

城市区域碳排放测量反演研究国际进展

胡鹤鸣, 王 池, 张金涛

(中国计量科学研究院, 北京 100029)

摘要: 城市聚集了世界 50% 的人口和 70% 以上的碳排放, 然而, 每个城市的碳排放不确定度很大, 50% ~ 100% 的数据误差是很常见的。对温室气体浓度的时空分布特征及碳排放测量反演的基本思路进行了介绍。目前美国国家标准与技术研究院 (NIST) 正在资助开展若干个城市/城市群碳排放测量试点项目, 利用自上而下的方法, 基于温室气体浓度测量和精确的城市尺度大气输移扩散模式, 反演推算城市区域的碳排放通量。对 NIST 正在开展的研究进行了综述, 并对中国计量科学研究院未来在该领域的工作进行了展望。

关键词: 计量学; 城市碳排放; 温室气体; 浓度; 大气模式; 反演模型

中图分类号: TB94; TB99

文献标识码: A

文章编号: 1000-1158(2017)01-0007-06

International Research Overview of Inversion Approach of Carbon Emission Measurement in Urban Area

HU He-ming, WANG Chi, ZHANG Jin-tao

(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: Urbanization has concentrated over 50% of the global population and more than 70% of the carbon emissions. Uncertainties in carbon emissions are very large or unknown at the spatial scale of individual cities, and 50% to 100% errors are not uncommon. The temporal and spatial distribution of greenhouse gas concentration is introduced, and the basic idea of carbon emission inversion model is described. Current NIST funded studies in several cities using top-down approach to estimate carbon emissions. Based on measurement of greenhouse gas concentration and accurate dispersion models that can operate at the city scale, carbon emissions in urban area can be estimated by inversion method. NIST researches are summarized and future works in this field by NIM of China are in plan.

Key words: metrology; urban carbon emission; greenhouse gas; concentration; dispersion model; inversion model

1 引 言

根据政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第五次评估报告^[1], 过去的 130 年间人类的活动, 特别是使用煤、石油等化石燃料导致的温室气体排放的增加, 是 20 世纪中期以来全球气候变暖的主要原因。为了统一各国温室气体排放量的报告, IPCC 提供了国家温室气体清单指南^[2], 并为其中各个参数和排放因子提供了默认值, 供各国编制温室气体排放清单参考。然而, 由于排放因子等参数存在较大的不确定度, 燃料端统计等手段获得的国家碳排放数据存在较大的不确定度, 如刘竹等 2015 年发表在

《Nature》上的文章^[3]称, 我国煤炭排放因子比国际上的默认值要低大约 40%, 造成我国碳排放总量被大大高估。

人为排放会造成大气中温室气体浓度 (所占的体积比) 上升, 通过观测大气中的温室气体浓度变化可以反推碳排放量。此方法的核心是基于温室气体浓度数据和大气边界层内气象数据, 利用大气扩散传输模式和统计学模型, 来反演一定范围内的碳排放通量。针对不同的需求, 国内外相关机构开展了全球、区域以及城市等不同尺度范围内碳排放通量测量反演的研究工作。

世界上 50% 的人口和 70% 以上的温室气体排放均集中在城市区域。由于缺乏有效的测量方法,

收稿日期: 2016-05-10; 修回日期: 2016-10-25

基金项目: 国家科技支撑项目 (2013BAK12B01); 国家国际科技合作专项 (2012DFA7181)

作者简介: 胡鹤鸣 (1980 -), 男, 河北衡水人, 中国计量科学研究院副研究员, 博士, 研究方向为流量计量、低碳计量。Huhm@nim.ac.cn

准确评估一个城市的碳排放量很困难。温室气体排放清单中每个城市的排放量的不确定度很大,50%~100%的测量误差是很常见的。目前,美国和欧洲部分大城市正在开始城市范围的碳排放测量反演研究,通过监测温室气体的浓度,对统计获得的碳排放清单进行修正或者生成独立的碳排放通量。

2 温室气体浓度的时空分布特征

近地面大气中温室气体浓度直接受到局地排放源(或汇)和大气输运作用的影响,其时空分布变化特征包含了碳源、碳汇以及大气水平、垂直输运的演变信息。人类大部分活动几乎均处在大气边界层内,其造成的温室气体排放首先影响大气边界层中的浓度水平,进而通过大气的垂直输运(包括对流输运和湍流垂直混合),经由边界层进入对流层乃至平流层,同时在大气水平输移的作用下影响到整个大气圈中温室气体的浓度变化。

