

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勣之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勤之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
基于多种新型受体模型的 PM_{2.5} 来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
华中地区夏季 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
淄博 2021 年元宵节 PM_{2.5} 水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
浙江省大气颗粒物 PM_{2.5} 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
2001~2019 年气象条件对江苏省 PM_{2.5} 分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
基于神经网络和数值模型的重点区域 PM_{2.5} 预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
2015~2020 年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
2000~2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
雨源型城市河流污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素: 以石家庄为例 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)
新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索: 以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)
典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全性的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 虎发虎, 韩辉 (1031)
土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
《环境科学》征订启事(618) 《环境科学》征稿简则(761) 信息(685, 935, 956)

基于多种新型受体模型的 $PM_{2.5}$ 来源解析对比

王振宇^{1,2}, 李永斌³, 郭凌³, 宋志强³, 许艳玲⁴, 王丰^{1,2}, 梁维青^{1,2}, 史国良^{1,2*}, 冯银厂^{1,2}

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300350; 2. 中国气象局-南开大学大气环境与健康研究联合实验室, 天津 300074; 3. 晋中市生态环境局, 晋中 030600; 4. 生态环境部环境规划院区域空气质量模拟与管控研究中心, 北京 100012)

摘要: 为了解多种新型受体模型的适用性, 利用正定矩阵分解/多元线性引擎 2-物种比值 (PMF/ME2-SR)、偏目标转换-正定矩阵分解 (PTT-PMF)、正定矩阵分解 (PMF) 和化学质量平衡 (CMB) 这 4 种受体模型对我国北方典型城市细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 数据进行同步解析并互相验证。结果发现, 燃煤源 (25%~26%)、扬尘源 (19%~21%)、二次硝酸盐 (17%~19%)、二次硫酸盐 (16%)、机动车源 (13%~15%)、生物质燃烧源 (4%~7%) 和钢铁源 (1%~2%) 这 7 种主要污染源对研究地区 $PM_{2.5}$ 有贡献。通过比较不同模型获得的源成分谱和源贡献以及计算各源的差异系数 (CD) 和平均绝对误差 (AAE), 发现 4 种模型的解析结果具有较高的一致性 (平均 CD 值在 0.6~0.7 之间), 但不同模型对各污染源中组分的识别存在差异。相比于传统 PMF 模型, PMF/ME2-SR 模型由于纳入一次源类的特征比值, 能够更好地地区分源谱特征较为相似的源类, 如扬尘源的 CD 和 AAE 分别比 PMF 模型低 15% 和 54%; PTT-PMF 模型以实测一次源谱和虚拟二次源谱为约束目标, 计算的二次硫酸盐的 CD 和 AAE 分别为 0.25 和 17%, 比 PMF 低 55% 和 23%, 获得了更“纯净”的二次源类并识别了其他模型未识别的钢铁源, 对源类的精细化解析更具优势。

关键词: $PM_{2.5}$; 来源解析; 正定矩阵分解/多元线性引擎 2-物种比值模型 (PMF/ME2-SR); 偏目标转换-正定矩阵分解模型 (PTT-PMF); 新型受体模型

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0608-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202106199

$PM_{2.5}$ Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models

WANG Zhen-yu^{1,2}, LI Yong-bin³, GUO Ling³, SONG Zhi-qiang³, XU Yan-ling⁴, WANG Feng^{1,2}, LIANG Wei-qing^{1,2}, SHI Guo-liang^{1,2*}, FENG Yin-chang^{1,2}

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. China Meteorological Administration-Nankai University (CMA-NKU) Cooperative Laboratory for Atmospheric Environment-Health Research, Tianjin 300074, China; 3. Jinzhong Municipal Bureau of Ecology and Environment, Jinzhong 030600, China; 4. Center for Regional Air Quality Simulation and Control, Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to understand the applicability of various new receptor models, four receptor models, including the positive matrix factorization/multilinear engine 2-species ratio (PMF/ME2-SR), partial target transformation-positive matrix factorization (PTT-PMF), positive matrix factorization (PMF), and chemical mass balance (CMB), were used to analyze and verify the atmospheric fine particulate matter ($PM_{2.5}$) data of a typical city in northern China. It was found that coal combustion (25%-26%), dust (19%-21%), secondary nitrate (17%-19%), secondary sulfate (16%), vehicle emissions (13%-15%), biomass burning (4%-7%), and steel (1%-2%) had a contribution to $PM_{2.5}$. By comparing the source profiles and source contributions obtained by different models and calculating the coefficient of differences (CD) and average absolute error (AAE) of each source, we found that although the source apportionment results of the four models were in good agreement (the average CD value was between 0.6 and 0.7), there were still slight differences in the identification of some components in each source. Compared with the traditional model (PMF), the PMF/ME2-SR model can better identify sources with similar source profile characteristics, which is due to the component ratios of sources that are introduced. For example, the CD and AAE of dust sources were 15% and 54% lower than those of PMF, respectively. The PTT-PMF model takes the measured primary source profiles and virtual secondary source profiles as a constraint target, and the calculated CD and AAE of secondary sulfate were 0.25 and 17%, respectively, which were 55% and 23% lower than PMF. The PTT-PMF model can obtain more “pure” secondary sources and identify the pollution sources that are not identified by other models, which has more advantages in the refined identification of sources.

Key words: $PM_{2.5}$; source apportionment; positive matrix factorization/multilinear engine 2-species ratio (PMF/ME2-SR); partial target transformation-positive matrix factorization (PTT-PMF); new receptor models

随着工业化、城市化和经济的快速发展, 人类活动对环 境空气质量产生了较大的影响。中国在过去的近 20 年中一直面临着严重的空气污染问题, 特别是区域性雾-霾污染日益突出^[1~3]。大气细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 作为控制雾-霾的关键已成为世界上最重要的空气污染物之一, 其污染形势严峻, 刻不容缓^[4~6]。作为一种复杂的无机和有机化合物的混合

物, $PM_{2.5}$ 来源十分复杂^[7], 对区域气候、公共卫生和人类健康造成不利影响^[8]。例如, $PM_{2.5}$ 可以通过

收稿日期: 2021-06-24; 修订日期: 2021-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41775149, 42077191); 中央高校基本科研业务费专项 (63213072); 大气重污染成因与治理攻关项目 (DQGG-05-30)

作者简介: 王振宇 (1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染防治, E-mail: wangzhenyu818@mail.nankai.edu.cn

* 通信作者, E-mail: nksgl@nankai.edu.cn

散射和吸收光辐射,降低大气能见度,给人们的生活带来不便^[9]. 除此之外,长期暴露于高浓度水平的颗粒物环境中会引起多种人体健康问题,如哮喘和心血管疾病等^[10,11]. 因此,准确识别和量化 PM_{2.5} 的污染来源对于制定有效的空气污染控制策略至关重要.

大气颗粒物来源解析技术方法主要包括 3 类:源清单法、源模型法和受体模型法(receptor model, RM). 其中,受体模型法因其不依赖于气象资料和污染源排放信息,只需要输入受体组分信息的特点被广泛应用于国内外的空气污染研究^[12~15],特别是化学质量平衡(chemical mass balance, CMB)模型和正定矩阵因子分解(positive matrix factorization, PMF)模型是目前国内最常用的模型^[7,16,17]. 然而,随着空气污染特征的复杂性变化和管理部门应急管控实际诉求的提高,传统受体模型在实际应用中不断面临着新的挑战^[18,19]. 例如,CMB 模型需要同时输入源成分谱(源谱)信息和受体数据,虽然该模型能够较明确地识别污染源,但仅能鉴别输入源谱中的源类,对于化学组成相似的共线性源类不能很好地区分. 此外,对于没有源谱或者源谱不全的情况无法解析. PMF 模型利用受体的化学组成解析源谱和源贡献,单纯从数学角度寻找满足最小理论 Q 值的情况. 其在提取因子时没有考虑物理意义的合理性,因此可能会计算出无穷多解,这使得解析出的源谱无法对应到真实源类^[20].

