

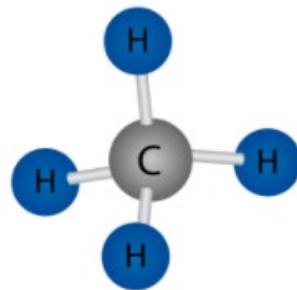
卫星遥感测量甲烷排放

从全球、区域到点源

张羽中

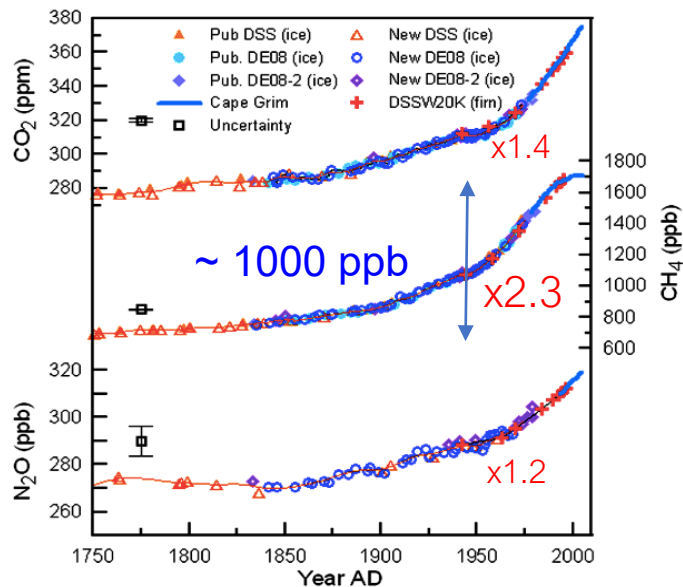
西湖大学大气环境研究课题组

zhangyuzhong@westlake.edu.cn



温室气体甲烷

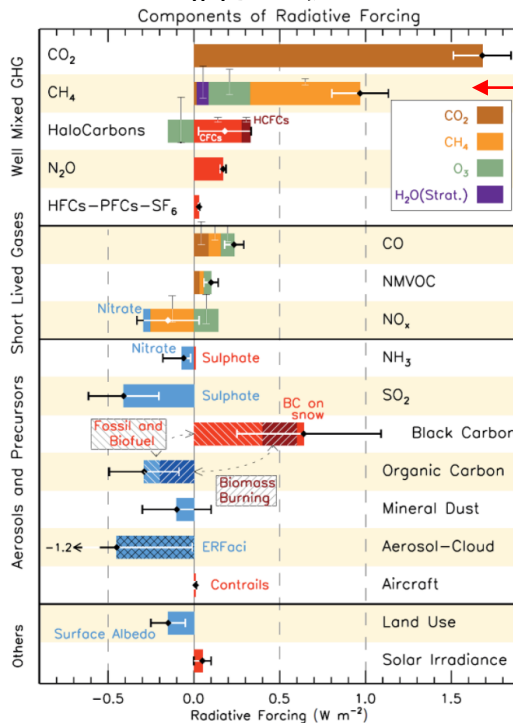
工业革命以来大气温室气体浓度变化



Ice core record

MacFarling Meure et al., GRL, 2006

辐射强迫

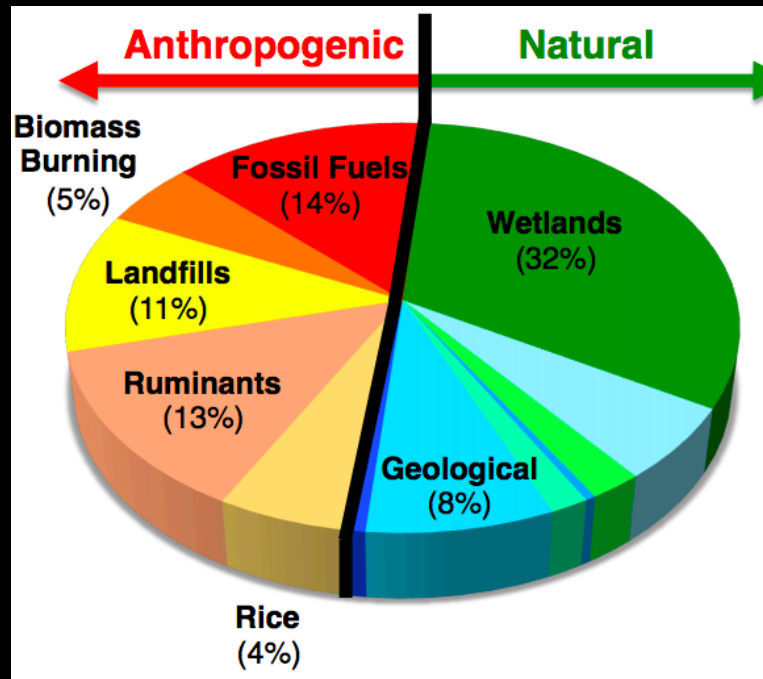


全球升温潜势
Global Warming
Potential

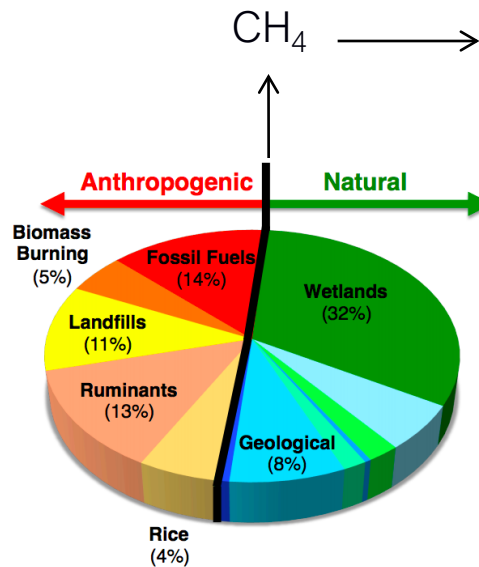
单位质量甲烷吸收红外能量的能力是二氧化碳的30倍（100年尺度）

IPCC AR5

大气甲烷的源



大气甲烷的汇



源
550 ± 60 Tg a⁻¹

汇
大气寿命约10年

对流层OH氧化
89%



对流层Cl氧化

土壤吸收

平流层氧化

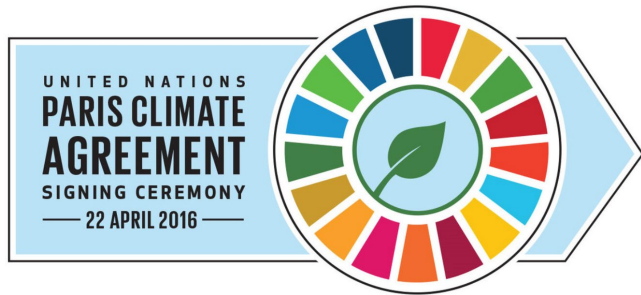
如能显著降低排放，通过十几年就能**降低**大气浓度，从而降低温室效应



二氧化碳没有大气汇，在大气中存留约100年。降低排放**减缓**浓度上升。

温室气体减排

应对气候变化



中国的承诺

二氧化碳排放力争于**2030年前达到峰值**
努力争取**2060年前实现碳中和**

“十四五”时期 环境领域主要目标

● 推动绿色发展，促进人与自然和谐共生

坚持绿水青山就是金山银山理念

持续改善环境质量，基本消除重污染天气和城市黑臭水体

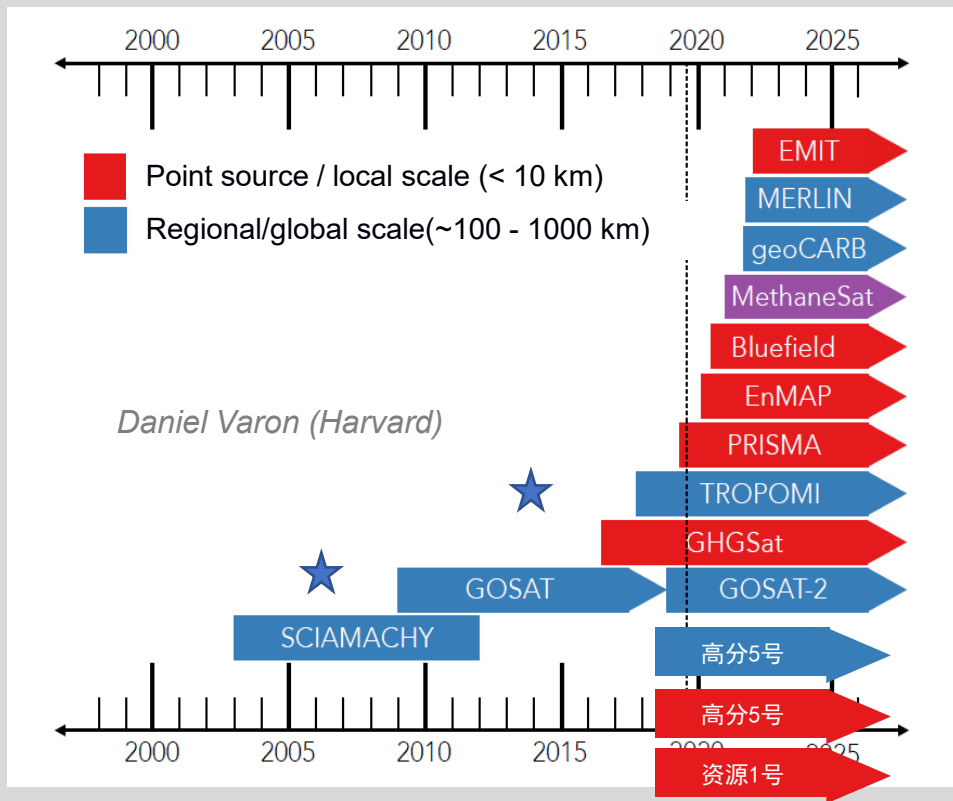
落实2030年应对气候变化国家自主贡献目标

加快发展方式绿色转型

首次提出
