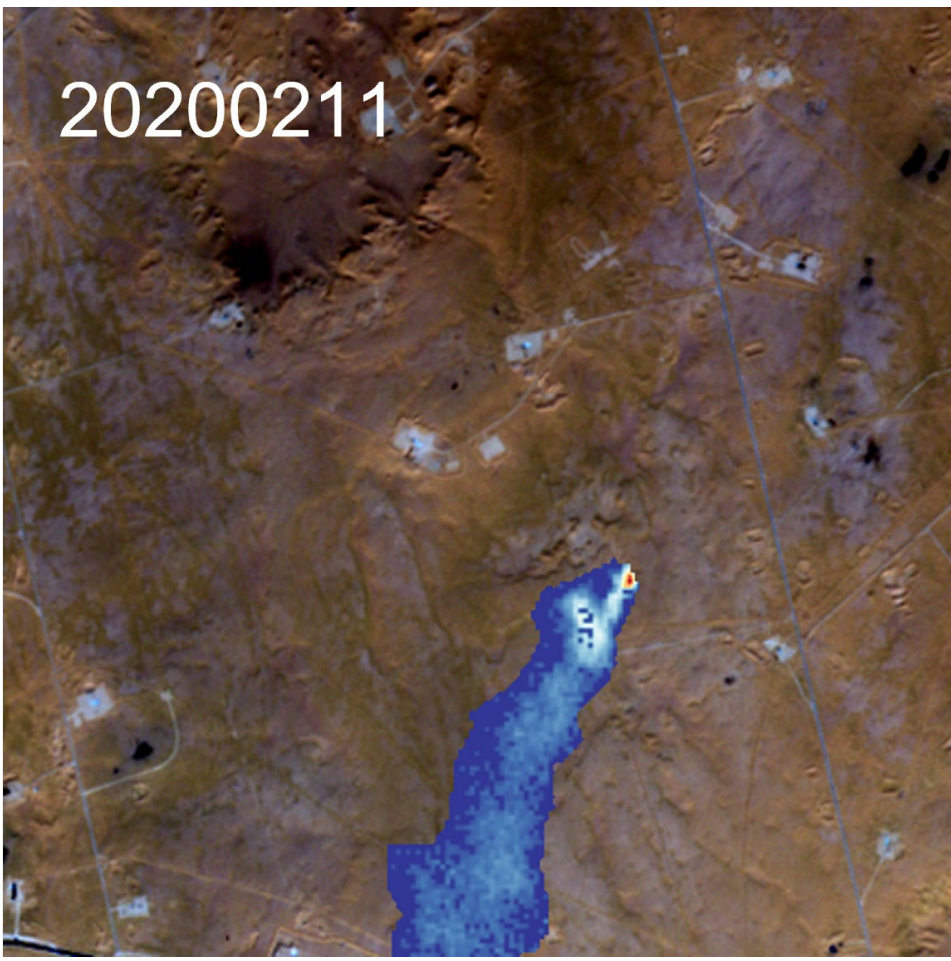
中国油气部门排放量高于国家清单,
低于EDGARv7清单

近几年无明显趋势

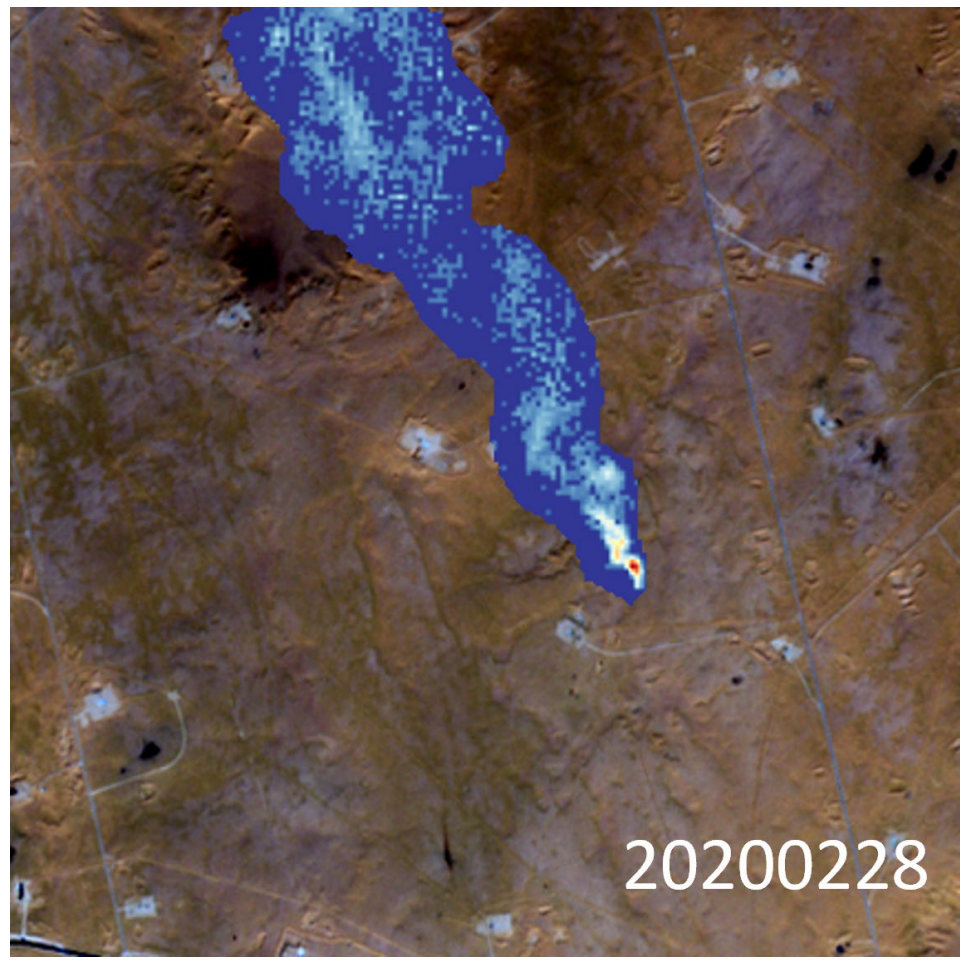
Liang et al., in prep

点源型卫星的应用

20200211



20200228



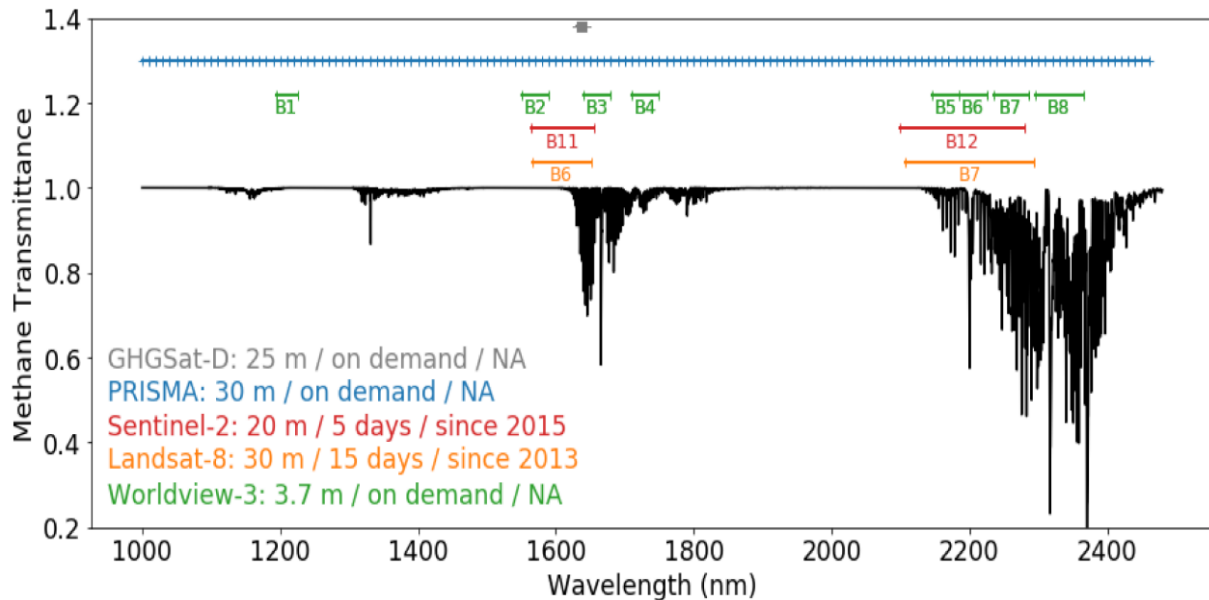
区域型 vs. 点源型卫星

区域型

超高光谱 浓度精确
