

# 应用化学质量平衡模型解析西宁大气 PM<sub>2.5</sub> 的来源

窦筱艳<sup>1</sup>, 赵雪艳<sup>2</sup>, 徐 珣<sup>1</sup>, 高海鹏<sup>1</sup>, 李 婷<sup>1</sup>, 丁梅梅<sup>1</sup>, 刘 宇<sup>1</sup>, 韩 斌<sup>2</sup>, 白志鹏<sup>2</sup>

1. 青海省环境监测中心站, 青海 西宁 810000

2. 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

**摘 要:** 为研究影响西宁市大气环境 PM<sub>2.5</sub> 污染水平的主要来源, 于 2014 年采暖季、风沙季和非采暖季依托西宁市大气地面观测网络在 11 个监测点采集大气 PM<sub>2.5</sub> 样品, 对其化学组分(元素、离子和碳)进行分析。研究同步采集了 4 类固定源、14 类移动源和 4 类开放源的 PM<sub>2.5</sub> 样品, 并构建源排放成分谱。应用化学质量平衡受体模型(CMB)开展源解析研究。源解析结果表明, 观测期间西宁市 PM<sub>2.5</sub> 主要来源包括城市扬尘(分担率为 26.4%)、燃煤尘(14.5%)、机动车尾气(12.8%)、二次硫酸盐(9.0%)、生物质燃烧(6.6%)、二次硝酸盐(5.7%)、钢铁尘(4.7%)、锌冶炼尘(3.4%)、建筑尘(4.4%)、土壤尘(4.4%)、餐饮排放(2.9%)和其他未识别的来源(5.2%)。大力开展城市扬尘为主的开放源污染控制, 严格控制本地燃煤、机动车等污染源的 PM<sub>2.5</sub> 排放, 是改善西宁市空气质量的重要途径。

**关键词:** 化学质量平衡; PM<sub>2.5</sub>; 来源解析; 西宁

中图分类号: X823

文献标志码: A

文章编号: 1002-6002(2016)04-0007-08

DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2016.04.02

## Source Apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Xining by the Chemical Mass Balance

DOU Xiaoyan<sup>1</sup>, ZHAO Xueyan<sup>2</sup>, XU Xun<sup>1</sup>, GAO Haipeng<sup>1</sup>, LI Ting<sup>1</sup>, DING Memei<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>, HAN Bin<sup>2</sup>, BAI Zhipeng<sup>2</sup>

1. Environmental Monitoring Center of Qinghai Province, Xining 810000, China

2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

**Abstract:** In the study, PM<sub>2.5</sub> samples were collected from 11 monitoring sites in Xining during the winter, spring and summer/autumn of 2014 to investigate the major sources of ambient PM<sub>2.5</sub> in the city. 4 types of stationary sources, 14 types of mobile sources and 4 types of fugitive dust sources were collected for source chemical profiles. Chemical compositions (elements, water-soluble ions, and carbonaceous species) were analyzed for all PM<sub>2.5</sub> samples. Chemical Mass Balance receptor model was applied for the source apportionment of PM<sub>2.5</sub>. Results indicated that the major sources of PM<sub>2.5</sub> were urban resuspended dust (26.4%), coal combustion dust (14.5%), vehicle exhaust (12.8%), secondary sulfate (9.0%), biomass burning (6.6%), secondary nitrate (5.7%), iron manufacturing dust (4.7%), zinc manufacturing dust (3.4%), construction derived dust (4.4%), soil dust (4.4%), cooking fume (2.9%) and unknown sources (5.2%). The result suggests that critical pathways of controlling PM<sub>2.5</sub> pollution in Xining would be great managements and reductions on the fugitive dust, coal burning emission and local vehicle exhaust.

**Key words:** chemical mass balance; PM<sub>2.5</sub>; source apportionment; Xining

青海省西宁市承载了青藏高原主要的经济社会活动, 污染相对较重。随着现代工业的高速发展以及东部经济向西部转移的压力, 西宁大气环境质量受到严重影响。目前, 西宁市空气污染问题比较突出, 空气颗粒物污染问题尤其不容忽视。在新《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)下,

大气颗粒物成为影响西宁市环境空气质量的首要污染物<sup>[1]</sup>。PM<sub>2.5</sub>在大气中停留时间长、输送距离远, 同时其粒径小, 比表面积大, 含大量有毒、有害物质, 能够对空气质量、大气能见度、人体健康和生态环境等造成重要危害<sup>[2-6]</sup>。

PM<sub>2.5</sub>的化学组成和物理特征复杂多变, 与颗

收稿日期: 2016-03-18; 修订日期: 2016-04-12

基金项目: 青海省科技支撑计划项目“西宁市大气颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 来源解析”(2013-J-401); 青海省委组织部 2014 年青海省人才“小高地”项目(青人才字[2014]12 号); 环保公益性行业科研专项“PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>自动监测的标准量值传递和 QA/QC 关键技术研究”(201309010)

作者简介: 窦筱艳(1964-), 女, 山东临朐人, 硕士, 高级工程师。

粒物的来源密切相关,因而定量识别  $PM_{2.5}$  的主要来源是环境管理部门的重点工作之一。解决这一问题的的重要手段之一是开展环境空气颗粒物的源解析研究,该技术能够建立起污染源与环境空气质量之间的定量关系,进一步确定污染源治理的主要对象和顺序,提高环境管理部门污染防治工作的针对性和科学性<sup>[7-8]</sup>。

