南京市 PM2.5 物理化学特性及来源解析

黄辉军[1] 刘红年[1] 蒋维楣[1] 黄世鸿[1] 张予燕[2]

1 南京大学大气科学系，南京 210093
2 南京市环境监测中心站，南京 210024

摘 要 在夏、冬两季，分别在南京市4个站点进行为期7天的气溶胶PM2.5采样，同步采集并分离主要排放源的PM2.5样品，用X射线荧光光谱仪（XRF）分析得到气样及源样中PM2.5的化学成分，对南京市PM2.5的物理化学特性、富集因子进行了分析，并应用化学质量平衡法（CMB）计算各类源对气溶胶PM2.5的贡献。结果表明，南京市PM2.5的夏、冬平均值分别为69.1、139.5 $\mu g \cdot m^{-3}$，PM2.5/PM10的全年平均值为63.9%；富集成分中，S、As、Zn、Pb等主要来源于人为污染源，Na则主要来源于海洋。来源解析的结果表明，各类污染源对南京市气溶胶PM2.5的贡献率分别为：扬尘37.28%、煤烟尘30.34%、硫酸盐9.87%、建筑尘7.95%、汽车尘2.98%、冶炼尘2.57%、其他源9.01%。作者还对扬尘中的PM2.5进行了来源解析。

关键词 气溶胶PM2.5 源解析 化学质量平衡法
文章编号 1006-9585（2006）06-0713-10 **中图分类号** X513 **文献标识码** A

Physical and Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM2.5 in Nanjing

HUANG Hui-Jun[1], LIU Hong-Nian[1], JIANG Wei-Mei[1], HUANG Shi-Hong[1], and ZHANG Yu-Yan[2]

1 *Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing* 210093
2 *Nanjing Municipal Environment Monitoring Station, Nanjing* 210024

Abstract Aerosol PM2.5 samples have been collected at four sites in summer (August 27—September 2, 2004) and winter (January 11—18, 2005) in Nanjing. Several sources have been collected at the same time. All these samples are analyzed by X-ray fluorescence analysis for elements characteristics. The average PM2.5 mass concentrations are 69.1 $\mu g \cdot m^{-3}$ in summer and 139.5 $\mu g \cdot m^{-3}$ in winter. Yearly average of PM2.5/PM10 ratio is 63.9%. The enrichment elements, such as S, As, Zn, Pb are mainly released from anthropogenic sources, and Na is from the ocean. The enrichment factor of every element is calculated, and the chemical mass balance method (CMB) has been applied to identify the sources of PM2.5. The result of the source apportionment shows that, the major contributions of PM2.5 aerosol mass in Nanjing include: fugitive dust (37.28%), coal combustion (30.34%), sulfate (9.87%), construction dust (7.95%), motor vehicle exhausts (2.98%), steel industry dust (2.57%), and other sources (9.01%). Source apportionment has also been considered on the PM2.5 of fugitive dust.

Key words aerosol PM2.5, source apportionment, chemical mass balance (CMB)

收稿日期 2005-05-17 收到，2006-06-12 收到修定稿
资助项目 江苏省环保厅环保科技项目 2004008
作者简介 黄辉军，男，1973年出生，硕士研究生，主要从事大气气溶胶和空气污染研究。E-mail: hjhuang@grmc.gov.cn

1 引言

大气颗粒物来源广泛、地区特性强，是大气环境中化学组成最复杂、危害最大的污染物之一。气溶胶颗粒物会对人体健康产生直接的负面影响，因而受到各国政府及有关研究部门的高度重视。其中PM2.5更易于富集空气中的有毒重金属、酸性氧化物、有机污染物、细菌和病毒，且颗粒物的粒子半径越小，其化学成分越复杂，毒性越大。一是因为小颗粒物的巨大表面积使其能吸附更多的有害物质，并能使毒性物质有更高的反应和溶解速度；二是因为这些细颗粒物可以进入人的肺部，对人体健康的危害远比粗颗粒物大[1]。同时，PM2.5还对城市能见度有着非常大的影响[2]。

PM2.5在大气中停留的时间可以长达几天以上，所以这种颗粒可以长距离地传输，从而对更远的地方造成污染[1]。美国环保局于1997年美国国家大气质量标准中，规定了PM2.5的日均值为65 $\mu g \cdot m^{-3}$，年均值为15 $\mu g \cdot m^{-3}$，限制非常严格，以降低这些细颗粒物对人体健康和能见度的影响。

在对大气颗粒物进行来源解析方面，国内外已经做了很多工作[3~11]。南京市是我国的主要工业城市之一，随着社会经济的快速发展和城市化进程的加剧，工业、生活、交通、建筑等各类排放源排放了大量的烟尘和粉尘粒子，这些颗粒物进入大气以后很大一部分都以细粒子的形式存在。本文通过研究南京市PM2.5的物理化学特性和来源解析，可以初步了解目前南京市PM2.5的污染状况，为制定南京市PM2.5控制措施提供科学依据。