控制甲烷
等非二氧化
氧化碳温室
气体

《2021两会政府工作报告》

发展迅速的卫星观测能力



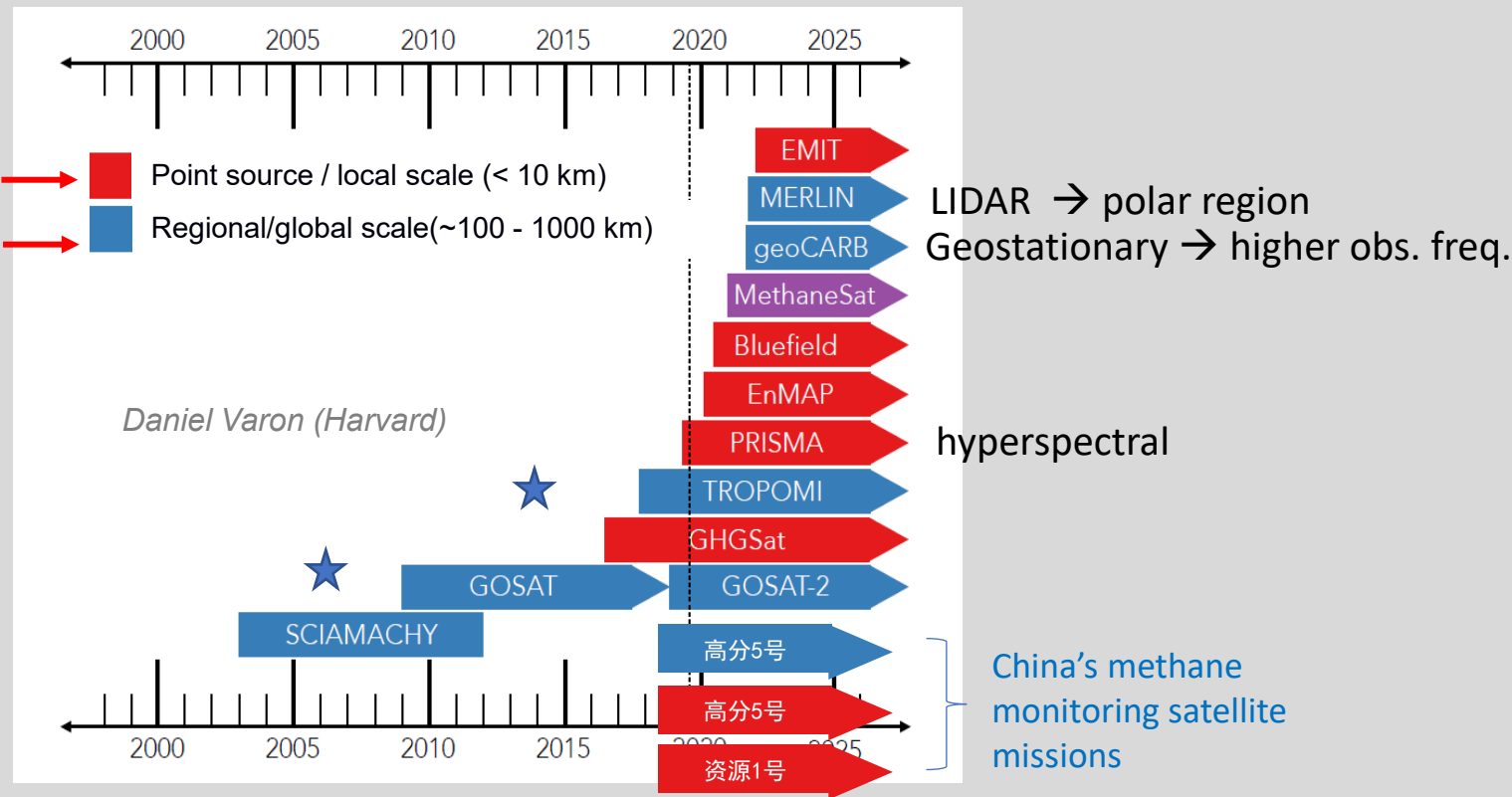
发展迅速的卫星观测能力

Low precision

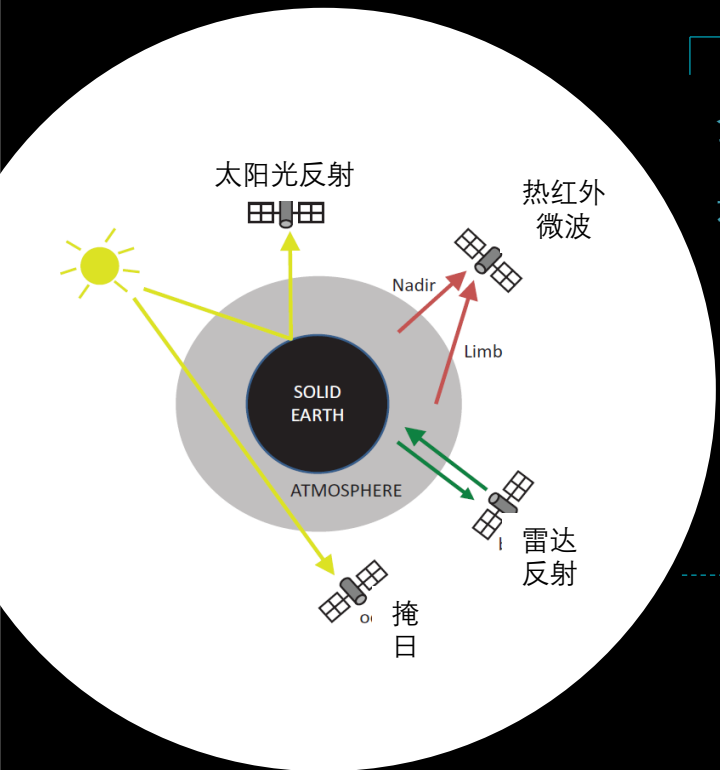
high spatial resolution

High precision

low spatial resolution



卫星环境监测的独特优势

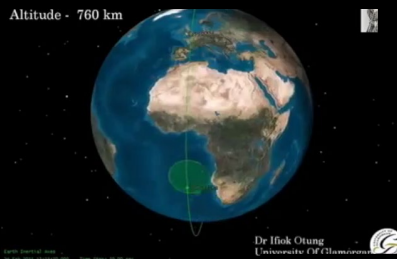


全球覆盖

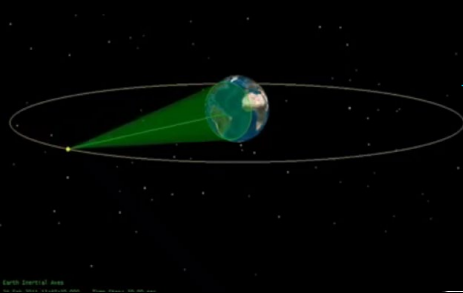
连续运行

极轨轨道
500-1000 km 高度

Altitude - 760 km



地球静止轨道
36,000 km 高度



常见观测物种

Pollutant gases:

NO_2 , SO_2 , O_3 , CO , NH_3 ,
 CH_2O , $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_2$, BrO

Greenhouse gases

CO_2 , CH_4

Aerosols

Temperature, precipitation,
light, fire, cloud, lightning,
land type, carbon cycle

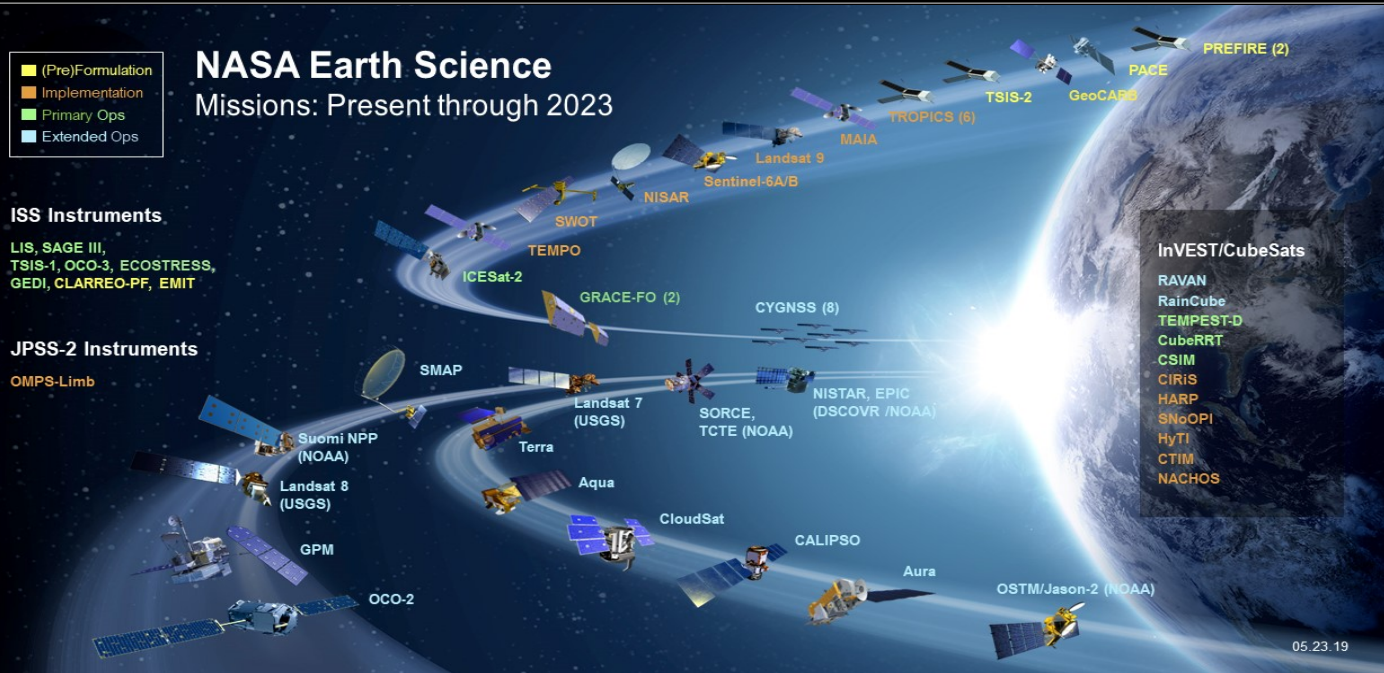
迅速增长的卫星监测能力

欧美机构

美国: NASA, NOAA

欧洲: ESA, EUMETSAT

日本: JAXA



污染气体:

NO_2 , SO_2 , O_3 , CO , NH_3 ,
 CH_2O , $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_2$, BrO

温室气体:

CO_2 , CH_4

颗粒物

温度、降水、火点、灯光、云、闪电、土地类型、碳循环

迅速增长的卫星监测能力

中国

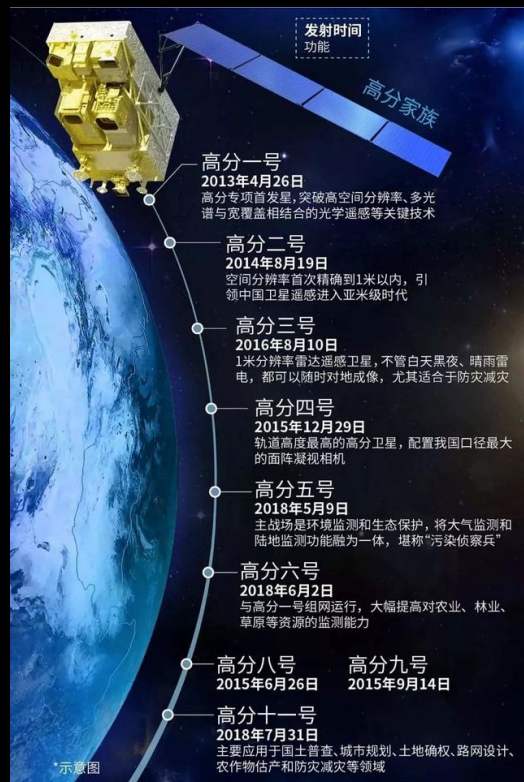
高分系列

环境一号

风云系列

从国家国防科技工业局与中国气象局联合召开的风云卫星发展研讨会上获悉

我国未来十年将发射14颗气象卫星



高质量数据
“气候级”

海量数据
空间分辨率
时间分辨率

覆盖全球

科学问题
决策支持

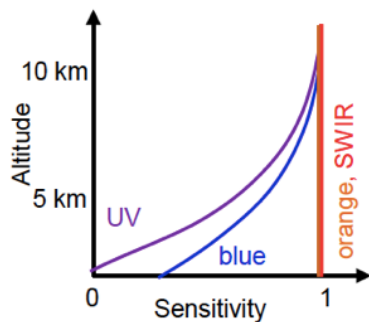
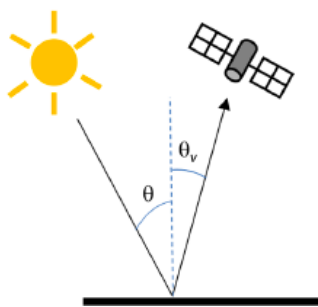
卫星遥感监测的常见物种、波段和垂直敏感性

太阳光反射

紫外：二氧化硫、甲醛、臭氧、BrO

可见：二氧化氮、颗粒物、臭氧

近红外：一氧化氮、甲烷、二氧化碳



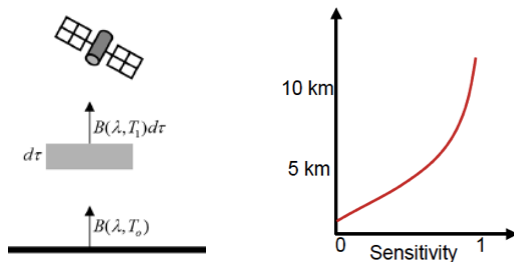
气体：OMI, GOME-2, OMPS, MOPITT, GOSAT, OCO-2, TROPOMI, TEMPO

