

绝对主因子分析法解析龙岩市 大气中的可吸入颗粒物来源

邱立民, 刘 淼, 王 菊, 张胜楠, 侯 洁, 房春生
(吉林大学 环境与资源学院, 长春 130012)

摘要: 采用福建省龙岩市 2009~2010 年对龙岩环境监测站、龙岩师专、闽西大学和龙岩学院 4 个大气采样点中 PM_{10} 开展的 3 期采样数据, 利用主因子分析法 (principal component analysis, PCA) 和绝对主因子分析法 (absolutely principal component analysis, APCA) 对 PM_{10} 的来源进行研究. 结果表明: 龙岩市大气主要污染源是二次扬尘/燃煤尘、汽车尾气/道路尘、土壤风沙尘和垃圾焚烧尘; 龙岩监测站采样点的主要污染源为汽车尾气/二次扬尘、土壤风沙尘和道路尘; 龙岩师专的主要污染源为土壤风沙尘、燃煤尘和汽车尾气/二次扬尘; 闽西大学的主要污染源为二次扬尘/燃煤尘、汽车尾气和垃圾焚烧尘; 龙岩学院采样点的主要污染源为二次扬尘、汽车尾气/土壤风沙尘和燃煤尘.

关键词: PM_{10} ; 源解析; 主因子分析; 绝对主因子分析

中图分类号: X823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5489(2012)02-0371-06

Sources Apportionment of Atmospheric Particles PM_{10} in Longyan with Absolute Principal Component Analysis

QIU Li-min, LIU Miao, WANG Ju, ZHANG Sheng-nan, HOU Jie, FANG Chun-sheng
(College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: Principal component analysis (PCA) and absolutely principal component analysis (APCA) were used to qualitatively analyze the data of PM_{10} samples from three periods of 2009 to 2010 at Longyan environmental monitoring station, Longyan teachers college, Minxi university and Longyan university for the purpose to obtain the different source apportionments and contributions of PM_{10} . The results show that on the city's perspective, the main sources of PM_{10} in Longyan City are the second dust/coal dust, vehicle exhaust/road dust, soil dust, and waste incineration. In the view of each sampling point, the main sources of PM_{10} at Longyan environmental monitoring station are vehicle exhaust/secondary dust, soil dust and road dust, the major sources of PM_{10} at Longyan teachers college are soil dust, coal dust and vehicle exhaust/secondary dust, the main sources of PM_{10} at Minxi university are secondary dust/coal dust, vehicle exhaust and waste incineration, the main source of PM_{10} at Longyan university are secondary dust, vehicle exhaust/soil dust and coal dust.

Key words: PM_{10} ; source apportionment; principal component analysis; absolutely principal component analysis

收稿日期: 2011-11-22.

作者简介: 邱立民(1971—), 男, 汉族, 博士研究生, 从事环境规划与评价的研究, E-mail: qiulm@jlu.edu.cn. 通讯作者: 房春生(1971—), 男, 汉族, 博士, 教授, 从事环境规划与评价的研究, E-mail: fangcs@jlu.edu.cn.

基金项目: 教育部产学研用合作创新项目(批准号: OSR 01-06).

可吸入颗粒物(PM_{10})是大气中的主要污染物之一^[1,2],目前对 PM_{10} 的研究已取得了很多成果^[3-5]. PM_{10} 是导致福建省龙岩市环境空气质量下降的主要污染物,因此科学准确地了解龙岩市空气中 PM_{10} 的主要污染来源,才能有针对性地制定污染控制策略,从而为改善龙岩市大气环境质量提供依据.

利用改进后的主因子分析法(principal component analysis, PCA),即绝对主因子分析法(absolutely principal component analysis, APCA)对可吸入颗粒物的来源进行定性和定量解析,需要借助线性代数的相关知识,对主因子载荷矩阵及主因子得分系数矩阵进行适当处理,即可得到各主要污染源对颗粒物及各化学组分的贡献值和分担率数据^[6-7].本文利用2009~2010年对龙岩市大气中 PM_{10} 开展的3期采样数据,采用绝对主因子分析法识别龙岩市大气 PM_{10} 的主要来源.