为缓解这些问题,近年来,有学者陆续开发了多种模型来降低当前受体模型的不确定性,一些改进的新方法应用而生. 例如 Zheng 等^[21,22] 的研究结合有机分子示踪物开发了 CMB-有机示踪物(CMB-molecular marker, CMB-MM)法,能够更好地识别传统 CMB 模型不易判别的某些有机源类; Shi 等的研究为了使识别的因子谱更准确地对应到实际源类,开发了以特征组分比值和源谱特征为约束的 PMF/ME2-SR 模型^[23,24] 和 PTT-PMF 模型^[25].

虽然上述新型模型的提出已经得到了一定程度的应用,但关于模型间适用性的对比研究依然十分缺乏. 同时,源解析结果具有未知性,通过多种模型的对比研究能够降低单一方法的不确定性,得到较为可靠的一致性结果,这也为源解析结果的判断和选择提供借鉴. 为此,本文选择 PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 新型模型,以晋中市为研究区域,利用同一组颗粒物受体数据,通过比较不同模型的源成分谱和源贡献,探究 PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 新型模型与 PMF 和 CMB 传统模型解析结果的差异,以期不同模型源解析的适用性研究提供科学依据,并为我国精细化源解析工

作的开展提供科学技术支撑.

1 材料与方法

1.1 源解析模型

本研究采用 PMF/ME2-SR、PTT-PMF、PMF 和 CMB 这 4 种模型进行同步解析和相互验证,重点在于突出比较上述新型模型和传统模型解析结果的差异,从而评估新型模型的适用性. 4 种模型的具体原理如下.

1.1.1 正定矩阵分解模型(PMF)

PMF 模型作为由美国环保署(EPA)推荐的源解析模型之一,被广泛用于颗粒物来源解析工作. PMF 利用最小二乘法,对受体浓度矩阵 X 不断分解,直到 Q 值和理论值接近,最终得到两个最优的因子矩阵 G 和 F 以及一个残差矩阵 E . 该模型的目的是通过选择适当数量的源类别 p ,满足残余矩阵 $E_{(n \times m)}$ 最小化的同时得到源贡献 $G_{(n \times p)}$ 矩阵和源成分谱 $F_{(p \times m)}$ 矩阵^[20,26].

$$X_{(n \times m)} = G_{(n \times p)} F_{(p \times m)} + E_{(n \times m)} \quad (1)$$

式中, n 为样本个数, m 为组分数量.

PMF 的任务是寻找最小化目标函数(Q_{main}):

$$Q_{\text{main}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (e_{ij}/\sigma_{ij})^2 \quad (2)$$

式中, e_{ij} 为 σ_{ij} 对应的误差; σ_{ij} 为第 i 样品中 j 个物种的不确定性.

1.1.2 正定矩阵分解/多元线性引擎 2-物种比值模型(PMF/ME2-SR)

PMF 模型基于大量统计学方法从受体数据中提取因子,计算过程中没有考虑实际源类的物理意义,导致被提取的因子与实际的污染源成分谱之间存在一定差异. 而 PMF/ME2-SR 模型基于 PMF/ME2 科学计算平台,将污染源特征组分的比值作为提取过程的约束条件纳入模型,使得提取的因子更具物理意义^[23]. 该模型可以求解 PMF 模型中各种多线性和拟多线性问题,通过实施外部约束,使解析结果朝着目标值或比值拉伸因子元素^[26,27]. 该模型在一定程度上使结果朝着更客观的实测源谱靠近,降低了 PMF 结果易受主观因素影响的不确定性. 一般来说,源特征组分比值必须作为辅助方程处理,辅助方程作为附加项(Q_{aux})包含在增强对象函数 Q_{enh} 中^[23,28,29]:

$$Q_{\text{enh}} = Q_{\text{main}} + Q_{\text{aux}} \quad (3)$$

$$Q_{\text{main}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (e_{ij}/\delta_{ij})^2 \quad (4)$$

$$Q_{\text{aux}} = (f_{\text{pk}} - a_{\text{pk}})^2 / (\sigma_{\text{pk}}^{\text{aux}})^2 \quad (5)$$

式中, Q_{enh} 为从 PMF/ME2-SR 获得的输入文件中标

记为“ Q ”的总 Q 值. Q_{main} 与 PMF 模型相同. δ_{ij} 为第 j 类源中 i 样品的不确定度, e_{ij} 为 δ_{ij} 对应的误差. Q_{aux} 为由辅助方程引入的附加项, 其中为拉伸方程的不确定度; f_{pk} 为从 ME2 基本运行中得到的因子加载元素; a_{pk} 为目标值.

1.1.3 偏目标转换-正定矩阵分解模型(PTT-PMF)

PTT-PMF 模型是在 PMF/ME2 的基础上做出的进一步改进, 它是一种将源成分谱数据纳入模型, 通过部分目标转换方法实现的新型源解析模型. 具体来说, 该模型将测量得到的实测一次源谱及虚拟的二次源谱作为目标因子, 选择并固定所有源的源标识组分, 通过方程式(3)的拉动, 实现因子谱的目标转换. 使用该模型提取的因子谱更接近实际的源成分谱, 从而增加了解析结果的真实性和可靠性. 其详细原理详见文献[25].

1.1.4 化学质量平衡模型(CMB)

为了和上述 PMF 类的模型更好地对比, 本文还使用了 CMB 模型进行检验. CMB 模型假设在排放源和环境受体(污染源样品和环境颗粒物样品)之间存在化学质量平衡, 即污染物在从源到受体的传输过程中质量没有损失, 则受体上测量的化学组分浓度就是每一源类贡献该化学组分浓度值的线性加和^[30~32]. 该模型需要输入源成分谱数据.

$$c_i = \sum_{j=1}^J F_{ij} S_j \quad (6)$$

式中, c_i 为受体中所测的第 i 个组分的质量浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); F_{ij} 为第 j 个排放源排放的物质中第 i 个组分占的比例; S_j 为第 j 个排放源的贡献 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); i 为化学物质的数目; J 为污染源类型的数目.

1.2 样品采集与分析

为了比较不同模型的解析结果, 本研究采用同一组环境受体样品进行计算. 于 2018 年 10 月至 2019 年 9 月, 以晋中市中心榆次区为采样地点, 同步布设两台中流量的空气采样器, 一台搭载石英纤维滤膜(石英膜, 直径 47 mm), 用于碳组分和水溶性离子分析; 另一台搭载特氟龙滤膜(有机膜, 直径 47 mm), 适用于无机元素分析. 每天连续采样 23 h (10:00 ~ 次日 09:00). 最终挑选 134 个样品进行源解析计算.

本研究采用重量法测定颗粒物质量, 并对颗粒物中化学组分进行分析, 包括 31 种无机元素, 9 种水溶性离子和碳质组分. 其中元素(Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Co、Cu、Zn、Ba、Li、Be、As、Sr、Cd、Sn、Sb、Bi、Tl、Se、Ag、Th、U、Hg 和 Pb)由 ICP-MS 分析测得; 依据离子色谱

法, 采用超声提取系统提取水溶性离子 (Na^+ 、 Cl^- 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 F^- 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-}), 并用离子色谱仪进行分析. 有机碳(OC)和元素碳(EC)的测定仪器为热/光碳分析仪 DRI-2001A (Atmoslytic, 美国).

