

# 大气颗粒物的源成分谱研究现状综述

郭婧, 华蕾, 荆红卫

(北京市环境保护监测中心, 北京 100044)

**摘要:** 调研国内外大气颗粒物排放源成分谱研究情况, 对排放源的分类、颗粒物的化学组分和测定、各类排放源的成分谱组成、研究情况以及排放源的标识元素情况进行了综述。

**关键词:** 大气颗粒物; 成分谱; 标识元素

**中图分类号:** X131.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6732(2011)-06-0028-05

## Summary of Current Research on Source Profiles of Atmospheric Particulates

GUO Jing, HUA Lei, JING Hong-wei

(Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100044, China)

**ABSTRACT:** Foreign and domestic researches on source profiles of atmospheric particulates were investigated. Source category, chemical compositions of particulates, analysis of compositions, source profiles, relevant studies, and marker elements of sources were summarized.

**KEY WORDS:** atmospheric particulates; source profiles; marker elements

大气颗粒物是指悬浮在大气中的固态或液态颗粒状物质, 又称悬浮颗粒物, 是大气的主要污染物之一。国内外针对颗粒物的污染进行了大量的研究, 源解析即是其中重要的一项工作, 它以成分谱为基础, 通过化学质量平衡受体模型来确定各源对环境中的颗粒物的分担率。因而获得准确且有代表性的源的成分谱和主要源的标识元素成为源解析工作的重心。目前国内开展  $PM_{10}$  (颗粒物直径小于或等于  $10 \mu m$ ) 研究多一些, 国外有些研究已深入至  $PM_{2.5}$  (颗粒物直径小于或等于  $2.5 \mu m$ )。

### 1 排放源的分类

目前国内外对源的分类没有统一的标准, 研究目的不同, 排放源的分类也不相同。在宋宇、唐孝炎对北京市大气细粒子来源的研究中将其分为6类来源: 地面扬尘、建筑源、生物质燃烧、二次源、机动车排放和燃煤<sup>[1]</sup>; 在王帅杰、朱坦的研究中将其粗略分为4类: 天然源、人为源、混合源以及其他源类<sup>[2]</sup>; 华蕾等人在北京市的源解析研究中将污染源分为土壤尘、道路尘、城市扬尘、建筑尘、煤烟尘、钢铁尘及机动车排放尘等7种典型源类<sup>[3]</sup>; 而

在美国 EPA (美国环保局) 的颗粒物研究中则将其分为固定源、流动源、生物质燃烧源、海盐粒子、二次污染颗粒物等几种类别。其中, 固定源的分类主要是为了区别于机动车等流动的排放源类, 它的范围很广, 包括了电厂以及其他一些工业工程的燃料燃烧, 建筑工地的建造及拆毁, 金属、矿石、石化产品以及木材制品的生产过程, 耕地的风化, 废物的处置及循环等排放至空气中的颗粒物, 以及道路的飘尘。流动源主要指道路机动车以及非道路机动车的排放, 包括汽车尾气颗粒物, 车辆、行人扬尘以及二次污染物。

### 2 排放源颗粒物的化学组分和测定方法

#### 2.1 化学组分

常规测定的化学组分有: 元素 (Na、Mg、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、As、Se、Br、Rb、Sr、Y、Zr、Mo、Pd、Ag、Cd、In、Sn、Sb、Ba、La、Au、Hg、Tl、Pb 和 U), 水溶性离子 ( $Cl^-$ 、

收稿日期: 2011-07-20

作者简介: 郭婧 (1976—), 女, 工程师, 硕士, 从事环境监测工作。

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), 有机碳(OC)和元素碳组分(EC), 还有一些特殊的有机化合物(例如: 多环芳烃、有机酸、内酯、醇、糖类等)<sup>[4]</sup>。

2.2 测定方法

颗粒物的质量一般采用重量分析法来分析, 化学组分的组成一般情况下分别采用如下方法: 元素Na→U采用质子X射线荧光法(PIXE); 阴离子Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>采用离子色谱法; 阳离子Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>采用原子吸收分光光度法; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>采用自动比色法; OC和EC以及特殊的有机化合物采用热/光反射法(TOR)<sup>[5]</sup>。