2 实验与方法

2.1 气溶胶PM2.5样品的采集

气溶胶PM2.5的采集分为夏（2004年8月27日～9月2日）、冬（2005年1月11～18日）两个季节进行，采样点分别设在南京市环境监测站的4个子站（草场门、迈皋桥、瑞金路和山西路）内，采集为期7天的PM2.5样品。其中，草场门在交通主干道附近，迈皋桥位于工业区，瑞金路处于居民区，山西路属于市中心的商业区，具有一定的代表性（见图1）。4个采样点的距地高度，草场门、迈皋桥和山西路约为15 m，瑞金路约为3 m。

采样采用Anderson采样仪，单个样品采样时间为24 h，采样体积大于30 m^3，用高纯度的过滤乙烯滤膜收集PM2.5样品。用于水溶性分析的为单个样品；用于浓度分析、富集因子分析和源解析的样品分析值均为各站的5天平均值。

2.2 源样的采集与分析

结合南京市的实际情况，确定气溶胶PM2.5的主要排放源为地面扬尘、建筑尘、煤烟尘、冶炼尘、汽车尘和二次气溶胶（以硫酸盐气溶胶为代表）。各源的收集情况如下：

扬尘：在市区内的窗台、广告牌等地方收集积尘，共计5个样品。

建筑尘：在市区拆迁工地、建筑工地地面采集，共计5个样品。

煤烟尘：在燃煤电厂煤烟道壁上刮取煤烟尘，共计3个样品。

冶炼尘：在冶炼车间及窗台上采集冶炼尘，共计2个样品。

硫酸盐气溶胶：参考美国环保局CMB7.0中的源样数据[12]。

汽车尘：取美国的机动车源样数据[8]。

土壤尘：在市区、市北郊、东郊各采集1个，共3个样品。

采集到的源样，用Anderson采样仪分离出当中的PM2.5成分，同样用高纯度的过滤乙烯滤膜收集PM2.5样品。在分离过程中，我们分析得到了部分源样的PM2.5/PM10的值（均为采集样品的平均值），见表1。可见，在各类气溶胶一次排放源的PM10中，PM2.5都占有一定的比例。

过滤乙烯滤膜上采集到的PM2.5源样和样品，经X射线荧光光谱仪（XRF，ARL-9800，

表1 部分排放源的PM2.5/PM10值

Table 1 PM2.5/PM10 ratio of some sources

	扬尘 Fugitive dust	建筑尘 Construction dust	煤烟尘 Coal combustion	土壤尘 Soil dust
PM2.5/PM10	0.2870	0.2496	0.2447	0.3859

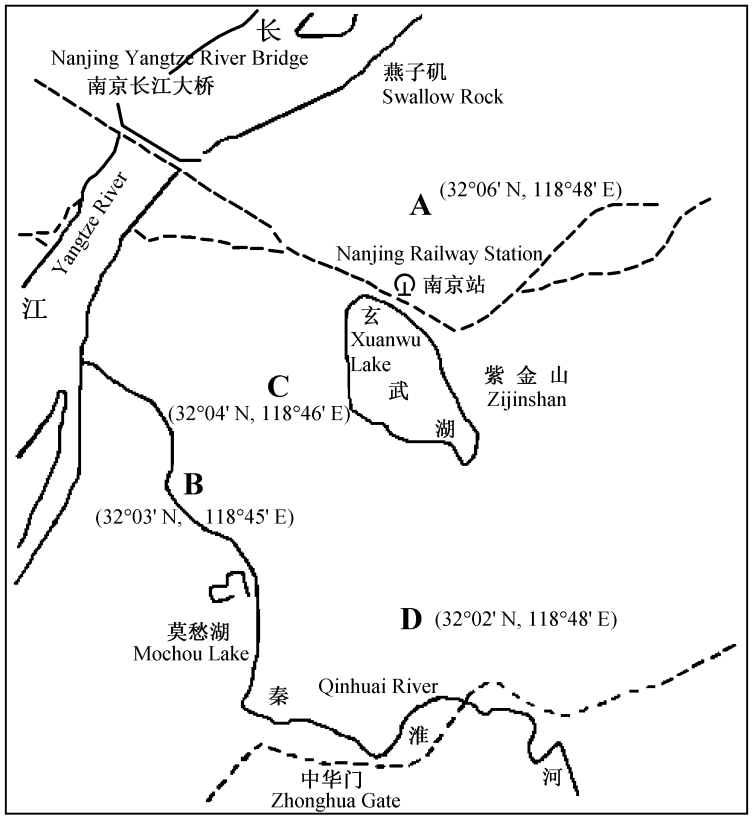

图 1　南京市 4 个采样点（A：迈皋桥，B：草场门，C：山西路，D：瑞金路）

Fig. 1　Four sampling sites in Nanjing（A：Maigao Bridge，B：Caochang Gate，C：Shanxi Road，D：Ruijin Road）

元素分析的相对误差一般＜5%）分析得到 17 种元素的含量，这些元素是 Na、Mg、Al、Si、P、K、Ca、Ti、Mn、Fe、S、Zn、Pb、Ni、As、Cr、V。在分析的 17 种元素中，Ni、Cr、V 等 3 种元素因元素值太小而不能分析出来，具体参与计算和讨论的元素是 14 种。

