



中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



污染气体与温室气体卫星监测技术

国内外进展与应用

陈良富

中国科学院 空天信息创新研究院
2025年8月28日



提
纲

一

污染气体与温室气体卫星监测原理

二

污染气体卫星遥感技术进展与应用

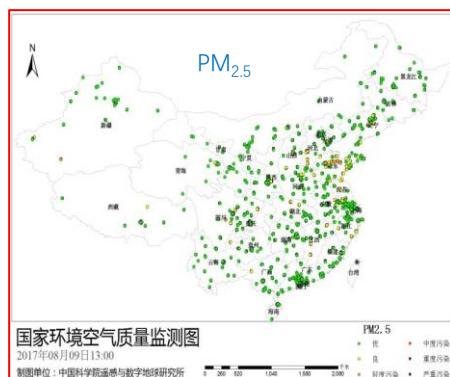
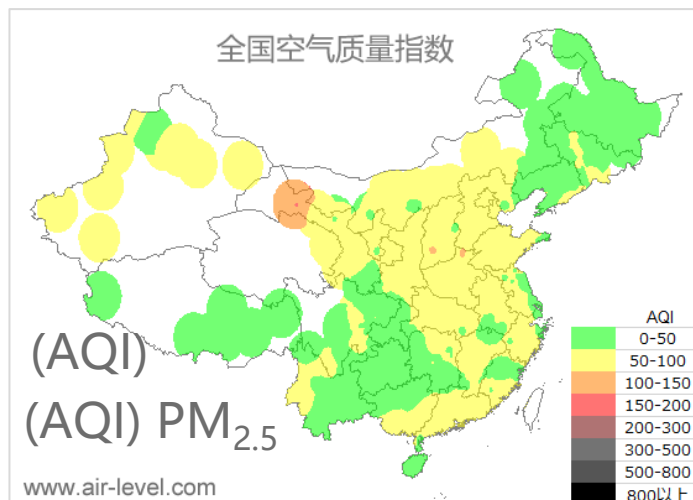
三

温室气体卫星遥感技术进展与应用

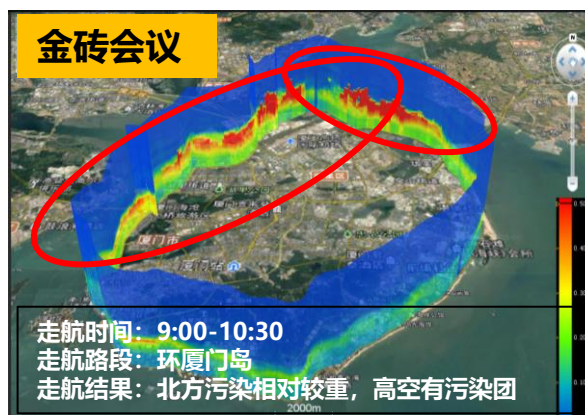
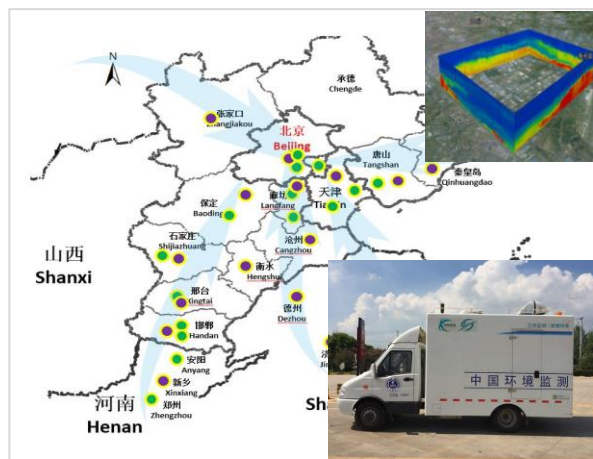


监测手段：站点、线、面

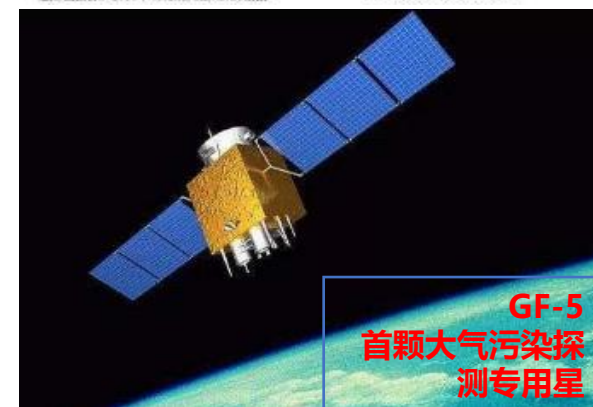
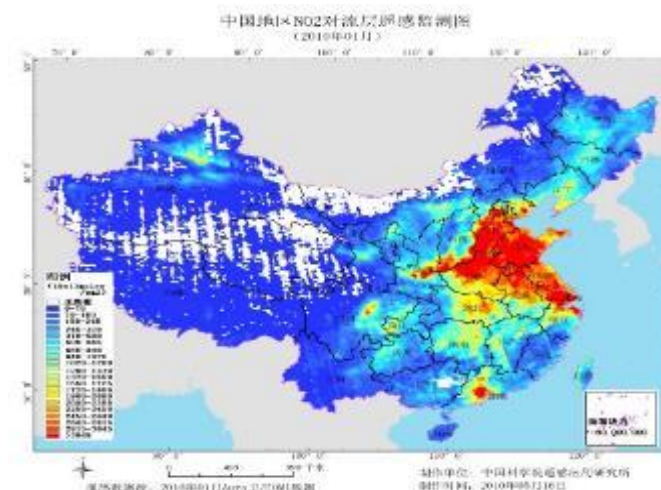
站点：点尺度、一维时间



激光雷达：一维垂直空间



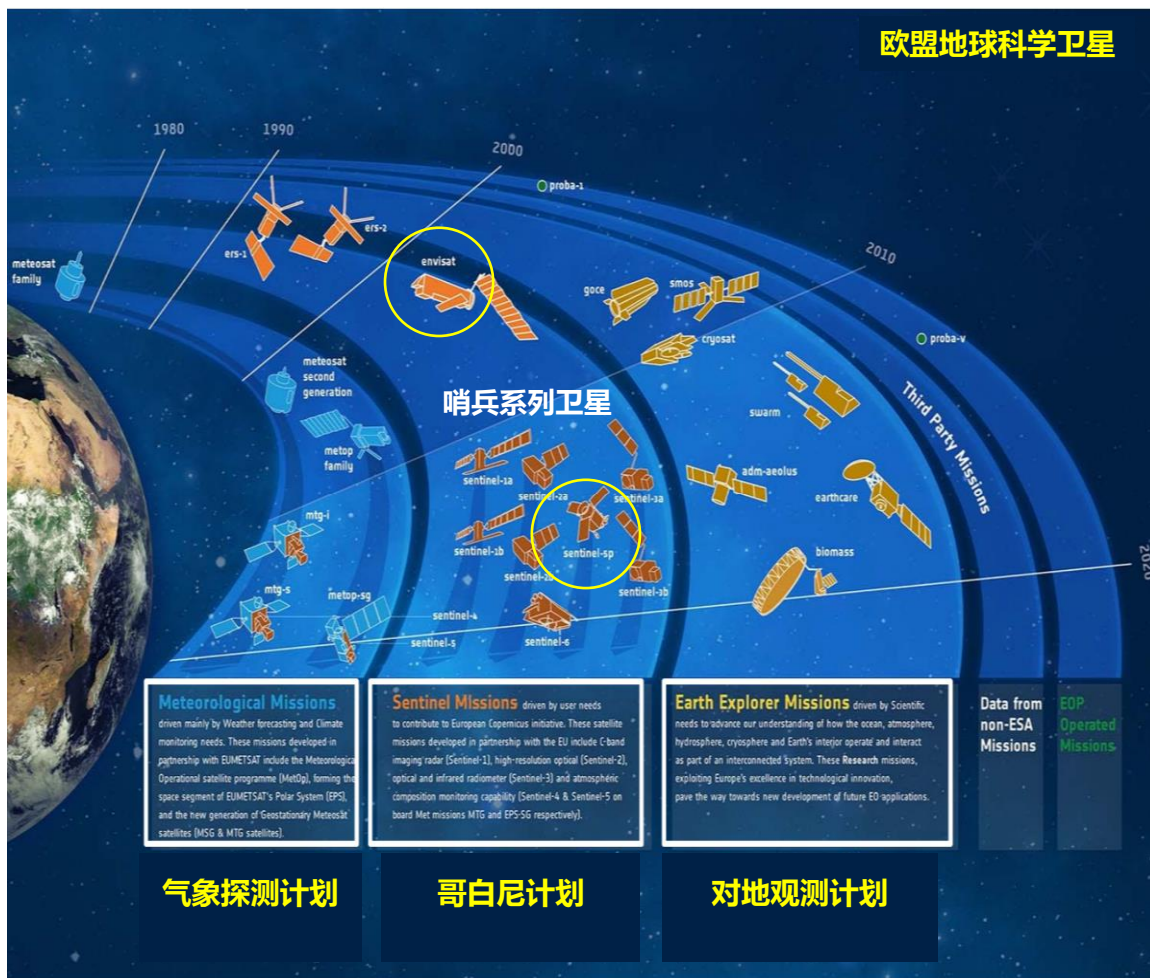
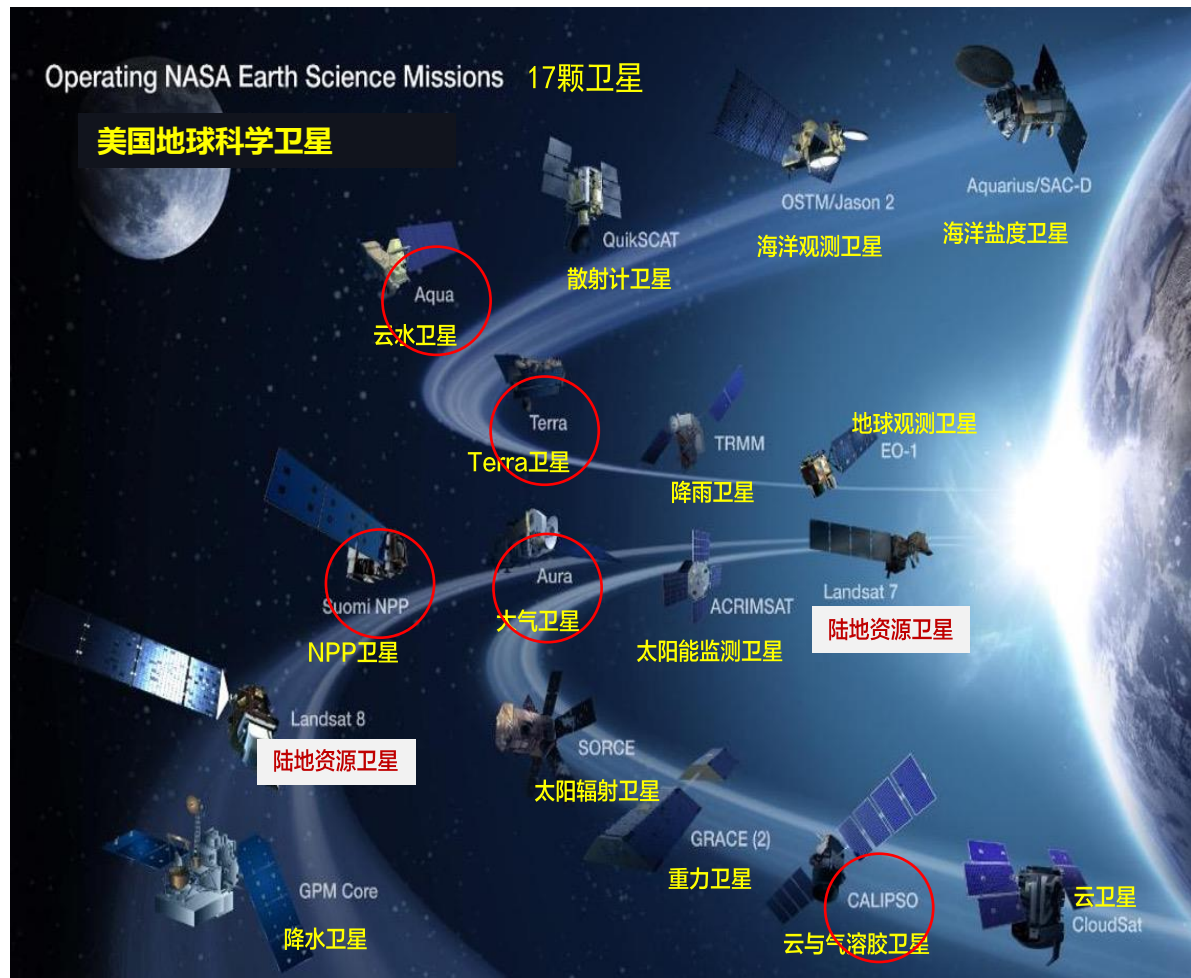
卫星：二维空间连续





国外卫星

美国NASA、NOAA、USGS卫星；欧盟ESA卫星

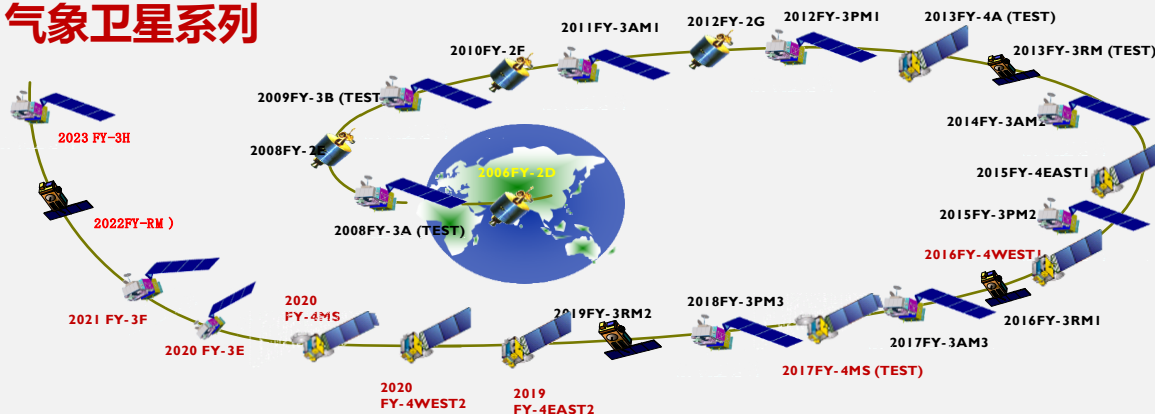




中国卫星

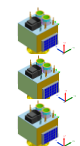
气象、环境和高分卫星系列：空气质量，生态和水质应用

气象卫星系列



我国高分辨率系列卫星

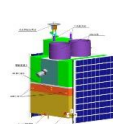
2013年4月26日



GF-1星

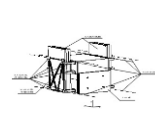
GF-1-B,C,D星于2019年3月21日以一箭三星形式发射

2014年8月19日



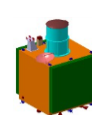
GF-2星

2016年8月10日



GF-3星

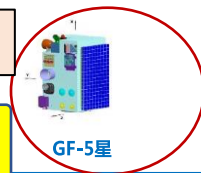
2015年12月29日



GF-4星

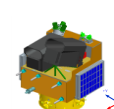
2018年5月9日

GF-5号



GF-5星

2018年6月2日



GF-6星

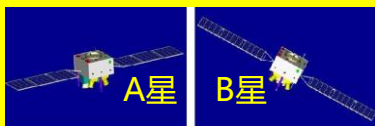
2019年6月2日



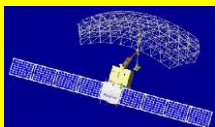
GF-7星

环境与灾害监测预报小卫星星座

HJ-1号A/B/C星



C星



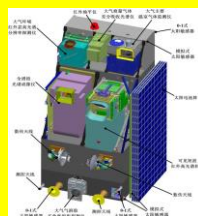
2008年9月6日发射

HJ-2号A/B星



2020年9月27日

GF-5 (02) 星



2021年11月7日

DQ星



2022年4月12日

高景一号：东方红

GJ01/02: 2016. 12
GJ03/04: 2018. 01



北京一/二号：21世纪

BJ01/02: 2005. 02
BJ02A, B, C: 2015. 07



吉林一号：长光卫星

JL01/02: 2015. 10
GP01/02: 2019. 01
JL02A: 2019. 11
二期：138颗卫星组网

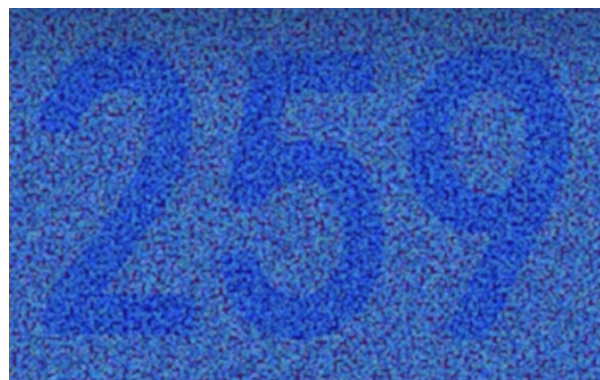
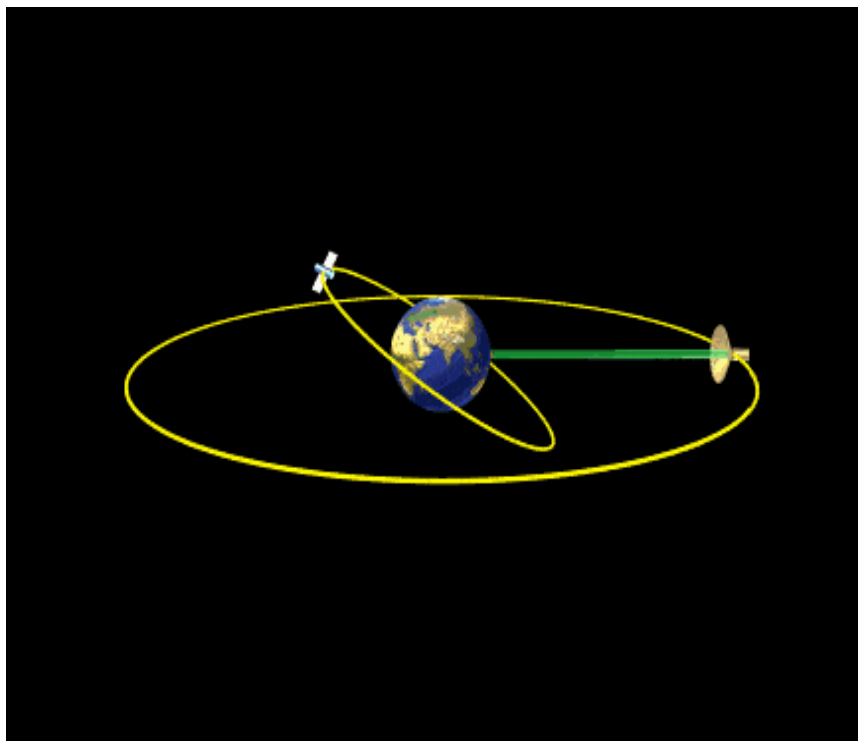


我国商业卫星



卫星探测原理：噪声 VS 信号

- **噪声：**相机工艺水平（光学系统）、器件质量
- **信号强度：**光通量大小取决于像元分辨率（瞬时视场角）、光谱分辨率



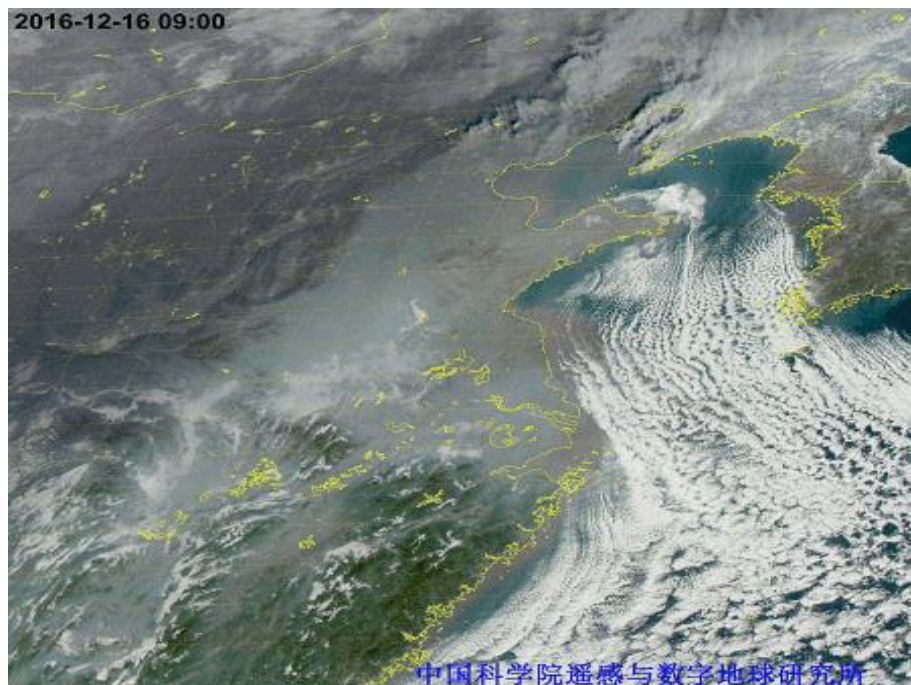


卫星探测原理：大气成分探测难点

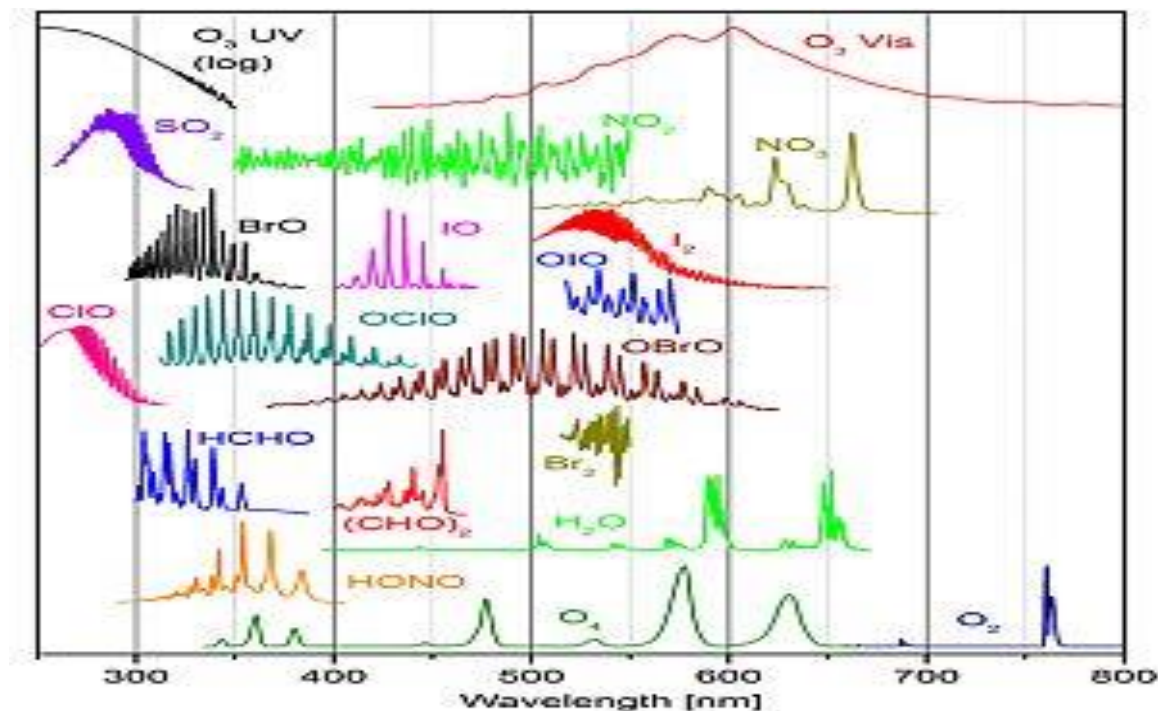
目标
特性

地表目标：反射与辐射特征、强信号、空间分辨率高、看的细

气体目标：吸收和发射特征、弱信号、空间分辨率粗



2016年12月16—21日

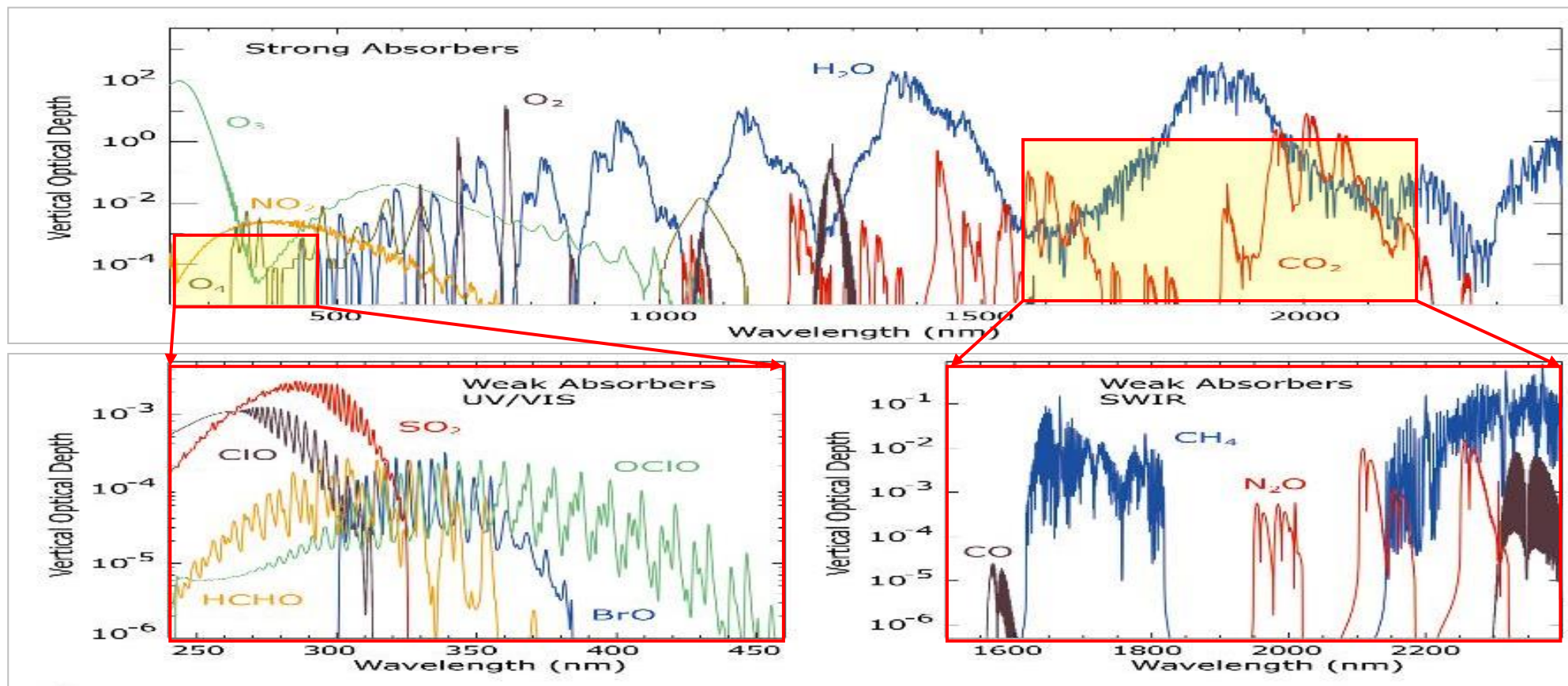


气体吸收截面（气体指纹）



卫星探测原理：大气成分吸收谱线

采用高光谱分辨率，实现大气成分的探测





大气环境卫星遥感成分

- 云（相态、光学）、大气温度、湿度、地表辐射、.....
- 气溶胶：光学厚度、光学与微物理特性、**质量浓度** $\text{PM}_{2.5/10}$ 、沙尘、...
- **污染气体**： O_3 、 NO_2 、 CO 、 HCHO 、.....
- **温室气体**： CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、.....



提纲

一

污染气体与温室气体卫星监测原理

二

污染气体卫星遥感技术进展与应用

三

温室气体卫星遥感技术进展与应用

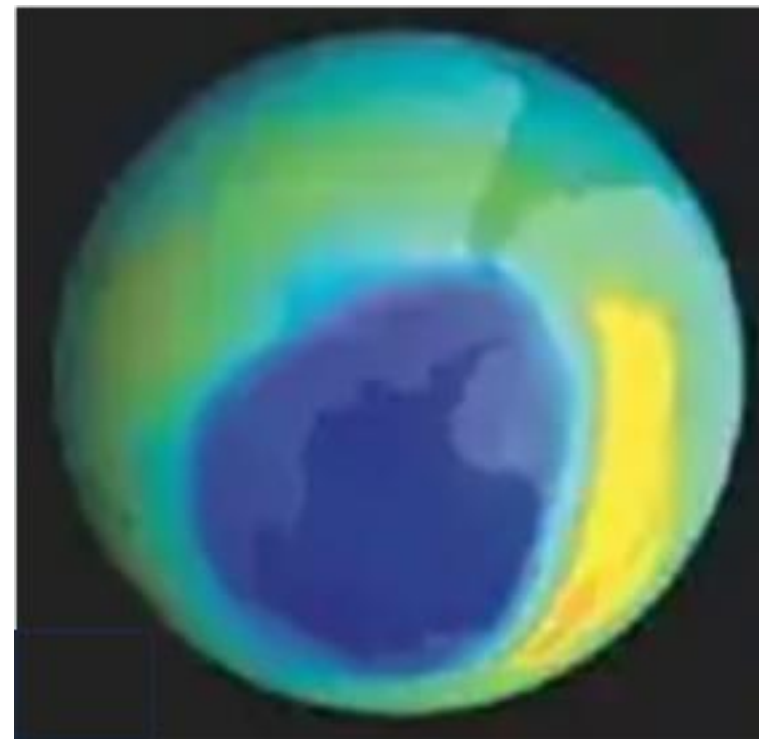


早期臭氧探测：美国“雨云-7号”观测到南极臭氧空洞

- 1985年，美国“雨云-7号” (Nimbus satellite-7) 气象卫星观测到南极臭氧空洞
- 臭氧总量测绘光谱仪 (TOMS) 获得全球臭氧数据

TOMS-臭氧总量测绘光谱仪

臭氧总量测绘光谱仪 (TOMS) 是通过测量向后太阳紫外辐射中的 4 个光谱通道的辐射值 (其波长分别为：312、317、331 和 339nm)，根据臭氧最强吸收 (312nm) 辐射和最弱吸收 (331nm) 辐射的比值就可反演出大气柱中臭氧的总含量。在实际反演算式中用 3 个通道来进一步订正地面反射率、波长漂移及大观测角度臭氧垂直分布等因素的影响，从而提高反演精度。经地面 Dobson 测量资料校正，除去系统偏差，TOMS 对臭氧总量的反演精度可达 5% 以上。TOMS 的扫描幅宽为 2300km，地面分辨率为 50-100km，每天可得到一幅全球的臭氧总量分布图。



1985年南极臭氧空洞



污染气体卫星监测技术发展历程



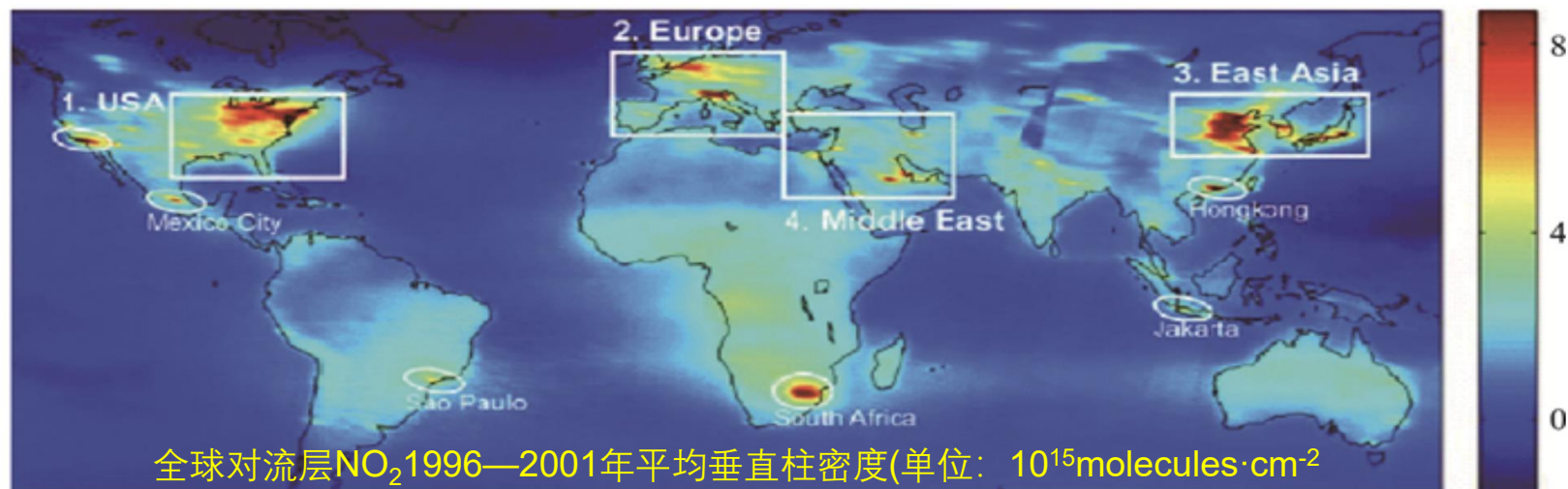
ESA
ERS-2/GOME

ERS-2卫星是欧洲空间局（ESA）于1995年4月21日发射的第二代地球资源遥感卫星



全球臭氧监测仪（GOME）
幅宽：240km
空间分辨率：40km×80km

- 首次利用差分吸收光谱算法（DOAS），实现多物种反演
- 对流层和平流层： O_3 、 NO_2 、BrO、OCIO和 SO_2



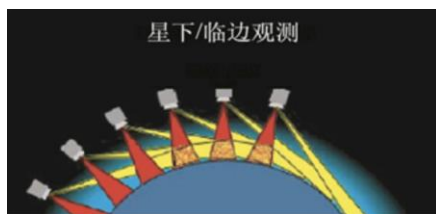
全球对流层 NO_2 1996—2001年平均垂直柱密度(单位： $10^{15}\text{molecules}\cdot\text{cm}^{-2}$)



