

上海市典型道路扬尘源解析

陈峥嵘, 李飞, 程伶俐, 焦正

(上海大学 环境与化学工程学院, 上海 200444)

摘要: 道路扬尘是城市颗粒物的重要来源, 导致霾污染加重; 影响城市景观、增加市容清洁成本等; 直接或间接引起呼吸系统疾病而影响市民的身心健康。研究分析了上海典型道路扬尘的化学成分, 并使用化学质量平衡模型 EPA-CMB8.2 进行了源解析工作。研究表明, 典型道路扬尘的污染源按分担率排序依次为土壤风沙尘 (36.7%)、搅拌站粉尘 (25.0%)、渣土码头尘 (14.7%)、建筑工地尘 (11.0%)、机动车尾气尘 (0.9%)。其中, 土壤风沙尘、搅拌站粉尘、渣土码头尘和建筑工地尘是典型道路扬尘的主要来源, 分担率合计大于 85%。总结研究过程中获得的经验, 提出了针对道路扬尘、施工扬尘和堆场扬尘的污染防治建议。

关键词: 道路扬尘; 源解析; 化学质量平衡模型

中图分类号: X513

文献标志码: A

Source Analysis in Road Dust of Typical Roads in Shanghai

CHEN Zhengrong, LI Fei, CHENG Lingli, JIAO Zheng

(School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Road dust is the important source to urban particulate matters which worsen haze pollution, influence the urban landscape, and increase the cost of urban appearance cleaning. It can bring about serious respiratory diseases directly or indirectly, which might damage on the physical and mental health of the citizens. The chemical composition of typical road dust was analyzed, and the source analysis was carried out using the chemical mass balance model EPA-CMB8.2. The results show that the pollution sources of typical road dust are sorted according to the contribution rate: soil dust (36.7%), mixing plant dust (25.0%), muck wharf dust (14.7%), construction site dust (11.0%) and motor vehicle exhaust dust (0.9%). Among them, soil dust, mixing station dust, muck wharf dust and construction site dust are the main sources of typical road dust, and the total contribution rate is greater than 85%. Based on the experience gained in the research, we put forward suggestions for the prevention and control of road dust, construction dust and yard dust pollution.

Keywords: road dust; source analysis; chemical mass balance model

0 引言

随着我国城市社会经济的不断建设发展、能源需求大幅度增长, 大城市的大气污染类型已经由传统单一的煤烟型污染转变为多种污染源共同作用、多种污染物共存、污染物互为源汇的复合型大气污染, 特别是长三角等经济发达的地区。复合型污染的主要特征为高细颗粒物浓度和高浓度臭氧等, 呈

现出来的典型污染现象是灰霾污染, 在过去十年中, 这已经成为影响大城市环境空气质量的主要因素。前期研究已经形成共识, 灰霾天气产生的直接原因之一是大气颗粒物浓度增加导致的^[1-2]。大气中颗粒物的成分非常复杂, 来源众多。通过推进“大气十条”等措施, 一次工业源的颗粒物排放贡献越来越低, 二次贡献变大, 但扬尘对城市大气颗粒物的贡献始终得到关注。特别是随着城市建设的推进和工业

收稿日期: 2021-03-12

通信作者: 焦正 (1972-), 男, 北京人, 教授, 博士, 主要研究方向为环境污染治理材料与技术。E-mail: zjjiao@shu.edu.cn

源控制的深化, 大气颗粒物的来源结构发生了变化, 因此人们对扬尘这种随处可见却又不普通的颗粒物的来源越来越重视。扬尘的组成、来源、污染特点的相关研究已有不少, 但随着颗粒物源的变化以及治理措施的变化, 扬尘对城市中大气颗粒物污染的贡献仍值得跟踪研究^[3-4]。因此控制城市道路扬尘污染是从源头提高环境空气质量的一种重要途径, 是改善城市环境空气质量的紧迫任务。

本文的研究对象为上海市典型道路, 通过实地采集道路扬尘样品和各污染源样品, 结合使用化学质量平衡 (CMB) 模型计算各类污染源对道路扬尘的分担率, 为治理道路扬尘提供指导方向; 同时, 对大气环境保护与管理、道路扬尘污染防治具有一定的科学指导意义。

1 研究方法

1.1 采集道路扬尘样本

参照《防治城市扬尘污染技术规范》(HJ/T393—2007)^[5]关于采样要求的表述: 在每条道路上每间隔 3 km 采集 1 个样本, 每个样本使用不少于 3 个子样品进行混合 (即每间隔 0.5~1 km 用真空吸尘方式采样 1 次, 每个样本的采样面积约 1 m², 而后将 3 km 内采集到的多个样品混合为 1 个样品)。

研究选择上海市中心城区一条南北走向的主干道作为研究对象, 沿线及周边范围内有工业企业、居民区、渣土中转码头、砂石料中转码头和混凝土搅拌站等。选择其作为研究对象的依据是该道路沿线污染源种类较多, 道路车流量较大, 对区域大气环境质量有一定影响。典型道路长度约 9 km, 参考每隔 3 km 设置 1 个扬尘样品采集点的原则, 本研究将典型道路分为 A、B、C 3 个路段 (见图 1)。每一段每隔 0.5~1.0 km 在东、西两侧道路上各采集 1 个道路扬尘子样品, 然后将该段东侧道路采集的所有子样品等质量混合成 1 个样品、西侧道路采集的所有子样品等质量混合成 1 个样品, 该段全部子样品等质量混合得到 1 个样品, 即 A、B、C 每段共有 3 个道路扬尘样品 (道路扬尘子样品具体采集信息详见表 1)。本研究于 2019 年 7—8 月在典型道路上共采集了 9 个道路扬尘样品。

