

城市碳监测案例

随着双碳工作的推进，我国已逐渐开展碳监测评估试点工作，其中城市层面的碳监测是一项重要内容。了解全球主要的城市碳监测示范项目现状，对于我国城市开展相关工作具有重要的借鉴意义。亚洲清洁空气中心特邀请权威专家撰稿，编制了《城市碳监测案例》，从而为国内城市提供技术与信息支持。

温室气体排放估算的传统方法是清单法（自下而上法）。近年来，基于大气浓度监测反演温室气体排放的方法迅速发展起来，该方法可以弥补清单法对于无组织排放统计的不足，提供更高时空分辨率的温室气体排放动态变化，和清单方法互相补充，更为准确地获得国家或省市的温室气体排放结果。在《政府间气候变化专门委员会（IPCC）2006年国家温室气体清单指南2019修订版》中，大气温室气体监测及反演方法列入温室气体清单的质量保证/质量控制措施。瑞士、英国等国已向联合国气候变化框架公约（UNFCCC）提交包括大气浓度观测反演结果在内的两套独立的温室气体排放量数据，生态环境部也将碳监测评估试点纳入《“十四五”生态环境监测规划》。

城市碳排放的高时空分辨率监测是目前从科学角度与应用角度亟待解决的一个重要难题。作为人类活动最密集区域，城市贡献了全球总碳排放的70%以上。但由于城市结构复杂，交通、建筑、工业、人居等空间分布高度不均，时间变异极为不匀。由于各城市产业结构、地理条件各不相同，目前全世界尚没有通用的标准方法来获取高时空分辨率的城市碳排放信息，但是在中国、美国、法国、瑞士等地已经开展了多个区域、城市群或城市层面的温室气体排放监测的探索性工作，世界气象组织启动了“全球温室气体综合信息系统的计划”（IG³IS），总结城市和区域温室气体排放监测技术，并在此基础上制定相关技术指南，可以为我国相关工作提供经验和参考。

1

京津冀城市群碳监测网络

京津冀地区面积 21.6 万平方公里，人口达到 1.1 亿。GDP 占全国的 11%，其中钢铁产量占全国的 28.4%，煤炭消费强度更是达到全球平均的 30 倍。因此京津冀区域是全球碳排放强度最大的区域之一。在科技部重点研发专项项目“京津冀城市群高时空分辨率碳排放监测及应用示范”支持下，中国科学院大气物理研究所牵头，国内 16 家单位参与，于 2018 年起逐步建立了京津冀城市群碳监测网络^[1]。该网络首次在中国建立了国际前沿的城市群天、空、地大气 CO₂ 综合观测体系。如图 1 所示，观测体系包括 3 颗国际碳卫星和 3 颗我国自主碳卫星或碳载荷、6 个高精度 CO₂ 基准站、200 余个站点组成的高密度 CO₂ 观测网、十余辆移动观测车、2 架大气探测飞机、大气廓线采样、CO₂ 激光雷达扫描等，其中高精度基准站和高密度观测网开展连续观测，而飞机、观测车、激光雷达开展定期强化观测。高精度监测系统的进样口一般安装在具有较高高度的观测塔塔顶，结合高精度光腔衰荡光谱（CRDS）法 CO₂ 分析仪配套了进样模块、除水模块以及自动标定模块，实现了无人值守站点的全自动化观测（图 2）。在垂直观测方面，建立了不同高度层的温室气体垂直观测体系，综合利用梯度塔、CO₂ 激光雷达、大气探测飞机和平流层探空气球实现了从近地面到 30km 高度的分层 CO₂ 高精度观测技术，各项技术分别针对近地层、边界层内、对流层内的温室气体分布（图 3）。此外，针对城市群 CO₂ 浓度变化大的特点，还研制了低成本中精度传感器，200 多

个站的高密度监测网的 CO₂ 精度为 1–5ppm（1%），揭示城市 CO₂ 高时空变化特征和规律。

以上观测数据进入大数据融合同化系统，应用贝叶斯反演（Bayesian Inversion）和局地集合卡尔曼滤波（LETKF-C）2 种方法研制了空间分辨率为 1km×1km、时间分辨率为 1 小时的高时空分辨率碳同化反演系统，同化反演结果与先验清单在京津冀城市尺度差异为 5–12%。同时建立的 1km 逐小时的生物圈碳通量模型（VEGAS_Regional）实现了碳的水平传输、人口和动物呼吸碳排放的模拟。应用该系统可分离出新冠疫情、生物圈和天气对大气 CO₂ 浓度的定量影响。开发网格化的碳排放清单，然后通过多源数据融合技术与同化系统模拟产生城市群高时空分辨率碳监测信息，并通过建立可视化监测与分析示范平台以及低碳评估指数体系作为应用出口。