质子X射线荧光已经广泛应用于元素的测定, 但它无法测定比Na轻的元素, 仪器中子活化分析方法(INNA)弥补了这一缺点, INNA可以测定轻元素(如Na、Al)的一些更精确的数据, 并能提供

一些我们感兴趣的元素的数据, 包括金属元素以及非金属元素如As、Se、In、Sb、卤素I等, 另外, 还有人应用FAAS和GFAAS来测定这些轻金属<sup>[6]</sup>。

此外, 电感耦合等离子发射光谱法(ICP-AES)可同时分析大量元素, 国外有些源谱成分的分析采用了此方法。但是由于检出限较高(ICP-AES的检出限为2 mg/kg), 许多元素在大气中存在量都小于检出限, 仅11种元素(Al、Ca、Cr、Cu、Fe、Mg、Mn、Pb、Sr、V和Ze)能被测定<sup>[7,8]</sup>。

3 颗粒物各类排放源成分谱的研究

3.1 源成分谱

国内进行过很多研究, 但是对外公布的排放源的成分谱较少, 2004年公布的对北京市PM<sub>10</sub>的研究结果比较完整, 见表1。

表1 北京市大气污染各类排放源的化学组分组成质量百分比

源类型	化学成分百分含量*			
	< 0.1%	0.1% ~ 1%	1% ~ 10%	> 10%
农田土	Se、Cd、Sc、As、Ni、Cr、Cu、V、Zn、Pb、Ba	Mn、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、Ti、EC、Na	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、Mg、K、Ca、OC、Fe、Al	Si
山体土	Se、Cd、Sc、As、Cr、Cu、Ni、V、Zn、Pb、Ba、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、Mn	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、Ti、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、EC	Na、Mg、Ca、K、Fe、OC、Al	Si
河滩土	Se、Cd、Sc、Cu、As、Ni、V、Cr、Pb、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、Ba、Zn	Mn、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、Ti、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、EC	Na、Mg、K、OC、Fe、Ca、Al	Si
道路尘	Se、Cd、Sc、As、Ni、V、Cr、Cu、Pb、Ba、Mn	Zn、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、Ti、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	EC、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、Na、K、Mg、Fe、Al、OC	Ca、Si
城市扬尘	Se、Cd、Sc、As、Ni、V、Cr、Cu、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、Pb、Mn、Zn、Ba	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、Ti	Na、EC、K、Mg、Fe、Al、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、OC	Ca、Si
建筑扬尘	Se、Cd、Sc、As、Ni、V、Cr、Cu、Zn、Pb、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、Ba、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、Mn	Ti、EC、K	Na、Mg、Fe、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、Al、OC	Si、Ca
钢铁尘	Se、Ni、As、Cu、EC、Pb、Zn、Cr、Ba、V、Se、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、Cd、Mn	Ti、Na、K	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、Al、Mg、OC、TC	Ca、Si、Fe
煤烟尘	Se、Cd、Sc、As、Ni、V、Cr、Cu、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、Pb、Mn、Zn、Ba	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、Ti	Na、EC、K、Mg、Fe、Al、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、OC、Ca	Ca、Si