源解析方法主要包括源清单法、源模型法和受体模型法<sup>[9]</sup>。化学质量平衡受体模型(CMB)是受体模型法的代表,已被美国环保局(USEPA)推荐作为大气颗粒物源解析的重要方法之一<sup>[10-13]</sup>。由于其物理意义明确、算法成熟,在目前大气颗粒物源解析研究工作中已成为最重要、最实用的模型,也是在我国开展源解析研究中使用最为广泛的一类模型,在多个城市的源解析研究中得到了应用<sup>[14-16]</sup>。

西宁大气  $PM_{2.5}$  源解析研究目前尚处于起步阶段,之前的研究均是针对 TSP 和  $PM_{10}$  的研究<sup>[17-18]</sup>。赵旭东等<sup>[18]</sup>应用二重源解析技术得到了西宁市  $PM_{10}$  的源解析结果,其中影响西宁市  $PM_{10}$  的主要污染源分别为土壤尘(34.6%)、机动车尾气尘(11.6%)、燃煤尘(26.3%)、建筑水泥尘(10.7%)、钢铁尘(2.3%)和电解铝尘(2.7%)。考虑到目前西宁市  $PM_{2.5}$  污染问题比较突出,开展  $PM_{2.5}$  源解析研究是有效开展西宁市大气污染防治工作的重要基础。基于此,本研究应用 CMB 模型对西宁市大气  $PM_{2.5}$  主要来源进行解析,输入文件基于 11 个环境点在采暖季、风沙季和非采暖季的样品数据以及  $PM_{2.5}$  本地化污染源成分谱,对  $PM_{2.5}$  年均水平及季节差异下来源特征进行研究分析,以期对西宁市大气污染防治提供依据。

## 1 实验部分

### 1.1 研究区域概况

西宁市位于青海省东北部,青藏高原东部,地处湟水及 3 条支流的交汇处,地理坐标为东经  $101^{\circ}77'$ 、北纬  $36^{\circ}62'$ ,是青海省省会,地处湟水中游河谷盆地。西宁海拔较高,属高原大陆型季风气候。由于高海拔及高原地区山间小盆地的地形作用,形成了特定的边界层条件,使该地区逆温发生的频率、强度等明显高于平原地区,对西宁市区的大气环境影响极大<sup>[19]</sup>。

### 1.2 环境样品的采集与分析

#### 1.2.1 采样点位和采样时间的设置

本研究充分考虑到西宁市风向、气候、地理条

件、污染源等复杂因素对空气颗粒物污染水平的综合影响。将研究区域确定为西宁市建成区及其周边地区,布设 11 个采样点(表 1),分别涵盖市区、郊县和工业园区。受体采样点的布设既考虑了西宁市城区分布及西宁市城区环境质量的代表性,又着重考虑了西宁市城市功能区、城市发展规划的需要。

表 1 环境样品采样点信息

序号	采样点	地理位置			行政区域
		东经	北纬	海拔/m	
1	市环境监测站	101°44'53"	36°38'34"	2 247	城西区
2	省医药仓库	101°44'55"	36°41'32"	2 330	城北区
3	四陆医院	101°50'03"	36°34'55"	2 244	城东区
4	第五水厂	101°31'28"	36°41'12"	2 395	湟中县
5	湟中县园林所	101°34'12"	36°29'49"	2 684	湟中县
6	湟源县老干局	101°15'37"	36°40'57"	2 634	湟源县
7	大通县林业局	101°40'40"	36°56'39"	2 453	大通县
8	城南新区	101°42'24"	36°32'43"	2 414	城南新区
9	甘河工业园区	101°34'12"	36°33'32"	2 674	甘河工业园区
10	省环境监测中心站	101°48'03"	36°33'50"	2 265	城东区
11	西宁钢厂	101°40'51"	36°41'28"	2 337	城北区

西宁市采暖季从当年的 10 月 15 日到次年的 4 月 15 日,风沙季从当年的 4 月 16 日到 5 月 31 日,非采暖季是从当年的 6 月 1 日到 10 月 14 日。采暖季的燃煤量要多于非采暖季,燃煤飞灰的排放量两季差别明显。采暖季又是建筑施工的淡季,非采暖季是建筑施工的旺季,所以建筑尘在两季的差别也较明显。由于采暖季人群活动的频率与非采暖季的差异,其他污染源的排放也会发生变化。综上所述,受体采样周期设置在采暖季和非采暖季是恰当的。春季是西宁市的风沙季,扬沙天气在 4—5 月。扬沙季节对西宁市空气质量的影响较大,颗粒物超标率增加<sup>[20]</sup>。因此有必要采集风沙季样品,以摸清风沙扬尘的贡献。西宁市空气颗粒物排放源排放的季节稳定性是由我国北方的气象季节稳定性和因气象季节稳定性而形成的人群活动稳定性所决定的。

基于上述考虑,为研究大气颗粒物质量浓度的季节性变化,采样时间设定为采暖季(2014 年 2 月 26 日至 3 月 4 日)、风沙季(2014 年 4 月 22—28 日)、非采暖季(2014 年 9 月 19—25 日),每季采集 7 d。如遇降水、仪器意外停机等情况,当天样品无法获得时,该样品作废,同时需选择随后的第一个无降水工作日重新采集。