颗粒物：MODIS, MISR, VIIRS

热红外

一氧化碳、臭氧、氨、甲烷

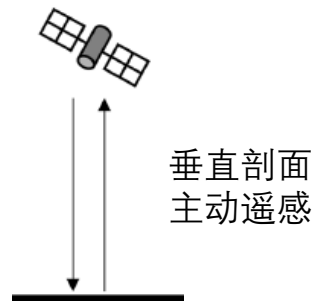
MOPITT, TES, AIRS, IASI, CrIS



雷达

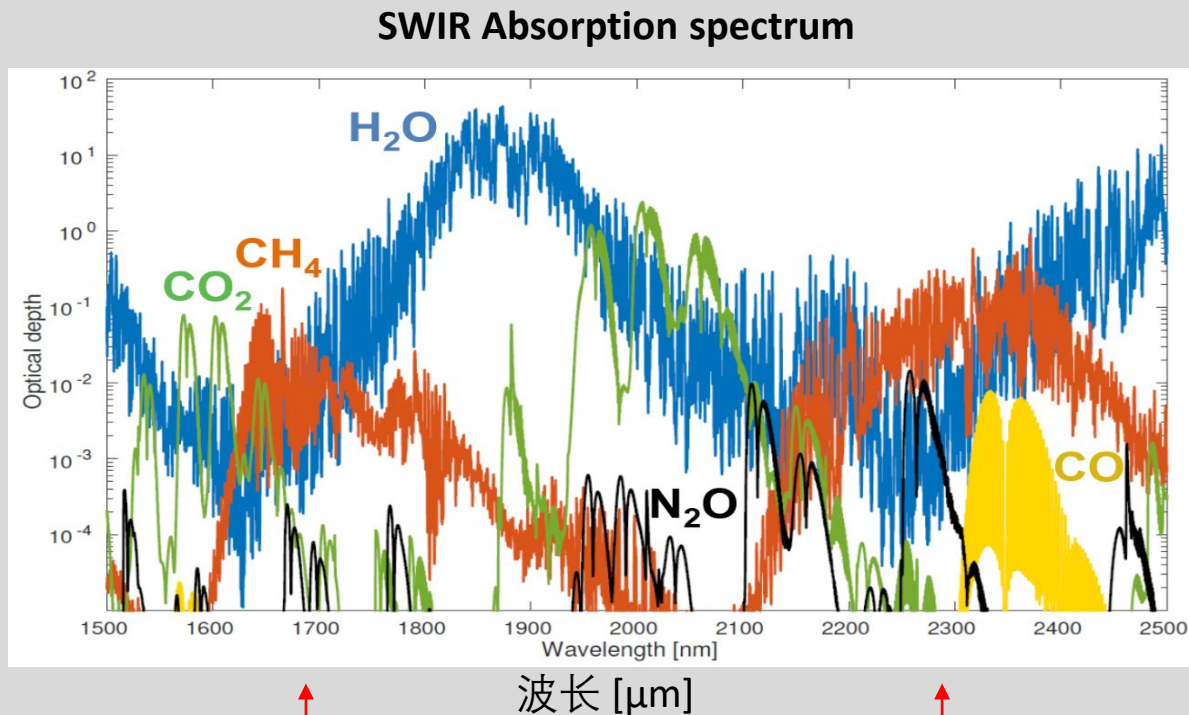
颗粒物 CALIOP

甲烷 MERLIN

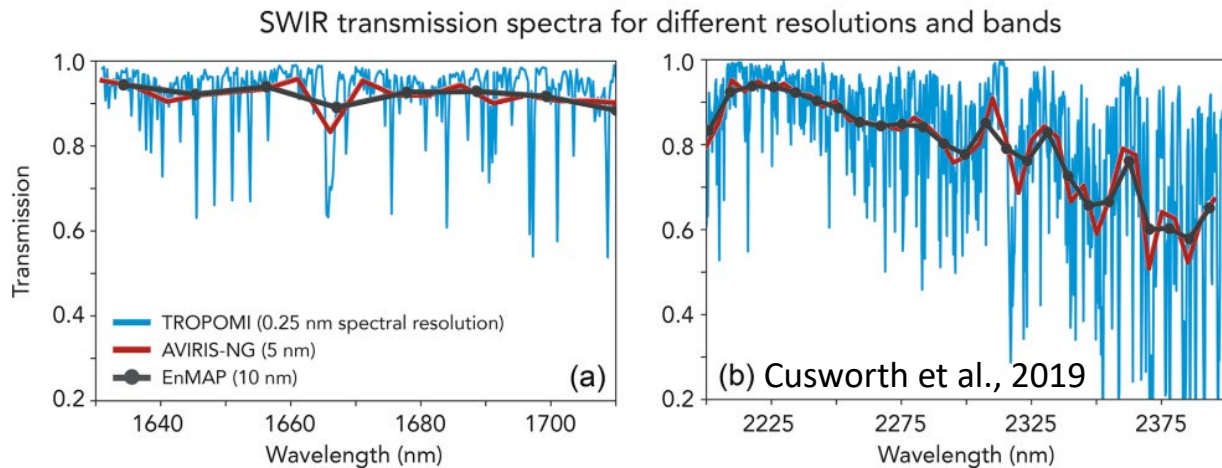


甲烷卫星观测：甲烷在太阳红外波段的吸收谱线

光学厚度



区域vs. 点源：光谱分辨率和空间分辨率的权衡

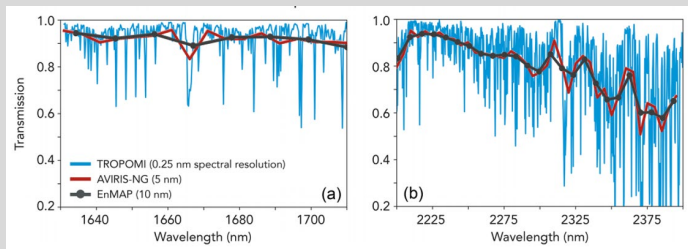


区域监测：高光谱分辨率→高浓度精度、低空间分辨率（10km）→低定位能力
大幅宽（几百到上千千米）→一次覆盖范围广、重访时间短

点源探测：低光谱分辨率→低浓度精度、高空间分辨率（50m）→高定位能力
小幅宽（几百到上千千米）→一次覆盖范围小、重访时间长

卫星遥感监测排放的技术路线

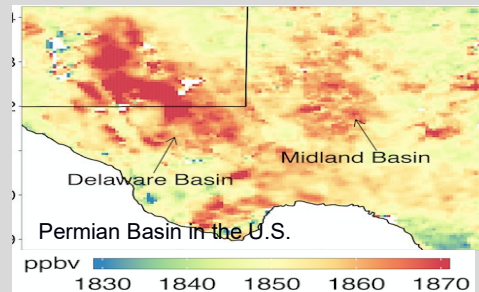
光谱信号



浓度反演

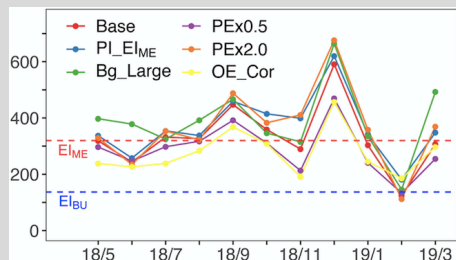
辐射传输模型

浓度信息

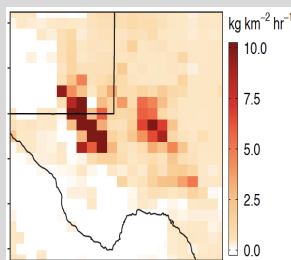


排放信息

Temporal changes

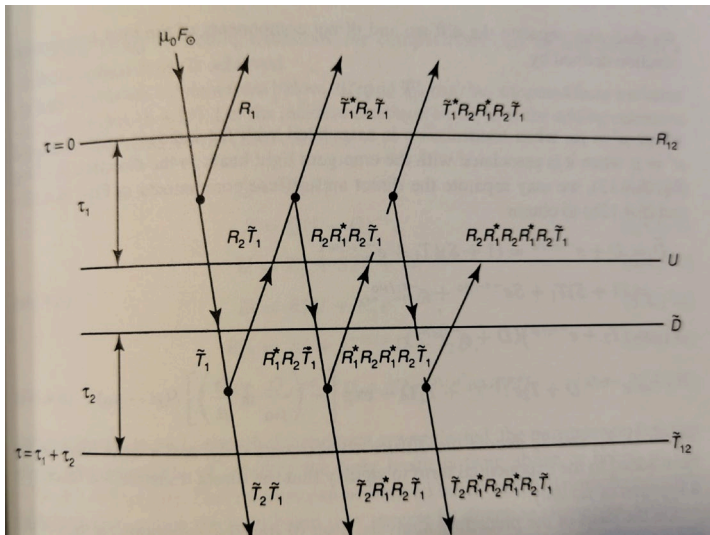


Spatial distribution



排放反演
大气化学传输模型

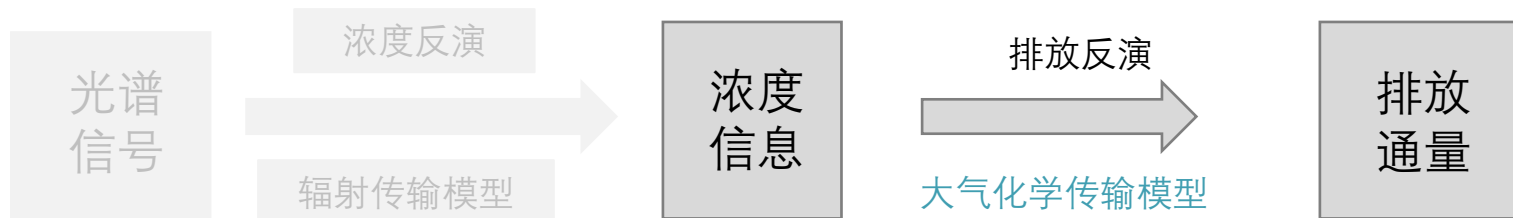
卫星遥感监测排放的技术路线



特定**物种浓度**下、特定波段的电磁波在大气层中的传输 → 测量到的**光谱信号**

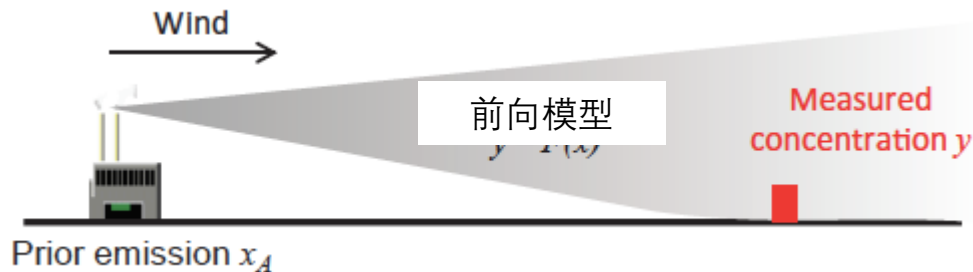
分子散射、吸收 颗粒物散射、吸收
云反射、散射、吸收
地表的反射 温度、气压

卫星遥感监测排放的技术路线



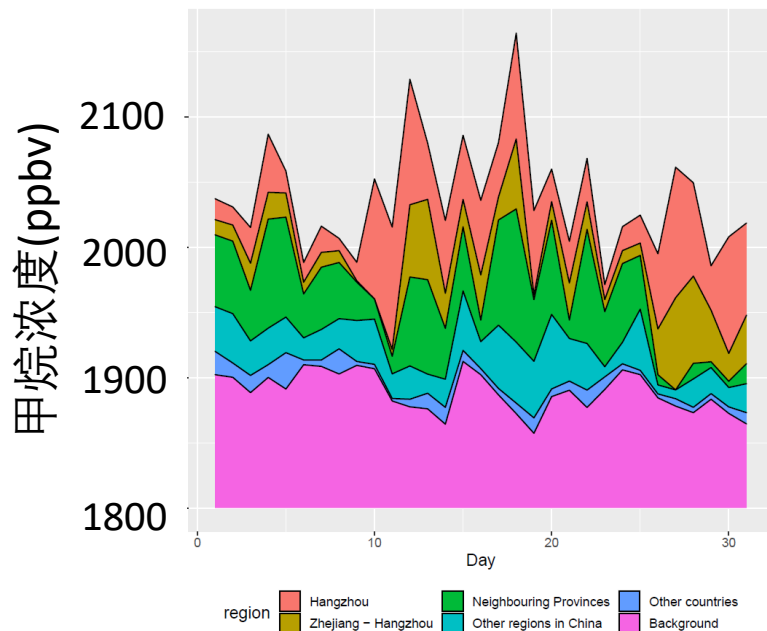
某物种在特定**排放通量**、特定的大气物理化学条件下的传输转化过程

→ 观测到的**浓度信息**



区域浓度观测与排放之间复杂的关系

2010年3月



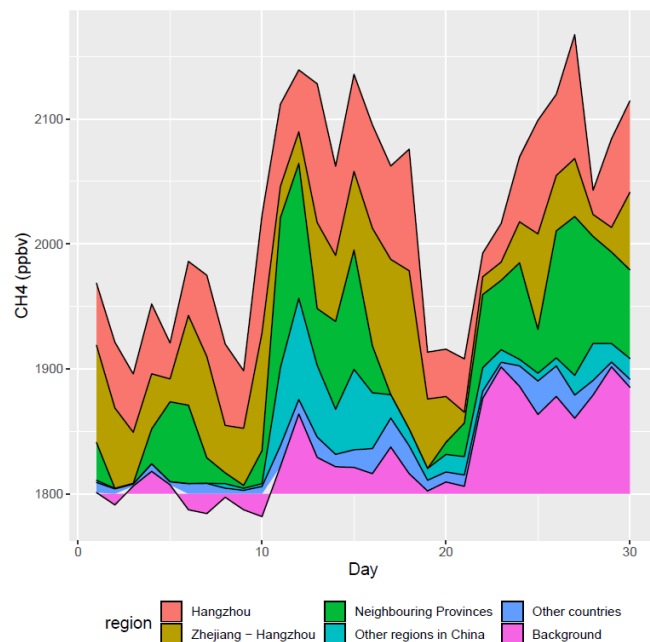
杭州
本地
排放



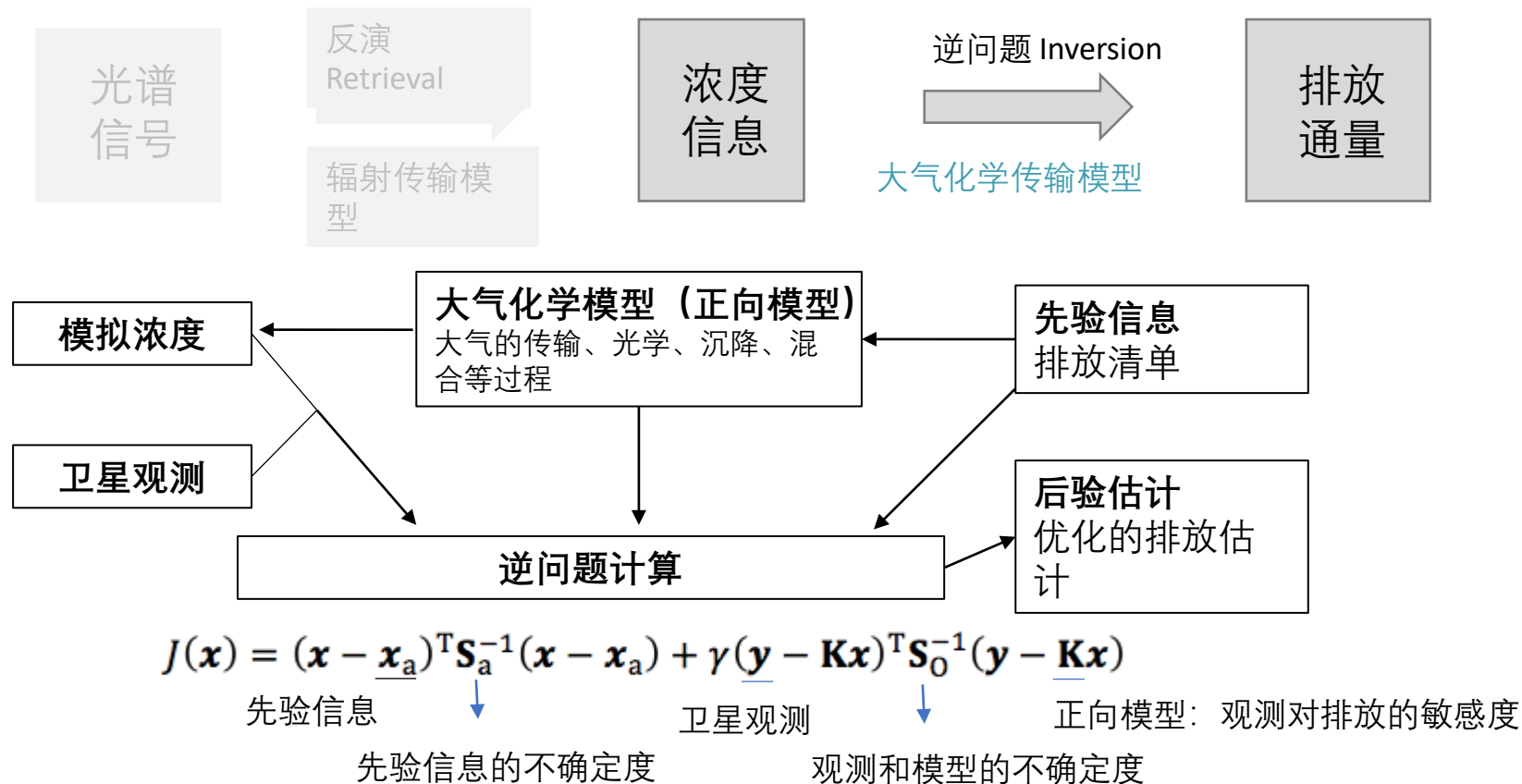
全球
背景



2010年9月



卫星遥感监测排放的技术路线

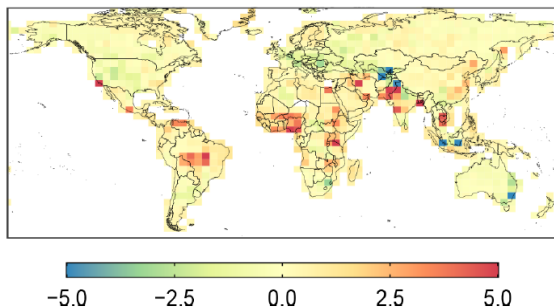


甲烷排放的监测：从全球到点源

全球/国家

考察全球浓度变化的驱动因素
考察自然源和汇的反馈

(a) 2010–2018 emission trends ($\% \text{ a}^{-1}$)

