基于多源异构数据的沧州市大气环境管理 APP 平台的构建与应用

成国庆[1]，伯 鑫[2*]，李时蓓[3*]，高 爽[4]，屈加豹[3]，马 岩[3]，李厚宇[5]，路瑞娟[6]，雷团团[3,7]

1.河北正润环境科技有限公司，河北 石家庄 050091
2.北京科技大学能源与环境工程学院，北京 100083
3.生态环境部环境工程评估中心，北京 100012
4.南京大学环境规划设计研究院股份公司，江苏 南京 210093
5.山东师范大学地理与环境学院，山东 济南 250014
6.沧州市环境保护科学研究院，河北 沧州 061000
7.河北科技大学环境科学与工程学院，河北 石家庄 050018

摘要： 大气环境管理平台是目前我国城市大气环境管理的重要手段. 利用气象、空气质量、污染源等多源异构数据资料，以模型集成分析的方法，针对沧州市的消峰和污染减排问题，开发了大气环境管理平台(APP)，并对沧州市大气污染过程进行综合分析和验证. 以沧州市 2019 年 1 月 27—30 日两次大气污染过程为例进行分析，结果表明：①污染过程 1(2019 年 1 月 27 日 14:00—1 月 28 日 02:00)中 $\rho(PM_{2.5})/\rho(PM_{10})$ 平均值为 0.59，$\rho(SO_2)$、$\rho(NO_2)$ 和 $\rho(CO)$ 平均值分别为 37.0 μg/m³、66.7 μg/m³ 和 1.5 mg/m³；污染过程 2(1 月 29 日 10:00—1 月 30 日 09:00)中 $\rho(PM_{2.5})/\rho(PM_{10})$ 平均值为 0.61，$\rho(SO_2)$、$\rho(NO_2)$ 和 $\rho(CO)$ 平均值分别为 38.5 μg/m³、67.7 μg/m³ 和 1.8 mg/m³，说明加强对前体物的控制是削弱重污染时段 $\rho(PM_{2.5})$ 的重要途径. ②污染过程 1 的相对湿度在重度污染时段增长显著，污染过程 2 中相对湿度有 10 h 在 70%以上；同时，在此期间风速较小，近地面逆温层较厚，从而加速了颗粒物吸湿增长和二次转化，说明高湿、低风速等气象条件是形成重污染天气的主要原因之一. ③源解析结果表明，外来源的平均贡献率为 44.73%，本地源的平均贡献率为 55.27%，本地工业源、民用源、交通源和电力源贡献率分别为 42.20%、11.97%、1.00%和 0.10%，说明重污染期间沧州市受到周边区域传输具有一定的可能性，本地源的贡献主要来自工业源和民用源.

关键词： 大气污染；管理平台；APP；沧州市
中图分类号： X511 **文章编号：** 1001-6929(2019)10-1747-08
文献标志码： A **DOI：** 10.13198/j.issn.1001-6929.2019.08.24

Construction and Application of APP Platform for Cangzhou City Atmosphere Environmental Management based on Multi-Source Isomerism Data

CHENG Guoqing[1], BO Xin[2*], LI Shibei[3*], GAO Shuang[4], QU Jiabao[3], MA Yan[3], LI Houyu[5], LU Ruijuan[6], LEI Tuantuan[3,7]

1.Hebei Zhengrun Environmental Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050091, China
2.Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
3.Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China
4.Academy of Environmental Planning & Design, Co., Ltd., Nanjing University, Nanjing 210093, China
5.Shandong Normal University of Geography and Environment, Jinan 250014, China
6.Environmental Protection Science Research Institute of Cangzhou City, Cangzhou 061000, China
7.School of Science and Technology of Environmental, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China

收稿日期： 2019-07-02 **修订日期：** 2019-08-29

作者简介： 成国庆(1989-)，女(满族)，吉林松原人，工程师，硕士，主要从事大气污染理论与控制方面研究，1013575673@qq.com.
* **责任作者：** ①伯鑫(1983-)，男，山东烟台人，高级工程师，硕士，主要从事大气环境质量模拟、排放清单研究，boxinet@gmail.com；②李时蓓(1962-)，女，江苏徐州人，研究员，主要从事环境质量模型法规化与标准化研究，lisb@acee.org.cn