1.3 评价指标

为了进一步比较模型提取的源成分谱与实测源成分谱间的差异, 引入差异系数(CD)指标来评价因子分析的有效性^[33]. 一般来说, CD 接近 0 表示相似程度较大, 接近 1 表示差异较大.

$$\text{CD} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left(\frac{x_{kf} - x_{kj}}{x_{kf} + x_{kj}} \right)^2} \quad (7)$$

式中, x_{kf} 和 x_{kj} 分别为第 f 个和第 j 个污染源中第 k 个化学物质的质量浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 其中 f 和 j 分别为模型解析的污染源和实测的污染源; p 为化学组分的总数.

同时, 为评价多模型因子贡献率的准确性, 采用平均绝对误差(AAE)来量化各模型估算源贡献率与多模型平均源贡献率之间的整体差异. 通常情况下, 该数值越大, 表示模型解析的源贡献率与平均源贡献率的差异越大^[34].

$$\text{AAE}_k = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{(E_{ik} - A_{ik})}{A_{ik}} \times 100 \quad (8)$$

式中, AAE_k 为第 k 个源类的 AAE 值; n 为样品的数量(在本研究中, $n=114$); E_{ik} 为第 k 个源类中第 i 个样品的估计贡献值 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); A_{ik} 为第 k 个源类中第 i 个样品的多模型平均贡献值 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

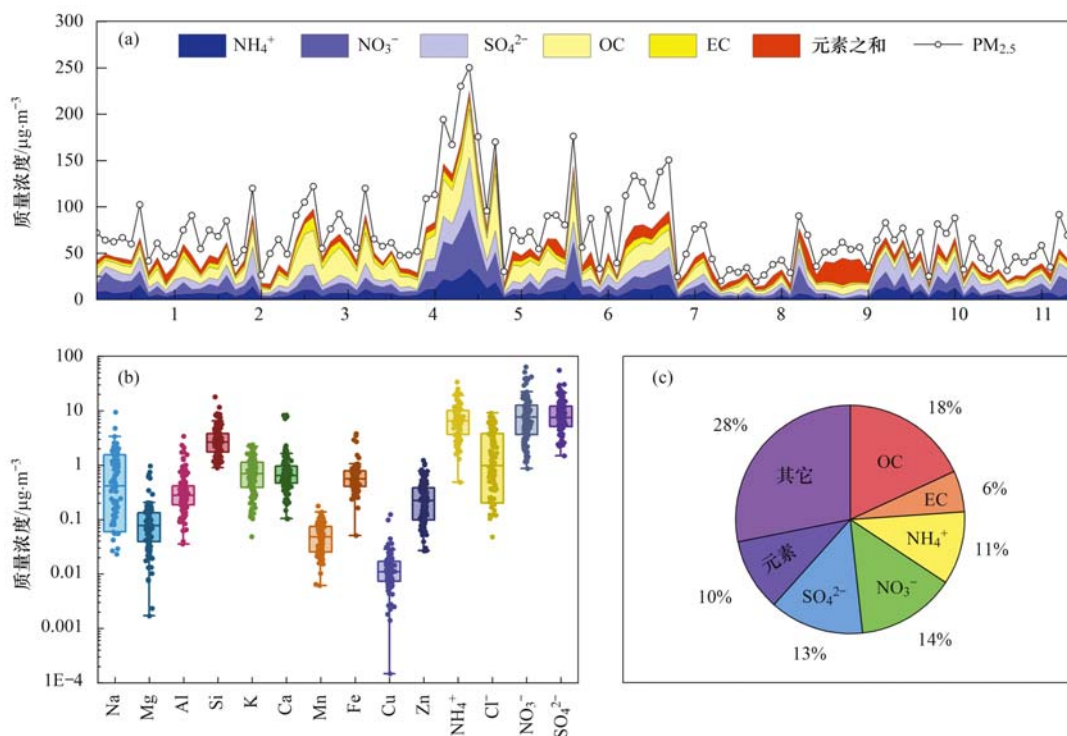
2 结果与讨论

2.1 颗粒物样品及其主要化学组分质量浓度特征

为更好地识别污染源, 首先对采集得到的受体样品及其化学组成质量浓度特征进行分析. 图 1 为采样期间环境受体颗粒物及其化学组分, 主要包括含碳组分、水溶性离子和部分无机元素的质量浓度水平及质量分数. 由图 1(a)的日均质量浓度时间序列变化可以看出, $\text{PM}_{2.5}$ 和各组分的变化趋势基本一致. 观测期间, 平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $(73.2 \pm 42.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是 2018 年京津冀和长三角地区的 1.3 倍左右^[5], 与郑州 ($70.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和新乡 ($69.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 基本相当^[35], 但低于成都市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ [$(96.5 \pm 11.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 的 34%^[36]. 此外, 对主要的无机元素和离子组分质量浓度做进一步地统计分析[图 1(b)], 结果表明 $\rho(\text{Si})$ 、 $\rho(\text{Ca})$ 、 $\rho(\text{Na})$ 、 $\rho(\text{K})$ 和 $\rho(\text{Fe})$ 分别为 (3.2 ± 2.4) 、 (1.1 ± 1.5) 、 (0.9 ± 1.2) 、 (0.8 ± 0.6) 和 (0.7 ± 0.6)

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 在总无机元素中较高, 分别占元素之和的 42.7%、14.1%、11.5%、10.9% 和 8.9%, 与其他元素相比, 对 PM_{2.5} 的贡献较大。Si、K 和 Ca 等又是扬尘源的典型标志组分, 初步说明该城市的大气污染可能受到扬尘源的影响。图 1(c) 呈现了各组分占 PM_{2.5} 的质量分数情况, 可以看出无机元素和水溶性离子对 PM_{2.5} 有着重要贡献, 尤其是 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 等二次离子, 这也间接表明了该地区大气污染可能存在较严重的二次污染。无机元素之和的平均质量浓

度为 $(7.5 \pm 4.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 在 PM_{2.5} 中同样占有较高的质量分数(10%)。相比于无机元素, 含碳物质平均 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 分别为 $(13.2 \pm 11.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(4.3 \pm 3.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别占 PM_{2.5} 的 18.1% 和 5.8%。以 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主的离子在 PM_{2.5} 中的质量分数高达 38%, 其质量浓度分别为 (7.6 ± 5.6) 、 (10.2 ± 10.5) 和 $(9.8 \pm 7.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 说明 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 是大气颗粒物主要的化学组分。



(a) 中: 1. 2018-10-31; 2. 2018-12-06; 3. 2018-12-19; 4. 2019-01-01; 5. 2019-01-17; 6. 2019-02-10; 7. 2019-03-08; 8. 2019-03-28; 9. 2019-06-14; 10. 2019-08-26; 11. 2019-09-20

图 1 采样期间细颗粒物 (PM_{2.5}) 及主要组分的质量浓度和质量分数水平

Fig. 1 Mass concentrations and percentages of fine particulate matter (PM_{2.5}) and its major components during sampling

2.2 基于多种受体模型的颗粒物来源解析

基于上述实际采集的受体数据, 本研究利用 PMF/ME2-SR、PTT-PMF、PMF 和 CMB 这 4 种不同的模型进行解析。其中, PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 是新型因子分析类模型, 本研究重点比较这两种新型模型与 PMF 和 CMB 这两种传统受体模型结果之间的差异。

2.2.1 PMF 模型的源解析结果

PMF 模型不需要输入源谱信息, 依靠受体的化学组成就可以得到带有时间序列的解析结果。经过多次试验, 最终确定 6 个因子为最佳结果, 因子谱如图 2 所示。因子 1 中 OC、EC 和 SO_4^{2-} 的质量浓度较高, 被识别为燃煤源 (26%), 高质量浓度的 OC 和 EC 表明该源中可能混合了部分二次有机气溶胶