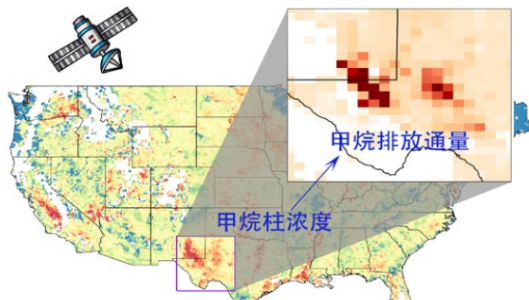


全球2010–2018年甲烷收支

GOSAT 卫星

区域

支持区域政策制定
理解控制区域排放源的因素

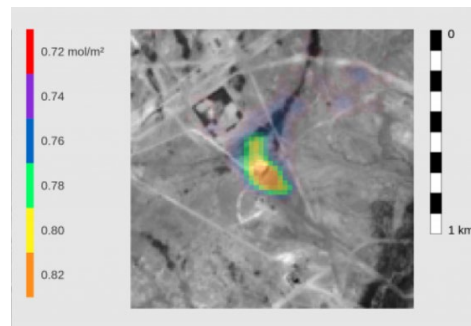


重点油气生产区域高分辨率反演

TROPOMI 卫星

点源/设施

发现异常排放点源
采取维修、监管措施



~10 m 分辨率

油气生产设施super emitter

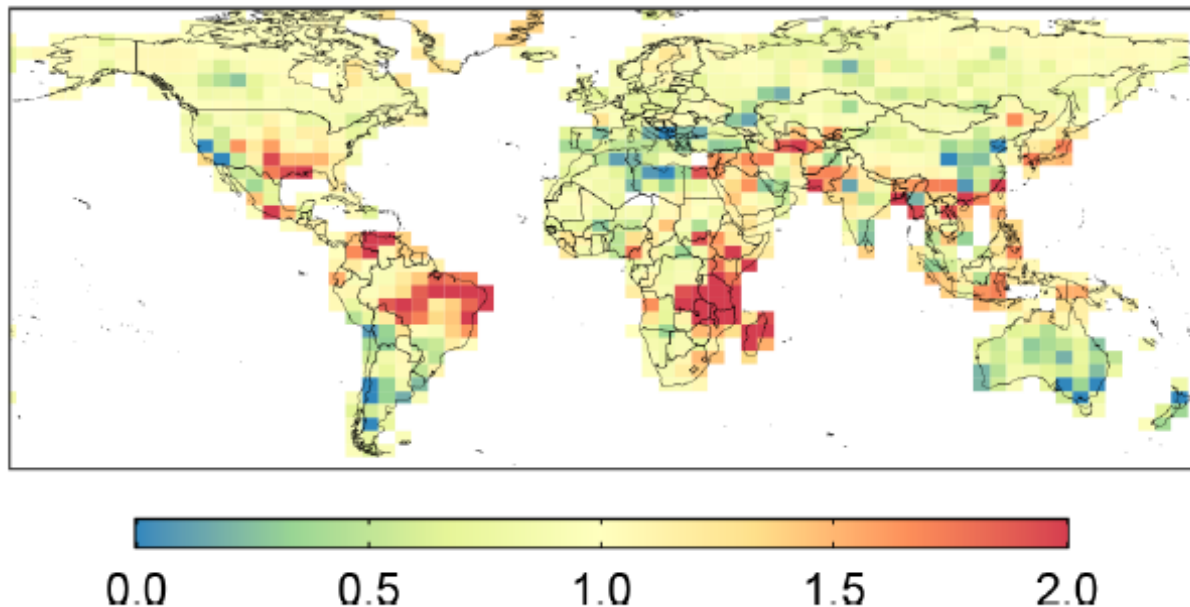
高分五号

不同时空尺度之间信息的整合

研究进展一：全球甲烷收支盘点

GOSAT卫星
2010-2018

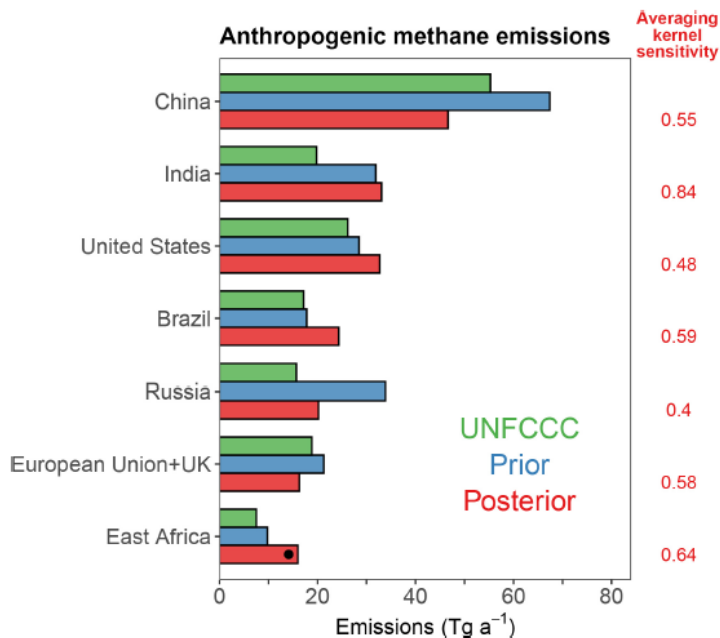
根据卫星观测计算的排放量/先验排放清单



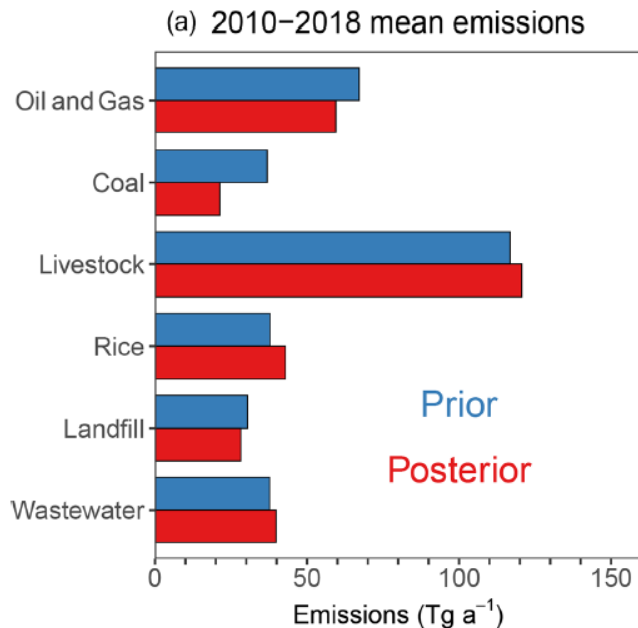
Zhang et al., ACP, 2021

“自上而下” 验证国家清单

验证国家清单

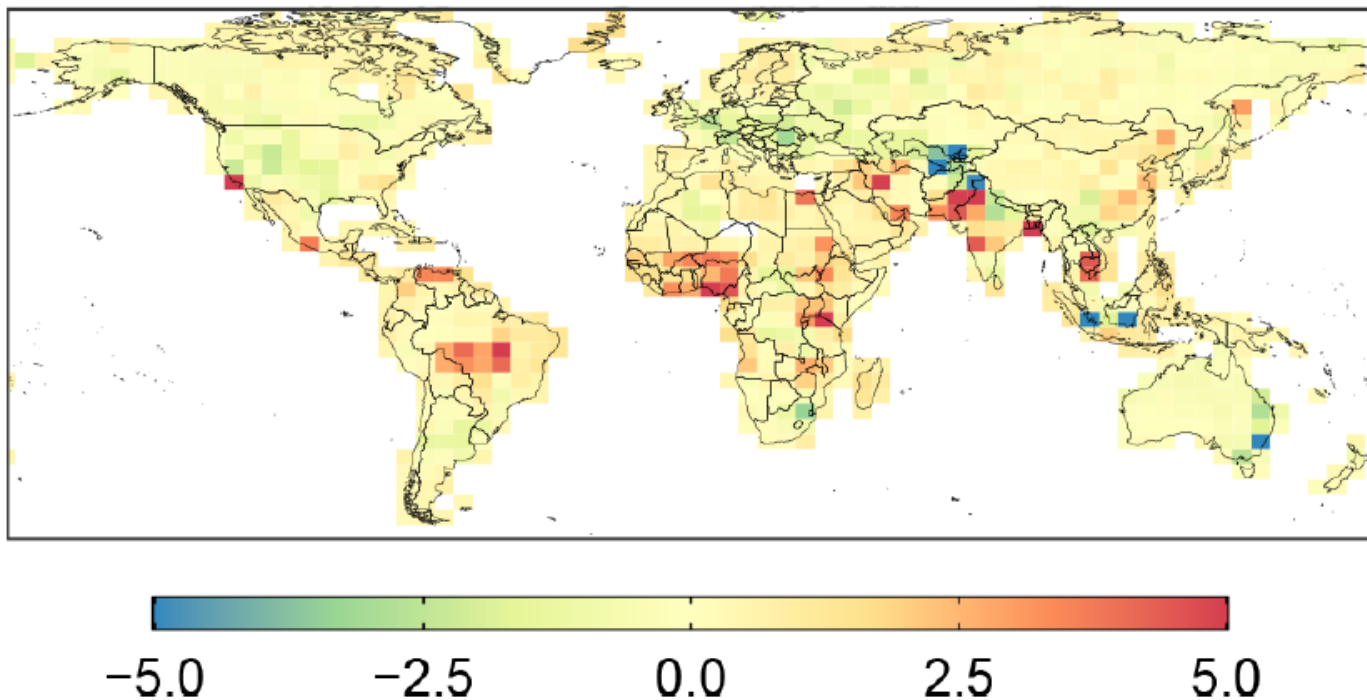


各类排放源全球总量盘点

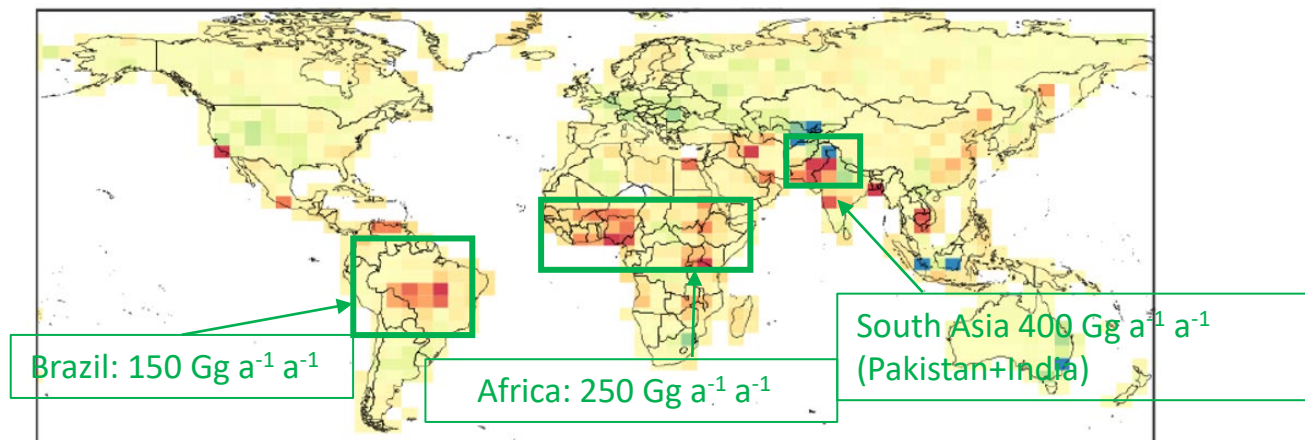