基金项目： 大气重污染成因与治理攻关项目(No.DQGG0209-07，DQGG0304-07)；河北省重点研发项目(No.18273705D)
Supported by National Research Program for Key Issues in Air Pollution Control, China (No. DQGG0209-07, DQGG0304-07); Key Research and Development Projects of Hebei Province, China (No.18273705D)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Abstract: The atmospheric management platform is an important means of urban atmospheric environmental management in China. Using multi-source heterogeneous data such as meteorology, air quality and pollution sources. In response to the peak and pollution reduction problems in Cangzhou City, the APP platform of atmospheric environmental management system was developed by means of model integration analysis, the process of atmospheric pollution in Cangzhou City was comprehensively analyzed and verified. Taking the two atmospheric pollution process from 1.27 to 1.30 in Cangzhou City in 2019 as an example. The results showed that: (1) In pollution process 1 (began at 14:00 on 27th and reached severe pollution at 02:00 on 28th), the average value of $\rho(PM_{2.5})/\rho(PM_{10})$ was 0.59, and the average values of $\rho(SO_2)$, $\rho(NO_2)$ and $\rho(CO)$ were 37.0 μg/m^3, 66.7 μg/m^3 and 1.5 mg/m^3. In pollution process 2 (began at 10:00 on 29th and reached severe pollution at 09:00 on 30th), the average value of $\rho(PM_{2.5})/\rho(PM_{10})$ was 0.61, and the average values of $\rho(SO_2)$, $\rho(NO_2)$ and $\rho(CO)$ were 38.5 μg/m^3, 67.7 μg/m^3 and 1.8 mg/m^3, indicating that it is important to enhance control of the precursors to weaken heavy pollution time $\rho(PM_{2.5})$. (2) The humidity of pollution process 1 increased significantly during heavy pollution time, and the relative humidity in heavy pollution process 2 reached more than 70% for 10 h. At the same time, the wind speed was low during this period. The thickness of the near-ground inversion layer accelerated the growth of moisture absorption and secondary transformation of particles, indicating that meteorological conditions such as high humidity and low wind speed were among the main reasons for the formation of heavy polluted weather. (3) The results of source apportionment showed that the contribution of outside source occupied an average of 44.73%, while 55.27% was from the local area. Local industry, civil use, transport and electricity contributed 42.20%, 11.97%, 1.00% and 0.10%, respectively. Indicating thatduring the heavy pollution period, Cangzhou City had a certain possibility of transmission from the surrounding area. Coal contribution was mainly from industrial and civilian combustion.

Keywords: air pollution; management platform; APP; Cangzhou City

大气环境管理平台可辅助管理者分析污染成因[1-3]，评价大气环境状况，有效预测大气环境问题发展趋势[4-5]，是我国生态环境保护科学决策的有力支撑[6-7].

国内外研究者对大气环境管理平台开展了大量研究: 伯鑫等[8-9]开发了基于 CEMS 全国污染源清单数据库系统、中国钢铁行业大气污染物排放清单管理系统等，为高分辨率工业源排放清单编制工作服务; 张云海等[10]开发了基于 Windows XP 操作系统的大气环境管理平台，实现了气象和大气污染源数据查询功能; 鄢学贫等[11]设计采用 Linux 操作系统的大气环境管理平台，实现了解城市污染源排放情况. 大气环境管理平台的研究多集中在污染物排放和空间分布方面[12]: Fouda[13]针对 Rosetta 地区的工业污染，利用 GIS 计算分析其空间分布与地理属性的关系; Jensen 等[14]开发环境平台，实现了预估周边空气污染物浓度水平的功能; Mongi 等[15]研究开发了决策支持系统用于评估污染物的排放和空间分布.

2017 年 9 月原环境保护部环境工程评估中心开展了“沧州市大气重污染成因与治理攻关”研究课题，课题组在沧州市驻点工作发现，原沧州市环境保护局在重污染期间组织每日会商，分析重污染天气成因，但受到时间、人力因素的限制，迫切需要一种能够快速反应重污染成因的辅助工具(如 APP)，以保证对大气会商做出实时响应，提高沧州市大气污染管控效率.

为此，原环境保护部环境工程评估中心利用 B/S、GIS 架构，开发了基于多源异构数据的大气环境管理平台(APP)，根据全国实时气象、环境空气质量、源解析、空气污染预报等数据，自动生成分析报告推送给城市环境管理者的手机端. 该大气环境管理平台具有以下特点: ①实现了将全国气象、环境空气质量、源解析等多源异构数据的融合; ②提供自动分析功能，为地方生态环境局重污染会商提供辅助; ③系统设置的各项功能，可为手机用户提供操作. 该系统已部署到沧州市，以期为沧州市的消峰和污染减排提供依据和指导.

1 研究方法

1.1 技术方案

1.1.1 多源异构数据集成

获取各类模型计算、展示和报告生成所需数据，集成融合多源异构数据(全国气象、全国空气质量、污染源清单等)，基于 Datist 数据平台实现多源异构数据的解析与适配策略，具体解析适配方式: ①针对数据库数据，通过数据库驱动器方式获取，支持的数据格式(类型)包括 Oracle、MySQL、SQL Server、Access、OLE DB、PostgreSql、SQLite、ODP 等. ②针对半结构化数据，通过文件数据解析器方式获取，支持的文件类型包括 Excel、Word、Txt、CSV 等，支持的数据格式包括两列式数据格式、复杂统计表格、表格折行显示、表格内部多区块格式、图形中数据提取、多区块显示数据、多页签卡片式显示数据、格式的特殊显

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

示方式等. ③针对空间数据格式数据,通过空间数据解析器方式获取,支持的文件类型包括 shp、dwg、kml、gml、mif、las、gdf、dxf、tab、ddf、dht、lht 等. ④针对其他类型数据(无法通过数据库或文件方式获取的数据,如页面数据),通过页面爬取、FTP 接入等方式获取,其中,气象、空气质量、污染源(沧州市及周边城市)数据等多源异构数据来源于国家大气污染防治攻关联合中心,源解析基础数据来源于中国环境科学研究院.

1.1.2　模型集成分析

模型的封装方面,包括模型对外暴露输入、控制和输出三类参数. 管理界面的开发,是将三大参数与平台代码和界面相关联,实现与模型的交互. 模型的运行方面,是将多源输入数据经过预处理后输送至模型,管理界面上用户的操作被转化为脚本参数传入模型,待模型执行结束后,成果数据或文件将被平台接收、解析、呈现.