(SOA); 因子 2 以 Na、Al、Si 和 Ca 等地壳元素为主, 其中 Si 和 Ca 在该因子中的贡献率均在 40% 左右具有较大优势, 故将该因子确定为扬尘源^[37], 贡献占比达到 21%; 因子 3 中 OC 和 EC 的质量浓度显著高于其他组分, 作为机动车的典型标志组分被识别为机动车源^[38] (14%); 因子 4 主要由 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 组成, 这些组分可作为二次硫酸盐 (16%) 的标志物^[39], 但该源的 Si 元素过高; 因子 5 含有高质量浓度的 NH_4^+ 和 NO_3^- , 可能是二次硝酸盐 (18%), 但该因子伴随有部分 SO_4^{2-} ; 因子 6 因其含有高质量浓度的 K 和 Cl⁻ 等生物质燃烧的标志组分被判定为生物质燃烧源^[40] (5%), 但 PMF 模型识别的该源中混杂了少量的地壳元素和金属元素, 如 Mg、Al、Fe 和 Cu 等。结果表明, PMF 模型提取的因子在

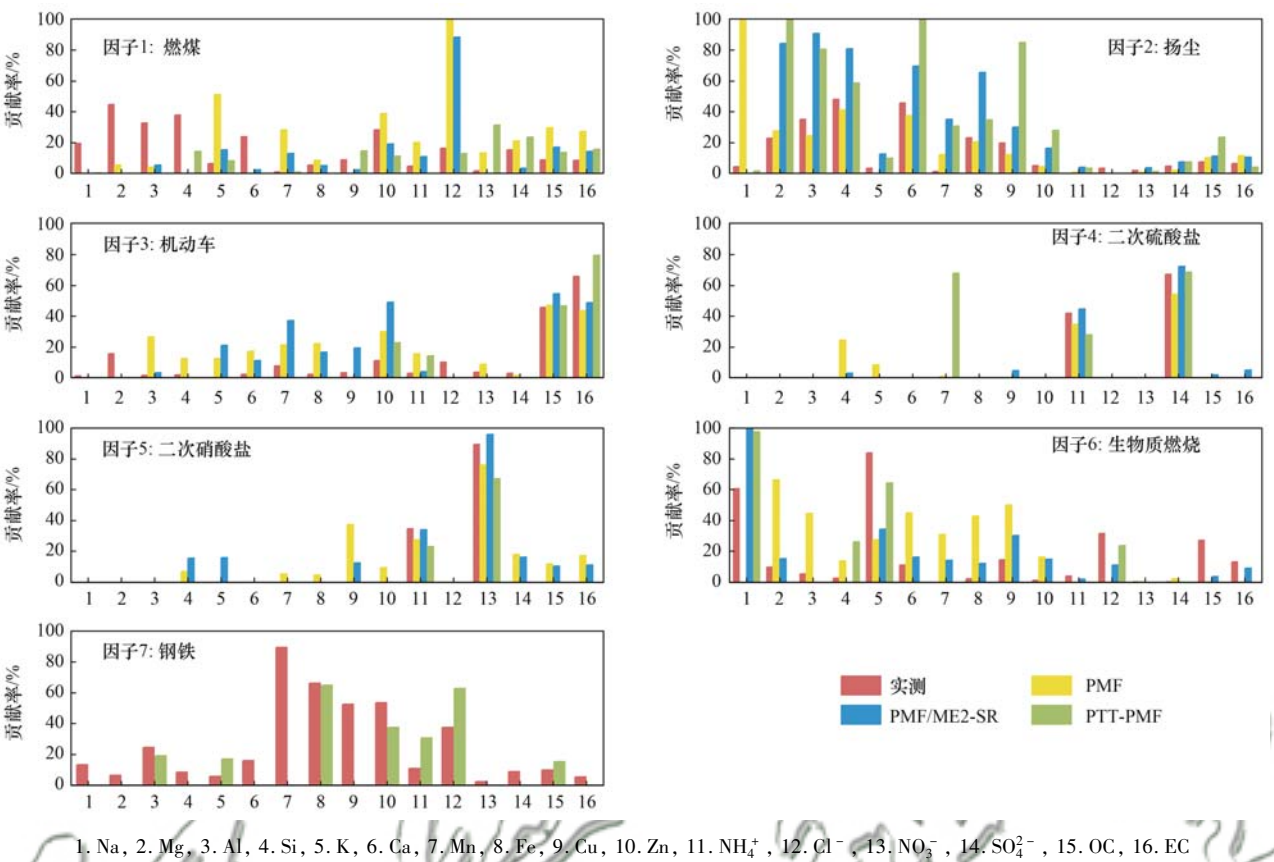


图2 由多种模型解析的细颗粒物(PM_{2.5})污染来源成分谱

Fig. 2 Source profiles of fine particulate matter (PM_{2.5}) analyzed by various models

识别过程中存在一定的不确定性,一些因子中混杂着其他源类的标志组分.这一现象在诸多源解析工作中也有报道^[15,39,41].

2.2.2 PMF/ME2-SR 模型的源解析结果

PMF/ME2-SR 模型将实测源谱的标识组分特征纳入 PMF 模型中,使得提取的因子具有实测源谱的特征,可以更加接近实际源类.表 1 为纳入 PMF/ME2-SR 模型的特征组分比值.该模型识别出 6 个因子(见图 2).因子 1 含有高质量浓度的 OC、Cl⁻ 和 SO₄²⁻,同时 Al/Ca 为 1.41(等于实测源谱中的比值),因此是燃煤源;因子 2 以 Si 和 Ca 为特征组分,Al/Ca 等于 0.81,十分接近实测源谱中的 0.80,故将其判断为扬尘源;因子 3 为机动车源,典型标志组分 OC 和 EC 质量浓度高;因子 4 以 SO₄²⁻ 和 NH₄⁺ 为主,是二次硫酸盐;因子 5 含有大量的 NO₃⁻ 和 NH₄⁺,但也混合了少量 SO₄²⁻,故该因子为二次硝酸盐;因子 6 被认为是生物质燃烧源,其标志组分 K 元素和 Cl⁻ 的质量浓度较高.与 PMF 模型的识别情况相比,PMF/ME2-SR 模型由于纳入了一次源类精细化的标志组分比值,更好地分配了燃煤源和扬尘源中的 Al、Ca,从而进一步区分了两种源类.另外,在生物质燃烧源的识别中混杂的其他干扰组分较少,其结果更接近实际情况.