注: \* 指各个元素占各类型样品的质量百分比, <0.1% 列列出的为各类型样品中质量百分比 <0.1% 的各个元素, 其他列列法同。

美国 EPA 通过多年研究得出的源成分谱数据, 总结出了在大多数源排放中所发现的物质的化

学组成<sup>[9]</sup>, 见表2。

表2 美国 EPA 得出的各类排放源中化学组分组成质量百分比

源类型	主要颗粒物的分类	化学成分百分含量*			
		< 0.1%	0.1% ~ 1%	1% ~ 10%	> 10%
铺过的路面	粗颗粒	Cr, Sr, Pb, Zr	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , P, S, Cl, Mn, Zn, Ba, Ti	EC, Al, K, Ca, Fe	OC, Si
未铺过的路面	粗颗粒	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , P, Zn, Sr, Ba	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , P, S, Cl, Mn, Ba, Ti	OC, Al, K, Ca, Fe	Si
建筑	粗颗粒	Cr, Mn, Zn, Ba	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , K <sup>+</sup> , S, Ti	OC, Al, K, Ca, Fe	Si
农田土壤	粗颗粒	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Cr, Zn, Sr	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Na, K <sup>+</sup> , S, Cl, Mn, Ba, Ti	OC, Al, K, Ca, Fe	Si
自然土壤	粗颗粒	Cr, Mn, Sr, Zn, Ba	Cl <sup>-</sup> , Na, EC, P, S, Cl, Ti	OC, Al, Mg, K, Ca, Fe	Si
湖底	粗颗粒	Mn, Sr, Ba	K <sup>+</sup> , Ti	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Na <sup>+</sup> , OC, Al, S, Cl, K, Ca, Fe	Si
机动车	细颗粒	Cr, Ni, Y	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Si, Cl, Al, Si, P, Ca, Mn, Fe, Zn, Br, Pb	Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , S	OC, EC
生物质燃烧	细颗粒	Ca, Mn, Fe, Zn, Br, Rb, Pb	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , S	Cl <sup>-</sup> , K <sup>+</sup> , Cl, K	OC, EC
残余油燃烧	细颗粒	K <sup>+</sup> , OC, Cl, Ti, Cr, Co, Ga, Se	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , Zn, Fe, Si	V, OC, EC, Ni	S, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
焚化炉	细颗粒	V, Mn, Cu, Ag, Sn	K <sup>+</sup> , Al, Ti, Zn, Hg	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> , EC, Si, S, Ca, Fe, Br, La, Pb	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , OC, Cl
燃煤锅炉	细颗粒	Cl, Cr, Mn, Ga, As, Se, Br, Rb, Zr	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , P, K, Ti, V, Ni, Zn, Sr, Ba, Pb	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , OC, EC, Al, S, Ca, Fe	Si
燃油发电厂	细颗粒	V, Ni, Se, As, Br, Ba	Al, Si, P, K, Zn	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , OC, EC, Na, Ca, Pb	S, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
钢质鼓风机	细颗粒	V, Ni, Se	Al, Si, P, K, Zn	Mn, OC, EC	Fe
熔炉火	细颗粒	V, Mn, Sb, Cr, Ti	Cd, Zn, Mg, Na, Ca, K, Se	Fe, Cu, As, Pb	S
锑烧烤炉	细颗粒	V, Cl, Ni, Mn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Sb, Pb	S	—
海洋	细颗粒、粗颗粒	Ti, V, Ni, Sr, Zr, Pd, Ag, Sn, Sb, Pb	Al, Si, K, Ca, Fe, Cu, Zn, Ba, La	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , OC, EC	Cl <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> , Na, Cl

注：粗颗粒是指粒径为 2.5 ~ 10 μm，细颗粒是指粒径 < 2.5 μm。\* 与表 1 同。

### 3.2 国内外成分谱的研究情况

北京市在 2004 年的研究中将来自农田、山体及干涸河滩等纯粹的沙土来源的尘统一归为土壤尘，由于道路的尘土中包含了机动车排放以及人为活动影响的尘土，单独将其列为道路尘，而把风力、交通、人为等共同活动影响的尘土列为城市扬尘，这部分尘土通过收集散落在阳台、房顶等的尘土得到，除这几种尘源外，还研究了建筑尘、煤烟尘、钢铁尘、机动车排放尘等单一尘源。国内一些城市近年来的成分谱研究也多采用了此分类，如南开大学指导下进行的石家庄、济南等城市的源谱分析<sup>[10]</sup>。