#### 1.2.2 采样仪器的选择

每个点位使用 1 台欧盟标准的高负载高原型

PM<sub>2.5</sub> 采样器( MVS6 型, 无锡) 作为质控仪器, 考虑西宁市海拔已达 2 200 m, 使用 USEPA 标准颗粒物采样器 16.7 L/min 采集到的样品量偏少, 为保障分析数据采用欧盟标准的 38.3 L/min, 使用特氟龙滤膜采集颗粒物样品以保证质量浓度数据的准确度, 同时为保证化学分析的需要, 同一点位另外配备 1 台崂应产 2034 型中流量智能颗粒物采样器, 同步采集石英滤膜样品。

### 1.2.3 采样滤膜的选择和前处理

本研究中, 特氟龙滤膜(  $\phi$  47 mm) 样品供无机元素分析使用, 石英( 无机) 滤膜( 美国) 供碳组分及离子分析使用。滤膜在采样前均要放入烘箱或马弗炉内进行干燥或灼烧, 除掉膜内的挥发分或其他组分, 以免影响分析精度。聚丙烯滤膜的干燥温度 60 ~ 80 °C, 干燥时间 0.5 h; 石英滤膜烘烤温度 400 ~ 500 °C, 烘烤时间 2 h。

### 1.2.4 污染源样品的采集

根据西宁市大气污染源普查数据, 确定了燃煤锅炉、机动车、扬尘类开放源、工业排放、生物质燃烧、餐饮油烟等为主要污染源。分别采用稀释通道方法<sup>[21]</sup> 采集固定源和餐饮油烟的颗粒物样品, 随车采样法采集机动车尾气样品, 再悬浮方法<sup>[22]</sup> 获取开放源排放的颗粒物样品, 生物质燃烧排放样品则使用环境采样器按上下风向法<sup>[8]</sup> 采集样品。通过化学分析建立了燃煤锅炉、工业窑炉、餐饮油烟、生物质燃烧、土壤尘、建筑尘、机动车尾气尘等主要 PM<sub>2.5</sub> 排放源成分谱以及以二次硫酸盐、二次硝酸盐为代表的二次颗粒物成分谱。

### 1.2.5 样品化学分析

对源与受体样品化学组分的测试均采用统一的分析技术, 运用电感耦合等离子体-质谱( ICP-MS) 和电感耦合等离子体-发射光谱( ICP-OES) 分析 39 种元素( Li、Be、Na、P、K、Sc、As、Rb、Y、Mo、Cd、Sn、Sb、Cs、La、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Ce、Sm、W、Tl、Pb、Bi、Th、U、Zr、Al、Sr、Mg、Ti、Ca、Fe、Ba、Si) , 使用离子色谱测定水溶性离子、热光法测试 OC/EC, 每批样品均采取空白样品、质控样品、加标样品、平行测试等质量控制和质量保证措施<sup>[23]</sup>。

## 1.3 PM<sub>2.5</sub> 来源解析方法

受体模型<sup>[23-24]</sup> 是应用在源和受体上所测量的大气颗粒物的物理化学特性来确定对受体有贡献的源类及其贡献值。受体模型的种类很多, 其中化学质量平衡受体模型( CMB) 是由一组线性方程构

成的, 表示每种化学组分的受体浓度等于各种排放源类的成分谱中这种化学组分的含量值和各种排放源类对受体的贡献浓度值乘积的线性和<sup>[25]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 西宁市 PM<sub>2.5</sub> 本地化源谱特征

本研究共采集城市扬尘、土壤风沙尘、建筑尘 3 类开放源样品, 燃煤尘、钢铁尘、锌冶炼 3 类固定源样品, 不同燃料类型( 汽油、柴油、天然气) 、不同车型( 客车、货车、轿车) 的移动源( 机动车尾气尘) 样品, 餐饮油烟、生物质燃烧 2 类生活源样品。图 1 中给出了各源类的成分谱图。从图 1 可以看出, 城市扬尘和土壤尘成分谱较为相似, 均是以地壳元素 Si、Al、Ca 为主, Si 元素是其含量最高的组分, 且土壤尘中 Si 的含量( 17%) 高于城市扬尘( 13%)。建筑尘成分谱与城市扬尘也较为相似, 不同之处在于 Ca 是建筑尘中含量最高的组分( 16%) , 明显高于 Ca 在其他污染源中的含量。燃煤尘中以地壳元素、OC 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 为主, OC 为含量最高的组分( 11%) , SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 次之( 9%)。锌冶炼中 Zn 元素的含量最高( 10%) , 明显高于其与其他源中的含量。钢铁尘中 OC 含量最高( 26%) , 其次为 Fe 元素( 9%)。机动车尾气尘、生物质燃烧源以及餐饮油烟尘源谱均以 OC 和 EC 为主, 不同之处在于机动车尾气尘中 EC 的含量( 14%) 稍高于其他 2 类源, 生物质燃烧源中 Cl<sup>-</sup> 和 K 元素的含量( 17% 和 10%) 明显高于其他源, 餐饮油烟的 OC 含量( 64%) 则明显高于其他源。二次无机颗粒物( 硫酸盐/硝酸盐) 多采用虚拟源谱, 使用硫酸铵和硝酸铵的成分来代替。

