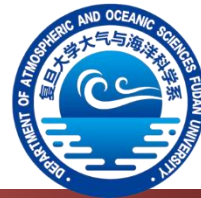




第十一届长三角空气质量管理技术研讨会
分会场 2：双碳目标下碳监测与应用思考



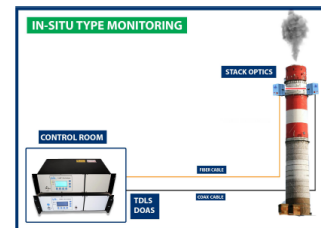
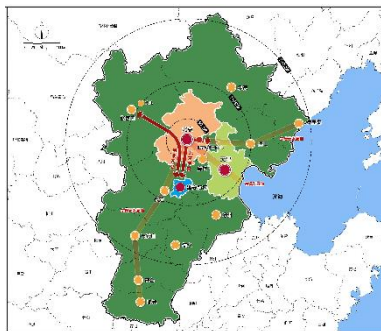
温室气体排放监测网络设计与数据应用

姚波

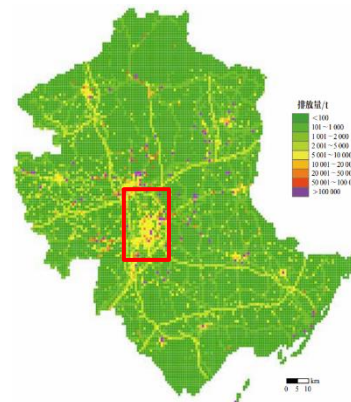
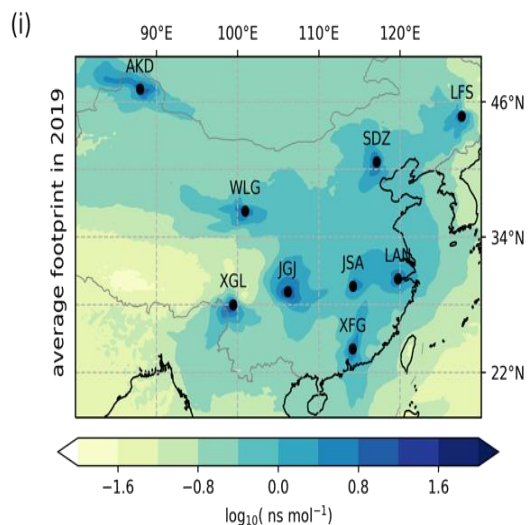
复旦大学大气与海洋科学系