国外研究源谱方法与国内不尽相同，由于铺过路面的道路尘、裸露路面的道路尘和土壤尘的主量

元素都是地壳元素，美国 CHOW 和 WATSON 等人则将其统一归为地质尘，在每一种地质尘中，Al、Si、K、Ca 都具有很大的丰度和较小的偏差<sup>[11,12]</sup>。1999 年在德克萨斯州的两个地方所采的两组土壤成分谱中，Si 分别为 (45.900 4% ± 13.317 2%) 和 (22.180 9% ± 5.885 5%)、TC 为 (8.106% ± 4.405 8%) 和 (4.717 5% ± 3.147 1%)、Al 为 (4.179 9% ± 1.092 4%) 和 (6.519 3% ± 1.642 2%)、Ca 为 (3.689 9% ± 0.608 5%) 和 (12.780 7% ± 1.850 2%)、Fe 为 (1.624 4% ± 0.269 5%) 和 (3.295 1% ± 0.211 2%)。HO、LEE 等人在香港所作的地质尘谱中，发现 Al、Si 和 OC 富集于铺过路面的道路尘和土壤尘<sup>[5]</sup>。在

2008年 YATKIN 等人对土耳其的伊兹密尔所做的研究中进一步证实地壳元素 Al、Ca、Fe、K 和 Mg 以及海盐元素 Na 是表层土壤尘的主要组成成分,同时,还发现一些人为活动的元素例如 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、V 和 Zn 经常在  $PM_{2.5}$  中出现<sup>[13]</sup>。国外对建筑尘的研究一般采集水泥窑的飞灰或者直接检测水泥,很少采集施工工地的建筑尘。水泥窑成分谱主要受  $SO_2$ 、 $NH_3$  的影响,并且由于工况、除尘设备等的不同,不同的水泥窑采得的成分谱差别很大,1985年 COOPER 所作的一个燃煤的水泥窑的成分谱为 Al(4.3% ± 0.4%)、Si(8.4% ± 0.8%)、Ca(10% ± 1.3%)、Fe(0.9% ± 0.14%)、OC(5.4% ± 0.6%)、EC(0.2% ± 0.4%)、K(5.4% ± 1.5%)<sup>[14]</sup>。2004年 CHOW 等人所采集德克萨斯州的水泥窑飞灰( $PM_{2.5}$ )的成分谱为  $SO_4^{2-}$ (29.7% ~ 31.45%)、Al(1.06% ~ 1.14%)、Si(3.4% ~ 5.8%)、Ca(17.3% ~ 18.8%)、Fe(1.10% ~ 1.75%)、OC(11.7% ~ 14.6%)、K(4% ~ 14%)<sup>[4]</sup>;燃煤飞灰作为工业尘的一种,由于除尘方式的不同,其成分谱中元素的含量差异较大,总体说来,除了添加了  $SO_4^{2-}$  和 Se 外,与地质尘的组分含量很相似,1999年美国 EPA 曾报道过燃煤飞灰中含 Al 13.2%, Si 21%, Ca 4.2%, Fe 6.2% (未报道偏差),2008年 YATKIN 等人报道这些组分在小颗粒中的含量要大于在大颗粒中的含量,也就是说在  $PM_{2.5}$  中的含量大于在  $PM_{10}$  中的含量<sup>[13]</sup>;国外所报道的钢铁尘中,含量较突出的化学成分也是 Fe,另外含量百分比在 1% ~ 10% 之间的还有 EC、OC 和 Mn;此外,在源成分谱的研究中,国外很多专家投入很大精力研究了海盐粒子以及烧烤排放的烟尘等,海盐粒子中富含  $Na^+$ 、Na、S 以及  $SO_4^{2-}$  等离子及元素单质,一些沿海城市受其影响较大,而烧烤气体中含有大量的 OC(76% ~ 96%)。

#### 4 标识元素

所谓标识元素是指那些能够表征排放源特征并且在大气迁移过程中变化不大的元素。它是某源类区别于其他源类的重要标志,对排放源的确定起了很重要的作用。

由于源分类的不同,标识元素的选取也不尽相同。以土壤为主的地质尘一般选取 Si、Ca 和 OC 作为标识元素;HO 在香港地区的成分谱研究中将 Si、Al、K、Ca、Ti 和 Fe 作为土壤和铺过路面的道路

尘的标识元素<sup>[5]</sup>。他在研究中发现 Zn 和 Pb 与道路尘有很好的相关性,于是将这两种元素作为道路尘的其他源的标识元素,因为 Zn 用作汽车轮胎上及其他橡胶制品的硫化剂,轮胎磨损造成道路上富集 Zn。他发现虽然香港出售的汽油皆为无铅汽油,但是在道路尘中 Pb 含量仍然具有很大的比例。