2.3　水溶性成分分析

用液相离子色谱法（IC，Dionex-300 型）测得各站点 PM2.5 水溶性成分中两个主要阴离子 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的分析值（表 2），SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的年平均比值为 7.2。

2.4　化学质量平衡法

对气溶胶来源解析目前较多地使用受体模型进行研究。常用的受体模型有化学质量平衡法（CMB）、主因子分析法（PFA）和目标变换因子法（TTFA）等。化学元素平衡法不考虑气溶胶粒子从排放源到受体传输过程中的化学变化和动力学过程，直接从在受体处采集样品所得到的化学组成来推测出它们的来源类型，并计算出不同类型来源所占的比例。在已确定气溶胶排放源类型的前提下，使用化学质量平衡法定量判定各源类的贡献，是比较简便和直观的。

化学质量平衡法（CMB）的数学模型如下[13]：

$$d_i = \sum_{k=1}^{n} X_{ik} g_k, \qquad (i = 1,2,\cdots,m) \qquad (1)$$

式中，d_i 为颗粒物样品中元素 i 的含量，X_{ik} 为排放源 K 的颗粒物中元素 i 的含量，g_k 为源强系数，n 为颗粒物排放源类数，m 为颗粒物中分析的元素数。若测出 d_i 和 X_{ik}，在 $m > n$ 的条件下，则可解出 g_k，从而得到 K 源对气溶胶的贡献率。

3　结果分析

3.1　PM2.5 浓度分析

市区各 PM2.5 采样点都有南京市环境监测站的同期 PM10 观测资料，具体各站点的 PM2.5 与

表 2 各测站 PM2.5 水溶性成分中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 分析值

Table 2 Concentrations of NO_3^- and SO_4^{2-} of water-soluble elements in PM2.5 at four sites $10^{-2}\,g \cdot g^{-1}$

测站 Sites	夏季		冬季	
	NO_3^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	SO_4^{2-}
草场门 Caochang Gate	0.91	11.11	4.65	13.97
迈皋桥 Maigao Bridge	1.01	13.32	4.03	15.50
瑞金路 Ruijin Road	0.92	13.39	6.21	15.83
山西路 Shanxi Road	1.37	8.53	3.13	16.30
平均 Average	1.05	11.58	4.50	15.40

表 3 夏、冬季各测站 PM2.5 与 PM10 值

Table 3 Mass concentrations of PM2.5 and PM10 in summer and winter at four sites

季节 Season	测站 Sites	PM2.5 均值 PM2.5 average/$\mu g \cdot m^{-3}$	PM10 均值 PM10 average/$\mu g \cdot m^{-3}$	(PM2.5/PM10)/ %
夏季 Summer	草场门 Caochang Gate	65.6	109.4	60.0
	山西路 Shanxi Road	72.9	125.6	58.0
	瑞金路 Ruijin Road	71.7	113.2	63.3
	迈皋桥 Maigao Bridge	66.2	119.7	55.3
	平 均 Average	69.1	117.0	59.2
冬季 Winter	草场门 Caochang Gate	153.9	186.4	82.6
	山西路 Shanxi Road	126.9	194.7	65.2
	瑞金路 Ruijin Road	118.5	229.9	51.5
	迈皋桥 Maigao Bridge	158.8	212.3	74.8
	平 均 Average	139.5	205.8	68.5

PM10 均值（PM2.5、PM10 均为 5 天平均值）见表 3。

计算结果表明：南京市 PM2.5/PM10 值的变化范围在 51.5%～82.6%之间，且冬季平均值比夏季平均值高 9.3%，全年平均值为 63.9%。

南京市 PM2.5 的夏、冬平均值分别为 69.1、139.5 $\mu g \cdot m^{-3}$，参考美国 PM2.5 日均值浓度的环境标准（65 $\mu g \cdot m^{-3}$），PM2.5 日均值浓度在夏、冬季均有超标，尤其在冬季，超标 2 倍以上。冬季 PM2.5 浓度远远高于夏季，二者之比为 2.02。这可能是以下一些原因造成的：一是冬季土壤较为干燥，地表植被覆盖减少，地面扬尘等容易进入空气当中；二是冬季混合层相对较低，地面污染物不易扩散。

从表 3 还可以看出，同一季节各站点的 PM2.5 浓度没有非常明显的差异，即使是居民区内的瑞金路观测点 PM2.5 的浓度也相当高，表明南京市 PM2.5 并不是主要由测站附近的局地源产生的，而是由市区内各类源排放、输送等因子共同作用的结果，是一个城市地区整体的混合和输送的过程。

3.2 富集因子分析

利用富集因子分析法可以区分气溶胶颗粒物的人为源和天然源。表 4 为计算出的南京市 PM2.5 中各元素相对于地表土壤元素的富集因子（土壤数据取的是此次采样的地表土壤的 PM2.5 元素分析值，参比元素为 Al）。