1.1.3　平台管理展示

平台通过数据可视化、二维地图可视化和三维地球可视化实现展示功能: ①数据可视化.提供常规的折线图、柱状图、散点图、饼图、K 线图、盒形图、热力图、线图、关系图等,支持图与图之间的混搭,支持多维度数据分析. ②二维地图可视化. 支持全球范围内各类型各坐标系地图数据,基于开源 Leaflet 地图,兼容多种 GIS 标准,框架简便、高性能、可用性好,支持插件扩展. ③三维地球可视化. 具备与二维地图同样丰富的地图数据,和良好的数据兼容性. 基于开源 Cesium 地球,实现跨平台跨浏览器全三维地球显示.

1.1.4　技术服务项目

大气环境管理平台(APP)的系统子模块栏目如图 1 所示. 由图 1 可见: ①逐时提醒,逐时推送目标城市 AQI 指数、污染等级、常规污染物浓度、首要污染物、气温、相对湿度、风速、风向等. ②晚间推送,根据当前的污染气象条件,推送晚间道路交通、施工扬尘、工业企业的强化管控措施建议. ③空气质量,逐时推送区域内的大气质量概况,包括污染等级、AQI 值变化曲线、常规污染物浓度变化及与周边城市常规污染物浓度对比等. ④气象分析,逐时推送城市风场、能见度、地面和 700 Pa 气压场、辐合流场情况. ⑤CALPUFF 模拟结果,提供上一年秋冬季污染源贡献模拟结果的查询服务,以及推送当前的一次重污染 $PM_{2.5}$ 的模拟结果. ⑥历史报告查询,提供历期“跟踪研究专报”“污染成因周报”“污染成因月报”“空气质量年报”的查询下载服务. ⑦自动报告生成,自动生成基于当前成果的标准报告. ⑧正式报告发布,该模块将各种模型成果、图表成果进行按照预定格式进行整理、编排,形成符合标准要求的正式研究报告并发布. ⑨工作新闻动态,展示国家大气污染防治攻关联合中心、生态环境部等最新动态. ⑩污染源概况,提供近 3 年城市的产业情况、能源情况、交通情况和用地情况的查询服务. ⑪模式源解析,推送当日和未来 3 d 源解析结果. ⑫AERMOD 模型,提供污染源贡献模拟结果的查询服务.



图 1　大气环境管理平台(APP)的系统子模块栏目

Fig.1 Submodule of the mobile APP

1.2　系统主要模块

1.2.1　可视化气象子模块(气象分析)

气象条件是空气污染过程最直接的外因[16-20]. 可视化气象子模块主要包括风场数据查询模块、能见度数据查询模块、气压场(地面、700 Pa)数据查询模块、辐合流场数据查询模块. 在数据查询模块中,用户可对实时的风场、能见度、气压场(地面、700 Pa)、辐合流场实时数据进行总览和查询.

在风场数据查询模块,用户能通过风场数据获取风向和风速信息; 在能见度数据查询模块,用户能通过能见度数据初步判断主要污染类型(霾、雾、沙尘); 在气压场数据查询模块,通过气压场等压线和等压面数据可初步判断污染物传输方向、污染物扩散条件; 在辐合流场数据查询模块,可以通过辐合场分析,结合温度、相对湿度、污染浓度等综合分析污染情况.

1.2.2　可视化空气质量子模块(空气质量)

环境空气质量研究主要集中在 AQI、颗粒物的研究[21-23]. 可视化空气质量子模块包括空气质量现状模块和空气质量预报模块. 该模块实现的主要功能是给出分析区域内的大气质量概况,包括污染等级、AQI 值变化曲线、污染物浓度变化、本市与周边城市 $\rho(PM_{2.5})$ 对比、本市与周边城市 $\rho(CO)$ 对比、气溶胶

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

消光系数等.

1.2.3 空气质量模型模块(CALPUFF、AERMOD 模型)

基于国家气象局预报资源及 WRF 模式结果,建立了 CALPUFF、AERMOD 小尺度预报系统[24-25],开展未来 7 d 重点企业对国控点和周围环境的污染预测,分析不同方案对城市空气质量改善程度,为大气污染应急、预警等提供预报服务,其可预报城市单个或多个钢铁工厂、电厂、化工厂、道路或工业园区排放大气污染物对国控点和居民区的污染贡献影响.

1.2.4 大气污染源解析子模块(模式源解析)

基于空气质量模式源解析结果(CAMx)给出当日和未来 3 d 各污染源解析结果,并以图片和表格形式展现各污染源对 $PM_{2.5}$ 的贡献率.

1.2.5 报告自动生成子模块(自动报告生成)

根据城市大气污染会商需求,开发了报告自动生成子模块. 根据需求形成标准格式的正式研究分析报告,其应用场景分为定时推送报告和自助获取报告. 其中,定时推送报告适用于输入数据类别固定、输出结果类别固定、报告生成周期固定的场景,如某分析周报、某分析月报,并向指定相关人推送; 自助获取报告适用于涉及可变参数较多且报告生成时间不固定的场景,如按污染物类别查看最新分析结果; 自助获取报告向用户提供可选参数,用户按需将参数提交并执行,平台将即时生成相关报告.

2 结果与讨论

2.1 沧州市大气污染期间空气质量情况分析

为体现平台对大气重污染天气会商期间的响应功能,该研究以沧州市 2019 年 1 月 27—30 日大气污染过程为例,采用大气环境管理平台(APP),分析大气污染期间沧州市空气质量情况、污染成因等.