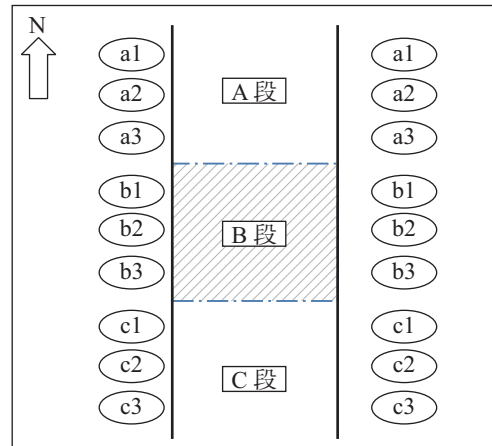


图 1 道路扬尘采样点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of road dust sampling points

表 1 道路扬尘子样品具体采集信息表

Tab. 1 Specific collection information of road dust sub samples

路段	采样点 (东西两侧道路 采样点均参照该点)	子样品 个数	样品 个数
A 段	a1	2	3
	a2	2	
	a3	2	
B 段	b1	2	3
	b2	2	
	b3	2	
C 段	c1	2	3
	c2	2	
	c3	2	
总计	—	—	9

1.2 污染源样本采集

根据现场调查、踏勘和典型道路的实际情况, 选取大型车辆运输尘、机动车尾气尘、建筑工地尘、土壤风沙尘、渣土码头尘、搅拌站粉尘 A~F 共 6 类^[6-7]。

A 大型车辆运输尘: 采集洒落在典型道路上的 2 个样本。采样区域面积约为 1 m², 单个样本质量约 50 g。

B 机动车尾气尘: 对机动车 (汽油车、柴油车等) 尾气管末端进行改造, 安装带滤膜的采样器, 并于车辆行驶 1 h 后收集尾气尘。选取汽油车、柴油车各 1 辆; 在每辆机动车排气筒末端分别收集 1 份无机和有机滤膜样本。再根据典型道路的车流量统计数据, 按比例混合 2 种车型的尾气尘样本, 将有机和无机

滤膜分开混样,得到2份机动车尾气尘样本。

C 建筑工地尘: 收集散落在典型道路沿线建筑工地施工作业面上的混凝土尘混合样,在2个点位各采样100 g,混合成为1个样本。单个采样区域面积约为1 m²。采样时在未完全覆盖的裸土和工地内部道路上较容易采集到样本。

D 土壤风沙尘: 在A、B、C3段道路的东西两侧的绿化土壤与裸露土壤处分别布设1个采样点,共获得6个土壤风沙尘样本。进行采样时,先用笤帚将地表土收集于采样袋中,用塑料铲获取地表以下约20 cm处的土壤,混合均匀后制成每份重200 g的样本。采样过程中,6个土壤风沙尘样本的采样面积

和采样深度保持一致。

E 渣土码头尘: 进入典型道路沿线的3个渣土运输码头内部,每个码头选取2个点位分别采样100 g并进行混合,共得到3个样本。单个采样区域面积约为2 m²。在渣土车途经的道路附近较容易采集到样本。

F 搅拌站粉尘: 进入典型道路沿线的4个搅拌站内部,每个搅拌站选取2个点位分别采样100 g并进行混合,共得到4个样本。在混凝土搅拌车途经的道路附近较容易采集到样本。

在典型道路各路段的总计18个污染源样品的分布情况如表2所示。

表2 典型道路扬尘源样品数量和分布

Tab. 2 Quantity and distribution of typical road dust source samples

路段	大型车辆运输尘	机动车尾气尘	建筑工地尘	土壤风沙尘	渣土码头尘	搅拌站粉尘	其他
A段	1	—	0	2	1	1	0
B段	0	—	1	2	0	1	0
C段	1	—	0	2	2	2	0
整个典型道路(合计)	2	2	1	6	3	4	0

1.3 样本前处理和组分分析

将现场采集获取的原始样本存放在自封袋中,于35℃下干燥,通过20目(<1 mm)的尼龙网筛,把树叶、干草、石块、烟蒂、头发等杂质剔除后,将所有样本通过150目尼龙筛,以获取粒径小于100 μm的部分用于化学成分分析^[1,8-10]。通过以上步骤实现对样品的质量控制,提高实验的准确度。

采用电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)分析Na、Mg、Al、Si、P、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Ba和Pb元素含量。采用有机碳/元素碳(OC/EC)分析仪分析EC和OC含量^[11];采用瑞士万通离子色谱法测定水溶性离子NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺的含量^[12]。

1.4 CMB模型基本原理

CMB模型是根据质量平衡原理建立起来的,假设存在着对受体中的大气颗粒物有贡献的多种排放源类(*j*),并满足以下假设条件:①各种排放源类在环境空气中的颗粒物化学成分有显著差别;②各种排放源类排放的颗粒物化学成分相对稳定;③各种排放源类所排放的颗粒物之间不发生相互作用。如

是则受体上的每种化学组分浓度就是每一源类的化学组分的含量值和源贡献浓度值乘积的线性之和,即

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

式中:*C_i*为环境受体中的颗粒物化学成分*i*的浓度测量值,μg/m³; *F_{ij}*为第*j*类源化学成分*i*的含量测量值,g/g; *S_j*为第*j*类源贡献的浓度计算值,μg/m³; *j*为源类的数目,*j* = 1, 2, ..., *J*; *i*为化学组分的数目,*i* = 1, 2, ..., *I*。

选择所测定的共*i*个元素,则可以建立由*i*个方程所组成的线性方程组。原则上当*i* > *j*,可计算得到各种排放源的贡献值*S_j*和相应的分担率:

$$\eta = \frac{S_j}{\sum_{j=1}^J F_{ij}} \quad (2)$$

CMB模型的算法主要有示踪化学组合法、线性程序法、普通加权最小二乘法、岭回归加权最小二乘法以及有效方差最小二乘法。当前CMB模型最常用的算法是有效方差最小二乘法,因为该算法