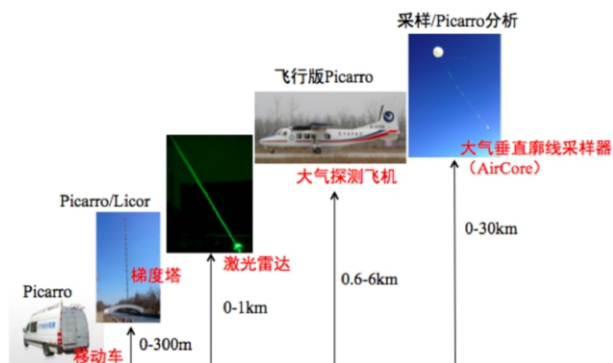


图 3 | 不同高度层的温室气体监测技术

来源：“京津冀城市群高时空分辨率碳排放监测及应用示范”项目组

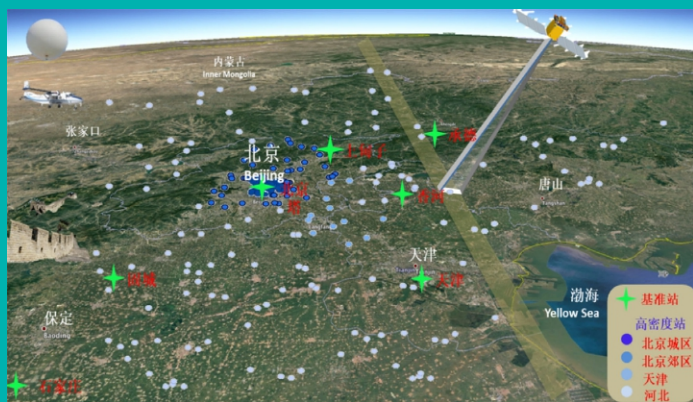


图 1 | 京津冀碳监测项目综合监测体系示意图

来源：“京津冀城市群高时空分辨率碳排放监测及应用示范”项目组



图 2 | 京津冀碳监测项目高精度基准站外景及 CO₂ 高精度观测系统

来源：“京津冀城市群高时空分辨率碳排放监测及应用示范”项目组

2

郑州碳监测网络

郑州碳监测网络由郑州计量先进技术研究院^[2]建立，这也是我国首个针对城市中心区的碳监测网络。针对目前国际社会对排放量数据提出的“可测量、可报告、可核查”的要求，可获得空间分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 、时间分辨率为1小时的实时动态网格化排放量数据，从而满足不同层级管控部门的温室气体减排建议、污染精准治理方案制定及政策评估等需求。该网络应用了中国计量科学研究院与美国、英国的国际合作研究的多方面成果。在企业排放精准计量方面，建立了烟道连续排放监测系统（CEMS）的排放量量值溯源体系，确保测量数据质量，使企业能够采用CEMS实时动态监测企业排放量；在交通碳排放精准计量方面，城市交通路网以每一个路段为一个单元，可以获得每小时的排放数据；小区域反演技术用于重点区域排放的精准计量，是通过测量有限点位大气中目标物质的浓度结合气象参数，反推污染源的位置和强度，实现小区域范围内无组织排放的源头追溯和精准计量，定位精度优于50米；大区域反演技术用于城市区域排放精准计量，对城市或城市群进行高精度碳浓度分布和气象参数测量，可以获得

$1\text{km} \times 1\text{km}$ 网格内的小时级排放量，实现1小时和1公里的测量分辨率。

郑州碳监测网络基于模式分析及统计算法在郑州市高新区进行高精度 CO_2 和高精度 CH_4 的城市监测点和背景点的选址，结合走航车移动监测系统、无人机遥感监测系统和碳通量同化反演系统，建立覆盖郑州市范围低、中、高空范围的全方位、立体化温室气体监测网络，获得准确的温室气体浓度监测数据。通过应用企业精准测量技术、交通路网排放实时监测技术及高精度的居民天然气排放数据，优化现有郑州市温室气体排放清单，提高反演输入清单的准确性和分辨率。基于上述温室气体浓度监测数据和排放清单，综合利用中尺度气象模式、大气传输模式、粒子扩散模型，基于贝叶斯统计、卡尔曼滤波等理论建立温室气体排放量反演模型，获得高分辨率、精准的城市温室气体排放通量，实现与核算法清单的相互验证。郑州碳监测项目为落实郑州市“减污降碳”工作、推进碳监测评估体系建设、支撑应对气候变化工作成效评估、形成可推广、可应用、可示范的城市碳排放监测及反演技术提供系统化解解决方案。