表 1 PMF/ME2-SR 模型中包含的特征组分比值

Table 1 Characteristic component ratios included in the PMF/ME2-SR model

源类别	组分比值	输入	输出
燃煤	Al/Ca	1.41	1.41
扬尘	Al/Ca	0.80	0.81

2.2.3 PTT-PMF 模型的源解析结果

如上所述,PMF 模型解析的二次源类中混杂着 Si 等一次源类中的典型组分,这可能与二次粒子的老化过程有关.但在实际管理中,为了获得更“纯净”的二次源类(以更好地区别一次源类),本研究将实测的一次源成分谱和虚拟的二次源成分谱作为 PTT-PMF 模型的目标约束条件纳入模型计算,同时固定燃煤源中的 Ca、OC、EC 和 SO₄²⁻;扬尘源中的 Si 和 Ca;二次硝酸盐中的 NO₃⁻;二次硫酸盐中的 SO₄²⁻ 和 NH₄⁺;机动车排放源中的 OC 和 EC;生物质燃烧源中的 K 和 OC 以及钢铁源中的 Al 和 Fe.最终共解析出 7 种污染源,各污染源对 PM_{2.5} 的贡献结果依次为:燃煤源(26%)>扬尘源(20%)>二次硝酸盐(19%)>二次硫酸盐(16%)>机动车源(13%)>生物质燃烧源(4%)>钢铁源(2%).与上述模型相比,可以发现,PTT-PMF 模型进一步细分了工艺过程中的钢铁源,这说明 PTT-PMF 模型对其

他模型未识别的污染源具有更优的解析能力。

2.2.4 CMB 模型的源解析结果

为了进一步对比上述因子分析类模型的结果,本研究还采用了与上述模型原理不同的 NKCMB1.0 模型进行计算。结果表明,采样期间晋中市大气颗粒物污染贡献源类以燃煤源、扬尘源以及二次源(二次硝酸盐和二次硫酸盐)为主。其中燃煤源为首要污染源类,占比为 25%;扬尘源次之,约占 19%。二次来源包括二次硝酸盐(17%)和二次硫酸盐(16%)是由气态前体物(SO_2 和 NO_x)的化学反应形成的^[42],对 $\text{PM}_{2.5}$ 水平有重要影响。此外,机动车也是 $\text{PM}_{2.5}$ 的一个重要来源类别,贡献率为 15%。值得注意的是,与 PMF 类模型不同,CMB 模型得到的是某一时段内颗粒物污染源贡献的平均结果。

2.3 不同模型源解析结果比较

2.3.1 源成分谱对比

为比较上述模型的异同,本研究分别就提取的因子谱(源成分谱)、源贡献等方面对结果进行评估。图 2 将 PMF、PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 模型提取的因子谱(源成分谱)与 NKCMB 模型纳入的实测源成分谱进行比较。4 种模型识别了 6 种相同源类:燃煤、扬尘、机动车、二次硫酸盐、二次硝酸盐和生物质燃烧源。不同的是 PTT-PMF 还进一步解析了组分质量浓度偏低的钢铁源。4 种模型的估计结果基本保持一致,尤其是对污染源典型标志组分的识别,都准确地展现了该污染源的组分特征。这也表明上述源类的解析结果是可靠的。

但是,不同模型对各组分识别的适用性略有差异。与实测源成分谱相比,PMF 识别的燃煤源中 Na、Mg 和 Al 元素的质量浓度明显较低,K、Mn 和 Cl^- 的质量浓度明显较高;PMF/ME2-SR 识别的燃煤源

成分谱中含有相对较高的 Cl^- ; PTT-PMF 由于自身纳入了实测源谱和虚拟源谱特征,解析结果更接近真实情况。对扬尘源,PMF 计算的该源中 Na 的质量浓度要高于实测值,PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 模型则呈现相对较好的一致性。对二次硝酸盐,PMF、PMF/ME2-SR 解析的 SO_4^{2-} 、OC 和 EC 的质量浓度都在一定程度上高于实测值,尤其是 PMF 的高值情况更为严重;而 PTT-PMF 识别的源成分谱中除标志物外没有混合可能干扰识别的其他组分,表现优于其他模型。对生物质燃烧源,PMF 模型获得的 Na 元素低于实测源谱值,同时 Mg、Al、Mn 和 Fe 等金属元素又高于实测值,表明该模型对生物质燃烧源识别的准确性低于新型模型。

为了进一步评估 PMF、PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 估算得到的源成分谱与实测源成分谱的关系,本研究还计算了 CD 值。根据图 3 可以看出,PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 计算的 CD 值普遍低于 PMF,尤其是扬尘源、二次硝酸盐和二次硫酸盐的 CD 值。对于燃煤源,3 种模型计算的 CD 值相似;对扬尘源,由 PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 模型得到的 CD 值分别为 0.50 和 0.46,均低于 PMF 得到的 0.59;对二次硝酸盐和二次硫酸盐,PTT-PMF 计算的 CD 值(0.25 和 0.25)明显低于 PMF/ME2-SR(0.61 和 0.50)和 PMF(0.75 和 0.56);对生物质燃烧源,PMF/ME2-SR 的 CD 值更接近 0,表示与实测源成分谱的相似度较大。总的来说,这些结果与上述讨论一致,CD 值的大小表明了 PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 模型的结果接近实测源成分谱的程度,从而验证了模型的有效性。

综上所述,PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 模型解析出的因子谱比 PMF 模型更接近当地的实际情况。这

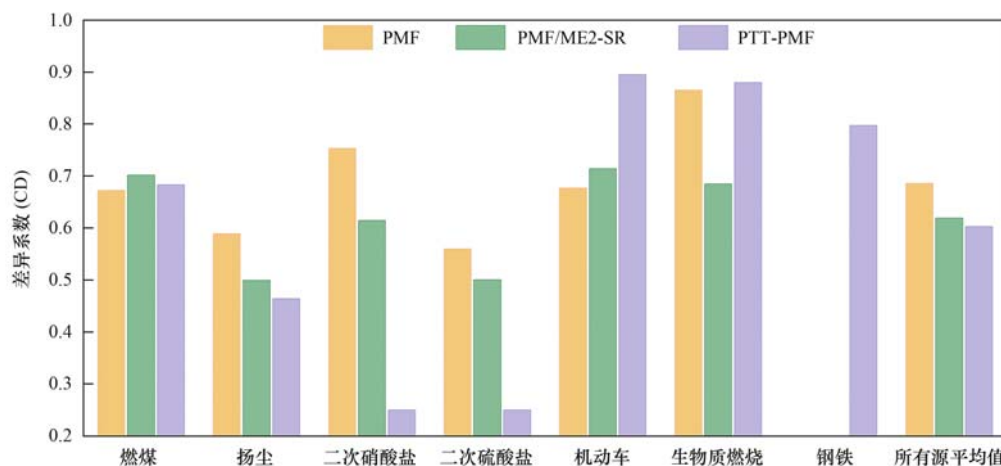


图 3 PMF、PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 解析得到的源谱的 CD 值比较

Fig. 3 Comparisons of CD for source profiles of PMF, PMF/ME2-SR, and PTT-PMF

是由于两种新型模型都引入了源谱标识组分作为约束指标,从而使得解析结果朝着实测源谱的目标贴近.组分间的比值关系实际反映了一次源谱的物理特征,PMF/ME2-SR 将其作为提取过程的约束条件纳入模型,使得提取的因子更具物理意义,在一定程度上降低了传统因子分析类受体模型仅依赖标志组分识别因子的不确定性,大大提升了相似源类的区分度. PTT-PMF 模型以部分实测和虚拟源谱为目标约束,识别到了组分含量偏低的钢铁源,这说明相比于其他受体模型,PTT-PMF 模型对源类的精细化识别更有优势;此外,PTT-PMF 模型提取的二次硝酸盐因子谱中除标志组分 NH_4^+ 和 NO_3^- 外,只伴随少量的 OC; 二次硫酸盐因子谱中除标志组分 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 外,只含有少量 Mn,并且 CD 值均为 0.25,明显低于其他模型的 CD 值.因此,该模型得到的二次源类的源成分谱更为“纯净”,混杂的其他一次源类的标志组分较少.

