

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0201

危浩 朱云 许嘉钰 等. 2017. 特种污染物排放源强反演及可视化分析工具研发及 Hg²⁺ 分析示例 [J]. 环境科学学报, 37(2): 512-519

Wei H, Zhu Y, Xu J Y, et al. 2017. Development of a GIS-based visualization tool for inverse computation of pollutant emission rates and a pilot study case of Hg²⁺ [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 37(2): 512-519

特种污染物排放源强反演及可视化分析工具研发及 Hg²⁺ 分析示例

危浩¹ 朱云^{1*} 许嘉钰² 余斌³ 王书肖² 付学吾⁴ Lin Chejen⁵ 张磊² 杨文尉¹ 杨再东¹

1. 华南理工大学环境与能源学院 广东省大气环境与污染控制重点实验室 广州 510006
2. 清华大学环境学院 北京 100084
3. 广州市环境监测中心站 广州 510030
4. 中国科学院地球化学研究所 贵阳 550000
5. Center for Advances in Water and Air Quality, Lamar University, Beaumont, TX 77710-0088

收稿日期: 2016-03-31 修回日期: 2016-04-30 录用日期: 2016-05-16

摘要: 研发了特种污染物排放源强反演及可视化分析工具, 集成利用了 WRF 气象预报结果及 HYSPLIT 前向轨迹规划外场监测点, 调用 CALPUFF 模型基于监测数据和对应气象条件快速反算源强并模拟得到排放影响范围, 并使用开源 GIS 平台进行可视化分析. 同时, 选取大气背景浓度极低的活性气态汞 (Hg²⁺) 为目标, 以李坑垃圾焚烧厂不稳定 Hg²⁺ 排放为监测主体. 结果表明, 基于下风向监测数据反演的源强与实测的烟气 Hg²⁺ 含量有着较好的一致性 ($R^2 = 0.801$). 该工具可作为特种大气污染事故应急辅助决策新手段, 提供包含非稳态排放源强、污染扩散影响范围等信息在内的关键依据.

关键词: 特种污染物; 源强反演; 可视化分析; CALPUFF; 活性气态汞

文章编号: 0253-2468(2017)02-512-08 中图分类号: X51 文献标识码: A

Development of a GIS-based visualization tool for inverse computation of pollutant emission rates and a pilot study case of Hg²⁺

WEI Hao¹, ZHU Yun^{1*}, XU Jiayu², YU Bin³, WANG Shuxiao², FU Xuewu⁴, LIN Chejen⁵, ZHANG Lei², YANG Wenwei¹, YANG Zaidong¹

1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Atmospheric Environment and Pollution Control, College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006
2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084
3. Guangzhou Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510030
4. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550000
5. Center for Advances in Water and Air Quality, Lamar University, Beaumont, TX 77710-0088

Received 31 March 2016; received in revised form 30 April 2016; accepted 16 May 2016

Abstract: An innovative GIS-based visualization tool for inverse computation of pollutant emission rates is developed in this study. Using endpoint data obtained by the HYSPLIT forward trajectory model and the air dispersion data obtained by the CALPUFF model both driven by WRF meteorological forecast data, the GIS-based tool can visualize and inversely calculate the pollutant emission rates from stacks. To demonstrate the effectiveness of this

基金项目: 广州市 2014 年污染防治新技术、新工艺开发项目 (No.x2hjB2150020); 广州市科技计划项目 (No.2014J4100089); 广东省省级科技计划项目 (No.2014A050503019); 2016 年度国家重点研发计划课题 (No.2016YFC0207606)

Supported by the Guangzhou New Technology of Pollution Prevention and Development Projects in 2014 (No.x2hjB2150020), the Science and Technology Project of Guangzhou (No.2014J4100089), the Science and Technology Project of Guangdong Province (No.2014A050503019) and the 2016 National Key Research and Development Subjects (No.2016YFC0207606)

作者简介: 危浩 (1992—), 男, E-mail: 297898467@qq.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: zhuyun@scut.edu.cn

Biography: WEI Hao (1992—), male, E-mail: 297898467@qq.com; * Corresponding author, E-mail: zhuyun@scut.edu.cn

tool, emissions of Hg^{2+} from Likeng waste incineration plant in Guangzhou, China was used as a test case since the background concentration of Hg^{2+} is extremely low in air. The case study results show that the estimated emission concentrations of Hg^{2+} are consistently agreeable with the on-site monitoring data in the stack plume ($R^2=0.801$). This tool provides a new modeling method with key information (e.g. pollutant emission rate and air dispersion area) for decision support of emergent pollutant emission control.