目前全球对大气温室气体浓度的观测集中在对流层中,主要采样和观测方式有:(1)瓶装采样;(2)地面在线观测(包括高塔);(3)船舶航海观测;(4)航空观测(包括飞机、探空气球、飞艇等)。国际上很多合作组织负责运行和维护着多个观测项目计划,如美国国家海洋和大气管理局(NOAA)运行的 Globalview 项目^[4],在多个国际实验室测量得到的 CO₂、CH₄ 和 CO 浓度数据(包括地面、船舶、飞机等不同载体的观测数据)的基础上,经过同化、时间拟合等数据处理后得到一个全球范围的统一数据集,成为碳循环模拟研究常用的重要工具。

图 1 显示的是全球不同纬度 CO₂ 浓度分布的年际变化^[4],X 轴为 2000 年到 2009 年,Y 轴为纬度。可以非常清晰地看到,北半球比南半球 CO₂ 浓度要

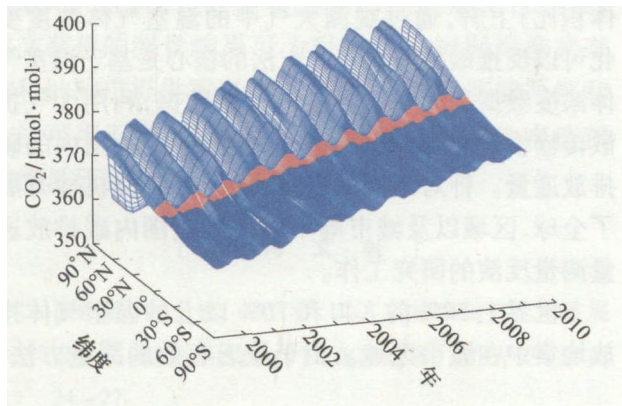


图 1 全球 CO₂ 浓度分布的年际变化

高,冬季比夏季浓度要高;北半球的峰谷变化要远大于南半球,差异主要在于峰值浓度,谷值浓度则差异不大,体现了 CO₂ 从北半球到南半球的输移过程。

图 2 为某城市郊区测点利用系缆气球测量的 CO₂ 浓度垂直分布特征^[5],可以说明大气对 CO₂ 垂直输运扩散的能力。由图可以看出,由于日间大气垂直方向的掺混比较均匀,所以 CO₂ 浓度垂直分布也比较均匀;夜间大气比较稳定,所以地面附近 CO₂ 浓度明显增大。

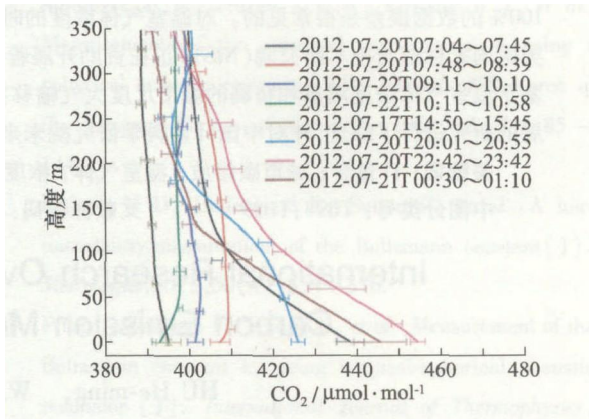


图 2 某城郊测点 CO₂ 浓度垂直分布的日变化

3 碳排放测量反演的基本思路

任何反演问题均是建立在正演问题基础之上。碳排放的正演问题为:在大气参数(风速、湍流度等)的驱动下,浓度测点附近已知的碳排放通量向测点位置输运,可以利用大气扩散模式计算测点浓度的时间序列。反演问题则为:实测若干点的浓度时间序列,结合已知的大气参数变化,反推一定区域内碳排放的通量分布和大小。反演问题的主要困难在于有限的测点数量,导致反演结果的不唯一性。因此在求解反演问题时,要根据已有资料,尽量多地引入先验信息、附加约束条件,以减少解的不确定性。