污染气体卫星监测技术发展历程



扫描成像吸收光谱大气制图仪(SCIAMACHY)是ESA于2002年发射的环境监测卫星(ENVISAT-1)

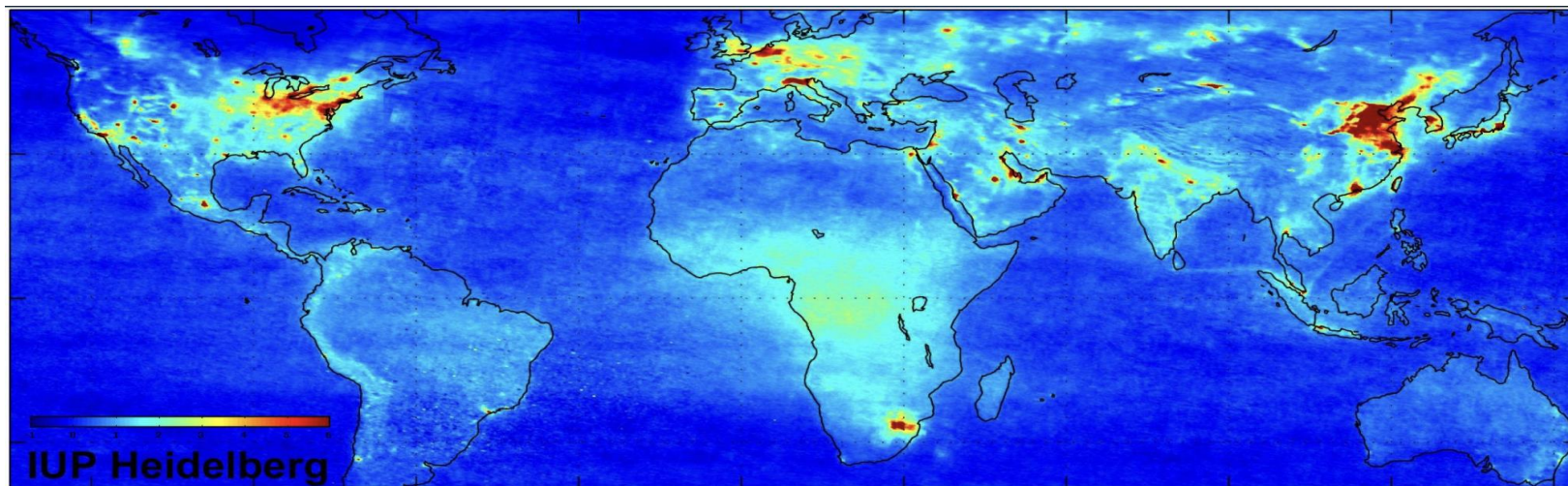


ENVISAT/SCIAMACHY

幅宽960km

空间分辨率: 30km × 60km

- 波长范围: 240~2380nm、观测模式: 对地观测、临边观测
- 对流层平流层: O_3 、 NO_2 、 SO_2 、 BrO 、 CO 、 O_2 、 CO_2 、 CH_4 、 N_2O





污染气体卫星监测技术发展历程



臭氧监测仪 (OMI) 搭载在NASA的Aura 卫星于2004年发射

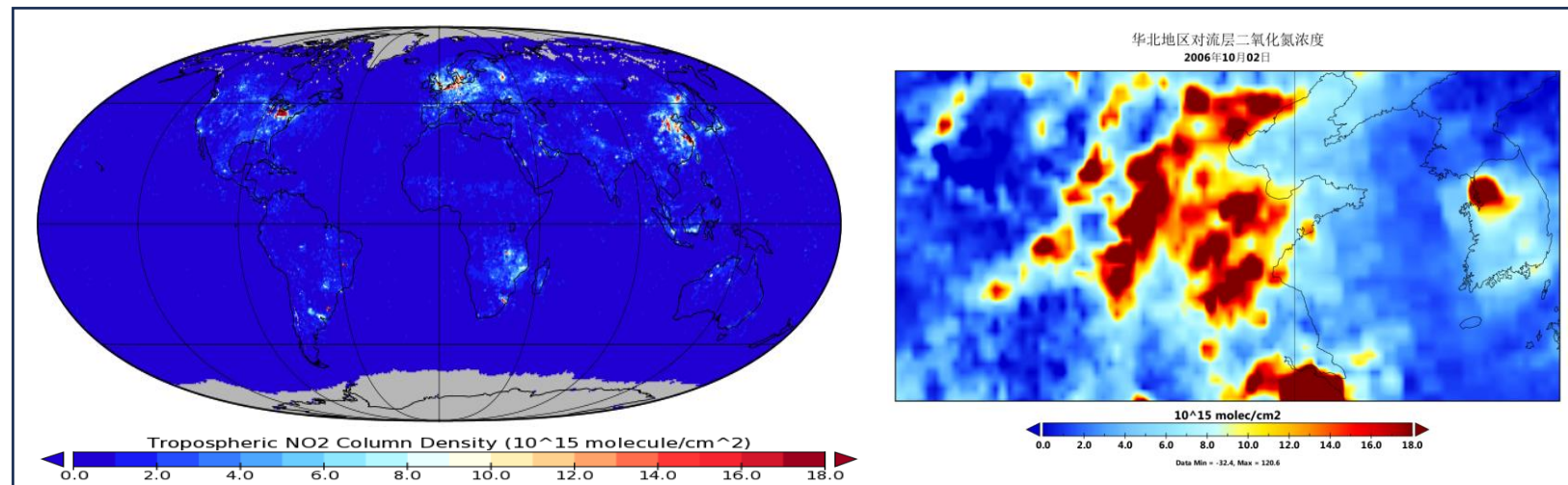


Aura / OMI

幅宽2600km

空间分辨率: 13km × 24km

- 重返周期: 一天覆盖全球一次
- 对流层气体: O_3 、 NO_2 、 SO_2 、HCHO、BrO、OCIO





污染气体卫星监测技术发展历程

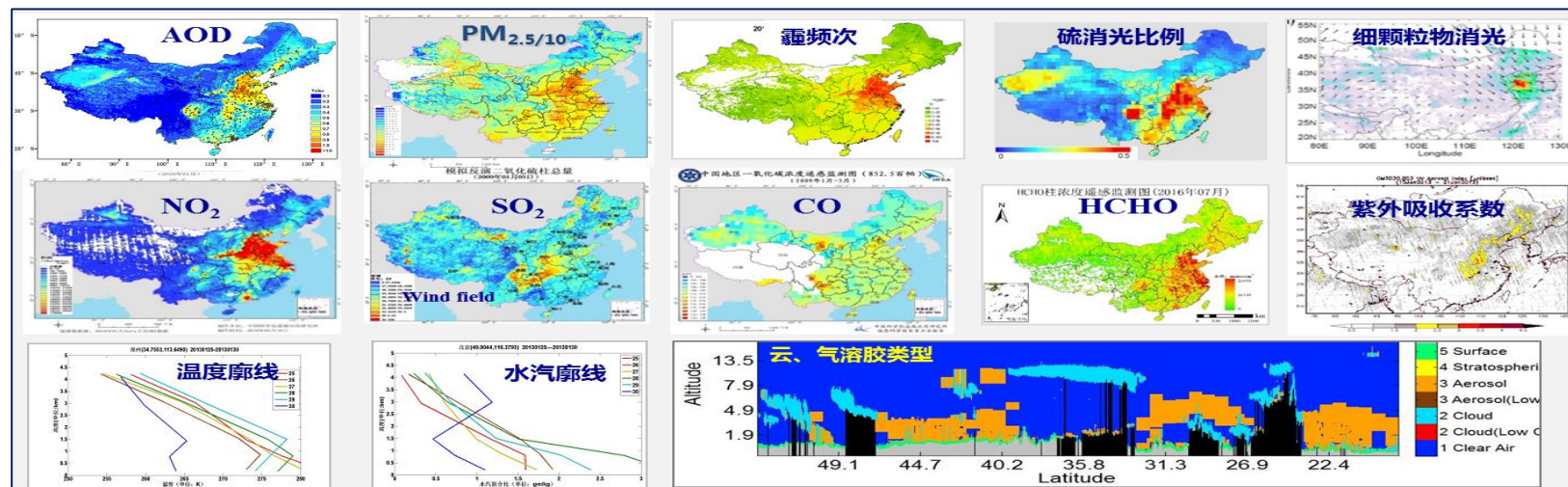


开启了卫星监测序幕: 多源卫星遥感大气环境污染综合监测技术 (2006AA06A303)



2006年项目启动会议

- 大气复合污染形成机制: 一次与二次污染并存、大气氧化性
- 主要参数: $PM_{2.5/10}$ 、 O_3 、 NO_2 、 SO_2 、CO、HCHO、 $PM_{2.5/10}$ 、.....





污染气体卫星监测技术发展历程

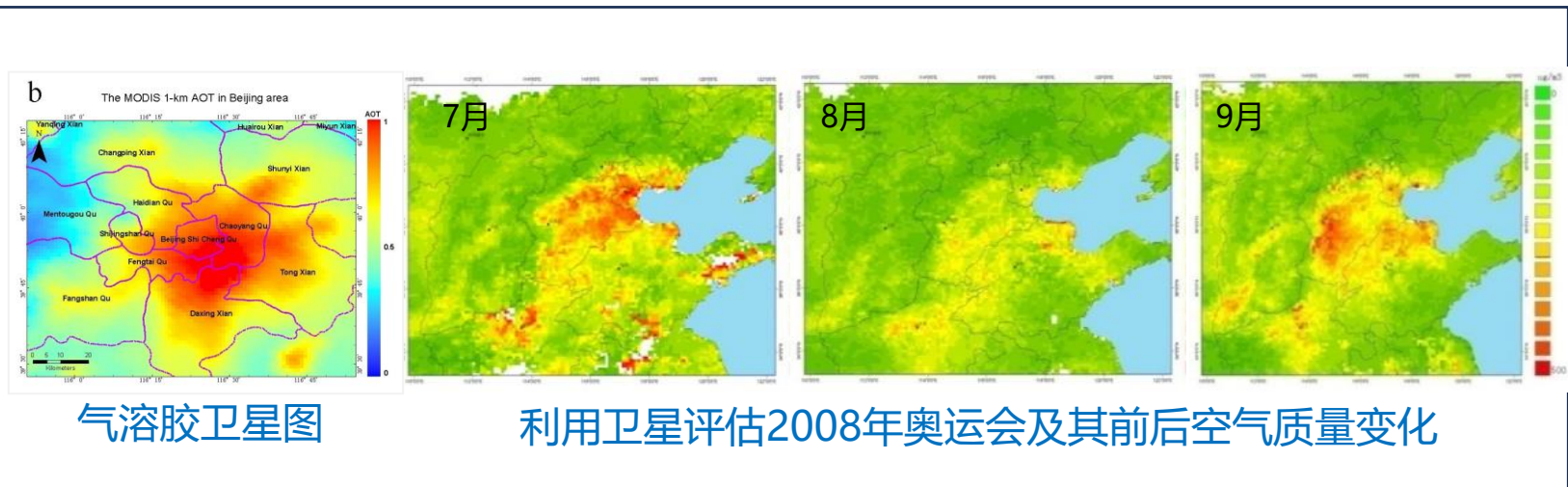


北京及周边地区大气污染卫星遥感监测

- 单双号限行，对北京市空气质量改善的测试
- 奥运期间空气质量状况，大气污染成因、大气污染放控成效评估



2007年北京奥运测试





污染气体卫星监测技术发展历程

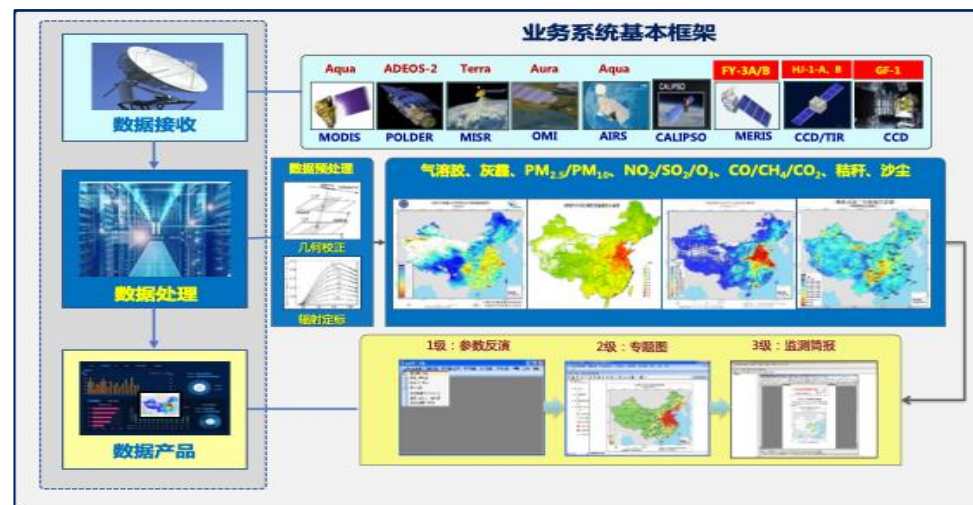


2008年发射环境卫星: 卫星监测业务系统研发

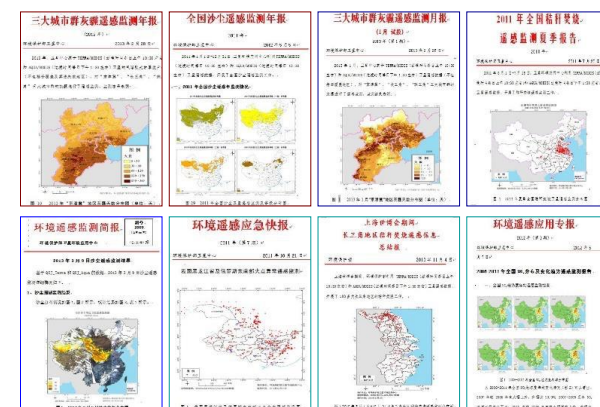
- 数据源: 环境卫星 (HJ-1)、国内外其他卫星数据
- $PM_{2.5}/PM_{10}$ 、 $NO_2/SO_2/O_3/CO$ 、甲醛/乙二醛、秸秆焚烧、沙尘



2009年及后期业务服务



业务系统部分监测简报首页





污染气体卫星监测技术发展历程



2013年我国东部地区：爆发严重的雾霾大气污染

- 污染特征：浓度水平高、影响范围大、持续时间长
- 公开解释：排放量大、不利气象条件、本地污染与区域传输相叠加

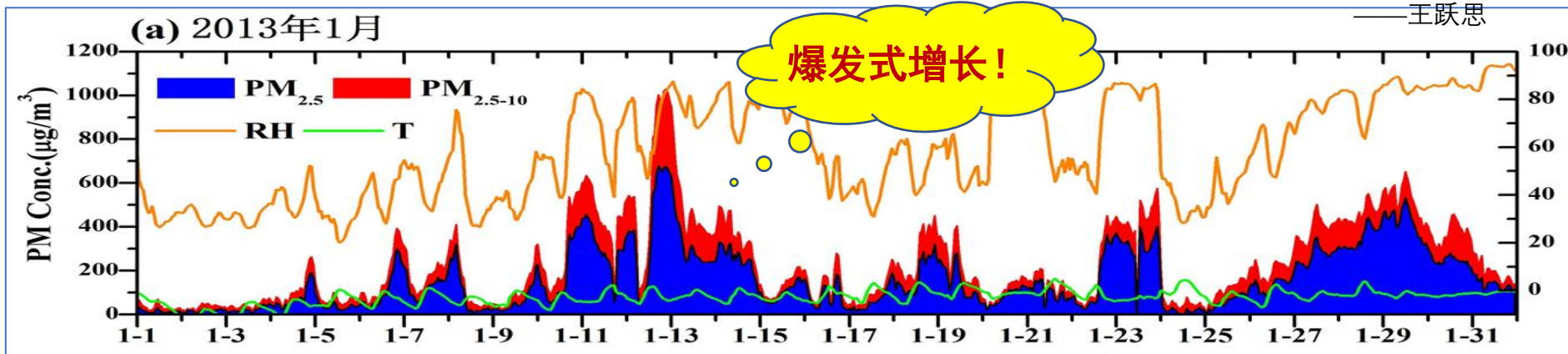


1月内有25天：
 $PM_{2.5} > 300\mu g/m^3$



中新社 光明日报 科学报
新华社 人民日报 青年报
科技日报 CCTV 经济日报







污染气体卫星监测技术发展历程

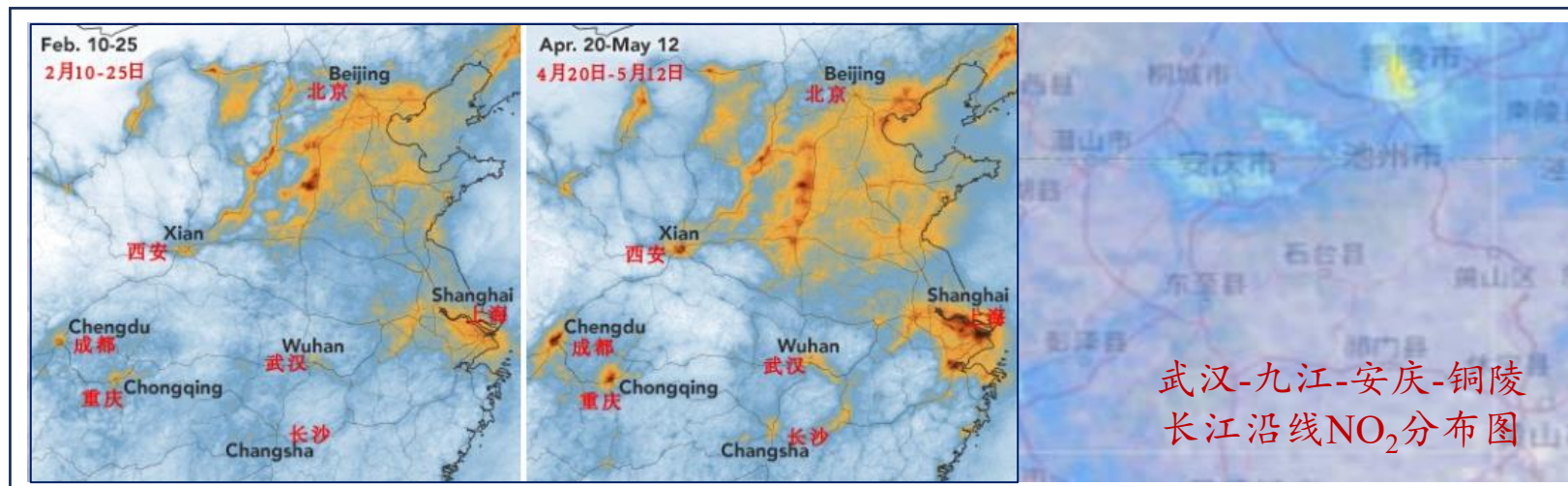


ESA于2017年10月13日发射 Sentinel-5P卫星上，搭载对流层监测仪器 (TROPOMI)

- 主要特征：数据质量好、空间分辨率高、每天一次覆盖
- 大气成分：HCHO、NO₂、O₃、CH₄、CO等13种大气成分



Sentinel-5P卫星 / TROPOMI 载荷
幅宽2,600km
空间分辨率：7 km×3.5 km



武汉-九江-安庆-铜陵
长江沿线NO₂分布图

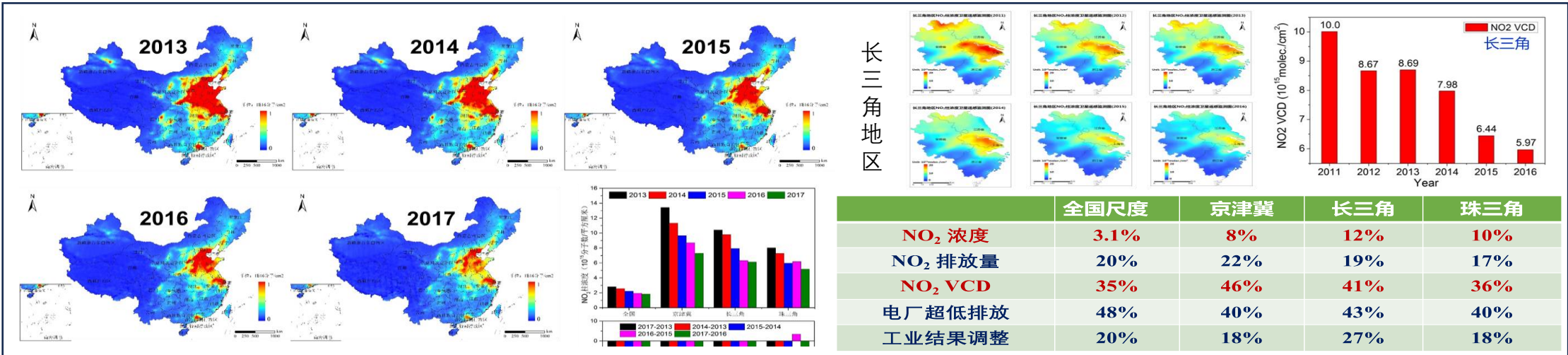


污染气体卫星监测技术发展历程



2017年底我国《大气污染防治行动计划》实施成效评估：卫星独立评估

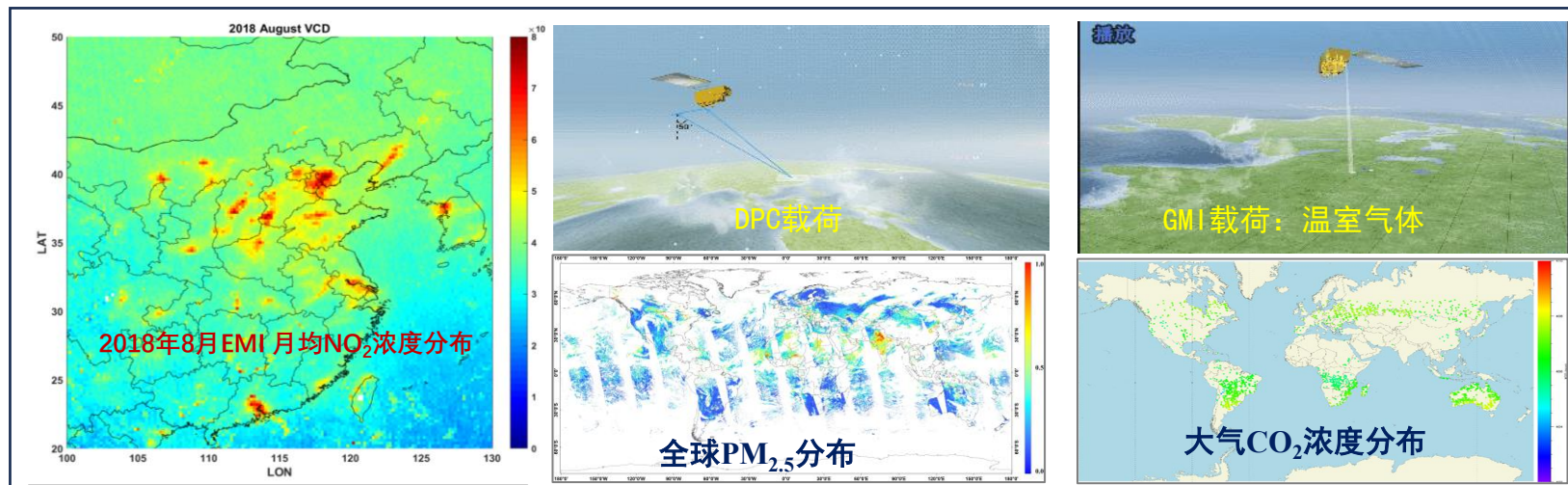
- 卫星评估优势：高架源、郊区、远离市区的排放源等减排，均可以被卫星监测到
- 技术特征：与地面站点监测原理不同，是一种独立的监测技术





VIS: 12km × 13km

- **主要载荷：**污染气体、颗粒物、温室气体
- **承担任务：**载荷指标及先进性论证、数据处理、参数反演算法与系统研发





污染气体卫星监测技术发展历程



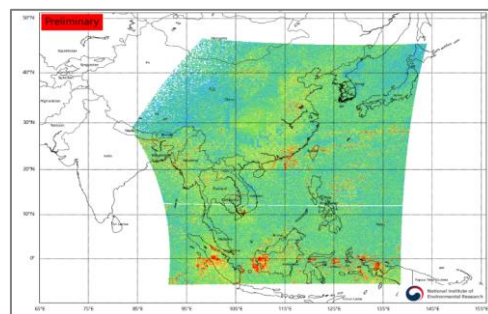
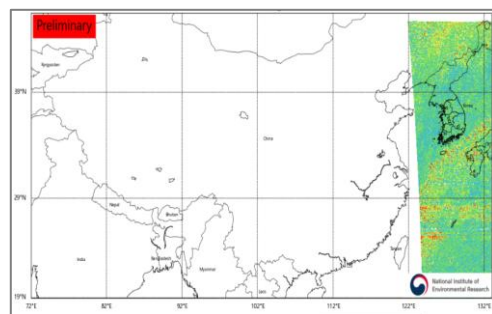
2020年2月18日发射静止卫星：全球首颗污染气体监测高轨卫星（GEO-KOMPSAT-2B）



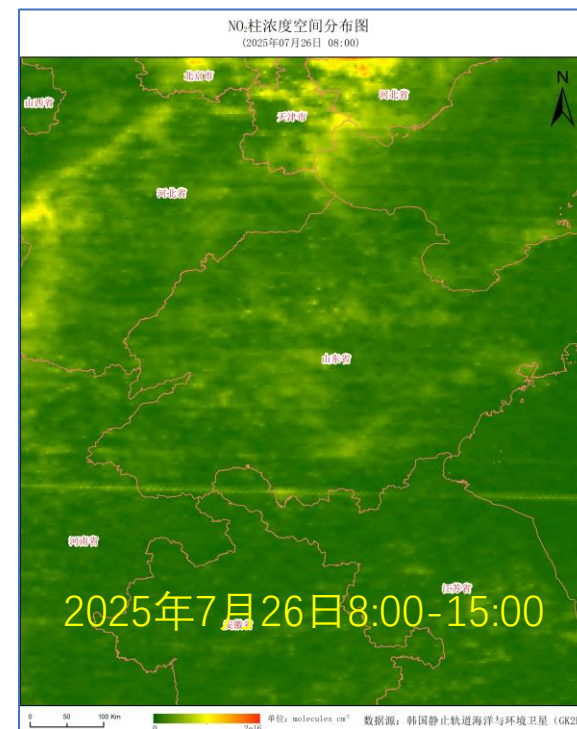
□ 监测成分： O_3 、 NO_2 、 SO_2 、HCHO等

□ 监测范围：5,000km x 5,000km

5°S - 45°N, 75°E - 145°E



观测模式：朝鲜半岛局部、东南亚

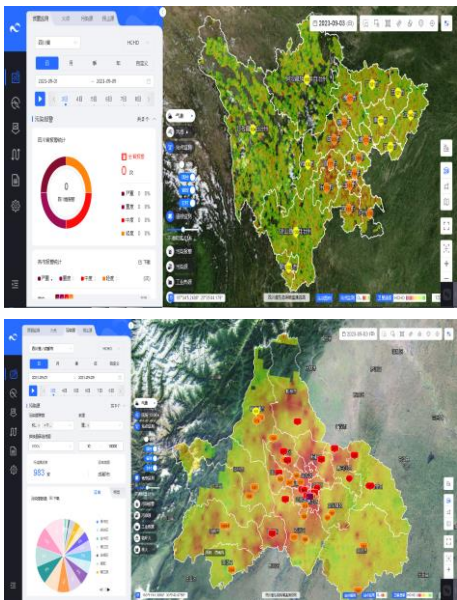




污染气体卫星监测技术发展历程



2023年建立基于卫星技术的大气污染溯源系统：四川省天空地一体化溯源平台



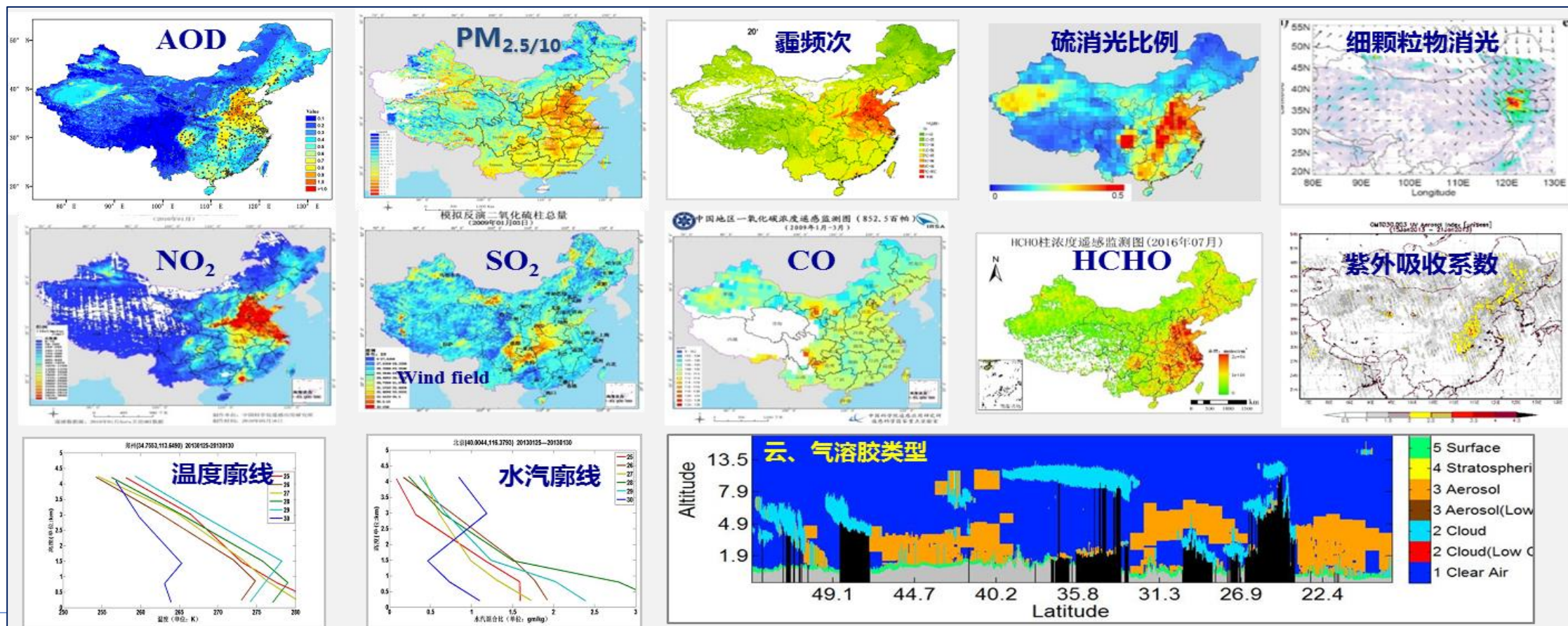
卫星溯源平台

- 在2023年世界大学生运动会的空气质量保障中发挥重要作用
- 2024年两会后：卫星溯源技术，推荐为生态环境监测领域新质生产力典型



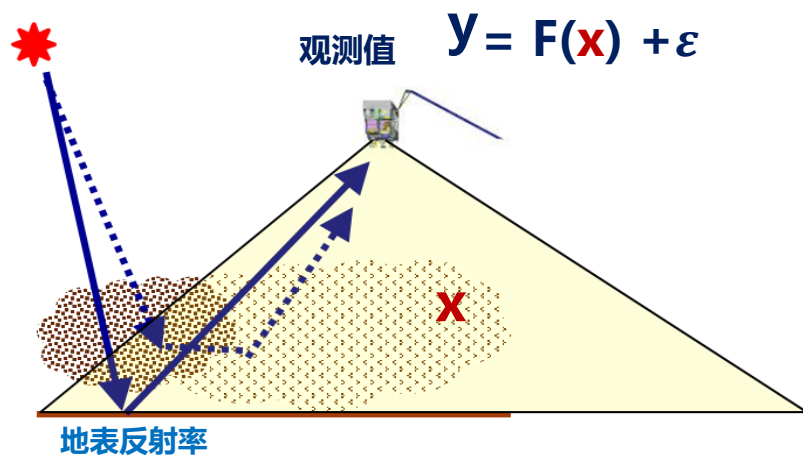


建立了大气污染卫星监测技术体系





晴空空气溶胶反演：细化了空间分辨率



X: 气溶胶理化参数

①气溶胶光学厚度AOD

②粒径谱：细模态、集聚态、粗模态，表述的变量？

③复折射指数：实部：散射特性，虚部：吸收特性

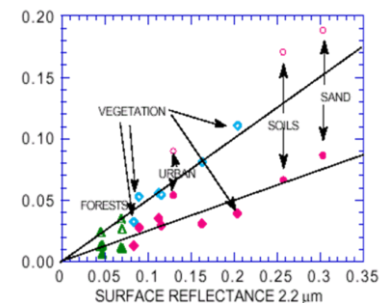
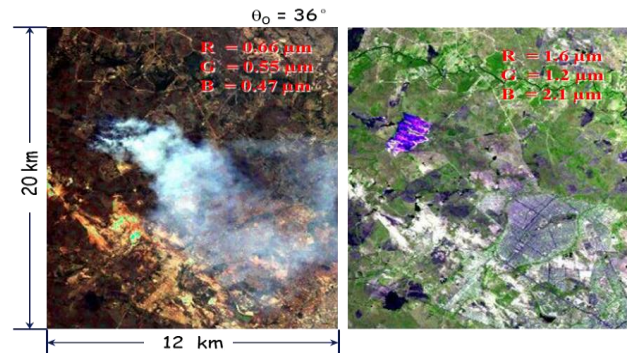
④形态：球形、不对称因子