杨复沫等人选用 Ca 作为建筑尘的标识元素,因为他发现 Ca 随着建筑施工活动的减少而减少<sup>[15]</sup>,WATSON 等人将几种金属元素 Ti、V、Mn 用来标识建筑水泥尘<sup>[4]</sup>,FUNG 在香港空气污染源分担率的研究中( $PM_{10}$ )发现 Sr 在建筑尘中占了相当大的质量比例<sup>[16]</sup>。

Se 一般用作燃煤电厂排放烟尘的标识元素,因为通常在未经过干法脱硫除尘的燃煤锅炉排气中发现 Se,WATSON 在德克萨斯州研究得到 Se 的含量在 0.51% ~ 2.2%,FUNG 在研究中得出 Se 和 As 是燃煤标识的重要影响元素<sup>[16]</sup>;WATSON 在 2002 年的研究中将 S 也作为燃煤炉的标识元素<sup>[17]</sup>;诸多文献中报道了 Ni 和 V 被首选作为燃油的标识元素,其次为 Fe 和 Mn,机动车排放主要为 OC 和 EC<sup>[18]</sup>。而 Mn/V 作为区分燃煤和燃油的一个关键参数,若  $Mn/V \leq 1$ ,认为污染来自燃油排放,若  $Mn/V \geq 1$ ,则认为来自燃煤<sup>[19]</sup>。

值得一提的是,随着标识元素辨别的发展,已有人将靠同位素之间的区别来进行标识。在道路尘的标识元素中,虽然含铅汽油是铅的一个重要的源,但是还有许多其他因素,如工业排放(铅熔炼厂、钢熔炼厂、废物燃烧)以及一些二次污染源(木材燃烧、废油气溶胶)等。为了区分汽油与其他源,有人采用了 Pb 的同位素。Pb 有 4 种稳定的同位素,其中有 3 种  $^{206}Pb$ 、 $^{207}Pb$ 、 $^{208}Pb$  分别是  $^{238}U$ 、 $^{235}U$ 、 $^{232}Th$  衰变产生的放射性产物。只有  $^{204}Pb$  是存在于地壳中没有变化的。用同位素比率方法来区分汽油排放源的贡献率更为可靠。一般采用  $^{206}Pb/^{207}Pb$ 。MATSON 于 1977 年发现在 19 世纪 70 年代中期汽油中的  $^{206}Pb/^{207}Pb$  约为 1.185 ~ 1.237;STUKAS 和 WONG 报道为 1.23;TERA 等于 1985 年在华盛顿测得此值为 1.23 ~ 1.25;FLAMENT 于 2000 年报道,源于欧洲大陆的空气颗粒物中  $^{206}Pb/^{207}Pb$  为 1.134 ~ 1.172,起源于英国的为 1.23 ~ 1.25<sup>[20,21]</sup>。

## 5 成分谱研究工作目前尚存的不足

尽管成分谱的研究方面已经开展了许多工作,但是仍然存在一些不完善的地方。主要有以下几个方面:(1)采样技术对成分谱的分析起着至关重要的作用,但是现在的采样技术还不是十分成熟,如何将排放源及受体的颗粒物种类全部采集齐全以及如何将大气颗粒物中的 $PM_{10}$ 或者 $PM_{2.5}$ 精确地分离出来仍然是今后工作的难点;(2)现有成分谱中的化学物种是易于测定的那些物质,而不是可以将源很好地与其他源区分开来的那些物质;(3)得到的源的种类及其颗粒物的分布往往与受体测定的不一致;(4)源的分类方法没有统一的标准;(5)虽然大多数颗粒物都采用某一测定或分析方法,但是在这方面却没有统一的规范,不同方法得到的数据往往有很大误差;(6)有些源可以找到标识元素,而有的源却找不到。