1 数据和方法

1.1 PM_{10} 样品的采集

本文样品于2009年9月~2010年3月在龙岩环境监测站、龙岩学院、闽西大学和龙岩师专4个大气自动站分3期进行采集,分别为夏季、冬季和春季.采用TH-1000型中流量采样器(武汉天虹智能仪表厂),使用有机滤膜,采样流量为100 L/min,连续采集24 h.第一次采集样品16个,第二次采集样品20个,第三次采集样品12个,共采集样品48个.将源解析采样结果与大气自动站同期数据进行相关分析,结果显示源解析采样数据具有典型性和代表性.

1.2 PM_{10} 样品主要金属元素分析

利用电感耦合等离子体/质谱分析法(ICP-MS)检测大气颗粒物中受体滤膜样品的主要金属元素组分.采用美国Milestone公司的ETHOD系列微波消解仪对滤膜进行微波消解,消解后的样品利用ICP/MS分析测试.元素成分谱包括Na, Mg, Al, K, Ca, Fe, Be, Cu, Zn, Ni, Se, Mn, Pb, Co, Ti, V, Cr, As, Cd, Hg, Mo, Ba, Sb共23种元素.

1.3 主因子分析法

主因子分析法基于与污染源有关的各变量之间均存在某种相关性,在尽量不损失原变量指标包含信息的前提下,采用少数几个综合变量(主因子)近似代替原来多个变量的方法,并计算各因子的因子载荷,最后结合对污染源的认识判断源的类型^[8].

通过上述步骤识别主因子后,引入绝对主因子得分APCS(absolute principal component scores)估算各因子的贡献率^[9].样品标准化: $Z_{ik} = (C_{ik} - C_i)/S_i$,其中: Z_{ik} 为标准化实测的污染物元素的质量比(i 种污染物, k 个样品); C_{ik} 为 k 个样品 i 项目质量比的实测值; C_i 为 i 项目的平均值; S_i 是所有样品中 i 项目的标准方差.

由于上述主因子得分是经过标准化的,因此,引入一个有项目质量比均为零的样品,其标准化结果为 $(Z_0)_i = (0 - C_i)/S_i = -C_i/S_i$.各实测样品的主因子得分减去上述引入的质量比为零样品的因子得分即为绝对主因子得分.

将可吸入颗粒物作为因变量,绝对因子得分作为自变量进行回归分析,得出每个样品中各主因子的相对贡献率;以样品中各元素的质量比作为因变量,每个样品中各主因子的相对贡献率作为自变量,最终可求出各主因子中各种元素的质量比: $C_i = (b_0)_i + \sum APCS_p \times b_{pi}$ ($p = 1, 2, \dots, n$),其中: $(b_0)_i$ 为常数项; b_{pi} 是回归系数; $APCS_p$ 是样品的绝对主因子得分, $APCS_p \times b_{pi}$ 表示污染源 p 对污染物 C_i 的贡献.所有样品的 $APCS_p \times b_{pi}$ 均值即为污染源 p 的平均贡献率.主因子中各种元素的质量比计算方式依此类推.本文主因子定性分析部分在统计分析软件SPSS上进行,定量计算结果通过软件SAS和EXCEL电子表格完成.

2 结果与讨论

2.1 全市采样 PM_{10} 主因子分析

先将全市4个采样点的采样数据进行初步分析处理后,再将分析结果中各种元素的质量比作为主

因子分析的变量代入 SPSS 软件进行主因子分析计算. 根据前 p 个因子累计方差贡献率 $\geq 85\% \sim 95\%$ 的原则确定主因子个数. 当 $p = 3$ 时, 方差贡献率达到 82.686%; 当 $p = 4$ 时, 方差贡献率达到 94.059%. 经主因子分析得到的方差极大正交旋转因子载荷矩阵列于表 1.