碳排放通量 e_j 与测点浓度 c_i 之间的关系可以表达为

$$\sum_j T_{ij} e_j = c_i - B \quad (1)$$

式中: T_{ij} 为碳排放通量对测点浓度的贡献率,单位为 $\times 10^{-6}/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$; B 为背景浓度。测点浓度 c_i 与背景浓度 B 的差异可以认为是排放所导致,背景浓度需要进行仔细地测量与模化。

碳排放反演首先需要利用大气动力学模式计算一定空间分辨率的大气参数变化过程,模式输入条件包括物理模型的选择及其参数、地形及土地利用

类型数据、气象初始/边界条件、气象观测同化数据等。然后在大气参数的基础上,利用拉格朗日粒子扩散模型,计算各测点附近不同时刻不同位置通量的贡献率。最后再引入测点测到的浓度数据,与先验的统计方法得到的碳排放通量,利用统计学优化

模型(比如 Bayesian 模型等),在两者的误差协方差估计条件下计算后验的碳排放通量及其不确定度。在浓度测点有限的条件下,相当于对先验通量进行修正,因此,很难脱离先验通量直接准确地得到独立的碳排放通量。碳排放测量反演技术框图见图 3。

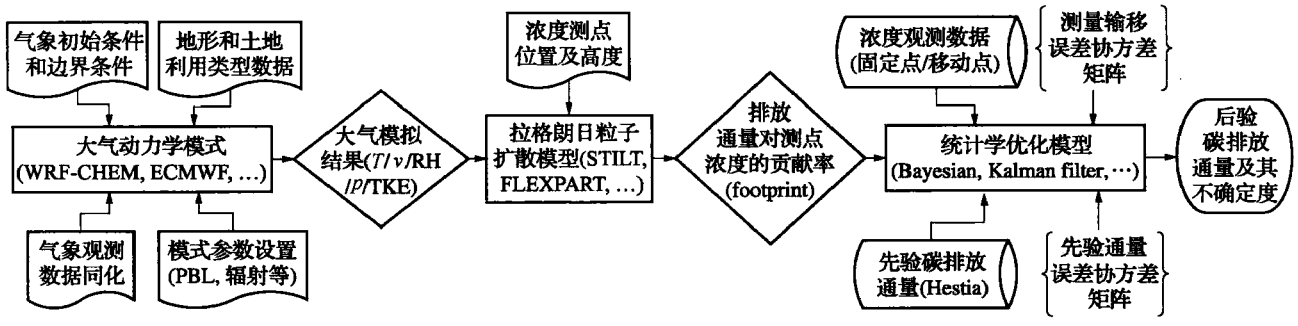


图 3 碳排放测量反演技术框图

4 美国城市碳排放反演技术测试平台

美国国家标准与技术研究院(NIST)资助了若干城市测试平台,开发新的测量技术和数据分析技术,监测城市的碳排放量并确定其来源。每个城市的碳浓度测量网络均产生海量数据,这些数据可以揭示城市碳排放方式的细节,也可以用来验证温室气体排放反演方法的有效性。

4.1 印第安那波利斯实验项目(INFLUX)

INFLUX 以印第安那波利斯为实验城市,研究自上而下的城市温室气体排放量测量的新方法,评估其准确度水平,并与自下而上的方法比较、优化,实现两者之间的一致性。印第安那波利斯为内陆城市,地形平坦,气象条件简单,而且周围没有其他大城市影响背景浓度,作为第一个试点城市实施起来相对比较容易。

4.2 洛杉矶特大城市项目(LA Megacity)

洛杉矶靠海环山,地形和气象条件远比印第安那波利斯复杂,为复杂条件下的大气扩散模型和数据反演提供了测试条件,并成为多种测量方式(包括碳卫星、激光雷达等)的实验平台。

4.3 东北走廊地带实验项目(Northeast Corridor Test Bed)

东北走廊地带地形和气象条件的复杂度在以上两者的中间程度,但由城市扩展到城市带。其特色在于利用高精度浓度测点和低成本浓度测点结合组网的方式,反演推算碳排放通量的位置和大小。目前

工作集中在华盛顿及巴尔的摩地区,未来会扩展到包含费城、纽约、波士顿等城市的美国东北部走廊地带。

这些测试平台中主要利用了基于固定测点(主要是测量塔)的测量反演方法,也辅以基于移动测点(车载平台和机载平台等)的通量计算分析方法。

5 基于测量塔数据的碳排放通量反演方法

5.1 高分辨率碳排放统计数据库(Hestia)