提供了一种用于计算源贡献值 S_j 和 S_j 的方差 σ_{S_j} 的实用方法。有效方差最小二乘法能够让加权的元素测量值与计算值之差的平方和最小:

$$\min m^2 = \sum_{i=1}^I \frac{\left(C_i - \sum_{j=1}^J F_{ij} \cdot S_j \right)^2}{V_{\text{eff},i}} \quad (3)$$

$$V_{\text{eff},i} = \sigma_{C_i}^2 + \sum_{j=1}^J \sigma_{F_{ij}}^2 \cdot \sigma_{S_j}^2 \quad (4)$$

式中: $V_{\text{eff},i}$ 为有效方差, 权重值; σ_{C_j} 为受体大气颗粒物的化学组分测量值的标准偏差; $\sigma_{F_{ij}}$ 为污染源的化学组分测量值的标准偏差; σ_{S_j} 为源的化学组分贡献值的标准偏差。

应用有效方差最小二乘法对 CMB 模型进行求解时, 模型的输入参数为受体化学元素谱浓度的测量值 C_i 和 C_i 的标准偏差 σ_{C_i} ; 源成分谱的含量测量值 F_{ij} 和 F_{ij} 的标准偏差 $\sigma_{F_{ij}}$ 。模型的输出参数为源贡献计算值 S_j 和 S_j 的标准偏差 σ_{S_j} 。

根据源和受体颗粒物化学组成的监测值来建立 CMB 模型, 从而定量计算各类污染源对环境空气中颗粒物浓度的源贡献值和源分担率。CMB 模型历经数十年发展已较为成熟, 获得了美国环境保护署 (EPA) 的推荐, 并在多个城市和地区进行了实际应用, 当前的系统软件版本为 EPA-CMB8.2。我国从 20 世纪 80 年代开始应用源解析技术开展城市空气污染防治研究工作, 北京、天津、南京等多个城市利用 CMB 模型进行了大气颗粒物源解析工作, 均取得了较好结果。

杨妍妍等^[13]的研究结果显示: ① 在观测期间, 大气环境中 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源主要包括二次硫酸铵和硝酸铵 (分担率 36%)、有机物 (分担率 20%)、机动车 (分担率 16%)、燃煤 (分担率 15%)、土壤尘 (分担率 6%) 以及其他未识别来源 (分担率 7%); 与历史解析结果相比, 燃煤源分担率有所下降, 二次无机盐与有机物分担率上升, 且二次硝酸盐有赶超二次硫酸盐之势; ② 从主要组分的来源看, 观测期间环境大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中近 25% 分担率的硫酸盐来自于燃煤锅炉和电厂排放, 17% 的有机物来自机动车排放; ③ 北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 来源类型大致相同, 但各点位 $\text{PM}_{2.5}$ 来源种类和分担率具有一定差异, 对一些排放量较大的局地排放源有比较明确的响应。研究表明, 开展区

域性 $\text{PM}_{2.5}$ 治理、大力削减前体物、严格控制本地机动车、燃煤等 $\text{PM}_{2.5}$ 排放都是改善北京市空气质量的重要途径。

韩斌等^[14]的研究结果显示: 天津近海海域 TSP 来源主要有有人为源、地壳源和海盐粒子源。CMB 结果显示燃煤飞灰所代表的人为源对 TSP 贡献最大 (36.14%), 其次是地壳源类 (33.26%)、海盐粒子 (1.58%) 以及其他未识别的源 (30.58%)。由此推断陆地污染源对近海海域大气颗粒物的贡献远远高于海盐粒子, 因此对渤海周围陆地污染源的控制应得到足够重视。

2 结果与讨论

2.1 典型道路扬尘的化学组分

本研究关于典型道路扬尘排放源建立了 A~F 共 6 类成分谱, 成分谱包括 17 种化学元素、3 种阴阳离子、EC 和 OC。道路扬尘排放源成分谱如表 3 所示, 4 个道路扬尘采样点各自的化学组成分谱如表 4 所示。图 2~7 较为直观地描述了 6 种源的质量百分含量及标准差。

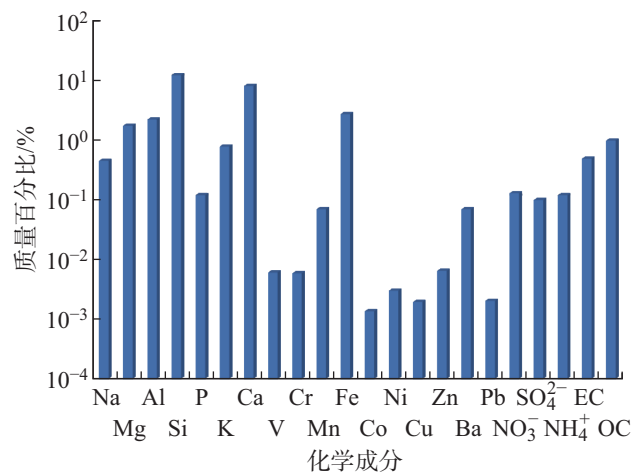


图 2 大型车辆运输尘成分谱

Fig. 2 The chemical compositions characteristics in dust of heavy vehicle transportation

2.2 模型计算与结果解析

(1) 选择标识元素。本研究使用 EPA-CMB8.2 模型, 将排放源的成分谱和道路扬尘成分谱输入程序后, 选择标识元素代入模型进行计算。

所谓标识元素, 代表的是能够表现排放源固有特征且不会在迁移过程中发生较大变化的元素。作

表3 道路扬尘排放源成分谱(%)