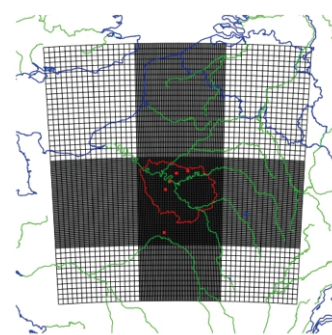
图4 | 郑州碳监测项目的技术路线图

来源：郑州计量先进技术研究院

巴黎是全世界最早建立碳监测网络的城市之一。巴黎空气质量监测协会 (AirParif) 在巴黎地区共设有五个监测站点 (表 1) , 负责 CO₂ 和其他污染物的排放情况监测。AirParif 将温室气体监测数据同已知的污染物排放清单和大气输送模型相结合, 得出日 / 月时间尺度温室气体排放。巴黎中心地区的三个监测站点 (EIF、MON、GON) 配备高精度 CRDS 法分析仪, 另外两个站点 GIF 和 TRN 为 AirParif 和欧洲综合碳观测系统 (ICOS) 合作运行, 使用气相色谱分析仪, 仪器测量精度均显著高于 CO₂-Megaparis 项目中 5 分钟均值的精度 (0.17 ppm)。由于巴黎城市布局具有密集、排放强、地势平坦的特点, 站点布设采用沿着主导风向的方式。温室气体监测结果结合巴黎市现有温室气体清单和大气同化反演模式, 可用于估算巴黎地区 CO₂ 排放量。

除地面监测网络外, 法国环境与气候科学实验室 (LSCE) 和德国卡尔斯鲁厄理工学院 (KIT) 等研究机构还建立了巴黎碳柱总量联合监测网, 以测量巴黎地区的 CO₂ 和 CH₄ 浓度。利用布鲁克 (Bruker) 公司

和 KIT 联合开发的可移动的地面傅立叶变换红外光谱仪 (FTIR) 仪器测量 CO₂ 和 CH₄ 垂直积分浓度。仪器的原理是当太阳光穿过大气层时, 大气层中的温室气体吸收特定的波长, 其吸收强度与大气中的温室气体浓度有关。仪器设置在市中心 (Jussieu) 和与中心距离几乎相等的四个站, 包括 Gif sur Yvette、Saulx les Chartreux、Piscop、Mitry Mory (图 6)。LSCE 负责建立大气模型, 计算巴黎的温室气体人为排放量。



五个监测站点用红色圆点表示, 黑色网格线代表研究所用的模型网络, 中部区域为 2 km 精度, 边缘地区为 10 km 精度。红色线条表示巴黎区域范围。

图 5 | AirParif 项目研究区域分布图

来源: Br é on, F. M. et al., 2015.

表 1 | 巴黎温室气体监测站点基本情况^[3]

站点位置	简称	纬度	经度	海拔 (m)	距巴黎市中心距离 (km)
Eiffel Tower	EIF	48.8582	2.2946	300	4 (W)
Montgé-en-Goële	MON	49.0284	2.7489	9	35 (NE)
Gonesse	GON	48.9908	2.4446	4	16 (N)
Gif-sur-Yvette	GIF	48.7100	2.1475	7	23 (SW)
Trainou forest	TRN	47.9647	2.1125	180	101 (S)

来源: Br é on, F. M. et al., 2015.