根据富集因子的值可将表中 13 种元素大体上分为 3 类：一是非富集成分（EF＜2），包括 Mg、Si、Ti、Fe 等，主要来源于地壳。二是富集成分（EF＞10）S、As、Zn、Pb、Na 等，其中 S、As、Zn、Pb 等主要来源于人为污染源；Na 则主要来源于海洋。三是介于两者之间的成分（2＜EF＜10），如 P、Mn、K、Ca 等，说明它们除了来自地壳外，还受到人为污染源的影响。

值得注意的是，与北京、上海等地相比[14～16]，此处计算得到的 Pb 的富集因子偏小，而气溶胶 PM2.5 样品中 Pb 的元素分析值与上述地区是相近的，说明在南京市的地表土壤中 Pb 存在较大的富集。如果参考江苏省的土壤元素背景

值[17]，可以计算得到南京市地表土壤中 Pb 的 EF 均值为 7.84，而气溶胶 PM2.5 中 Pb 的 EF 值变化范围为 67.92～320.52，均值为 181.87。

另外，Na 的富集因子与上海在同一个量级上[15]，说明南京也明显受到了海洋的影响，而 Na 的富集因子冬季比夏季低，估计可能受季节盛行风向的影响。As 的富集因子冬、夏季节差异明显，原因尚不清楚。

3.3　气溶胶 PM2.5 来源解析

采用化学质量平衡法进行来源解析，需要确定标识元素，即表征排放源固有特征并且在迁移过程中变化不大的元素。本文选取扬尘和土壤尘中的 Si、建筑尘中的 Ca、煤烟尘中的 Al、冶炼尘中的 Fe、硫酸盐中的 S 和汽车尘中的 Pb 作为标识元素。

南京市 PM2.5 各排放源元素分析值见表 5，各测点 PM2.5 的元素分析值（5 天平均）见表 6。

将表 5 和表 6 的 PM2.5 源样和样品的元素分析值代入（1）式计算，实际上就是建立一组矩阵作多元回归分析，求出各源对 PM2.5 的源强系数（g_k）。计算结果表明，相关系数都在 0.95 以上。各测点夏、冬季来源解析的结果见表 7。

从表 7 中可以看出，南京市的 6 类主要污染源对PM2.5的总贡献率在90.39％～91.97％

表 4　南京市 PM2.5 富集因子（EF）分析

Table 4　Analysis of the enrichment elements (EF) of PM2.5 in Nanjing

元素　Elements	夏季平均　Summer average	冬季平均　Winter average	全年平均　Yearly average
S	2101.40	1913.60	2007.50
As	2077.30	260.40	1168.90
Zn	225.07	290.15	257.61
Pb	20.75	27.63	24.19
Na	20.02	14.25	17.14
P	13.00	5.51	9.26
Mn	9.69	5.63	7.66
K	6.89	5.00	5.95
Ca	2.38	1.78	2.08
Mg	1.62	1.85	1.74
Si	1.09	1.04	1.07
Ti	0.86	1.00	0.93
Fe	0.97	0.84	0.91

表 5　南京市 PM2.5 排放源元素分析

Table 5　Source profiles of PM2.5 in Nanjing　　$\mu g \cdot mg^{-1}$

元素 Elements	扬尘 Fugitive dust	建筑尘 Construction dust	煤烟尘 Coal combustion	冶炼尘 Steel industry dust	硫酸盐 Sulfate	汽车 Motor vehicle exhaust	土壤尘* Soil dust
As	0.015	0.33	0.13	0.24	0.0	0.01	0.0008
Fe	6.68	6.52	11.92	76.38	0.0	0.01	5.6100
Pb	0.23	0.02	0.06	2.90	0.0	0.13	0.0250
Zn	0.13	0.00	0.62	0.39	0.0	0.45	0.0011
S	10.62	1.29	0.72	18.72	333.0	4.81	0.0280
Al	8.03	6.45	22.95	7.72	0.0	0.06	8.2700
Ca	16.40	92.82	2.52	12.85	0.0	0.36	5.5800
K	2.27	2.63	3.85	3.35	0.0	0.07	2.5900
Mg	1.21	1.14	0.46	1.03	0.0	0.00	0.8900
Na	0.55	0.47	0.54	0.38	0.0	0.00	0.3100
P	0.18	0.16	0.17	0.18	0.0	0.34	0.4700
Si	17.90	17.96	30.31	9.22	0.0	0.36	21.5300
Mn	0.19	0.28	0.11	1.89	0.0	0.00	0.1500
Ti	0.60	0.59	2.53	1.38	0.0	0.01	0.6200

* 土壤尘用来解析扬尘

* Soil dust is used to analyse fugitive dust

表 6 南京市各测站 PM2.5 样品元素分析

Table 6 PM2.5 element mass concentration at four sites in Nanjing $\mu g \cdot m^{-3}$