### [参考文献]

- [1] 宋宇,唐孝炎,方晨,等.北京市大气细粒子的来源分析[J]. 环境科学,2002,23(6):11-16.
- [2] 王帅杰,朱坦.大气颗粒物源解析技术研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备,2002,3(8):8-12.
- [3] 华蕾,郭婧,徐子优,等.北京市主要 $PM_{10}$ 排放源成份谱分析[J]. 中国环境监测,2006,22(6):64-70,71.
- [4] CHOW J C, WATSON J G, HAMPDEN K, et al. Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the Big Bend Regional Aerosol Visibility and Observational Study [J]. Chemosphere, 2004,54(2):185-208.
- [5] HO K F, LEE S C, CHOW J C, et al. Characterization of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  Source Profiles for fugitive dust in Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2003,37(8):1023-1032.
- [6] WATSON J G, CHOW J C. Source characterization of major emission sources in the Imperial and Mexicali Valleys along the US/Mexico border [J]. The Science of the Total Environment, 2001,276(1-3):22-47.
- [7] MAENHAUT W, FERNANDEZ M T, RAJTA I, et al. Two-year of atmospheric aerosols in Alta Floresta, Brazil: Multielemental composition and source apportionment [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 2002, 189(1-4):243-248.
- [8] TSAI J, OWEGA S, EVANS G, et al. Chemical composition and source apportionment of Toronto summertime urban fine aerosol ( $PM_{2.5}$ ) [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2004,259(1):193-197.
- [9] WATSON J G, CHOW J C. Reconciling Urban Fugitive Dust Emissions Inventory and Ambient Source Contribution Estimates: Summary of Current Knowledge and Needed [R]. Reno: Desert Research Institute of University and Community College System of Nevada, 2000:10-12.
- [10] 大气颗粒物源解析课题组.济南市大气颗粒物来源解析及防治对策的研究[R]. 济南:济南市环境保护科学研究所, 2002:68-75.
- [11] CHOW J C, WATSON J G, ASHBAUGH L L, et al. Similarities and differences in  $PM_{10}$  chemical source profiles for geological dust from the San Joaquin Valley, California [J]. Atmospheric Environment, 2003,37(9-10):1317-1340.
- [12] WATSON J G, CHOW J C.  $PM_{2.5}$  chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995[J]. Chemosphere, 2001,43(8):1141-1151.
- [13] YATHIN S, BAYRAM A. Determination of major natural and anthropogenic source profiles for particulate matter and trace elements in Izmir, Turkey [J]. Chemosphere, 2008,71(4):685-696.
- [14] COOPER J A, RRAZIER C A, HOUCK J E. Seattle-Tacoma Aerosol Characterization Study (STACS) [R]. Tigard: NEA, Inc., 1985.
- [15] 杨复沫,贺克斌,马永亮,等.北京大气细粒子 $PM_{2.5}$ 的化学组成[J]. 清华大学学报:自然科学版,2002,42(12):1605-1608.
- [16] FUNG Y S, WONG L W Y. Apportionment of air pollution sources by receptor models in Hong Kong [J]. Atmosphere Environment, 1995,29(16):2041-2048.
- [17] WATSON J G, ZHU T, CHOW J C, et al. Receptor modeling application framework for particle source apportionment [J]. Chemosphere, 2002,49(9):1093-1136.
- [18] MANOLI E, VOUTSA D, SAMARA C. Chemical characterization and source identification/ apportionment of fine and coarse air particles in Thessaloniki, Greece [J]. Atmospheric Environment, 2002,36(6):949-961.
- [19] MITRA A P, MORAWSKA L, SHARMA C, et al. Chapter two: methodologies for characterisation of combustion sources and for quantification of their emissions [J]. Chemosphere, 2002,49(9):903-922.
- [20] SUTHERLAND R A, Day J P, BUSSEN J O. Lead concentrations, isotope ratios, and source apportionment in road deposited sediments, Honolulu, Oahu, Hawaii [J]. Water, Air and Soil pollution, 2003,142(1-4):165-186.
- [21] FLAMEN P, BERTHO M L, DEBOUDET K, et al. European isotopic signatures for lead in atmospheric aerosols: a source apportionment based upon  $^{206}Pb/^{207}Pb$  ratios [J]. The Science of the Total Environment, 2002,296(1-3):35-57.