

Research on Rapid Source Identification of Atmospheric Pollution

Yuxin Wang Tao Zhang Xijuan Cheng Zhifeng Zhang Jia Jia

Shaanxi Zhongsheng Ecological environment Consulting Service Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 712000, China

Abstract

In this paper, a pollution source tracking technology combining receptor model triangulation method, high-resolution meteorological field and Lagrange trajectory algorithm is studied to rapidly trace the source of sudden air pollution events and lock the key areas and pollution sources. Pollutant concentration data and meteorological data from a pollution event on March 12, 2024 at Liangsidu National Control Station of Xianyang High-tech Industrial Development Zone were tested. The results show that by applying the pollution source tracing technology, it is preliminarily judged that the pollution source with the greatest probability of occurrence is located in the west-southwest direction of Liangsidu Station. Combined with the actual investigation of pollution sources, there is a site in the west-southwest direction of Liangsidu station with thick ground floating soil, serious dust pollution caused by vehicle driving, and a large amount of dust is emitted. The traceability results are consistent with the actual investigation, and the air pollution rapid traceability technology is more effective in practical application.

Keywords

air pollution; trace to the source; source analysis; high resolution meteorological data; receptor mode; lagrange trajectory algorithm

一种大气污染快速溯源技术的研究

王雨馨 张涛 成西娟 张智锋 贾佳

陕西中圣生态环境咨询服务有限公司, 中国·陕西 西安 712000

摘 要

论文研究了一种结合受体模型三角定位方法、高分辨率气象数据、拉格朗日轨迹算法的污染源追踪技术, 以对大气突发性污染事件进行快速溯源, 锁定污染来源重点区域、重点污染源。用咸阳高新技术产业开发区两寺渡国控站2024年3月12日的一次污染事件的污染物浓度数据、气象数据进行测试, 结果表明, 应用该污染源追踪溯源技术, 初步判断造成本次污染事件的污染源出现几率最大的位置位于两寺渡站点西南偏西方向; 结合污染源现场实际调查, 两寺渡站点西南偏西方向某处工地存在地面浮土厚、车辆行驶扬尘污染严重的情况, 排放大量扬尘, 溯源结果与实际调查情况相符, 本大气污染快速溯源技术在实际应用中较为有效。

关键词

大气污染; 溯源; 源解析; 高分辨率气象数据; 受体模型; 拉格朗日轨迹算法

1 引言

大气污染溯源是大气污染防治中尤为重要内容, 大气污染物源解析技术已较为成熟, 被广泛应用到农业、工业、环境、公共卫生、交通运输和国防等多个领域, 主要针对于较长时间尺度的污染来源分析, 反映区域整体的污染特征。如吴正佳等^[1]利用模拟多个区域空气污染物浓度的叠加和扩散, 找出污染最严重的区域; 石东伟等^[2]给出了污染源溯源的基本方法; 王永昭等^[3]基于坐标变换建立了城市的污染源溯源模拟。传统方法耗费时间较长, 不能满足突发性污染事件实时溯源的要求, 国内外对于实时溯源的大气污染

溯源技术研究相对较少。在大气污染防治的精细化要求下, 有必要在大气污染溯源技术的研究基础上, 探索大气污染快速溯源技术, 便于进一步管控, 遏制污染事件的持续。论文研究了一种结合受体模型三角定位方法、高分辨率气象数据、拉格朗日轨迹算法的污染源追踪技术, 以对大气突发性污染事件进行快速溯源, 锁定污染来源重点区域、重点污染源, 为大气污染溯源及污染源管控提供有力抓手。

2 样品采集与分析

2.1 样品采集

本研究选取咸阳高新技术产业开发区(以下简称“咸阳高新区”)为研究区域, 选择咸阳市4个国控站点的数据进行测试, 数据来源于陕西省环境空气质量监测联网管理平台, 包括国控站所监测的环境空气质量指标(PM_{10} 、

【作者简介】王雨馨(1994-), 女, 中国陕西韩城人, 本科, 助理工程师, 从事生态环境保护、大气污染治理研究。

PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO、O₃)浓度及气象数据(风向、风速),平台显示数据时间尺度均为5分钟,数据选取时段为2024年3月12日20时30分至次日00时00分。4个国控站点分别为咸阳高新区的两寺渡站点(坐标:108.66375849, 34.29381055)、咸阳市秦都区的实验中学站点(坐标:108.67714942, 34.31326750)、咸阳市渭城区的师范学院站点(坐标:108.72825100, 34.36144800)及咸阳市经开区的奥体中心站点(坐标:108.63961900, 34.40680800)。