2.3.2 源贡献对比

为进一步探究不同模型结果的差异,图 4 呈现了 PMF、PMF/ME2-SR、PTT-PMF、前 3 种 PMF 类和 NKCMB 模型估计的平均源贡献率的对比情况. 4 种模型得到了较一致的解析结果:其中,燃煤源贡献率均为最高,在 25%~26% 之间;次之为扬尘源,贡献率为 19%~21%,其中最高贡献率由 PMF 和 PMF/ME2-SR 得到,最低贡献率由 NKCMB 得到;二次硝酸盐贡献率在 17%~19% 之间,PMF 的计算结果略高于 NKCMB,为 18%,PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 的贡献率最高,均为 19%;对于二次硫酸盐,4 种模型计算的对 $\text{PM}_{2.5}$ 的分担率相同,均为 16%;机动车源的贡献率介于 13%~15% 之间,在 4 种模型结果中的贡献均较小.其中,PMF/ME2-SR 和 PMF/ME2-SR 获得的贡献率一致,为 14%,NKCMB 解析的贡献率最高,PMF 则最低.生物质燃烧源的贡献率普遍低于机动车源,为 4%~7%,其中最高贡献率由 NKCMB 获得,最低贡献率由 PTT-PMF 获得,PMF 和 PMF/ME2-SR 的占比均为 5%.对于钢铁源,PTT-PMF 和 NKCMB 的解析结果相似,分别为 2% 和 1%.

从整体来看,3 种 PMF 模型得到的平均源贡献率与 NKCMB 源贡献率十分相似(图 4).其中,PMF 类模型估算的燃煤源、扬尘源和二次硝酸盐的贡献率仅比 NKCMB 高 1%;二次硫酸盐的贡献率均为 16%;机动车、生物质燃烧源和钢铁源的贡献率分别比 NKCMB 低 2%、2% 和 1%.本研究结果表明,新型模型添加约束条件后,解析出的各污染源贡献

与传统模型结果保持高度相似,但明显的优势在于对因子谱的识别有了更明确的判断.

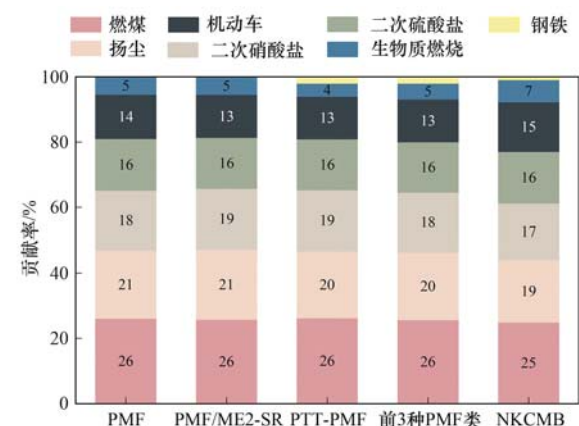


图 4 由多种模型解析的细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 源贡献率
钢铁源贡献率(黄色);PTT-PMF 为 2%,前 3 种 PMF 类(指 PMF、PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF)的平均贡献率为 2%,NKCMB 为 1%

图 4 由多种模型解析的细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 源贡献率

Fig. 4 Source contributions of fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) analyzed by various models

同时,本文还利用各模型估算的源贡献率与多模型平均的源贡献率计算了 AAE,从而比较不同模型源贡献率的可靠程度(图 5).结果发现,与使用 PMF 相比,PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 中扬尘和生物质燃烧源的 AAE 明显较低,分别比 PMF 低 54% 和 32%、45% 和 42%,说明 PMF 对这两种源贡献的差异性较大.对于二次硫酸盐,PTT-PMF 的 AAE(为 17%)低于 PMF 和 PMF/ME2-SR(分别为 22% 和 20%),表明 PMF 和 PMF/ME2-SR 对该源类的解析有更大的差异.

此外,在颗粒物来源解析工作中,除了估计平均贡献百分比外,源贡献的时间趋势也是值得考虑的.上述源解析结果反映了采样期间污染源的平均贡献水平,而探究不同源贡献的季节变化可以看出该结果是否符合当地的实际情况.从图 6 可以看出,3 种 PMF 类模型解析的燃煤源贡献浓度均在冬季达到最高.晋中市作为中国典型的北方城市,采暖季供暖使燃煤源成为秋冬季大气颗粒物的重要污染源类,这可能会造成相对高的煤炭燃烧源比例.由模型得到的源贡献结果恰好与当地供暖的实际情况紧密贴合,表明了解析结果的可靠性.需要注意的是,PTT-PMF 解析的春季燃煤源贡献浓度略高于其他模型,可能会存在一定程度的高估.另外,春季强风扬起的地壳尘埃,使扬尘源成为春季颗粒物重要的来源之一.由 PMF 和 PMF/ME2-SR 模型解析的扬尘源的季节变化基本符合当地的季节特征,但由 PTT-PMF 得到的贡献浓度表现为夏季高于春季,说明 PTT-PMF 对春夏季扬尘源的识别不确定性较大.对生物质燃烧源,PMF 获得的源贡献浓度呈现为:夏季 > 春季

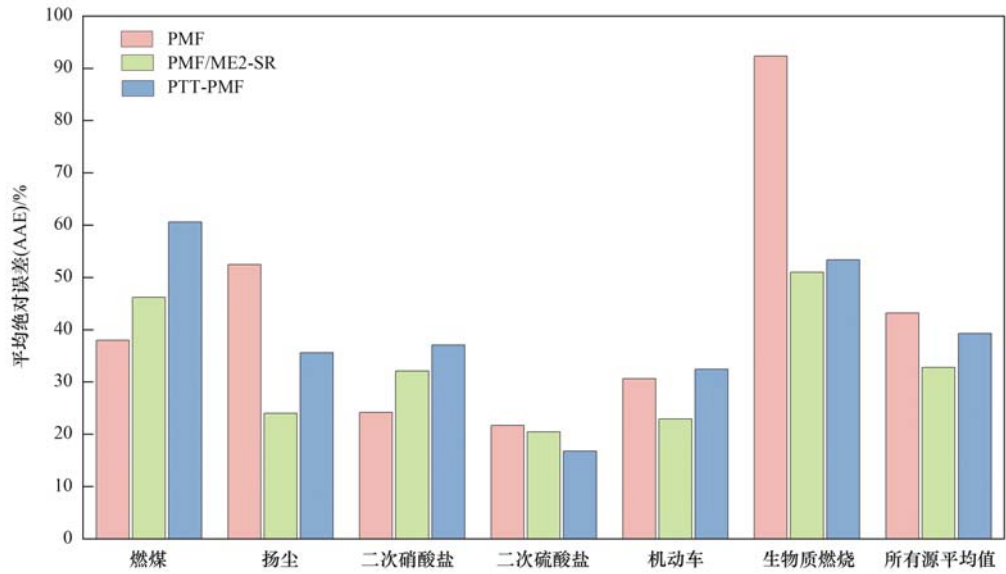


图5 PMF、PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 解析得到的源贡献率的 AAE 值比较
Fig. 5 Comparisons of AAE for source contributions of PMF, PMF/ME2-SR, and PTT-PMF