空间分辨率低（几公里）

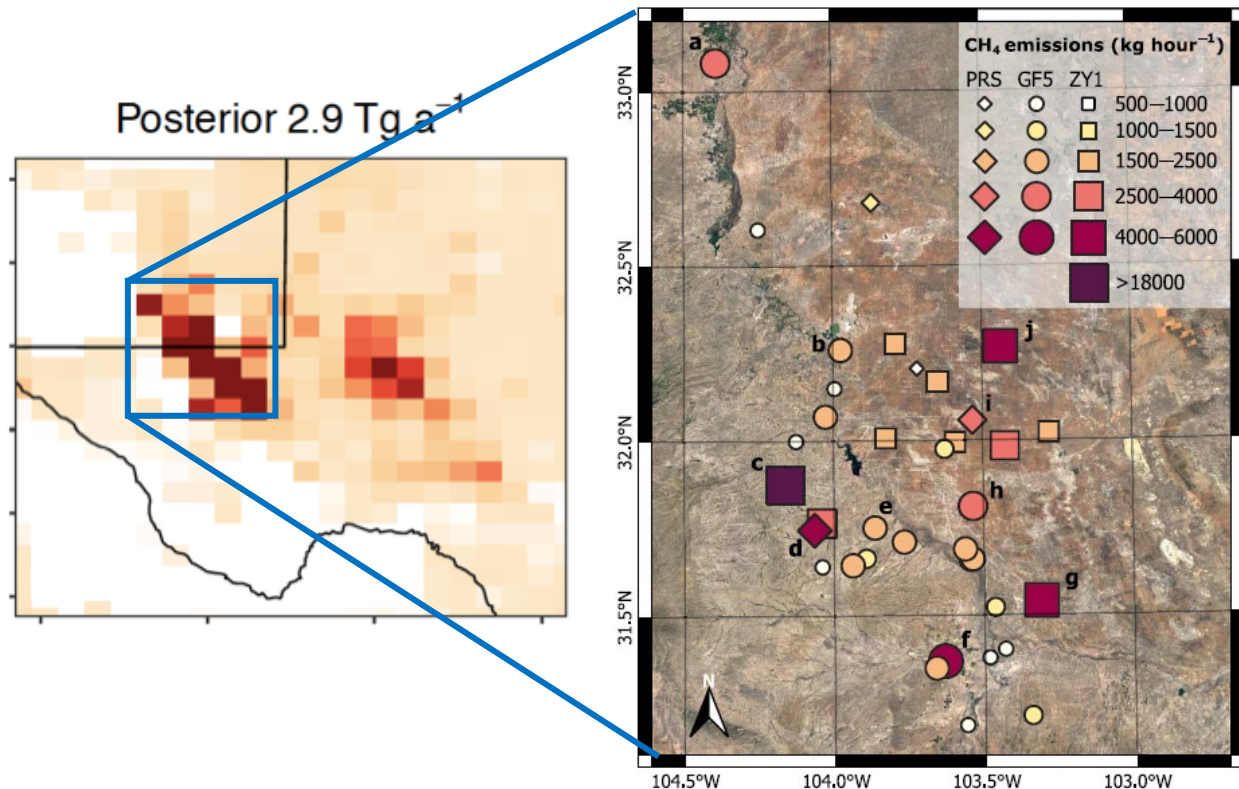
点源型

多/高光谱 浓度不精确
空间分辨率高（几米）



Sánchez-García et al., 2021

Permian Basin 点源探测

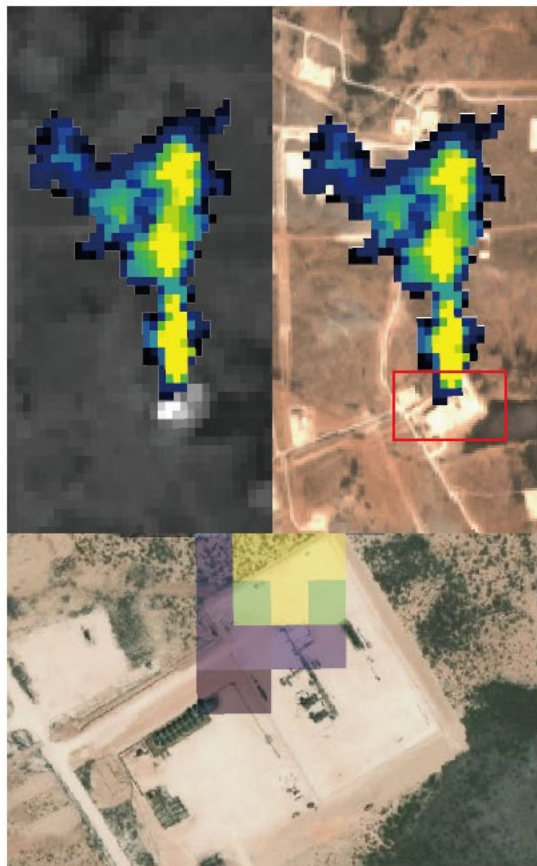


- PRISMA
- 高分5号
- 资源1号

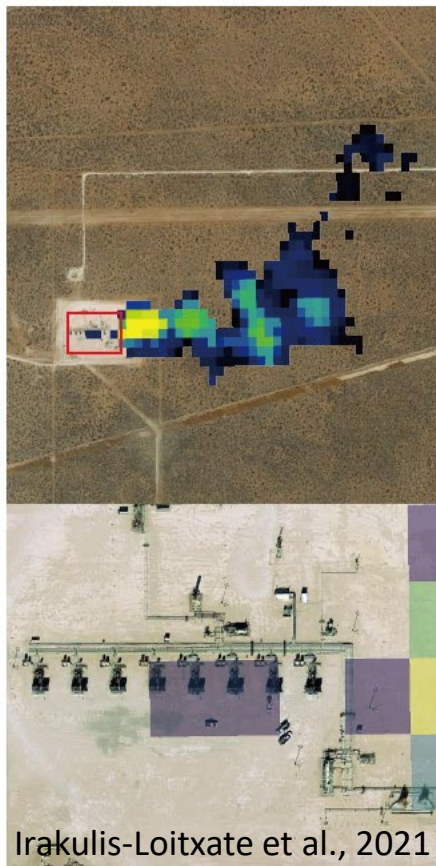
- 19个点源