### 2.2 西宁市大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征分析

收集汇总西宁市 2014 年国控监测点位的 PM<sub>2.5</sub> 连续监测数据, 计算得到全市范围内不同季节及全年的 PM<sub>2.5</sub> 浓度均值( 如图 2 所示) 。从全市年均质量浓度 [ ( 62.3 ± 29.0 ) μg/m<sup>3</sup> ] 来看, 西宁市 PM<sub>2.5</sub> 整体质量浓度超过国家二级标准 ( 35 μg/m<sup>3</sup> ) 0.78 倍。

造成西宁市大气颗粒物污染突出的原因是复杂和多方面的, 目前主要有以下 6 个方面: ①已经形成的工业布局问题长期影响西宁市环境空气中的颗粒物浓度; ②产业结构偏重型化, 工业污染物排放量大, 给环境空气质量带来巨大压力; ③开放源类的污染对城市环境空气质量的影响不断增

大;④城镇化进程加快,生活污染物排放贡献率在逐年增大;⑤机动车的数量不断增加,带来了机动

车污染的贡献也逐年增加;⑥独特的湟水谷地地形及气象条件不利于污染物扩散。

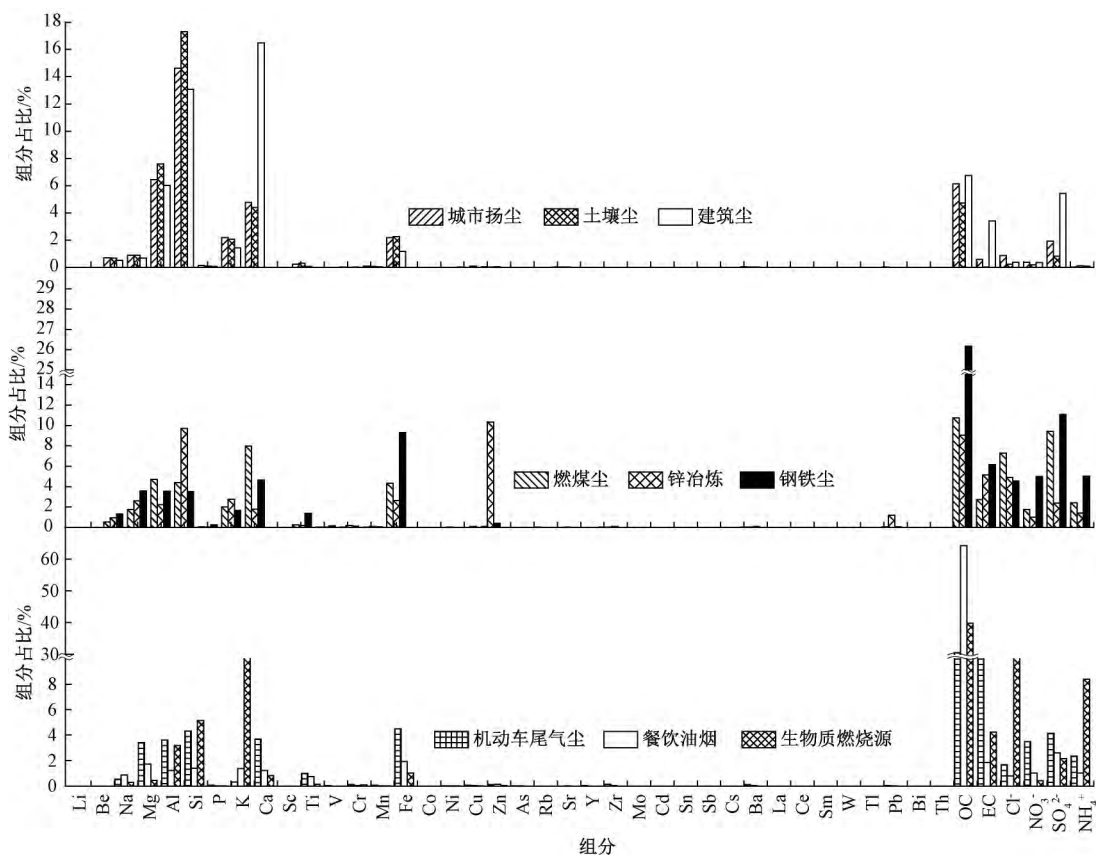


图1 西宁市大气PM<sub>2.5</sub>污染源化学成分谱

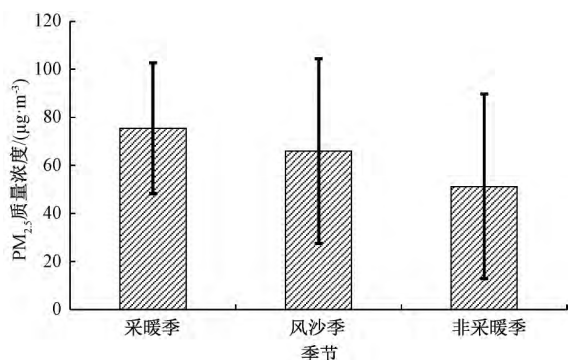


图2 西宁市各季及全年PM<sub>2.5</sub>变化规律

采用大气颗粒物质量平衡,不仅可以根据不同成分化合物的占比来估计不同来源气溶胶对环境空气质量的影响,而且可以对不同方法测量的各种成分结果进行一致性检验和评估<sup>[26-27]</sup>。PM<sub>2.5</sub>的质量平衡通常按如下几类组分进行质量重构:有机物(OM),EC,二次粒子(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>),地壳物质(MIN,指产生于地壳的无机物质),微量元素及未鉴别物质<sup>[28]</sup>。在上述6类物质中,3种离子组分、EC和微量元素是直接测量