2.1.1 AQI 指数分析

由图 2 可见: 2019 年 1 月 27—30 日沧州市有 19 h 的 AQI 指数在 201~300 之间,AQI 指数最高达 259(30 日 07:00). 此次污染过程存在 2 个典型时段,分别为污染过程 1 和污染过程 2. 污染过程 1 从 27 日 14:00 开始,于 27 日 21:00 达重度污染,重度污染持续时间(2 h)较短,并于 28 日 02:00 空气质量恢复至优良水平; 污染过程 2 从 29 日 10:00 开始,8 h 后达重度污染并持续 17 h,至 30 日 09:00 空气质量恢复至优良水平. 结合沧州市实际,2019 年 1 月 28 日 00:00—1 月 30 日 24:00 沧州市发布重污染天气橙色预警,启动二级应急响应,响应措施时间段与手机平台预判的分析结果一致.

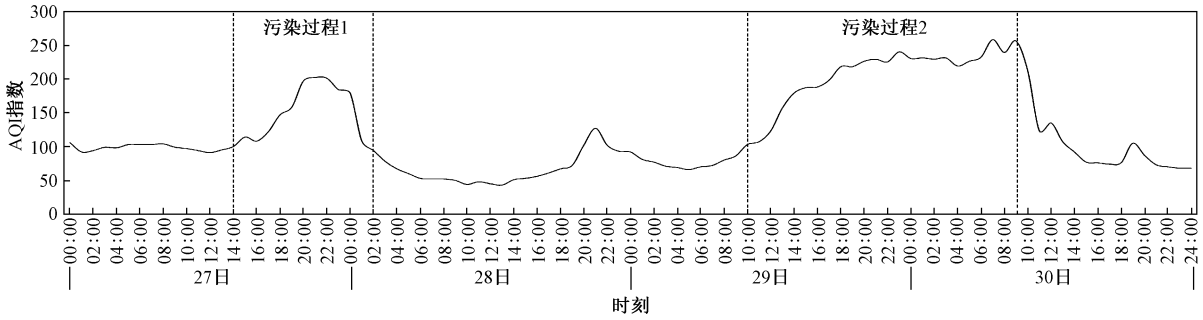


图 2 2019 年 1 月 27—30 日沧州市 AQI 指数的变化趋势

Fig.2 Cangzhou AQI Index from from 27th to 30th January, 2019

2.1.2 常规污染物小时浓度分析

沧州市 2019 年 1 月 27—30 日常规污染物质量浓度变化情况如图 3 所示. 由图 3 可见: 从 1 月 27 日 14:00 起,$\rho(PM_{2.5})$ 和 $\rho(PM_{10})$ 均逐渐升高,21:00 后随 $\rho(SO_2)$、$\rho(NO_x)$ 和 $\rho(CO)$ 的快速上升,$\rho(PM_{2.5})$ 也快速升至 153 μg/m³,$\rho(PM_{2.5})$ 在 7 h 内上升了 1.1 倍; 28 日 02:00 各污染物质量浓度开始下降,空气质量恢复至优良水平; 29 日 10:00 $\rho(PM_{2.5})$ 再次升高,29 日 18:00 $\rho(PM_{2.5})$ 迅速升至 219 μg/m³,重度污染持续了 17 h; 30 日 14:00 各污染物质量浓度迅速下降,转为优良水平. 污染过程 1 中 $\rho(PM_{2.5})/\rho(PM_{10})$ 平均值为 0.59,$\rho(SO_2)$、$\rho(NO_2)$ 和 $\rho(CO)$ 平均值分别为 37.0 μg/m³、66.7 μg/m³ 和 1.5 mg/m³; 污染过程 2 中 $\rho(PM_{2.5})/\rho(PM_{10})$ 平均值为 0.61,$\rho(SO_2)$、$\rho(NO_2)$ 和 $\rho(CO)$ 平均值分别为 38.5 μg/m³、67.7 μg/m³ 和 1.8 mg/m³. 在污染过程 2 的最后时段,$\rho(SO_2)$ 已先开始下降,在 1 月 30 日 09:00,扩散条件变好,风速增大,加快了污染物的扩散,$\rho(PM_{2.5})$ 迅速降低,污染清除期间 $\rho(PM_{2.5})/\rho(PM_{10})$ 减小,降至 0.5 以下,最小值为 0.12. 表明加强对前体物的控制是削弱重污染时段 $\rho(PM_{2.5})$ 的重要途径.