元素 Elements	夏季 Summer				冬季 Winter			
	草场门 Caochang Gate	迈皋桥 Maigao Bridge	瑞金路 Ruijin Road	山西路 Shanxi Road	草场门 Caochang Gate	迈皋桥 Maigao Bridge	瑞金路 Ruijin Road	山西路 Shanxi Road
As	0.26	0.00	0.04	0.20	0.03	0.07	0.00	0.00
Fe	0.63	0.89	0.56	0.50	1.15	1.12	0.79	0.81
Pb	0.04	0.13	0.05	0.04	0.21	0.25	0.11	0.04
Zn	0.02	0.06	0.02	0.00	0.12	0.06	0.03	0.00
S	6.73	7.34	7.60	5.64	14.23	10.34	10.23	8.21
Al	0.88	1.28	0.99	0.75	1.70	2.14	1.75	1.29
Ca	1.26	1.88	1.91	1.19	1.83	2.33	2.66	1.44
K	2.04	2.13	2.35	1.71	3.54	2.36	2.96	1.78
Mg	0.14	0.26	0.16	0.13	0.37	0.40	0.37	0.23
Na	0.75	0.81	0.75	0.57	1.08	0.92	0.90	0.72
P	0.76	0.78	0.41	0.80	0.65	0.17	0.46	0.68
Si	2.43	3.72	2.81	2.09	4.74	5.21	5.05	3.51
Mn	0.21	0.32	0.12	0.07	0.15	0.24	0.12	0.18
Ti	0.06	0.08	0.06	0.05	0.14	0.12	0.12	0.12

表 7 南京市 6 类源对 PM2.5 的贡献率

Table 7 Contribution of six sources to PM2.5 in Nanjing %

源样 Sources	夏季 Summer				冬季 Winter			
	草场门 Caochang Gate	迈皋桥 Maigao Bridge	瑞金路 Ruijin Road	山西路 Shanxi Road	草场门 Caochang Gate	迈皋桥 Maigao Bridge	瑞金路 Ruijin Road	山西路 Shanxi Road
扬尘 Fugitive dust	32.33	34.69	38.30	47.02	36.21	36.40	35.22	38.14
建筑尘 Construction dust	8.48	7.00	9.23	5.64	7.08	9.04	9.91	7.24
煤烟尘 Coal combustion	31.81	34.56	27.25	20.51	33.14	34.84	31.70	28.91
冶炼尘 Steel industry dust	3.42	2.75	2.89	2.20	2.72	2.01	2.09	2.55
硫酸盐 Sulfate	12.17	9.71	10.77	11.08	8.84	7.35	9.64	9.43
汽车尘 Motor vehicle exhaust	3.05	2.01	2.04	3.93	3.38	2.34	2.80	4.31
合计 Total	91.26	90.71	90.48	90.39	91.37	91.97	91.36	90.58

之间。与其他测站相比，位于市中心商业区的山西路站的扬尘、汽车尘较高，而煤烟尘相对较低，与实际情况相符。

各源对 PM2.5 贡献率的夏、冬季平均值比较见图 2。由图可见，夏、冬两季各源的贡献率变化不大；冬季煤烟尘的贡献率只是略有上升，这是因为南京没有明显的采暖期和非采暖期的区别。夏季二次硫酸盐的贡献率高于冬季，这是因为夏季辐射强、温度高，SO_2 的光化学转化率比冬季高。

气溶胶 PM2.5 中的硫酸盐从来源上可以分为一次和二次硫酸盐。一次硫酸盐是指从各类源中直接排放出来的，而二次硫酸盐是指通过光化学反应转化生成的硫酸盐。比较表 2 和图 2 可以发现，在夏季，二次硫酸盐是气溶胶 PM2.5 中的硫酸盐的主要来源；而在冬季，由于各类源的排放总量相对增加，以及光化学反应较弱，一次硫酸盐则成为重要来源。