⑤垂直分布：廓线

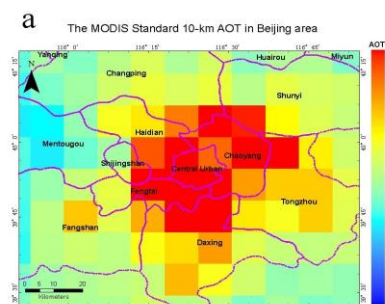
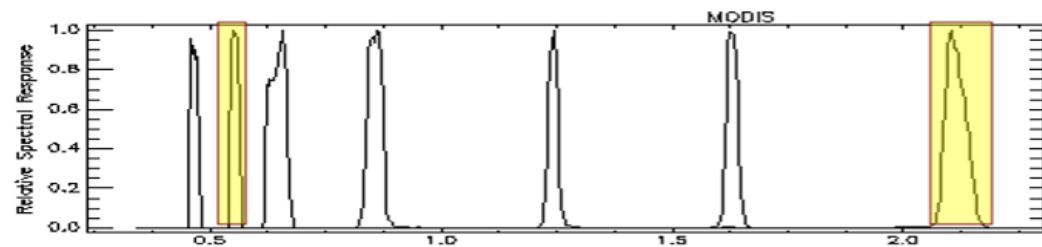
⑥气溶胶成分：BC、OC、SNA、沙尘、水份含量

反演时假设
气溶胶模式

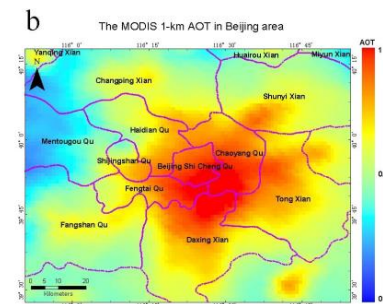
- 大陆型
- 海洋型
- 沙漠型



生物质燃烧 (巴西, August 25, 1995)



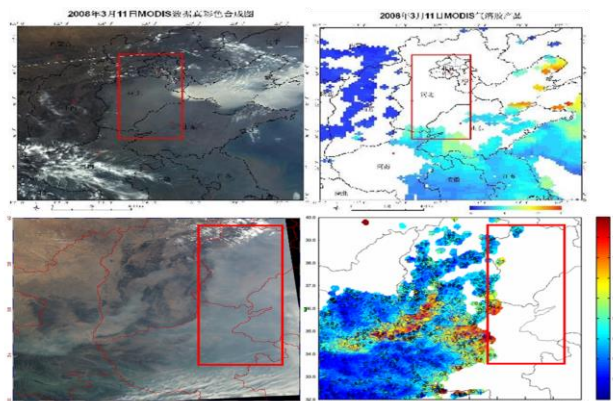
NASA 10km AOD结果



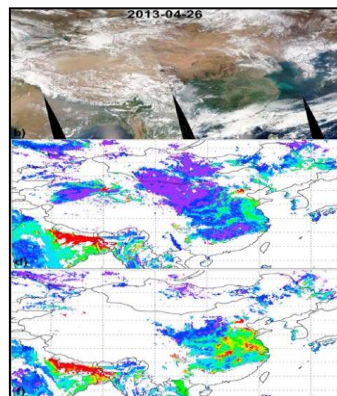
我们 1km AOD结果

实现了霾天气溶胶反演

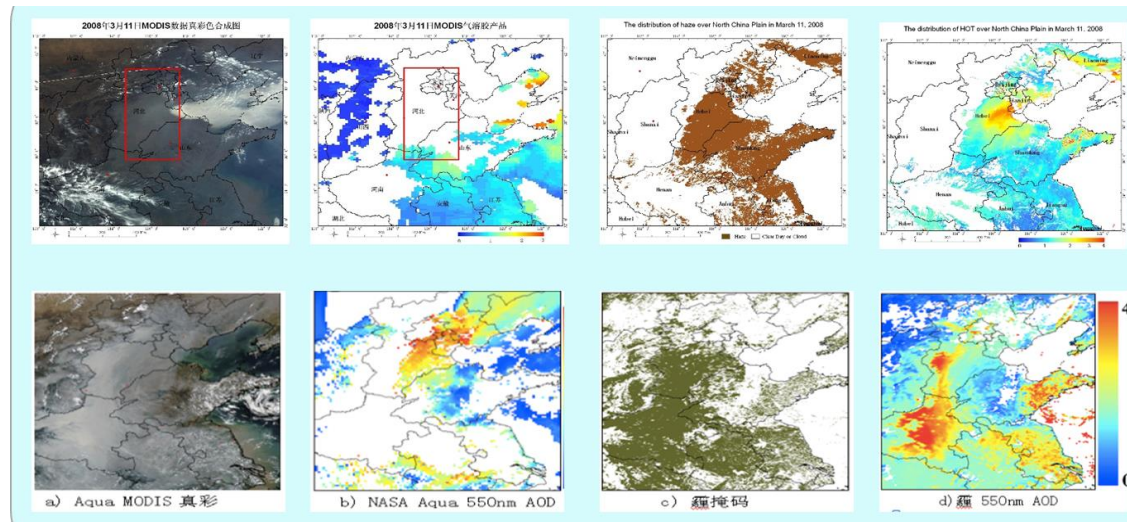
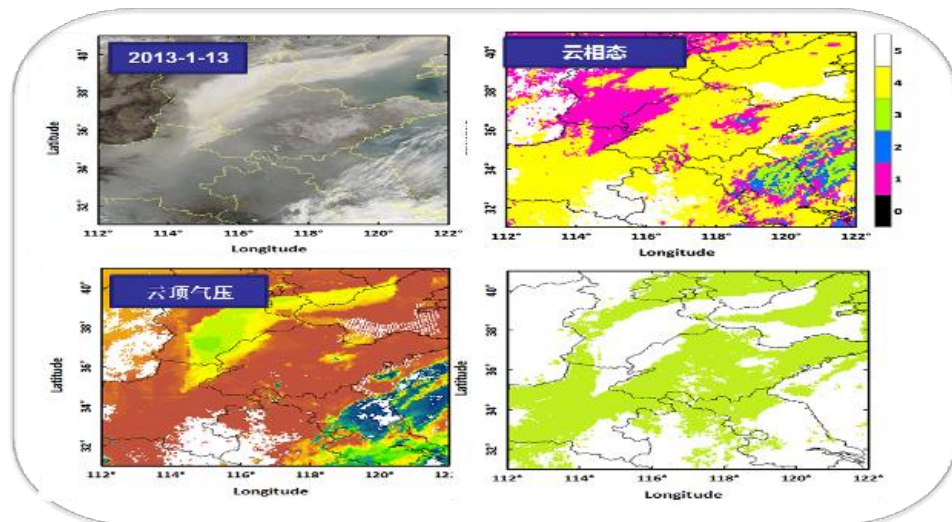
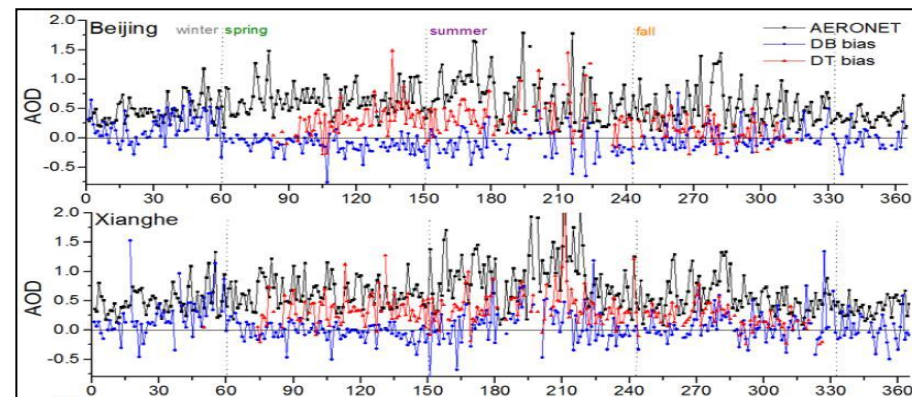
□ NASA早期算法不适用霾天状况



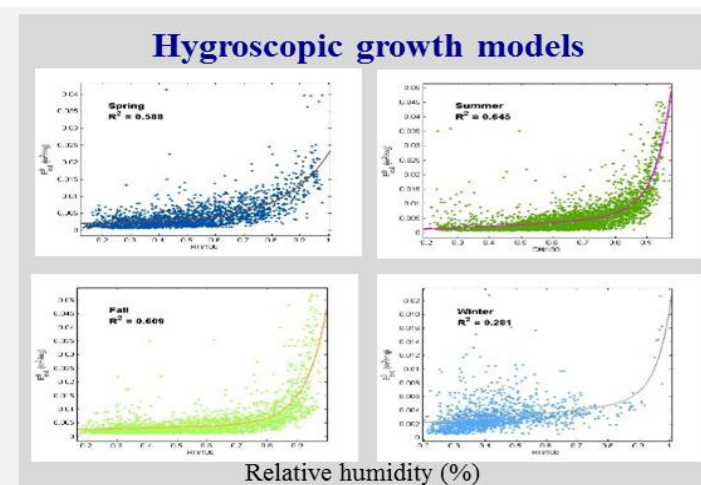
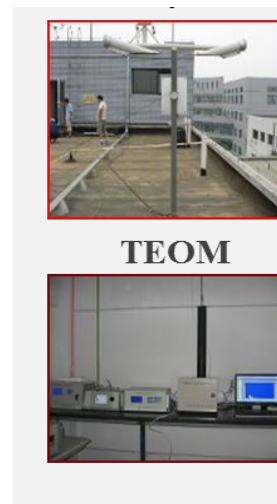
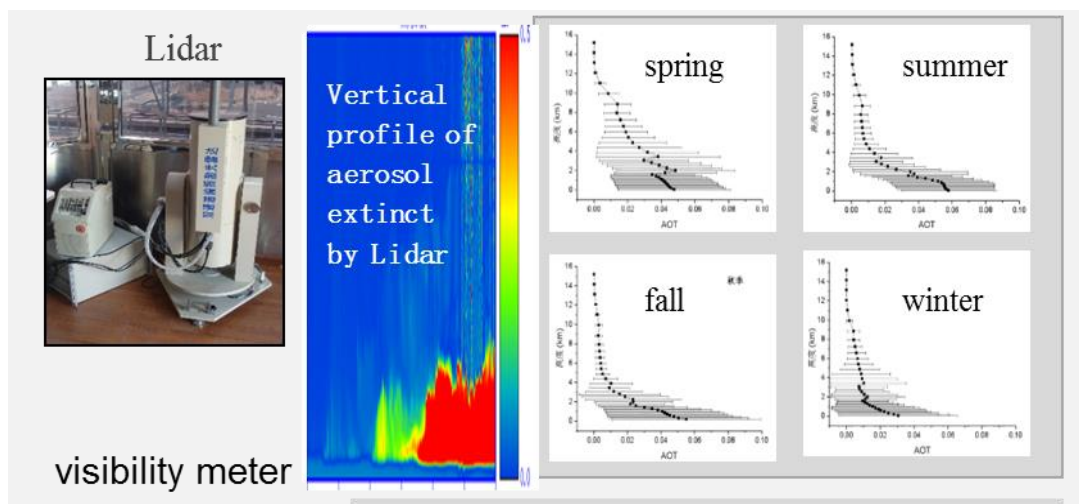
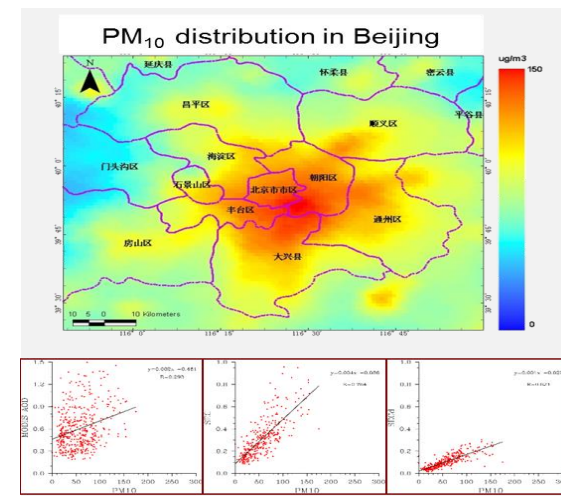
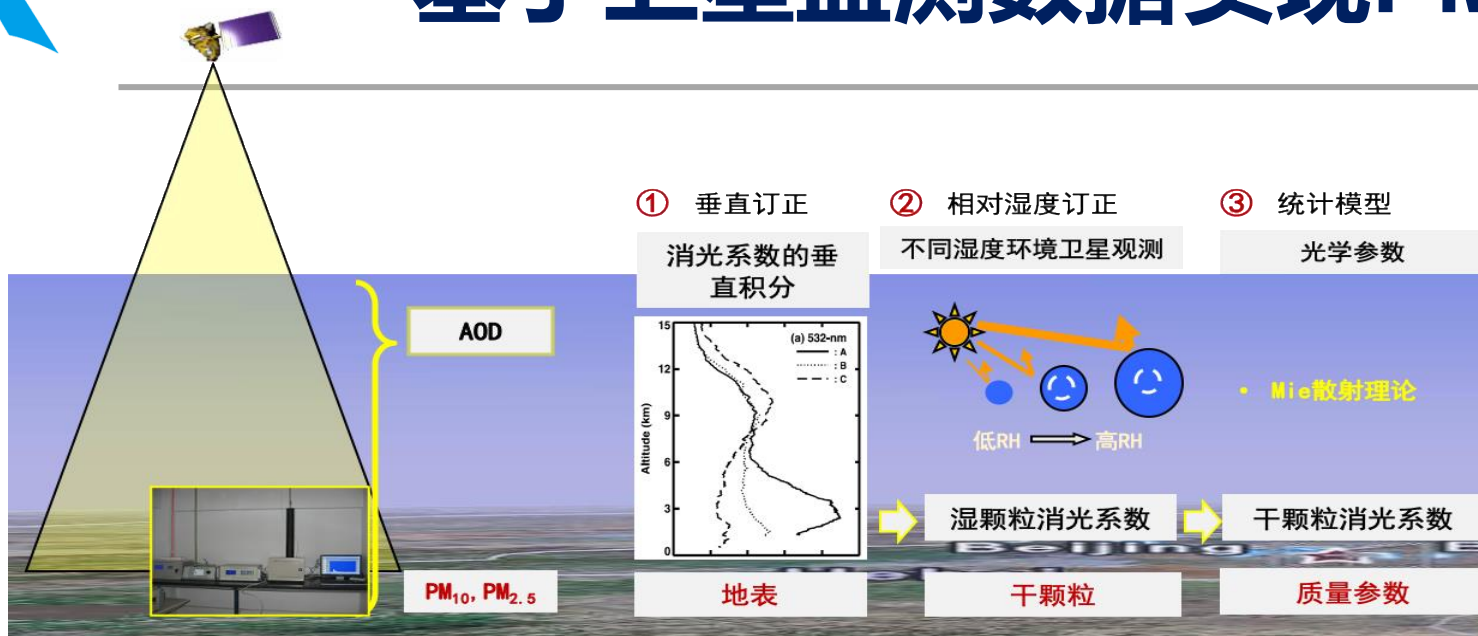
□ 两种算法差异大



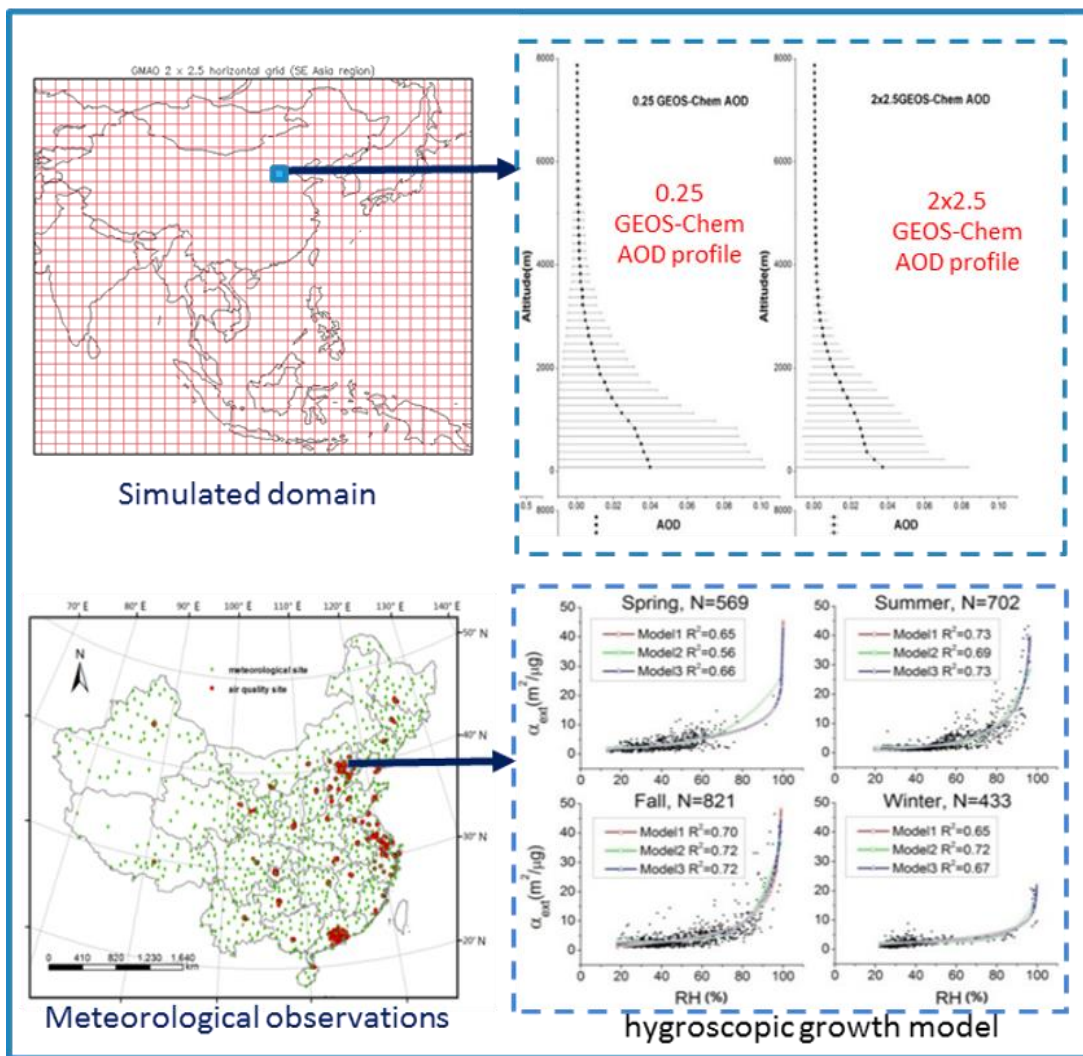
□ 多年平均MODIS/AOD与AERONET比较



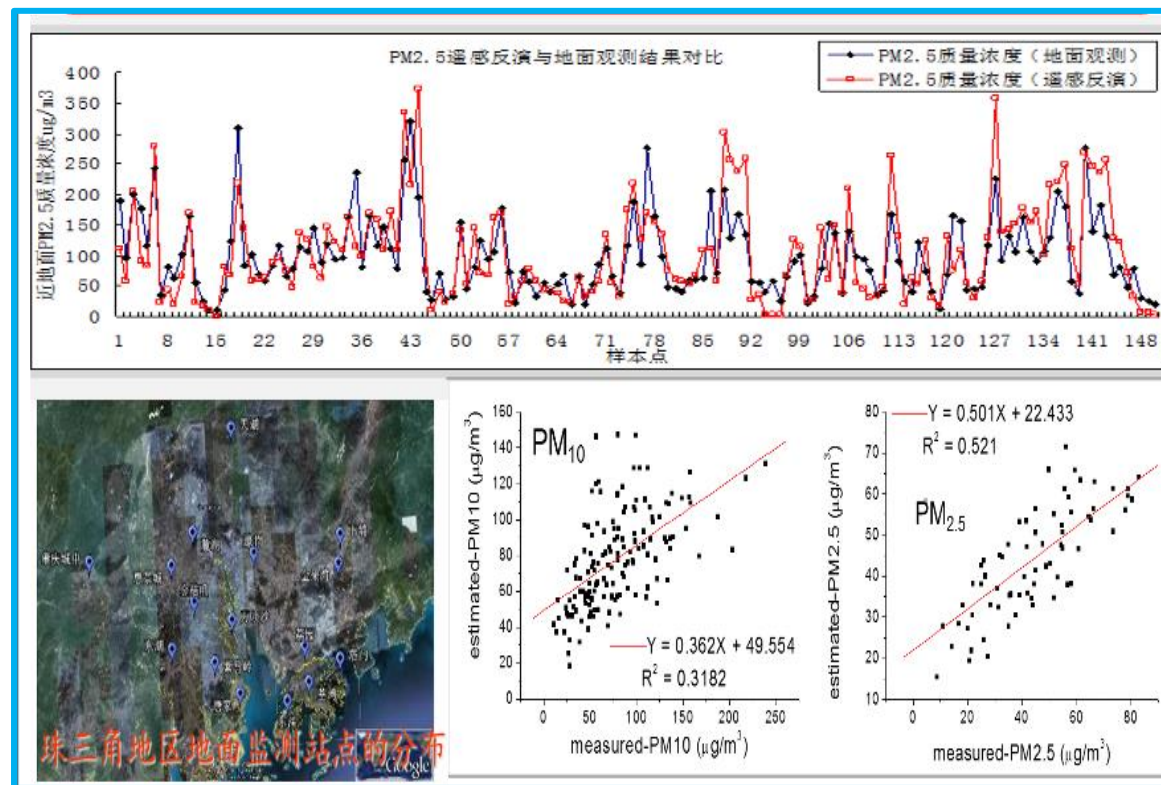
基于卫星监测数据实现PM浓度估算



基于卫星监测数据的PM估算：区域尺度

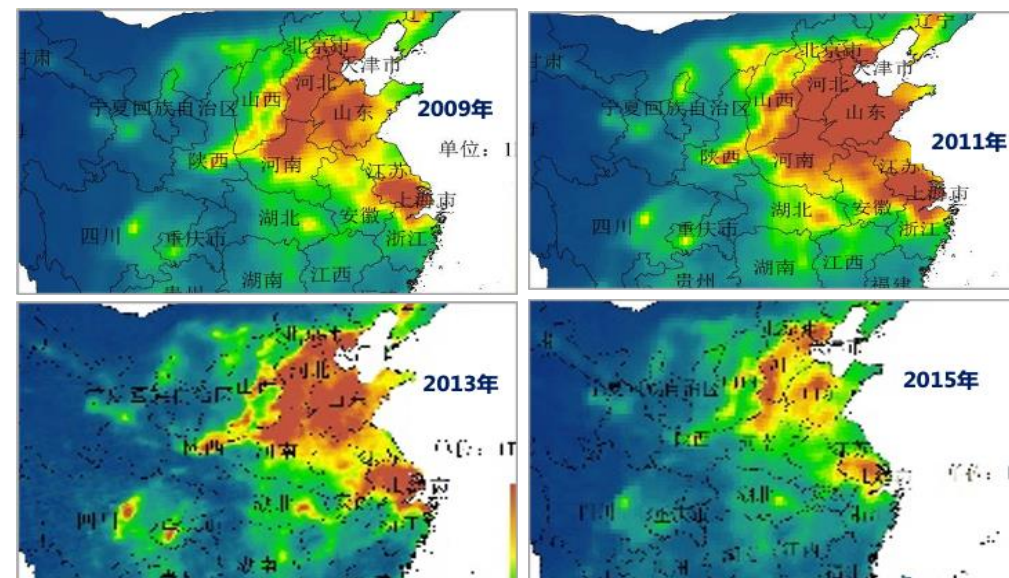
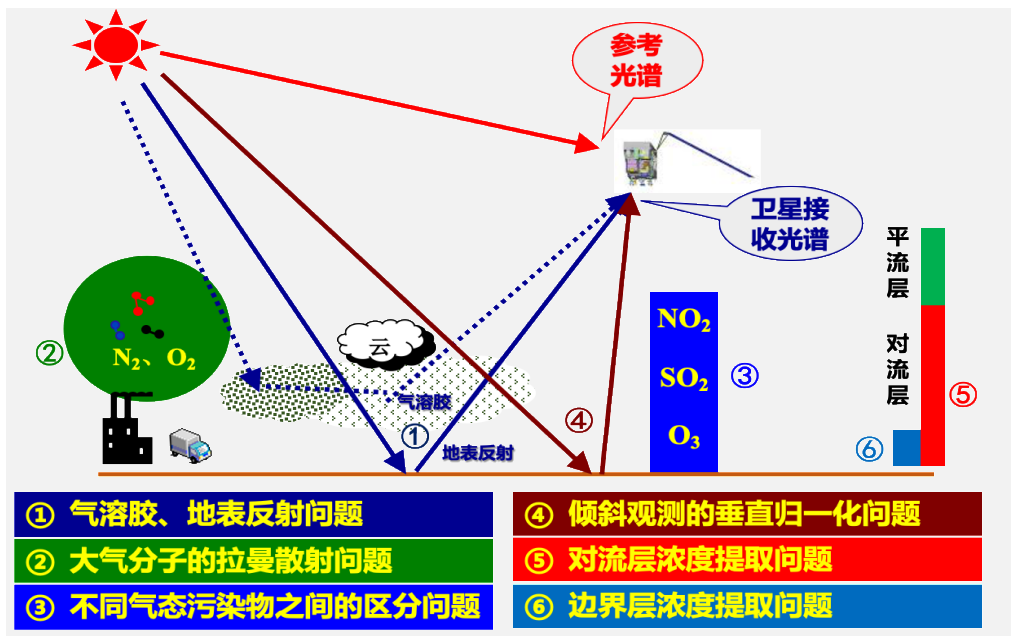


华北平原生态网络地面监测验证结果

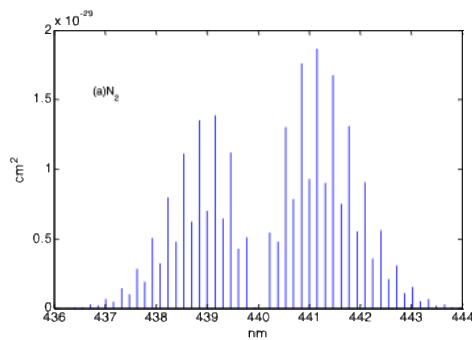


基于珠三角监测站点的结果验证

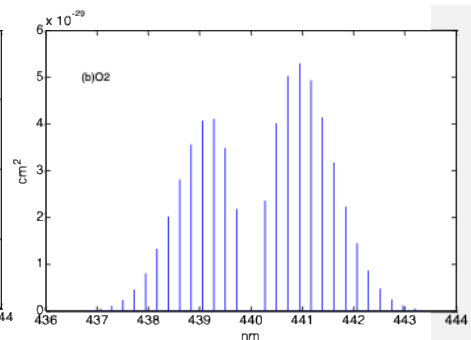
NO₂差分吸收光谱反演方法 (DOAS)



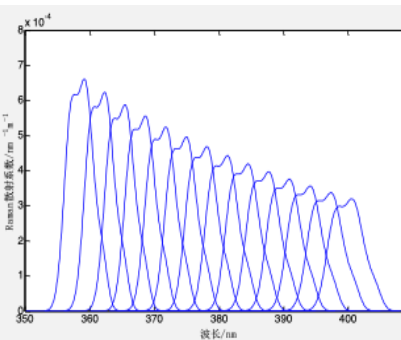
反演的NO₂对流层住浓度



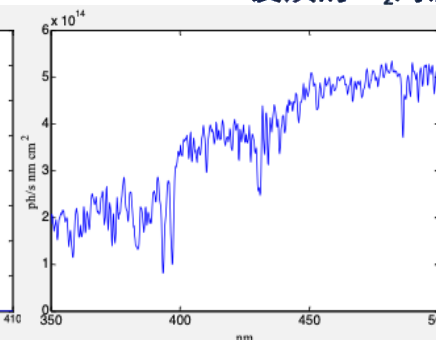
N₂ 吸收截面



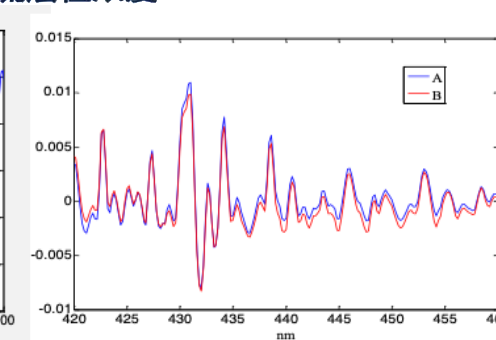
O₂ 吸收截面



N₂ 各吸收波段的吸收截面分布



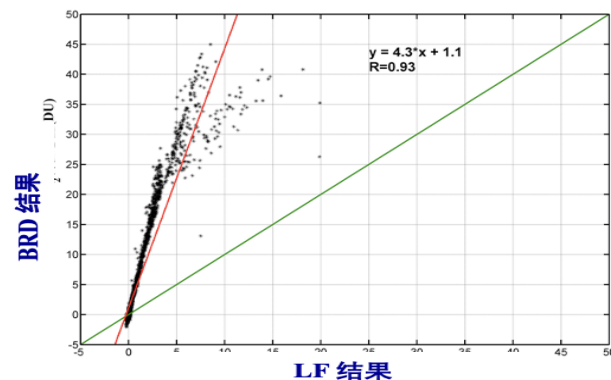
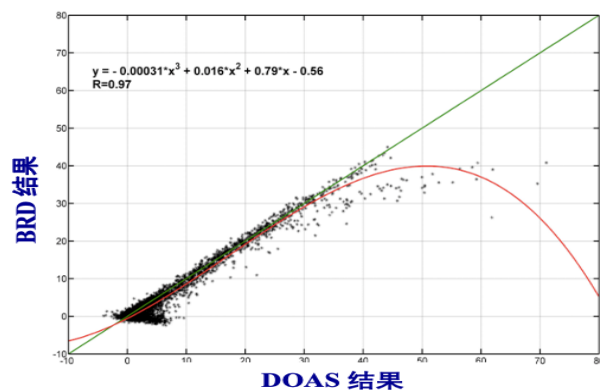
太阳光谱



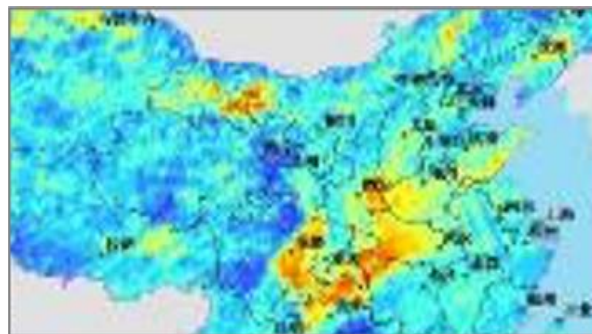
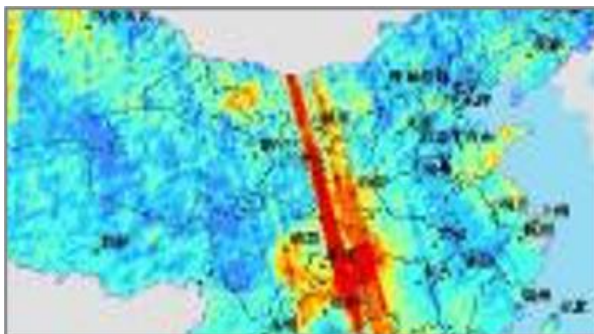
Ring 效应

三种SO₂反演算法比较

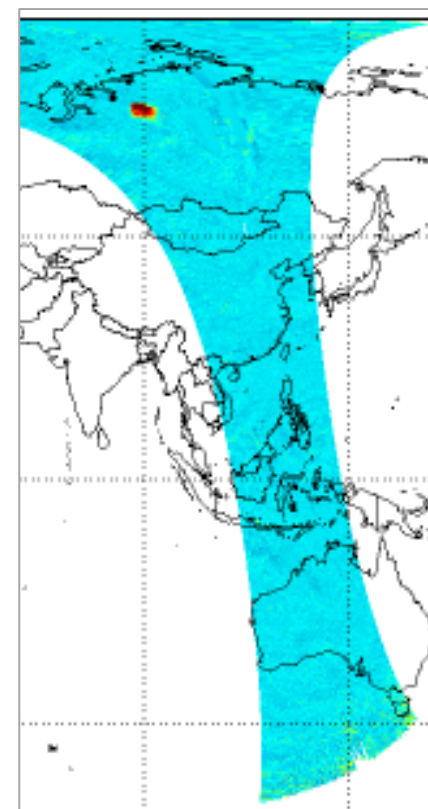
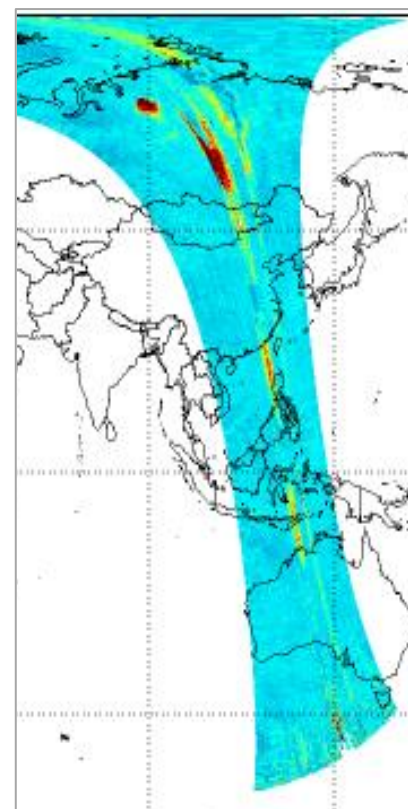
- ① 查分吸收光谱算法: DOAS (Eisinger and Burrows, 1998)
- ② 波段对差值法: BRD : band residual difference (Krotkov et al., 2006)
- ③ 线性拟合算法: LF : Linear fit algorithm (Yang et al., 2007)