2.2 污染成因分析

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

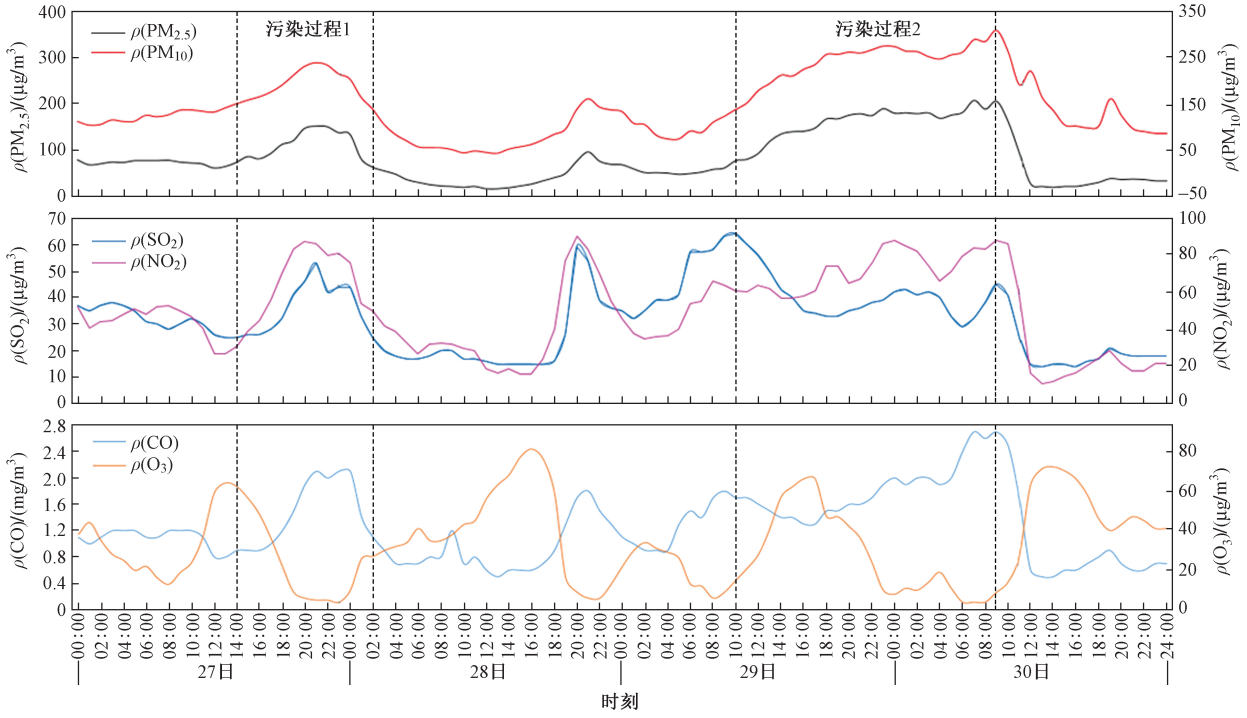


图 3　沧州市 2019 年 1 月 27—30 日常规污染物质量浓度变化

Fig.3 Changes in the concentration of normal pollutants in Cangzhou City from 27th to 30th January, 2019

2.2.1　区域传输

区域传输与污染物形成有关[26]. 沧州市地处东部沿海地区,与廊坊市、衡水市、德州市、天津市和北京市相邻,沧州市与周边城市常规污染物质量浓度对比如图 4 所示. 由图 4 可见,此次污染过程中沧州市污染物质量浓度与周边城市相比处于中上水平,整个重污染过程期间 $\rho(PM_{2.5})$ 的增长有一定的滞后性,呈由南向北传输特征,表明沧州市受到周边区域传输具有一定的可能性.

沧州市 2019 年 1 月 27—30 日污染过程常规污染物质量浓度日变化情况如图 4 所示. 由图 4 可见,$\rho(PM_{2.5})$、$\rho(SO_2)$ 和 $\rho(CO)$ 有相同的变化趋势,三者在夜间均较高.

2.2.2　气象条件

由图 5 可见: 重污染过程 1 中相对湿度变化相对较小,但在重度污染时段仍然增长显著; 污染过程 2 中相对湿度持续较高,因后期污染过程时间较长,不利扩散条件和污染物积累相互作用,相对湿度有 10 h 在 70%以上,高湿环境有利于颗粒物吸湿增长和二次转化. 污染过程 1 中,自 27 日 14:00 起,$\rho(PM_{2.5})$ 和 $\rho(PM_{10})$ 均升高,2 h 后相对湿度迅速增加至 60%以上,风向以西南风为主. 沧州市处于均压场控制,风速较小,近地面有较厚的逆温层,不利的扩散条件及本地积累的颗粒物吸湿增长和二次转化,导致 $\rho(PM_{2.5})$ 迅速升高,说明相对湿度、风速、风向[27-28]和逆温[29]等气象条件不利于污染物扩散. 污染过程 2 中,29 日 10:00 随相对湿度的升高,$\rho(PM_{2.5})$ 快速升至 209 μg/m^3,重度污染过程持续约 17 h,30 日 09:00 系统风转为东北风,风速增大,加快了污染物的扩散,$\rho(PM_{2.5})$ 迅速降低. 在污染清除过程中,沧州市受到短时的沙尘影响,沙尘影响结束后空气质量转为优良水平,此次污染过程结束.

消光系数是大气消光的重要参数和研究内容[30-32]. 由分析数据显示,两次污染过程中边界层较低(在 500 m 以下),地面污染物累积层浓度高,在边界层下降的条件下污染物质量浓度快速升高.

2.2.3　源解析

基于空气质量模式 CAMx 进行源解析分析,结果显示,沧州市 2019 年 1 月 27—30 日 $PM_{2.5}$ 外来源的贡献率为 44.73%,本地源的贡献率为 55.27%,重污染受到局部传输的影响较大[33]. 其中,本地主要贡献源为工业源和民用源,贡献率分别为 42.20%和 11.97%; 交通源和电力源贡献较少,分别为 1.00%和 0.10%. 说明在重污染期间环境管理部门可加强对本地源中工业源和民用源的管控力度.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