Tab. 3 The chemical compositions characteristics of road dust emission source

%

成分	大型车辆运输尘		机动车尾气尘		建筑工地尘		土壤风沙尘		渣土码头尘		搅拌站粉尘	
	平均值	偏差	平均值	偏差	平均值	偏差	平均值	偏差	平均值	偏差	平均值	偏差
Na	0.432 0	0.019 2	0.480 2	0.176 4	0.241 8	0.027 9	0.523 8	0.067 9	0.432 0	0.036 0	0.282 0	0.056 4
Mg	1.660 8	0.220 8	0.284 2	0.147 0	1.209 0	0.120 9	0.756 6	0.126 1	1.674 0	0.063 0	1.118 6	0.122 2
Al	2.102 4	0.249 6	0.235 2	0.205 8	1.850 7	0.186 0	4.015 8	0.417 1	1.458 0	0.180 0	2.312 4	0.159 8
Si	11.520 0	2.678 4	0.656 6	0.568 4	7.737 6	0.771 9	23.765 0	3.414 4	19.449 0	5.364 0	13.028 4	3.468 6
P	0.115 2	0.009 6	—	—	0.065 1	0.006 5	0.106 7	0.029 1	0.063 0	0.027 0	0.056 4	0.009 4
K	0.748 8	0.019 2	0.235 2	0.205 8	2.994 6	0.297 6	1.241 6	0.077 6	0.918 0	0.090 0	0.799 0	0.028 2
Ca	7.622 4	0.144 0	2.224 6	0.793 8	8.211 9	0.818 4	1.784 8	0.329 8	1.188 0	0.144 0	13.442 0	0.827 2
V	0.006 0	0.000 5	—	—	0.006 4	0.000 7	0.005 0	0.000 4	0.006 3	0.001 1	0.005 6	0.000 5
Cr	0.005 8	0.000 4	0.009 8	0.019 6	0.008 2	0.000 8	0.007 8	0.001 3	0.005 2	0.002 0	0.005 5	0.000 3
Mn	0.067 2	0.009 6	0.009 8	0.001 0	0.083 7	0.008 4	0.048 5	0.009 7	0.072 0	0.009 0	0.065 8	0.000 1
Fe	2.582 4	0.211 2	0.470 4	0.166 6	1.339 2	0.130 2	1.309 5	0.135 8	2.331 0	0.144 0	2.049 2	0.094 0
Co	0.001 3	0.000 1	0.019 6	0.009 8	0.000 9	0.000 1	0.001 0	0.000 1	0.001 1	0.000 3	0.001 4	0.000 5
Ni	0.003 0	0.000 3	0.029 4	0.019 6	0.002 2	0.000 2	0.002 5	0.000 3	0.002 2	0.000 7	0.003 2	0.001 5
Cu	0.001 9	0.000 2	0.009 8	0.009 8	0.005 7	0.000 6	0.006 4	0.002 9	0.001 4	0.001 0	0.002 7	0.002 6
Zn	0.006 3	0.000 7	0.225 4	0.127 4	0.015 4	0.001 6	0.016 2	0.004 7	0.006 8	0.001 6	0.008 1	0.000 7
Ba	0.067 2	0.048 0	0.009 8	0.019 6	0.027 9	0.002 8	0.048 5	0.009 7	0.117 0	0.027 0	0.028 2	0.009 4
Pb	0.002 0	0.000 1	—	—	0.005 0	0.000 5	0.006 5	0.001 7	0.002 9	0.001 0	0.003 3	0.000 6
NO ₃ ⁻	0.124 8	0.019 2	1.391 6	0.392 0	0.074 4	0.007 4	0.194 0	0.019 4	0.468 0	0.036 0	0.056 4	0.009 4
SO ₄ ²⁻	0.096 0	0.009 6	1.793 4	1.185 8	0.065 1	0.006 5	0.097 0	0.009 7	0.198 0	0.036 0	0.075 2	0.009 4
NH ₄ ⁺	0.115 2	0.001 0	—	—	0.027 9	0.002 8	0.029 1	0.009 7	0.036 0	0.000 1	0.009 4	0.000 1
EC	0.470 4	0.048 0	—	—	0.353 4	0.037 2	0.436 5	0.038 8	0.567 0	0.063 0	0.300 8	0.000 1
OC	0.940 8	0.086 4	65.562 0	5.096 0	0.706 8	0.074 4	0.873 0	0.223 1	1.071 0	0.288 0	0.742 6	0.028 2

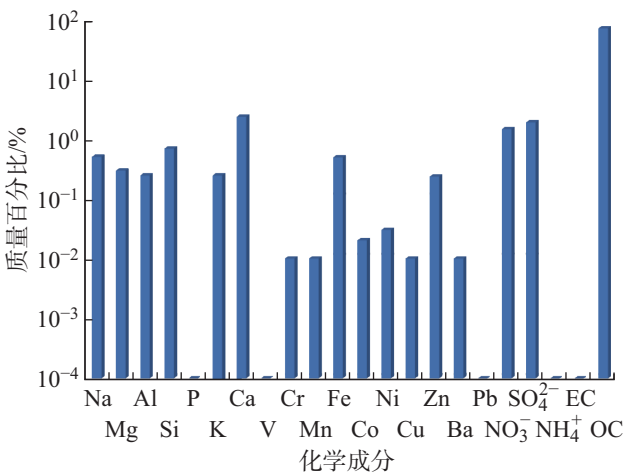


图3 机动车尾气尘成分谱

Fig. 3 The chemical compositions characteristics in dust of motor vehicle exhaust dust

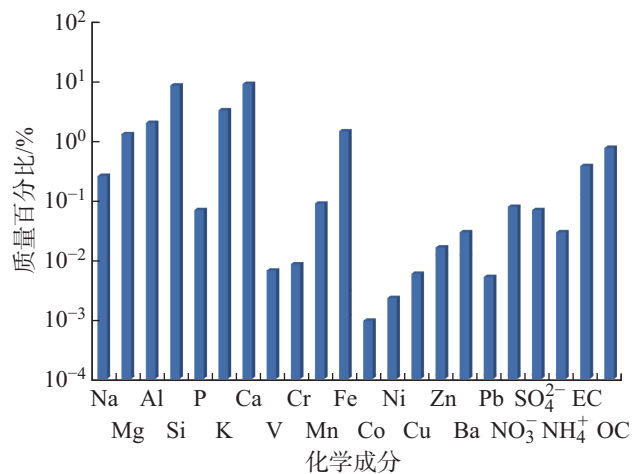


图4 建筑工地尘成分谱

Fig. 4 The chemical compositions characteristics in construction site dust

表 4 道路扬尘成分谱 (%)