为了更清晰地掌握城市区域碳排放的来源和动态变化,美国亚利桑那州州立大学(ASU)与普渡大学在 INFLUX 项目的支持下共同开展了 1 项名为 Hestia 的研究^[6]。他们利用自下而上的统计方法,对公共数据库(例如地方空气污染报告、电厂发电数据和车辆数据库等)进行数据挖掘,操作交通状况的模拟运算,并对每栋建筑物的能源利用情况建模,建立了不同来源的碳排放模型;可以显示某个街区甚至某个建筑物每小时的碳排放通量动态结果,用立体化显示方式描绘整个城市中的碳排放情况,并标识出碳排放的具体地点、时间及产生原因。Hestia 展示的温室气体排放源的高分辨率地图中,可以跟踪温室气体排放情况,找到减少排放量的最经济的方法,帮助政府制定最有效的温室气体排放规则。

Hestia 已经在美国印第安那波利斯市得到运用,图 4 给出了 2002 年全年该市的碳排放图景,不同颜色代表不同的排放强度,排放强度最大的点为它的火电厂。Hestia 数据的空间分辨率约为 200 m,

时间分辨率为 1 h,而且划分为民居、商业建筑、工业生产、电力、机场、路面交通和非路面交通等多个排

放来源,数据容量巨大,可以分析城市碳排放的规律和各种相关关系。

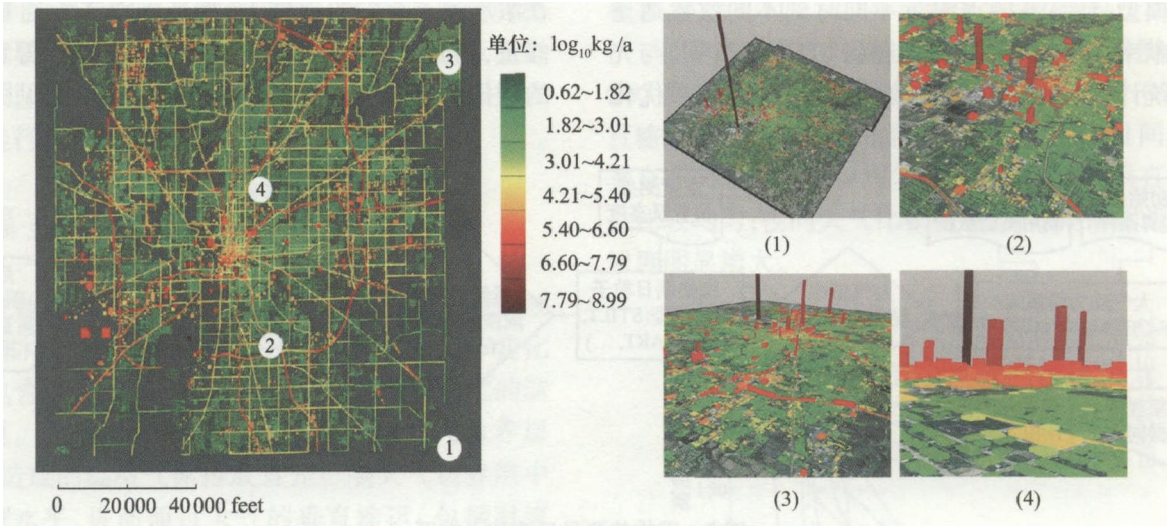


图 4 2002 年印第安纳波利斯市化石燃料 CO₂ 总排放量

Hestia 项目目前正在洛杉矶、凤凰城与盐湖城等更多的城市中推行。其目标是绘制出美国人口最密集城市的温室气体排放情况,探索城市的可持续发展路径,研究投资投放在何处可以取得最大的综合效益等。除了城市层面的行动外,该项目还计划建立 1 个全球城市网络,通过探讨方法、共享数据和推广最佳实践等,最终得出削减全球温室气体排放的统一框架。

5.2 城市区域碳浓度的测量

宾夕法尼亚州立大学(PSU)负责运行和维护印第安纳波利斯市的温室气体浓度测量网络,包括 CO₂、CH₄ 和 CO 这 3 种温室气体。该测量网络包含 10 多个测量塔,其分布见图 5,大部分布置在城市中心区域,少部分布置在城市的外围区域用来监测和分析背景浓度。这些测量塔利用 Picarro 公司生产的基于光腔衰荡法(CRDS)的痕量浓度仪器,测量不同高度处的温室气体浓度,实施了一系列的数据质量控制措施,包含定期的标准气体校准等,其 CO₂ 浓度的准确度宣称可达到 0.1 $\mu\text{mol/mol}$ 。