图 6 | 巴黎温室气体柱总量和廓线观测网示意图

来源: <http://www.chasing-greenhouse-gases.org/coccon-in-paris>

加利福尼亚州南海岸盆地（SCB）地区拥有大约1630万居民，占地面积约17100平方公里。SCB在地表复杂性、气象学及其CO₂和CH₄排放的时空变异性方面具备独特的挑战。SCB地区具备独特的地理条件：西面是太平洋，北面和东面是山脉，在特大城市洛杉矶上空观测到的中尺度环流模式在大气传输模型中具有挑战性，且盆地内复杂的地形可以形成微气象带，导致物质输送模型更加复杂。因此，需要一个具有高度空间和时间分辨率的密集监测网络来为洛杉矶温室气体通量计算提供可靠数据。洛杉矶城市群碳监测项目^[4]是美国国家标准与技术研究所（NIST）建立的三个城市温室气体测量试验平台之一，旨在证明在城市和区域范围内温室气体测量可以为碳排放提供准确的结果。洛杉矶城市群碳监测的目标是测量SCB的多年温室气体排放趋势，包括温室气体整体排放量以及重点部分的排放量，这些重点部门包括电力、工业、运输和农业。

洛杉矶温室气体监测网络设计基于CO的网络受体足迹敏感性分析，使用模式模拟（WRF+STILT）初步筛选站点位置并确定站点数量。场地评估和选址流程包括以下步骤（1）对地图和卫星图像进行目视检查，查看是否有高塔，现有开放式通讯塔等优先，高度在50–100m左右，并评估地形和附近强温室气体排放源的潜在影响；（2）现场调查；（3）对目标区域进行移动监测；（4）在矮塔（约10 m）上临时（约1–2周）安装CRDS法温室气体分析仪，根据观测结果确认后最终设点。洛杉矶城市群碳监测网包括12个城市点和4个背景点（如图7）。各站点除温室气体高精度监测系统外，都配备了气象站，用于测量风速、风向、气压、气温、湿度、露点温度和入射太阳辐射。

洛杉矶碳监测项目的经验是在可能的情况下，可以在开放式通信塔上寻找监测位置，因为它们自身的结构特点使得其受扰动气流和附近排放源影响较少。当关键采样区域没有可用的塔址时，可以在目标监测区域的高层、多层建筑屋顶上寻找适合的位置，在评估屋顶场地情况时，进行大涡模拟以探究附近结构对建筑物屋顶周围流场的影响。

自上而下的排放反演法需要准确定量相对于当地背景的温室气体抬升浓度。洛杉矶城市群碳监测项目中应用了一种基于简单统计过滤标准的数据选择方法，将观察到的CO₂和CH₄摩尔分数的稳定值用作当地背景空气水平，并进一步用于估计洛杉矶的CO₂和CH₄的浓度抬升。这种数据选择方法依赖于以下标准：（1）1小时内的变化在一定范围内；（2）小时与小时间差异在一定范围内；（3）前两个条件可持续几个小时。基于这些标准，监测值可以排除局部排放或再循环效应的影响，且这种数据过滤方法不依赖于任何其他观测（即风、边界层高度等）。然而，此方法忽略了大气输送情况的变化，在实际环境中，背景值随时间和季节变化，因此还需进行反向轨迹分析，评估大气输送对背景值的影响。

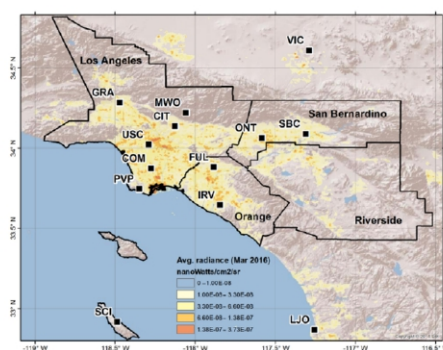


图7 | 洛杉矶城市群温室气体监测网络示意图^[5]