2.2 污染源调查

对咸阳高新区区域内污染源进行整体调查,摸清污染源分布情况。咸阳高新区区域内的国控站为两寺渡站点,为咸阳市国控考核站点;该站同时作为咸阳高新区省控评价站点,用于陕西省生态环境厅对高新区空气质量的评价考核。现以两寺渡站点为中心,向周边辐射进行污染源摸排工作,距国控站点距离越近,代表对国控站点的污染贡献概率相对越大。根据现场调查情况,两寺渡国控站500米范围内有污染源5个,其中施工工地2个,道路扬尘源3个;1公里范围内存在4个施工工地、4个道路扬尘源和50家餐饮单位;3公里范围内有施工工地42个,涉气企业78个,加油站3个,汽修厂3个,道路扬尘源12个,餐饮300家,共计501个污染源。

2.3 研究方法

2.3.1 基于受体模型三角定位方法的溯源技术

该技术是基于现有的环境质量空气监测网数据,结合每个空气质量监测站点的实时气象条件,绘制出每个空气质量监测站点的污染风玫瑰图。当发生污染时,初步判断污染来源的方式如下:

①污染风玫瑰图可以表达污染物在各方向出现的机率,其作法是将污染物监测数据与气象资料结合,得到监测期间相对应的风速和风向。然后将风向与浓度做分类,风向则分配为16个或多个方向,浓度也由低至高分成6个或多个等级。统计各风向及污染物浓度的出现几率,其中色标代表所对应风向出现污染物的机率,颜色越靠近红色,污染浓度越高;颜色越靠近深蓝色,污染浓度越低,可初步判断污染物的来源方向。

②根据空气质量监测站在事故发生时对每种污染物的浓度结果,结合绘制的多个站点、各污染物的污染玫瑰图,通过三角定位法,同步收集通过气象资料统计出的各风向来源污染物的几率,计算得到污染源^[4]。

2.3.2 高分辨率气象数据的建立

不同气象要素(温度、风速、相对湿度、降水等)可以通过二次形成、积累或稀释、非均相反应等多种途径对颗粒物浓度产生影响^[5]。通常,我们认为强风有利于污染物的扩散,也能促使颗粒物及其前体物挥发,污染浓度间接被降低,风速与颗粒物存在负相关关系,大部分地区的研究结果是一致的^[6-8]。在弱风等一些特定条件下,风速与颗粒物可能存在正相关关系,风速的增加会造成湍流强度较小,大气

水平运动较弱而高空下沉运动占主导,有利于颗粒物累积。因此,污染物扩散模拟时,气象数据决定了污染物轨迹结果的准确性,气象数据越细致、分辨率越高,污染物的溯源轨迹越准确。

传统的拉格朗日模型算法,需气象数据进行驱动,目前可公开获取的大范围气象数据的分辨率较低,如NOAA Rcanalysis的气象数据分辨率为2.5°×2.5°,NCEP GDAS的气象数据分辨率为1°×1°,在几百至几千千米尺度的污染物传输轨迹研究中具有较好效果,但对局地尺度(几百米至几千米)的污染物传输轨迹研究时缺乏高分辨率的局地气象数据。而现有的监测网数据中都包含有高时间分辨率的实时气象数据,可直接驱动基于拉格朗日轨迹模型的算法。但由于同一区域中存在多个自动监测站点,不同站点数据之间会有一定偏差。因此,本研究总结出一套可以实时校准气象数据的数学统计方法,最终得出一组较为准确的气象数据来当做溯源区域小范围的风场数据,模型根据此风场数据计算气团轨迹,模拟溯源。

研究整体思路为先判断研究关心的两寺渡站点气象数据是否与咸阳市其他监测站相差过大,以剔除其他相差较大的监测站点的气象数据;若相差不大,则用其他监测站的气象数据对两寺渡站点的气象数据进行校准,具体步骤如下:

①针对风向的校准,设置的标准为相差角度在90°以上即可判定为相差较大。

步骤1:剔除相较于两寺渡站点差距在90°以上的站。

步骤2:对剔除后剩余的监测站同时刻所监测风向求平均,得出平均风向。现有研究认为,算术平均法对经过0°风向的处理误差较大,计算出的风向偏南风的概率变大^[9]。因此,对于存在过0的两个站(1-45度&315-360度),数据要进行修正,处理方法见式(1):

$$\begin{aligned} D_i &= y_i & i &= 1 \\ D_i &= D_{i-1} + \delta_i + 360 & i > 1, \delta_i < -180 \\ D &= D_{i-1} + \delta_i - 360 & i > 1, \delta_i > 180 \\ D &= D_{i-1} + \delta_i & i > 1, \delta_i < |180| \\ \delta_i &= y_i - D_{i-1} & i > 1 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, y_i 为第*i*分钟的风向采样值; D_i 为 y_i 的修正值; δ_i 为第*i*分钟的风向采样值 y_i 与第*i-1*分钟的风向修正值 D_{i-1} 的差值。

经修正后,由式(2)计算得到平均值 $\bar{y}'$,由于 $\bar{y}'$ 可能不在0°~360°范围内,故由式(3)得到最终平均值 $\bar{y}$ ^[9]。

$$\bar{y}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D \quad (2)$$

$$\begin{cases} \left\lfloor \frac{\bar{y}'}{360} \right\rfloor = \text{整数}, \text{则} \bar{y} = 0 \\ \left\lfloor \frac{\bar{y}'}{360} \right\rfloor < 1, \text{则} \begin{cases} \text{若} \bar{y}' < 0, \bar{y} = \bar{y}' + 360 \\ \text{若} \bar{y}' > 0, \bar{y} = \bar{y}' \end{cases} \\ 1 \leq m < \left\lfloor \frac{\bar{y}'}{360} \right\rfloor < m+1, \text{则} \begin{cases} \text{若} \bar{y}' < 0, \bar{y} = \bar{y}' + 360 \times (m+1) \\ \text{若} \bar{y}' > 0, \bar{y} = \bar{y}' - 360 \times m \end{cases}, \text{其中} m \text{为整数} \end{cases} \quad (3)$$

步骤 3: 剔除与平均风向夹角在 90° 及以上的风向, 直至满足最大风向与最小风向之间的夹角小于 90° , 说明各个站差距不大, 无需剔除。

步骤 4: 对剩余风向求平均。

②针对风速的校准, 设置的标准为相对偏差在 50% 以上即可判定为相差较大。

步骤 1: 剔除已剔除风向所对应风速。

步骤 2: 以两寺渡站点风速作为真值, 剔除与两寺渡站点风速相对偏差在 50% 以上的监测站数据。

步骤 3: 剩余监测站求平均风速, 对各站所监测的风速与平均风速相对偏差在 50% 以上的风速进行剔除。

步骤 4: 对剩余风速求平均。

2.3.3 拉格朗日轨迹算法的提升改进

本次研究运用基于拉格朗日轨迹模型的算法, 对现有轨迹模型算法进行提升与改进, 以提高模型计算结果的时空分辨率, 通过计算每个监测站点的污染物来源轨迹, 并结合污染风玫瑰的三角定位法, 最终可快速、精准锁定污染气体来源。

①潜在源贡献分析法 (PSCF)。

PSCF 是一种利用后向轨迹确定污染源的地理位置以及空间分布的函数方法^[10]。将研究区划分为若干相等的网格(i, j), 将 (i, j) 的 PSCF 值定义为式 (4):

$$PSCF_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (4)$$

式中, n_{ij} 为研究期间经过网格 (i, j) 的轨迹总数, m_{ij} 是网格 (i, j) 中污染物质量浓度高于日平均值二级标准值的污染轨迹数, 本次研究以 $PM_{2.5}$ 质量浓度值 $\geq 75\mu g \cdot m^{-3}$ 、 PM_{10} 质量浓度值 $\geq 160\mu g \cdot m^{-3}$ 的轨迹为污染轨迹。

PSCF 方法可以直观地反映研究区域内潜在污染源的空间分布, PSCF 值越大, 表明该区域存在污染源的可能性越高。但由于 PSCF 是一个概率值, 当 $n(i, j)$ 较小时, 可能造成较大误差。此外, PSCF 方法无法量化污染物的浓度贡献。