的,而有机物和地壳物质则是根据直接测量的某些组分的含量计算而得。

对于大气颗粒物中的有机物,通常假定对应于每克碳含有0.2~0.4 g其他元素(如O、H和N等),即以1.2~1.4代表有机物相对于每克OC的平均相对分子质量。TURPIN等<sup>[29]</sup>近年来对这一做法的合理性进行了检验,认为对城市地区的气溶胶取1.4是合适的,但对生物气溶胶和二次气溶胶较多的非城市地区历时较长(被充分氧化)的气溶胶取1.9~2.3更合适。目前尚缺乏西宁细粒子中有机物的组成与排放数据,在本研究中有有机物OM取OC的1.4倍,与YAN等<sup>[30]</sup>研究中取值相同。大气颗粒物中地壳物质通常以地壳元素的氧化物浓度相加的方法进行估算,一般假定土壤尘由6种元素的氧化物(即SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、FeO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和K<sub>2</sub>O)组成,其中包括构成大陆地壳物质最重要的8种化合物中的6种。另外2种氧化物Na<sub>2</sub>O和MgO约分别占地壳物质质量的3%。本研究地壳元素的构成<sup>[31]</sup>:矿物尘=

$2.20 \times \omega(\text{Al}) + 2.49 \times \omega(\text{Si}) + 1.63 \times \omega(\text{Ca}) + 2.42 \times \omega(\text{Fe}) + 1.93 \times \omega(\text{Mg})$  , $\omega$  为各种地壳元素的质量分数。

西宁不同季节大气 PM<sub>2.5</sub> 化学质量重构结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,西宁市 PM<sub>2.5</sub> 主要构成分有地壳物质、有机物及硫酸盐。地壳物质是西宁市 PM<sub>2.5</sub> 中占比最高的组分(35%~53%),分析原因可能是西宁市气候干燥,风沙较大,因此地壳物质的贡献相对较大。从季节差异来看,地壳物质在风沙季含量最高,非采暖季含量最低,可能由于春季多风沙,且风速较大,造成了较高的地壳物质分担率,也可能源于建筑施工等管理不善导致的扬尘污染。有机物占比为 11%~17%,表明西宁大气中有机细粒子的污染严重。此外,硫酸盐在 PM<sub>2.5</sub> 中的占比为 10% 左右,也是含量较为主要组分。硫酸盐、有机物、硝酸盐的季节变化趋势一致,浓度从高到低顺序为采暖季>风沙季>非采暖季,可能是受采暖季供暖锅炉的影响,排放的前体物(SO<sub>2</sub>)及碳组分含量增加所致。

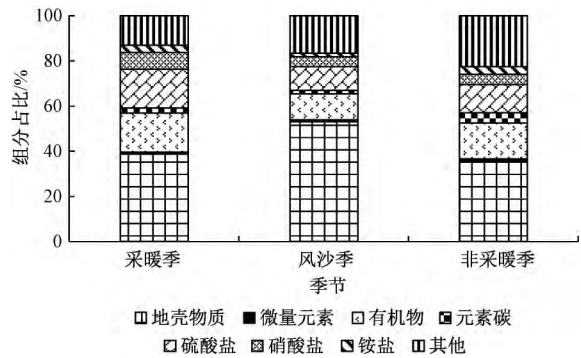


图 3 西宁市环境受体 PM<sub>2.5</sub> 化学质量重构结果

2.3 西宁市 PM<sub>2.5</sub> 来源解析结果

2.3.1 环境空气中 PM<sub>2.5</sub> 贡献值和分担率

将各源类的成分谱(各化学组分的百分含量

平均值及其标准偏差)和受体成分谱(各化学组分的质量浓度平均值及其标准偏差)纳入 CMB 模型,选中各源类标志组分(土壤尘、建筑尘、锌冶炼、钢铁尘、机动车尾气尘、餐饮油烟、生物质燃烧、硫酸盐、硝酸盐标志组分分别为 Si、Ca、Zn、Fe、EC、OC、K、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)参与拟合计算,得到各源类对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献值和分担率。图 4 为西宁市 2014 年全市 PM<sub>2.5</sub> 的源解析结果。