OMI的条带产品, 我们处理的结果



OMI的条带产品, 我们处理的结果



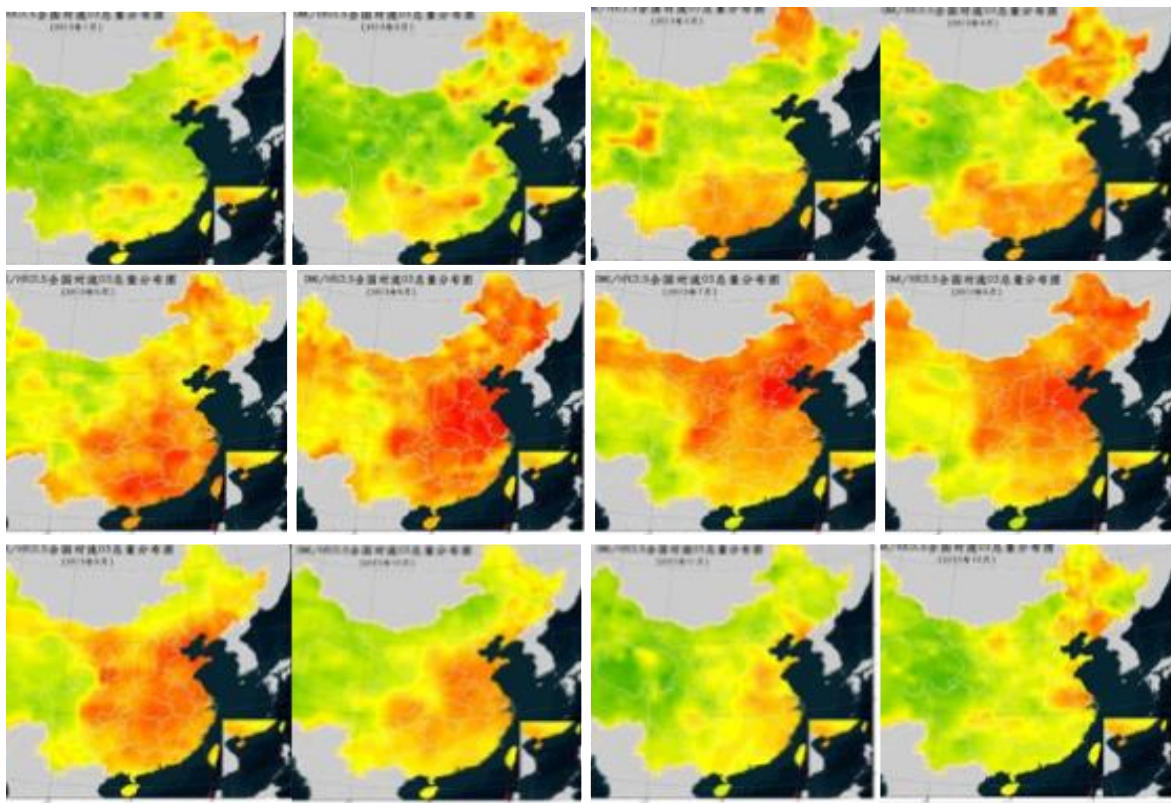


利用红外探测数据、实现O₃和CO廓线反演

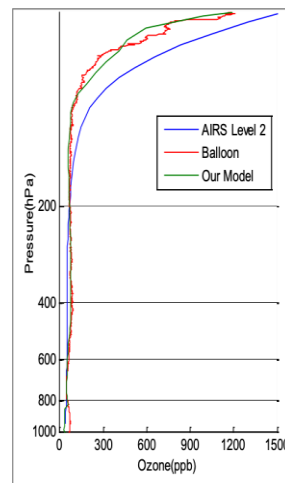
- 数据: AIRS
- 热红外遥感前向模型: RTTOV

- 反演算法: 最优化数学方法
- 空间分辨率: 13km*24km

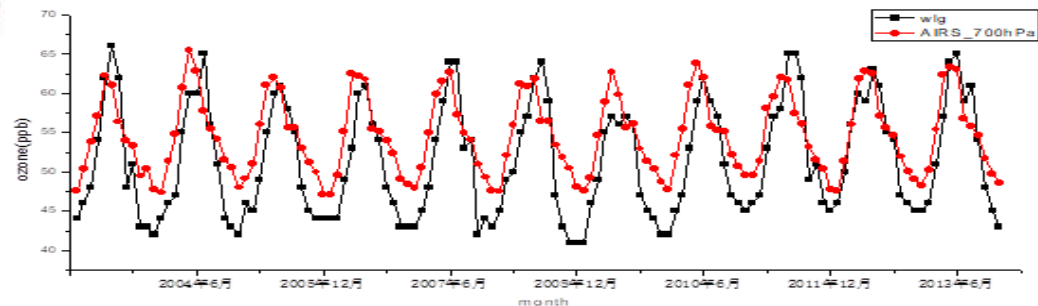
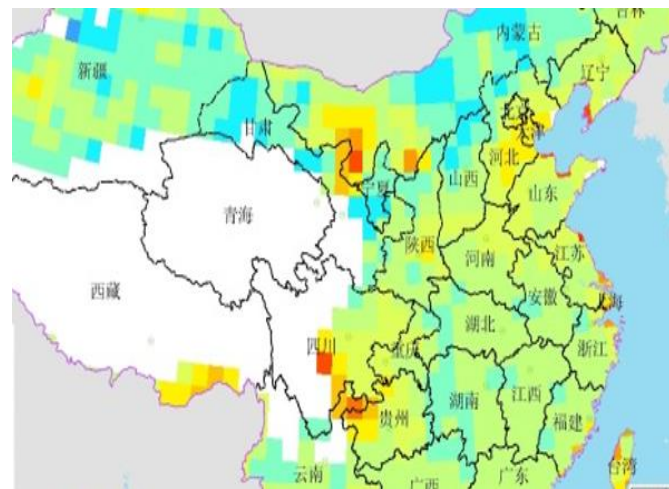
852hPa高度的O₃月均值分布



臭氧廓线



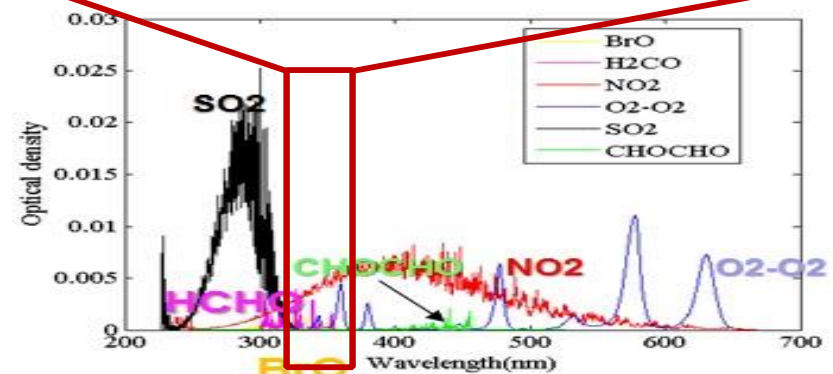
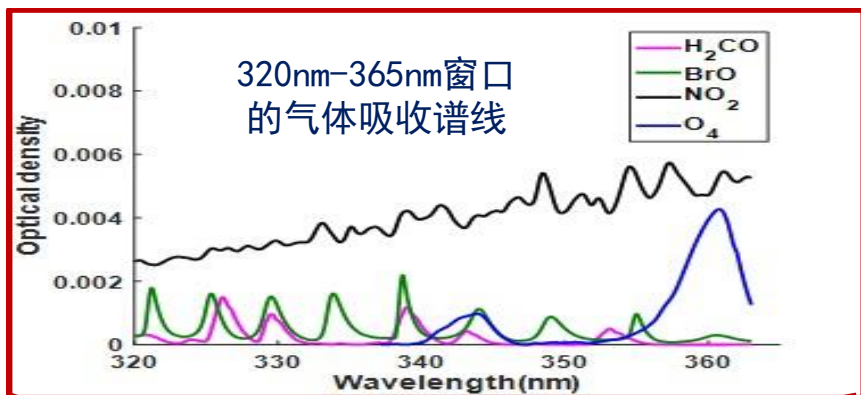
852hPa高度的CO月均值分布



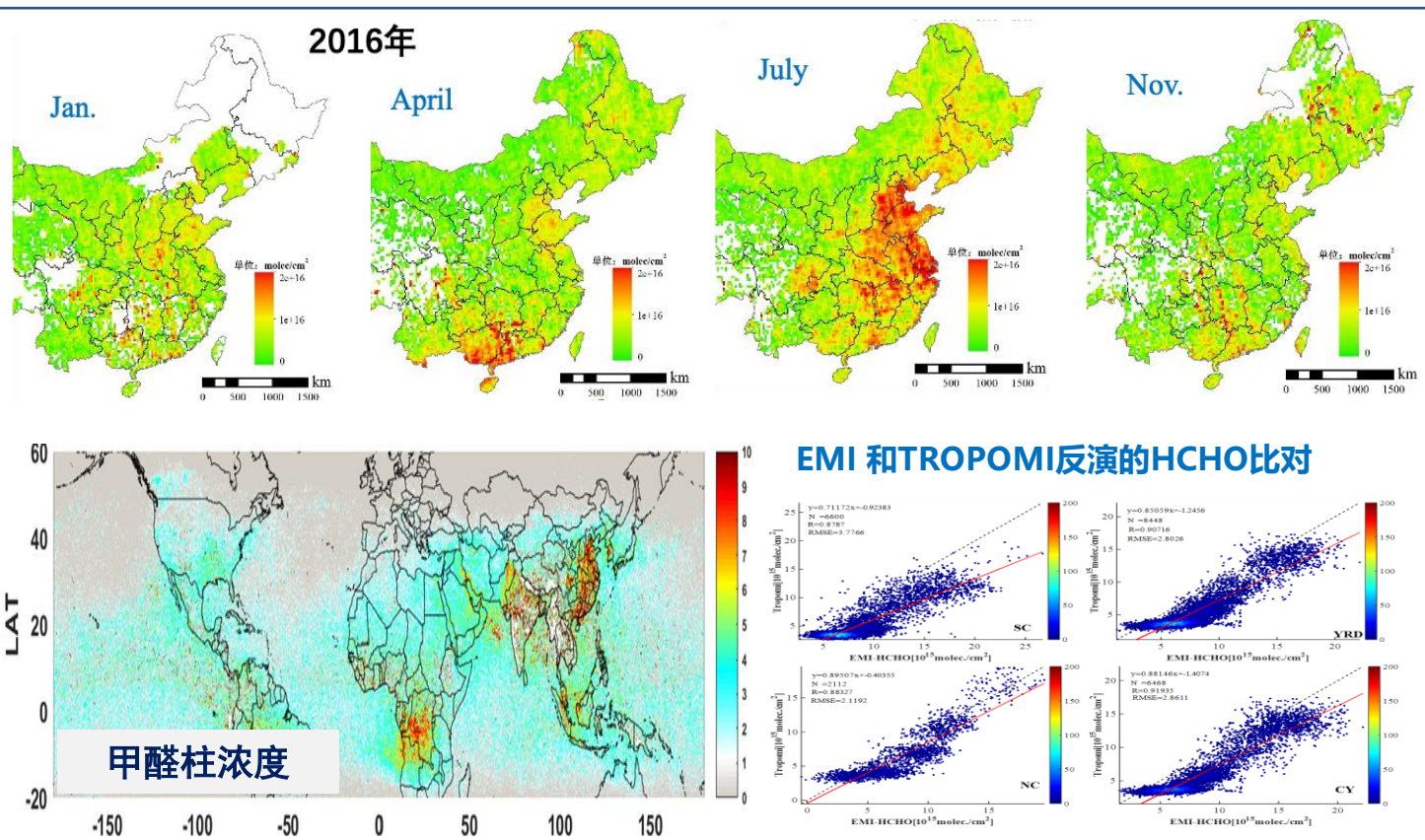
甲醛卫星反演

基于差分吸收光谱算法，实现GF-5卫星EMI数据对甲醛（HCHO）污染物反演

不同季节甲醛浓度空间分布

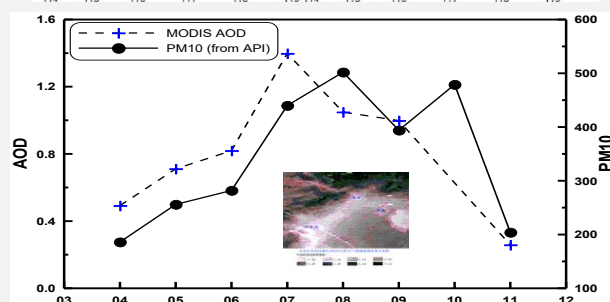
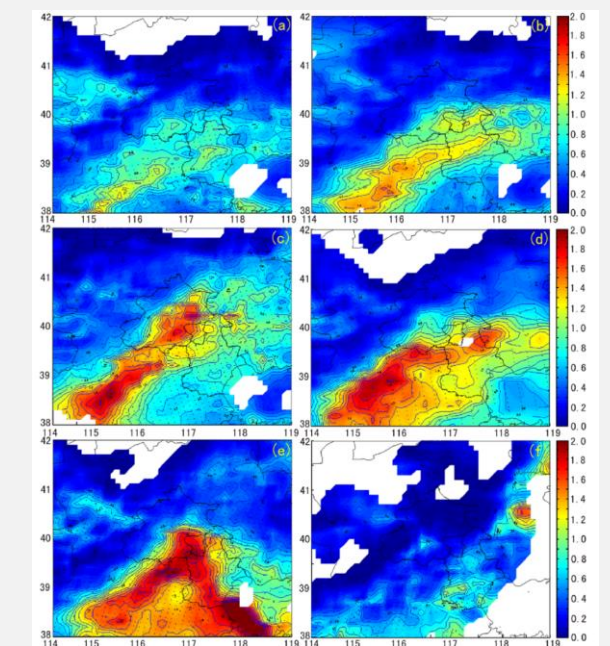
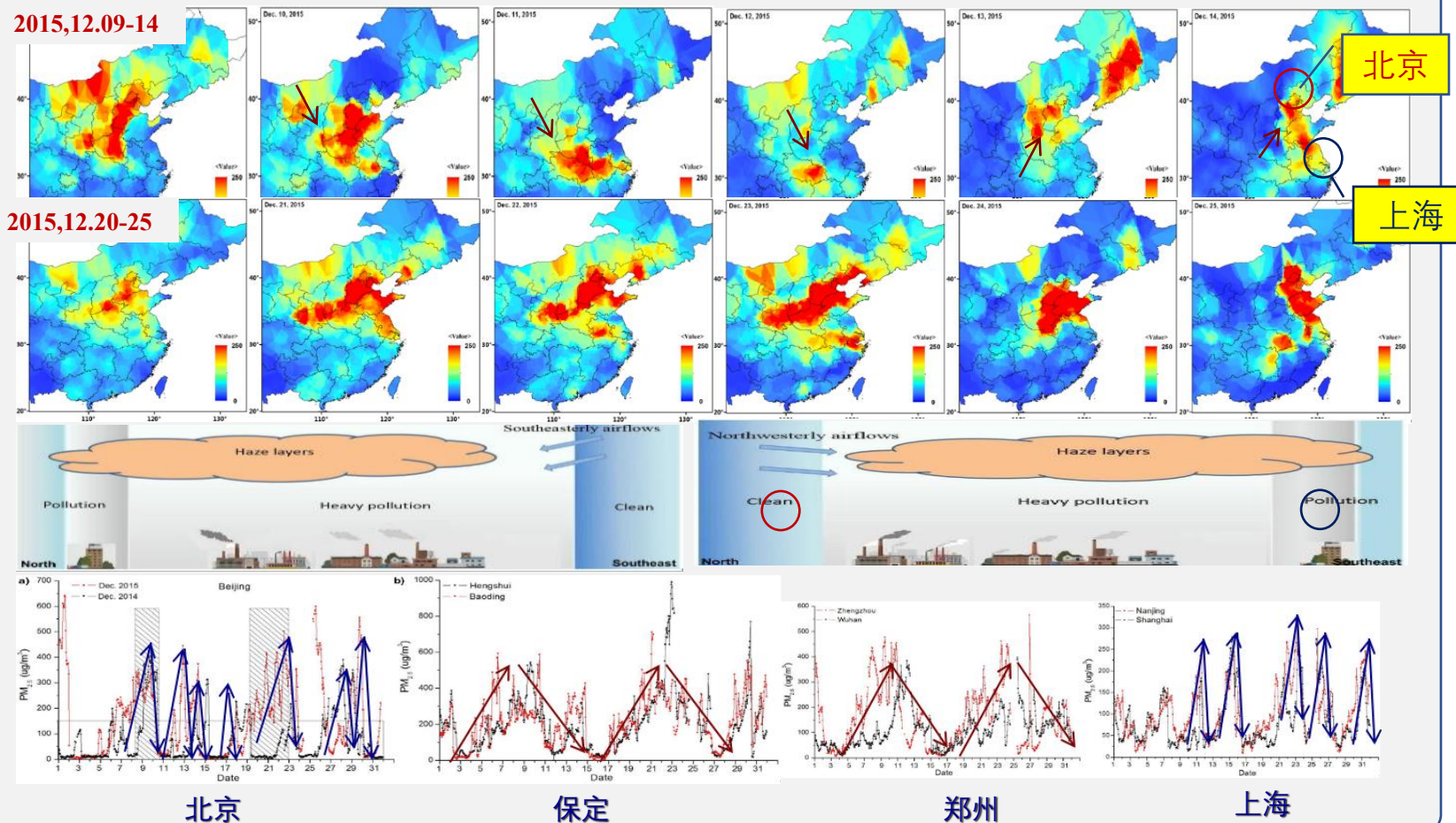


200nm-700nm窗口的气体吸收谱线



我国东部区域污染物传输卫星监测

——华北平原污染物逐步累积，由于偏北、偏南风，导致污染气团南北方向振荡，影响气团两端的北京和上海空气质量



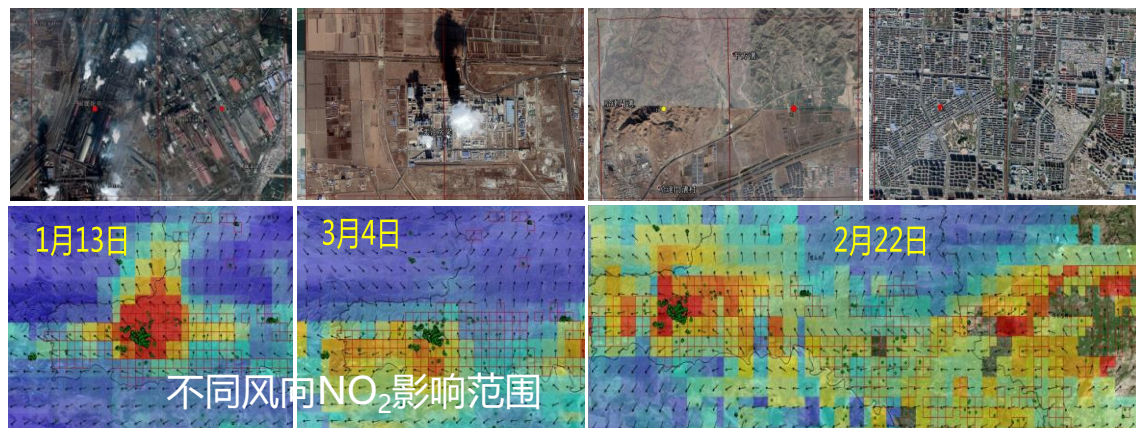
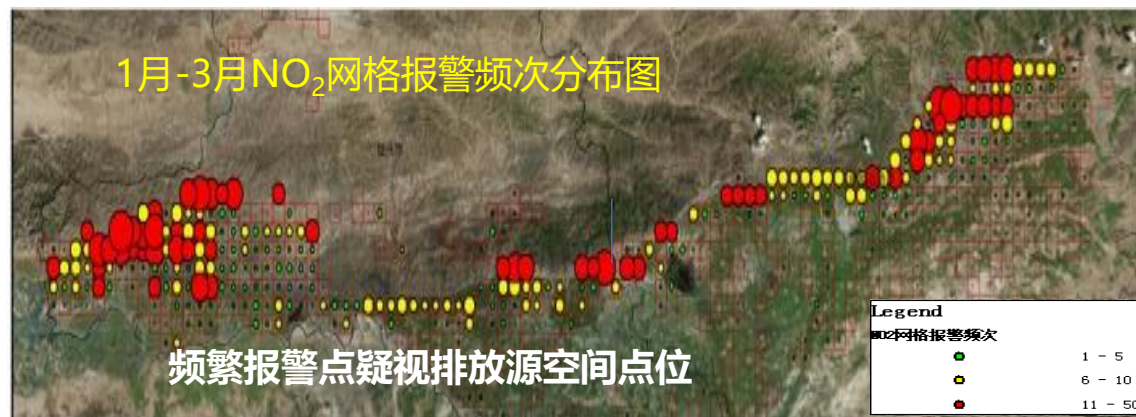
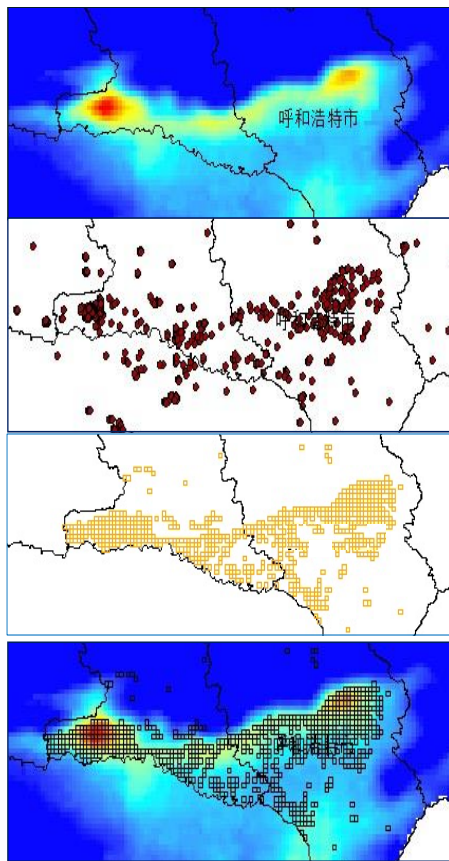
——来源：北京大学李成才教授

2004年10月

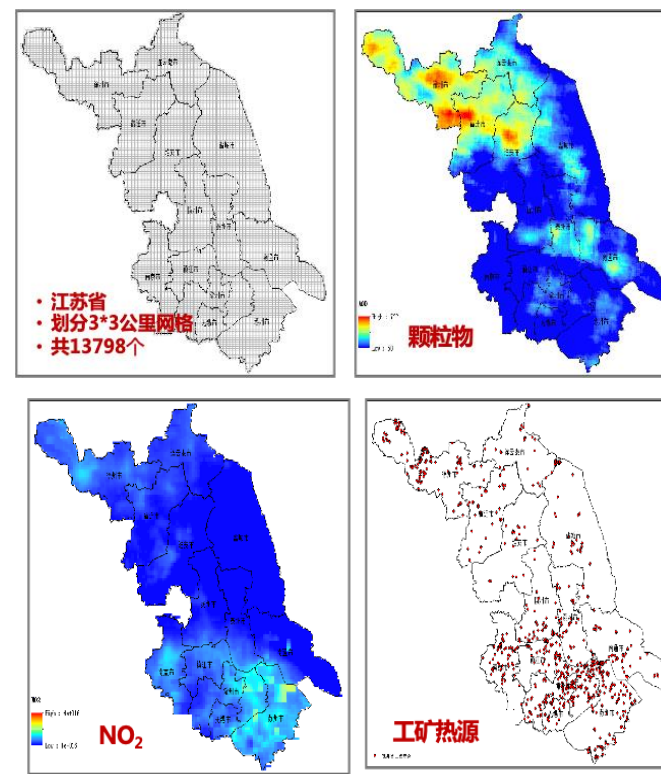


卫星扫描污染物实现高浓度报警

- 基于热点网格，利用卫星实时监测的污染物浓度扫描数据，进行超标预警
- 建立不同污染物浓度预警模型



江苏省排放热点网格报警频次分布图





秸秆焚烧、森林野火监测（生物质燃烧监测）

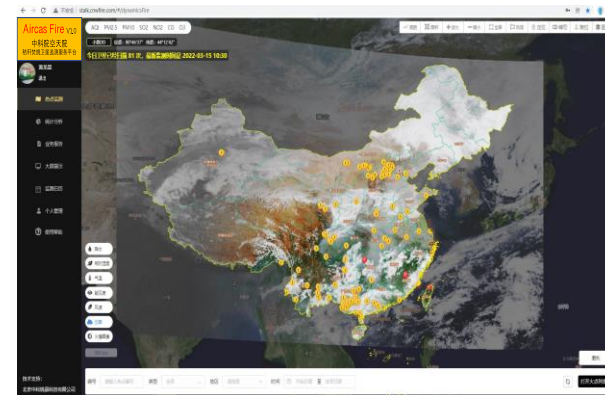
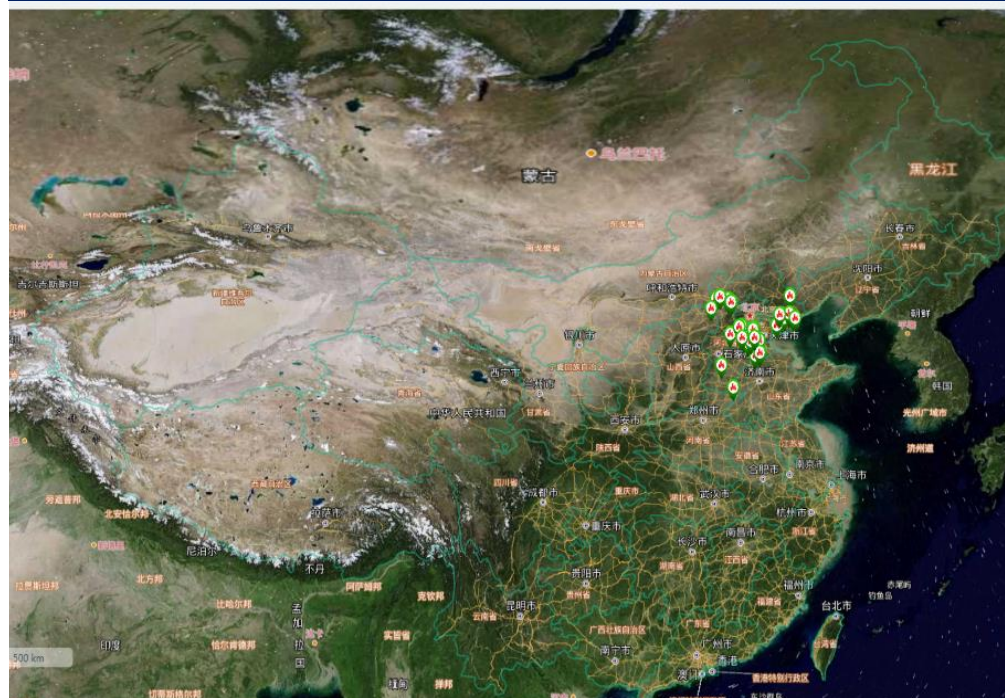
2007年以后，支持生态环境部对秸秆禁烧监测

排热型
高能耗企业监测

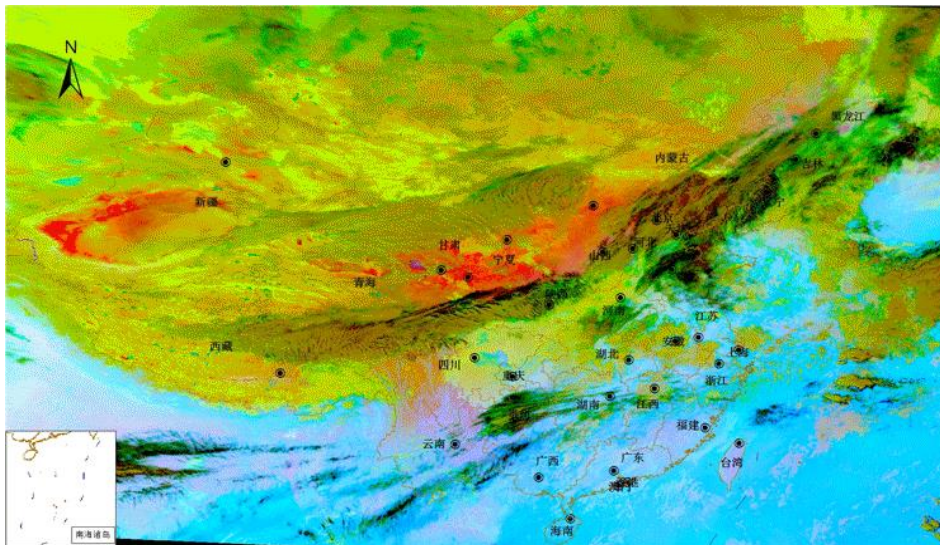


全国秸秆焚烧监测
——生态环境部卫星中心业务应用

发现火点：惩罚性措施

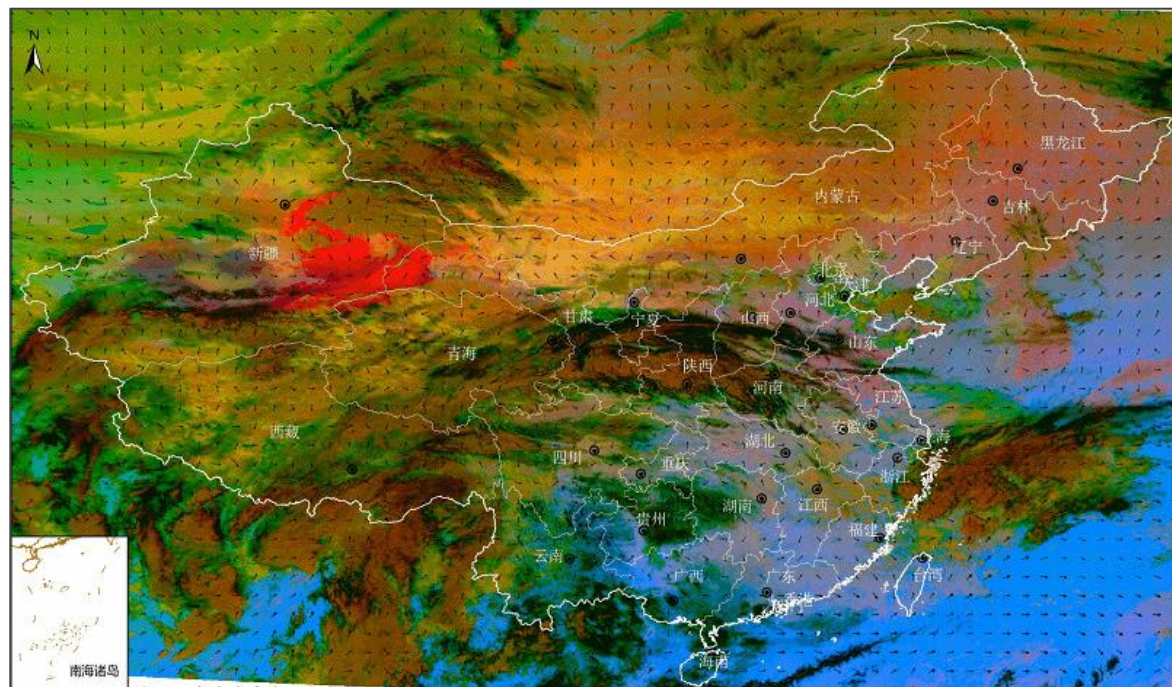
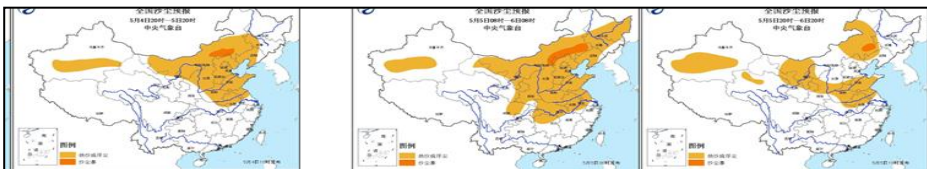
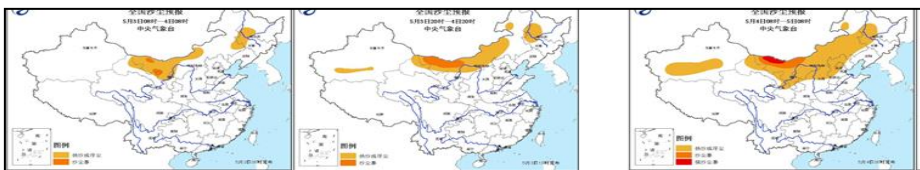