Keywords: special pollutants; emission estimate; visual analysis; CALPUFF; Hg^{2+}

1 引言(Introduction)

随着我国核工业、石化等行业的高速发展,特种高危污染物排放风险剧增,若处置不当就会对人体健康及社会经济造成严重损害。特种污染物是大气中不常见或背景浓度很低的毒害污染物(如核化污染物、有毒有害气体等),这类气体或气溶胶(如氯气、大气汞、放射性气溶胶)在较低浓度时即可对人体产生毒害,达到一定浓度时将产生严重的急性毒性或高致死率(Busby *et al.*, 1995; Yunsur *et al.*, 2009; Jiang *et al.*, 2006)。空气中累积达到可损害人体健康剂量的特种污染物,主要源于污染物泄露或突发污染事故。事故发生时,人们往往可以快速定位事故排放源位置,但受制于现场环境的复杂性,难以直接测量排放源强,更难以依据污染物扩散浓度阈值,快速决策包含人群疏散范围在内的应急措施。突发污染事故下快速估算特种污染物源强,对于突发事故应急管理具有十分重要的意义,可为事故应急工作开展提供重要的科学依据。目前,国内外估算特种污染物源强是通过数学模型与计算机结合的方法(Zheng *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2009),如 Ning 等(2012)利用混合遗传算法计算核事故源强,赵培等(2013)基于 Bayes 推断理论的 MCMC 抽样方法对氯气泄漏源的泄漏强度进行反演。这些方法可为应急救援的源强估算提供初始数据参考;但事故排放源强具有非稳定排放特征,且在估算出排放源强后,用户往往期望能结合地理信息系统(GIS)快速得到污染物浓度分布现状及发展趋势,以进一步确定包含人群疏散范围在内的各项应急措施。为此,本课题组研发了特种污染物源强反演及可视化数据分析工具,期望能实现特种大气污染源的排放强度估算,并与 GIS 融合模拟分析其扩散影响的空间尺度(谢颖斯, 2014)。

汞是一种生物蓄积性且神经毒性极强,可经由大气循环传播的全球性重金属污染物(冯新斌等, 2009)。大气中的汞主要有气态原子汞或气态单质汞(GEM, Gaseous Elemental Mercury)、活性气态汞(RGM, Reactive Gaseous Mercury, Hg^{2+})和颗粒态汞

(PBM, Particulate Bound Mercury) 3 种形态。大气中的 RGM(Hg^{2+})含量很低,主要源于工业排放。工业点源排放的 Hg^{2+} 容易在周边沉降、积累,对局地环境有着极强的毒害风险(Shao *et al.*, 2012),是受到普遍关注的典型特种污染物。垃圾焚烧厂烟气中排放的 Hg^{2+} 含量高(刘明等, 2013),且主要源于焚烧进料所含的汞(如水银温度计、荧光灯管、含汞废旧电池等),具有排放浓度波动大的特征,可以用来初步验证本文研发的特种污染物排放源强反演及可视化分析工具的有效性。本文以我国最大的垃圾焚烧厂之一的广州第一资源热力电厂(又名广州李坑垃圾焚烧厂,以下简称李坑)为应用案例,利用 WRF-HYSPLIT 气象预报-前向轨迹来选择观测点,定点进行空气质量和垃圾焚烧烟气中汞的分形态观测,使用 CALPUFF 进行源强反演和扩散模拟,并利用工具中集成的 GIS 来可视化分析 Hg^{2+} 的扩散影响范围。

2 研究方法(Methodology)

2.1 功能框架

特种污染物排放源强反演及可视化分析工具主要由“气象轨迹模拟”、“排放源强反演”、“影响区域分析”3 大功能模块组成,图 1 为工具的功能框架。上述 3 个模块相对独立运行,在实际使用时可由数据流串联成一个整体。其中,“气象轨迹模拟”为“排放源强反演”所需的实时监测数据提供布点参考,“排放源强反演”的结果为“影响区域分析”提供

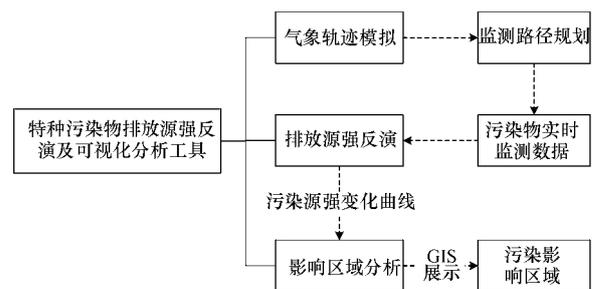


图 1 特种污染物排放源强反演及可视化分析工具功能框架
Fig.1 Functional framework of GIS-Based visualization tool for inverse computation of special pollutant emission rate

污染源排放输入,“影响区域分析”网格化模拟结果是 GIS 可视化分析的基础.