- >500 kg/hr
- 区域总量的30%–50%

Permian Basin 点源探测

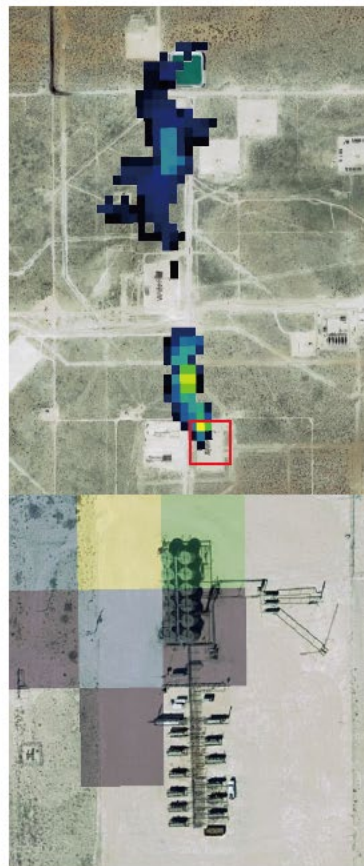
Flaring emission



Compressor emission



Tank battery emission



Irakulis-Loitxate et al., 2021

大型点源识别和量化

海量大数据
计算效率低

测量精度低
自动检测难

1. 计算甲烷浓度的变化量 (ΔX_{CH_4})