Tab. 4 The chemical compositions characteristics of road dust

%

成分	典型道路整段		A 段		B 段		C 段	
	平均值	偏差	平均值	偏差	平均值	偏差	平均值	偏差
Na	0.766 3	0.106 7	0.665 0	0.114 0	0.754 4	0.073 6	0.879 5	0.117 6
Mg	0.863 3	0.164 9	0.750 5	0.047 5	0.901 6	0.184 0	0.937 8	0.196 0
Al	2.386 2	0.213 4	2.403 5	0.095 0	2.254 0	0.276 0	2.501 1	0.274 4
Si	17.741 3	1.581 1	16.549 0	0.760 0	16.348 4	1.757 2	20.326 5	1.372 0
P	0.077 6	0.009 7	0.076 0	0.009 5	0.064 4	0.009 2	0.092 4	0.009 8
K	0.824 5	0.067 9	0.779 0	0.066 5	0.809 6	0.082 8	0.884 9	0.078 4
Ca	5.596 9	0.358 9	5.557 5	0.342 0	5.299 2	0.552 0	5.934 0	0.196 0
V	0.005 3	0.000 1	0.005 1	0.000 1	0.005 1	0.000 1	0.005 6	0.000 1
Cr	0.009 2	0.000 7	0.009 5	0.000 7	0.008 7	0.000 4	0.009 6	0.000 9
Mn	0.077 6	0.009 7	0.076 0	0.009 5	0.082 8	0.009 2	0.074 0	0.009 8
Fe	2.279 5	0.426 8	2.156 5	0.342 0	2.152 8	0.552 0	2.529 2	0.509 6
Co	0.000 9	0.000 1	0.000 9	0.000 0	0.000 9	0.000 1	0.001 0	0.000 1
Ni	0.002 4	0.000 2	0.002 5	0.000 3	0.002 3	0.000 1	0.002 5	0.000 1
Cu	0.006 1	0.002 8	0.007 4	0.003 9	0.004 8	0.002 4	0.006 1	0.002 2
Zn	0.016 8	0.003 7	0.018 6	0.006 0	0.014 7	0.001 6	0.017 0	0.002 0
Ba	0.077 6	0.009 7	0.066 5	0.000 1	0.073 6	0.000 1	0.092 7	0.009 8
Pb	0.007 2	0.002 0	0.008 2	0.002 5	0.006 4	0.001 3	0.006 9	0.001 9
NO ₃ ⁻	0.145 5	0.009 7	0.142 5	0.028 5	0.138 0	0.009 2	0.156 0	0.000 1
SO ₄ ²⁻	0.067 9	0.009 7	0.076 0	0.009 5	0.064 4	0.009 2	0.063 3	0.009 8
NH ₄ ⁺	0.019 4	0.009 7	0.019 0	0.009 5	0.018 4	0.000 1	0.020 8	0.000 1
EC	0.688 7	0.077 6	0.627 0	0.038 0	0.644 0	0.119 6	0.795 1	0.049 0
OC	1.251 3	0.252 2	1.235 0	0.313 5	1.122 4	0.340 4	1.396 5	0.147 0