2.2 技术路线

突发大气环境污染事故发生时,为快速、有序地开展事故应急工作,环保应急部门需要规划合理的监测路径,反演污染物排放源强,得到污染物浓度分布现状及发展趋势,进而实现影响区域动态分析,为事故的应急驰援提供科学决策依据(王磊等,2012).遵循上述大气环境应急数据获取环节,本研究采用 WRF 进行气象预报、HYSPLIT 攫取前向轨迹(Ngan et al.,2015; Skjoth et al.,2013),利用 CALPUFF (Cui et al.,2011; Abdul-Wahab et al.,

2011) 反算特种污染物大气排放源强并模拟扩散浓度范围.图 2 技术路线中,气象轨迹模拟模块的 HYSPLIT 模型直接利用 WRF 气象预报结果得到排放源前向轨迹,并可在 GIS 中根据用户设定的时间范围进行动态更新,从而为监测布点提供科学依据.监测车所测污染物实时浓度输入到排放源反演模块中,结合观测现场实时气象条件,可反算得到动态变化的源强.源强反演结果输入到影响区域分析模块,与 WRF 模型模拟所得现状及预报气象输出结合,利用 CALPUFF 模拟得到特种污染物的扩散浓度变化,进而利用集成的 GIS 进行影响范围的可视化分析.

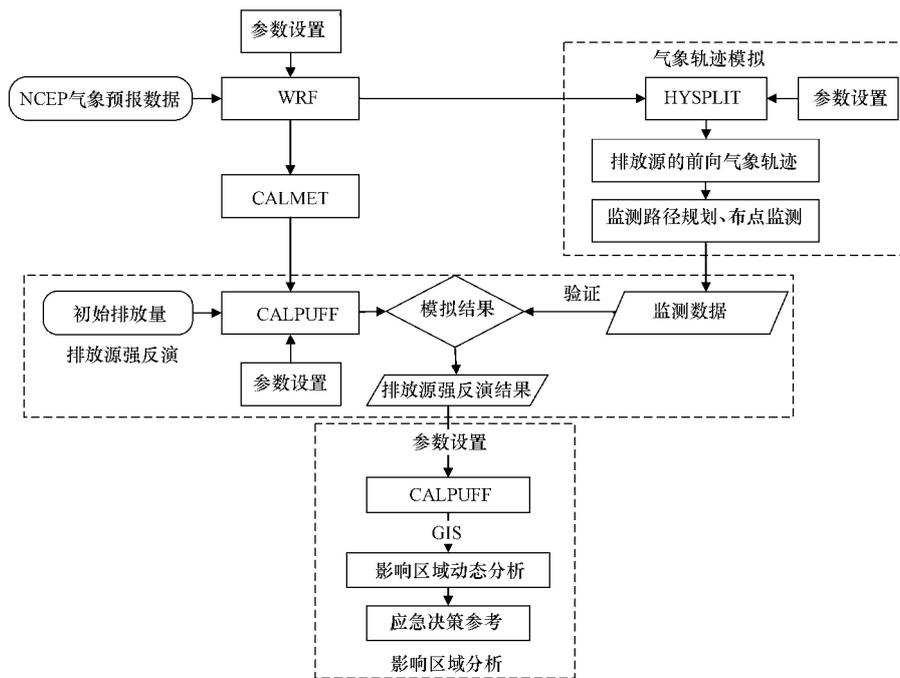


图 2 特种污染物排放源强反演及可视化分析工具技术路线

Fig.2 Technical flowchart of GIS-Based visualization tool for inverse computation of special pollutant emission rate

2.3 源强反演方法

2.3.1 模拟区域 为分析李坑污染源对附近区域的污染情况,将模拟区域根据广州市分区划分为花都区、从化区、增城区、白云区、黄埔区、天河区、越秀区、荔湾区、海珠区、番禺区,模拟区域如图 3 所示,以李坑(图中“▲”)为大致中心,经纬度方向均跨 44 km,图中“▲”位置为李坑烟囱排放点位(113.3388°E,23.27015°N).

2.3.2 模型选型及配置 WRF (The Weather Research and Forecasting Model) 是广泛应用于数值天气预报、气象模拟和数据同化的新一代中尺度气

象预报模式和同化系统(常鸣等,2014).驱动数据使用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的逐 6 h 的全球气象卫星数据,并使用对应时段的探空观测数据和地面站观测数据同化,气象模拟区域覆盖 CALPUFF 网格,采用兰伯特投影,两条标准纬线分别为 25°N 和 40°N,中心经纬度为 113.347°E、23.225°N.模拟时间段为 2014 年 5 月 26 日 0:00 (UTC+8) 至 5 月 27 日 24:00 (UTC+8).

HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) 是广泛应用于大气污染物传输及扩散轨迹模拟的专业模型(霍庆等,

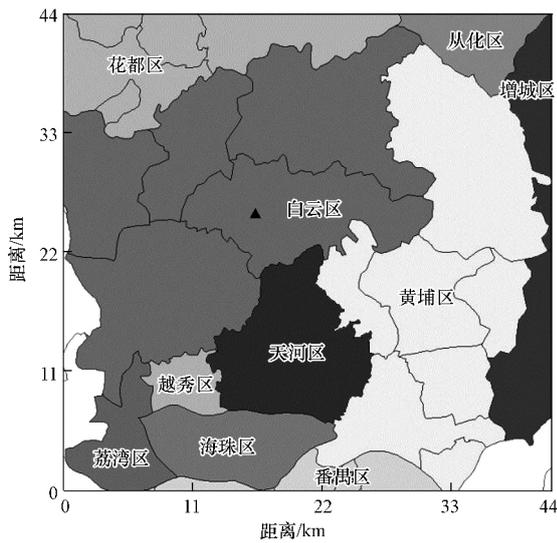


图3 模拟区域

Fig.3 Simulation domain

2012b). 输入数据为 WRF 气象预报结果, 轨迹模拟方式为前向轨迹模拟, 起始时间为 2014 年 5 月 26 日 0:00 (UTC+8), 轨迹推算时间为 24 h, 基准点位为李坑烟囱排放点位。

CALPUFF 是 USEPA 推荐用于模拟污染物扩散的主要模式, 也是我国推荐的环评导则模式之一 (伯鑫等, 2009), 近年来在特种大气污染源强反演及扩散模拟应用中取得了较好的效果 (Ghannam *et al.*, 2013; 李沁怡等, 2012). CALPUFF 考虑了复杂地形的影响、水上传输、海岸的交界影响、建筑物的下沉影响, 以及干湿沉降及简单的化学转化, 以平流扩散的方式模拟从源排放出来的污染物, 可以估算出在预设点的浓度和沉降量 (Zhang *et al.*, 2015). CALPUFF 模式系统包括 CALMET 风场诊断模块、CALPUFF 高斯烟团模块和 CALPOST 后处理模块 3 部分. CALMET 中模型域投影方式、中心经纬度与标准纬线设置与 WRF 一致, 北偏为 18 km, 东偏为 20 km, 模型域气象网格划分为 44×44 (经向 \times 纬向), 分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, 垂直层数为 10, 高度分别为 20.0、40.0、80.0、160.0、320.0、640.0、1000.0、1500.0、2200.0、3000.0 m (Hao *et al.*, 2007). 输入数据为同化后的 WRF 气象预报结果. CALPUFF 中网格参数设置与 CALMET 一致, 气象场输入文件为 CALMET 处理结果, 污染源输入为含有李坑坐标、烟囱高度 (m) 及直径 (m)、海拔高度 (m)、烟气排放温度 (K) 及排放速率 ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$) 等相关信息的文件。

2.3.3 源强反演 在具有空气中污染物监测数据

的条件下, 可以根据 WRF 数值预报结果及 CALPUFF 模拟计算结果, 结合环境监测数据反向估算源项释放率 (陈晓秋等, 2012). 源强反演方法主要是利用一定气象条件下的空气质量监测值成比例模拟反算污染物排放源强 (李航等, 2013). 计算公式 (1) 中假设空气中污染物背景浓度为零, 因此, 仅适用于背景浓度很低的特种污染物. 监测数据时间与对应的源排放时间关系如公式 (2) 所示. 根据公式 (2) 计算出与监测数据对应的源排放时间, 以排序后的最早时间作为起始时间并输入假设的初始排放量 (Q_m) 至 CALPUFF, 得到其模拟值 (C_m), 利用公式 (1) 求出该监测数据所对应的实际排放源强 (Q_s), 按源排放时间的先后顺序逐个对监测数据进行源强反演, 即可得到动态变化的源强。

$$Q_s = \frac{Q_m \times C_s}{C_m} \quad (1)$$

式中 Q_s 为实际排放源源强 ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$), Q_m 为排放源的初始排放量 (本文假设为 $10^3 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$), C_s 为实际监测点污染物浓度监测值 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), C_m 为根据初始排放量模拟得到同一监测点所在网格内污染物浓度平均值 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$).

$$t_s = t - \frac{d}{v \times \cos\left(\frac{\pi}{180}(\theta_1 - \theta_0)\right)} \quad (2)$$

式中 t_s 为源强反演所能检测到的最早排放时间 (s), t 为监测数据的监测时间 (s), d 为监测数据坐标点到排放源的距离 (m), v 为监测数据的风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), θ_0 为监测数据的风向 ($^\circ$), θ_1 为监测数据坐标点对于排放源的方位角 ($^\circ$), 若监测数据中风向与其对于排放源的方位角相反, 则将该监测数据剔除。