来源：Verhulst, K. R. et al., 2017

表2 | 洛杉矶城市群温室气体监测点的地理位置、观测塔高度和使用的仪器

Code	Full site name	Inlet height (m a.g.l.)	Site elevation (m a.s.l.)	Lat (°N)	Long (°W)	Analyzer
VIC	Victorville ^a	100/100/50	1370	34.61	117.29	Picarro G2301
GRA	Granada Hills ^a	51/51/31	391	34.28	118.47	Picarro G2401
USC-1	downtown LA (University of Southern California) ^{b,c}	50	55	34.02	118.29	Picarro G2301
USC-2	downtown LA (University of Southern California) ^{b,c}	50	55	34.02	118.29	Picarro G2401
COM	Compton ^a	45/45/25	9	33.87	118.28	Picarro G2401
FUL	Fullerton (CSU Fullerton) ^b	50	75	33.88	117.88	Picarro G2401
IRV	Irvine (UC Irvine) ^b	20	10	33.64	117.84	Picarro G2301
SCI	San Clemente Island ^d	27	489	32.92	118.49	Picarro G2401
ONT	Ontario ^a	41/41/25	260	34.06	117.58	Picarro G2301
CNP	Canoga Park ^a	15	245	34.19	118.6	Picarro G2301
LJO	La Jolla (Scripps Pier) ^b	13	0	32.87	117.25	Picarro G2301
CIT-1	Pasadena (Caltech, Arms Laboratory) ^{b,d,e}	10	230	34.14	118.13	Picarro G2401
CIT-2	Pasadena (Caltech, Millikan Library) ^{d,e}	48	230			
MWO	Mt. Wilson ^{b,e,f}	3	1670	34.22	118.06	Picarro G2301
PVP	Palos Verdes Peninsula ^{b,f}	3	320	33.74	118.35	
SBC	San Bernardino ^{a,b,h}	27/58	300	34.09	117.31	Picarro G2301

来源：Verhulst, K. R. et al., 2017

瑞士建立了国家温室气体监测网络，并在提交至 UNFCCC 的《Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2018 National Inventory Report》中将利用大气浓度监测计算的“自上而下”法温室气体排放结果纳入附件 5《Additional information on verification activities》。

瑞士国土面积 4.1 万平方千米，人口 866.7 万人，和我国地级市的面积及人口相当，因此瑞士的国家温室气体监测体系对我国城市温室气体碳监测具有较好的参考意义。

瑞士的温室气体监测网络包括 5 个站点，其中位于阿尔卑斯山少女峰顶的少女峰站（JFJ）开展温室气体全要素（CO₂、CH₄、N₂O、HFCs、PFCs、SF₆、NF₃）及示踪物（CO）在线观测，其他四个站点 Beromünster（高塔，BEO）、Lägern Hochwacht（山顶高塔站，LHW）、Gimmiz（平地高塔站，GIM）、Frühbühl（山区站，FRU），Schauinsland（山顶站，SSL）仅观测 CO₂、CH₄，而 BEO 站还观测 N₂O。

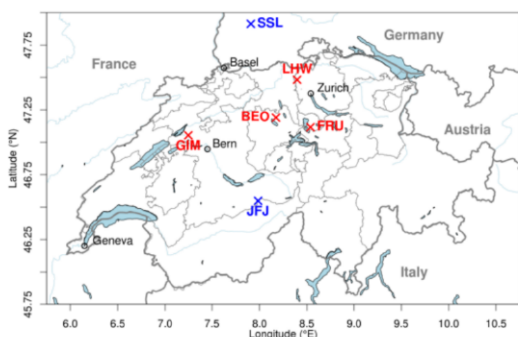


图 8 | 瑞士国家温室气体观测网络布局^[6]

来源：Federal Office for the Environment, 2020

HFC 和 SF₆ 的排放量采用比值相关法，利用 JFJ 站点同时观测的含氟温室气体以及 CO 的抬升浓度比值，结合瑞士 CO 排放清单计算了瑞士含氟温室气体的排放量。除瑞士外，英国和澳大利亚提交给 UNFCCC 的“自上而下”温室气体排放结果也都包括了含氟温室气体，原因在于含氟温室气体几乎全部来自人为源，反演模型相对简单，而清单的排放因子的不确定较大，因此“自上而下”的结果可以较好的提高清单的准确性。图 10 显示了两套方法计算的瑞士 HFC-134a 的排放量比较，两者的差距可能达到 40%。而图 11 显示，尽管清单统计瑞士 HFC-152a 排放应在 2003 年后大幅下降，2009 年后应接近零排放。但是大气浓度监测计算的排放结果显示瑞士依旧存在 HFC-152a 不可忽视的排放量，体现了“自上而下”法在监测“无组织排放”方面的优势。

CH₄ 和 N₂O 的排放量利用监测的大气浓度结合大气反演模式 FLEXPART 获得。FLEXPART 模式由瑞士国家气象局（MeteoSwiss）提供的数值天气预报模型 COSMO（7 km × 7 km 水平分辨率）的高分辨率气象输入数据驱动。对于每个站点，在 3 小时的时间间隔内释放 50000 个离子，计算追踪其 4 天的运行，并以此计算每 3 小时的源敏感系数，再利用同化算法获得其排放。如图 12 和图 13，自上而下法获得 CH₄ 和 N₂O 结果与清单方法没有显著性差异，但两套结果的不确定度均较大。