从光谱信号中提取甲烷浓度信息

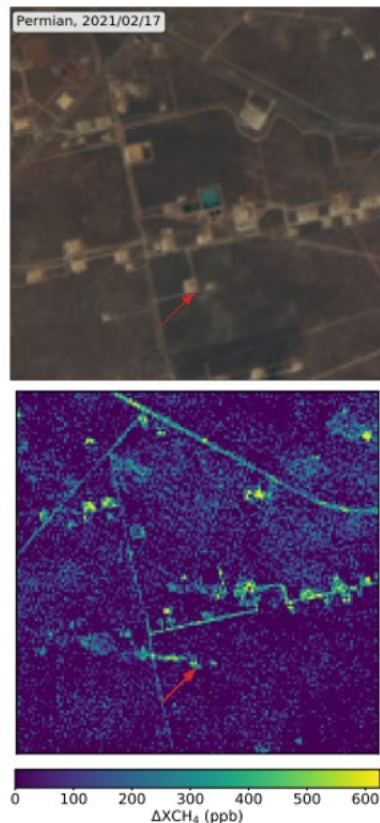
2. 识别甲烷烟羽

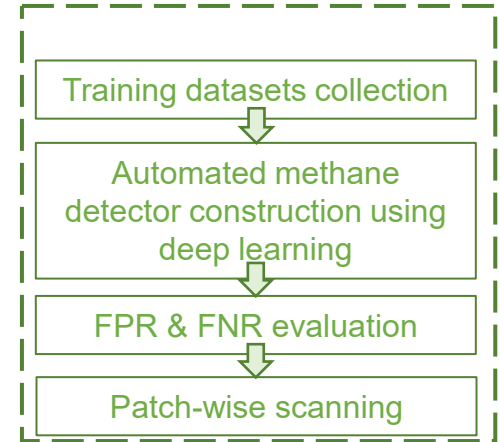
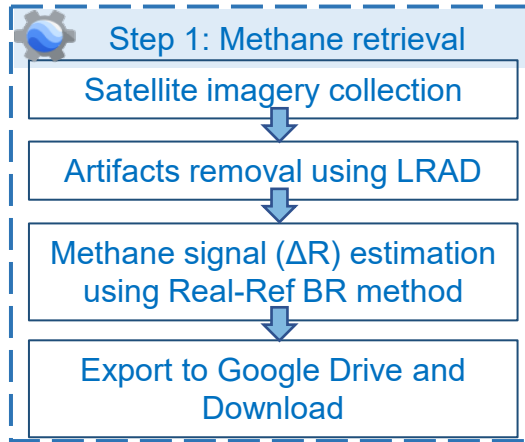
从甲烷浓度场中分辨出有效信号、定位排放源位置