城市碳排放带来的温室气体浓度的增量相对其背景浓度而言是非常小的,所以碳排放通量反演方法对浓度测量系统偏差的要求非常高,很小的测量偏差也不可忽略。图 6 为 2013 年秋季 2 个月内其测量塔最高采样点测到的 CO₂ 浓度平均值,如果将 1 号测量塔的测量结果作为背景浓度值,最大的浓度增量也仅有 4.2 $\mu\text{mol/mol}$,0.1 $\mu\text{mol/mol}$ 的测量偏差已经超过其增量的 2% 了。利用如此稀疏的测量塔去反演整个城市的碳排放量,测点浓度的准确

度要求之高可想而知。

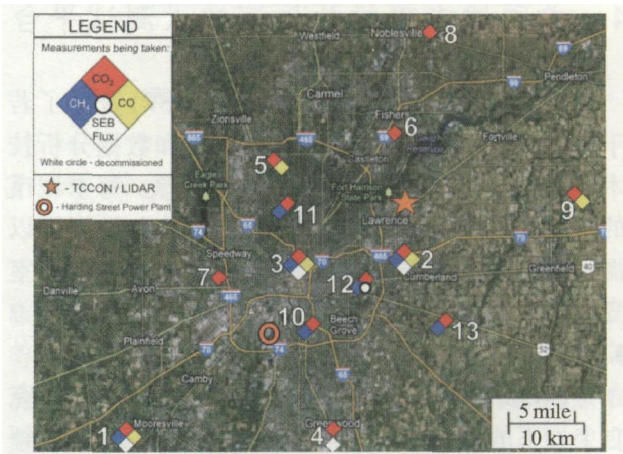


图 5 INFLUX 测量塔位置分布图

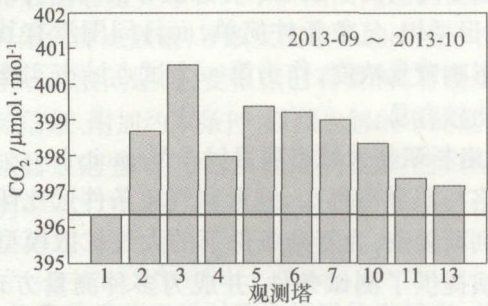


图 6 观测塔最高采样点测到的 CO₂ 浓度

5.3 通量对浓度的贡献率

通量对浓度的贡献率(footprint)是基于大气参数进行计算得到,他们采用了天气研究预报模型(WRF)模式。WRF 模式为美国国家大气研究中心(NCAR)、美国国家大气与海洋管理局(NOAA)等

单位联合开发的新一代中尺度预报模式和同化系统,采用高度模块化、并行化和分层设计技术,集成了迄今为止中尺度模式方面的先进研究成果。WRF 模式重点考虑从云尺度到天气尺度等重要天气的预报,水平分辨率重点考虑 1~10 km。为了更好地体现大气边界层的结构和湍流特性,他们还开展了激光雷达测量边界层参数的实验,并把这些数据同化到其大气参数的计算中。

大气模式考虑的是中尺度问题,无法体现城市内部建筑物等的精细影响。为了提高大气流动参数计算的精度,NIST 将大尺度模型和精细尺度模型结合起来,把火灾动力学模型(FDS)作为天气研究预报模型

(WRF)的子网格模型,开发了 FDS-WRF 耦合模型,用于印第安纳波利斯两市的区域内大气参数的计算。

基于大气参数,他们利用拉格朗日粒子扩散模型 STILT 进行通量贡献率的计算。STILT 为一种基于随机游走方法模拟湍流扩散的计算模型,在反向时间方向上模拟浓度测点释放的粒子轨迹,用于获得测点附近不同位置通量对浓度的贡献率。

图 7 给出了 5 天平均和 2 个月平均的通量贡献率^[7],可以看到仅有测点上风向通量对测点浓度有贡献,长时间的平均将使得测点浓度体现测点周围的碳排放信息。此外,采样高度不同测点覆盖的范围也不同,采样点越高覆盖的范围越大。