2.4 监测验证方法

排放源下风向最大落地浓度处的观测值可以相对较好地地表征污染源对区域环境空气质量的影响 (王峰等, 2008), 利用最大落地浓度点的监测值反算的排放源强不确定性也较小. 大气汞分形态在线分析仪 (Tekran 2537A+Tekran 1130+Tekran 1135) 调试至稳定运行耗时 1 d 以上, 仅适用于定点观测. 因此, 本研究选择预报 1 d 内, 以恒定排放模拟得到的 Hg^{2+} 最大落地浓度点 ($113.371335^\circ \text{E}$, 23.292428°N) 为李坑排放烟气中汞的分形态外场观测位置. 由图 4 所示的前向轨迹可以看出, 5 月 26 日李坑主要风向为西南风向, 该厂排放的 Hg^{2+} 主要往东北方向

扩散,图中“▲”为排放烟囱位置,星号图标位置为工具模拟所得 Hg^{2+} 26 日 0:00—24:00 平均最大落地浓度点.其他常规大气污染物和气象观测数据由

广州市环境监测中心站提供,大气汞分形态监测数据由中国科学院地球化学研究所提供,污染源数据分形态监测数据由清华大学提供,具体见表 1.

表 1 不同测点处大气汞监测数据来源

Table 1 Sources of atmospheric mercury monitoring data at different points

测点位置	监测单位	采样及分析方法
李坑下风向 Hg^{2+} 最大落地浓度点 (113.371335°E, 23.292428°N)	中国科学院地球化学研究所	高时间分辨率大气汞形态在线分析仪(Tekran 2537A+Tekran 1130+Tekran 1135)(付学吾等,2011).采样周期为 1 h
李坑排放烟囱烟气出口处 (113.3388°E, 23.27015°N)	清华大学	美国试验材料学会(ASTM) 的 D6784 标准方法(Ontario Hydro Method, 简称 OH 方法(Kellie <i>et al.</i> , 2004)).烟气样品吸收液的提取液使用 F732-V 智能型测汞仪进行分析测定.采样周期为 2 h



图 4 气象轨迹分析结果

Fig.4 Result of meteorological trajectory analysis

2.5 开发和运行环境

软件开发平台选用主流 Windows 平台应用程序集成开发环境 Microsoft® Visual Studio 2013,开发语言为 C# 4.0, GIS 平台为开源 GIS 类库 DotSpatial. 系统运行操作系统平台为 Windows XP 及以上版本, 软件运行框架为 Microsoft® .NET Framework 4.0.

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 排放源强反演结果验证

李坑排放烟气中 Hg^{2+} 监测值为 OH 法测定结果. Hg^{2+} 源强反演结果由“排放源强反演”模块基于

大气汞形态在线分析仪监测结果和实时气象条件反算得出.图 5 中两种方法得到的浓度对比结果显示,其整体变化趋势相似,可决系数可达 0.801,表明“排放源强反演”能较好地基于下风向监测值反算得到排放源源强变化特征.图 5 中计算得到反演法 Hg^{2+} 24 h 平均值为 $7.991 \mu g \cdot m^{-3}$, OH 法 Hg^{2+} 24 h 平均值为 $11.525 \mu g \cdot m^{-3}$,反演低估相对误差为 -30.69% .造成排放源强低估有以下原因: 污染物最大落地浓度位置受气象条件影响(刘春莉等, 2006), 风速、风向等因素的改变导致定点监测位置偏离最大落地浓度点,使得外场观测值小于实际污

染物浓度; Hg²⁺ 化学形态及其性质复杂, 目前还未有研究完全分析清楚其转化过程, 本文验证试验过程假设了在近距离的局部, 其形态未发生转化, 但实际上扩散过程中 Hg²⁺ 较高的水溶性、干沉降速率及污染

化合物的生成会使得外场观测值小于实际污染物浓度; 此外, 源强反演方法中假设空气中 Hg²⁺ 背景浓度为零, 而实际空气中含有少量 Hg²⁺ (Pirrone *et al.*, 2010), 也可使得反演值低于实际监测值。