3. 排放源判定

利用辅助信息判断排放源

4. 排放通量估算





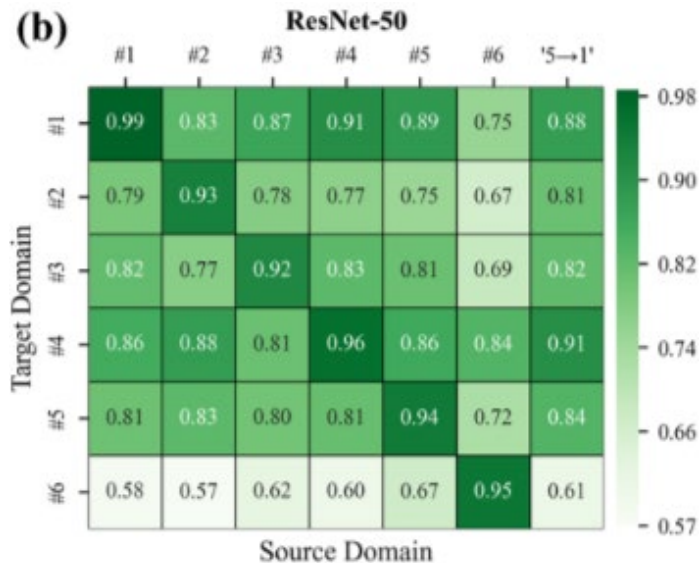
Positives



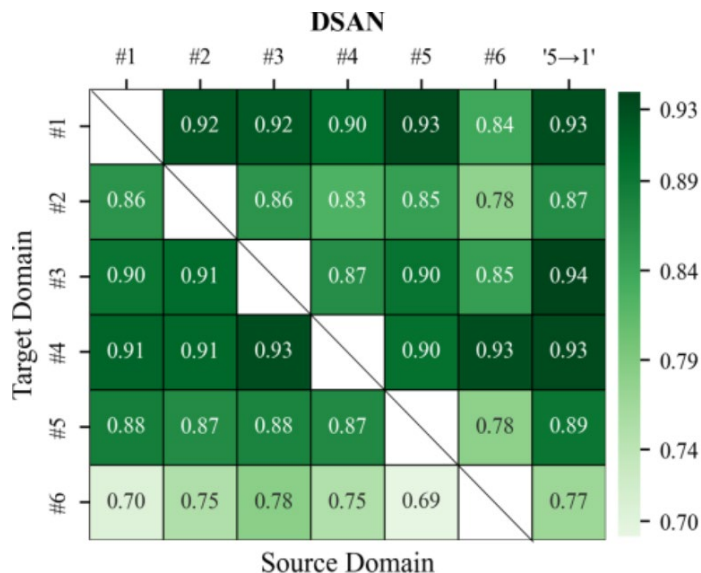
迁移学习训练Sentinel-2甲烷烟羽检测器

挑战：有效样本少，背景干扰大，A地数据训练的检测器难以用于B地

传统机器学习方法



迁移学习

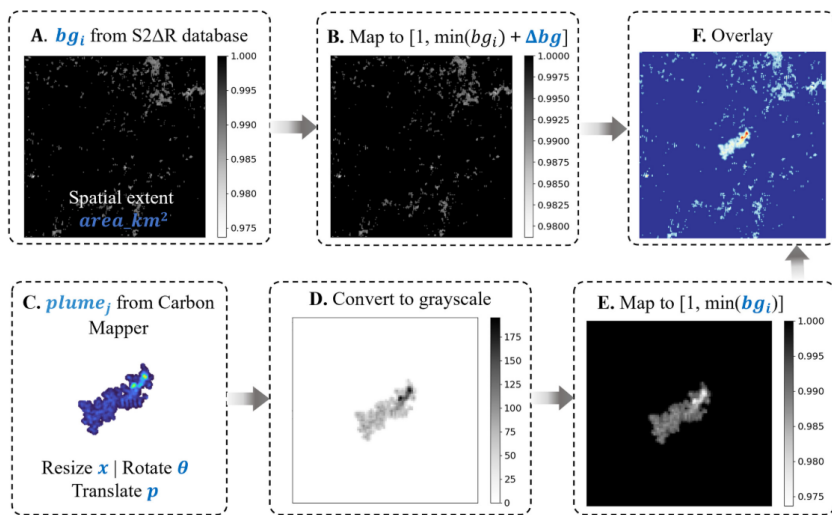


非对角线表示跨地区应用

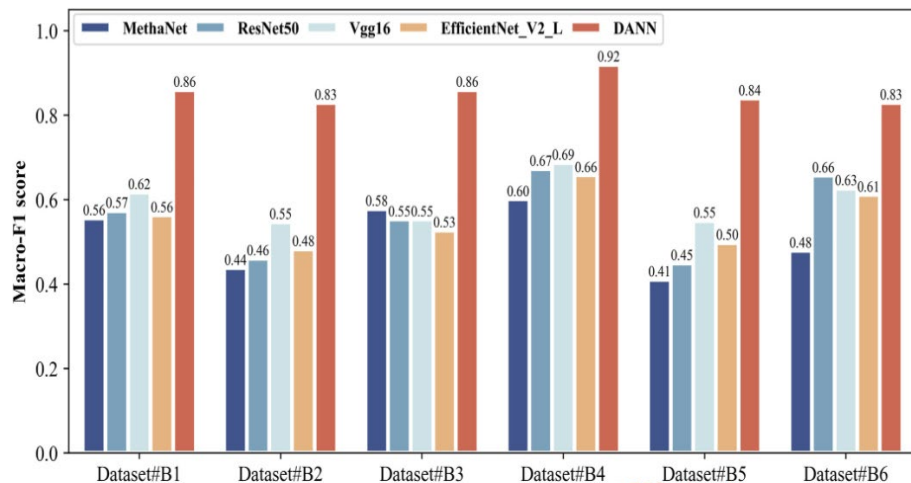
迁移学习训练 Sentinel-2 甲烷烟羽检测器

挑战：有效样本少，难以训练高准确率的检测器