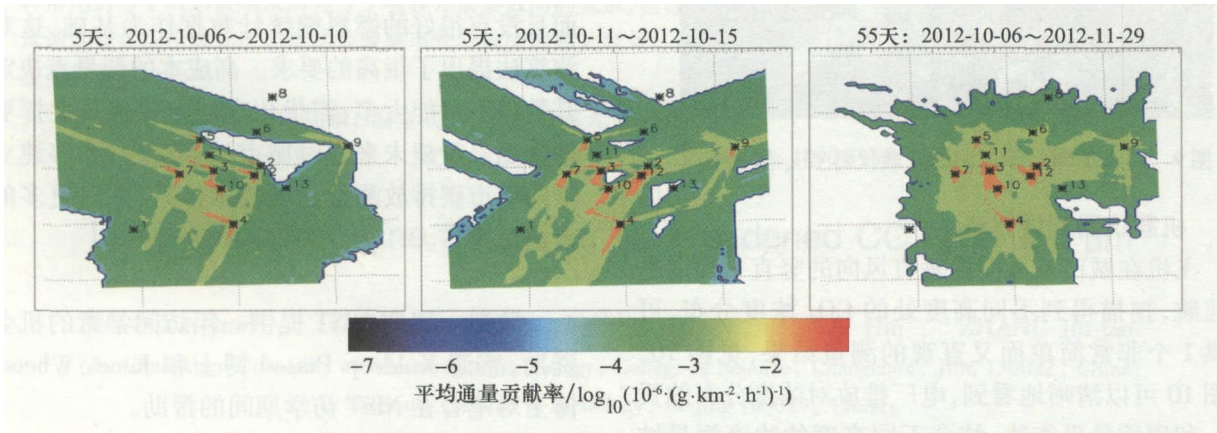


图 7 印第安纳波利斯 5 天和 2 个月内的平均通量贡献率

5.4 反演模型的修正结果

由于测点数量的限制,目前反演模型需要以碳排放通量统计数据(如 Hestia 数据)为先验值,对其进行核查和修正。图 8 为印第安纳波利斯市的先验

通量和后验修正结果的比较^[7],修正的幅度依赖于浓度测量值和先验通量哪一个置信度更高,具有较大的主观性。研究人员也在研究不同的反演方法,希望逐渐降低甚至摆脱对先验数据的依赖。

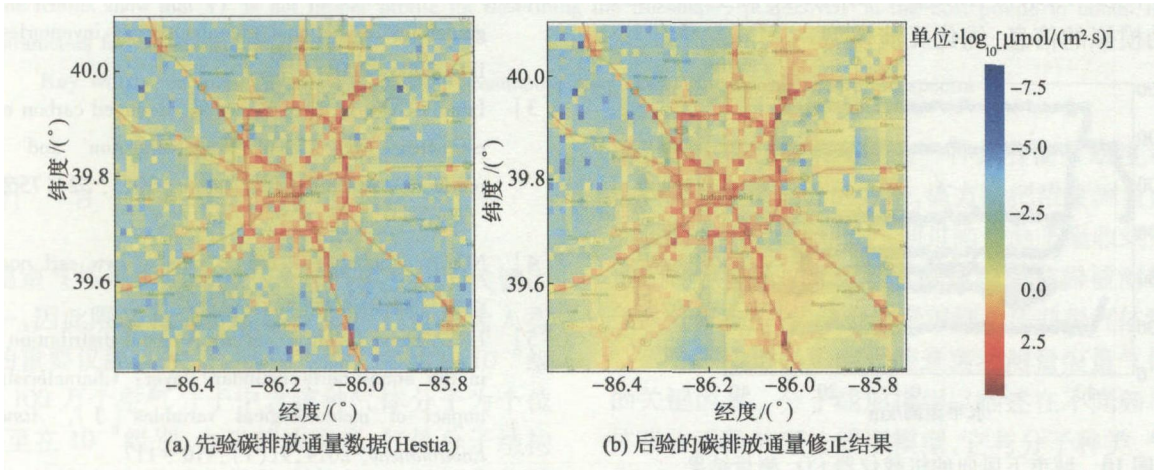


图 8 碳排放通量测量反演模型的调整结果(INFLUX)