②浓度权重分析法 (CWT)。

CWT 方法可以定量估算每个网格上污染物的浓度, 通过平均具有穿过网格单元的相关轨迹的样本浓度为每个网格单元分配加权浓度, 计算公式见式 (5):

$$C_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^M C_l \times T_{lji}}{\sum_{l=1}^M T_{lji}} \quad (5)$$

式中, C_{ij} 是网格 (i, j) 上的平均权重浓度 ($\mu g \cdot m^{-3}$), M 代表轨迹总数 (条), C_l 代表轨迹 l 过网格的污染物浓度 ($\mu g \cdot m^{-3}$), T_{lji} 表示轨迹 l 经过网格 (i, j) 内的时间 (48h)。

CWT 方法不仅能反映污染轨迹经过每个网格的概率, 还能定量估算每个网格上污染物的浓度, 从而更准确地反映

了污染源的强度分布。但当网格中的端点数量较少时, 可能导致结果的不确定性增加。

③改进算法。

为了克服 PSCF 和 CWT 方法各自的缺点, 本研究提出了结合两种方法的改进算法:

第一, 引入权重函数: 为了减小 PSCF 和 CWT 中由于轨迹数量少而造成的误差, 引入权重函数 $W(i, j)$:

$$W_{n_{ij}} = \begin{cases} 1.00 & 80 < n_{ij}; \\ 0.70 & 20 < n_{ij} \leq 80; \\ 0.42 & 10 < n_{ij} \leq 20; \\ 0.05 & n_{ij} \leq 10. \end{cases} \quad (6)$$

第二, 修正后的 PSCF 和 CWT 值:

$$WPSCF(i, j) = W(i, j) \times PSCF(i, j) \quad (7)$$

$$WCWT(i, j) = W(i, j) \times CWT(i, j) \quad (8)$$

第三, 综合指数: 将 WPSCF 和 WCWT 结合, 提出综合污染源识别指数 (CSII):

$$CSII(i, j) = \alpha \times WPSCF(i, j) + \beta \times WCWT(i, j) \quad (9)$$

式中, α 和 β 为权重系数, 可根据具体研究需求调整。

这种改进算法综合了 PSCF 的空间分布优势和 CWT 的浓度量化优势, 同时通过权重函数减小了由于轨迹数量少造成的误差。通过计算 CSII, 我们可以更准确地识别潜在污染源的位置和强度, 为污染控制策略的制定提供更可靠的科学依据。

第四, 大气污染源排放清单的叠加。在 CSII 算法中叠加重点区域大气污染源的排放量数据, 结合污染源的位置分布, 可更好的识别排放大户的贡献, 精准确定污染来源。

3 结果与讨论

2024 年 3 月 12 日, 20 时 30 分至次日 00 时 00 分, 两寺渡站点 PM_{10} 浓度出现快速上升趋势, 浓度值达轻度污染。现以该污染事件为例采用本研究方法进行大气污染事件的快速溯源。

3.1 基于受体模型三角定位方法的溯源分析技术

基于受体模型三角定位方法的溯源分析技术至少需要两个监测站的数据, 由于本次污染事件同时影响到两寺渡、实验中学两个站点, 故以两寺渡及实验中学监测站作为本方法研究站点。根据污染时段 (20 时 30 分至次日 00 时 00 分) 两寺渡及实验中学监测站 PM_{10} 浓度及同时段所监测的风向、风速数据, 绘制两个站点的风污染玫瑰图, 其中红色色谱延伸的方向表示污染概率较高的污染来源风向。图 1 中, 两站点高值方向延伸线交叉点围成的四边形区域 (A-B-C-D) 即为造成本次污染事件的污染源出现几率最大的位置, 初步判断该污染源位于两寺渡站点西南偏西方向。