基于红外卫星的沙尘传输监测



沙尘红外监测卫星影像

数据源：葵花8号 2018年12月03日 06:00



沙尘红外监测卫星影像

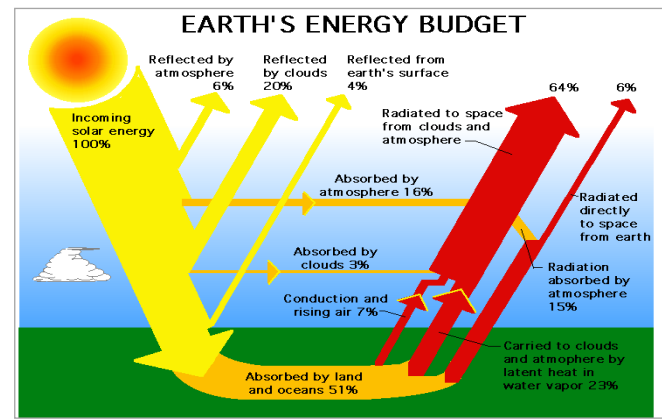
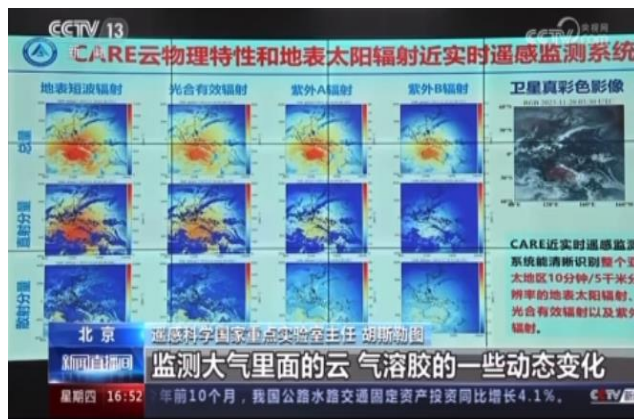
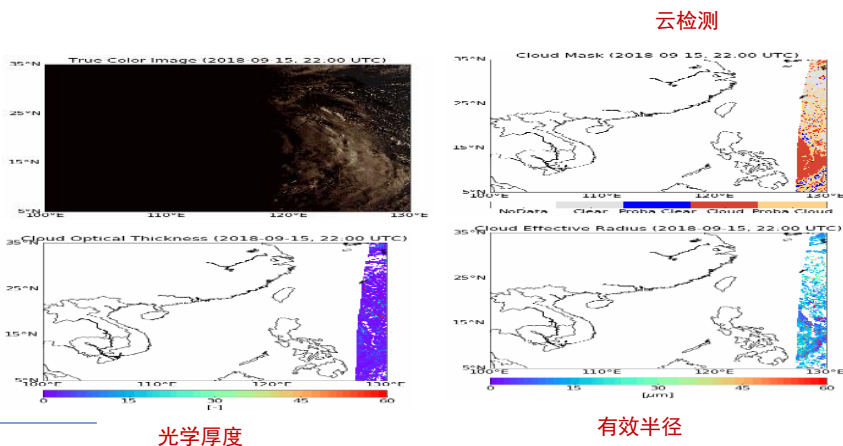
数据源：葵花8号 2023年03月20日 04:00





我国建成全球最高地表太阳辐射监测系统

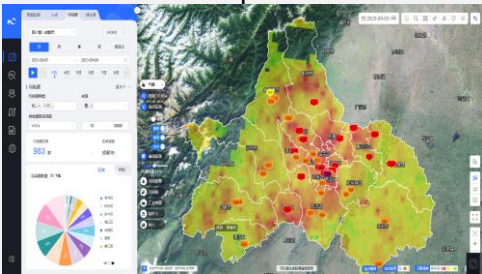
- 2023年11月30日-12月12日，第28届联合国气候变化大会在阿联酋迪拜世博城举办
- 利用卫星监测云相态、粒径、云光学厚度、云顶高度、大气水汽总量，实现对太阳辐射的估算



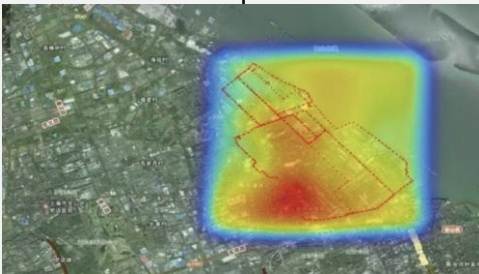


天、空、地一体化

卫星平台



无人机平台



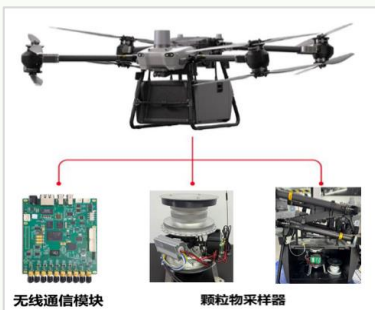
无人机系统（庞小兵教授）

- 1、无人机颗粒物采样系统
- 2、无人机恶臭检测系统
- 3、无人机空气质量检测系统
- 4、无人机氧化亚氮检测系统
- 5、无人机臭氧检测系统
- 6、无人机气象检测系统
- 7、无人机TVOC检测系统
- 8、无人机气相色谱-光电离检测系统
- 9、无人机温室气体检测系统
- 10、无人机气袋采样系统
- 11、无人机苏玛罐采样系统
- 12、无人机吸附管采集系统
- 13、二氧化碳检测系统



前九套无人机探测平台（庞小兵教授）

颗粒物采样系统

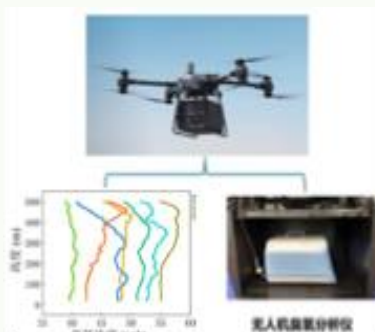


空气质量检测系统



PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、
NO₂、CO、O₃

臭氧检测系统



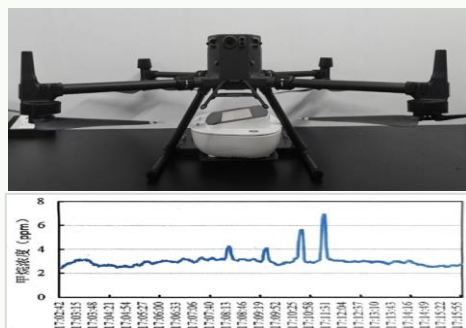
气相色谱-光电 离检测系统 (GC-PID)



+
色谱柱温箱
微型光电离检测器

TVOCs 苯及其同系物(如甲苯、二甲苯等)、醛类(如甲醛、乙醛等)、酮类(如丙酮)、酯类醇类(如乙醇、甲醇), 对含有芳香族环、双键或三键的有机化合物比较敏感, 尤其适合检测低浓度的 VOCs

温室气体检测系统



基于可调谐二极管激光吸收
光谱法(TDLAS)的甲烷(CH₄)、
二氧化碳(CO₂)探测

氧化亚氮检测系统

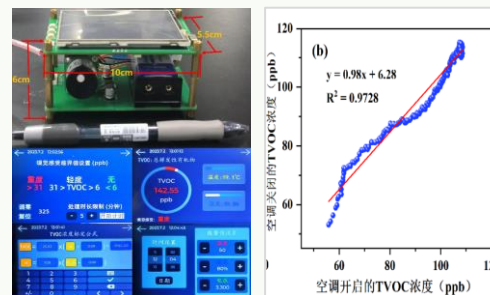


便携式氧化亚氮检测仪与无人机联用

气象检测系统



TVOC 检测系统



测量范围：0~40 ppm
分辨率：1 ppb

恶臭检测系统



氨气、三甲胺、硫化氢、
甲硫醇、甲硫醚、二甲二硫
醚、二硫化碳、苯乙烯等
(检出限 1ppb)、TVOC

提纲

一

污染气体与温室气体卫星监测原理

二

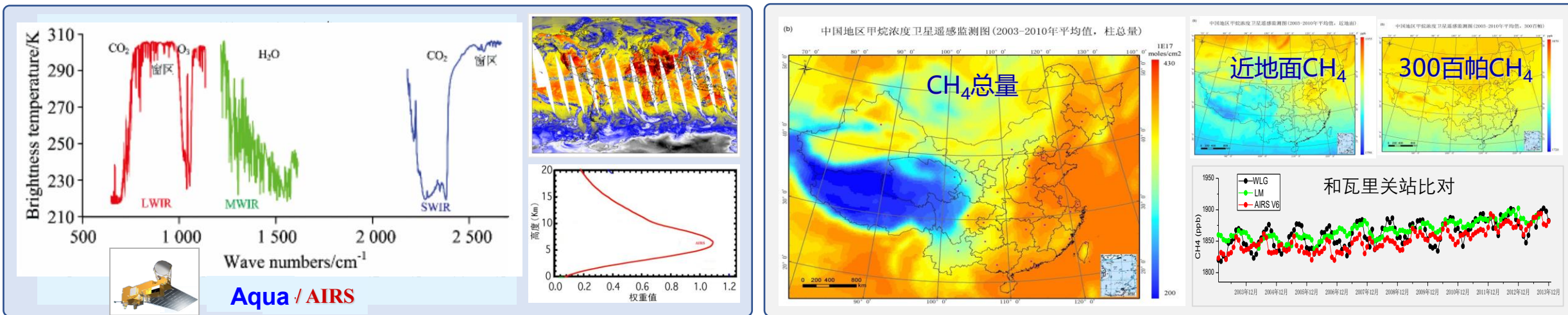
污染气体卫星遥感技术进展与应用

三

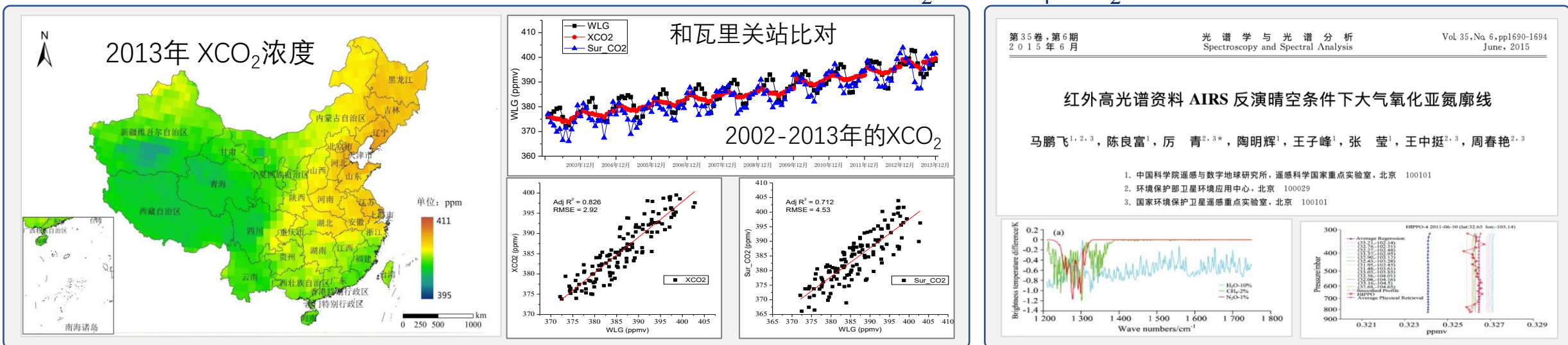
温室气体卫星遥感技术进展与应用



温室气体：热红外遥感探测 XCO_2 、 XCH_4 、 N_2O



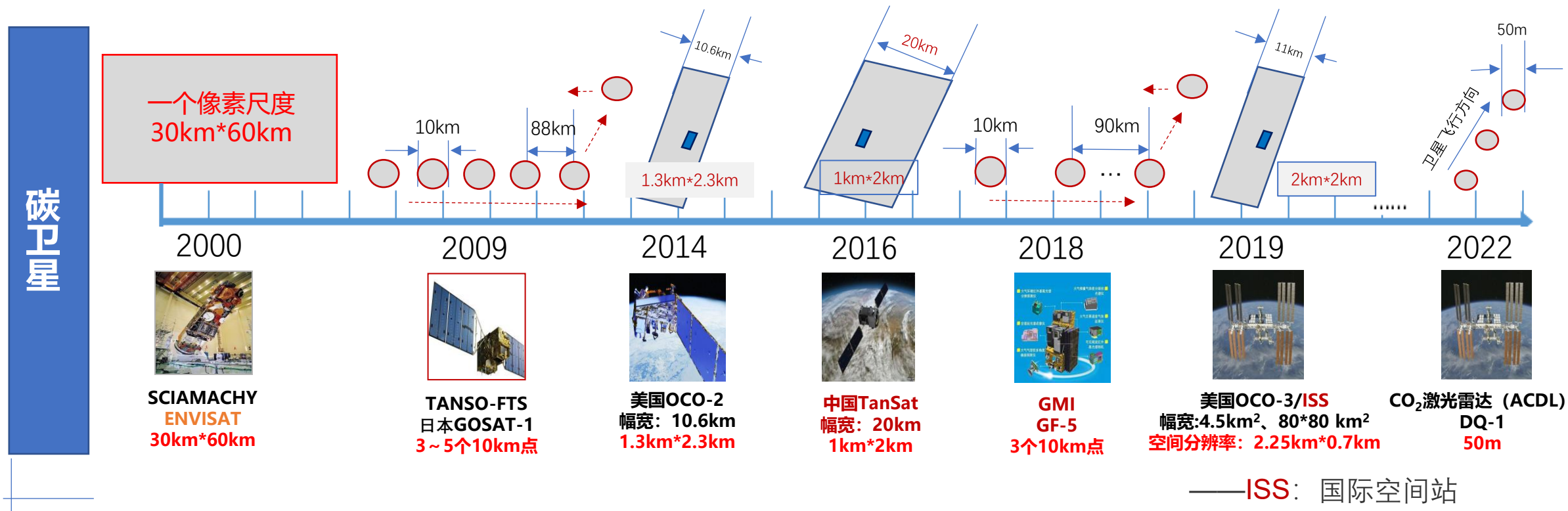
基于热红外AIRS载荷数据，反演 XCO_2 、 XCH_4 、 N_2O 廓线





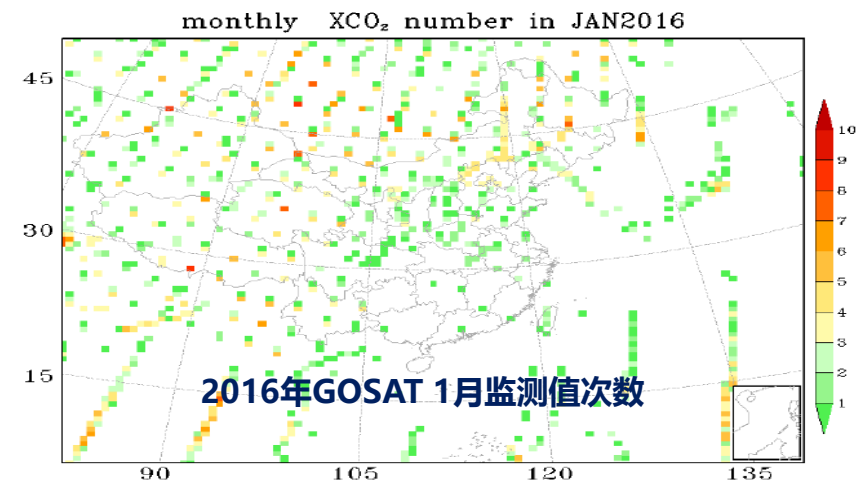
国内外短波红外碳卫星发展历程

- 碳卫星：2000年具备CO₂探测能力（欧空局），2009年发射第一颗专业碳卫星（日本）
- 覆盖率小：光栅成像幅宽10~20km，干涉足迹点稀疏10km直径、3~5个点
- CO₂探测精度低：1%（3~4ppm）、最好的大气状态时达：1.5ppm左右

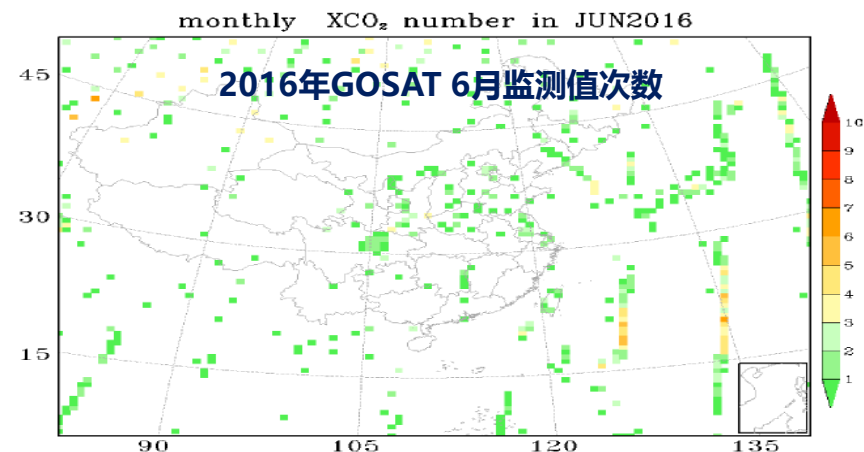
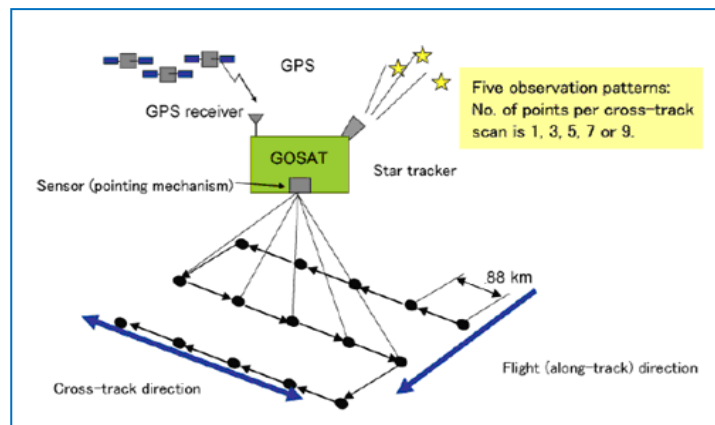
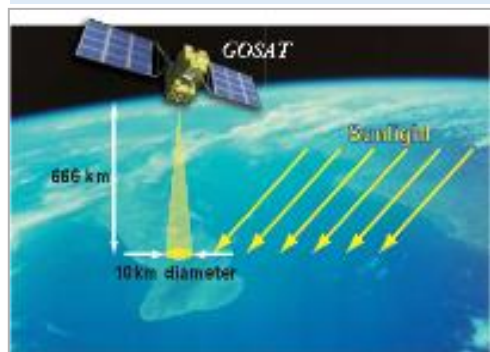


日本GOSAT卫星干涉探测及探测结果

- 卫星：2009年发射A星、2018年发射B星
- 谱段：可见光-短波红外-热红外
- 物种：主要探测CO₂
- 精度：XCO₂:1 ~ 4ppm



日本Tanso-FTS





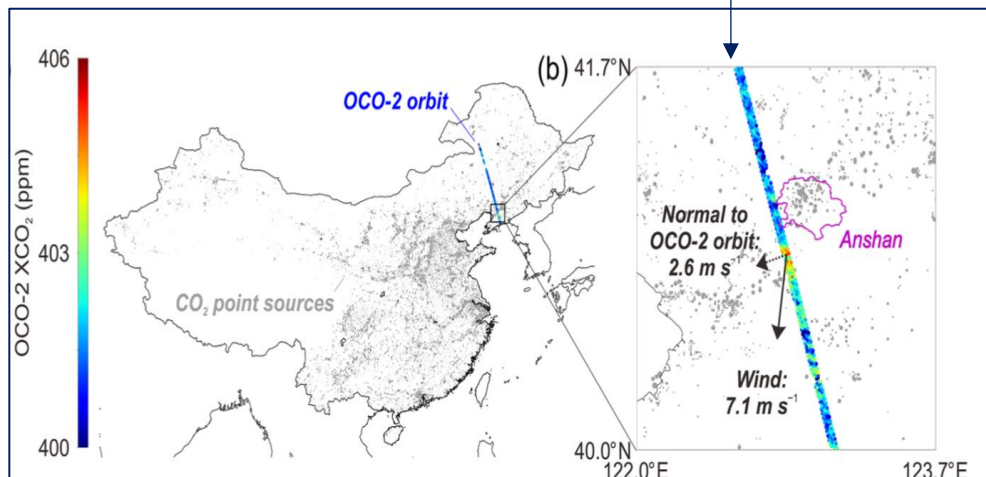
OCO-2卫星：短波红外光栅光谱成像探测模式

卫星：NASA的小卫星系列，首发2009年失败，OCO-2于2014年发射成功，OCO-3于2019年发射挂载在国际空间站上。可探测 CO_2 、 CH_4 ，精度： $\text{XCO}_2: 1 \sim 4 \text{ ppm}$

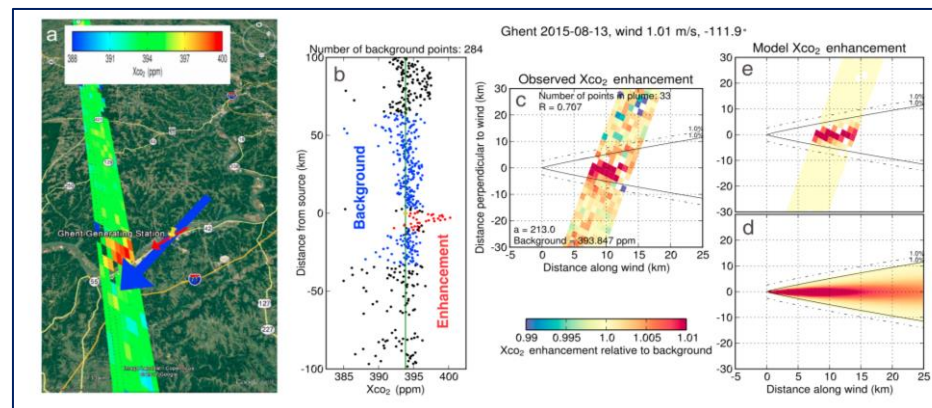


光栅光谱仪

幅宽
10.6km



加拿大：R.Nassar
首先利用烟羽模型开展点源
 CO_2 排放估算（2017年）

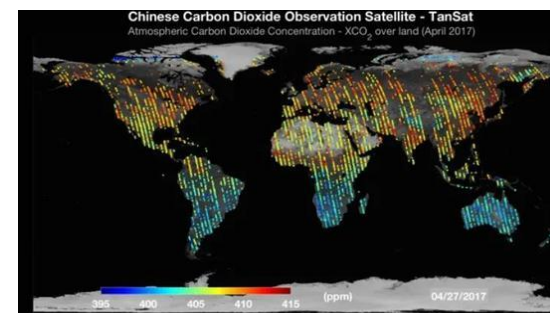
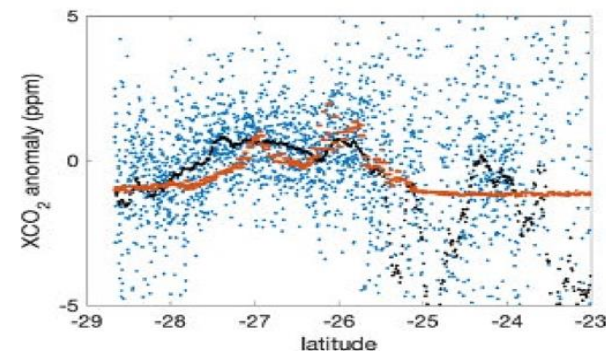
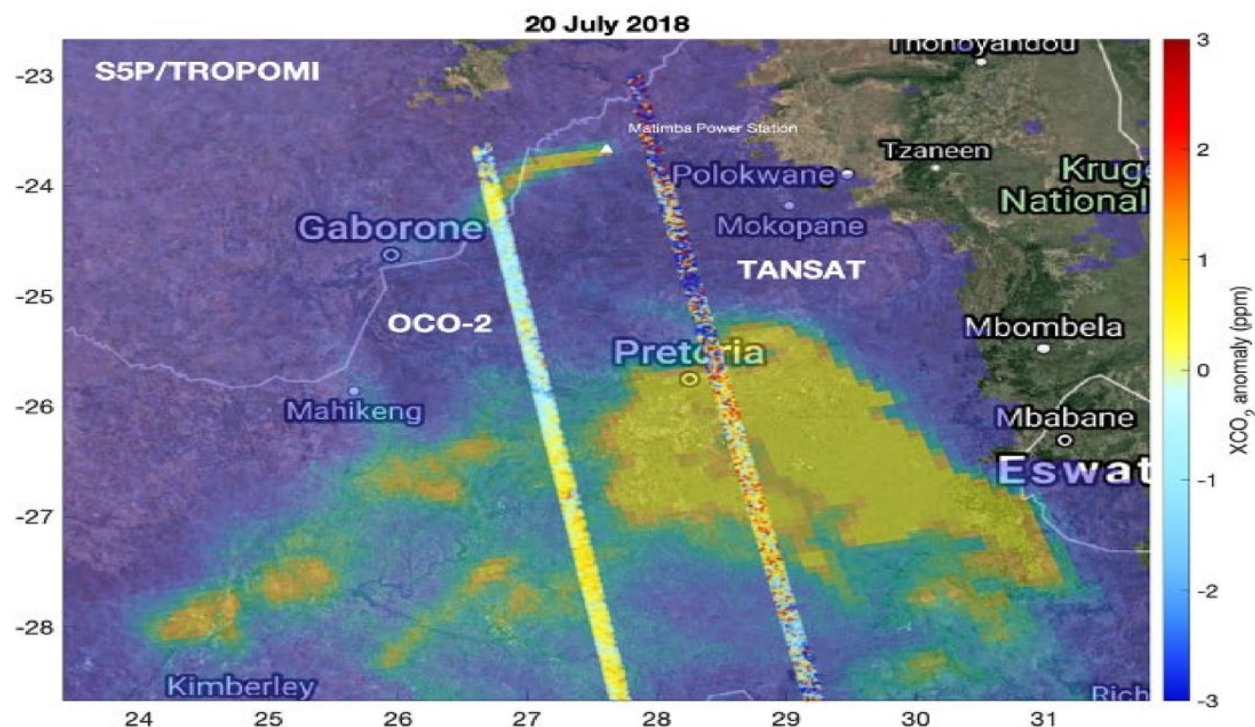


单个点源的烟羽扩散模拟



我国首颗碳卫星(Tanat)的技术突破

- 我国首颗碳卫星由科技部支持，中国科学院和中国气象局联合研制，2016年发射
- 在荷载技术和卫星平台、CO₂浓度观测与算法方面都获取了开拓性的成果





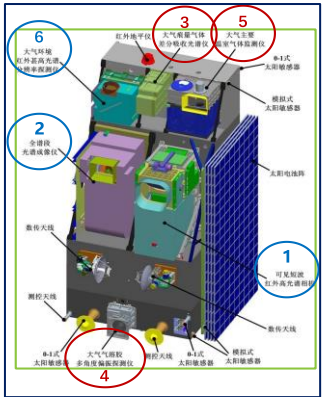
GF-5及GF5-02星温室气体空间外差干涉探测模式

高分五号（GF-5）卫星载荷

- 可见短波红外高光谱相机
- 全谱段光谱成像仪
- 痕量气体差分吸收光谱仪（EMI）
- 气溶胶多角度偏振探测仪（DPC）
- 温室气体监测仪（GMI）： CO_2 、 CH_4
- 大气环境红外甚高分辨率探测仪

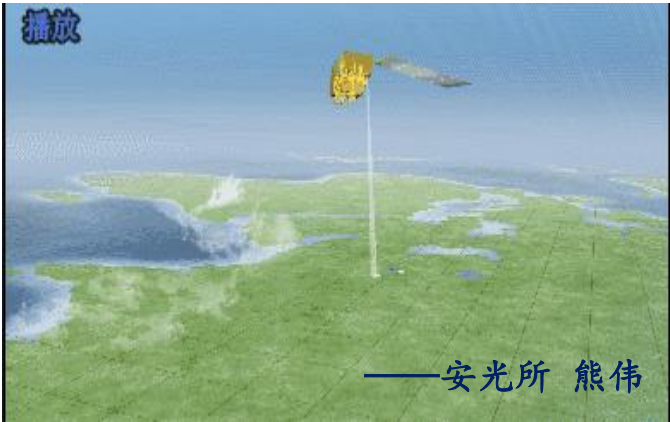
高分五号（GF-5/02）卫星载荷

- 3: 大气痕量气体差分吸收光谱仪(EMI-II)
- 4: 大气气溶胶多角度偏振探测仪(DPC-II)
- 5: 大气主要温室气体监测仪(GMI-II)
- 高精度偏振扫描仪(POSP)



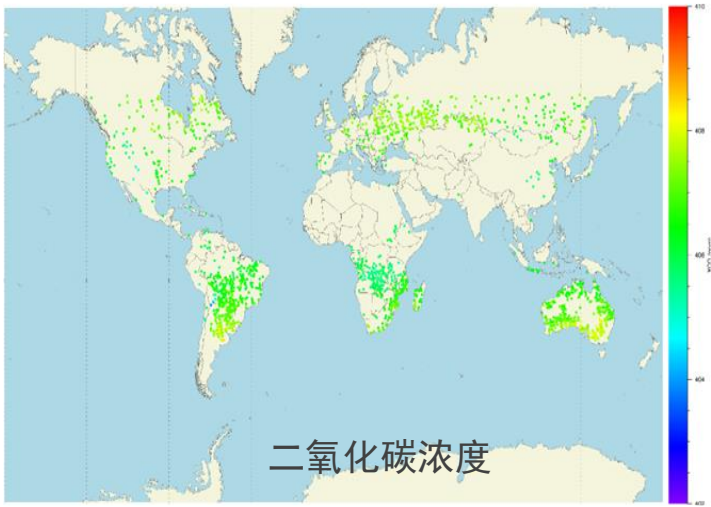
高分五号卫星于2018年5月9日发射、2021年9月7日发射高分02星

技术参数	GMI	TAN SO-FTS
轨道类型	太阳同步	太阳同步
观测模式	天底二维指向扫描	天底二维指向扫描
通道设置	O_2 : 0.759–0.769 μm CO_2 : 1.568–1.583 μm CH_4 : 1.642–1.658 μm CO_2 : 2.043–2.058 μm	O_2 : 0.758–0.775 μm CO_2/CH_4 : 1.563–1.724 μm CO_2 : 1.923–2.083 μm
光谱分辨率	0.6 cm^{-1} @ Band1 0.27 cm^{-1} @ Band2/3/4	0.2 cm^{-1}
信噪比	250–300	300
幅宽	788km	788km
空间分辨率	10.5km	10.5km



——安光所 熊伟

GMI载荷：温室气体

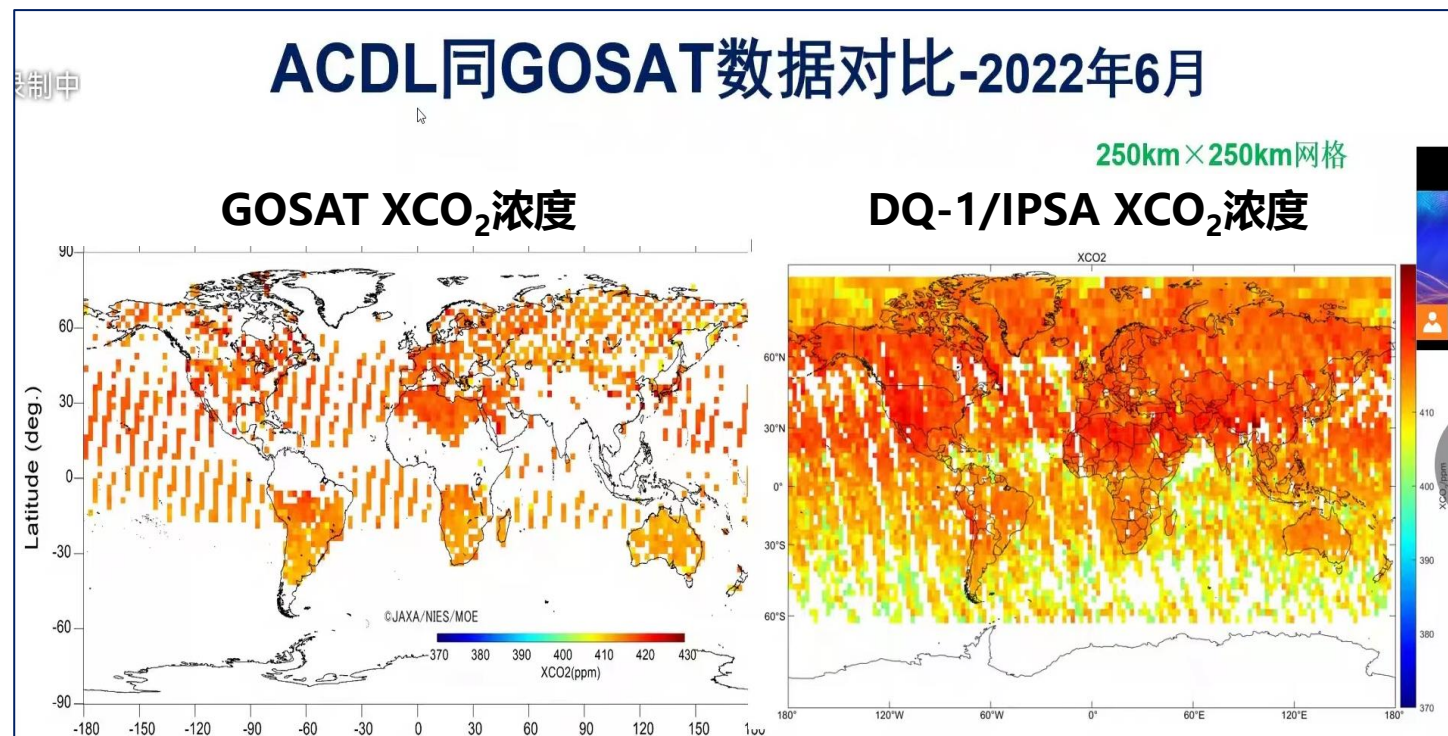
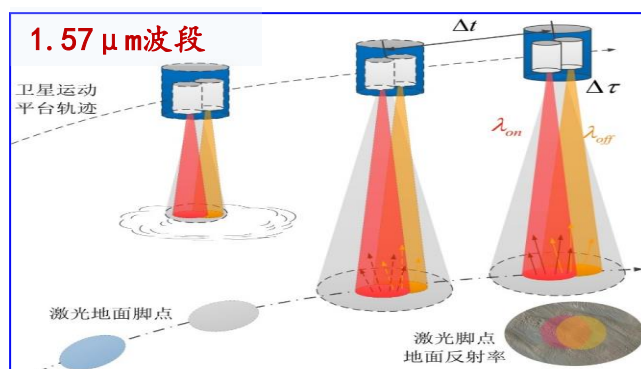
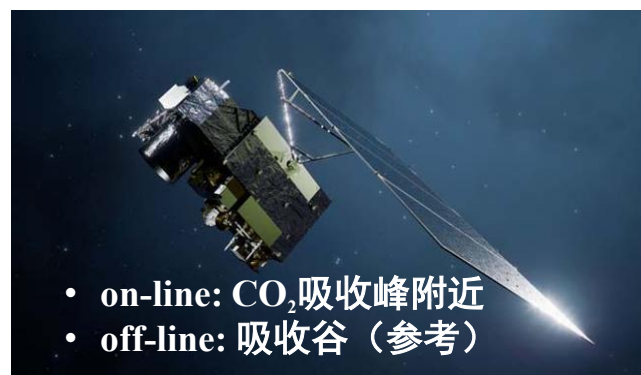