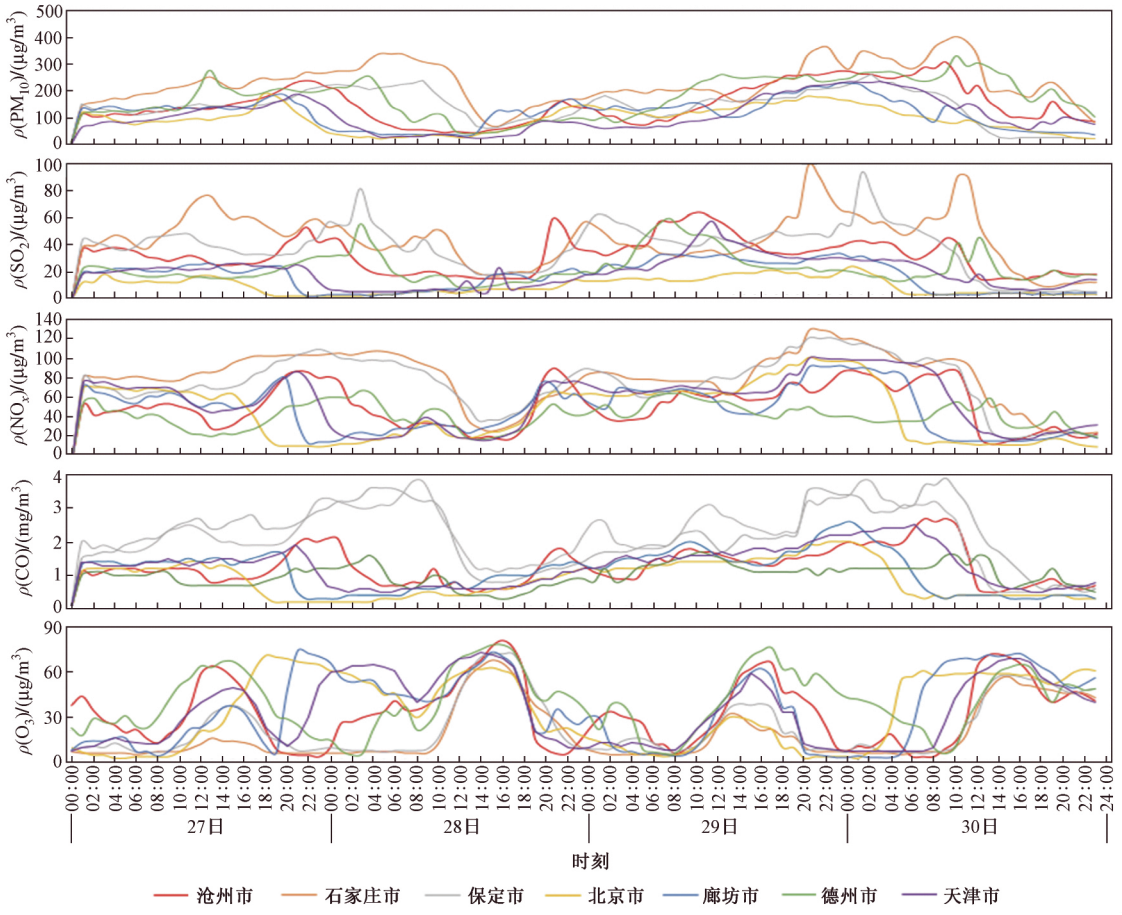


图 4 2019 年 1 月 27—30 日沧州市与周边城市常规污染物质量浓度对比

Fig.4 Comparison of normal pollutants concentrations between Cangzhou City and surrounding cities from 27th to 30th January, 2019

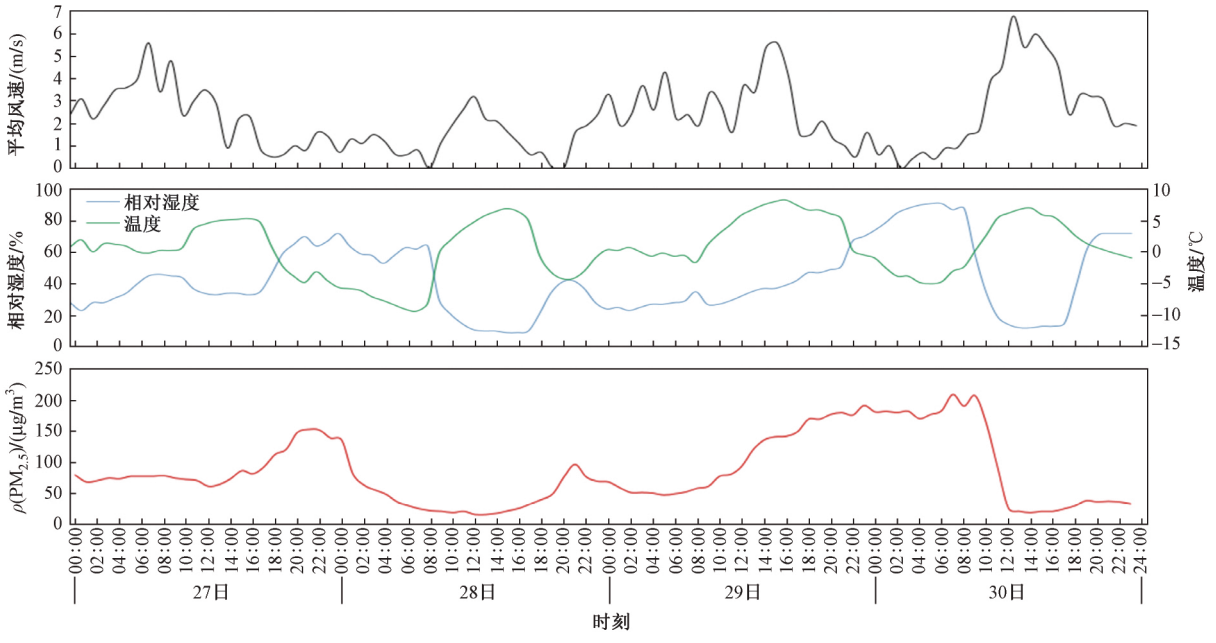


图 5 沧州市 2019 年 1 月 27—30 日污染过程气象参数的变化

Fig.5 Changes in meteorological parameters of pollution processes in Cangzhou City from 27th to 30th January, 2019