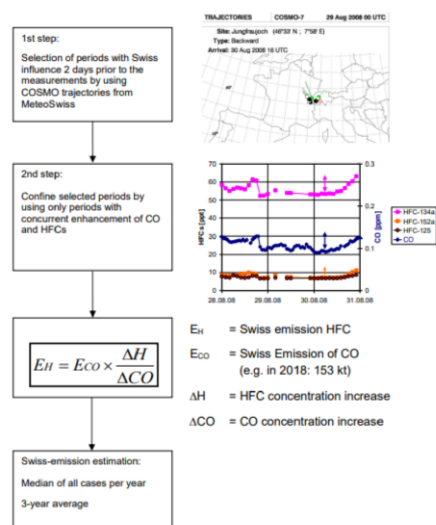


图 9 | 瑞士国家温室气体清单中自上而下法含氟温室气体排放量计算流程

来源：Federal Office for the Environment, 2020

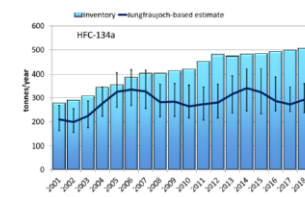


图 10 | 自上而下法计算的瑞士 HFC-134a 排放以及与清单的比较

来源：Federal Office for the Environment, 2020

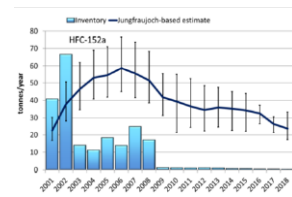


图 11 | 自上而下法计算的瑞士 HFC-152a 排放以及与清单的比较

来源：Federal Office for the Environment, 2020

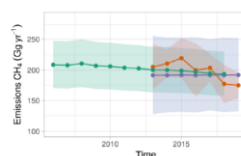


图 12 | 自上而下法计算的瑞士 CH₄ 排放以及与清单的比较
NIR 为清单结果，posterior 为自上而下法反演后的结果

来源：Federal Office for the Environment, 2020

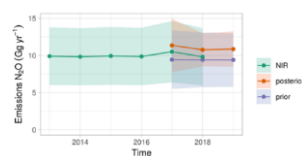


图 13 | 自上而下法计算的瑞士 N₂O 排放以及与清单的比较
NIR 为清单结果，posterior 为自上而下法反演后的结果

来源：Federal Office for the Environment, 2020



全球温室气体综合信息系统 (IG³IS) 计划

为了支持《巴黎协定》，第 17 届世界气象大会通过了一项关于实施“全球温室气体综合信息系统计划”(IG³IS) 的决议，旨在扩大温室气体的观测能力，将世界气象组织(WMO)原有的全球大气观测网络(GAW)扩展到区域和城市领域，并开发信息系统来提升温室气体模式反演能力，提供准确的温室气体排放信息。世界气象组织执行理事会在 2018 年 6 月的第 70 届会议上批准了 IG³IS 科学实施计划，并于 2019 年实施。

目前 IG³IS 的目标包括：(1) 与清单编制专家合作，减少向 UNFCCC 提交的国家排放清单的不确定性。(2) 向各行业和企业提供信息，帮助定位和定量以前未知的排放来源，例如甲烷的无组织排放量。(3) 支持省市

政府，特别是排放显著的特大城市，提供需要的时空分辨率的温室气体排放信息，以评估和指导实现减排目标的进展。(4) 在各国政府和《联合国气候变化框架公约》确定需求时，支持《巴黎协定》的全球评估。

IG³IS 正在整合全球不同尺度的温室气体排放监测计划，总结其经验，编写基于大气浓度监测的自上而下法温室气体排放监测方法学指南，并指导不同国家和城市开展碳监测。包括本手册介绍的京津冀城市群碳监测网络、郑州碳监测网络、巴黎碳监测网络、洛杉矶城市群碳监测网络、瑞士国家温室气体监测网络等十余个碳监测项目或网络均已纳入 IG³IS 国际碳监测示范项目。