表 1 龙岩市大气中 PM_{10} 样品方差极大正交旋转因子载荷矩阵Table 1 Factor transformation matrix after varimax rotation for PM_{10} of Longyan City

变量	因子负荷				共同度
	1	2	3	4	
Na	0.253	0.750	0.493	0.267	0.940
Mg	0.575	0.303	0.699	0.174	0.941
Al	0.318	0.388	0.837	0.009	0.952
K	0.329	0.357	0.013	0.843	0.947
Ca	0.804	0.298	0.320	0.386	0.987
Fe	0.522	0.706	0.409	0.159	0.963
Be	0.791	0.353	0.298	0.314	0.937
Cu	0.422	0.759	0.316	0.355	0.980
Zn	0.354	0.777	0.240	0.316	0.887
Ni	0.308	0.759	0.465	0.311	0.985
Se	0.866	0.360	0.169	0.194	0.946
Mn	0.563	0.412	0.388	0.447	0.837
Pb	0.581	0.650	0.221	0.398	0.968
Co	0.371	0.884	0.137	0.156	0.962
Ti	0.707	0.469	0.390	0.126	0.887
V	0.720	0.545	0.301	0.257	0.972
Cr	0.591	0.713	0.262	0.122	0.940
As	0.644	0.616	0.335	0.293	0.993
Cd	0.422	0.547	0.445	0.329	0.783
Hg	0.581	0.226	0.449	0.523	0.864
Mo	0.726	0.522	0.332	0.298	0.998
Ba	0.696	0.577	0.307	0.271	0.985
Sb	0.813	0.385	0.329	0.244	0.978
特征值	8.059	7.412	3.547	2.616	
方差贡献率/%	35.037	32.227	15.421	11.374	
累计贡献率/%	35.037	67.264	82.686	94.059	

第一因子中元素 Se, Sb, Ca, Be, Mo, V, Ti, Ba, As 的载荷较高, 载荷值分别为 0.866, 0.813, 0.804, 0.791, 0.726, 0.720, 0.707, 0.696 和 0.644, 其中元素 Se, Sb, Be, Mo, V, As 主要与燃煤尘排放有关, 而 Ca, Ti, Ba 对扬尘的影响较大. 因此, 因子 1 来源于二次扬尘/燃煤尘, 其贡献率为 35.037%.

第二因子中元素 Co, Zn, Cu, Ni, Na, Cr, Fe, Pb 的载荷较高, 载荷值分别为 0.884, 0.777, 0.759, 0.759, 0.750, 0.713, 0.706, 0.650, 其中 Co, Ni, Cr 和 Pb 是汽车尾气的标志元素, 而 Zn, Cu, Na 和 Fe 元素均属于地壳元素, 因此因子 2 可能来源于汽车尾气/道路尘, 其方差贡献率为 32.227%.

第三因子中元素 Al, Mg 载荷较高, 载荷值为 0.837 和 0.699, 这两种元素是土壤风沙尘的主要标志元素, 因此, 因子 3 来源于土壤风沙尘, 其贡献率为 15.421%.

第四因子中元素 K 载荷较高, 载荷值为 0.843, 其来源是垃圾焚烧尘, 贡献率为 11.374%.

2.2 各污染源对 PM_{10} 的分担率解析

2.2.1 绝对主因子定量源解析评估 在用因子分析法定性识别污染源类型的基础上, 通过绝对主因子分析法定量计算出各种污染源对 PM_{10} 的贡献值及分担率. 为验证该方法的准确性, 通过比较所选取变量的解析值和监测值之间的符合程度进行判断. 图 1 为龙岩市大气中 PM_{10} 绝对主因子法解析值与实际监测值之间的比较结果. 由图 1 可见, 各化学组分的解析值与监测值之比基本上接近于 1, 各种元素的相对误差基本在 $\pm 20\%$ 之内, 其中 Fe, Cu, Ni, Co, Cd 和 Hg 的解析值与监测值之间的相对误差较大,

尤其是 Cd, 可能是由于某些元素间具有较强的相关性或这些元素与主成分的相关性不强导致误差较大, 误差在可接受范围内. 总之, 该方法能较完全地解析龙岩市 PM_{10} 的主要来源.