基于高光谱卫星烟羽生成训练数据 → 多光谱卫星烟羽检测器

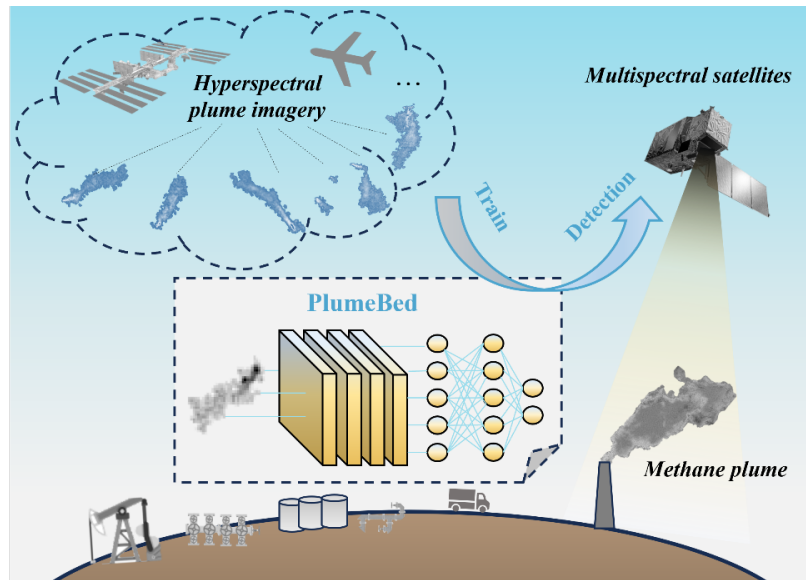


训练数据合成



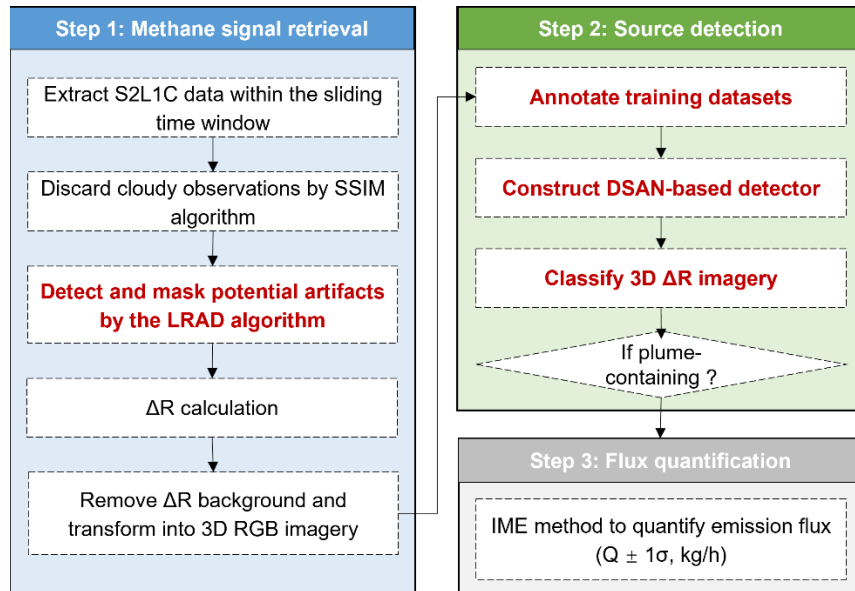
探测效果评估

2017-2023年甲烷点源排放与背景数据



<https://www.aers-cloud.org.cn/>
融合产品/甲烷点源排放

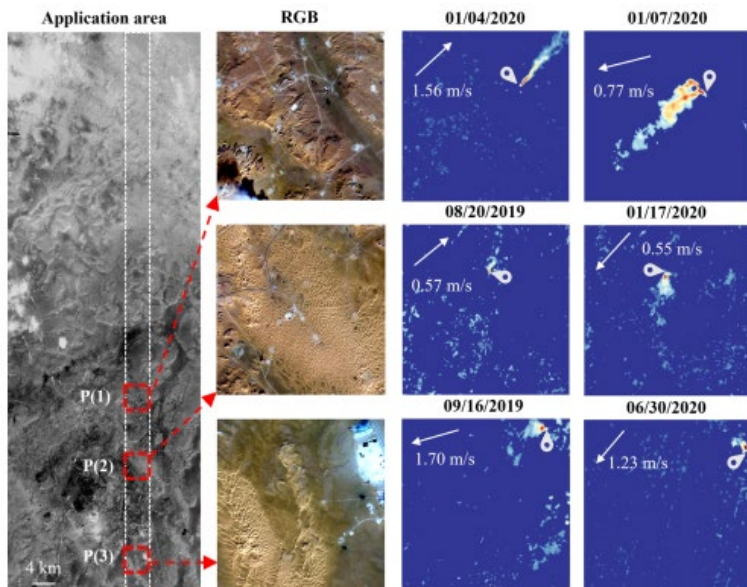
2017-2023年甲烷点源排放图像数据



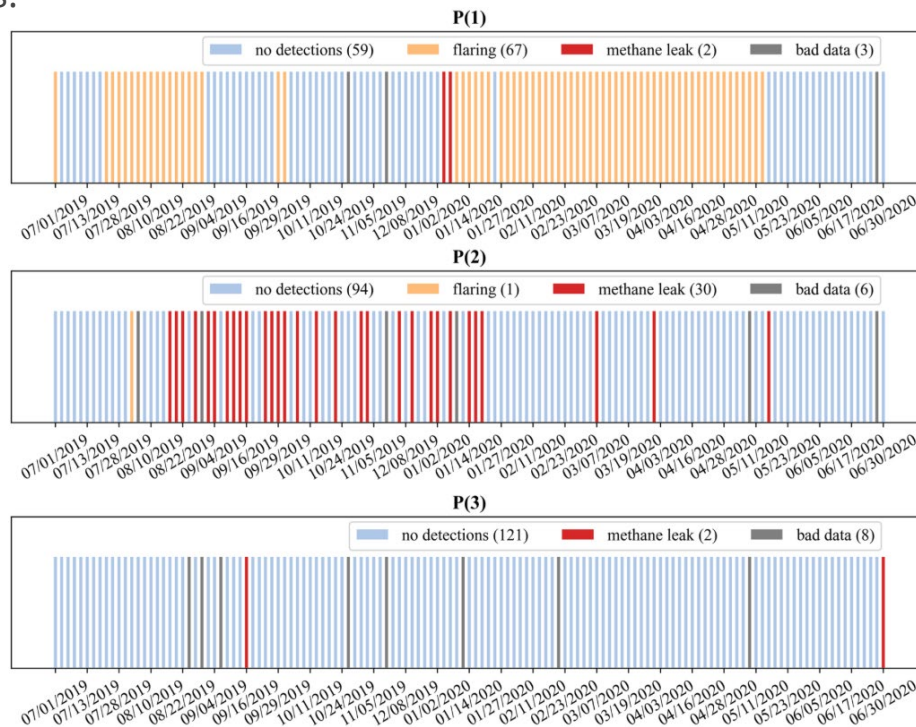
<https://www.aers-cloud.org.cn/>
融合产品/甲烷点源排放图像