追踪排放变化趋势

2010-2018人为源排放趋势 ($\% \text{ 年}^{-1}$)



发展中地区的农业畜牧源增长缺少重视和深入研究



养牛数量增长最快的5个国家

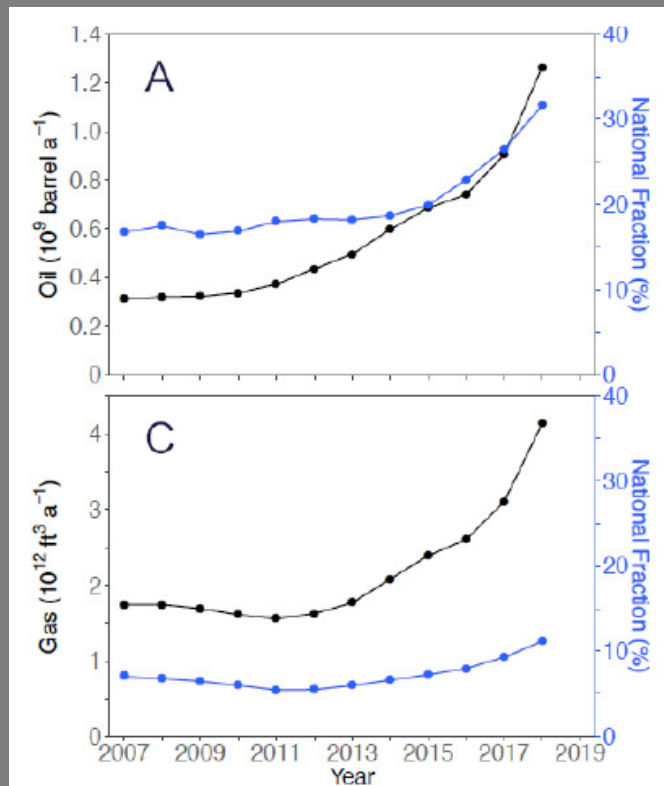
UNFAO

Country	Trend (million head per year)
Pakistan	1.4
Ethiopia	1.2
Tanzania	1.1
Brazil	0.9
Argentina	0.7

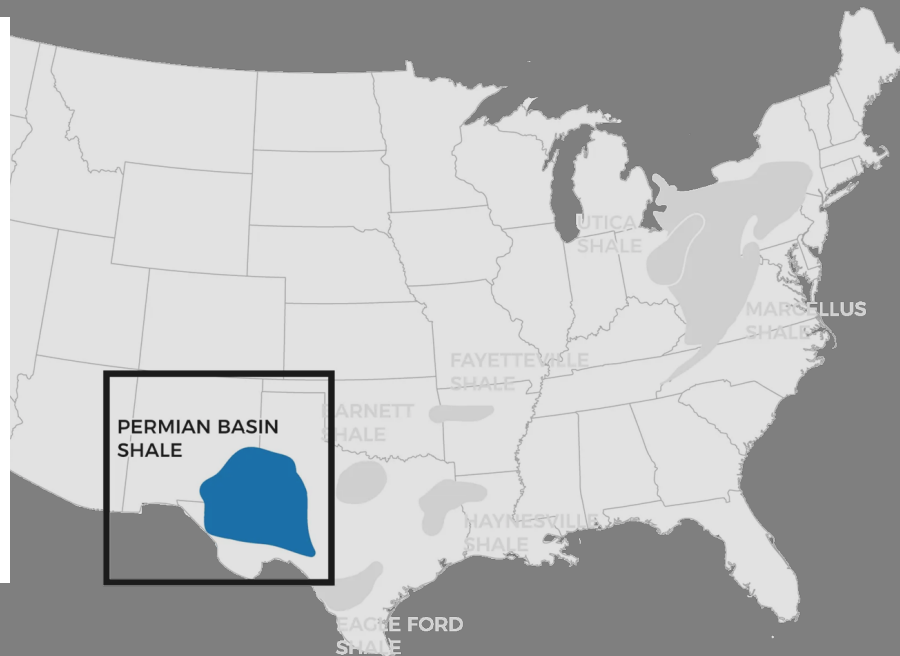
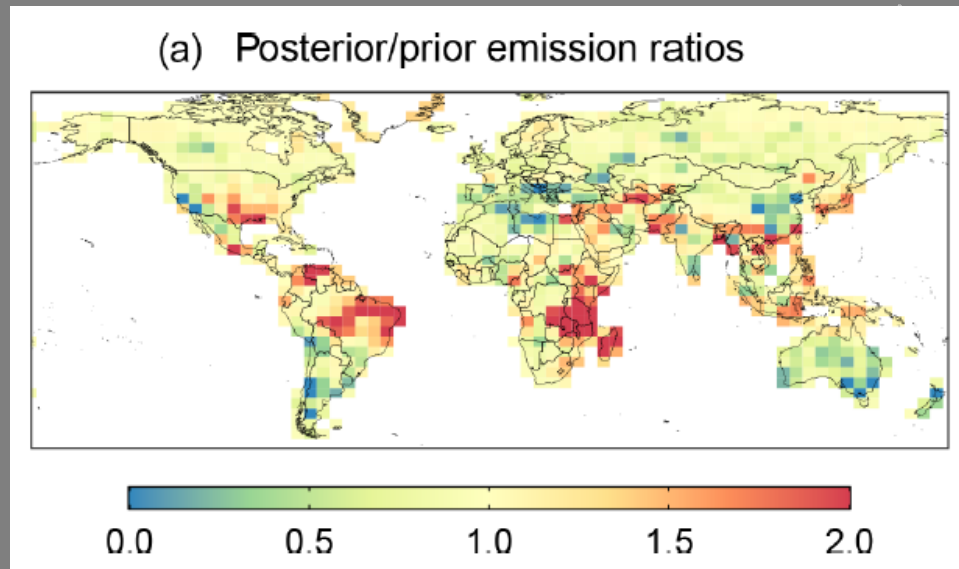
研究进展二：监测热点排放区域



U.S.'s Permian Basin (Zhang et al., 2020)
美国最大的油气生产盆地



研究进展二： 监测热点排放区域



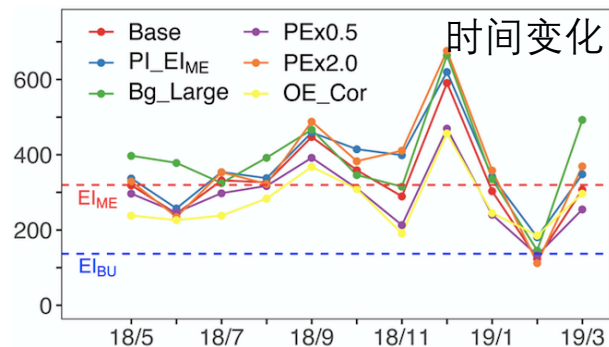
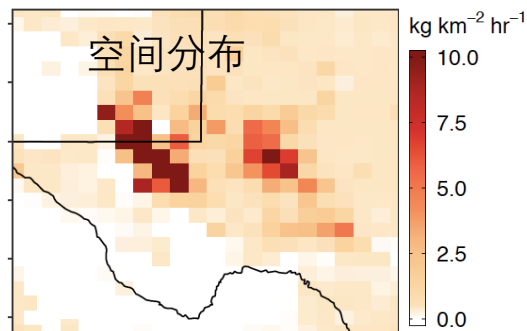
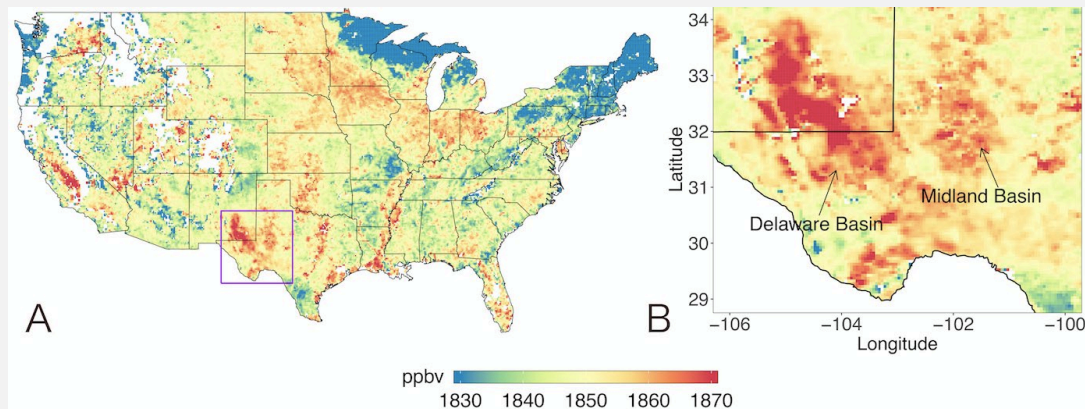
TROPOMI 卫星分析美国Permian盆地油气甲烷排放