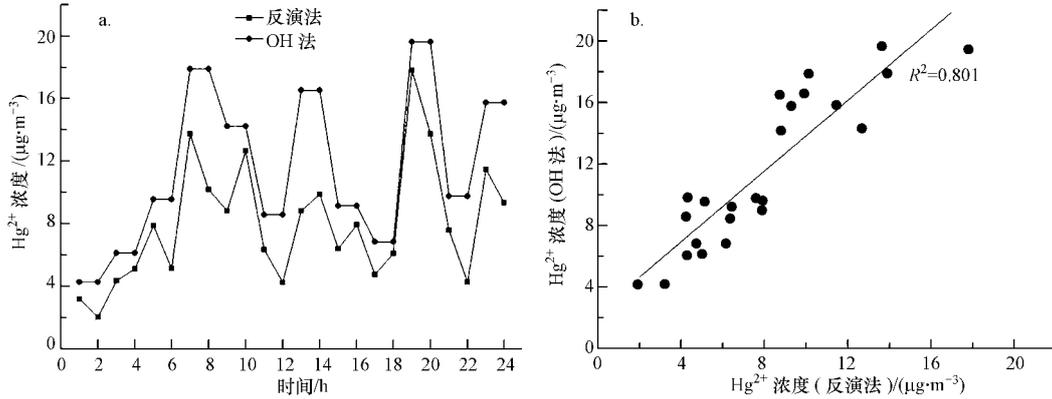


图 5 反演法与 OH 法 Hg²⁺ 结果比较

Fig.5 Comparison of Hg²⁺ between inverse computation method and OH method

3.2 影响区域分析

源强反演结果输入到“影响区域分析”模块, 结合 WRF 模拟现状及预报气象输出, 然后可利用集成的 GIS 快速可视化分析污染影响区域现状及发展趋势。图 6 为 2014 年 5 月 26 日 Hg²⁺ 平均浓度实时分布情况, 可知 Hg²⁺ 扩散浓度远小于空气中 Hg²⁺ 污染限值, 结合图 3 分析可知, 0:00—12:00 主要风向为西南风向, 扩散影响区域为白云区东部、黄埔区北部、从化区南部及增城区西部, 其中, 白云区的钟

落潭镇东南方向影响最为严重, Hg²⁺ 最高浓度为 53.28 pg·m⁻³。至 24:00, 扩散范围还包括白云区东南部、黄埔区中部及西部, 受 Hg²⁺ 影响较大的区域移至白云区太和镇东北部, 最高浓度增加到 68.73 pg·m⁻³, 位置与图 4 中最大落地浓度点一致。综合比较图 6 a 与 b 可知, 至 24:00 Hg²⁺ 的扩散范围及强度增大, 表明风向逐渐由西南风向变为西北风向, 污染物逐渐往东南方向扩散, 且 12:00—24:00 污染源排放量大于 0:00—12:00 污染源排放量, 并由图 5

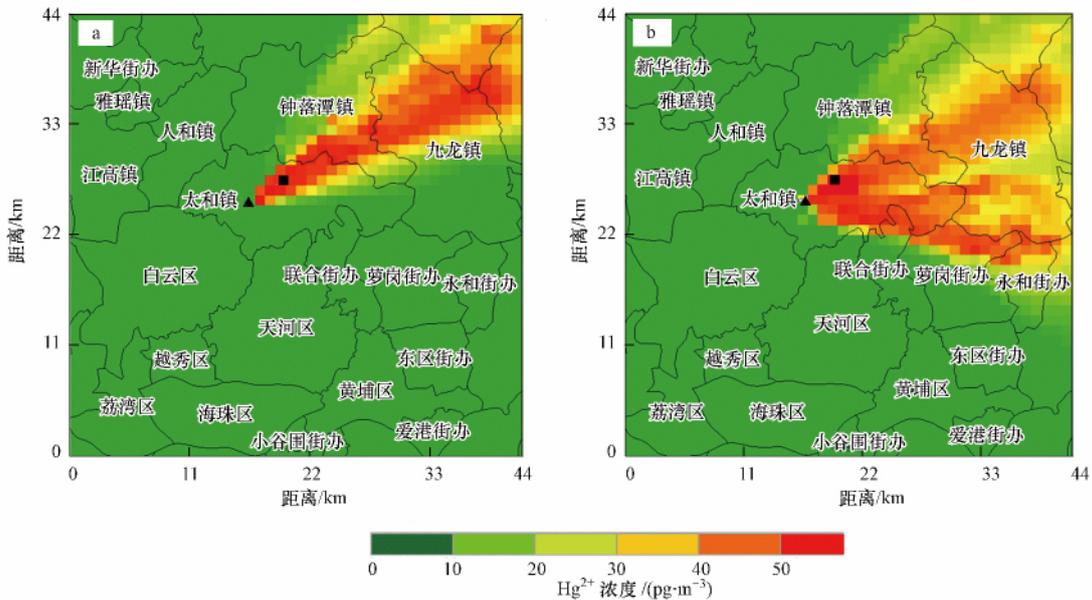


图 6 2014 年 5 月 26 日 Hg²⁺ 浓度分布 (a.12:00 b.24:00 “▲”为李坑位置 “■”为 Hg²⁺ 定点监测位置)