Hassi Messaoud O&G field in Algeria

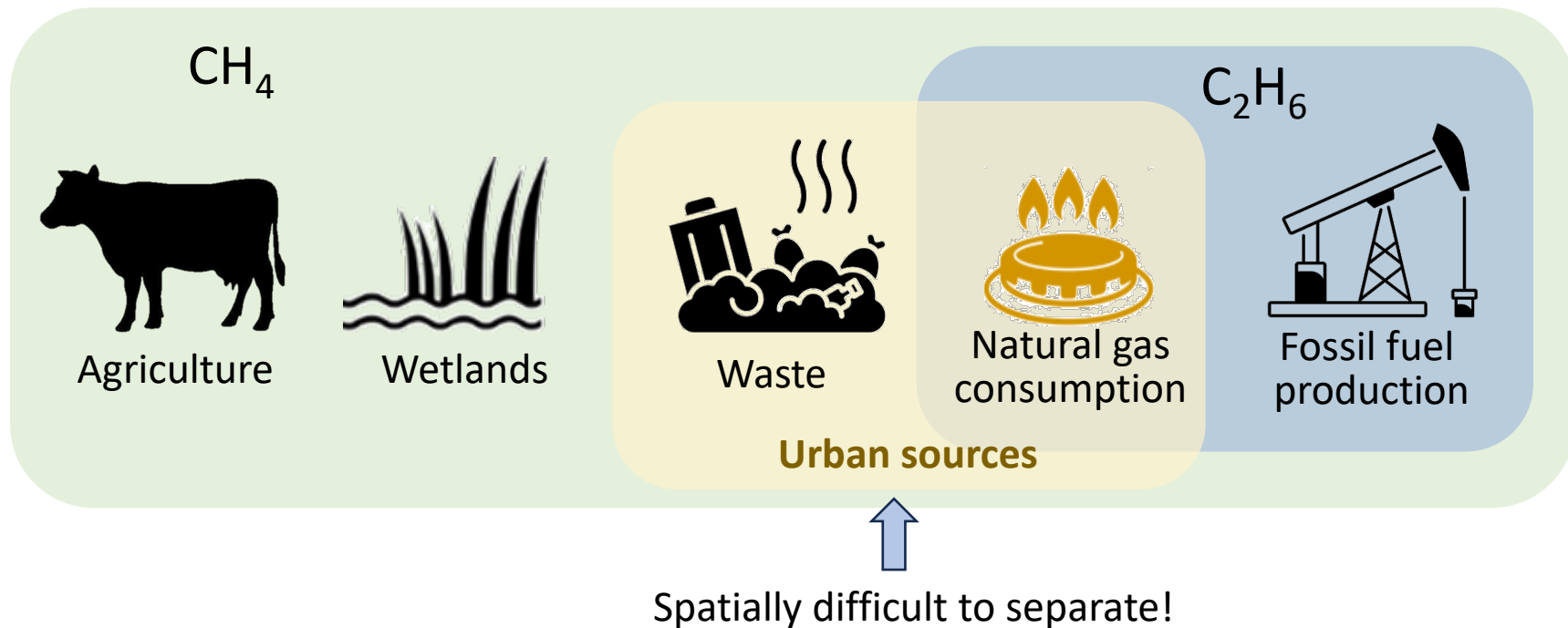
3527 images (200 pixels by 200 pixels) for 1 year, yielding 3168 negative (plume-free) and 369 positive (plume-containing) detections.