2023年9月1日

监测网络的尺度

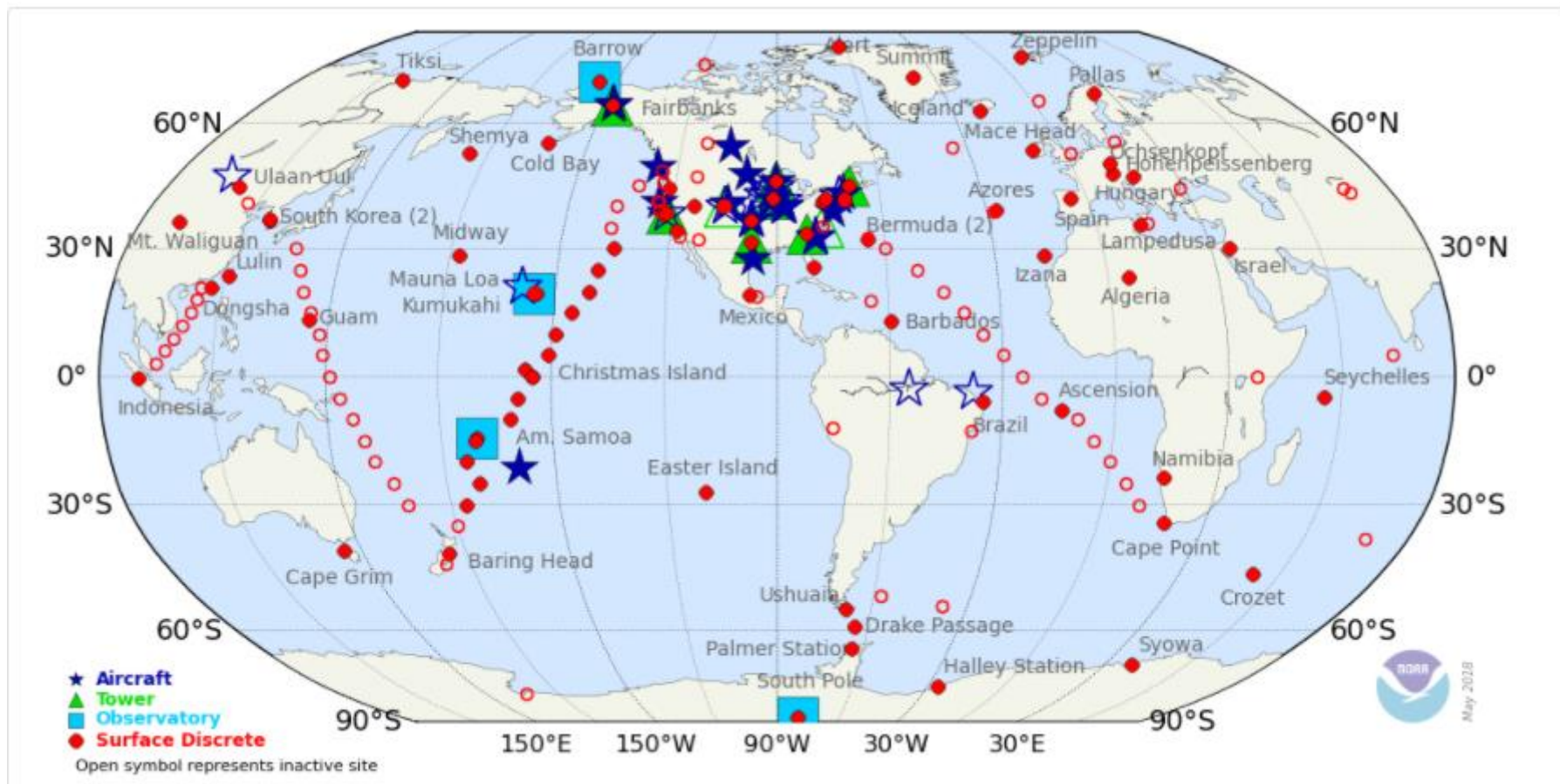


全球 → 中国 → 区域 → 城市 → 企业



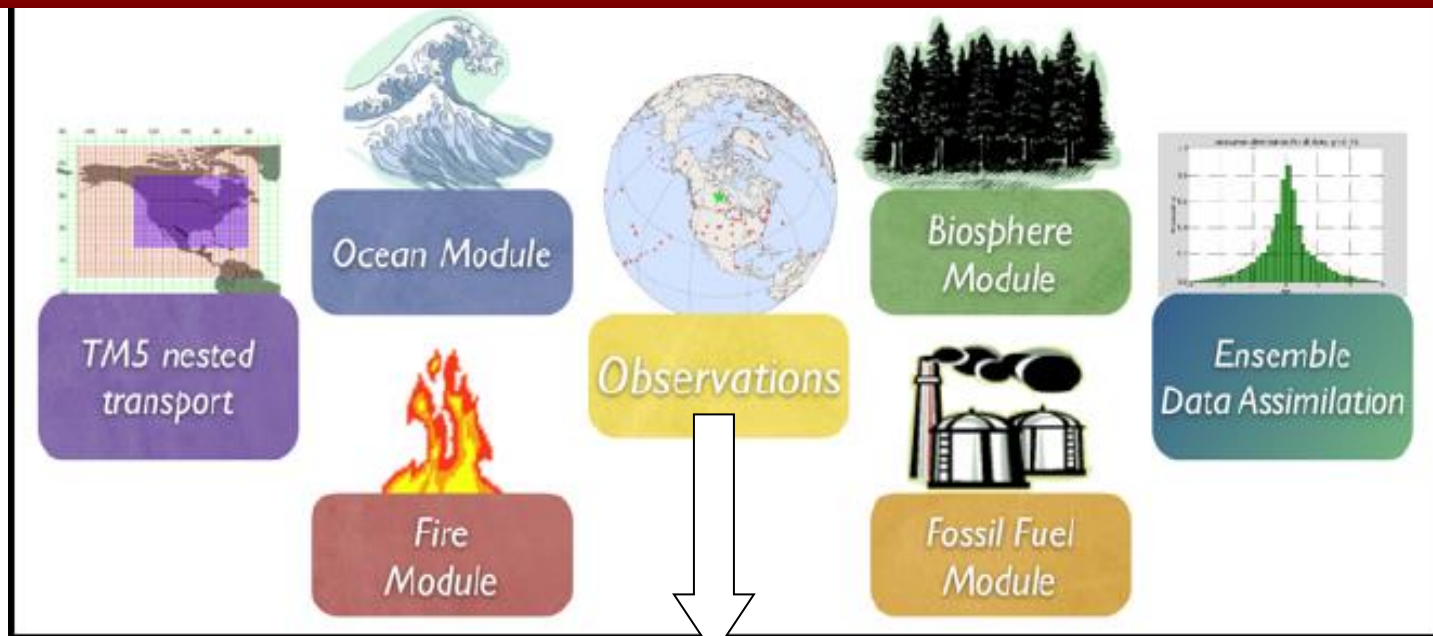
案例1

美国国家海洋与大气管理局（NOAA）温室气体监测网络

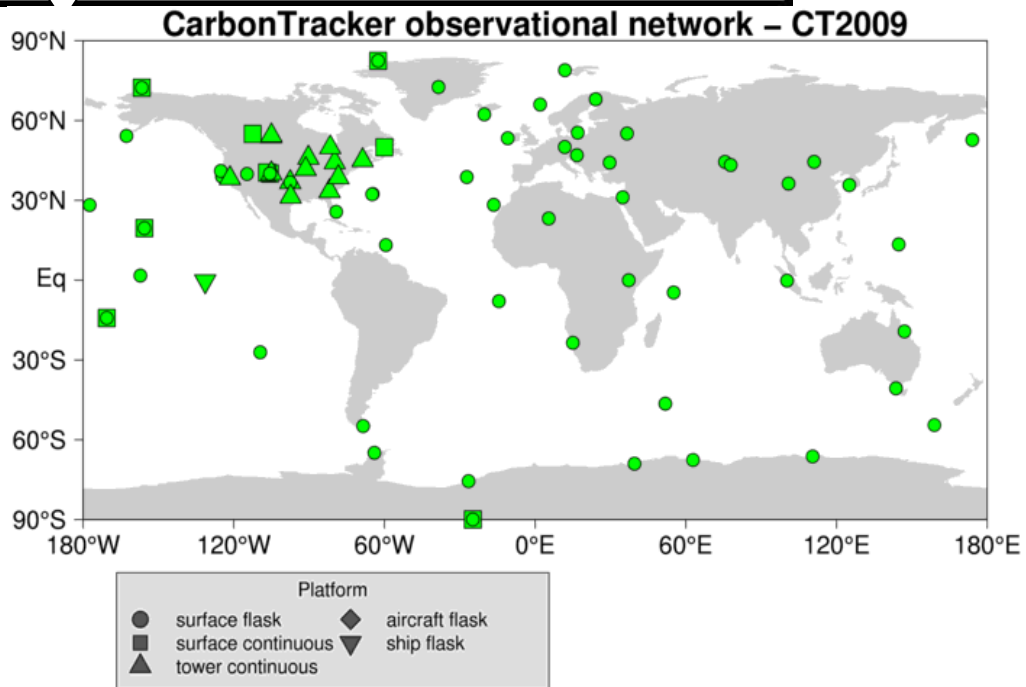


覆盖全球的观测网络
统一的监测标准，高质量控制要求

二氧化碳排放模型-Carbon Tracker

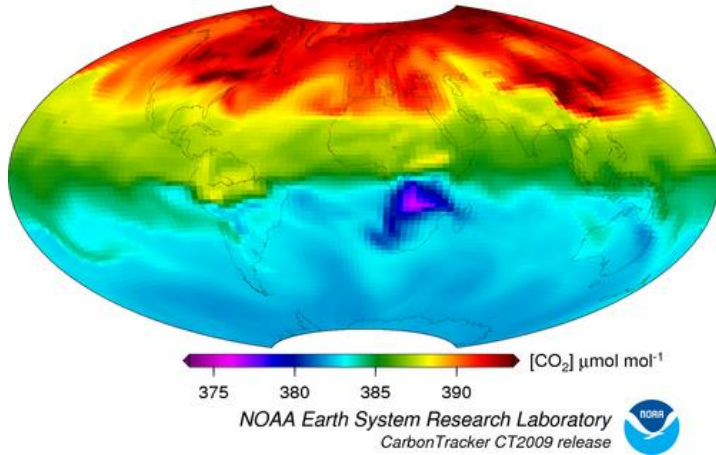


利用网络化观测的大气CO₂浓度数据，结合同期的气象资料，利用多个模块耦合的反演模型计算排放源和吸收汇的动态变化

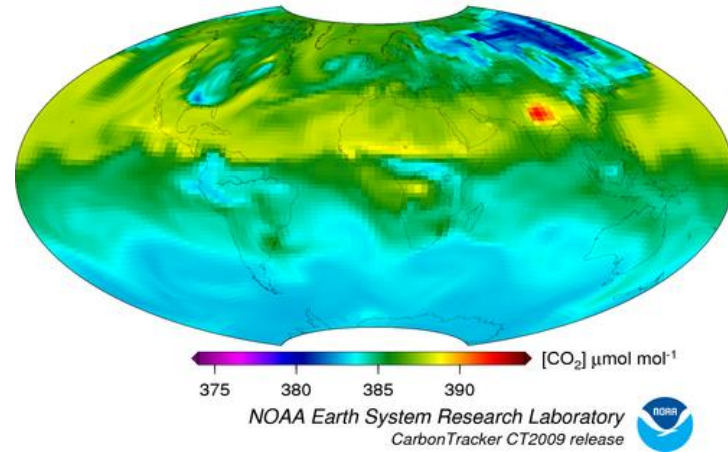


美国NOAA模式反演的碳排放产品 Carbon Tracker

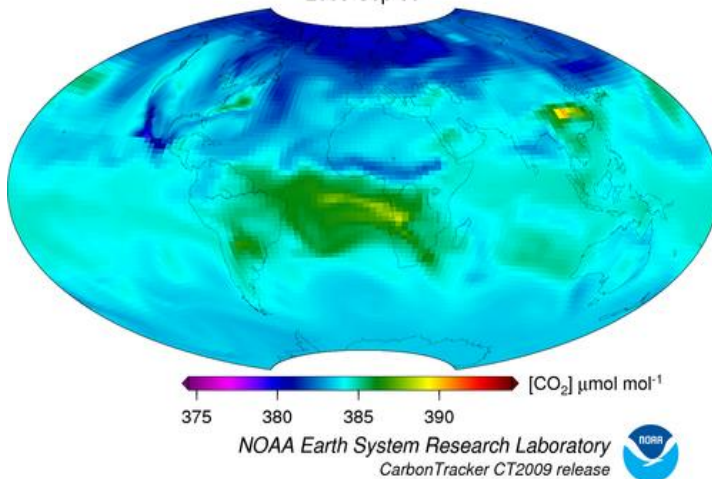
CarbonTracker free troposphere CO₂
2008-Mar-31