甲烷浓度
TROPOMI
5/2018-3/2019

求解
逆问题

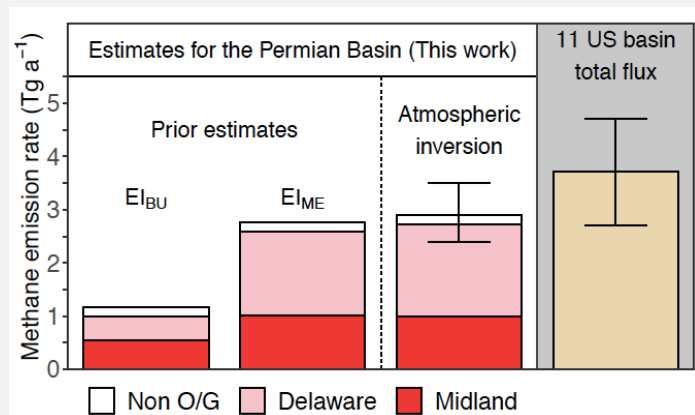
甲烷排放通量

Zhang et al., Science
Advances, 2020

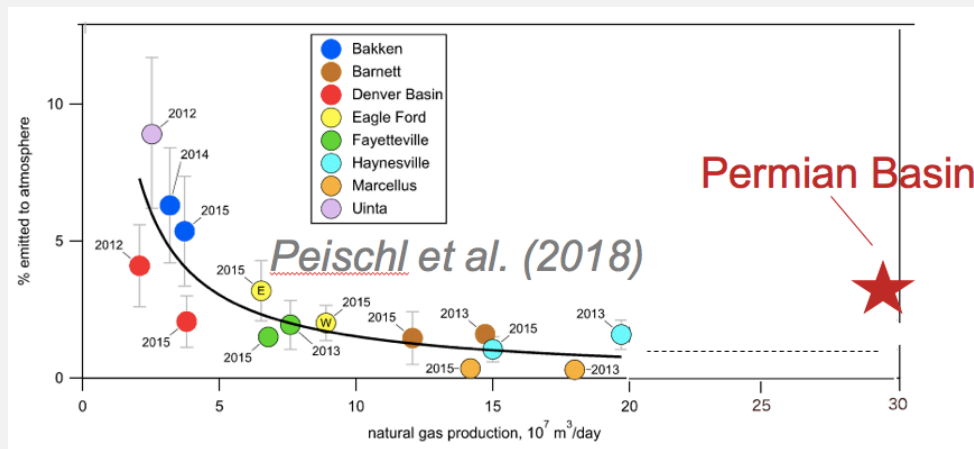


Permian Basin甲烷排放——巨大的排放量

美国甲烷排放量最高的油气盆地



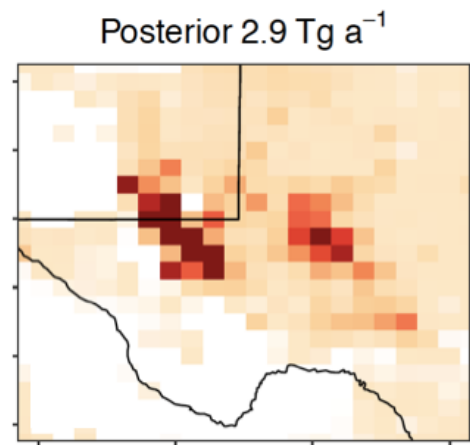
高产量、高泄漏率的“离群值”



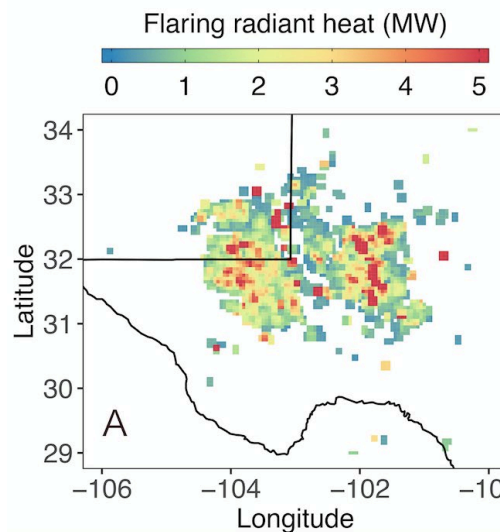
Zhang et al., Science Advances, 2020

多参数卫星协同观测

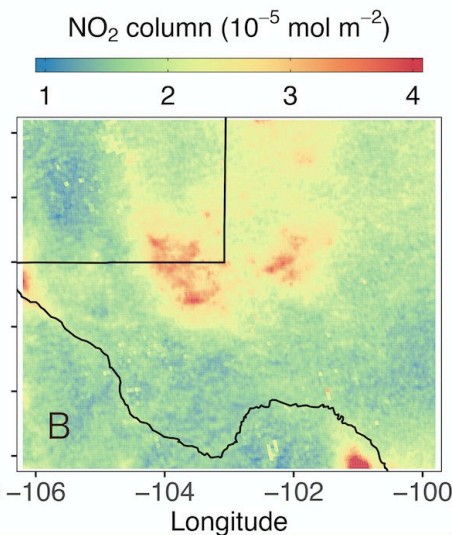
甲烷排放



红外热辐射



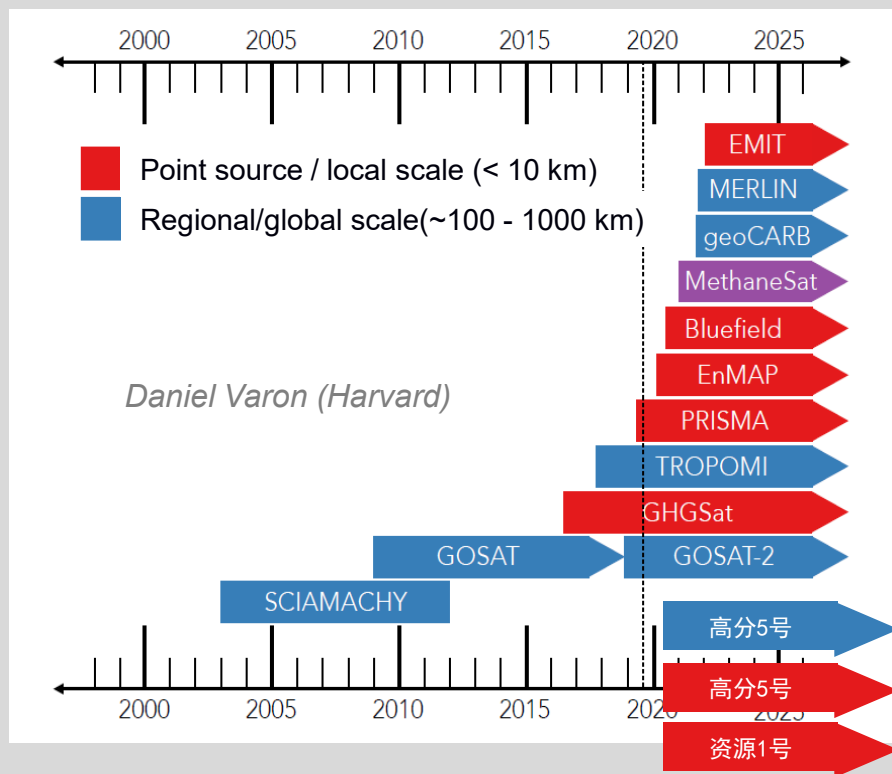
NO_2 浓度



Zhang et al., Science Advances, 2020

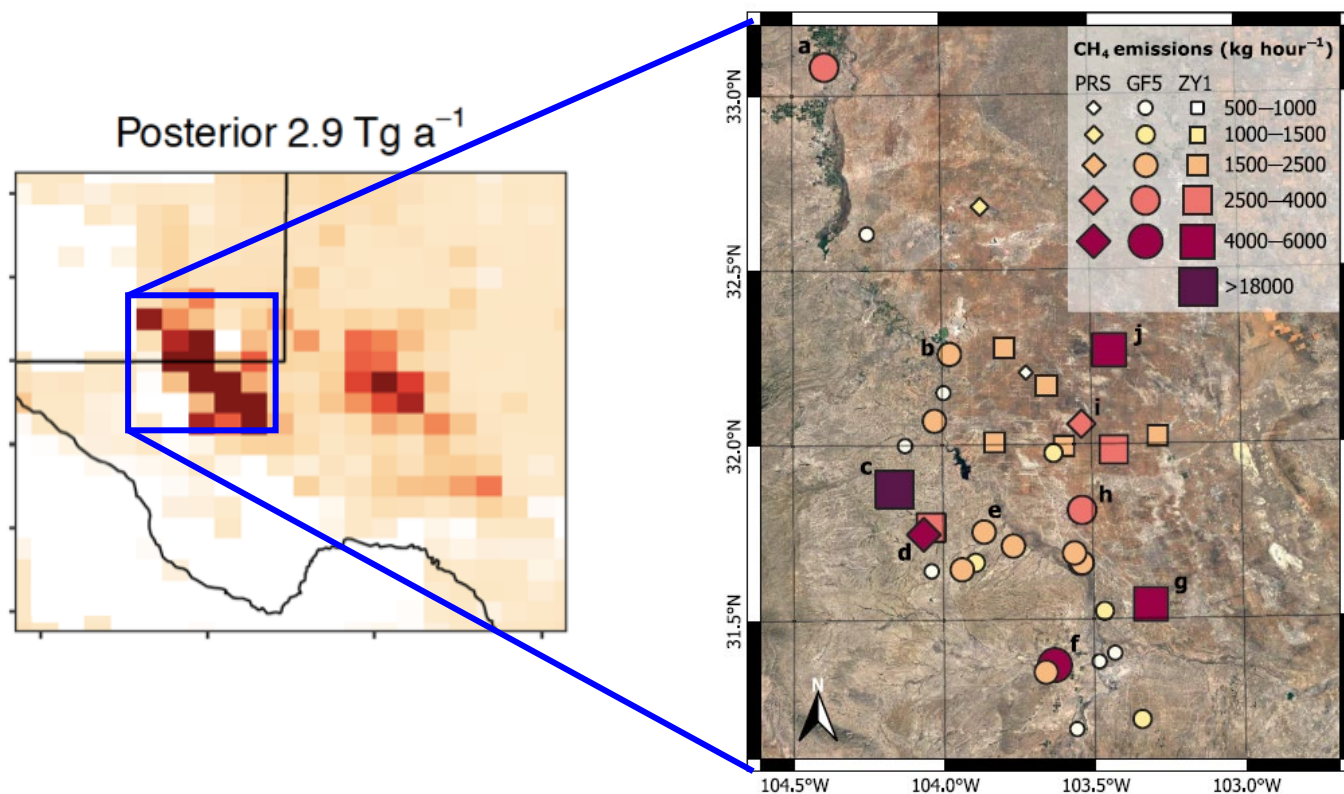
Burning of $5.2 - 8.7 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ natural gas