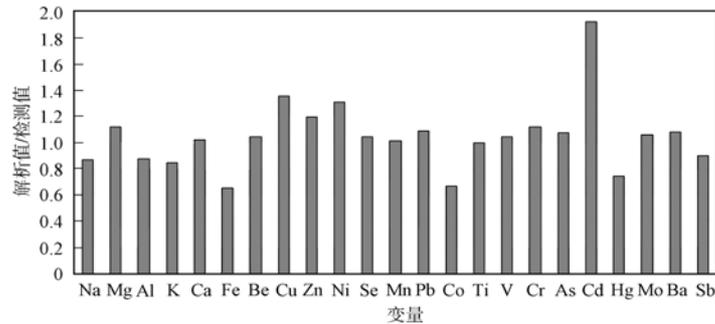


图1 各变量解析值与实际监测值之比

Fig. 1 Ratios of monitoring value and analytical value of variables

2.2.2 各污染源对 PM_{10} 的分担率及贡献值解析 龙岩市大气中 PM_{10} 实际监测值为 $95.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 绝对主因子法解析所有污染源的贡献值之和为 $87.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 可见绝对主因子法已经基本解析了龙岩市 PM_{10} 的各种来源, 即龙岩市大气颗粒物 PM_{10} 主要来源是二次扬尘/燃煤尘、土壤风沙尘、汽车尾气/道路尘和垃圾焚烧尘 4 类污染源.

图 2 为各污染源对 PM_{10} 的分担率. 由图 2 可见, 二次扬尘/燃煤尘是大气中 PM_{10} 的首要污染源, 对 PM_{10} 的分担率达 53%, 土壤风沙尘、汽车尾气/道路尘和垃圾焚烧尘是对 PM_{10} 贡献较大的另外 3 种重要污染源, 分担率分别达 18%, 13% 和 6%. 该结果与龙岩市本身的地理环境和人为因素有关: 尽管龙岩市地处南方, 每年的生活燃煤量不大, 但当地很多民用燃料采用燃煤, 燃烧后炉渣弃于附近, 属于低矮点源排放, 难以控制和治理, 所以有很大一部分燃煤尘排放到大气环境中或沉降后进入扬尘并以扬尘的形式进入到环境空气中; 此外, 龙岩市近几年经济发展迅速, 机动车数量不断增加, 道路建设、建筑施工项目遍布城市各地, 由车辆和施工引起的道路扬尘和建筑扬尘量也很大.

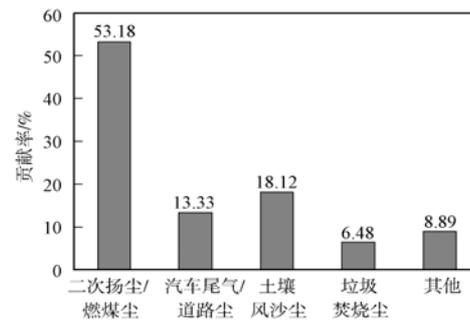


图2 龙岩市 PM_{10} 样品污染源解析结果

Fig. 2 Results of sources apportionment of PM_{10} in Longyan City

2.2.3 各污染源对 PM_{10} 中化学元素的分担率及贡献值解析结果 在识别影响大气 PM_{10} 主要污染源的基础上, 利用绝对主因子分析法不仅可以定量计算出各污染源对 PM_{10} 的综合贡献值和分担率, 还可解析出各污染源对 PM_{10} 中各种化学组分分担率和贡献值, 结果列于表 2. 由表 2 可见 PM_{10} 中各化学组分的来源, 这些数据再次验证了上述对污染源类型的判断.