Fig.6 Spatial distribution of Hg²⁺ concentration on May 26, 2014

可计算出 0:00—12:00 与 12:00—24:00 Hg^{2+} 浓度平均值分别为 6.974、9.006 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与 Hg^{2+} 扩散范围变化相符合。

突发事故发生时,为配合环保应急部门确定人群疏散范围并快速有效地开展应急工作,特种污染物排放源强反演及可视化分析工具可绘制特种高危污染物浓度分布现状及发展趋势。以 Hg^{2+} 为例,假定 5 月 27 日污染源排放规律不变,输入反演的 26 日 Hg^{2+} 非稳态排放源强及 27 日预报气象条件,利用“影响区域分析”模块模拟分析得到 27 日 Hg^{2+} 分布范围如图 7 所示。与 26 日相比, Hg^{2+} 扩散影响区域及强度扩大,排放源李坑附近影响加重,白云区东部及东北部、黄埔区北部及西部、天河区北部、增城区西部、从化区南部及花都区东南部区域也受到不同程度影响, Hg^{2+} 最大落地污染浓度可达 83.52 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。假定 50 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 浓度的 Hg^{2+} 代表特种毒物污染预警阈值(生活垃圾焚烧污染控制标准 GB18485-2014 中汞污染排放浓度限值为 5×10^7 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$,监测到的汞浓度远未达到对环境产生影响程度),据此可在 GIS 上可视化分析圈定白云区东部及东北部、天河区北部及黄埔区西部为事故应急人群疏散范围(图 7)。

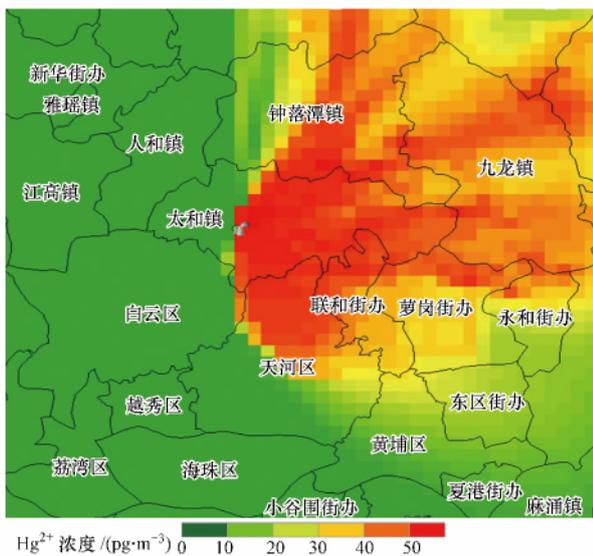


图 7 2014 年 5 月 26—27 日 Hg^{2+} 浓度分布

Fig.7 Spatial distribution of Hg^{2+} concentration from May 26 to May 27, 2014

4 结论 (Conclusions)

1) 实际大气环境中,特种污染物排放非常少见,更难以用毒害物质进行专门的野外扩散实验。因

此,本文选择了大气中背景含量很低的活性气态汞 (Hg^{2+}),以正常生产中的广州李坑垃圾焚烧厂为例,将日均最大落地浓度最大值处的 Hg^{2+} 监测值及实时气象条件,输入到研发的特种污染源强反演及可视化分析工具中,反演得到李坑非稳态排放源强,再与烟气中对应时段的实测 Hg^{2+} 浓度比较。实验结果表明,该工具能较好地利用监测值和气象条件反演得到特种污染物的非稳态排放源强,可决系数可达到 0.801,外场观测位置的选取、污染物本身特性及空气中污染物背景浓度变化是造成反演结果偏低的主要因素。

2) 本文研发的特种污染源强反演及可视化分析工具,集成运用 WRF-HYSPLIT 规划监测路径、选择外场监测点,利用 CALPUFF 进行源强反演与扩散模拟,以免费开源的 GIS 平台进行可视化分析展示,可为特种大气污染事故应急决策提供新的科学手段,并为包含非稳态排放源强、污染扩散影响范围等信息在内的关键决策提供依据。

参考文献 (References):