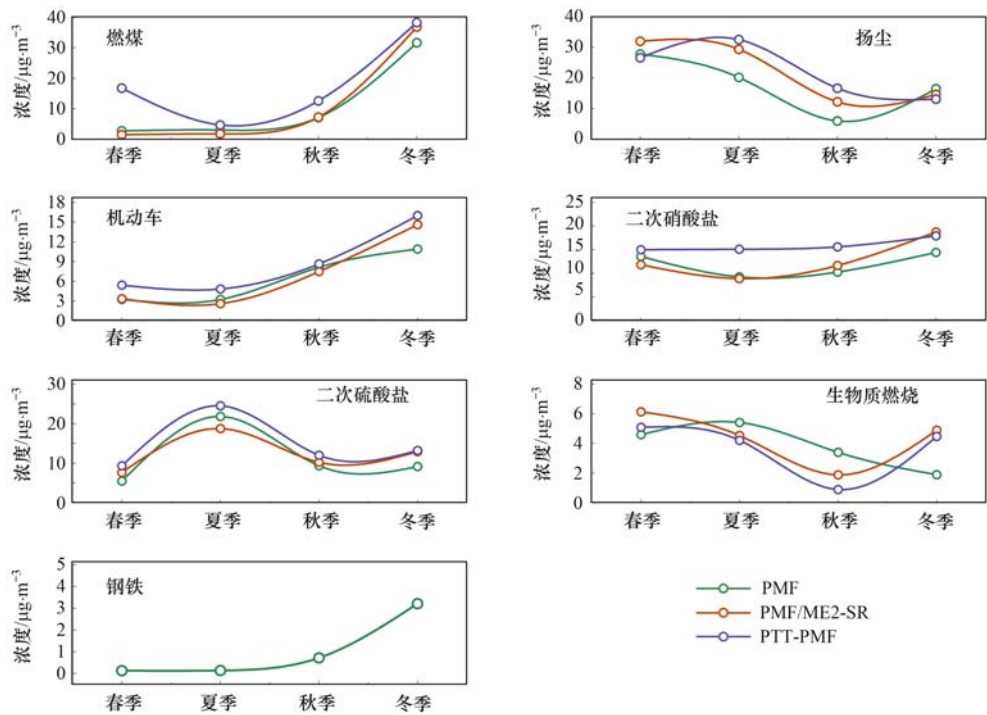


图6 采样期间 PMF、PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 模型的源贡献浓度季节变化
Fig. 6 Seasonal variations of source contribution concentrations of PMF, PMF/ME2-SR, and PTT-PMF models during sampling period

> 秋季 > 冬季,其变化趋势与另外两模型差别明显,这说明 PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 生物质燃烧源解析结果的准确度可能高于 PMF 模型.对机动车和二次源类,3 种模型的季节变化趋势较为一致,又结合解析出的源成分谱,PTT-PMF 对标志组分的识别更精准、更“纯净”.综上所述,4 种模型的源解析结果与晋中市实际情况相符,这表明模型获得的解析结果是可靠的.

2.3.3 拟合值/测量值对比

从整体分析,通过对比拟合值/测量值进一步确定模型解析结果的可靠性.图 7 为多种模型 PM_{2.5} 拟合浓度与实测颗粒物浓度线性拟合的吻合程度,可以看出 PMF、PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 的拟合度均较高(R^2 分别为 0.86、0.89 和 0.93),表明了解析结果的可靠性.结果显示,PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 两种新型模型通过添加特征比值和源谱约束

后,明显提高了实测 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和估算浓度之间的拟合度,使解析结果更趋于实际情况。

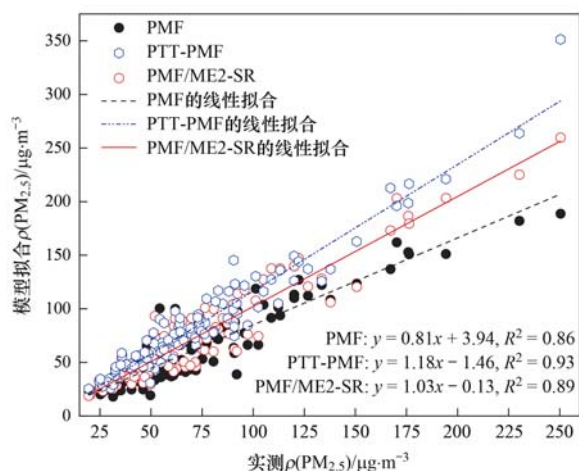


图7 实测样品 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和不同模型模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的拟合程度

Fig. 7 Fitting degree between the measured $\text{PM}_{2.5}$ concentration and $\text{PM}_{2.5}$ concentration simulated by different models

3 结论

(1) 采样期间(2018年11月至2019年9月),晋中市颗粒物的平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $(73.2 \pm 42.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 其中,以 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主要组成的水溶性离子和以 Si、K、Ca、Fe 为代表的无机元素对 $\text{PM}_{2.5}$ 有着重要贡献,分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 41% 和 10%。

(2) 4 种模型都能较准确地识别各污染源的标志组分,共识别到了 6 种相同的源类:燃煤源(25%~26%)、扬尘源(19%~21%)、二次硝酸盐(17%~19%)、二次硫酸盐(16%)、机动车源(13%~15%)和生物质燃烧源(4%~7%)。对比 3 种 PMF 类模型的平均源贡献率与 NKCMB 的源贡献率,得到了较为一致的结果:PMF 类模型计算的燃煤源、扬尘源和二次硝酸盐仅比 NKCMB 高 1%; 机动车、生物质燃烧源和钢铁源仅比 NKCMB 低 2%、2% 和 1%。除此之外,PTT-PMF 和 NKCMB 模型进一步识别到了低贡献率的钢铁源类(1%~2%)。经过分析,上述源贡献率符合晋中市的实际情况,表明了解析结果的可靠性。

(3) 通过比较上述模型获得的源成分谱和源贡献,发现不同模型对不同污染源的识别能力存在一定差异。相比于 PMF 传统模型,PMF/ME2-SR 由于纳入了特征物种的比值,可以更准确地解析出符合实际的因子谱,如扬尘源的 CD 值低于 PMF 的 15%,说明 PMF 模型对于该源的识别差异性更大。PTT-PMF 模型则具有较强的精细化源类识别能力,例如该模型计算的二次硫酸盐的 CD 值为 0.25,比

PMF 低 55%,表明 PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 模型与实测源谱相似程度较 PMF 大。此外,PTT-PMF 以实测的一次源谱和虚拟的二次源谱为目标约束,在解析因子的过程中能够自动提取出具有物理意义且接近实测源谱的因子,使取得的二次源成分谱更“纯净”。

(4) 上述模型在不同的情况下存在一定的适用性,本研究针对晋中市的研究表明新型受体模型和传统模型的拟合结果可靠,都能较好地反映当地大气颗粒物污染的实际情况,但 PMF/ME2-SR 和 PTT-PMF 新型模型在因子识别过程中表现更优异。因此,新型受体模型在今后的研究中具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] Fu H B, Chen J M. Formation, features and controlling strategies of severe haze-fog pollutions in China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **578**: 121-138.
- [2] Hu J L, Wang Y G, Ying Q, et al. Spatial and temporal variability of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} over the North China Plain and the Yangtze River Delta, China[J]. Atmospheric Environment, 2014, **95**: 598-609.
- [3] Yuan Z B, Yadav V, Turner J R, et al. Long-term trends of ambient particulate matter emission source contributions and the accountability of control strategies in Hong Kong over 1998-2008[J]. Atmospheric Environment, 2013, **76**: 21-31.
- [4] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(2): 257-269.
Wu D. Hazy weather research in China in the last decade: a review[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(2): 257-269.
- [5] Shen J Y, Zhao Q B, Cheng Z, et al. Evolution of source contributions during heavy fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) pollution episodes in eastern China through online measurements[J]. Atmospheric Environment, 2020, **232**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117569.
- [6] Li M G, Wang L L, Liu J D, et al. Exploring the regional pollution characteristics and meteorological formation mechanism of $\text{PM}_{2.5}$ in North China during 2013-2017[J]. Environment International, 2020, **134**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105283.
- [7] Zhang Y J, Cai J, Wang S X, et al. Review of receptor-based source apportionment research of fine particulate matter and its challenges in China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **586**: 917-929.
- [8] Zhu Y H, Huang L, Li J Y, et al. Sources of particulate matter in China: insights from source apportionment studies published in 1987-2017[J]. Environment International, 2018, **115**: 343-357.
- [9] Liberda E N, Tsuji L J S, Peltier R E. Mining in subarctic Canada: airborne $\text{PM}_{2.5}$ metal concentrations in two remote First Nations communities[J]. Chemosphere, 2015, **139**: 452-460.
- [10] Wang C C, Cai J, Chen R J, et al. Personal exposure to fine particulate matter, lung function and serum club cell secretory protein (Clara)[J]. Environmental Pollution, 2017, **225**: 450-455.
- [11] Van Ryswyk K, Wheeler A J, Wallace L, et al. Impact of