2.3 各污染源对龙岩市 4 个采样点 PM_{10} 分担率的解析结果

利用绝对主因子解析得到了龙岩市 4 个采样点 PM_{10} 污染源的贡献率, 结果列于表 3. 由表 3 可见, 龙岩环境监测站采样点主要污染源为汽车尾气/二次扬尘、土壤风沙尘和道路尘, 贡献率都在 10% 以上, 其中汽车尾气/二次扬尘贡献率最高. 因为该监测站位于城市中心, 人口密度较大, 活动频繁, 经过的摩托车和汽车较多, 也易产生二次扬尘; 土壤风沙尘和道路尘则是由于当地气候比较干燥, 道路上积灰较多, 加上过往车辆较多所致.

龙岩师专采样点主要的污染源有土壤风沙尘、燃煤尘和汽车尾气/二次扬尘, 其中贡献率最大的是土壤风沙尘, 这是由于龙岩师专采样点位于城市北端, 靠近城市边界, 附近多山丘和矿山, 且气候较干燥风速较大所致; 燃煤尘是由于龙岩师专附近有几个燃煤工厂, 且龙岩市处于盆地中, 由于山的阻隔, 使燃煤尘不宜扩散, 而在附近沉积, 所以燃煤尘的贡献率也较大.

表2 各污染源对PM₁₀中化学组分的贡献值和分担率解析结果Table 2 Contribution values and share rates of sources to chemical components of PM₁₀

变量	二次扬尘/燃煤尘		汽车尾气/道路尘		土壤风沙尘		垃圾焚烧尘		解析值 总计/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	监测 平均值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
	贡献值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	分担 率/%								
Na	0.086 1	29.78	0.074 2	25.67	0.067 9	23.47	0.021 9	7.59	0.250 1	0.289 1
Mg	0.294 9	65.27	0.045 2	10.01	0.145 0	32.09	0.021 5	4.76	0.506 7	0.451 9
Al	1.292 6	36.04	0.458 9	12.80	1.377 1	38.40	0.008 9	0.25	3.137 5	3.586 7
K	0.381 6	43.19	0.120 5	13.64	0.006 2	0.70	0.236 3	26.75	0.744 7	0.883 6
Ca	3.726 1	73.44	0.400 8	7.90	0.599 5	11.82	0.432 3	8.52	5.158 8	5.073 9
Fe	1.308 0	36.76	0.514 2	14.45	0.414 1	11.64	0.096 0	2.70	2.332 3	3.557 8
Be	0.000 1	75.57	0	9.74	0	11.48	0	7.23	0.000 1	0.000 1
Cu	0.083 2	66.55	0.043 5	34.80	0.025 2	20.19	0.016 9	13.53	0.168 8	0.125 0
Zn	0.348 1	56.11	0.222 1	35.79	0.095 4	15.38	0.075 0	12.08	0.740 6	0.620 4
Ni	0.003 5	50.87	0.002 5	36.39	0.002 1	31.03	0.000 9	12.39	0.009 0	0.006 9
Se	0.001 2	82.88	0.000 1	10.01	0.000 1	6.54	0.000 1	4.47	0.001 4	0.001 4
Mn	0.284 4	60.17	0.060 4	12.78	0.079 3	16.78	0.054 5	11.52	0.478 6	0.472 6
Pb	0.486 5	66.03	0.158 1	21.46	0.074 8	10.15	0.080 5	10.92	0.799 9	0.736 8
Co	0.000 3	34.55	0.000 2	23.88	0	5.13	0	3.50	0.000 6	0.000 9
Ti	0.390 6	68.49	0.075 3	13.20	0.087 2	15.29	0.016 9	2.96	0.570 0	0.570 4
V	0.002 6	70.86	0.000 6	15.58	0.000 4	11.98	0.000 2	6.11	0.003 9	0.003 7
Cr	0.010 3	70.57	0.003 6	24.72	0.001 8	12.63	0.000 5	3.51	0.016 2	0.014 5
As	0.057 2	66.94	0.015 9	18.60	0.012 0	14.07	0.006 3	7.35	0.091 3	0.085 4
Cd	0	96.39	0	36.51	0	41.10	0	18.13	0.000 1	0
Hg	0	45.13	0	5.10	0	14.10	0	9.81	0	0
Mo	0.000 9	70.61	0.000 2	14.75	0.000 2	13.06	0.000 1	7.01	0.001 4	0.001 3
Ba	0.025 7	71.16	0.006 2	17.12	0.004 6	12.69	0.002 4	6.69	0.038 8	0.036 1
Sb	0.001 5	65.55	0.000 2	9.02	0.000 2	10.73	0.000 1	4.75	0.002 1	0.002 3