- Abdul-Wahab S A, Ali S, Sardar S *et al.* 2011. Evaluating the performance of an integrated CALPUFF-MM5 modeling system for predicting SO_2 emission from a refinery [J]. *Clean Technologies & Environmental Policy*, 13(6): 841-854
- Busby C. 1995. The wings of death: nuclear pollution and human health. [J]. *Wings of Death Nuclear Pollution & Human Health*, 12(1): 17-22
- 伯鑫, 丁峰, 徐鹤, 等. 2009. 大气扩散 CALPUFF 模型技术综述 [J]. *环境监测管理与技术*, 21(3): 9-13
- 常鸣, 樊少芬, 王雪梅. 2014. 珠三角土地覆被资料优选及在 WRF 模式中的初步应用 [J]. *环境科学学报*, 34(8): 1922-1933
- 陈晓秋, 杨端节, 李冰. 2012. 利用福岛第一核电站事故期间环境监测资料反推事故释放源项 [J]. *核化学与放射化学*, 34(2): 83-87
- Cui H, Yao R, Xu X *et al.* 2011. A tracer experiment study to evaluate the CALPUFF real time application in a near-field complex terrain setting [J]. *Atmospheric Environment*, 45(39): 7525-7532
- Ghannam K, El-Fadel M. 2013. A framework for emissions source apportionment in industrial areas: MM5/CALPUFF in a near-field application. [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63(2): 190-204
- 冯新斌, 仇广乐, 付学吾, 等. 2009. 环境汞污染 [J]. *化学进展*, 21(2/3): 436-457
- 付学吾, 冯新斌, 张辉. 2011. 贵阳市大气气态总汞: Lumex RA-915AM 与 Tekran 2537A 的对比观测 [J]. *生态学杂志*, 30(5): 939-943
- 霍庆, 蔡旭晖, 宋宇, 等. 2012. 全国大气扩散输送模态与区划研究 [J]. *环境科学学报*, 32(2): 360-366
- Hao J, Wang L, Shen M *et al.* 2007. Air quality impacts of power plant emissions in Beijing. [J]. *Environmental Pollution*, 147(2):

- 401-408
- Jiang G B ,Shi J B ,Feng X B.2006.Mercury Pollution in China [J]. Environmental Science & Technology 40(12) : 3672-3678
- Kellie S ,Duan Y ,Yan C *et al.*2004.Mercury emissions from a 100-MW wall-fired boiler as measured by semicontinuous mercury monitor and ontario hydro method [J]. Fuel Processing Technology 85(6) : 487-499
- 李航,张宏升,蔡旭晖,等.2013.日本福岛核电站泄漏事故污染物扩散的数值模拟与事故释放源项评估[J].安全与环境学报,13(5) : 265-270
- 李沁怡,蔡旭晖,王雪,等.2012.太原煤化工区有毒气体泄漏环境风险分析[J].环境科学学报,32(3) : 537-544
- 刘春莉,李尚科.2006.大气污染物最大落地浓度计算方法的比较[J].四川环境,25(6) : 57-59
- 刘明,陈来国,许振成,等.2013.珠三角地区生活垃圾焚烧厂汞的排放特征[J].环境科学学报,33(11) : 2953-2958
- Ngan F ,Stein A ,Draxler R.2015. Inline coupling of WRF-HYSPLIT: Model development and evaluation using tracer experiments [J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology 54(1) : 28-32
- Ning S S ,Ping K L.2012. Back-calculation of source terms by hybrid genetic algorithm in nuclear power plant accident [J]. Atomic Energy Science & Technology 46(2) : 470-472
- Pirrone N ,Cinnirella S ,Feng X *et al.*2010. Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources [J]. Atmospheric Chemistry & Physics 10(13) : 5951-5964
- Shao D D ,Wu S C ,Liang P *et al.*2012. A human health risk assessment of mercury species in soil and food around compact fluorescent lamp factories in Zhejiang Province ,PR China [J]. Journal of Hazardous Materials 221-222(2) : 28-34
- Skjøth C A ,Baker P ,Sadys M *et al.*2013. Using WRF-HYSPLIT in GIS to study bioaerosols [Z]. New Sensing Technologies 30
- 王峰,程小泉,陈飞.2008.大气污染最大落地浓度及其距离计算方法的探讨[J].环境工程,26(2) : 42-43
- 王磊,刘涛,王勇.2012.大气污染事故应急监测、预警与风险评估系统建设[J].环境科技,25(2) : 54-57
- 谢颖斯.2014.基于 GIS 的突发事故核污染物扩散模拟系统研发与应用[D].广州:华南理工大学.166
- Yunsur C ,Meral O ,Ibrahim A ,*et al.*2009. Mass casualties from acute inhalation of chlorine gas [J]. Southern Medical Journal ,102: 1209-1213
- Zhang C ,Wang D H ,Gong Y F.2015. Dynamic modeling study of highly resolved near-surface wind based on WRF/CALMET [J]. Meteorological Monthly 41(1) : 34-44
- Zhang J W ,LIU Q ,WEI L J.2009. Comparative study on the back-calculation methods for the intensity of leakage sources in chemical leakage accidents [J]. China Safety Science Journal ,19(2) : 165-171
- Zheng X ,Chen Z.2010. Back-calculation of the strength and location of hazardous materials releases using the pattern search method [J]. Journal of Hazardous Materials ,183(1/3) : 474-481
- 赵培,熊亮.2013.氯气管道泄漏源项识别反演问题[J].科技导报,31(26) : 48-51