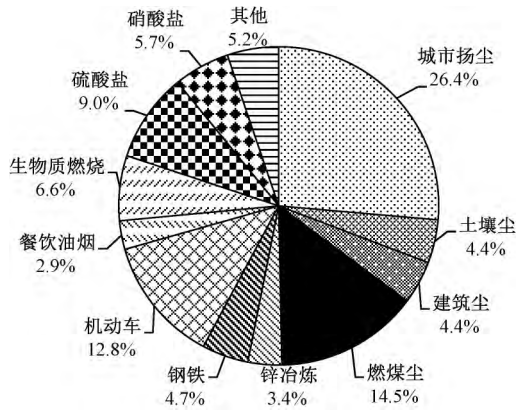


图 4 基于 CMB 模型的西宁市 PM<sub>2.5</sub> 的源解析结果

从图 4 可以看出,对西宁市 PM<sub>2.5</sub> 贡献最大的污染源为城市扬尘,分担率为 26.4%,以城市扬尘、土壤尘和建筑尘为代表的开放源类对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献为 35.2%,燃煤尘分担率为 14.5%,以硫酸盐和硝酸盐为代表的二次颗粒物对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献为 14.7%,机动车尾气、工业源(钢铁尘和锌冶炼)、生活源(餐饮油烟和生物质燃烧)分别贡献 12.8%、8.1%、9.5%。

2.3.2 不同季节颗粒物源解析结果

对西宁全市分季节的 PM<sub>2.5</sub> 进行解析,得到不同采样季节各污染源的贡献值和分担率。如表 2 所示。

表 2 西宁市各季节全市 PM<sub>2.5</sub> 来源解析结果

污染源类	采暖季		风沙季		非采暖季
	贡献值/( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	分担率/%	贡献值/( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	分担率/%	贡献值/( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )
城市扬尘	28.41	24.8	77.55	41.3	16.87
土壤尘	8.15	7.1	16.74	8.9	4.13
建筑尘	5.55	4.8	12.43	6.6	2.06
燃煤尘	22.72	19.8	20.47	10.9	11.66
锌冶炼尘	2.29	2.0	4.18	2.2	4.61
钢铁尘	4.36	3.8	6.45	3.4	4.88
机动车尾气尘	12.26	10.7	11.64	6.2	8.89
餐饮油烟	3.65	3.2	3.15	1.7	3.48
生物质燃烧	8.03	7.0	5.79	3.1	7.44
硫酸盐	9.24	8.1	13.44	7.2	8.87
硝酸盐	8.53	7.4	6.19	3.3	3.72
其他	1.37	1.2	9.79	5.2	2.80

注:此处使用的 PM<sub>2.5</sub> 浓度为各个季节采集的颗粒物样品浓度,与前文中提到的国控点位自动监测数据之间存在一定的差异。

从各污染源贡献的季节变化来看,风沙季的城市扬尘、土壤尘和建筑尘的分担率高于其他季节,主要与风沙季的气象条件相关,风沙季干旱同期,风力较大,地壳物质更易扬起并进入到环境空气中,造成颗粒物浓度升高。采暖季燃煤尘分担率高于其他季节,西宁市每年采暖期长达6个月,供暖锅炉的运行导致采暖季燃煤量远高于其他季节,因此导致采暖季燃煤尘对环境污染的贡献较为明显。工业污染源的分担率以非采暖季较高,以钢铁冶炼和锌冶炼

为主的西宁市工业污染排放各个季节的浓度贡献值相当,但是由于非采暖季其他源类的贡献较低,颗粒物浓度也较低,因此工业污染的相对分担率高于其他2个季节。

2.3.3 城市不同功能区颗粒物来源解析结果

为了对城市不同功能区颗粒物污染来源有更加全面的了解,本研究将针对全市范围的PM<sub>2.5</sub>进行源解析。表3为西宁市辖区11个点位PM<sub>2.5</sub>的源解析结果。从表3可以看到,不同点位的颗粒物来源存在较明显差异。

表3 PM <sub>2.5</sub> 分点位来源解析结果											%
源类	市区					郊区					
	市站	省医药仓库	四陆医院	省站	西钢	第五水厂	湟中	湟源	大通	城南新区	甘河园区
城市扬尘	32.8	31.1	33.4	31.4	31.2	24.1	13.7	27.4	31.7	29.1	10.7
土壤尘	2.2	1.2	2.0	2.8	0.7	0.8	1.7	1.4	3.5	0.3	1.0
建筑尘	13.3	10.3	3.6	7.3	6.4	4.7	7.3	5.9	4.6	5.2	10.2
燃煤尘	7.3	8.6	9.5	14.9	15.0	15.5	7.8	4.1	9.3	10.1	15.4
锌冶炼尘	2.9	2.1	1.0	3.1	5.8	0.9	2.1	1.0	0.8	1.1	6.7
钢铁尘	1.6	5.1	3.4	4.7	2.0	0.7	5.4	5.2	0.9	7.4	1.1
机动车尾气尘	6.7	4.4	7.9	2.7	5.4	5.4	8.8	12.8	12.9	7.7	10.7
餐饮油烟	1.6	0.5	2.4	2.0	2.8	2.5	2.5	8.9	6.6	3.3	2.1
生物质燃烧	9.2	8.7	4.9	9.2	6.6	9.9	9.4	7.4	10.2	6.9	8.8
硫酸盐	7.4	7.0	7.3	8.5	6.3	11.1	17.0	7.0	7.3	11.4	8.9
硝酸盐	4.1	4.2	4.8	6.8	5.3	8.2	8.8	3.4	2.7	8.0	5.6
其他	10.9	16.8	19.9	6.5	12.4	16.3	15.8	15.4	9.6	9.4	18.8