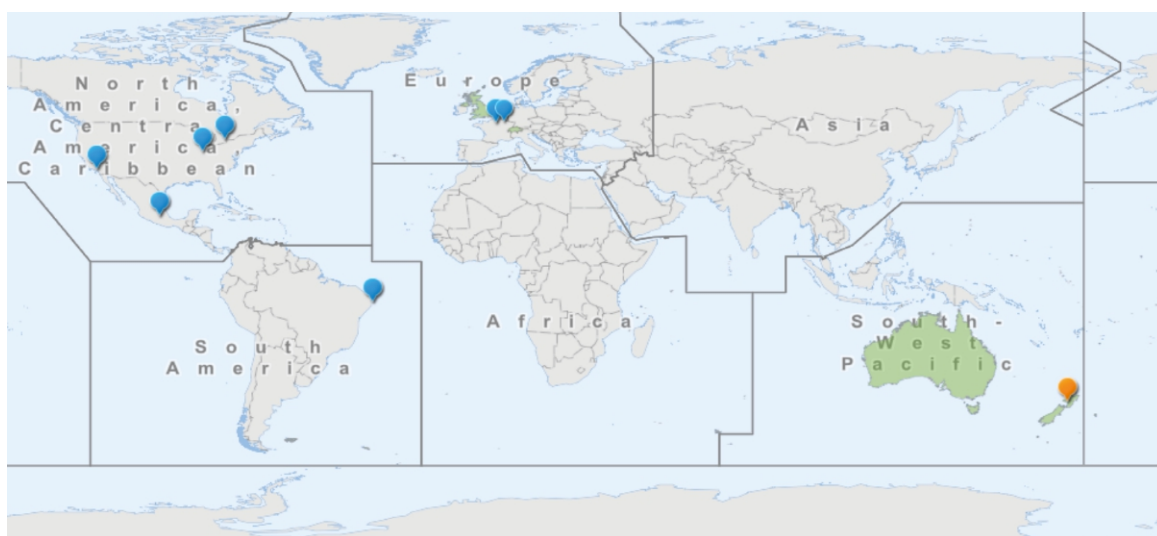


图 14 | 部分 IG³IS 城市群和国家监测示范项目分布

来源：<https://ig3is.wmo.int/en/welcome>

参考文献

- [1] 京津冀城市群碳监测网络 . <http://main.sense1.cn>
- [2] 郑州计量先进技术研究院 . <https://www.zim.ac.cn>
- [3] Bréon, F. M., Broquet, G., Puygrenier, V., Chevallier, F., Xueref-Remy, I., Ramonet, M., Dieudonné, E., Lopez, M., Schmidt, M., Perrussel, O., and Ciais, P.: An attempt at estimating Paris area CO₂ emissions from atmospheric concentration measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 1707 – 1724, <https://doi.org/10.5194/acp-15-1707-2015>, 2015.
- [4] 洛杉矶城市群碳监测项目 . <https://www.nist.gov/greenhouse-gas-measurements/los-angeles-megacity-carbon-project>
- [5] Verhulst, K. R., Karion, A., Kim, J., Salameh, P. K., Keeling, R. F., Newman, S., Miller, J., Sloop, C., Pongetti, T., Rao, P., Wong, C., Hopkins, F. M., Yadav, V., Weiss, R. F., Duren, R. M., and Miller, C. E.: Carbon dioxide and methane measurements from the Los Angeles Megacity Carbon Project – Part 1: calibration, urban enhancements, and uncertainty estimates, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 8313 – 8341, <https://doi.org/10.5194/acp-17-8313-2017>, 2017.
- [6] Federal Office for the Environment. Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2018, National Inventory Report. 2020. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/climate/state/data/climate-reporting/previous-ghg-inventories.html>

亚洲清洁空气中心一直致力于把知识转化为政策和行动，并开发了在线空气污染知识分享平台——空气知库，为政策制定者和大气污染治理相关领域从业者提供多种知识产品。目前，知库上已经有近千份空气质量
管理资料，涵盖研究报告、培训资料、政策分析、技术指南、国内外最佳实践经验等多个方面。

撰稿 姚 波 复旦大学大气与海洋科学系 研究员

任 歌 中国计量科学研究院 副研究员

策划 万 薇 亚洲清洁空气中心 空气质量项目主任

张伟豪 亚洲清洁空气中心 空气质量项目主管

高荣伟 亚洲清洁空气中心 实习生对本文亦有贡献



亚洲清洁空气中心中国办公室

北京市朝阳区秀水街 1 号建国门外外交公寓 3-41, 100600

邮箱: china@cleanairasia.org

电话 / 传真: +86 10 8532 6172

网址: www.allaboutair.cn www.cleanairasia.org