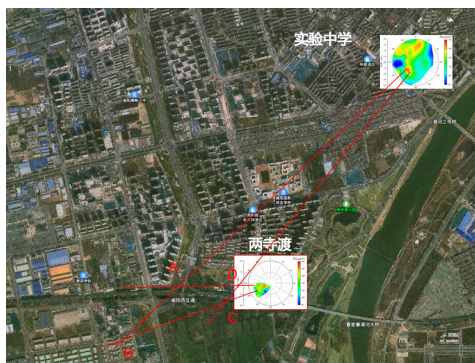


图1 2024年3月12日污染时段两寺渡、实验中学站点风污染玫瑰图

3.2 潜在源分析模型模拟溯源

利用潜在源分析法(PSCF)、浓度权重轨迹方法(CWT),同时叠加前期所调研的区域内污染源排放量分布的权重,进行模型模拟溯源,确定潜在源区域对两寺渡、实验中学监测站质量浓度贡献的大小。将污染时段(20时30分至次日00时00分)所建立的高分辨率气象数据及两寺渡、实验中学监测站 PM_{10} 浓度数据带入模型得出溯源图谱,红色区域代表该区域内污染源的污染贡献较大。由图2可看出,模型溯源得出的高值区域与基于受体模型三角定位方法所分析出的污染源出现几率最大的位置在两寺渡站点西南偏西方向较近区域有所重叠。结合基于受体模型三角定位方法的溯源技术分析结果,确定造成本次污染事件的污染源出现几率最大的位置为两寺渡站点西南偏西方向较近区域。

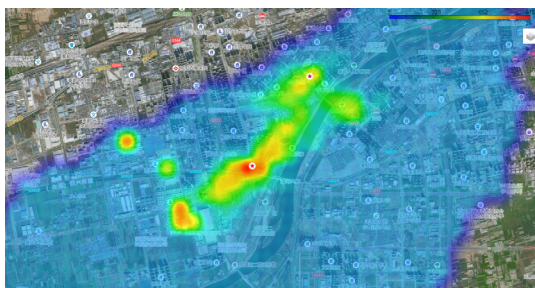


图2 2024年3月12日污染时段两寺渡、实验中学站点模型溯源图谱

3.3 污染源现场排查情况

根据基于受体模型三角定位方法叠加潜在源分析模型溯源所判断的污染源所在方位,结合两寺渡站点周边污染源分布情况,重点对两寺渡站点西南偏南方向工地扬尘进行调查。

现场发现,该区域某处工地扬尘源存在地面浮土厚、车辆行驶扬尘污染严重的情况,排放大量扬尘。溯源结果与实际调查情况相符,本大气污染快速溯源技术在实际应用中较为有效。

4 结语

大气污染溯源是大气污染防治中尤为重要内容。论文研究了一种结合受体模型三角定位方法、高分辨率气象数据、拉格朗日轨迹算法的污染源追踪技术,以对大气突发性污染事件进行快速溯源,锁定污染来源重点区域、重点污染源,为大气污染溯源及污染源管控提供有力抓手。用咸阳高新技术产业开发区的一次污染事件进行测试,溯源结果与实际调查情况相符,本大气污染快速溯源技术在实际应用中较为有效。后续将采用论文所研究的方法进行实际应用,根据实际需求进一步提升改进。

参考文献

- [1] 吴正佳,刘碧波.西安市 $PM_{2.5}$ 污染源位置确定的模型应用研究[J].环境科学与管理,2014,39(4):132-136.
- [2] 石东伟,陈冬娜.高斯扩散模型在确定污染源位置中的应用[J].河南科技学院学报(自然科学版),2012,40(2):55-58.
- [3] 王永昭,寇梦柯,王贺娜,等.基于高斯模型的安阳市区 $PM_{2.5}$ 扩散问题研究[J].安阳师范学院学报,2018(2):19-21+31.
- [4] <http://www.pcp-ai.com/pigknowledge/04512.html>.
- [5] 史之浩.气象条件对中国地区细颗粒物和臭氧污染影响的模拟研究[D].南京:南京信息工程大学,2022.
- [6] 江瑶,汪婷,沈利洪,等.2012年苏州地区 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的时空变化特征分析[J].热带气象学报,2015,31(1):128-136.
- [7] Han J, Wang J, Zhao Y, et al. Spatio-temporal variation of potential evapotranspiration and climatic drivers in the Jing-Jin-Ji region, North China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018(256):75-83.
- [8] Xu J, Yan F, Xie Y, et al. Impact of meteorological conditions on a nine-day particulate matter pollution event observed in December 2013, Shanghai, China[J]. Particuology, 2015(20):69-79.
- [9] 吕明华,闫江雨,姚仁太,等.风向的统计方法研究[J].气象与环境学报,2012,28(3):83-89.
- [10] Cheng M D, Hopke P K, Barrie L, et al. Qualitative determination of source regions of aerosol in Canadian high arctic[J]. Environ Sci Technol, 1993,27(20):63-71.