P(1): 31.8651°, 6.1683° | P(2): 31.7566°, 6.1864° | P(3): 31.5846°, 6.4878°

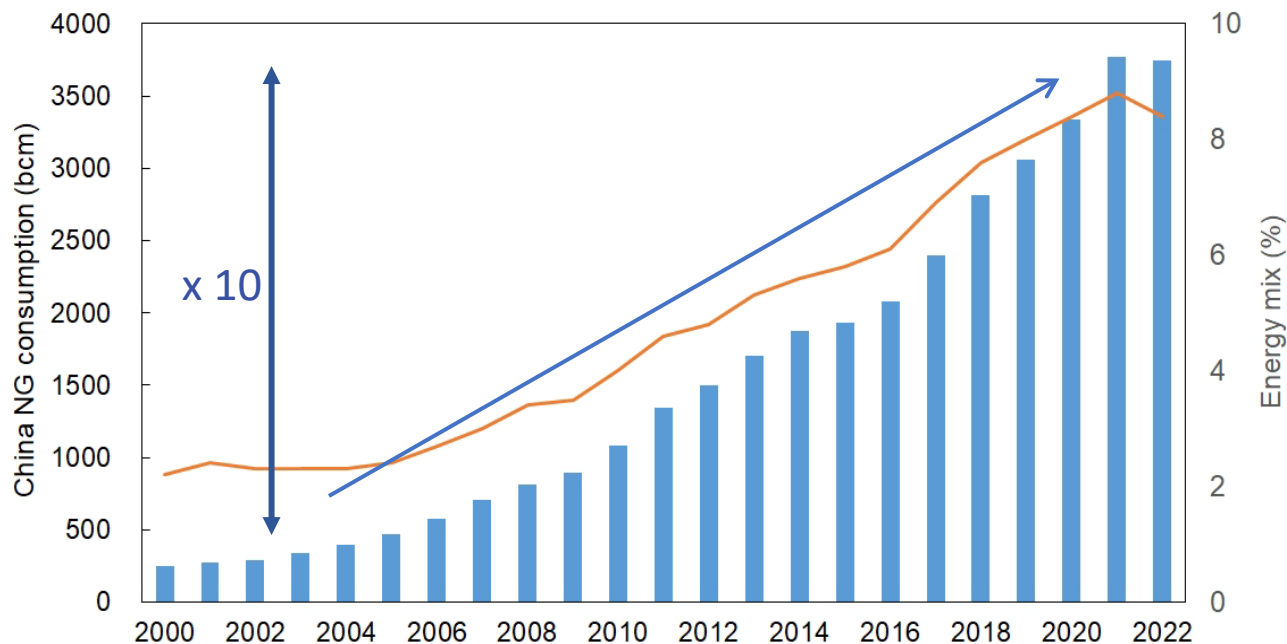


基于乙烷观测估算城市尺度燃气甲烷排放量



中国天然气消费量

Rapidly increasing consumption of natural gas since the 2000s



National Bureau of Statistics of China

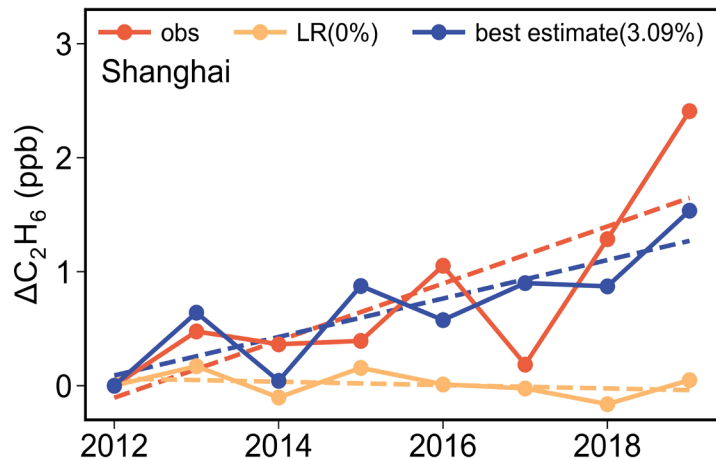
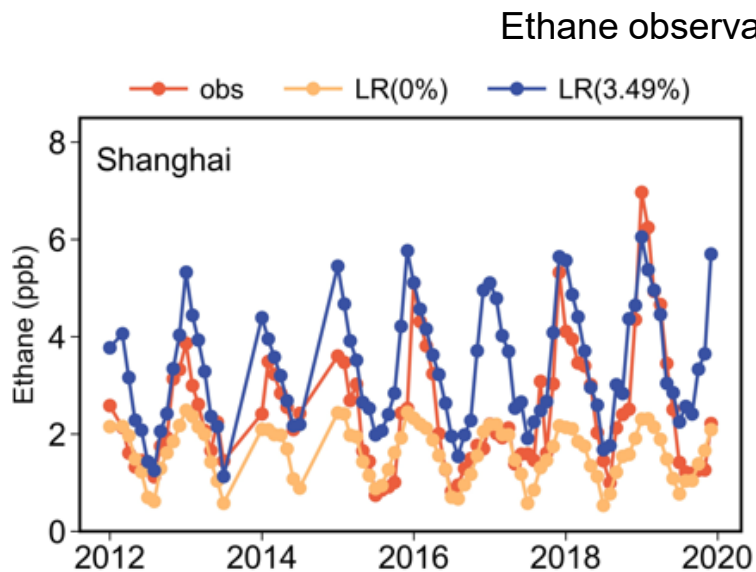
What is the leakage rate?

- **~0.2%** default inventory guideline
- **~2%** reported in some North American cities

Los Angeles: Wennberg 2012; Wunch 2016; He 2019; Zeng 2023

Boston: Mckain 2014

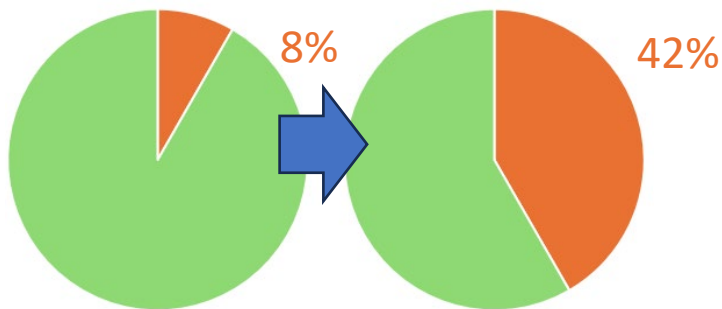
乙烷观测指示长三角城市燃气甲烷排放不可忽略



A leakage rate of 3.5% is needed to reproduce ethane observations

燃气vs废弃物 - 城市甲烷排放结构

Natural gas consumption to methane emissions in Yangtze-River Delta cities



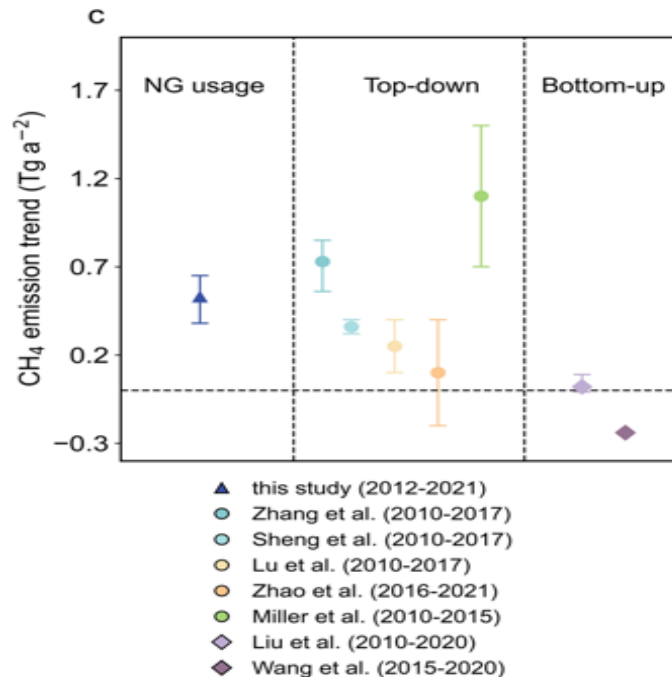
Zhang et al. (2022)

Updated with ethane data

Natural gas consumption

Non-Natural gas consumption
(e.g., wastewater, landfills)

Important contributor to national trend



Zhao et al., in prep

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。
- 全球油气甲烷排放增幅较小，北美出现减排趋势。
- 研究多关注生产环节的甲烷排放，城市燃气终端使用的排放的重要性可能被低估。