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　结论

a) 开发了大气环境管理平台(APP),该平台具有大气污染过程综合分析、报告自动生成等功能,用于辅助重污染天气会商,为消峰减排提供依据和指导.

b) 分析数据来源于国家大气污染防治攻关联合中心和中国环境科学研究院,同时将分析过程与实际情况进行验证,保证了分析结果的可靠性.

c) 沧州市 2019 年 1 月 27—30 日大气重污染过程中,有 19 h 的 AQI 指数在 201~300 之间,AQI 指数最高达 259; 有 19 h 的 $\rho(PM_{2.5})$ 在 150 μg/m^3 以上,$\rho(PM_{2.5})$ 最高值为 209 μg/m^3. 此次重污染过程中持续 2 d 为重度污染日. 从气象条件看,污染过程 2 以静稳天气为主,$\rho(PM_{2.5})$ 较高时,相对湿度超过 70%. 夜间逆温较强,不利于污染物扩散. 重污染过程期间,沧州市处于幅合流场区域,有利于污染物的积累; 受近地面幅合流场、高湿和逆温影响,不利的扩散条件及本地积累的颗粒物吸湿增长和二次转化,导致 $\rho(PM_{2.5})$ 迅速升高,使之达到重度污染的程度. 污染过程 1 至污染过程 2 期间,$\rho(PM_{2.5})/\rho(PM_{10})$ 由 0.59 升至 0.61,在污染结束时,$\rho(PM_{2.5})/\rho(PM_{10})$ 降至 0.5 以下,最小值为 0.12,表明加强对前体物的控制是削弱重污染时段 $\rho(PM_{2.5})$ 的重要途径.

d) 源解析结果表明,重污染期间区域传输贡献率较大,本地贡献源主要为工业源和民用源.

致谢: 感谢沧州市生态环境局在研究工作中给予的支持!

参考文献(References):

[1] CASTELLANOS P, MARUFU L T, DODDRIDGE B G, *et al*. Ozone, oxides of nitrogen, and carbon monoxide during pollution events over the eastern United States: an evaluation of emissions and vertical mixing [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116(D16): D16307.

[2] TIAN Hezhong, WANG Yan, ZHAO Dan, *et al*. Formation and causes of NO_x pollution on the east side of the Taihang Mountains in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(19): 2044-2049.

[3] HONDULA D M, SITKA L, DAVIS R E, *et al*. A back-trajectory and air mass climatology for the northern Shenandoah Valley, USA [J]. International Journal of Climatology, 2010, 30(4): 569-581.

[4] 刘毓.基于 GIS 的面向对象大气环境信息系统 [D]. 西安: 西北工业大学, 2011: 1-2.

[5] 王康.区域大气环境信息管理及展示平台设计与实现 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 2-3.

[6] 张达刚,陈海宁,陈华,等.环境评估大数据管理平台初探及技术综述 [J]. 计算机系统应用, 2019, 28(4): 205-211.
ZHANG Dagang, CHEN Haining, CHEN Hua, *et al*. Proposal and technology research of big data management platform environmental evaluation [J]. Computer Systems & applications, 2019, 28(4): 205-211.

[7] 董天奇.保定市大气污染城市智能管理平台设计 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2016: 4-5.

[8] 伯鑫,甄瑞卿,屈加豹,等.中国钢铁行业大气污染物排放清单管理系统研究 [J]. 环境污染与防治, 2017, 39(5): 578-582.
BO Xin, ZHEN Ruiqing, QU Jiabao, *et al*. Study on the management system of atmospheric pollutant emission inventory for steel industry of China [J]. Environmental Pollution and Prevention and Control, 2017, 39(5): 578-582.

[9] 伯鑫,何友江,商国栋,等.基于 CEMS 全国污染源清单数据库系统开发与应用 [J]. 环境工程, 2014, 32(8): 105-108.
BO Xin, HE Youjiang, SHANG Guodong, *et al*. Development and application of the national pollutant emission in ventory database system with CEMS [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2014, 32(8): 105-108.

[10] 张云海,马雁军,杨洪斌,等.辽宁省大气环境信息管理系统 [J]. 环境科学与技术, 2005, 28(5): 25-27.

[11] 鄢学贫,罗宇,李彬,等.郑州市环境监控应急指挥中心系统的设计与实现 [J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2001, 21(3): 48-50.
YAN Xuepin, LUO Yu, LI Bin, *et al*. Design and implementation of the commanding center of environmental supervision system about Zhengzhou City [J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry (Natural Science), 2001, 21(3): 48-50.

[12] 李东东.基于 GIS 的区域大气环境信息系统 [D]. 济南: 山东师范大学, 2009: 3-5.

[13] FOUDA Y E. A GIS for environmental assessment of air pollution impacts on urban clusters and natural landscape at Rosetta City and region, Egypt [J]. Urban Ecosystems, 2001, 5(1): 5-25.

[14] JENSEN S S, BERKOWICZ R, HANSEN H S, *et al*. A Danish decision-support GIS tool for management of urban air quality and human exposures [J]. Transportation Research, Part D (Transport and Environment), 2001, 6(4): 229-241.