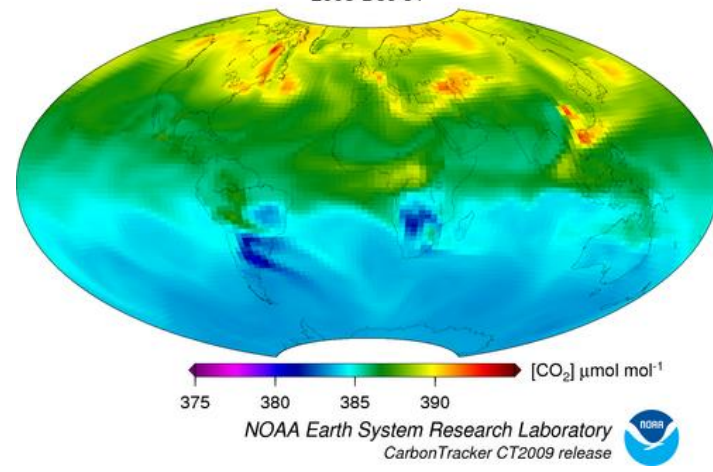
CarbonTracker free troposphere CO₂
2008-Jun-30



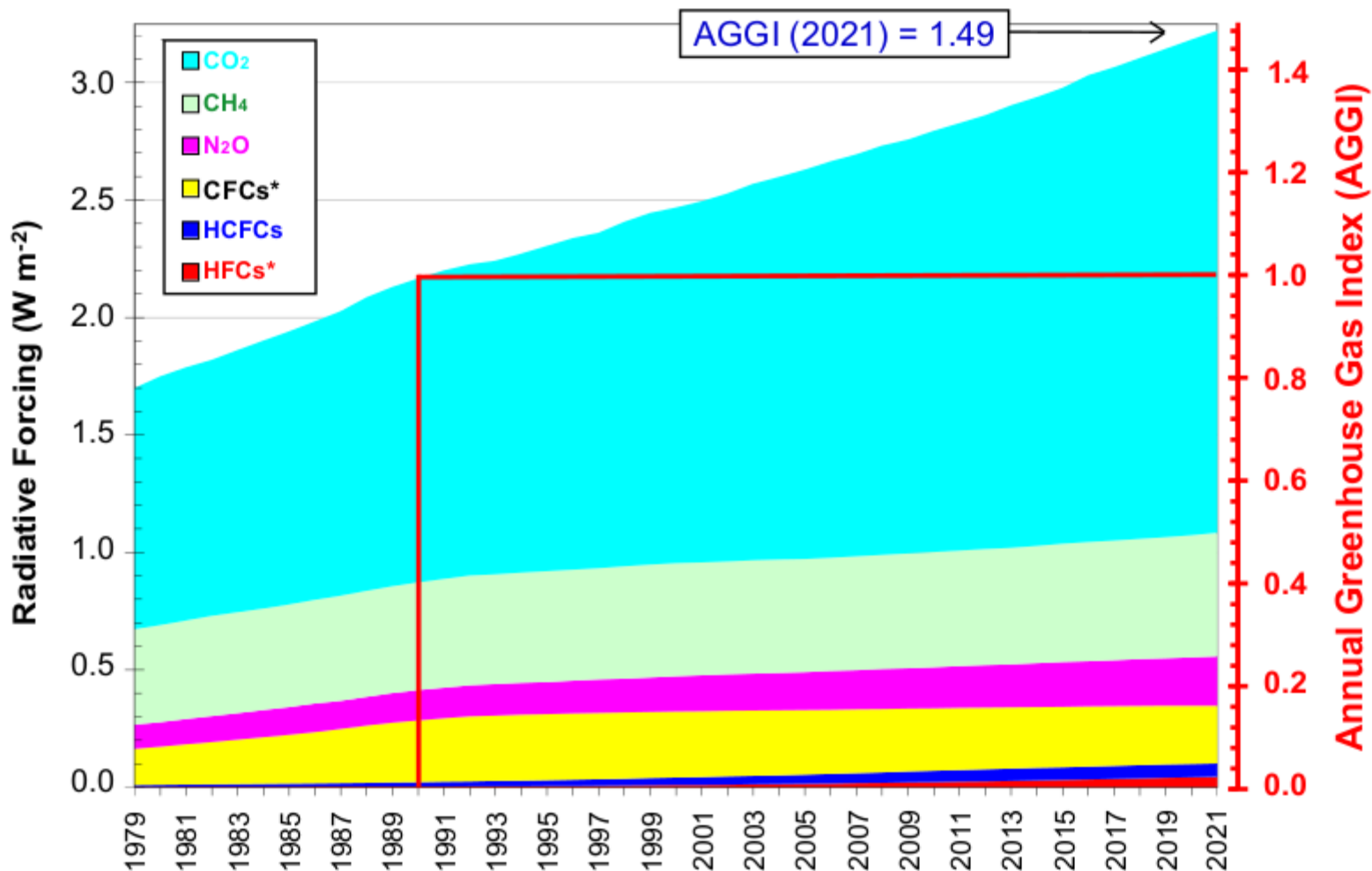
CarbonTracker free troposphere CO₂
2008-Sep-30



CarbonTracker free troposphere CO₂
2008-Dec-31



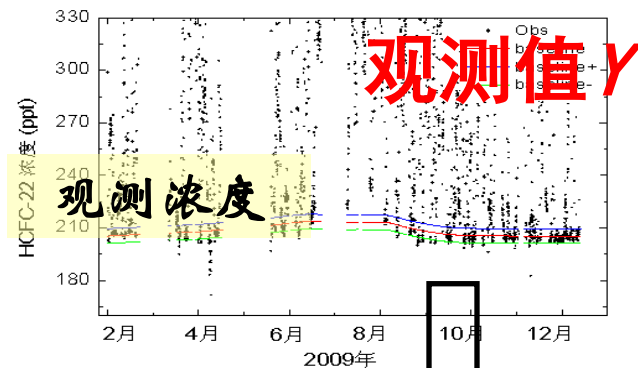
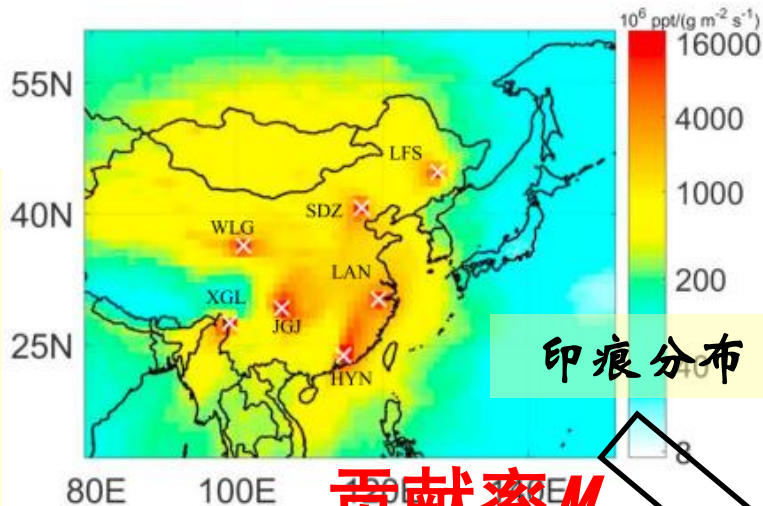
主要产品——年度温室气体指数 (AGGI)



案例2：我国含氟温室气体排放反演

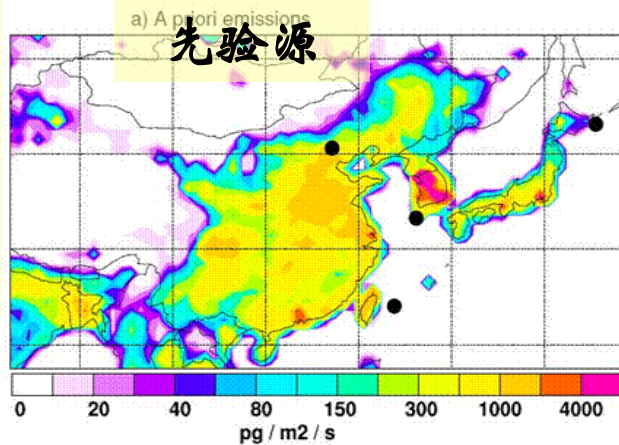
Vollmer et al., 2009; Stohl et al., 2010; Yao et al., 2019; 方法