二氧化碳浓度



星载CO₂差分吸收激光雷达探测

□ 积分路径差分吸收激光雷达IPDA –Lidar(Integrated Path Differential Absorption Lidar), 采用多分辨率卡尔曼滤波 XCO₂反演方法, 精度可达到1PPM

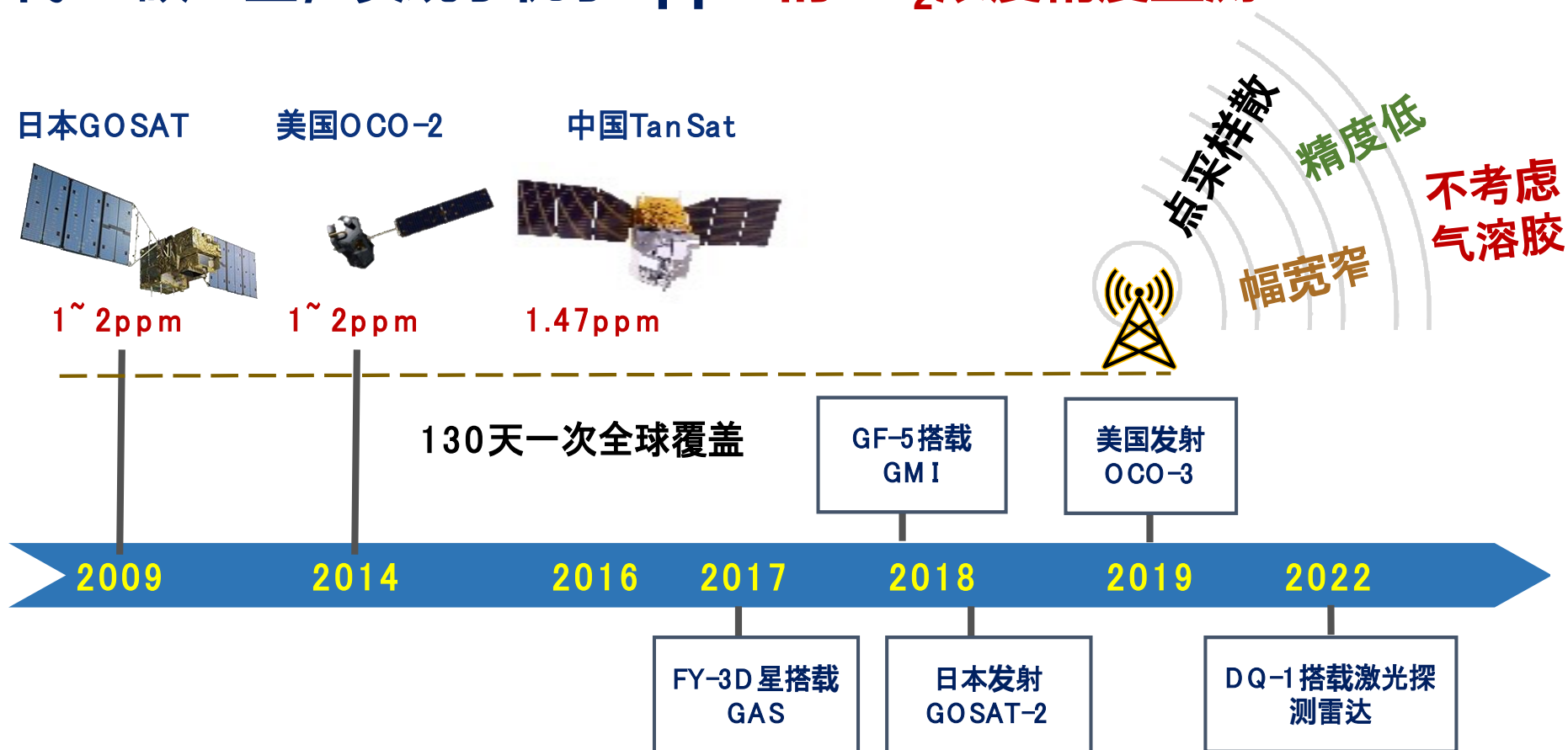


——图来自刘继桥PPT



第一代：验证了星载CO₂探测技术

- 经过近20年发展，以日本GOSAT、美国OCO及中国碳卫星为代表的“第一代”碳卫星，实现了优于2ppm的CO₂浓度精度监测

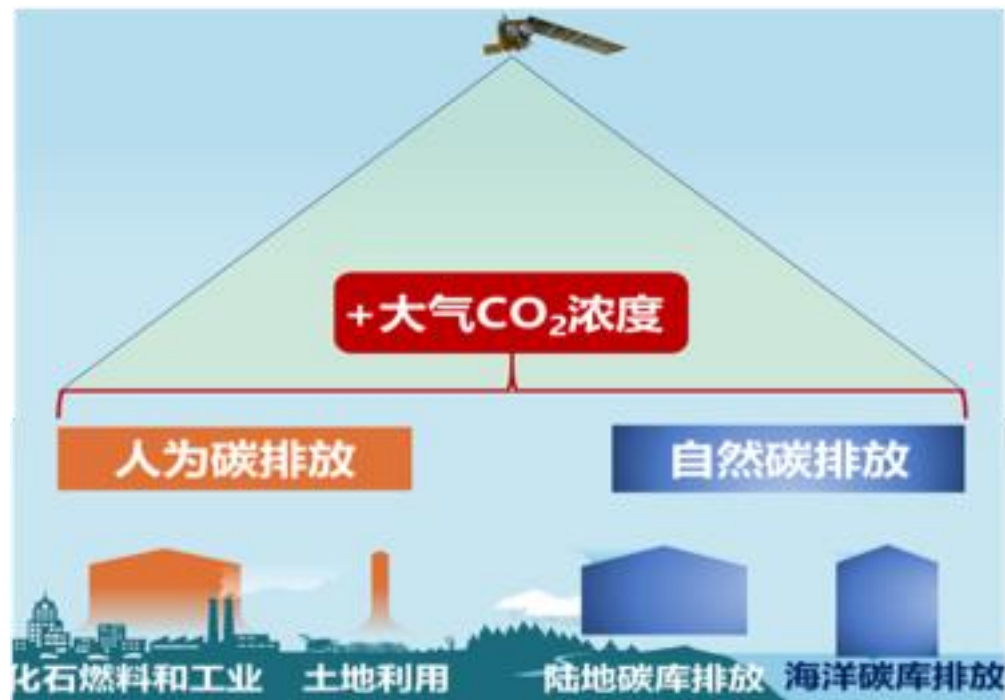




碳排放监测意义重大，自主申报清单数据缺乏客观性

- 《巴黎协定》明确：缔约国自主申报温室气体排放清单
- 全球碳盘点明确：建立监测和核查支持 (MVS) 能力
- “清单指南2019修订版”总则：利用温室气体浓度观测对传统清单进行“自上而下”校核

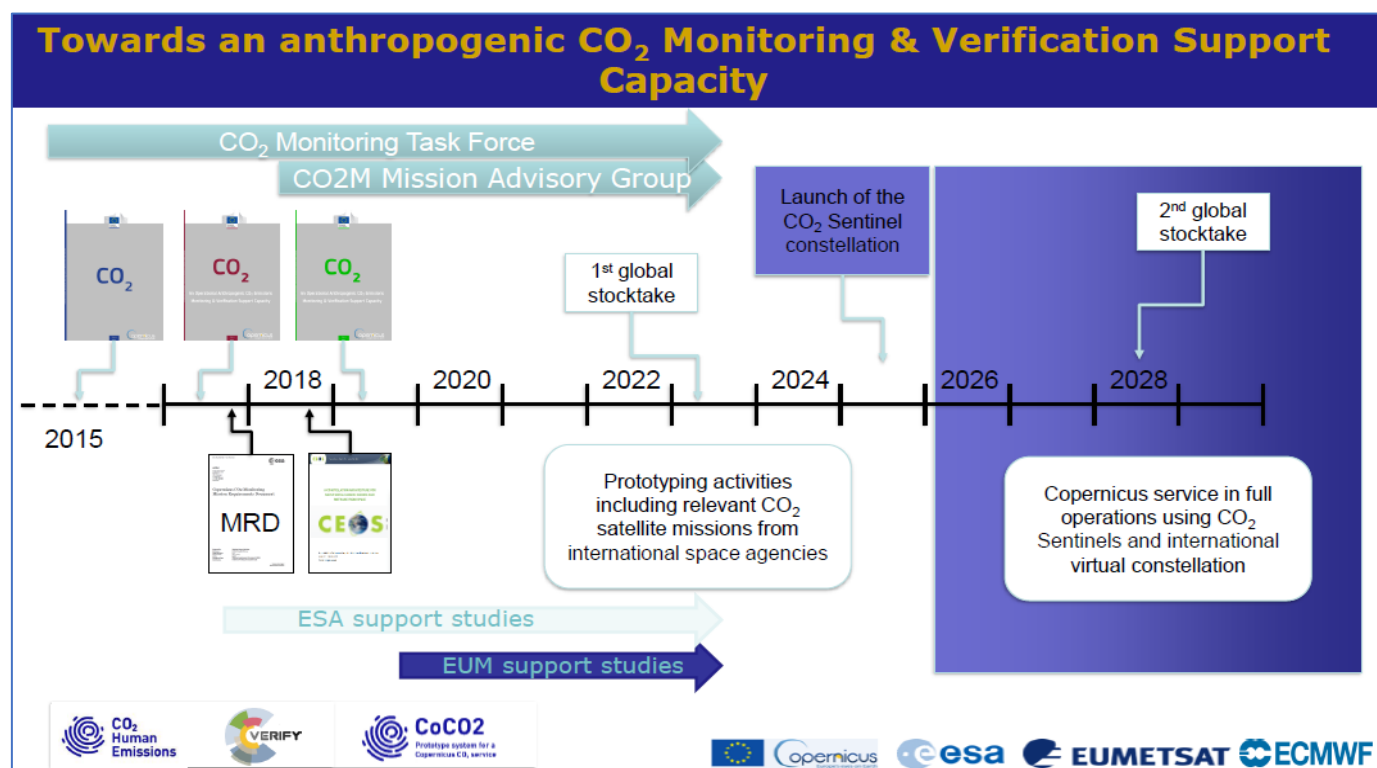
2015年COP21巴黎气候大会



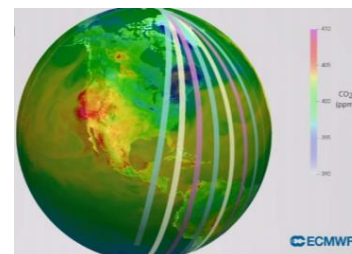


欧盟构建国别级碳清单核算卫星技术体系

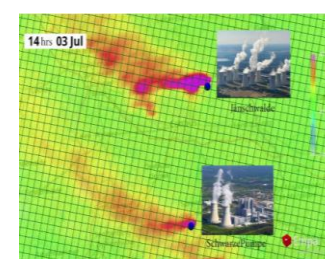
- 欧盟2018年设立了“CO₂M计划”：于2025年发射3颗碳卫星，和现有美国、日本和中国卫星形成虚拟星座，于2028年第2次全球碳盘点时开展业务化清单核算
- XCO₂探测技术指标：精度0.7ppm、像元分辨率 2km×2km



幅宽 > 250 km



适合点源探测



CO₂M Products:

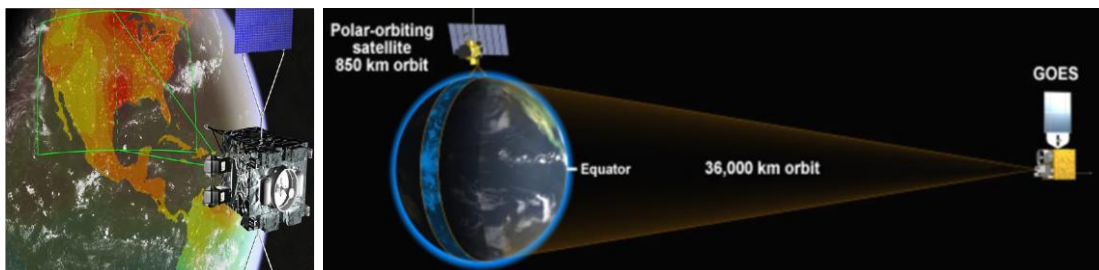
Product	Spatial resolution	Precision
CO ₂	4 km ²	0.7 ppm
CH ₄	4 km ²	10 ppb (est.)
NO ₂	4 km ²	1.5x10 ¹⁵ molec/cm ²
SIF	4 km ²	0.7 mW m ⁻² sr ⁻¹ nm ⁻¹
Aerosols	16 km ²	0.05 AOD, 500 m LH
Clouds	<5% of FOV	Water & cirrus clouds



美国和日本碳卫星关注人为排放

美国静止卫星+低轨卫星计划（2024年）

- 受地表和大气综合影响，观测频次要高
- 大气：天、周尺度影响生态系统，低频会因天气而错过生态系统转变
- 频次低：很难将浓度与人为排放关联，人为源和自然源规律不同
- 幅宽：3000km、空间分辨率：3km*6km、XCO₂精度：1.2ppm



美国静止轨道：GeoCarb 碳卫星

CarbonMapper 低轨



Total methane plumes

14300

Total CO₂ plumes

790

Total methane emissions

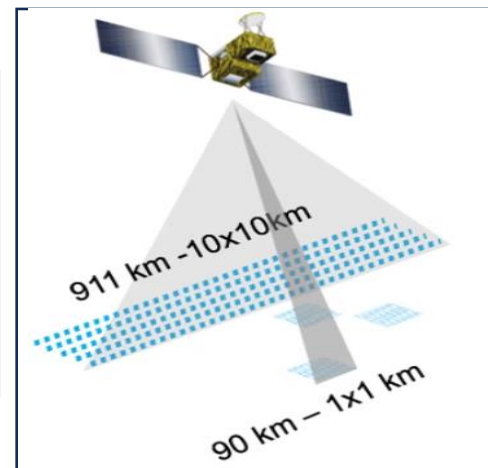
2.1M
kg CH₄/hr

<https://www.nasa.gov/feature/jpl/geocarb-a-new-view-of-carbon-over-the-americas>

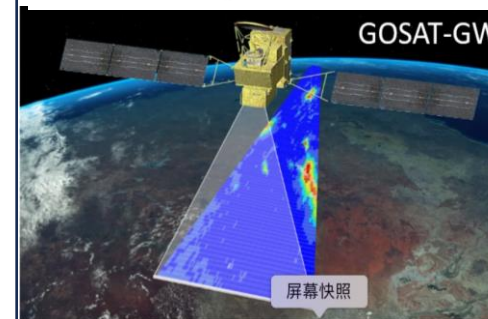
GOSAT-3 (GW) 日本卫星计划低轨CO₂监测

成像模式：傅立叶干涉模式 → 光栅成像模式

- 体制：改为光栅光谱仪
- 物种：CO₂、O₂、CH₄、NO₂
- 幅宽：911km/90km
- 空间分辨率：10km/1-3km



傅立叶干涉光谱仪



光栅光谱仪

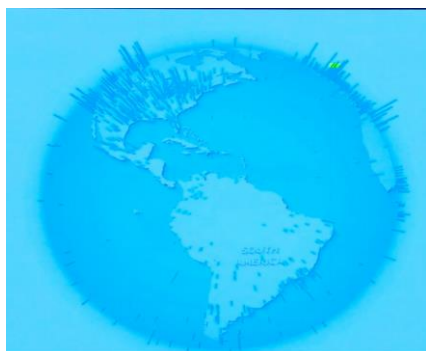
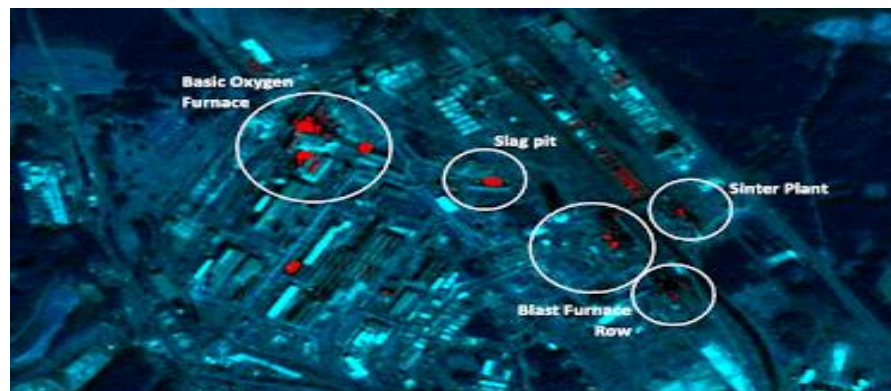


全球点源碳排放估算平台：高分辨率卫星+统计资料+AI

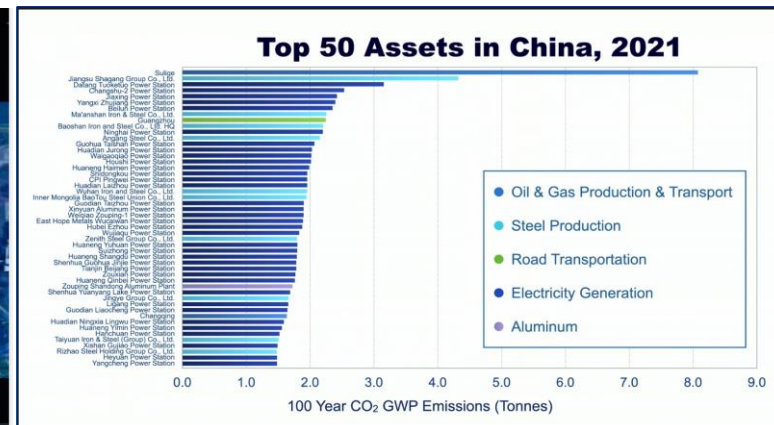
□ 2022年11月7日：COP27埃及气候大会美国研制了Climate Trace平台，监测全球碳排放

利用可见光、热红外卫星技术和AI技术、实现排放量估算
——高分辨率、热辐射、烟羽+统计资料+AI

COP27大会报告



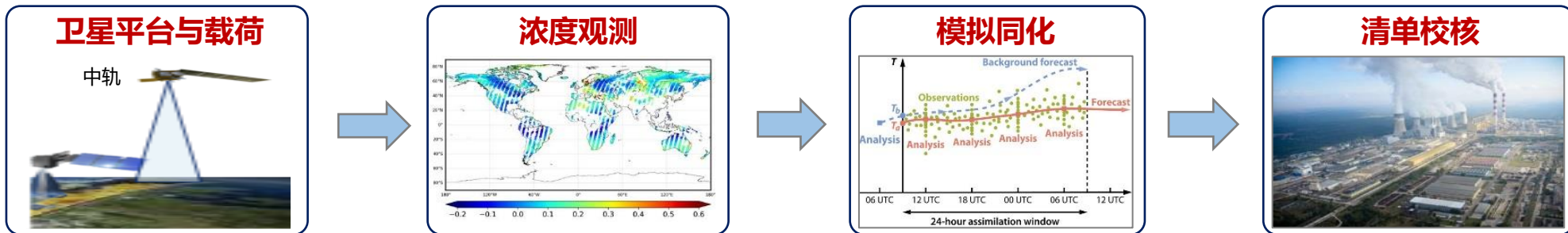
Climate Trace平台





我国下一代碳卫星需求分析

复杂系统工程：涉及卫星、载荷、卫星遥感、模式同化、排放清单等多领域

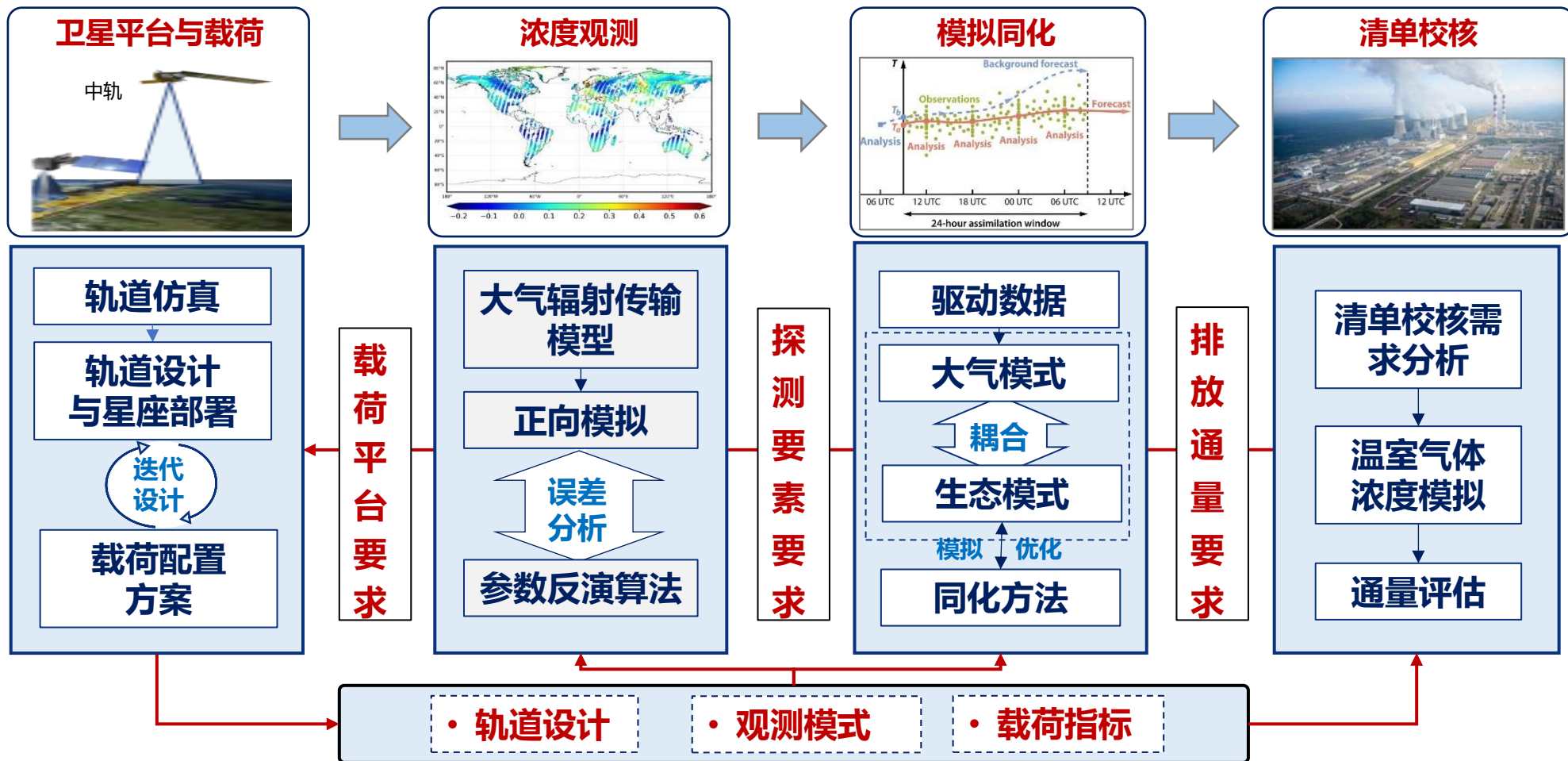


光谱范围、分辨率？ 光谱采样数？信噪比？	高精度反演 1%：4ppm, 1ppm、0.7ppm - 需要气溶胶（AOD<0.3）	1~3 ppm 419.3 ppm 2010-2019: 2.4 ppm/yr 2023 年：上升2.8ppm 微小增量 与噪声相当	年度CO ₂ 排放409亿吨 能源CO ₂ 排放374亿吨
观测模式 载荷配置	观测要素 - 人为排放示踪气体：NO₂/CO - 强化植被排放：SIF		人为源、自然源 难以区分
幅宽设计、轨道设计 月、周、日、小时？	观测频次 - 人为排放时间变化 - 自然源/汇~辐射、气温？	CO ₂ 扩散差异 CH ₄ 氧化能力 日变化	源/汇 时变特性强
空间分辨率？ 2km、1km、0.5km？	源强观测 - 主要排放点源 - NO₂排放对点源辅助识别	2km×2km 9km×9km	点源、城市源 分布复杂



观测系统模拟试验 (OSSE) 平台

“观测-模拟-反演-同化”全链路数值仿真

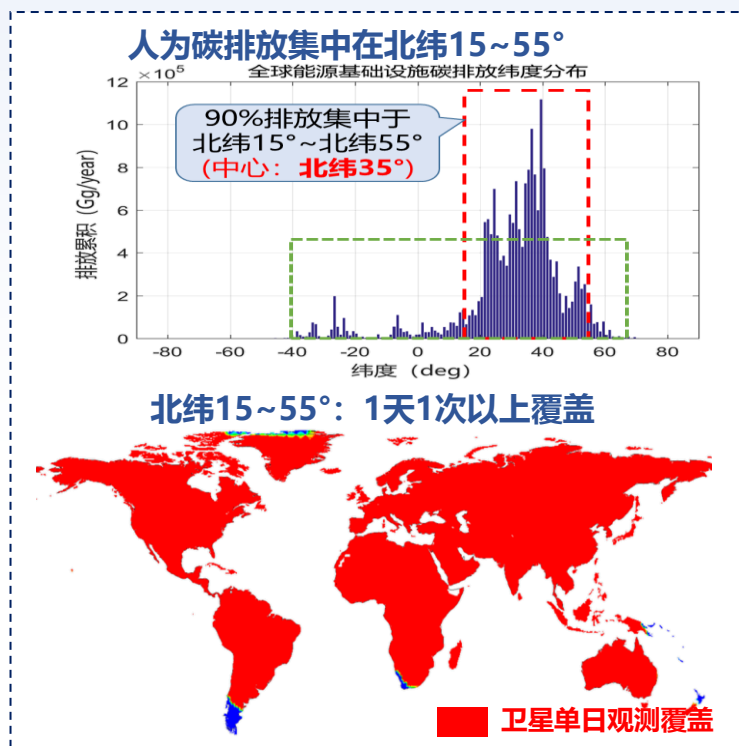




载荷与平台指标：中轨椭圆冻结太阳同步轨道

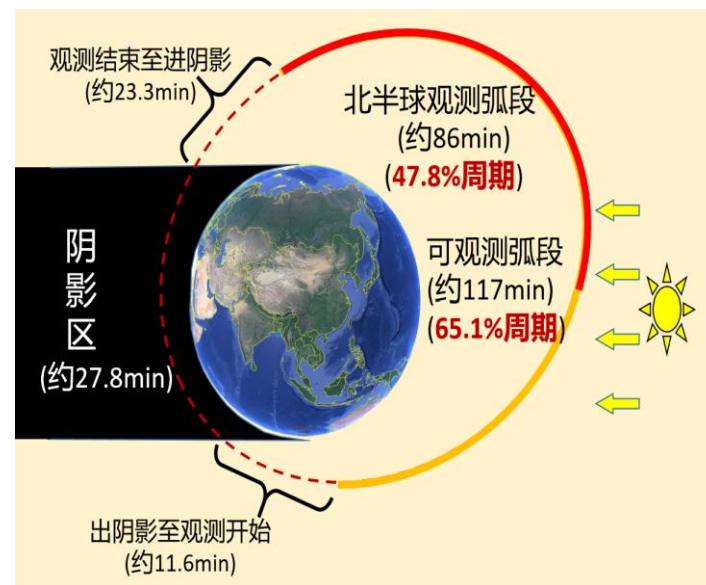
中轨椭圆轨道保证北半球长时间驻留，观测时长比例提升**1倍**

- **保证北半球长时间驻留**：90%的人为碳排放集中在北纬15~55°，提出了天回归中低轨椭圆冻结太阳同步轨道
- **提升单星重点城市观测频次**：除南北极全球陆地1天1次覆盖，区域/热点1天1.85次，与CO2M相比频次提升10倍



观测需求

观测效能



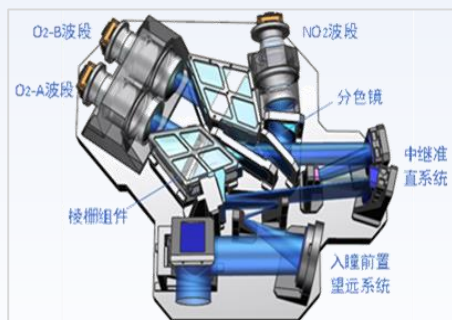
中低轨椭圆冻结太阳同步轨道

轨道参数&特性	值
近地点高度	522km
远地点高度	7840km
轨道倾角	116.565°
远地点所处纬度	北纬35°
回归周期	1天
观测区域分辨率变化	0.87km
幅宽需求	2900km
观测天顶角	小于30°