研究进展三：点源卫星观测



Permian Basin 点源探测

Irakulis-Loitxate et al., Science Advances, 2021



红外高光谱点源探测

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

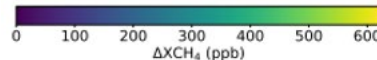
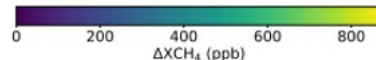
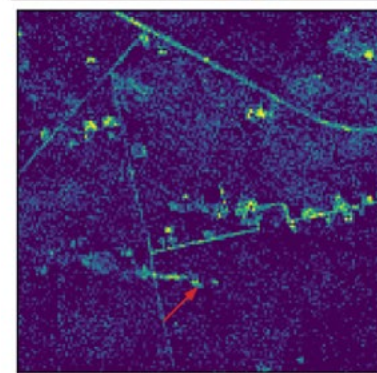
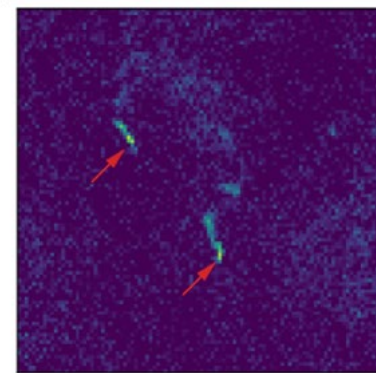
2. 识别甲烷烟羽

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

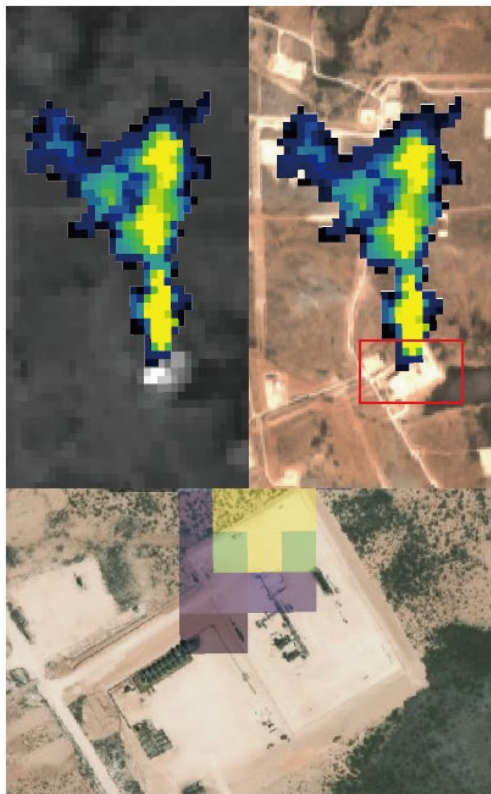
4. 排放通量估算



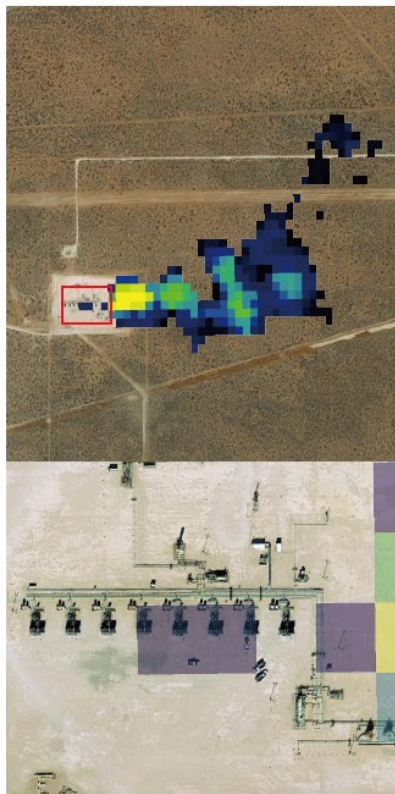
Permian Basin 点源探测

Irakulis-Loitxate et al., Science Advances, 2021

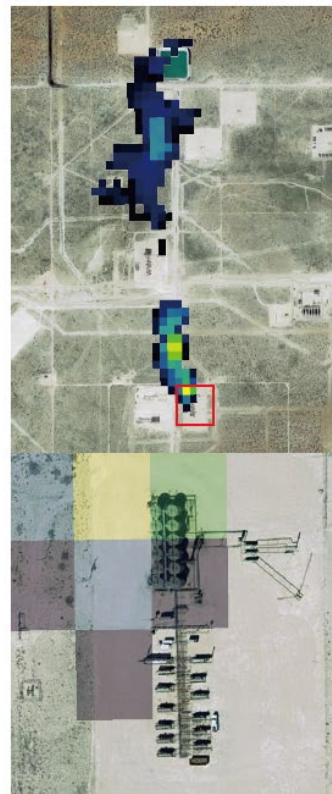
Flaring emission



Compressor emission



Tank battery emission



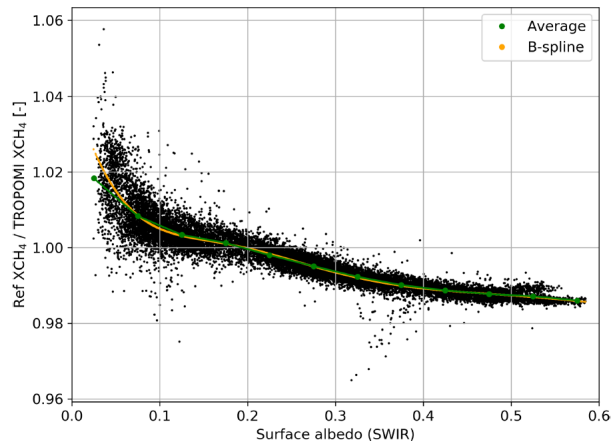
>500 kg/hr
detected 19 plumes

Account for 30-50%
of the regional
emissions

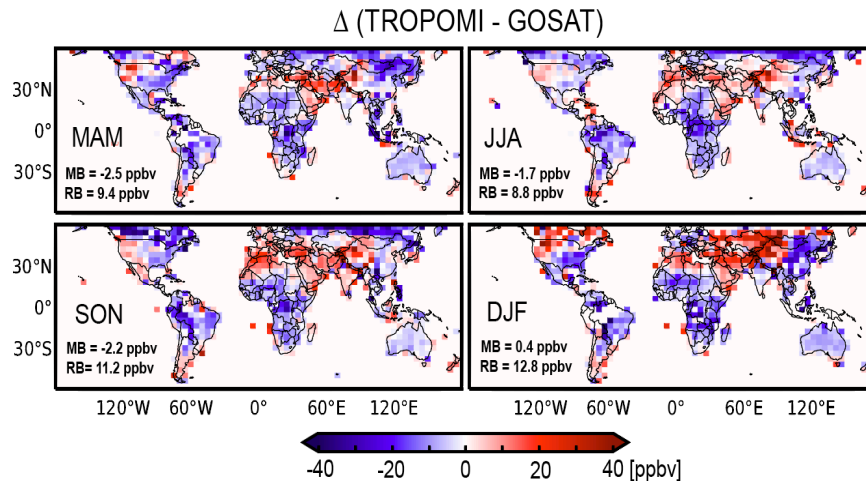
研究前沿：提高甲烷浓度反演的精度

TROPOMI 观测存在的问题

1. 地表反射率引起的系统误差；
2. 区域性、季节性系统偏差；
3. 云对覆盖率的影响



Lorente et al. 2021



Qu et al. 2021

研究前沿：加快排放反演计算的速度

- 快速定量筛查的业务需求
- 海量的卫星数据

大气反演

- 考虑风场信息和大气传输。
- 构建完整雅各比矩阵，需要大量扰动模拟，计算量巨大。

模型

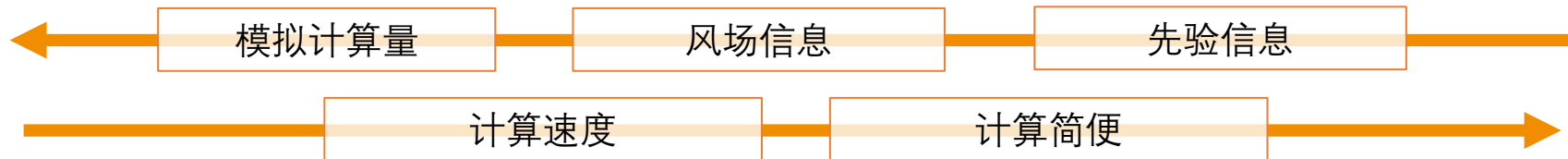
$$E = \frac{\Delta XCH_{4,obs}}{\Delta XCH_{4,model}} \cdot E_{model}$$

- 只需一次模拟
- 无空间分辨、需先验估计

质量守恒法

$$E = C \cdot \Delta XCH_4 \cdot u$$

- 无需模型模拟
- 均匀风场的简化假设
- 无空间分辨



总结

利用卫星进行环境监测

- 因为其良好的空间覆盖率有其独特的优势
- 对较稀疏的地面观测是有力的补充

卫星遥感观测的类型

- 太阳光反射、热红外、雷达、地球静止卫星等
- 卫星环境监测从光谱信号到排放通量的技术路线

温室气体甲烷监测的应用

- 从全球尺度到区域尺度
- 多物种的角度

谢 谢!

张 羽 中 西湖大学大气环境研究课题组
zhangyuzhong@westlake.edu.cn