Top-down
源反演

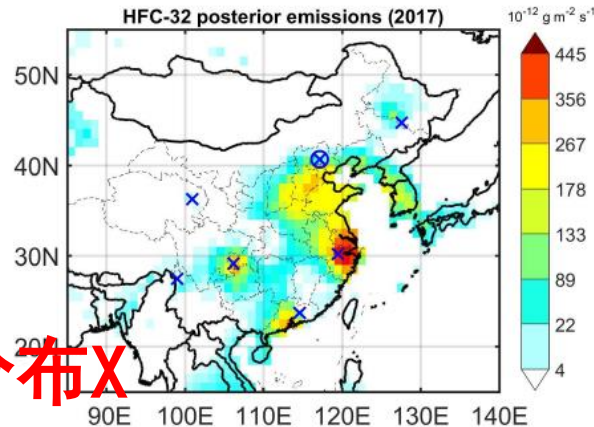


贡献率 M

$$M_{ij} X_i = Y_j$$



排放分布 X

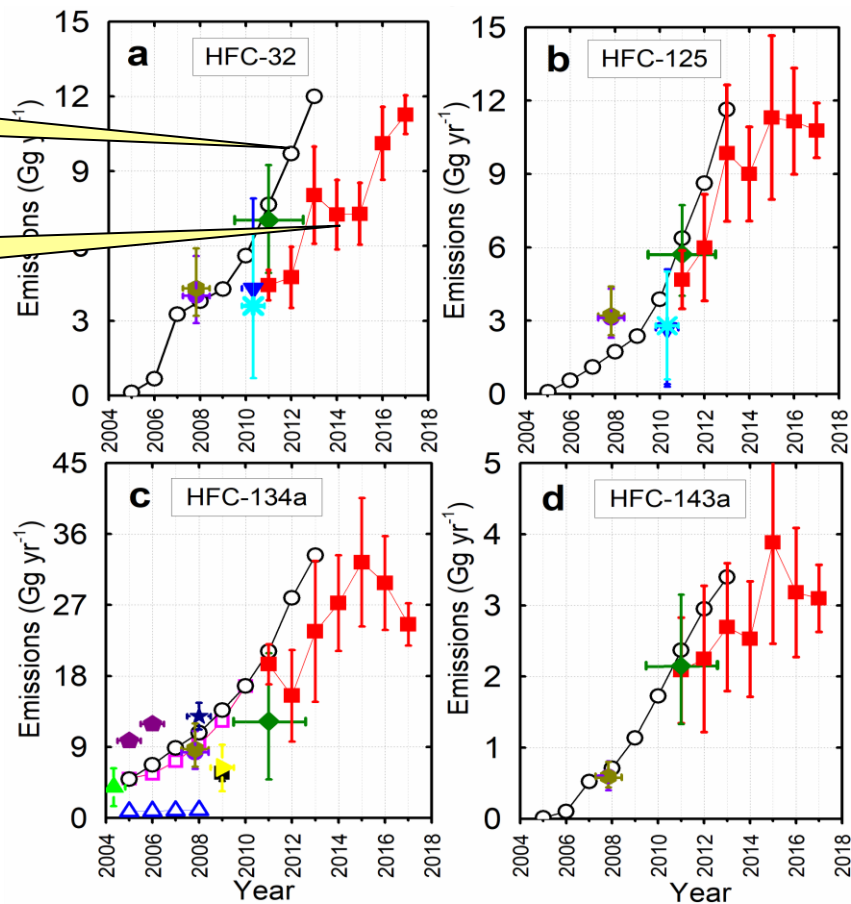


基于区域观测反演的HFC排放量

黑线：北京大学
HFC清单

红色：基于大气监测
的中国HFC排放量

两种方法计算的4
种HFC排放量在
误差范围内吻合



Top-down studies

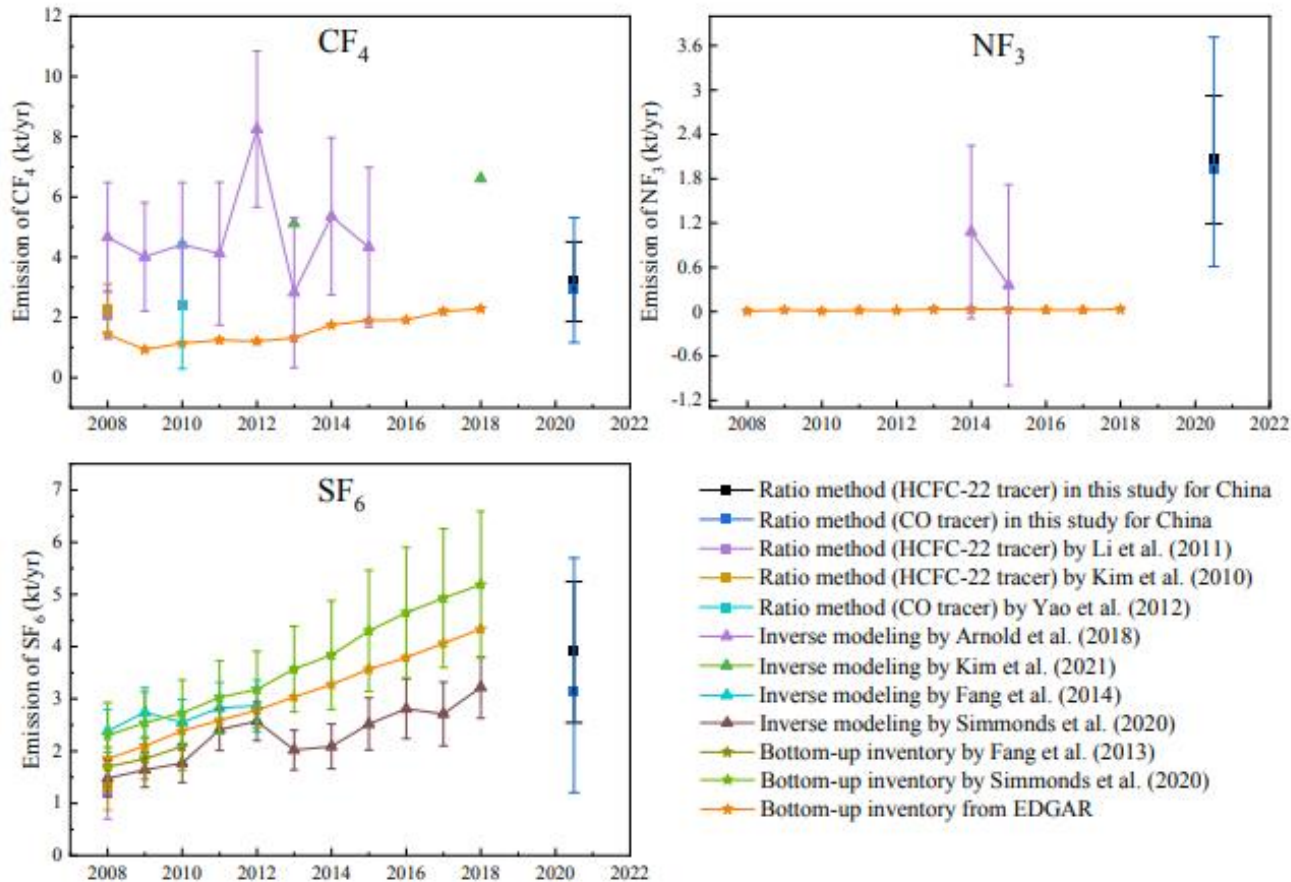
- ▲ CO-based ratio method by Yokouchi et al. 2006
- ▲ CO-based ratio method by Fang et al. 2012
- ▼ CO-based regression analysis by Yao et al. 2012
- ★ CO-based ratio analysis by Yao et al. 2012
- HCFC-22-based ratio method by Kim et al. 2010
- HCFC-22-based ratio method by Li et al. 2011
- ▲ HCFC-22-based ratio method by Fang et al. 2012
- Inverse modeling by Stohl et al. 2009
- ★ Inverse modeling by Stohl et al. 2010
- ◆ Inverse modeling by Lunt et al. 2015
- Inverse modeling by this study