轨道参数指标

我国下一代碳卫星总体方案

多要素、高时效、多尺度、高精度的下一代碳卫星总体方案

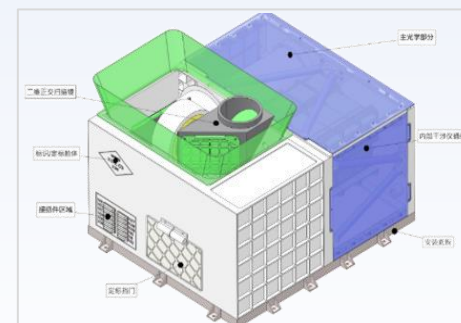


超大幅宽污碳协同监测仪

幅宽：2900km
分辨率：2km
监测要素：CO₂、CH₄、NO₂、SIF

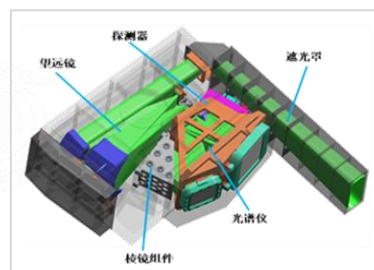
高分辨热点温室气体排放综合监测仪

幅宽：50km
分辨率：0.5km
监测要素：CO₂、CH₄、NO₂



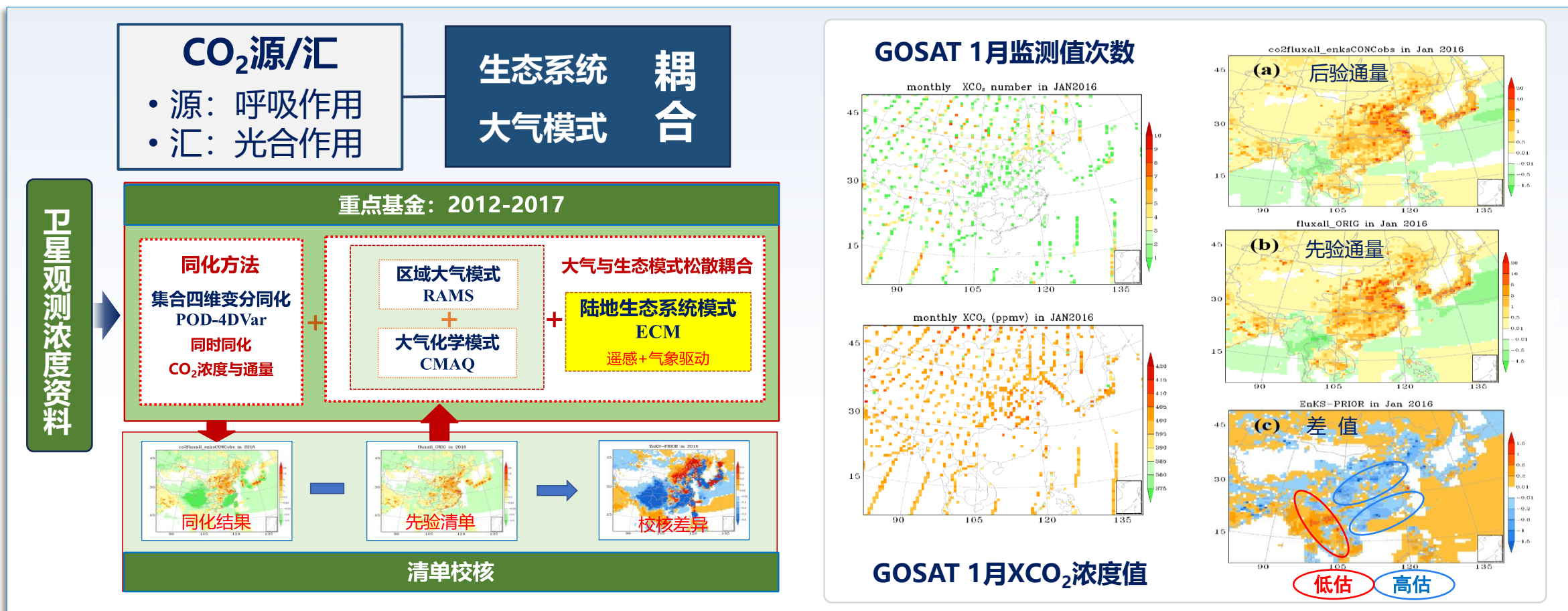
云与气溶胶监测仪

幅宽：3000km
分辨率：2km
监测要素：云、气溶胶（AOD、粒子谱、SSA、散射相函数）



2012-2017年重点基金项目的碳同化系统

区域尺度：基于卫星观测浓度的CO₂通量反演评估



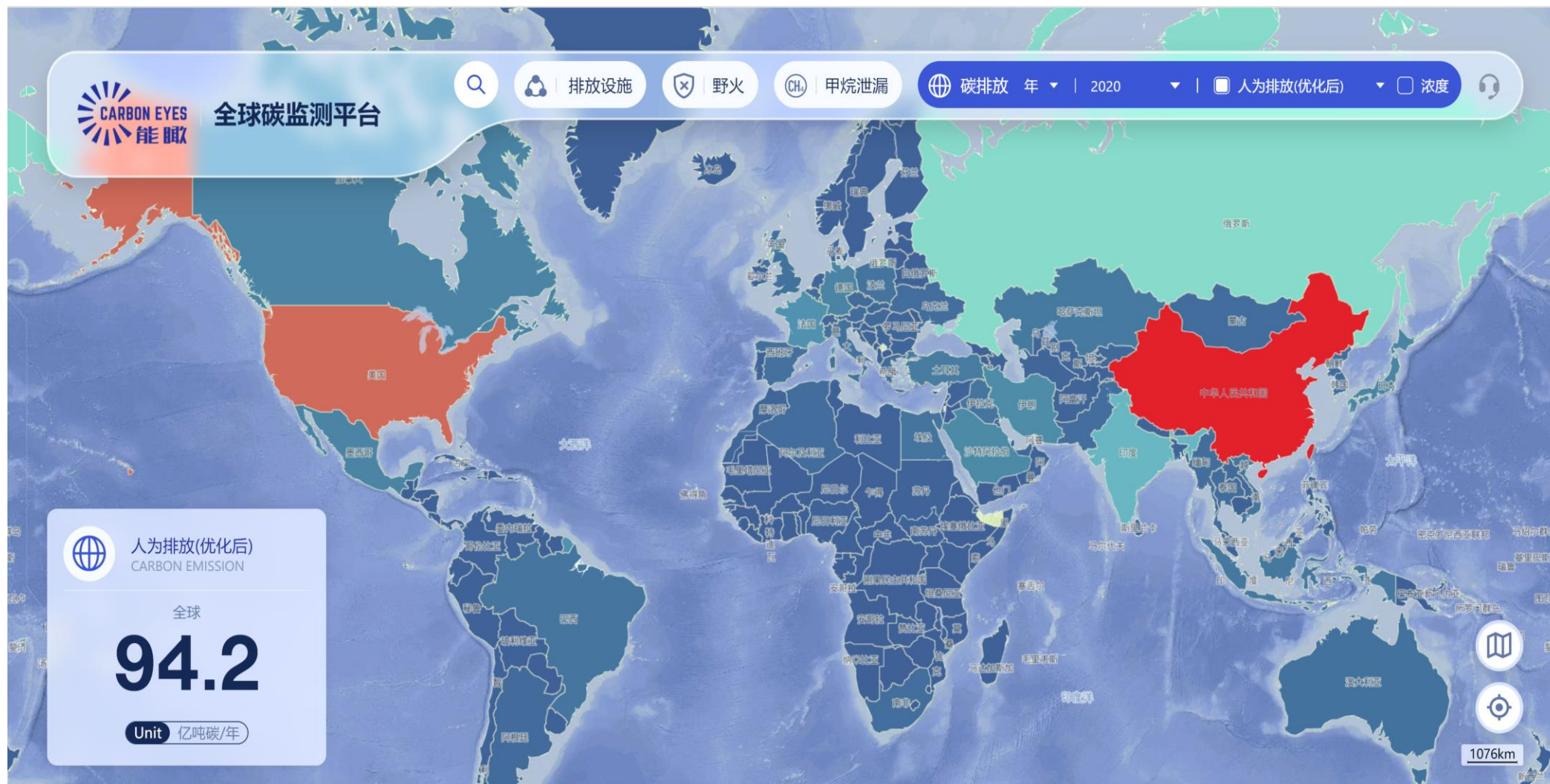


碳源汇监管平台





2020年全球国别尺度人为碳排放校核平台





全球甲烷承诺 Global Methane Pledge

□ **2021:** COP26 会上发布全球甲烷承诺

□ **目标:** 到2030年, 减至少30%2020年,
至2050年温升减少 0.2°C以上

□ **2023 :** 150多个国家签署承诺



化石燃料开采、储运、废气燃除过程排放了大量甲烷



PUBLICATION

Global Methane Pledge

PUBLISHED: 22 Nov 2023



Recognizing that, in order to ensure that the global community meets the Paris Agreement goal of keeping warming well below 2 degrees C, while pursuing efforts to limit warming to 1.5 degrees C, significant methane emission reductions must be achieved globally by 2030;

Recognizing that the short atmospheric lifetime of methane means that taking action now can rapidly reduce the rate of global warming and that readily available cost-effective methane emission measures have the potential to avoid over 0.2 degrees C of warming by 2050 while yielding important co-benefits, including improving public health and agricultural productivity;

Recognizing that methane accounts for 17 percent of global greenhouse gas emissions from human activities, principally from the energy, agriculture, and waste sectors, and that the energy sector has the greatest potential for targeted mitigation by 2030;

Recognizing that the mitigation potential in different sectors varies between countries and regions, and that a majority of available targeted measures have low or negative cost;

Recognizing that, to keep 1.5 degrees C within reach, methane emission reductions must complement and supplement, not replace global action to reduce carbon dioxide emissions, including from the combustion of fossil fuels (coal, oil and natural gas), industrial processes, and the lands sector;

Recognizing that improvements to the transparency, accuracy, completeness, comparability, and consistency of methane emissions data assessed and validated in accordance with United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) and Paris Agreement standards and Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) good practice can promote more ambitious and credible action;

Recognizing that, while there are multiple useful international initiatives that address methane, there is a need for high-level political engagement in order to catalyze global methane action.

The Participants in the Global Methane Pledge:

Commit to work together in order to collectively reduce global anthropogenic methane emissions across all sectors by at least 30 percent below 2020 levels by 2030.

Commit to take comprehensive domestic actions to achieve that target, focusing on standards to achieve all feasible reductions in the energy and waste sectors and seeking abatement of agricultural emissions through technology innovation as well as incentives and partnerships with farmers.

Commit to moving towards using the highest tier IPCC good practice inventory methodologies, consistent with IPCC guidance, with particular focus on high emission sources, in order to quantify methane emissions; as well as working individually and cooperatively to continuously improve the accuracy, transparency, consistency, comparability, and completeness of national greenhouse gas inventory reporting under the UNFCCC and Paris Agreement, and to provide greater transparency in key sectors.

Commit to maintaining up-to-date, transparent, and publicly available information on our policies and commitments.

Commit to support existing international methane emission reduction initiatives, such as those of the Climate and Clean Air Coalition, the Global Methane Initiative, and the relevant work of the United Nations Environment Programme, including the International Methane Emissions Observatory, to advance technical and policy work that will serve to underpin Participants' domestic actions.

Welcome and encourage announcements of further parallel specific domestic actions by Participants and commitments taken by the private sector, development banks, financial institutions and philanthropy to support global methane abatement.

Resolve to review progress towards the target of the Global Methane Pledge on an annual basis until 2030 by means of a dedicated ministerial meeting.

Call on other states to join the Global Methane Pledge.



国内外已具备甲烷监测能力卫星简表

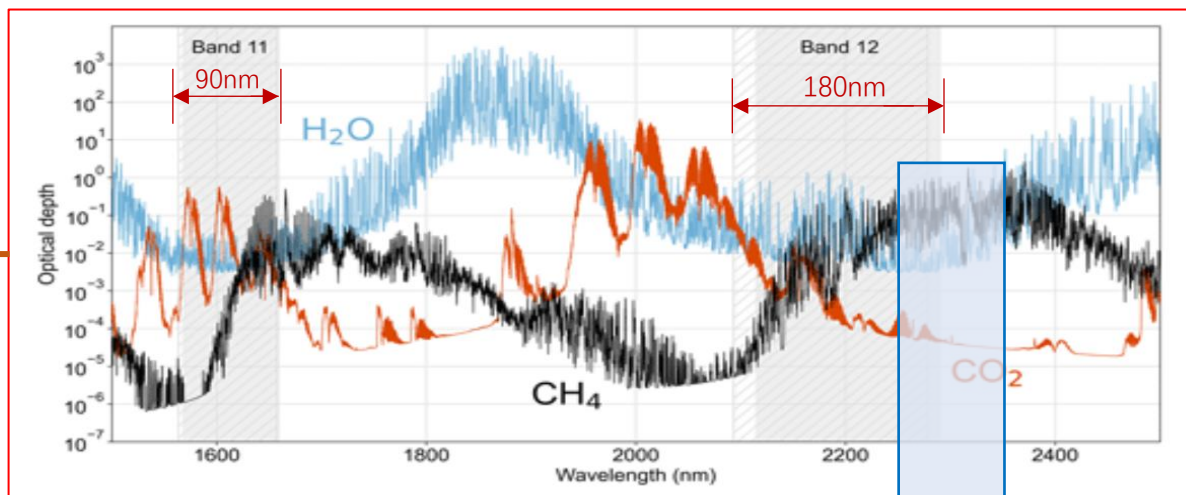
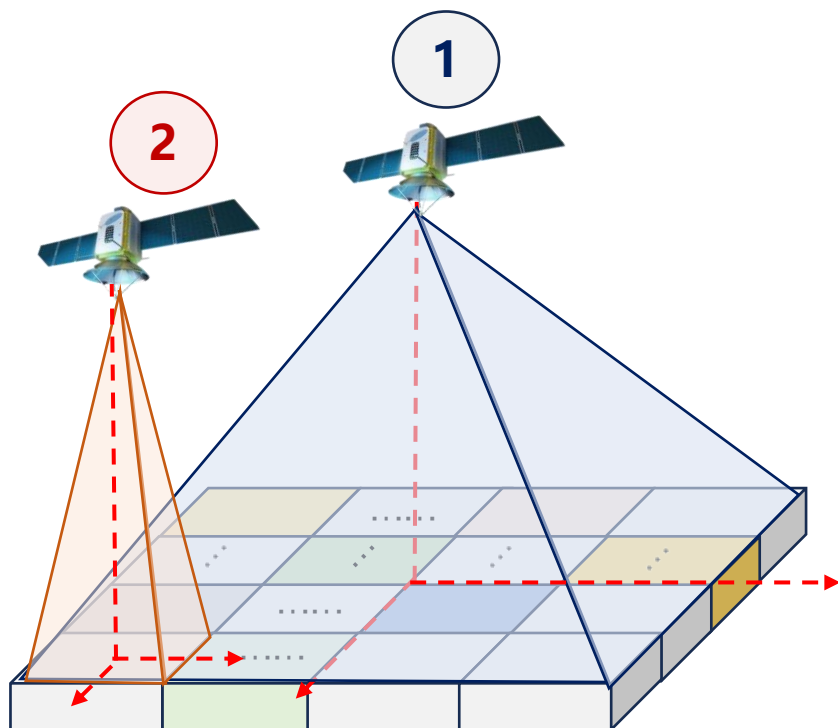
中国4颗在轨甲烷超级排放监测卫星（30m）

	卫星/传感器	CH ₄	CO ₂	空间分辨率	幅宽	2009	...	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
	GOSAT/TANSOFTS	•	•	10.5km	160km															
	Sentinel5P/ TROPOMI	•		7km	2600km															
	GOSAT-2/ TANSO-FTS-2	•	•	9.7km	160km															
	WorldView-3/ WV110Camera	•		3.72m	13.1km															
	Sentinel-2A(B)/MSI	•	•	30m	290km															
	GHGSat-D/WAF-P	•	•	50m	15km															
	PRISMA/HYC	•	•	30m	30km															
	GHGSat-C1(2)/ WAF-P	•	•	25m	15km															
	EnMAP/DLR	•	•	30m	30km															
	EMIT	•	•	60m	75km															
	风云-3D/GAS	•	•	10km	2250km															
	高分五号/GMI	•	•	10.3km	1850km															
	高分五号/AHSI	•	•	30m	60km															
	资源一号-02D/AHSI	•	•	30m	60km															
	环境二号-A(B)/WFV	•	•	16m	800km															
	高分五号-02/AHSI	•	•	30m	60km															
	资源一号-02E/AHSI	•	•	30m	60km															
	高分五号-01A/AHSI	•	•	30m	60km															

用于甲烷设施级排放源监测

- 卫星：4颗、AHSI x 4
- 幅宽：60x4 = 240 km
- 空间分辨率：30m
- 重返周期：10天

甲烷的两种观测模式



2 甲烷超级排放源检测

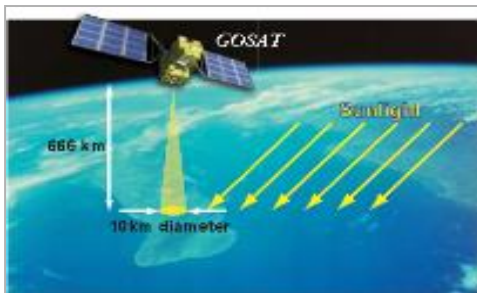
- 中心波长：1610nm、2190nm
- 光谱分辨率：Band11：90nm
- 光谱分辨率：Band12：180nm
- 空间分辨率：20m

1 甲烷浓度高精度观测

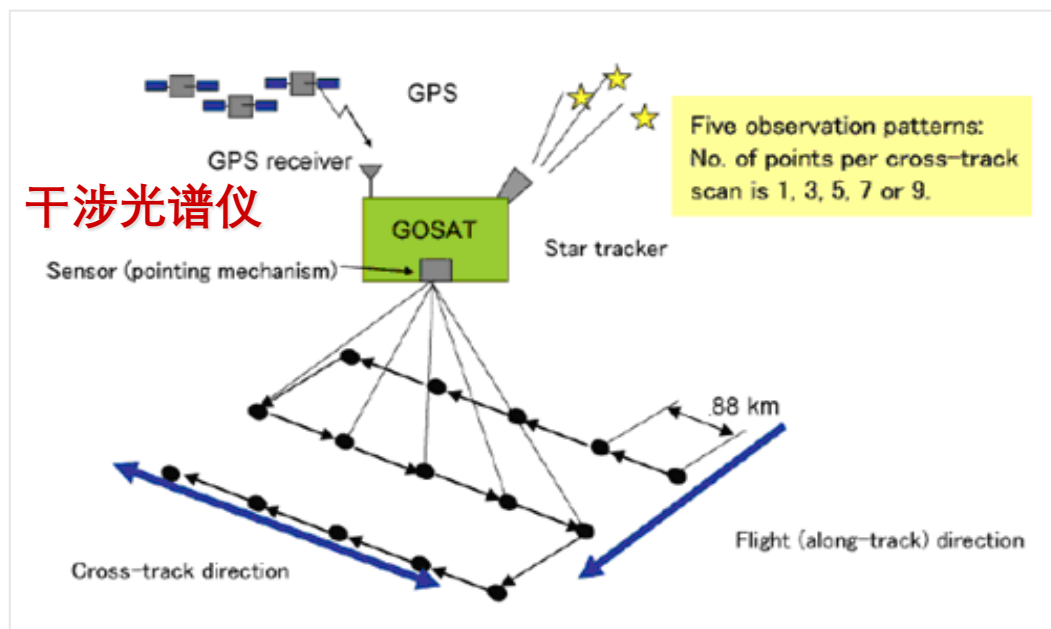
- 短波红外：2305-2385nm
- 光谱分辨率：0.5nm
- 空间分辨率：7 km×3.5 km

① 浓度高精度观测:日本GOSAT-1卫星干涉探测及探测结果

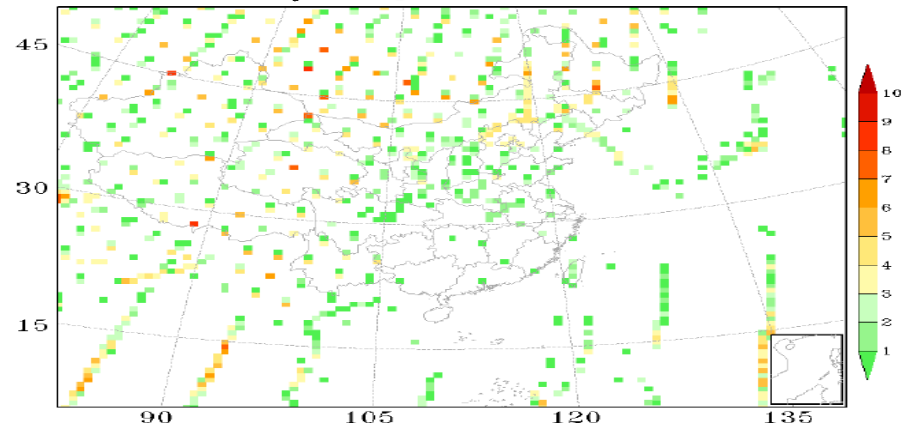
日本Tanso-FTS



干涉光谱仪

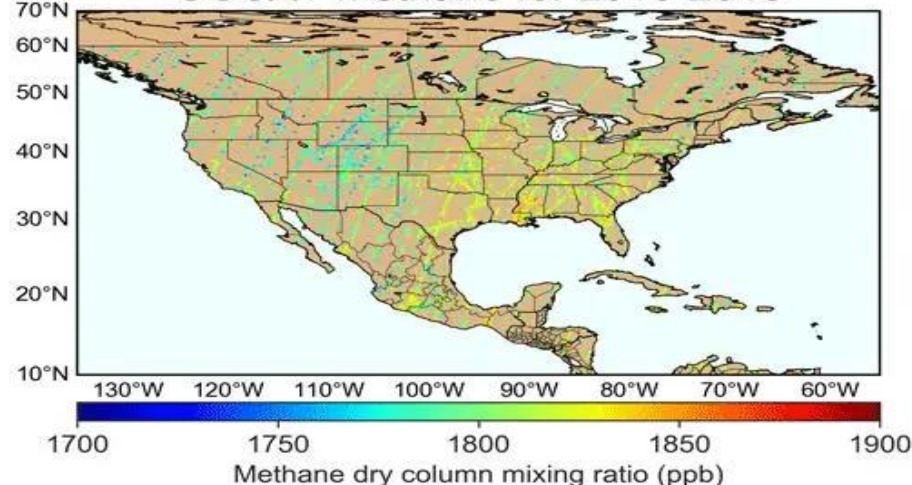


monthly XCO₂ number in JAN2016



2016年GOSAT 1月监测值次数

GOSAT Methane for 2010-2015



① 浓度高精度观测: TROPOMI的甲烷探测

ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS

LETTER

Investigating high methane emissions from urban areas detected by TROPOMI and their association with untreated wastewater

Benjamin de Foy^{1,*}, James J Schauer^{2,3}, Alba Lorente⁴ and Tobias Borsdorff¹

¹ Department of Earth and Atmospheric Sciences, Saint Louis University, St. Louis, MO, United States of America

² University of Wisconsin—Madison, Environmental Chemistry and Technology Program, Madison, WI, United States of America

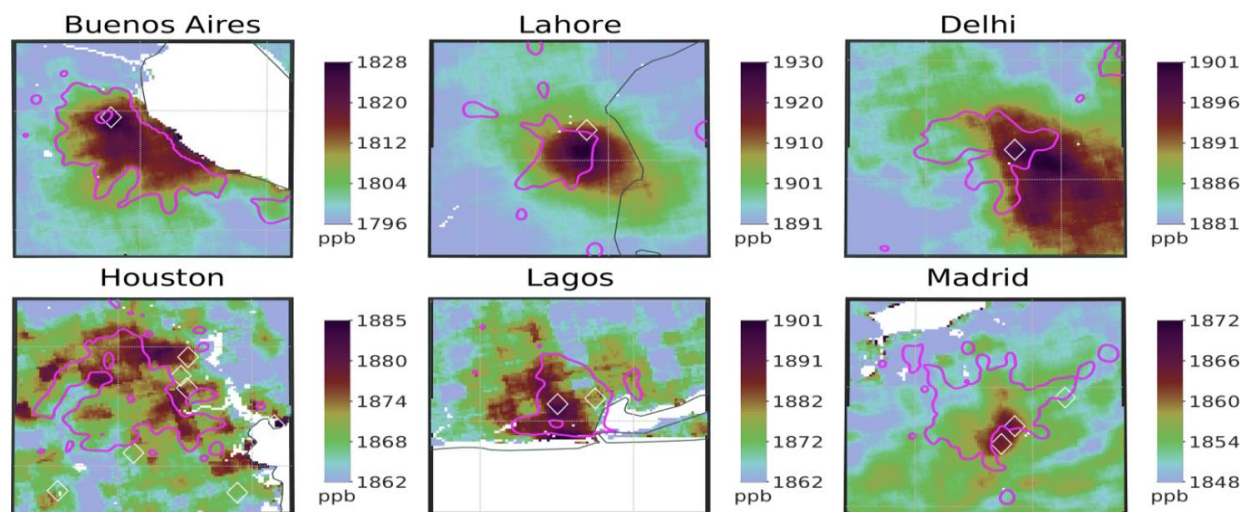


Figure 1. TROPOMI XCH₄ enhancements over selected urban areas ranging from a focused hotspot over Buenos Aires (900 ktpy) to Madrid (215 ktpy). White diamonds show major landfills. Outline of areas with high population density in magenta, national borders in gray. All domains are 100 km by 100 km. Colormaps range from 10% to 99.9% level. TROPOMI retrievals filtered using the global surface water dataset option 1 described in the supplementary materials.

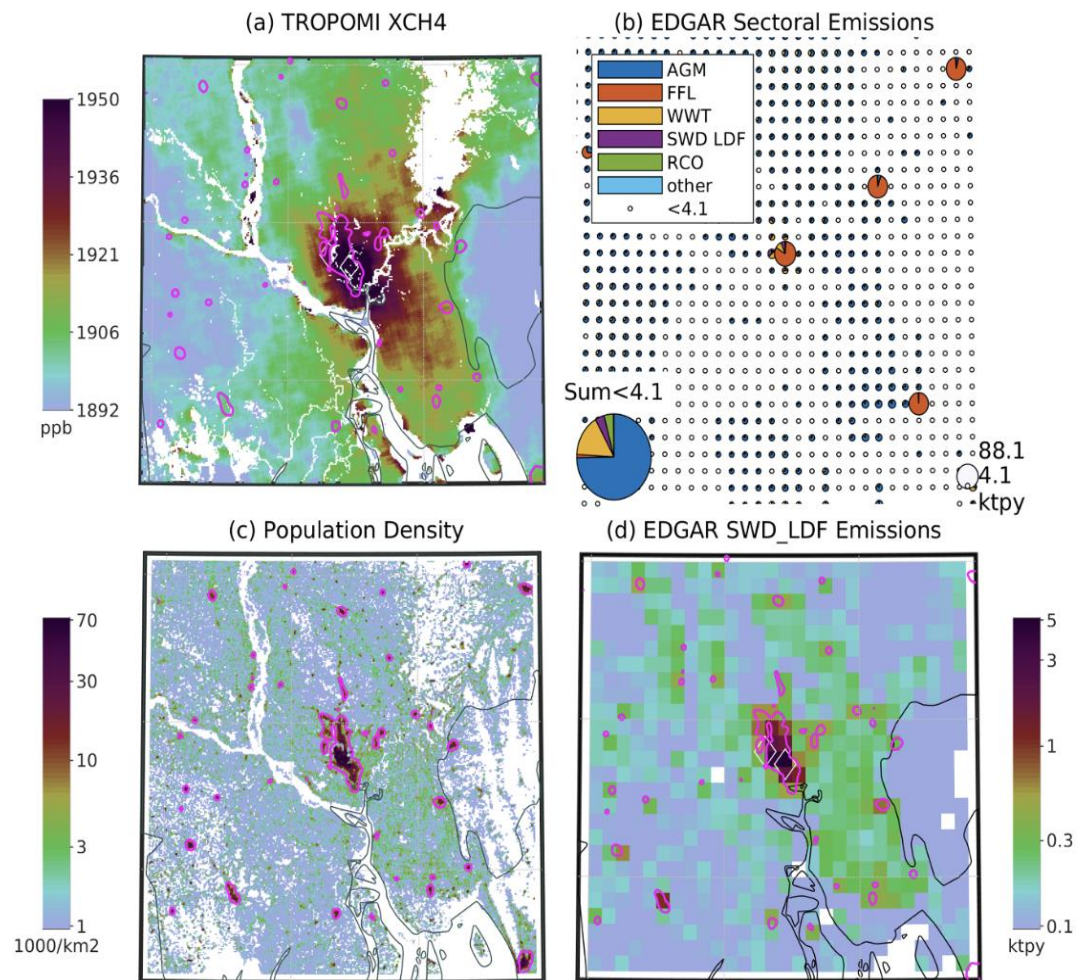
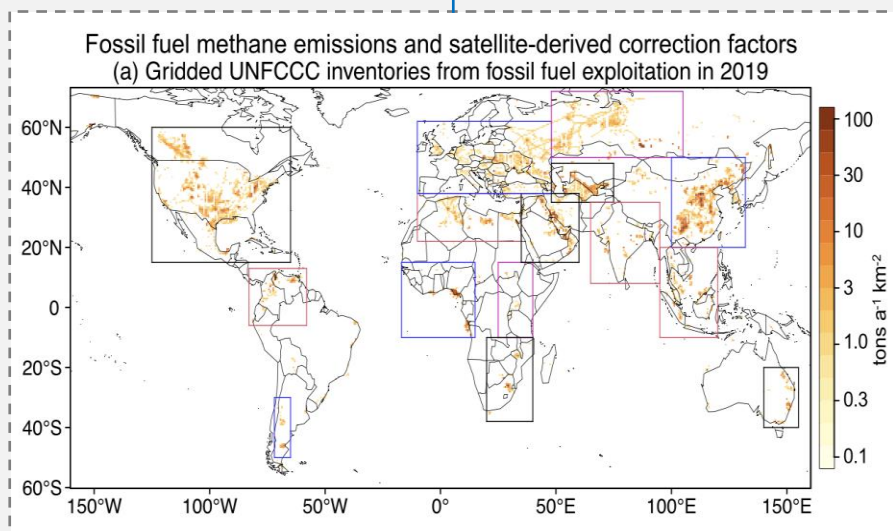
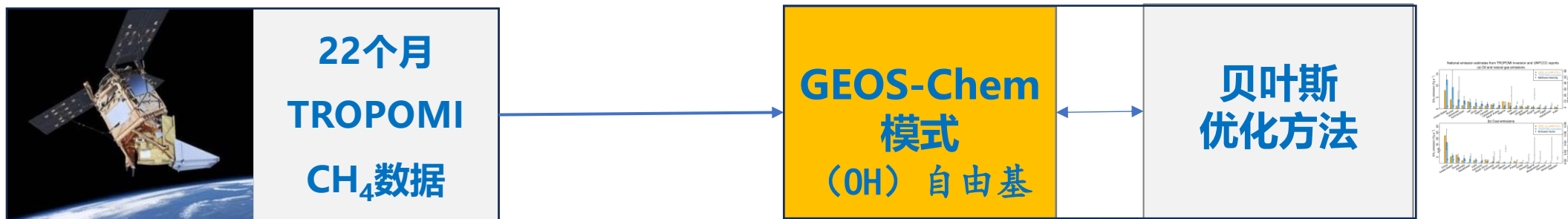


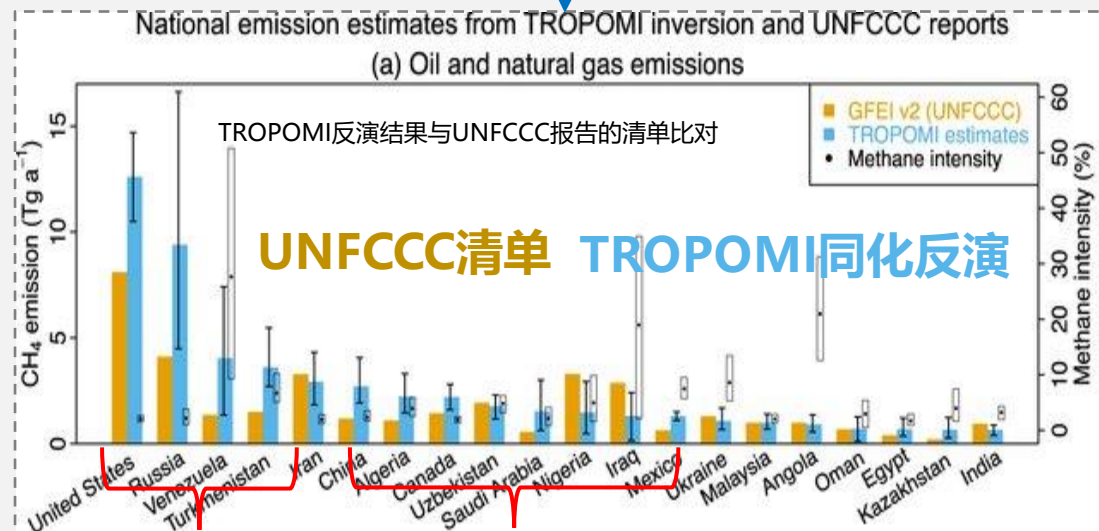
Figure 4. (a) Urban enhancement of TROPOMI XCH₄ over Dhaka screened by water mask option 1; (b) sectoral EDGAR emissions: agricultural (AGM), fossil fuels (FFL), wastewater (WWT), solid waste (SWD_LDF), residential (RCO) and other (the large pie on the lower left shows the total emissions from the grid points with emissions below the 50% level of 4.1 ktpy); (c) population density; (d) EDGAR solid waste and landfill emissions. Outline of areas with high population density shown in magenta. Dhaka's 2 main landfills shown as white diamonds. National borders shown in gray. Domain is 300 km by 300 km.