表3 龙岩市各采样点位主要污染源的贡献率

Table 3 Contribution rate of the main sources of each sampling spot in Longyan City

点位	污染源(贡献率/%)			
监测站	汽车尾气/二次扬尘 (35.64)	土壤风沙尘 (33.92)	道路尘 (16.95)	其他 (13.49)
龙岩师专	土壤风沙尘 (76.12)	燃煤尘 (15.18)	汽车尾气/二次扬尘其他 (5.66)	其他 (3.05)
闽西大学	二次扬尘/燃煤尘 (42.94)	汽车尾气 (24.97)	垃圾焚烧尘 (10.95)	其他 (21.14)
龙岩学院	二次扬尘 (46.88)	汽车尾气/土壤风沙尘 (46.55)	燃煤尘 (5.49)	其他 (1.08)

闽西大学采样点最大的污染源为二次扬尘/燃煤尘,其次为汽车尾气和垃圾焚烧尘,可见主要是人为污染源,这是因为由于闽西大学周围人为活动比较频繁,且随着经济发展和交通完善,汽车尾气带来的大气颗粒物污染也越来越严重.龙岩学院采样点主要污染源是二次扬尘、汽车尾气/土壤风沙尘和燃煤尘,表明此处的人为活动也较频繁,且龙岩学院靠近城市边界,周边区域开发较少,空地多,有少量的工业企业,货车较多,产生大量尾气,车辆产生污染较重.

2.4 龙岩市大气PM₁₀污染源解析

根据PCA/APCA的解析结果可知,龙岩市的主要污染源是二次扬尘/燃煤尘、汽车尾气/道路尘、土壤风沙尘和垃圾焚烧尘,对大气污染均有不同程度的贡献;龙岩监测站采样点主要污染源为汽车尾气/二次扬尘、土壤风沙尘和道路尘,龙岩师专采样点主要的污染源为土壤风沙尘、燃煤尘和汽车尾

气/二次扬尘, 闽西大学采样点的主要污染源为二次扬尘/燃煤尘、汽车尾气和垃圾焚烧尘, 龙岩学院采样点主要污染源是二次扬尘、汽车尾气/土壤风沙尘和燃煤尘. 可见, 除了扬尘和土壤风沙尘外, 机动车尾气尘对大气污染贡献较大.

3 结 论

(1) 主因子分析及绝对主因子分析的定量结果表明: 龙岩市大气颗粒物 PM_{10} 的4类主要来源是二次扬尘/燃煤尘、汽车尾气/道路尘、土壤风沙尘和垃圾焚烧尘, 贡献率分别为 53.18%, 13.33%, 18.12% 和 6.48%, 其余为不可识别源.

(2) 龙岩市大气可吸入颗粒物 PM_{10} 中污染来源的贡献率具有明显的空间变化特征. 比较各采样点结果可见: 龙岩市监测站和闽西大学位于龙岩市中心附近, 主要污染源为二次扬尘和汽车尾气, 是由于人为活动较频繁, 且机动车数量较多所致; 龙岩学院和龙岩师专位于城市边界附近, 主要污染源是土壤风沙尘.