Bottom-up studies

- Fang et al. 2016
- △ EDGAR v4.2
- Su et al. 2015

全氟化合物排放估算

我国几种典型的全氟化合物的排放量已超过或接近亿吨二氧化碳当量





政府信息公开

名称	关于控制副产三氟甲烷排放的通知		
索引号	000014672/2021-00626	分类	大气环境管理
发布机关	生态环境部办公厅	生成日期	2021-09-14
文号	环办大气函〔2021〕432号	主题词	

关于控制副产三氟甲烷排放的通知

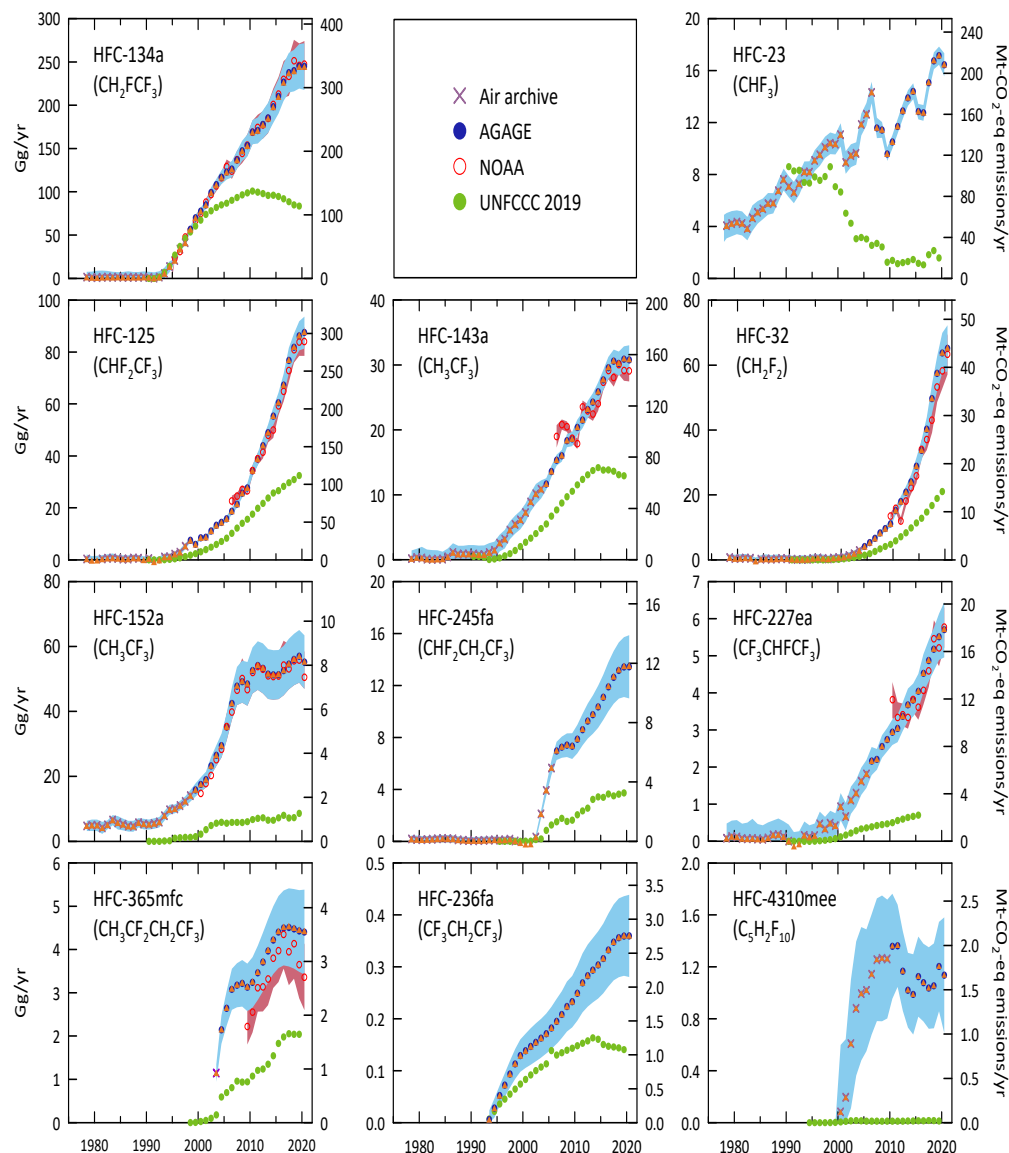
各省、自治区、直辖市生态环境厅（局），新疆生产建设兵团生态环境局：

《〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉基加利修正案》（以下简称《基加利修正案》）将于2021年9月15日对我国正式生效。自生效之日起，我国须履行《基加利修正案》关于控制副产三氟甲烷（HFC-23）排放的管理要求。为进一步明确HFC-23履约要求，确保实现履约目标，现就有关事项通知如下：

一、自2021年9月15日起，二氟一氯甲烷（HCFC-22）或氢氟碳化物（HFCs）生产过程中副产的HFC-23不得直接排放。

二、除作为原料用途和受控用途使用外，副产HFC-23应采用《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》缔约方大会核准的销毁技术（见附件）尽可能销毁处置。

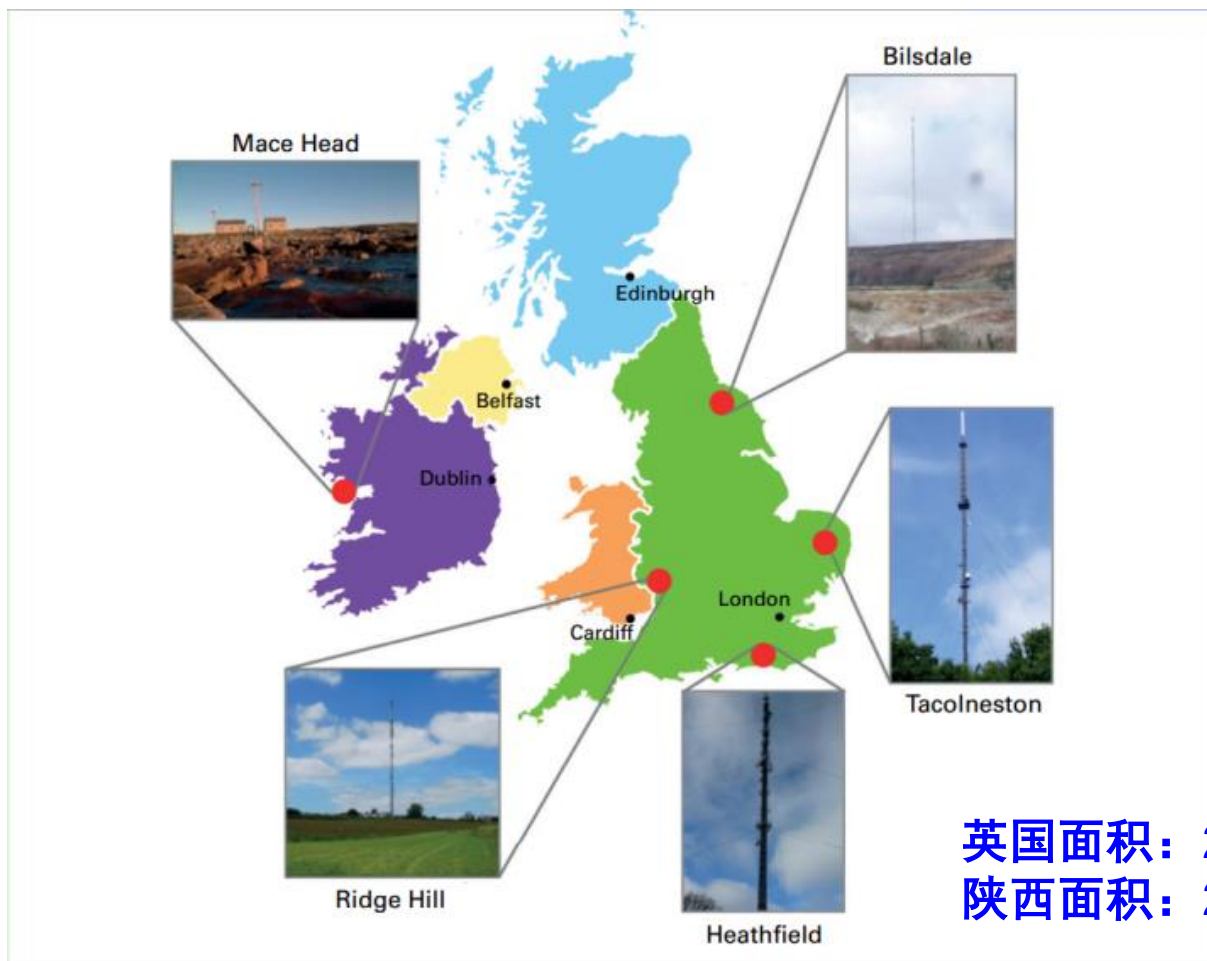
多种HFC大气反演与清单数据不一致 (WMO/UNEP 2022)