各源对 PM2.5 贡献率的全年平均见图 3。南京市的6类主要污染源，即扬尘、建筑尘、煤烟

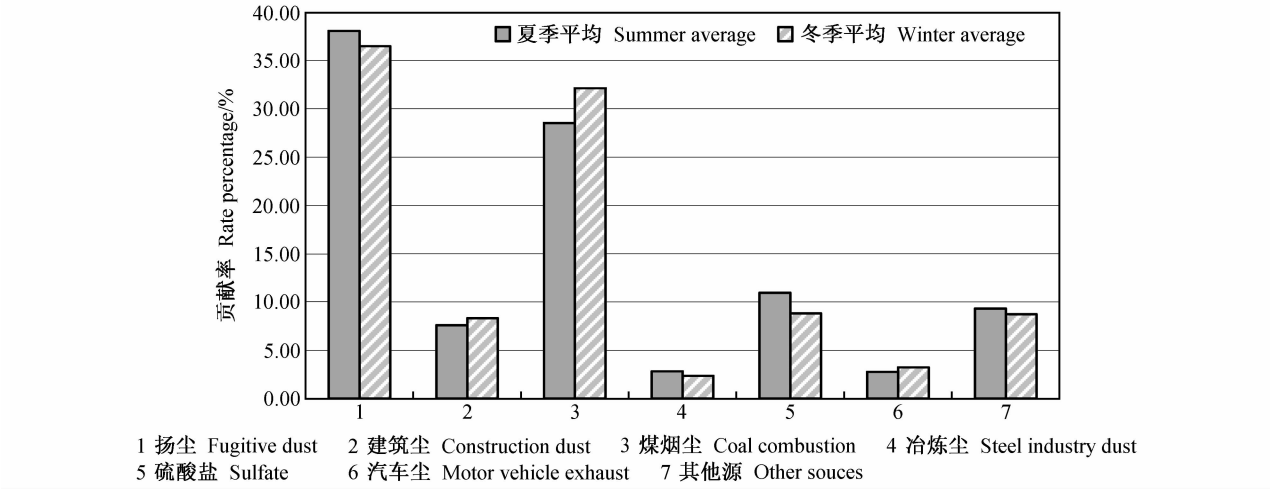

图 2　南京市 6 类源对 PM2.5 贡献率的夏、冬季平均值比较

Fig. 2　Comparison of average contribution of six sources between in summer and winter

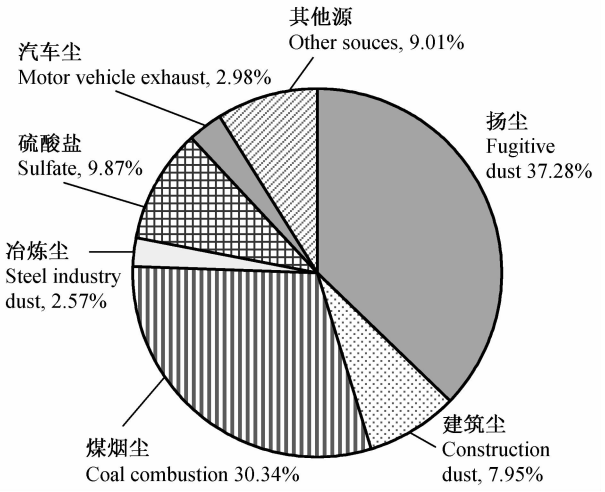

图 3　南京市 6 类源对 PM2.5 贡献率全年平均

Fig. 3　Yearly average contribution of six sources to PM2.5 in Nanjing

尘、冶炼尘、硫酸盐和汽车尘对 PM2.5 的总贡献率为 90.99%，说明它们是决定南京市气溶胶 PM2.5 水平的最主要贡献者。其中，扬尘的比例最大，达 37.28%；其次为煤烟尘，达 30.34%；接下来是表征二次污染源贡献的硫酸盐，为 9.87%；然后依次是建筑尘和汽车尘，分别为 7.95%、2.98%；冶炼尘最小，为 2.57%。

其他源的贡献总和约为 9.01%。我们通过进一步计算得到海洋源贡献率约为 1±0.3%；其余的 8.01%可能是由植物燃烧、二次有机物和其他未知源等的贡献。

3.4　南京市扬尘中 PM2.5 的来源解析

从来源解析的结果可以看到，扬尘对南京市 PM2.5 的贡献最大。而扬尘实际上是其他各类源排放的颗粒物沉降到地面所致，所以有必要分析扬尘的各种来源。本文将扬尘作为受体，同样用 CMB 方法研究它的来源，用土壤尘、建筑尘、煤烟尘、冶炼尘、硫酸盐和汽车尘等 6 个源对其进行来源解析。

其具体计算方法是：把扬尘的化学元素分析值代入（1）式中的 d_i，（1）式中的 X_{ik} 则用表 5 中的土壤尘代替扬尘，这样就可以得到 6 类主要源对扬尘的贡献，计算结果见表 8。

从表 8 中可以看出：对南京市扬尘中 PM2.5 贡献率最大的是土壤尘，达 59.56%；其次为建筑尘，为 21.05%；第三为煤烟尘，为 7.25%；然后依次为汽车尘、硫酸盐、冶炼尘，分别为 2.83%、1.80%、0.8%。

污染源对大气气溶胶 PM2.5 的贡献包括两方面，一是对 PM2.5 的直接贡献；二是各源进入地面扬尘中，通过地面扬尘造成的二次贡献。利用图 3 和表 8 的结果，可以计算得到土壤尘等 6 类独立源对南京市 PM2.5 的最终贡献率，结果见表 9。这与用土壤尘代替扬尘对各测站的 PM2.5 直接进行来源解析的结果相符。

表 9 中的结果与南京市 TSP 的来源解析结果（建筑尘 30%～45%，煤烟尘 20%～37%，土壤尘 15%～22%，冶炼尘 1%～2.4%）[11] 相比，建

表 8 南京市各污染源对扬尘中 PM2.5 的贡献率

Table 8 Contribution of 6 sources to PM2.5 of fugitive dust in Nanjing %

源 样 Sources	夏季平均 Summer average	冬季平均 Winter average	全年平均 Yearly average
土壤尘 Soil dust	60.74	58.37	59.56
建筑尘 Construction dust	20.86	21.24	21.05
煤烟尘 Coal combustion	5.37	9.13	7.25
冶炼尘 Steel industry dust	0.49	1.11	0.80
硫酸盐 Sulfate	1.40	2.19	1.80
汽车尘 Motor vehicle exhaust	3.64	2.01	2.83
合 计 Total	92.51	94.06	93.29