① 浓度高精度观测:全球尺度甲烷清单校核



全球共分为15个重点区域



>30%

>5%

油气甲烷实际排放比申报量多排

——Shen L. et al., Nat. Commun, 2023

② 甲烷超级排放源检测：哨兵2号卫星监测甲烷点源



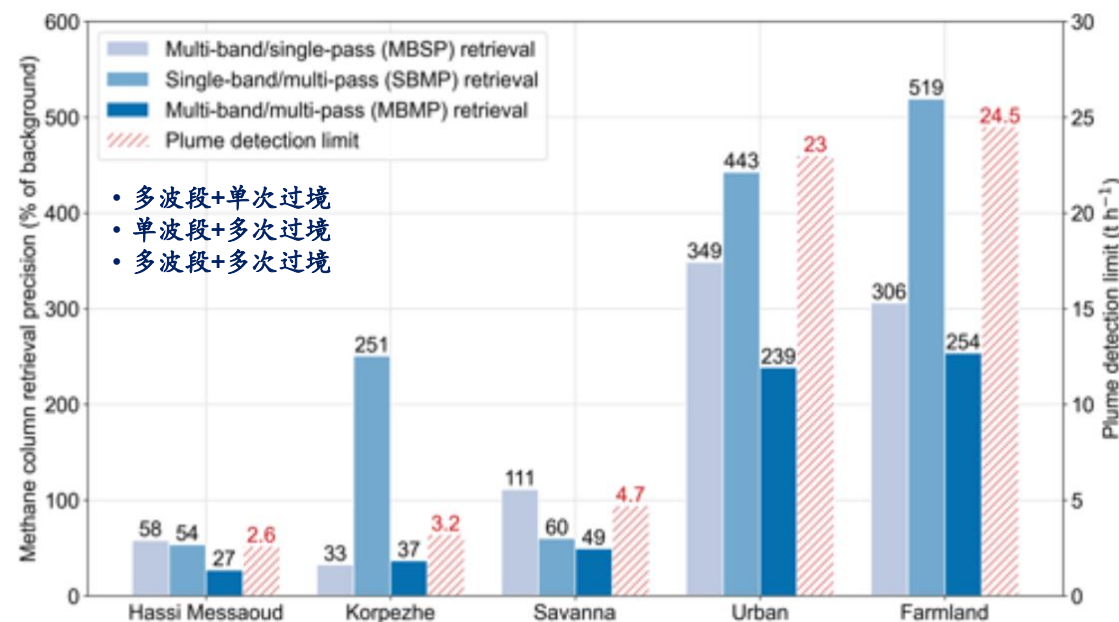
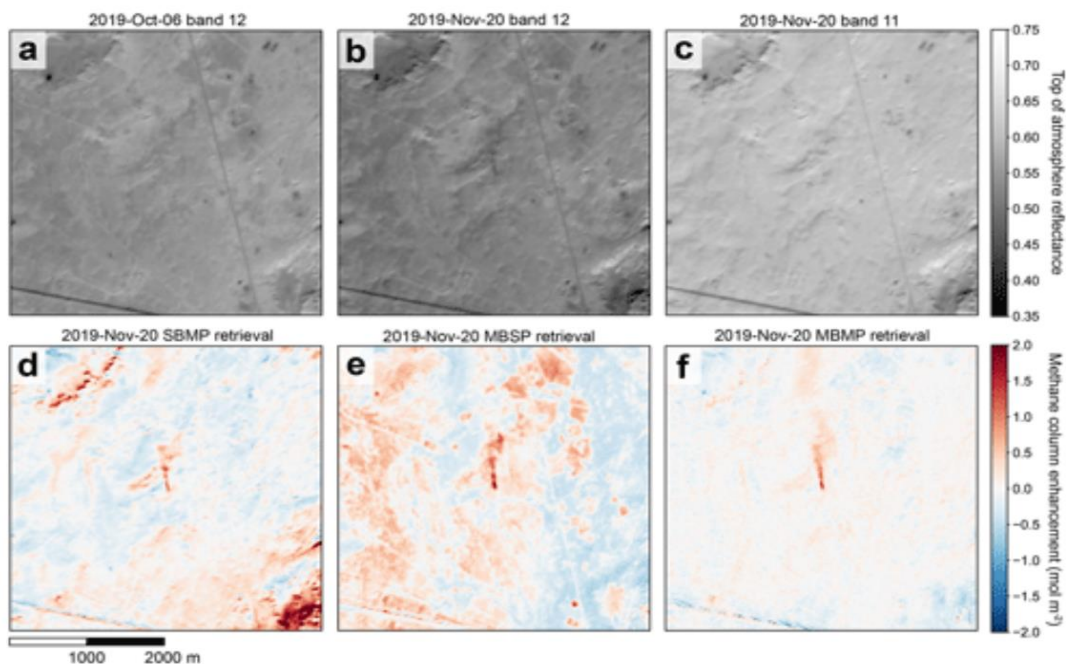
$$\Delta R_{\text{SBMP}} = \frac{cR_{12} - R'_{12}}{R'_{12}}$$

$$m_{\text{SBMP}}(\Delta\Omega) = \frac{T_{12}(\Omega + \Delta\Omega) - T_{12}(\Omega)}{T_{12}(\Omega)}$$



High-frequency monitoring of anomalous methane point sources with multispectral Sentinel-2 satellite observations

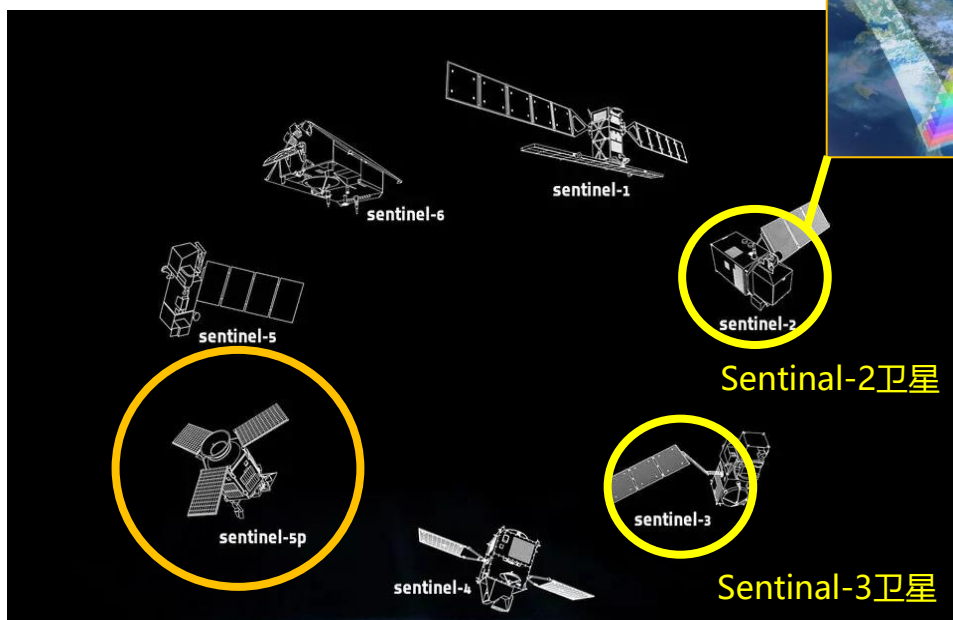
Daniel J. Varon^{1,2}, Dylan Jervis², Jason McKeever², Ian Spence², David Gains², and Daniel J. Jacob¹
¹School of Engineering and Applied Science, Harvard University, Cambridge, 02138, USA
²GHGSat, Inc., Montréal, H2W 1Y5, Canada





②

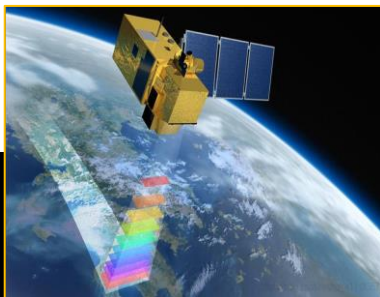
甲烷超级排放源检测：哨兵-5/2/3卫星甲烷异常探测



Sentinal-5P卫星

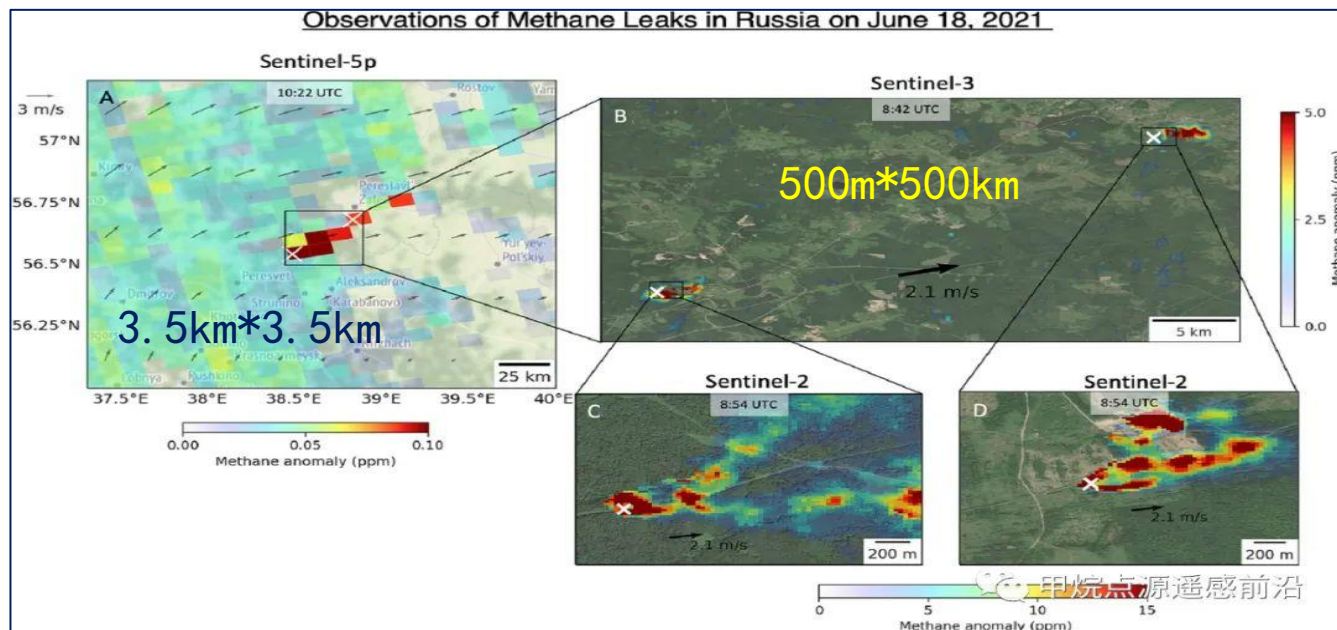
3.5km * 3.5km

发射时间 ⁴⁾	Sentinel-3A于2016年2月16日发射升空 ⁴⁾ Sentinel-3B于2018年4月25日发射升空 ⁴⁾
运行轨道 ⁴⁾	极地，与太阳同步，高度815 km ⁴⁾
重访时间 ⁴⁾	SLSTR 大约1天，OLCI 大约2天，SRAL在27天后有47 km的地面轨道间隔 ⁴⁾
设计寿命 ⁴⁾	最少7年 ⁴⁾
卫星尺寸 ⁴⁾	长2.2m，宽2.2m，高3.7 m ⁴⁾
卫星质量 ⁴⁾	1150 千克 (包括130 千克燃料) ⁴⁾
	海洋和陆地颜色仪器(OLCI): ⁴⁾ 覆盖21个光谱带(400-102 nm)，条带宽度1270km，空间分辨率300m。 ⁴⁾



□Sentinal-2: 幅宽290km*2、空间分辨率20m、两星每5天覆盖全球

□Sentinal-3: SLSTR载荷幅宽1420km*2、空间分辨率500、每天覆盖全球



甲烷点源遥感前沿



② 甲烷超级排放源检测：加拿大GHGSAT星座

- **系列卫星：** GHGSat-C1 (2020.9) 、 GHGSat-C2 (2021.1) 、 GHGSat-C3 ~ C5 (2022.5) 、 GHGSat-C6 ~ C8 (2023.4) 、 GHGSat-C9 ~ C11 (2024.11) 、 GHGSat-C12 ~ C13 (2025.6)
- **监测目标：** 跟踪全球石油与天然气设施和其他行业甲烷排放
- **主要特征：** 幅宽 35km、空间分辨率 30~20m，可以分辨排放源，监测甲烷泄漏



2022年5月，GHGSat利用SpaceX猎鹰9号火箭发射了三颗卫星，即GHGSat-C3 (Luca) 、 C4 (Penny) 和C5 (Diako)



2022年9月15日，在巴黎举办的第25届世界卫星商业大会（WSBW）上，美国卫星数据服务商Spire Global与加拿大公司GHGSat宣布展开合作。Spire Global将为GHGSat研制三颗16U立方星



②

甲烷超级排放源检测：其他甲烷排放检测的部分卫星

- 载荷特点：具有甲烷短波红外吸收探测波段， 1.61 、 $2.3\ \mu m$ ，宽波段光通量大
- 空间精细： $20 \sim 30m$ 高空间分辨率，牺牲探测的波段分辨率，实现高信噪比
- 探测不足：排放源伪点多，需要事先掌握甲烷泄漏的基础设施、或行业排口位置

意大利
2019年3月21日



幅宽：30km
分辨率：30m

中国
2019年9月12日



幅宽：60km
分辨率：30m

中国
2021年9月7日



幅宽：60km
分辨率：30m

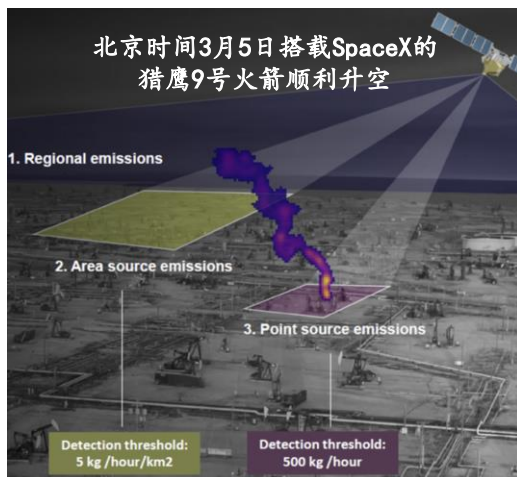
美国
2021年09月27日



幅宽：185km
分辨率：30m

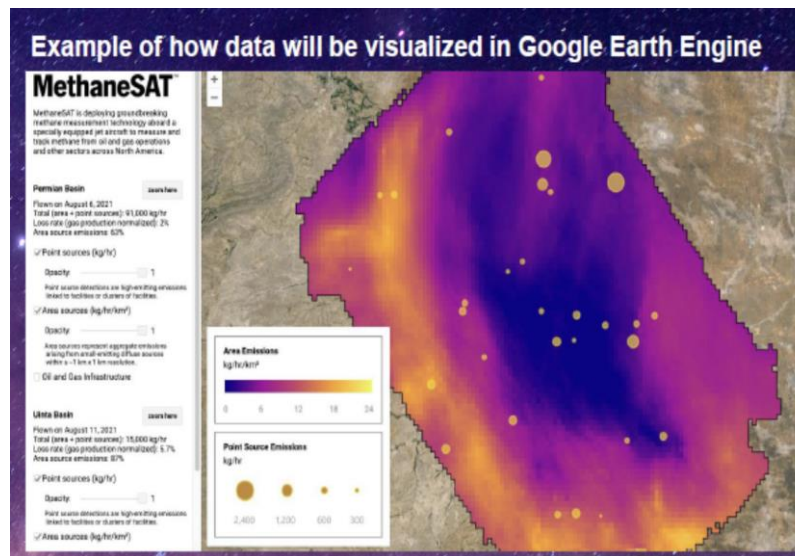


② 甲烷超级排放源检测：美国 MethaneSAT



- **幅宽：200km、像素：100m×400m**，覆盖占全球油气产量80%以上产区的甲烷排放；
- 生成跨200km×200km目标、1km²区域高分辨率排放热图；
- 检测低至3ppb甲烷浓度变化；
- 自动计算甲烷排放速率（点源排放及面源排放）；
- 2024年3月发射，2025年初数据在www.MethaneSAT.org和Google Earth Engine上；
- 完整描绘全球范围内的甲烷排放图景；

	Swath (km)	Pixels (m)	
TROPOMI	2,600	7000 x 5500	Global Mapping Global and large-scale regions Large point sources
MethaneSAT	200	100 x 400	Area Mapping Area sources / point sources Sector-wide quantification
GHGSat	12	30 x 30	Local Mapping Point sources Facility level attribution
PRISMA	30	30 x 30	
Carbon Mapper	18	30 x 30	



- 油气区域/国家/盆地/次盆地：
区域总排放量，为全球绝大多数油气生产提供全行业排放量化
- 高排放点源：可追溯至单一排放源，监测阈值为500kg/h。



② 甲烷超级排放源检测：我国在轨的甲烷探测载荷

□ 目前有 4 颗在轨卫星，搭载了刘银年老师研制的AHSI载荷 (Advanced Hyperspectral Imager)，可以用于全球甲烷排放点源的探测

2019年9月12日



2021年12月26日



2021年9月7日



2022年12月9日



- 波段范围：1010~2500: 330 通道
- 光谱分辨率： $\leq 10\text{nm}$
- 幅宽： $60\text{km} * 4 = 240\text{ km}$
- 分辨率：30m



中国科学院
上海技术物理研究所
刘银年研究员研制



② 甲烷超级排放源检测：国产GF-5卫星载荷甲烷应用



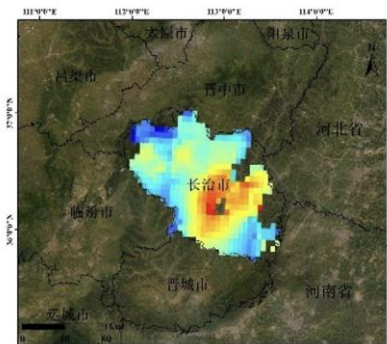
TROPOMI
CH₄数据

异常区
识别

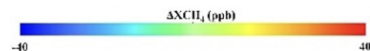
GF-02
AHSI载荷
CH₄数据

- ❑ 设施级泄漏点识别：匹配滤波算法反演
- ❑ 排放量反演：IME综合质量增强算法，排放速率均大于0.5吨/小时

TROPOMI数据
3.5km x 7.0km

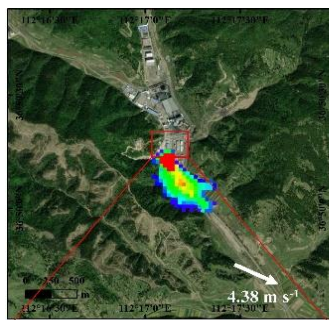


(a) 中国山西长治CH₄柱浓度年均值空间分布(2021年1月—12月)

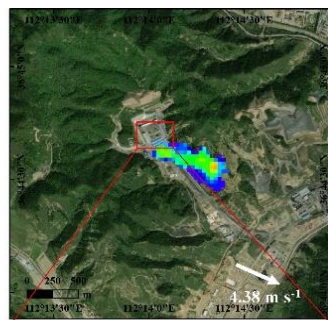


中国山西长治

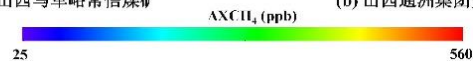
GF5-02/AHSI数据：30 m x 30 m



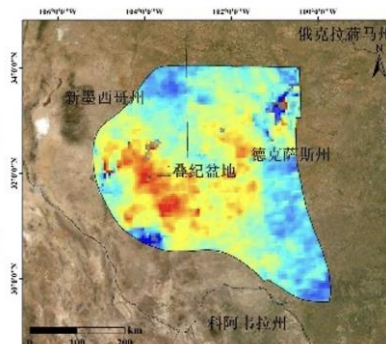
(a) 山西马军峪常信煤矿



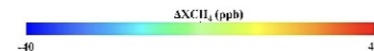
(b) 山西通元集团安发煤矿



TROPOMI数据
3.5km x 7.0km

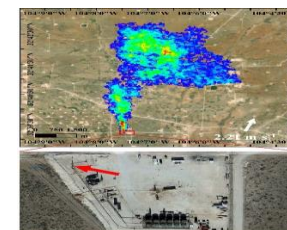


(b) 美国二叠纪盆地CH₄柱浓度年均值空间分布(2021年1月—12月)



美国二叠纪盆地

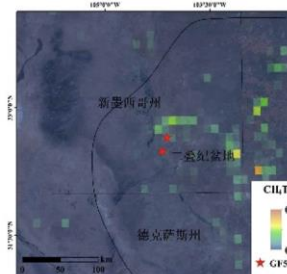
GF5-02/AHSI数据：30 m x 30 m



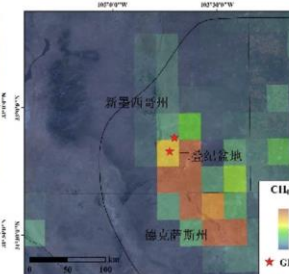
(a) 新墨西哥州埃迪县EOG天然气井



(b) 新墨西哥州埃迪县Motator压缩天然气

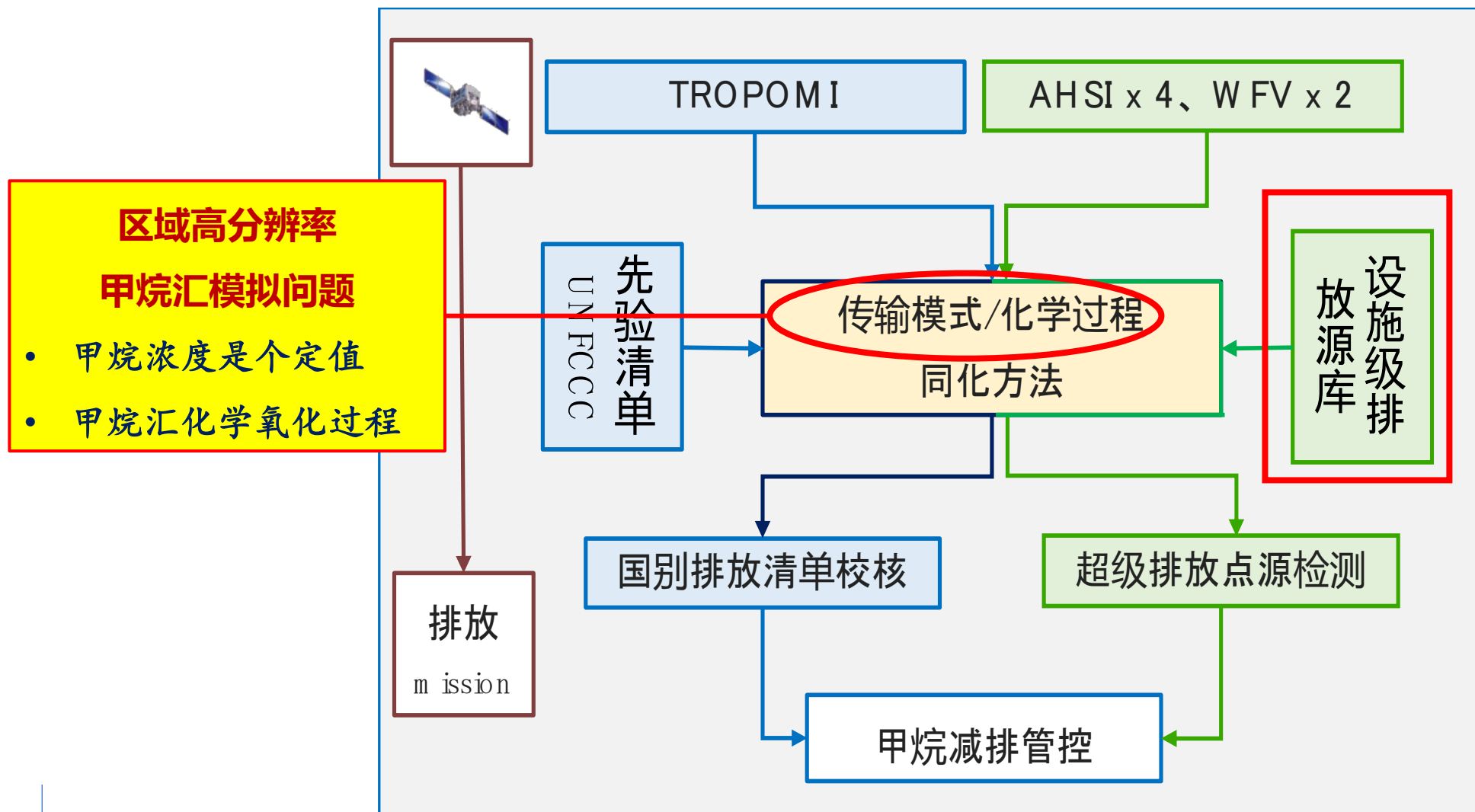


(a) 美国二叠纪盆地天然气CH₄排放通量空间分布(排放清单)



(b) 美国二叠纪盆地天然气CH₄排放通量空间分布(大气反演)

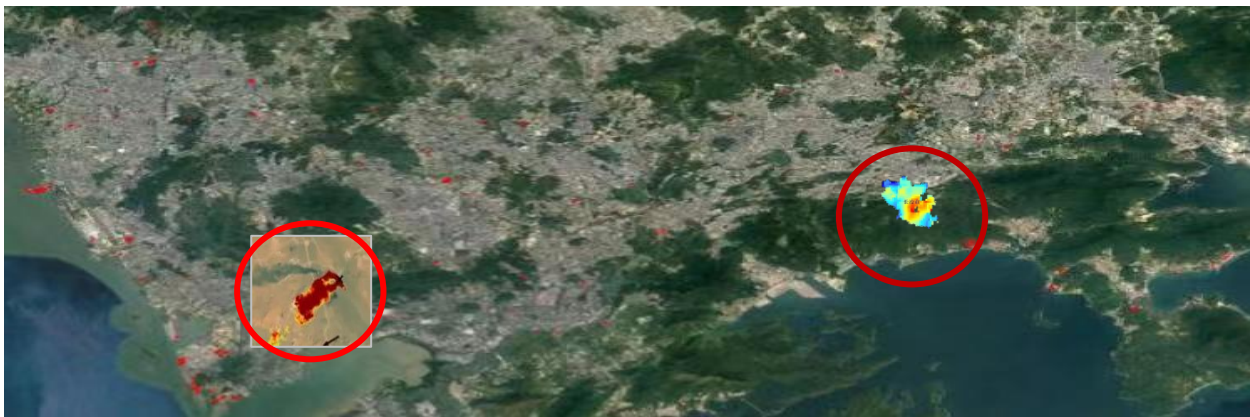
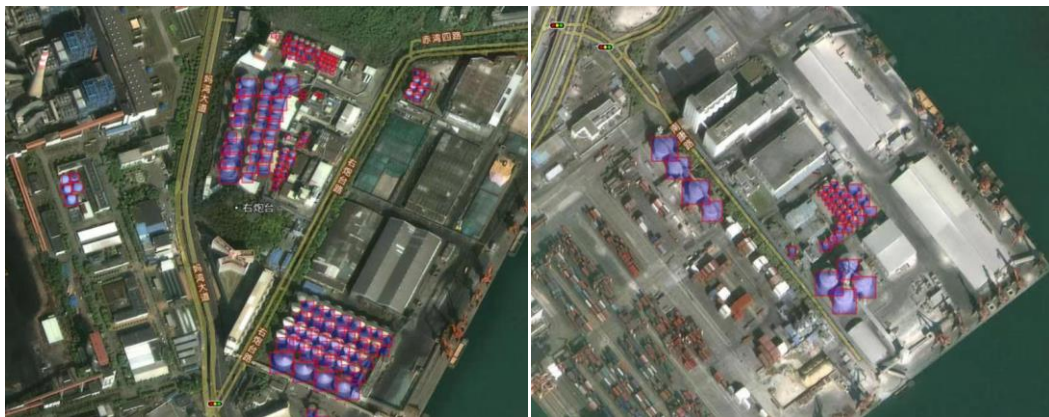
“自上而下” 核算逻辑与技术方





超级点源、清单编制：甲烷排放基础设施

- **问题与需求：** 目前高空间分辨率甲烷探测，具有较大的噪声、需要设施级油气基础数据进行匹配
- **精细排放源数据库：** 普查资料、网络大数据，建立精细排放源数据库
- **储油罐卫星识别案例：** 储油点空间分布

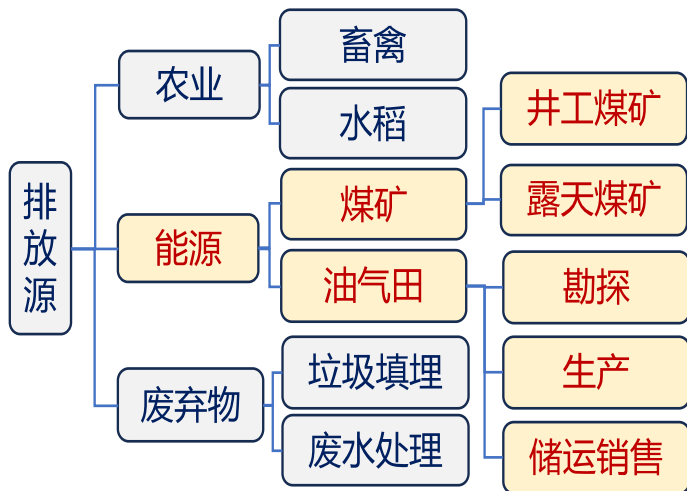




全球甲烷排放源设施数据库

- 中国甲烷源库：AI + 卫星遥感技术 + 部分排放源库，建立了中国油气、煤矿设施等甲烷排放源库
- 全球甲烷源库：AI + 卫星遥感技术 + 全球能源监测（GEM）、全球油气设施要素库（GOGI）、油气设施制图（OGIM）公开数据集，采用OSM(OpenStreetMap)、Google地图等时空数据开展验证

甲烷排放源分类体系



甲烷排放源设施的卫星遥感识别



工业储罐

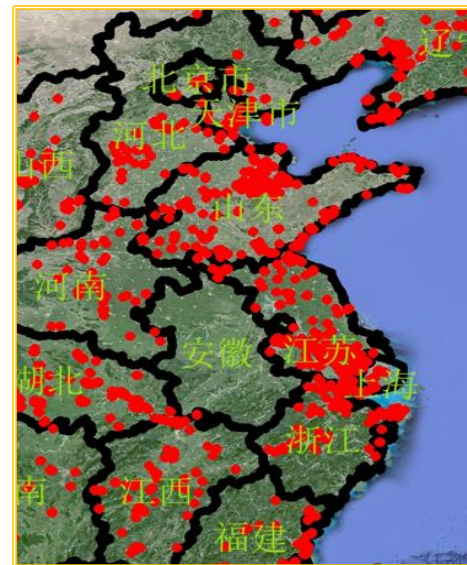


油井



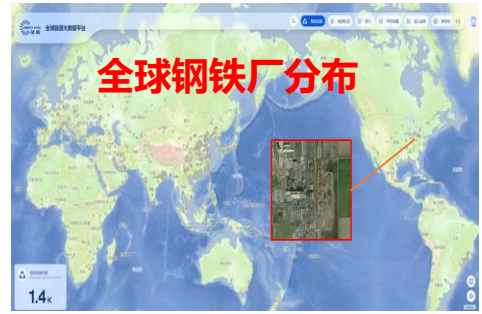
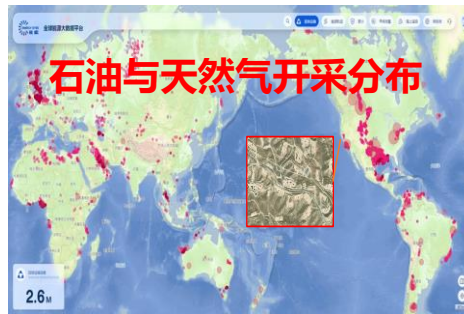
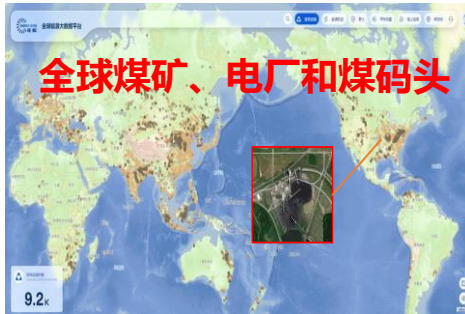
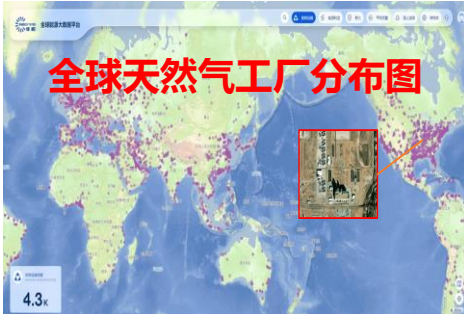
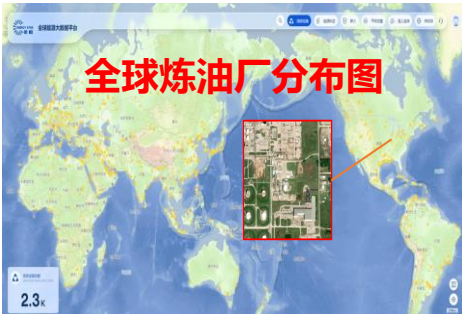
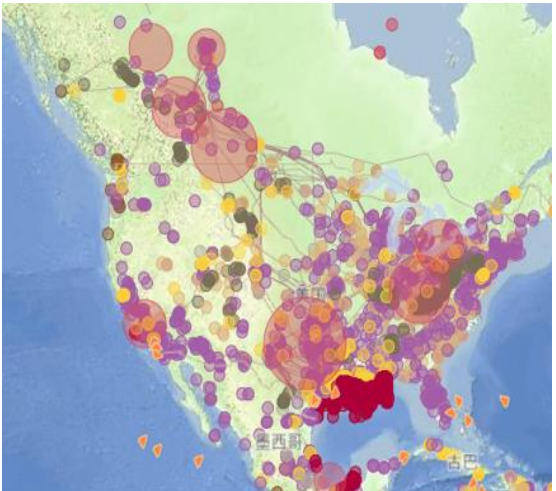
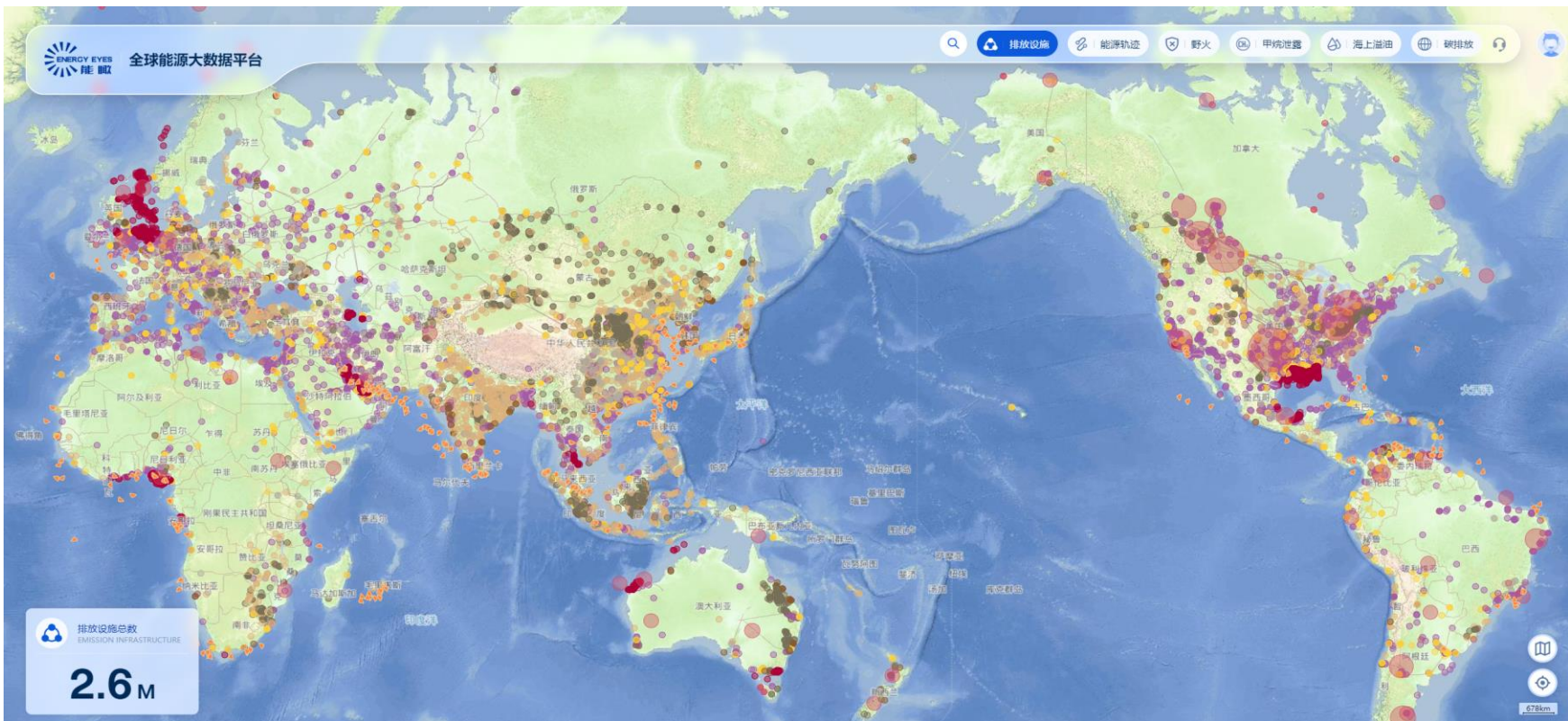
化工厂

中国东部工业储罐分布





全球甲烷排放源设施数据库





谢谢大家！ 请批评指正！

一

污染气体与温室气体**卫星**监测原理

二

污染气体**卫星**遥感技术进展与应用

三

温室气体**卫星**遥感技术进展与应用



□ 手机：13501247025

□ Email: chenlf@aircas.ac.cn