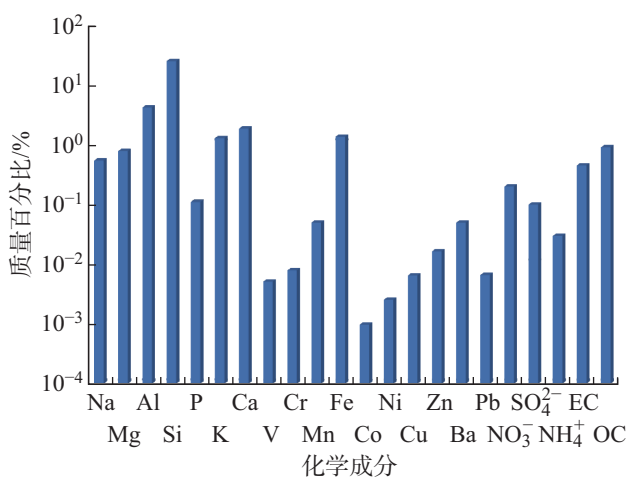


图 5 土壤风沙尘成分谱

Fig. 5 The chemical compositions characteristics in soil dust

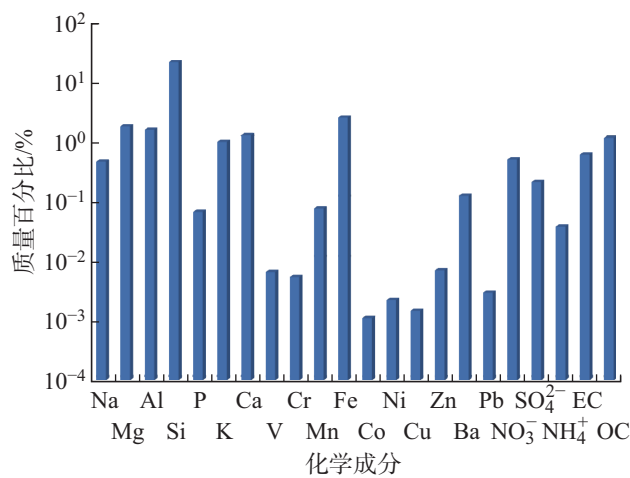


图 6 渣土码头尘成分谱

Fig. 6 The chemical compositions characteristics in muck wharf dust

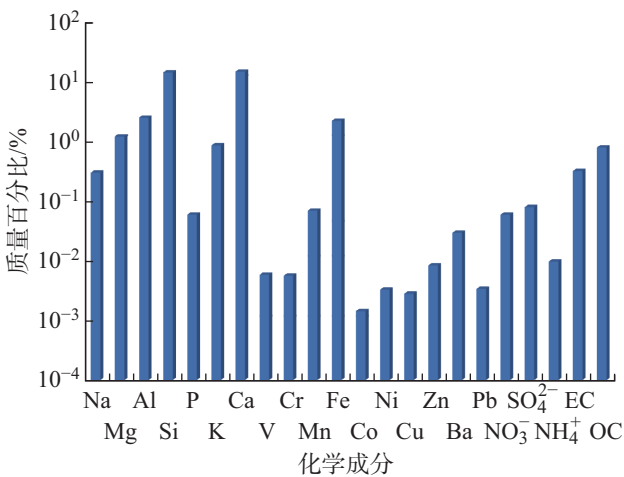


图7 搅拌站粉尘成分谱

Fig. 7 The chemical compositions characteristics in mixing station dust

为标识元素的条件是其在污染源排放总量的占比通常大于1%，且该元素在其他污染源排放物中的所占比例很小。同时，为了保证计算结果的可靠性，需要选取一定数量的标识元素。实践表明，选取10个以上的元素可确保相关系数大于0.9。由于研究开展的所在地不同，地理条件、气象条件与社会经济特点不尽相同，因此各地选择的污染源和标识元素也不相同。

参考国内外研究报道^[15-30]的各种发生源的标识元素可知，目前土壤尘的主要标识元素有Al、Si等，建筑尘中的Ca和Mg，汽车尘中的V、Pb等。这

些特征元素可以作为参考。另外，根据CMB原理，重点在于选择对某些排放源有较强表征能力，且不会在迁移过程中发生较大变化的元素作为标识元素。与此同时，EPA-CMB8.2模型中的灵敏度矩阵功能提供了一种定量方法来判定源成份谱的特征元素，即在灵敏度矩阵中，取绝对值为1或约等于1的元素为该类源的特征元素。EPA-CMB8.2模型可以计算每种元素的贡献浓度值。C/M为元素浓度值C与元素浓度测量值M的比值，C/M越接近1，说明元素浓度计算值和测量值拟合得越好，可以将C/M接近1的元素作为标识元素纳入模型中进行计算。

经过反复比对和筛选，本研究剔除了22种化学成分中对计算结果影响不大的元素，仅保留Mg、Al、Si、P等13种较敏感的标识元素参与模型计算。

(2) 典型道路的扬尘源解析结果。本研究首先对参与拟合的源类进行选择。由于大型车辆运输尘属于混合尘，主要为行驶在典型道路上的各种工地车辆、渣土运输车、混凝土搅拌车洒落的物料和车轮带起的积尘，其化学组成成分与渣土码头尘、搅拌站粉尘和建筑工地尘组分相似，共线性较严重，解析结果分担率会出现负值，故大型车辆运输尘源不参与拟合。将其余5种源类和受体(道路扬尘)的成分谱输入CMB模型进行计算，得出各源类对受体的分担率(见表5)。

表5 典型道路的扬尘源解析结果

Tab. 5 The results of the source analysis in road dust of typical roads

CMB 解析	源类					
	机动车尾气尘	建筑工地尘	土壤风沙尘	渣土码头尘	搅拌站粉尘	其他
分担率/%	0.9	11.0	36.7	14.7	25.0	11.7

2.3 源分担率特征分析

源分担率反映了各个排放源类在颗粒物污染中的主次地位，针对本研究的采样情况和实验获得的解析结果，典型道路扬尘的污染源按分担率排序依次为土壤风沙尘、搅拌站粉尘、渣土码头尘、建筑工地尘、机动车尾气尘。

在已识别了的各源类中，建筑工地尘、土壤风沙尘、搅拌站粉尘和渣土码头尘是道路扬尘主要的

来源。其中，最主要的贡献者是土壤风沙尘，这是由于典型道路两旁存在大量裸露的土壤，没有植被的覆盖，裸土在风蚀等的作用下，极易形成扬尘。渣土码头尘、搅拌站粉尘的分担率也很高，这是因为行驶在典型道路上的渣土运输车和混凝土搅拌车流量很大，还存在物料超载和未按规定进行密闭的情况，未按规定对运输车辆进行封闭导致行驶过程中洒落的尘土对道路扬尘贡献量很大。建筑工地尘的分担

率同样很高, 主要因为典型道路的建设施工活动较多。施工工地内土壤风沙尘的扬起, 其中大部分沉降到路面上, 当再次扬起时会形成二次道路扬尘, 因此施工工地扬尘对道路扬尘有很大贡献, 且建筑施工运输车辆难免会带起道路扬尘, 成为流动污染源沿途排放。

除此之外, 模型解析结果中机动车尾气的分担率很小。值得注意的是, 本次来源解析针对的是粒径小于 $100\ \mu\text{m}$ 的颗粒物, 机动车尾气尘在该粒径范围内的含量相对较小。关于 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的来源解析, 机动车尾气尘的分担率达到了 $10\%\sim 20\%$, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 对人体的健康危害更大, 所以不能忽视对机动车尾气尘的控制。

3 扬尘污染防治建议

3.1 大型车辆运输尘污染防治建议

(1) 在道路两侧, 应当实施一种将草本、灌木与乔木相结合的立体绿化模式, 或者实施绿化与硬化相结合的模式。尽可能减少裸土的出现, 对开挖路面和树坑采取覆盖措施, 减少扬尘的产生。

(2) 坚决查处超载行为, 防止因大型货运车辆超载引起的道路表面损伤。

(3) 运输容易产生扬尘物质的大型车辆应当进行密闭化运输, 杜绝运输时发生跑冒滴漏等现象。对于进出施工现场的大型运输车辆, 在其驶离施工工地前应当使用高压水枪对车轮及车身表面进行清洗。