表 9 通过扬尘解析后得到的各独立源对 PM2.5 的最终贡献率

Table 9 Final contribution of independence sources to PM2.5 %

源 样 Sources	对 PM2.5 的直接贡献 Direct contribution to PM2.5	通过扬尘对 PM2.5 的贡献 Contribution to PM2.5 through fugitive dust	对 PM2.5 的最终贡献率 Total contribution to PM2.5
土壤尘 Soil dust	—	22.20	22.20
建筑尘 Construction dust	7.95	7.85	15.80
煤烟尘 Coal combustion	30.34	2.70	33.04
冶炼尘 Steel industry dust	2.57	0.30	2.87
硫酸盐 Sulfate	9.87	0.67	10.54
汽车尘 Motor vehicle exhaust	2.98	1.05	4.03
合计 Total	—	—	88.48

筑尘在南京市 PM2.5 中的比例有明显下降，煤烟尘和土壤尘成为南京市 PM2.5 的主要来源。SO_2 通过光化学过程形成的二次气溶胶硫酸盐的贡献率达 10.54%，对 PM2.5 有着不可忽略的贡献。

独立源中煤烟尘的最终贡献率最大，为 33.04%。若考虑到煤烟尘同时也是 SO_2 的主要来源，则煤烟尘对南京市 PM2.5 的贡献就更大。这说明南京市还是一个以煤烟型污染为主的城市，同时说明南京市煤烟尘是进行 PM2.5 治理的首要目标。

近年来南京市空气污染指数（API）的最主要贡献者为 PM10（SO_2、NO_x 均达国家二级标准），说明大气颗粒物已经成为南京市危害最大的污染物之一，而 PM10 的主要质量又集中在 PM2.5 上，因此加强 PM2.5 的防治十分重要。来源解析的结果说明，要进行南京市气溶胶 PM2.5 的治理，一是必须重视对煤烟尘、土壤尘和建筑尘的治理；二是要重视二次污染所造成的危害，加强对工业废气的治理。

4 结论

通过对南京市气溶胶 PM2.5 进行的物理化学特性分析，富集因子分析和 PM2.5 的来源解析，以及对扬尘的二次解析，得到了以下主要结论：

（1）南京市 PM2.5 的夏、冬季平均值分别为 69.1、139.5 $\mu g \cdot m^{-3}$，PM2.5/PM10 值的变化范围在 51.5%～82.6%之间，且冬季平均值比夏季平均值高 9.3%，全年平均值为 63.9%。

（2）南京市气溶胶 PM2.5 中的富集元素 S、As、Zn、Pb 等，主要来源于人为污染源；富集成分 Na，主要来源于海洋。

（3）南京市的 6 类主要污染源，即扬尘、建筑尘、煤烟尘、冶炼尘、硫酸盐和汽车尘对 PM2.5 的总贡献率为 90.99%，说明它们是南京市气溶胶 PM2.5 的最主要贡献者。其中，扬尘的比例最大，达 37.28%；其余依次为煤烟尘 30.34%、硫酸盐 9.87%、建筑尘 7.95%、汽车尘 2.98%、冶炼尘 2.57%。此外，海洋源的贡献率约为 1%，其余的 8.01%可能是由植物燃烧、二次有机物和其他未知源等的贡献。夏、冬两季各源的贡献率变化不大，冬季煤烟尘的贡献率只是略有上升。夏季硫酸盐的贡献率高于冬季。

（4）对南京市扬尘中 PM2.5 贡献率最大的是土壤尘，达 59.56%；其次为建筑尘 21.05%、煤烟尘 7.25%、汽车尘 2.83%、硫酸盐 1.80%、冶

炼尘 0.8%。

(5) 通过对扬尘的解析，可以进一步得到 6 类独立源的最终贡献率分别为：煤烟尘 33.04%、土壤尘 22.20%、建筑尘 15.8%、硫酸盐 10.54%、汽车尘 4.03%、冶炼尘 2.87%。建筑尘在南京市 PM2.5 中的比例有明显下降，煤烟尘和土壤尘成为南京市 PM2.5 的主要来源。SO_2 通过光化学过程形成的二次气溶胶硫酸盐的贡献率达 10.54%，对 PM2.5 有着不可忽略的贡献。

(6) 南京市还是一个以煤烟型污染为主的城市，煤烟尘是进行南京市 PM2.5 治理的首要目标。要进行南京市气溶胶 PM2.5 的治理，一是必须重视对煤烟尘、土壤尘和建筑尘的治理；二是要重视二次污染所造成的危害，加强对工业废气的治理。

参考文献 (References)

[1] 赵德山，王明星．煤烟型城市污染大气气溶胶．北京：中国环境科学出版社，1991
Zhao Deshan, Wang Mingxing. *Atmospheric Aerosol of Coal-Smoke Air Pollution in Urban Environment* (in Chinese). Beijing: China Environmental Science Press, 1991