基于大气观测和模型
反演的排放量高于
各国
提交给UNFCCC的清
单数据

全球大气观测数据
来自：
AGAGE监测网
美国NOAA监测网

案例3：英国温室气体监测网络



  University of BRISTOL

REPORT TO BEIS
LONG-TERM ATMOSPHERIC MEASUREMENT AND
INTERPRETATION
(OF RADIATIVELY ACTIVE TRACE GASES)

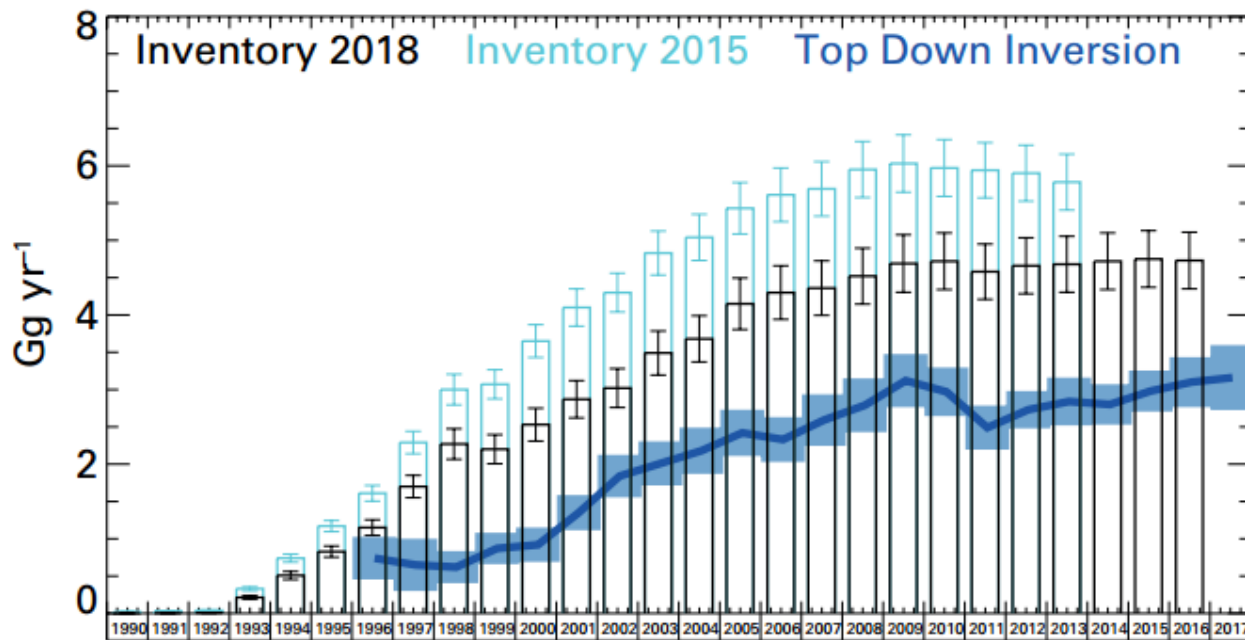
BEIS contract number: GA0201
Annual Report (Sept 2017 - Sept 2018)
Date: 10th September 2018

University of Bristol: Simon O'Doherty, Kieran Stanley,
Matt Rigby, Ann Barrett
Met Office: Alistair Manning, Alison Redington
INSCON: Peter Simmonds
Terra Modus Consultants Ltd: Dickon Young
University of East Anglia: Bill Sturgis, Adam Wither
University of Edinburgh: Paul Palmer
NPL: Chris Kennick, Tim Arnold

监测物种：CO₂、HFC、SF₆、PFC、NF₃、CH₄、N₂O、 $\Delta^{14}\text{C}$
排放反演物种：HFC、SF₆、PFC、NF₃、CH₄、N₂O

反演结果和清单的比较

所有气体：NAME模型反演



BEIS to investigate this further and an industry expert partly revised the United Kingdom HFC-134a inventory estimates.

提交的国家清单仍有科学问题需要解决

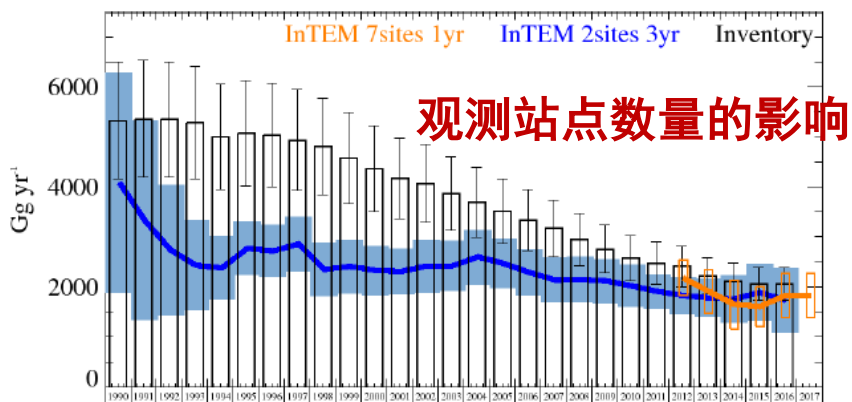


Figure 2: CH₄ UK Emission estimates (Gg yr⁻¹) from the UNFCCC Inventory (black) and InTEM with global meteorology: 3-year MHD+CBW (blue) and 12-month DECC + GAUGE + CBW network (orange). The uncertainty bars represent 1 std.

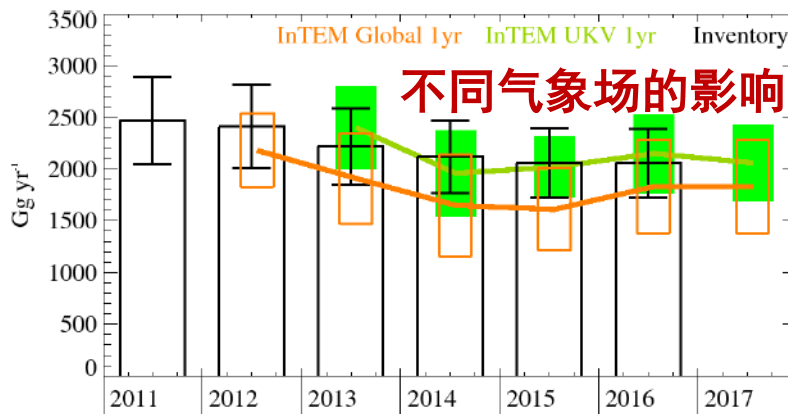


Figure 3: CH₄ emission estimates for the UK (Gg yr⁻¹) from the UNFCCC Inventory (black) and InTEM using the DECC + GAUGE + CBW observations, 1-year inversions with different meteorology: (orange) global meteorology and (green) 1.5 km high resolution meteorology. The uncertainty bars represent 1 std.