(4) 积极倡导高效清洁的清扫作业方式, 提高机械化作业面积。根据季节和气象变化定期进行道路洒水及冲洗作业, 并适时调整作业频率。

(5) 制定道路积尘量限值标准, 城市道路进行达标管理。

3.2 建设工程施工扬尘污染防治建议

(1) 施工工地内堆放水泥、灰土、砂石等易产生扬尘污染物料的, 应当在其周围设置不低于堆放物高度的封闭性围栏; 工程脚手架外侧必须使用密目式安全网进行封闭。

(2) 工程项目竣工后 30 d 内, 施工单位应当平整施工工地, 并清除积土、堆物。

(3) 不得使用空气压缩机来清理车辆、设备和物

料的尘埃。

(4) 施工工地的地面应当进行硬化处理。

(5) 在进行产生大量泥浆的施工作业时, 应当配备相应的泥浆池、泥浆沟, 做到泥浆不外流, 废浆应当采用密封式罐车外运。

(6) 在中心城范围内, 混凝土搅拌量在 $30\ \text{m}^3/\text{d}$ 以上的, 禁止现场露天搅拌; 混凝土搅拌量在 $30\ \text{m}^3/\text{d}$ 以下, 需要在现场露天搅拌的, 应当采取相应的扬尘防治措施。

(7) 施工单位应当使用预拌砂浆。

3.3 堆场扬尘污染防治建议

(1) 地面进行硬化处理。

(2) 采用混凝土围墙或者天棚储库, 库内配备喷淋或者其他抑尘措施。

(3) 采用密闭输送设备作业的, 应当在落料、卸料处配备吸尘、喷淋等防尘设施, 并保持防尘设施的正常使用。

(4) 在出口处设置车辆清洗的专用场地, 配备运输车辆冲洗保洁设施。

(5) 划分料区和道路界限, 及时清除散落的物料, 保持道路整洁, 并及时清洗。

4 结 语

(1) 对本研究中的典型道路化学组分分析, 结果表明典型道路扬尘中主要元素为 Si、Ca、Al、Fe、Mg, 分别占比 17.74% 、 5.60% 、 2.39% 、 2.28% 、 0.86% 。

(2) 典型道路扬尘的首要污染源是土壤风沙尘(分担率 36.7%), 其次是搅拌站粉尘(分担率 25.0%)、渣土码头尘(分担率 14.7%)、建筑工地尘(分担率 11.0%)、机动车尾气尘(分担率 0.9%)。土壤风沙尘、搅拌站粉尘、渣土码头尘和建筑工地尘是典型道路扬尘的主要来源, 分担率合计大于 85% 。

(3) 由于道路扬尘具有局地特征, 不同区域不同道路的扬尘源可能存在很大差别, 本文提供一种针对上海典型道路的扬尘分析方法, 研究过程中受制于客观条件, 采样点位的选取和采样时间的跨度选择比较有限, 可以更多地将季节、气候因素对样品的影响考虑在内, 使得样品更具有代表性。

参考文献:

- [1] 邵龙义, 王文华, 幸娇萍, 等. 大气颗粒物理化特征和影响效应的研究进展及展望 [J]. 地球科学, 2018, 43(5): 1691-1708.
- [2] 巫亮. 基于 β 射线法的大气颗粒物分级监测系统研究 [J]. 环境工程, 2018, 36(7): 170-173.
- [3] 乔冠皓, 陈警伟, 刘肖瑜, 等. 两种常见绿化树种对大气颗粒物的滞留与再悬浮 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 266-272.
- [4] 陈征, 张劲, 季雯, 等. 上海大气颗粒物中六溴环十二烷的污染特征及人体呼吸暴露水平 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(2): 477-484.
- [5] 国家环境保护总局. 防治城市扬尘污染技术规范: HJ/T 393—2007 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [6] 孙玉伟, 刘春亮, 祁昕. 四平市雾霾大气颗粒物的理化性质和来源分析 [J]. 山东化工, 2017, 46(2): 120-121.
- [7] 黄超智, 李芬. 武汉市大气颗粒物监测的比对分析 [J]. 消防界, 2017(2): 81.
- [8] 杨志文, 元洁, 吴琳, 等. 2015年2月天津市大气颗粒物数浓度变化及其与气象条件的关系 [J]. 环境工程学报, 2017, 11(7): 4125-4132.
- [9] 杜鹏瑞, 杜睿, 任伟珊. 城市大气颗粒物毒性效应及机制的研究进展 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(9): 2815-2827.
- [10] 尼玛楚多. 大气颗粒物来源及特征研究 [J]. 农村经济与科技, 2019, 30(8): 14.
- [11] 郇宁, 曾立民. 大气气溶胶中有机碳元素碳分析方法比较 [C]//中国环境科学学会 2006 年学术年会优秀论文集 (下卷). 北京: 中国环境科学学会, 2006: 2738-2742.
- [12] 朱岩, 张恺, 侯彦杰, 等. 气相和挥发性离子的离子色谱分析新方法 [C]//第二十届全国色谱学术报告会及仪器展览会论文集 (第一分册). 北京: 中国化学会, 2015: 20.
- [13] 杨妍妍, 李金香, 梁云平, 等. 应用受体模型 (CMB) 对北京市大气 $PM_{2.5}$ 来源的解析研究 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(9): 2693-2700.
- [14] 韩斌, 白志鹏, 解以扬, 等. 天津近海夏季大气颗粒物元素特征及来源解析 [J]. 海洋环境科学, 2010, 29(6): 829-833.
- [15] WATSON J G, CHEN L W, CHOW C J, et al. Source apportionment: Findings from the U.S. supersites program [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2008, 58(2): 265-288.
- [16] CAO J J, LEE S C, HO K F, et al. Spatial and seasonal variations of atmospheric organic carbon and elemental carbon in Pearl River Delta Region, China [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(27): 4447-4456.
- [17] DAN M, ZHUANG G S, LI X X, et al. The characteristics of carbonaceous species and their sources in $PM_{2.5}$ in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(21): 3443-3452.
- [18] CAO J J, LEE S C, HO K F, et al. Characteristics of carbonaceous aerosol in Pearl River Delta Region, China during 2001 winter period [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(11): 1451-1460.
- [19] CASTRO L M, PIO C A, HARRISON R M, et al. Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: Estimation of secondary organic carbon concentrations [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(17): 2771-2781.
- [20] PAATERO P. Least squares formulation of robust non-negative factor analysis [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1997, 37(1): 23-35.
- [21] TURPIN B J, HUNTZICKER J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. Atmospheric Environment, 1995, 29(23): 3527-3544.
- [22] BI X H, FENG Y C, WU J H, et al. Source apportionment of PM_{10} in six cities of northern China [J]. Atmospheric Environment, 2006, 41(5): 903-912.
- [23] KWANGSAM N, ANIKET A S, CHEN S, et al. Primary and secondary carbonaceous species in the atmosphere of western riverside county, California [J]. Atmospheric Environment, 2003, 38(9): 1345-1355.
- [24] BRINKMAN G, VANCE G, HANNIGAN M P, et al. Use of synthetic data to evaluate positive matrix factorization as a source apportionment tool for $PM_{2.5}$ exposure data [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(6): 1892-1901.
- [25] SHI G L, LI X, FENG Y C, et al. Combined source apportionment, using positive matrix factorization: Chemical mass balance and principal component analysis/multiple linear regression—chemical mass balance models [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(18): 2929-2937.
- [26] DUAN F K, HE K B, MA Y L, et al. Characteristics of carbonaceous aerosols in Beijing, China [J]. Chemosphere, 2005, 60(3): 355-364.
- [27] CHRISTENSEN W F, GUNST R F. Measurement error models in chemical mass balance analysis of air quality data [J]. Atmospheric Environment, 2003, 38(5): 733-744.
- [28] ZHAO P S, FENG Y C, ZHU T, et al. Characterizations of resuspended dust in six cities of North China [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(30): 5807-5814.
- [29] CHOW J C, ENGELBRECHT J P, FREEMAN N C, et al.