[2] Chan Y C, Simpson R W, Mctainsh G H, et al. Source apportionment of visibility degradation problems in Brisban (Australia) using multiple linear regression techniques. *Atmos. Environ.*, 1999, **33** (19): 3237～3250

[3] Donald F Gatz. Relative contributions of different sources of urban aerosols: Application of a new estimation method to multiple sites in Chicago. *Atmos. Environ.*, 1975, **9** (1): 1～18

[4] Kowalczyk G S, Choquette C E, Gordon G E. Chemical element balances and identification of air pollution sources in Washington, DC. *Atmos. Environ.*, 1978, **12**: 1143～1153

[5] 戴树桂，朱坦，曾幼生，等．天津市区采暖期飘尘来源的解析．中国环境科学，1986，**6** (4)：24～30
Dai Shugui, Zhu Tan, Zeng Yousheng, et al. Source apportionment for Tianjing urban aerosol in heating season. *China Environment Sciences* (in Chinese), 1986, **6** (4): 24～30

[6] 杨绍晋，杨亦男，钱琴芳，等．京津地区大气颗粒物的表征及来源鉴别．环境科学学报，1987，**7** (4)：411～423
Yang Shaojin, Yang Yinan, Qian Qinfang, et al. Characteristics of airborne particulates and identification of their sources in Beijing-Tianjing area. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 1987, **7** (4): 411～423

[7] 张远航，唐孝炎，毕木天，等．兰州西固地区气溶胶污染源的鉴别．环境科学学报，1987，**7** (3)：269～277
Zhang Yuanhang, Tang Xiaoyan, Bi Mutian, et al. Identification of pollutant sources of aerosol in Xigu area, Lanzhou. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 1987, **7** (3): 269～277

[8] 陈宗良，葛苏，张晶，等．北京大气气溶胶小颗粒的测量与解析．环境科学研究，1994，**7** (3)：1～9
Chen Zongliang, Ge Su, Zhang Jing, et al. Measurement and analysis for atmospheric aerosol particulates in Beijing. *Research of Environment Sciences* (in Chinese), 1994, **7** (3): 1～9

[9] 黄世鸿，沈恒华，李如祥，等．我国若干地区气溶胶颗粒来源解析．南京大学学报（地学专辑），1996，**32**：3～7
Huang Shihong, Shen Henghua, Li Ruxiang, et al. Source apportionment for Chinese aerosol. *Journal of Nanjing University* (Natural sciences edition) (in Chinese), 1996, **32**: 3～7

[10] 谢骅，黄世鸿，李联盟，等．陕西气溶胶总悬浮颗粒物来源解析．气象，1998，**24** (7)：25～28
Xie Hua, Huang Shihong, Li Lianmeng, et al. Aerosol source apportionment over Xi′an and Zaoyuan area. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1998, **24** (7): 25～28

[11] 刘文菁，黄世鸿，刘小红，等．南京市总悬浮颗粒物 (TSP) 及地面积尘来源解析．气象科学，2001，**21** (1)：87～94
Liu Wenjing, Huang Shihong, Liu Xiaohong, et al. Source apportionment for total suspended particles and accumulated dust of Nanjing. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **21** (1): 87～94

[12] U. S. EPA, "Receptor model technical series, Volume Ⅲ (1989 Revision). CMB 7.0 user′s manual". Report No. EPA-450/4-90-004, U. S. EPA, Research Triangle Park, NC, 1990

[13] 王明星．大气化学．北京：气象出版社，1991. 170～191
Wang Mingxing. *Atmospheric Chemistry* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 170～191

[14] 张仁健，王明星，张文，等．北京冬春季气溶胶化学成分及其谱分布研究．气候与环境研究，2000，**5** (1)：6～12
Zhang Renjian, Wang Mingxing, Zhang Wen, et al. Research on elemental concentrations and distributions of aerosols in winter/spring in Beijing. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (1): 6～12

[15] 周斌斌，徐家骝，胡广宇．上海市大气颗粒物中金属元素特征．上海环境科学，1994，**13** (9)：21～26
Zhou Binbin, Xu Jialiu, Hu Guangyu. Characteristics of mental elements in the atmospheric particulate of Shanghai. *Shanghai Environmental Sciences* (in Chinese), 1994, **13**

(9)：21～26

[16] 滕恩江，胡伟，吴国平，等．中国四城市中粗细颗粒物元素组成特征．中国环境科学，1999，**19**（3）：238～242
Teng Enjiang，Hu Wei，Wu Guoping，et al. The composing characteristics of elements in coarse and fine particle in air of the four cities in China. *China Environmental Science* (in Chinese)，1999，**19**（3）：238～242

[17] 中国环境监测总站．中国土壤元素背景值．北京：中国环境科学出版社，1990.366～369
China National Environmental Monitoring Center. *Soil Elements Background Values in China*（in Chinese）. Beijing：China Environmental Science Press，1990.366～369