[15] MONGI S, MOHAMED O, MAUD L, *et al*. Integrated environmental and socio-economic modeling using LEIS for desertification monitoring and assessment in Menzel Habib Observatory (South Tunisia) [M]. Medenine: Tunisia The Future of Drylands, 2008: 311-321.

[16] WANG Hong, LI Jianghao, PENG Yue, *et al*. The impacts of the meteorology features on $PM_{2.5}$ levels during a severe haze episode in central-east China [J]. Atmospheric Environment, 2019, 197: 177-189.

[17] ZHANG Qiang, QUAN Jiannong, TIE Xuexi, *et al*. Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China [J]. Science of the Total Environment, 2015, 502: 578-584.

[18] LI Jun, CHEN Hongbin, ZHAN Qingli, *et al*. Low-level temperature inversions and their effect on aerosol condensation nuclei concentrations under different large-scale synoptic circulations [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015, 32(7): 898-908.

[19] SILCOX G D, KELLY K E, CROSMAN E T, *et al*. Wintertime $PM_{2.5}$ concentrations during persistent, multi-day cold-air pools in a

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

mountain valley [J]. Atmospheric Environment, 2012, 46(1): 17–24.

[20] LI Xiaolan, WANG Yanfeng, SHEN Lidu, *et al*. Characteristics of boundary layer structure during a persistent haze event in the Central Liaoning City cluster, northeast China [J]. Journal of Meteorological Research, 2018, 32(2): 301–312.

[21] ZHENG Mei, SALMON L G, SCHAUER J J, *et al*. Seasonal trends in $PM_{2.5}$ source contributions in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(22): 3967–3976.

[22] SILVA R A, WEST J J, ZHANG Y, *et al*. Global premature mortality due to anthropogenic outdoor air pollution and the contribution of past climate change [J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(3): 1–11.

[23] YAO Wanxiang, ZHANG Chunxiao, WANG Xiao, *et al*. The research of new daily diffuse solar radiation models modified by air quality index (AQI) in the region with heavy fog and haze [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 139: 140–150.

[24] **伯鑫, 王刚, 田军, 等**. AERMOD **模型地表参数标准化集成系统研究** [J]. **中国环境科学**, 2015, 35(9): 2570–2575.
BO Xin, WANG Gang, TIAN Jun, *et al*. Standard systems of surface parmeters in AERMOD [J]. China Environmental Science, 2015, 35(9): 2570–2575.

[25] **伯鑫, 丁峰, 徐鹤, 等**. **大气扩散** CALPUFF **模型技术综述** [J]. **环境监测管理与技术**, 2009, 21(3): 9–13.
BO Xin, DING Feng, XU He, *et al*. Review of atmospheric diffusion spersion model CALPUFF technology [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2009, 21(3): 9–13.

[26] MA Jianzhong, XU Xiaobin, ZHAO Chunsheng, *et al*. A review of atmospheric chemistry research in China: photochemical smog, haze pollution, and gas-aerosol interactions [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2012, 29(5): 1006–1026.

[27] **叶霞, 王剑, 刘伟, 等**. **沧州市郊大气** PM_{10} **浓度变化特征分析** [J]. **环境化学**, 2013, 32(8): 1588–1589.
YE Xia, WANG Jian, LIU Wei, *et al*. Characteristic analysis of PM_{10} concentration in the suburbs of Cangzhou [J]. Environmental Chemistry, 2013, 32(8): 1588–1589.

[28] **李明华, 陈芳丽, 甘泉, 等**. 2013—2016 **年惠州市大气颗粒物质量浓度变化特征和典型污染过程分析** [J]. **气象与环境科学**, 2019, 42(2): 90-94.
LI Minghua, CHEN Fangli, GAN Quan, *et al*. Variation characteristics of particular matter concentration and typical pollution processes during 2013–2016 in Huizhou City [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42(2): 90-94.

[29] **姚青, 刘敬乐, 蔡子颖, 等**. **天津大气稳定度和逆温特征对** $PM_{2.5}$ **污染的影响** [J]. **中国环境科学**, 2018, 38(8): 2865–2872.
YAO Qing, LIU Jingle, CAI Ziying, *et al*. Atmospheric stability and inverse temperature characteristics of Tianjin and its effect on $PM_{2.5}$ pollution [J]. China Environmental Science, 2018, 38(8): 2865–2872.

[30] TAO Jun, ZHANG Leiming, HO K, *et al*. Impact of $PM_{2.5}$ chemical compositions on aerosol light scattering in Guangzhou: the largest megacity in South China [J]. Atmospheric Research, 2014, 135/136: 48–58.

[31] LI Xinghua, HE Kebin, LI Chengcai, *et al*. $PM_{2.5}$ mass, chemical composition, and light extinction before and during the 2008 Beijing Olympics [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013, 118(21): 158–167.

[32] LIN Yanfen, HUANG Kan, ZHUANG Guoshun, *et al*. A multi-year evolution of aerosol chemistry impacting visibility and haze formation over an eastern Asia megacity, Shanghai [J]. Atmospheric Environment, 2014, 92: 76–86.

[33] **刘娜, 余晔, 何建军, 等**. **兰州冬季大气污染来源分析** [J]. **环境科学研究**, 2015, 28(4): 509–515.
LIU Na, YU Ye, HE Jianjun, *et al*. Analysis of air pollutant transport in winter in Lanzhou [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(4): 509–515.

(**责任编辑: 刘 方**)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net