基于监测的人为源CO₂排放纳入国家清单 技术难度大

6 Estimating biogenic and anthropogenic CO₂

There remains no single, robust methodology to isolate ffCO₂ from atmospheric measurements of CO₂ alone.

There has been concerted modelling efforts to understand the performance of the current ¹⁴CO₂ network over Europe to quantify fossil fuel CO₂ (ffCO₂) (Wang et al, 2017, Wang et al, 2018), and the added benefit of increasing the spatial and temporal coverage of these measurements. Results from ¹⁴CO₂ data collected within the NERC-funded GAUGE project over the UK are still in preparation, but early results suggest care must be taken to remove the signal from the nuclear processing industry.




REPORT TO BEIS

LONG-TERM ATMOSPHERIC MEASUREMENT AND
INTERPRETATION
(OF RADIATIVELY ACTIVE TRACE GASES)

BEIS contract number: GA0201

Annual Report (Sept 2017 - Sept 2018)

Date: 10th September 2018



University of Bristol: Simon O'Doherty, Kieran Stanley,
Matt Rigny, Ann Stavert
Met Office: Alistair Manning, Alison Redington
INSCON: Peter Simmonds
Terra Modus Consultants Ltd: Dickon Young
University of East Angles: Bill Sturgess, Adam Wisher
University of Edinburgh: Paul Palmer
NPL: Chris Rennick, Tim Arnold

开展¹⁴C观测可以定量化石燃料CO₂排放

案例4：新西兰温室气体监测网络

新西兰碳监测项目

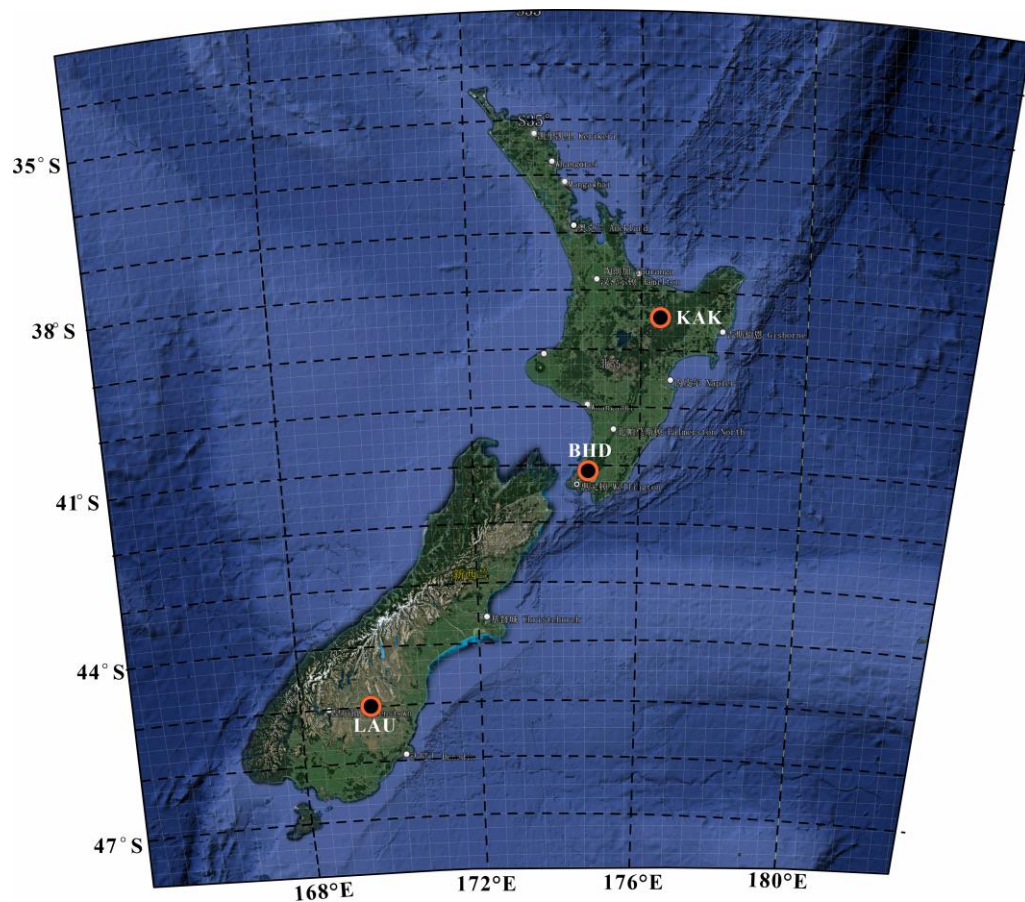
CarbonWatch NZ

-森林、草原、城市

特点：已实现碳中和

新西兰面积：27万平方公里

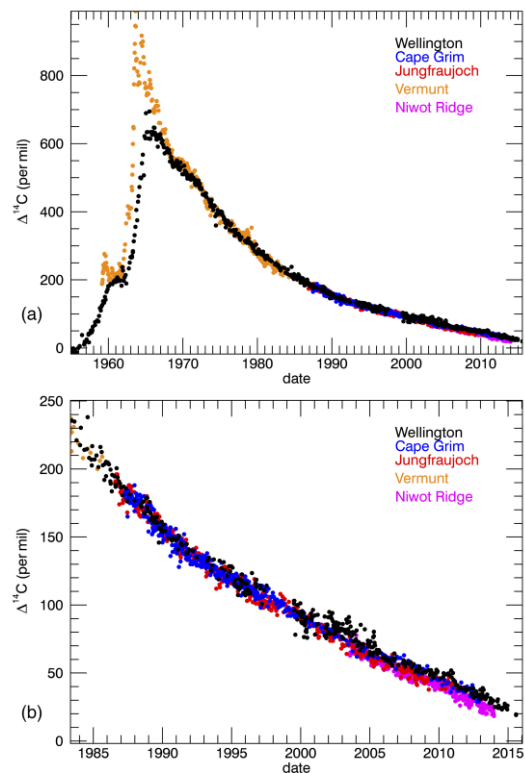
人口：512.4万



包括物种： CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、 CO 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\Delta^{14}\text{C}$