Chapter one: Exposure measurements [J]. Chemosphere, 2002, 49(9): 873-901.

dimensional edge detection [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2003, 65(2): 179-189.

[30] HENRY R C. Multivariate receptor modeling by N-

简讯

上海先进热功能材料工程技术研究中心建设启动仪式在我校举行

4月15日下午, 我校在19号楼301会议室举行上海先进热功能材料工程技术研究中心建设启动仪式。校党委书记吴松, 校长谢华清, 上海市科委基地处张帆, 上海市教委科技处副处长宋懿琛, 相关高校及合作企业代表, 技术委员会委员, 工程中心全体人员, 部分职能部门及二级单位负责人等参加启动仪式。仪式由副校长徐玉芳主持。

校领导吴松、谢华清, 上海市科委基地处张帆, 上海市教委科技处副处长宋懿琛, 共建单位负责人陈剑波、孔戈共同为上海先进热功能材料工程技术研究中心建设按下启动键。吴松在讲话中表示, 作为学校首个获批的工程中心省部级平台, 这是学校多年学科建设的成果, 他对市科委、市教委以及各个合作单位长期以来对学校的大力支持表示感谢, 学校将集聚全校优势资源支撑工程中心建设。他强调, 学校“十四五”期间, 将重点以优势特色学科为引领, 打造技术创新型平台, 推动学校科研、教学和人才队伍建设等不断发展。

谢华清代表学校致欢迎词, 他向与会嘉宾介绍了学校办学历程、特色以及学科建设成果, 强调学校坚持学科引领整体发展, 推动学科建设与产业深度融合, 以获批的工程中心建设为起点, 推进学校其他学科建设和提升, 同时要加强与国内外同行间的深度交流与合作, 推动政、产、学、研之间的交叉融合和协同创新, 继续走差异化、特色化发展道路, 使平台在汇聚高层次工程技术人才、产出高水平科研成果和引领行业技术进步等方面发挥重要作用。

市科委基地处张帆对工程中心建设正式启动表示祝贺。他指出, 上海工程技术研究中心是上海科技创新体系的重要组成部分, 学校工程中心在建设要做好顶层设计, 要更高层次地谋划发展和做好规划, 真正把工程中心建设成立足行业和产业高度的具有广泛影响力、区域辐射力及行业主导力的创新平台, 成为上海科创中心和产业发展的一个重要支撑点。

工程中心技术委员会主任、清华大学张兴教授在会上发言, 他表示热功能材料在国家战略新兴领域发挥着积极作用, 工程中心的成立将为国家热功能材料领域创新性成果的产出提供良好的支撑。科研处处长、中心常务副主任徐海萍从工程中心聚焦的研发领域、组织框架、运行模式以及建设目标等方面介绍了中心的基本情况。

启动仪式上, 吴松为工程技术研究中心主任、常务副主任、副主任, 工程技术研究中心技术委员会主任和委员颁发了聘书, 工程中心聘请中国科学院院士、东华大学朱美芳教授为中心技术委员会名誉主任。

签约仪式上, 学校与合作单位启东高新技术产业开发区管委会签署合作协议, 成立“上海先进热功能材料工程技术研究中心启东分中心”; 与美国TA仪器签署合作协议, 成立“热物性大数据联合研究中心”; 与上海煜志科技有限公司签署研究生奖学金捐赠协议。中心常务副主任徐海萍与合作单位启东高新区管委会主任施灵马共同为“启东分中心”揭牌, 与合作单位美国TA仪器中国区副总经理董传波共同为“热物性大数据联合研究中心”揭牌。

随后, 工程中心召开了技术委员会第一次会议。会议由技术委员会主任张兴主持, 与会专家讨论了工程中心的研究方向、管理机制以及人才队伍建设等事宜。