6 基于移动平台的碳排放测量方法

除了利用测量塔进行浓度测量并反演计算外,

INFLUX 项目还采用了汽车和飞机等移动平台进行碳排放的测量。

6.1 车载仪器测量方法

NIST 利用车载的 CRDS 设备在垃圾填埋场附

近道路进行了巡航测量,获得了各路段上的 CH_4 浓度分布,见图 9,图中可以明显发现浓度峰值在垃圾填埋场的下风向一定范围内。利用相应的气象数据和假设的排放量进行正向计算,得到了一致性很好的结果。



图 9 垃圾填埋场下风向的车载仪器 CH_4 测量结果

6.2 机载仪器测量方法

飞机在城市下风向沿垂直风向的竖直平面内进行巡航,扫描得到不同高度处的 CO_2 浓度分布,可提供 1 个非常简单而又直观的测量结果,见图 10。由图 10 可以清晰地看到,电厂排放对浓度分布的贡献。利用质量平衡法,结合不同高度的浓度测量结果和背景浓度的差异,可以估算排放量,大致具有 50% 的不确定度。其数据显示机载仪器浓度测量值反算的碳排放量略高于电厂连续监测报告值。由于浓度数据采样量受到一定的限制,且无法体现时间上的不同步,未来可在质量平衡法的基础上,融入大气流动模拟的信息,优化反演模型。

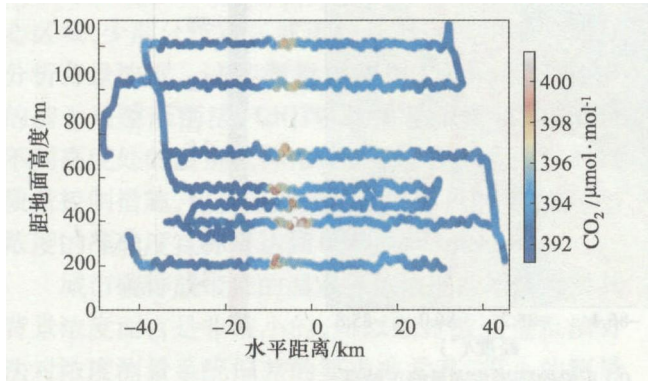


图 10 城市下风向的机载仪器 CO_2 测量结果

7 结 语

中国计量科学研究院目前正在规划开展城市碳排放测量反演技术研究和城市试点工作,在

美国 NIST 测量反演技术和经验的基础上,与国内相关领域优势单位合作开展研究,形成 1 套可在国内城市推广应用的测量反演技术。计划在试点城市布设温室气体浓度的监测网络,利用高、中、低 3 种精度的测量设备进行固定点组网,并辅以车载测量、可控气球测量等移动点观测,获得全方位、立体化的浓度分布及变化数据;结合气象观测数据及大气扩散模式,利用统计学优化模型,反演推算试点城市内具有一定时间和空间分辨率的碳排放通量。

城市碳排放量的评估是一个非常复杂的问题。利用有限的采样数据反演整个城市内的碳排放量,而且没有很好的燃料端统计数据作为基础,这对反演算法提出了很高的要求。高成本的测量点决定了其数量不可能太多,需优化布置位置使其发挥更好的作用。希望未来通过城市试点工作,能够建立完整的城市碳排放测量反演技术体系,并向更多的城市进行推广。

致谢 感谢 NIST 提供一年访问学者的机会和资助,感谢 Kuldeep Prasad 博士和 James Whetstone 博士对笔者在 NIST 访学期间的帮助。

[参 考 文 献]

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis summary for policymakers [R]. IPCC fifth assessment report, 2013.
- [2] Paustian K, Ravindranath N H, Amstel A R. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. IPCC2006, 2006.
- [3] Liu Z, Guan D, Wei W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China [J]. Nature, 2015, 524(7565):335-340.
- [4] NOAA. Globalview [DB]. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/globalview/>, 2016-05-08.
- [5] Li Y, Deng J, Mu C, et al. Vertical distribution of CO_2 in the atmospheric boundary layer: Characteristics and impact of meteorological variables [J]. Atmospheric Environment, 2014, 91(1):110-117.
- [6] Gurney K R, Razlivanov I, Yang S, et al. Quantification of fossil fuel CO_2 emissions on the building/street scale for a large U.S. city [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(21):12194-12202.
- [7] Lauvaux T, Miles N, Davis K, et al. Urban inversions of carbon sources and sinks [R]. INFLUX, 2014.