(3) 实验表明, 主因子分析模型可以用来解析缺少源成分谱时 PM_{10} 的主要来源, 绝对主因子分析则进一步的解析各污染源的贡献值和贡献率. PCA/APCA 方法的优势在于可以在不了解污染源的数目和组成情况下分析污染来源, 确定污染来源的类型和数目, 解析污染源的贡献率和贡献值.

参 考 文 献

- [1] QIAO Yu-shuang, WANG Jing, WANG Jian-ying. Research Progress of the Inhalable Particular in the Urban Air [J]. Environmental Monitoring in China, 2011, 27(2): 22-25. (乔玉霜, 王静, 王建英. 城市大气可吸入颗粒物的研究进展 [J]. 中国环境监测, 2011, 27(2): 22-25.)
- [2] ZHENG Xue-feng, ZOU Chang-wu, YIN Hong-ling. A New Source Apportionment Method of Maxed Dust Source Based on Cluster Analysis and Factor Analysis [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2011, 39(6): 3515-3518. (郑雪峰, 邹长武, 印红玲. 基于聚类分析和因子分析的混合尘源解析新方法 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(6): 3515-3518.)
- [3] ZOU Ben-dong, XU Zi-you, HUA Lei, et al. Sources Apportionment of Atmospheric Particles PM_{10} in Beijing by Factor Analysis [J]. Environmental Monitoring in China, 2007, 23(2): 79-85. (邹本东, 徐子优, 华蕾, 等. 因子分析法解析北京市大气颗粒物 PM_{10} 的来源 [J]. 中国环境监测, 2007, 23(2): 79-85.)
- [4] RUAN Cheng-qing, GUO Yan-liang, QU Wen-jun, et al. Source Apportionment of Atmospheric Aerosol at Background Site Akdala, Xinjiang [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(8): 172-176. (阮成卿, 郭延良, 屈文军, 等. 新疆阿克达拉大气背景点气溶胶物质来源研究 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(8): 172-176.)
- [5] ZHANG Xue-min. Source Apportionment of Inhalable Particulates in Air of Xiamen City [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 30(11): 51-54. (张学敏. 厦门市大气可吸入颗粒物源解析的研究 [J]. 环境科学与技术, 2007, 30(11): 51-54.)
- [6] LIU Zhang-xian, WANG Guo-zhen, GUO Rui, et al. Characteristics and Source Analysis of Elements in Dustfall in Pingdingshan City [J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(4): 825-831. (刘章现, 王国贞, 郭瑞, 等. 河南省平顶山市大气降尘的化学特征及其来源解析 [J]. 环境化学, 2011, 30(4): 825-831.)
- [7] HAN Bin, BAI Zhi-peng, XIE Yi-yang, et al. Characterization of Elements and Source Apportionment in Atmospheric Particulate Matter in Tianjin Offshore Area in Summer [J]. Marine Environmental Science, 2010, 29(6): 829-833. (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.)
- [8] GUO Lin, HE Zong-jian, YIN Li. Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in $PM_{2.5}$ in Summer of Nanchang [J]. Environmental Pollution and Control, 2010, 32(11): 58-62. (郭琳, 何宗健, 尹丽. 南昌市夏季 $PM_{2.5}$ 中多环芳烃来源解析 [J]. 环境污染与防治, 2010, 32(11): 58-62.)
- [9] LI Yu-wu, LIU Xian-de, LI Bing, et al. Source Apportionment of Aerosol Lead in Beijing Using Absolute Principal Component Analysis [J]. Environmental Science, 2008, 29(12): 3310-3319. (李玉武, 刘咸德, 李冰, 等. 绝对主因子分析法解析北京大气颗粒物中铅来源 [J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3310-3319.)

(责任编辑: 单 凝)