1954年首先开展 $\Delta^{14}\text{C}$ 观测

采样方法：NaOH吸收
、全空气玻璃瓶采样
、树木年轮-每两周

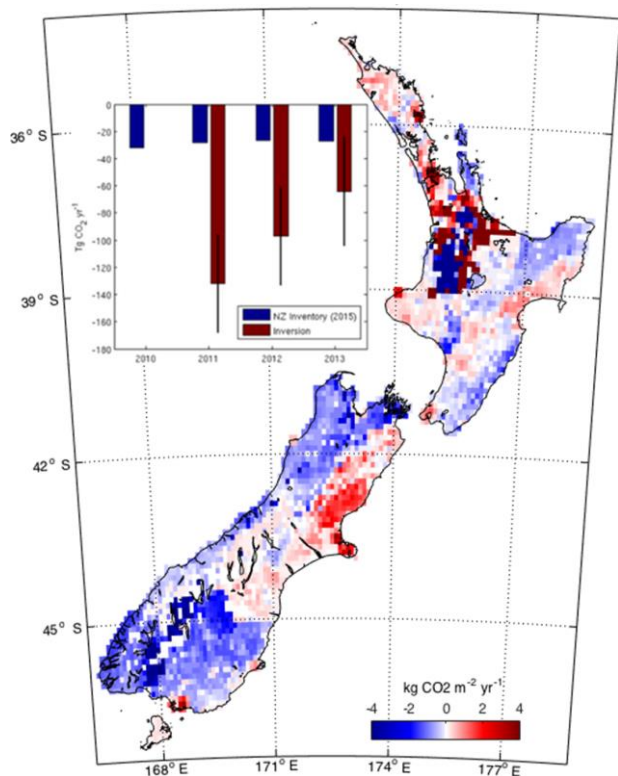


惠灵顿和其他地区
记录比较：估计南
北半球交换时间

J. C. Turnbull et al, 2017

开展 ^{14}C 观测理解南大洋动力学和南北交换过程

CO₂源汇分析及反演和清单比较



NAME反演模式
NZLAM模型气象场驱动
分辨率：1.5km和12km
原位观测数据：BHD、LAU

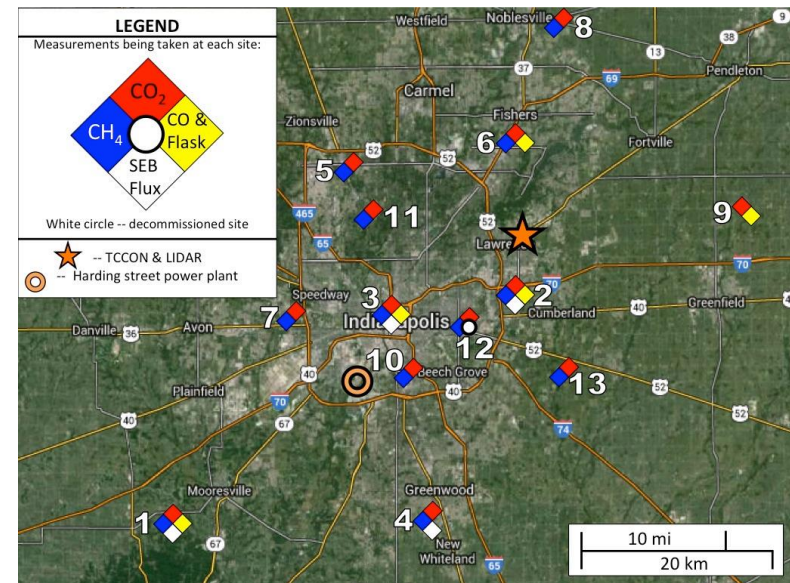
国家清单可能低估了新西兰
陆地碳吸收量30-60%。

K. Steinkamp et al, 2017

证实了年尺度上其陆地生物圈是一个净二氧化碳汇

案例5：美国印第安纳波利斯碳监测网络

- ✓ 12个高塔连续观测点（ $\text{CO}_2 + \text{CO} / \text{CH}_4$ ）；
- ✓ $^{14}\text{CO}_2$ 和其他痕量气体的玻璃瓶取样观测（2个观测塔）；
- ✓ 定期飞机温室气体和气象条件观测；
- ✓ 总碳柱观测网（TCCON）柱遥感站
- ✓ 涡流协方差和辐射通量测量；
- ✓ 多普勒激光雷达观测——三维风场和边界层厚度



- ✓ 市区面积911平方公里，人口80万。
- ✓ 印第安纳波利斯与其他大都市地区相对隔离
- ✓ 地形相对平坦，农田是城市周围的主要土地覆盖类型，南部是森林，休眠季节的主要风向是西南风，气象条件较为简单。

- ✓ 印第安纳波利斯的精细化清单与大气观测/模型的结果非常吻合（差值在3%以内）
- ✓ 城市自我报告（Self-report）的排放量大约比实际低了约35%
- ✓ 自我报告的排放清单很好地对应了排放量的变化。但实际上几乎所有的行业排放量都因为各种不同的原因而被低估。
- ✓ 利用城市碳监测来降低清单法中的不确定性是十分必要的。

案例6：移动观测对无组织排放的准确定位

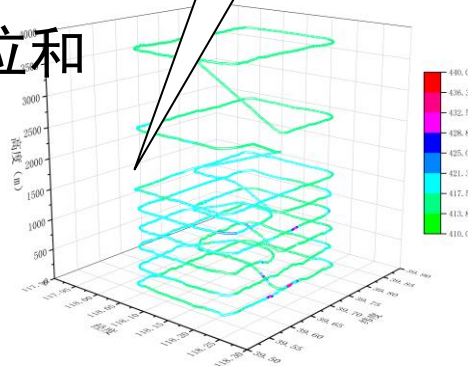
机载温室气体高精度监测

- ✓ 基于温室气体高精度商业主机的机载观测系统
- ✓ 可适用于密封常压舱（美国空中国王飞机）和开放低压舱（国产运-12飞机）
- ✓ 质量平衡法估算城区排放总量
- ✓ 可实现无色无味温室气体“无组织排放”的准确定位和定量

用于监管的可行性



无组织排放



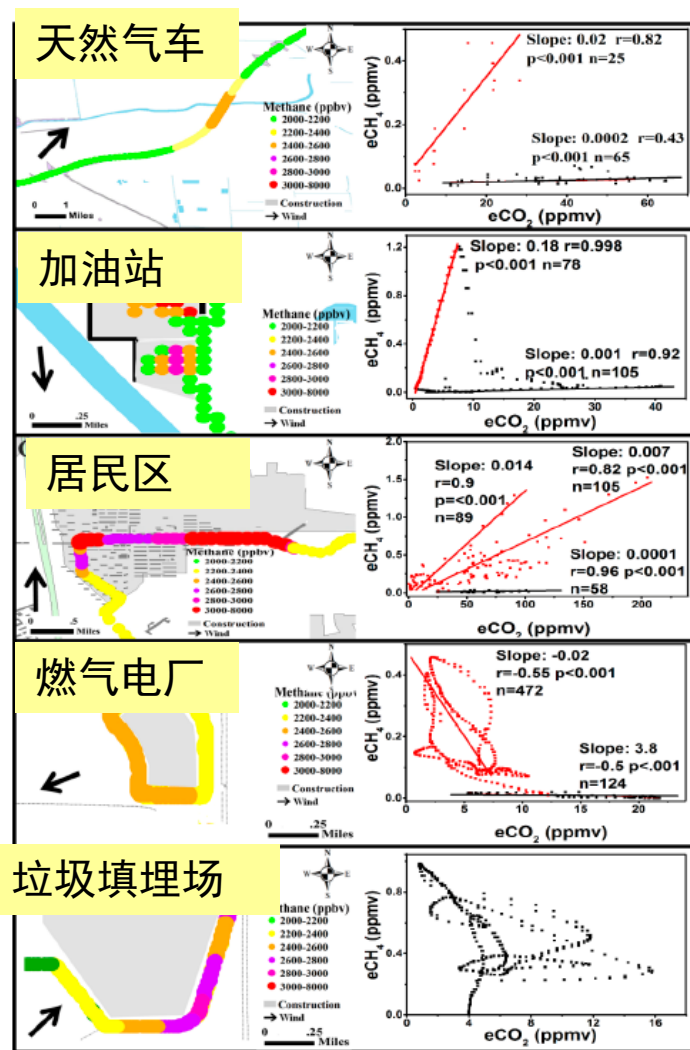
车载二氧化碳和甲烷高精度监测和源追踪

- ✓ 温室气体高精度高频主机，配合GPS、气象探头、采样模块，可以实现“未知源”的准确定位
- ✓ 可在普通轿车/MPV安装，使用范围广
- ✓ 获得不同排放源的温室气体“指纹”信息，可用于进一步甄别城市温室气体的来源



Liu, Han*, Yao* et al., 2021

Sun, Yao*, et al., 2019



碳监测思考

目标：通过碳监测，我们希望获得哪些传统清单方法无法提供的信息？



监测哪些物种？反演排放的空间和时间分辨率？不确定性？



为此需要建立碳监测网络的站点数量？站点分布？仪器选型？浓度观测质量目标？