为了进一步区分不同类型点位之间的区别,本研究将城市和郊区点位的分担率分别求得平均值后,得到如图5所示的各个污染源的分担率比较。

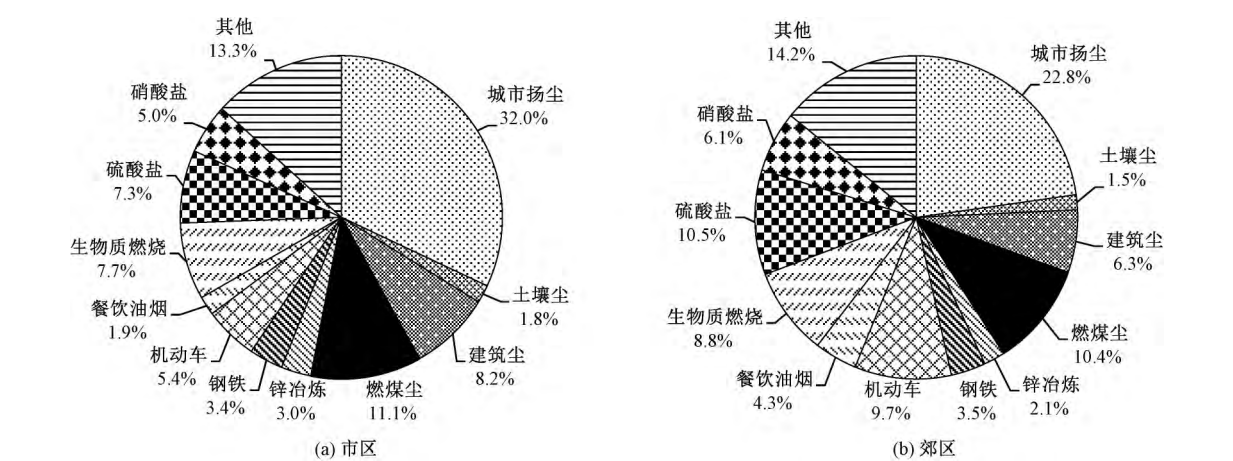


图5 郊区点位和城市点位各污染源分担率比较

从市区点和郊区点的源解析结果对比可以看出,城市扬尘对市区的影响大于郊区,市区PM<sub>2.5</sub>的分担率为32.0%,郊区分担率为22.8%。建筑尘对市区的影响同样大于郊区,对市区PM<sub>2.5</sub>的分担率为8.2%,对郊区PM<sub>2.5</sub>的

分担率为6.3%。其中,位于市区的市站点位因其周边存在大量的建筑施工活动,因此该点建筑尘的贡献高于其他点位。位于郊区的甘河工业园区点位附近不仅存在较多的施工活动,而且周边还分布有一定数量的水泥生产企业,因

此建筑尘对该点影响较大。机动车尾气尘的贡献整体上郊区大于城区,虽然城区范围内车辆较多,但是郊区行驶的多为大型载重货车,其排放量高于普通汽车,因此在郊区机动车尾气的贡献高于城区。甘河工业园区因为存在大量的锌冶炼企业,因此锌冶炼尘对该点的贡献值高于其他点位。

### 3 结论

1) 2014 年,西宁市大气 PM<sub>2.5</sub> 主要来源为开放源类(包括城市扬尘、土壤尘和建筑尘)、燃煤尘和二次颗粒物(硫酸盐和硝酸盐),对 PM<sub>2.5</sub> 的分担率分别为 35.2%、14.5% 和 14.7%。此外,机动车尾气、工业源(钢铁尘和锌冶炼)、生活源(餐饮油烟和生物质燃烧)的贡献也较为明显,分担率分别为 12.8%、8.1% 和 9.5%。源解析结果表明西宁市 PM<sub>2.5</sub> 污染属于开放源类和煤烟尘为主的多源类联合污染。

2) 采样期间,城市扬尘、建筑尘、燃煤尘、生物质燃烧、二次硫酸盐和硝酸盐对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献率呈现显著的季节变化特征,而机动车排放、锌冶炼、钢铁尘及餐饮油烟源的贡献率随季节变化不明显。

3) 不同功能区站点的源解析结果比较发现,城市扬尘及建筑尘对市区的影响大于郊区,机动车尾气尘贡献整体上郊区大于城区。

虽然受体模型能够对大气环境 PM<sub>2.5</sub> 的主要来源进行定量分析,能够较好地反应不同点位、不同季节 PM<sub>2.5</sub> 来源的主要特点。但是,对于 PM<sub>2.5</sub> 二次来源及区域传输的进一步解析,还应联合应用其他技术手段,如可靠的源清单数据、优化的数值模拟系统等手段。