- microenvironments and personal activities on personal PM_{2.5} exposures among asthmatic children [J]. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2014, **24** (3): 260-268.
- [12] Mamun A A, Celo V, Dabek-Zlotorzynska E, *et al.* Characterization and source apportionment of airborne particulate elements in the Athabasca oil sands region [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **788**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147748.
- [13] Scerri M M, Genga A, Iacobellis S, *et al.* Investigating the plausibility of a PMF source apportionment solution derived using a small dataset: a case study from a receptor in a rural site in Apulia-South East Italy [J]. *Chemosphere*, 2019, **236**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124376.
- [14] Jeričević A, Gašparac G, Mikulec M M, *et al.* Identification of diverse air pollution sources in a complex urban area of Croatia [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **243**: 67-77.
- [15] Rai P, Furger M, Slowik J G, *et al.* Characteristics and sources of hourly elements in PM₁₀ and PM_{2.5} during wintertime in Beijing [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116865.
- [16] 周敏. 上海大气 PM_{2.5} 来源解析对比: 基于在线数据运用 3 种受体模型 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (5): 1997-2005.
- Zhou M. Comparison of three receptor models for source apportionment of PM_{2.5} in Shanghai: using hourly resolved PM_{2.5} chemical composition data [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (5): 1997-2005.
- [17] 邱晨晨, 于兴娜, 丁铨, 等. 南京江北新区冬季 PM_{2.5} 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (2): 529-536.
- Qiu C C, Yu X N, Ding C, *et al.* Diurnal variations and source apportionment of water-soluble ions in PM_{2.5} during winter in Nanjing Jiangbei New Area [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (2): 529-536.
- [18] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 中国 PM_{2.5} 来源解析方法综述 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2014, **50** (6): 1141-1154.
- Zheng M, Zhang Y J, Yan C Q, *et al.* Review of PM_{2.5} source apportionment methods in China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, **50** (6): 1141-1154.
- [19] 朱坦, 吴琳, 毕晓辉, 等. 大气颗粒物源解析受体模型优化技术研究 [J]. *中国环境科学*, 2010, **30** (7): 865-870.
- Zhu T, Wu L, Bi X H, *et al.* Improving receptor models for ambient air particulate matter source apportionment [J]. *China Environmental Science*, 2010, **30** (7): 865-870.
- [20] Paatero P. Least squares formulation of robust non-negative factor analysis [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1997, **37** (1): 23-35.
- [21] Schauer J J, Rogge W F, Hildemann L M, *et al.* Source apportionment of airborne particulate matter using organic compounds as tracers [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30** (22): 3837-3855.
- [22] Zheng M, Cass G R, Schauer J J, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in the southeastern United States using solvent-extractable organic compounds as tracers [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36** (11): 2361-2371.
- [23] Liu G R, Shi G L, Tian Y Z, *et al.* Physically constrained source apportionment (PCSA) for polycyclic aromatic hydrocarbon using the Multilinear Engine 2-species ratios (ME2-SR) method [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **502**: 16-21.
- [24] Shi G L, Chen G, Liu G R, *et al.* Source insights into the 11-h daytime and nighttime fine ambient particulate matter in China as well as the synthetic studies using the new Multilinear Engine 2-species ratios (ME2-SR) method [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **181**: 304-311.
- [25] Gao J, Dong S H, Yu H F, *et al.* Source apportionment for online dataset at a megacity in China using a new PTT-PMF model [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **229**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117457.
- [26] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values [J]. *Environmetrics*, 1994, **5** (2): 111-126.
- [27] Paatero P. The multilinear engine—a table-driven, least squares program for solving multilinear problems, including the *n*-way parallel factor analysis model [J]. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 1999, **8** (4): 854-888.
- [28] Amato F, Hopke P K. Source apportionment of the ambient PM_{2.5} across St. Louis using constrained positive matrix factorization [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **46**: 329-337.
- [29] Amato F, Pandolfi M, Escrig A, *et al.* Quantifying road dust resuspension in urban environment by Multilinear Engine: a comparison with PMF2 [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43** (17): 2770-2780.
- [30] Watson J G, Robinson N F, Chow J C, *et al.* The USEPA/DRI chemical mass balance receptor model, CMB 7.0 [J]. *Environmental Software*, 1990, **5** (1): 38-49.
- [31] Watson J G, Cooper J A, Huntzicker J J. The effective variance weighting for least squares calculations applied to the mass balance receptor model [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1984, **18** (7): 1347-1355.
- [32] Watson J G, Chen L W A, Chow J C, *et al.* Source apportionment: findings from the U. S. supersites program [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2008, **58** (2): 265-288.
- [33] Wongphatarakul V, Friedlander S K, Pinto J P. A comparative study of PM_{2.5} ambient aerosol chemical databases [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32** (24): 3926-3934.
- [34] Javitz H S, Watson J G, Robinson N. Performance of the chemical mass balance model with simulated local-scale aerosols [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1988, **22** (10): 2309-2322.
- [35] Liu H J, Tian H Z, Zhang K, *et al.* Seasonal variation, formation mechanisms and potential sources of PM_{2.5} in two typical cities in the Central Plains Urban Agglomeration, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **657**: 657-670.
- [36] 邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 等. 基于 PMF 模型的 PM_{2.5} 中金属元素污染及来源的区域特征分析 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (12): 5276-5287.
- Deng L L, Zhang K S, Yin Z Y, *et al.* Characterization of metal pollution of regional atmospheric PM_{2.5} and its sources based on the PMF model [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (12): 5276-5287.
- [37] Pant P, Harrison R M. Critical review of receptor modelling for particulate matter: a case study of India [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **49**: 1-12.
- [38] Li L, Li M, Huang Z X, *et al.* Ambient particle characterization by single particle aerosol mass spectrometry in an urban area of

- Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **94**: 323-331.
- [39] Li J W, Chen B, De La Campa A M S, *et al.* 2005-2014 trends of PM₁₀ source contributions in an industrialized area of southern Spain[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **236**: 570-579.
- [40] Zhang R, Jing J, Tao J, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: seasonal perspective [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13** (14): 7053-7074.
- [41] Li J W, Wu Y F, Ren L H, *et al.* Variation in PM_{2.5} sources in central North China Plain during 2017-2019: response to mitigation strategies[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **288**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112370.
- [42] Charron A, Degrendele C, Laongsri B, *et al.* Receptor modelling of secondary and carbonaceous particulate matter at a southern UK site[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(4): 1879-1894.

欢迎订阅 2022 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA); Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA); Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS); Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i>	(577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo	(586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li	(597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i>	(608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i>	(619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i>	(639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming	(649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i>	(675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i>	(686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i>	(696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i>	(707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i>	(714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i>	(723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i>	(735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao	(743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun	(752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i>	(762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i>	(770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i>	(782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	(813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i>	(826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i>	(837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i>	(859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong	(867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i>	(878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i>	(887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i>	(907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i>	(920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i>	(928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i>	(936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song	(946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei	(957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing	(965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i>	(975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i>	(985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i>	(995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i>	(1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i>	(1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i>	(1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i>	(1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i>	(1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i>	(1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i>	(1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i>	(1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i>	(1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i>	(1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1108)