#### 参考文献:

- [1] 西宁市环境保护局. 西宁市 2014 年环境质量状况公报[R]. 西宁: 西宁市环境保护局 2015.
- [2] ZHANG K, BATTERMAN S. Air pollution and health risks due to vehicle traffic [J]. *Sci Total Environ*, 2013 450/451: 307-316.
- [3] LI H, QIAN X, HU W, et al. Chemical speciation and human health risk of trace metals in urban street dusts from a metropolitan city, Nanjing, SE China [J]. *Sci Total Environ*, 2013, 456/457: 212-221.
- [4] DAZ-ROBLES L A, FU J S, VERGARA-FERN NDEZ A, et al. Health risks caused by short term exposure to ultrafine particles generated by residential wood combustion: a case study of Temuco, Chile [J]. *Environ Int*, 2014 66: 174-181.
- [5] SHI Y, CHEN J, HU D, et al. Airborne submicron particulate (PM<sub>1</sub>) pollution in Shanghai, China: chemical variability, formation/dissociation of associated semi-volatile components and the impacts on visibility [J]. *Sci Total Environ*, 2014 473/474: 199-206.
- [6] 刘爱明, 杨柳, 吴亚玲, 等. 城市区域大气颗粒物的健康效应研究 [J]. *中国环境监测*, 2012, 28(5): 19-23.
- [7] 戴伟, 高佳琪, 曹昱, 等. 深圳市郊区大气中 PM<sub>2.5</sub> 的特征分析 [J]. *环境科学* 2012 33(6): 1 952-4 957.
- [8] 任丽红, 周志恩, 赵雪艳, 等. 重庆主城区大气 PM<sub>10</sub> 及 PM<sub>2.5</sub> 来源解析 [J]. *环境科学研究*, 2014, 27(12): 1 387-4 394.
- [9] 朱坦, 冯银厂. 大气颗粒物来源解析原理、技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [10] 环境保护部. 大气颗粒物来源解析技术指南 [S/OL]. [2013-08-20]. <http://wenku.baidu.com/view/708ea6d3f90f76c661371a7e.html>.
- [11] Office of Air and Radiation. Office of Air Quality Planning and Standards [M]. Washington D C: USEPA Research Triangle Park, 1987.
- [12] 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]. *Atmos Environ*, 1984, 18(7): 1 347-1 355.
- [13] 金蕾, 华蕾. 大气颗粒物源解析受体模型应用研究及发展现状 [J]. *中国环境监测*, 2007 23(1): 38-42.
- [14] 徐光. 辽宁省三城市大气颗粒物来源解析研究 [J]. *中国环境监测* 2007 23(3): 57-61.
- [15] 陈添, 华蕾, 金蕾, 等. 北京市大气 PM<sub>10</sub> 源解析研究 [J]. *中国环境监测* 2006 22(6): 59-63.
- [16] 包贞, 冯银厂, 焦荔, 等. 杭州市大气 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 污染特征及来源解析 [J]. *中国环境监测*, 2010, 26(2): 44-48.
- [17] 韩德辉. 西宁市环境空气可吸入颗粒物污染现状及来源研究 [J]. *青海环境* 2011 21(3): 106-111.
- [18] 赵旭东, 杨永顺, 冯晓涓. 二重源解析技术在西宁市

- PM<sub>10</sub>来源解析中的应用研究[J]. 青海环境, 2012, 24(3): 138-141.
- [19] 毛富仁. 2003—2012 年西宁市空气质量污染现状分析[J]. 青海环境, 2014, 24(2): 67-70.
- [20] 窦筱艳, 许嘉, 韩德辉, 等. 西宁市典型污染日 PM<sub>10</sub> 输送规律研究[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(2): 85-90.
- [21] 孔少飞, 白志鹏, 陆炳, 等. 固定源排放颗粒物采样方法的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(12): 88-94.
- [22] 陈魁, 白志鹏. 颗粒物再悬浮采样器研制与应用[J]. 环境工程, 2006, 24(5): 67-68, 81.
- [23] KONG Shao-fei, HAN Bin, BAI Zhi-peng, et al. Receptor modeling of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and TSP in different seasons and long-range transport analysis at a coastal site of Tianjin, China. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(20): 4 681-4 694.
- [24] SAGARESWAR G, YUARI B Y, MURTHY C, et al. Source apportionment of particulate matter in the ambient air of Hyderabad city, India[J]. *Atmospheric Research*, 2011(101): 752-764.
- [25] SANGIL L, LIU Wei, WANG Yu-hang, et al. Source apportionment of PM<sub>2.5</sub>: Comparing PMF and CMB results for four ambient monitoring sites in the southeastern United States[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 4 126-4 137.
- [26] 颜鹏, 郇宁, 杨东贞, 等. 两种气溶胶质量重建方法的比较及气溶胶质量闭合研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24(5): 661-666.
- [27] MARKUS S, RISTO H, SANNA S, et al. Chemical composition and mass closure of particulate matter at six urban sites in Europe[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 212-223.
- [28] WU Gang, DU Xin, WU Xue-fang, et al. Chemical composition, mass closure and sources of atmospheric PM<sub>10</sub> from industrial sites in Shenzhen, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(8): 1 626-1 635.
- [29] TURPIN B J, LIM H J. Species contributions to PM<sub>2.5</sub> mass concentrations: revisiting common assumptions for estimating organic mass. *Aerosol Sci Technol*, 2001, 35: 602-610.
- [30] YAN Peng, ZHANG Ren-jian, HUAN Ning, et al. Characteristics of aerosols and mass closure study at two WMO GAW regional background stations in eastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 60: 121-131.
- [31] JUDITH C C, DOUGLAS H L, CHEN A, et al. Mass reconstruction methods for PM<sub>2.5</sub>: a review, *Air Qual Atmos Health* 2015, 8: 243-263.