

李金. 应用地质累积指数评价鞍山市秋季 PM_{2.5} 中元素的污染状况[J]. 环境工程技术学报, 2017, 7(1): 46-51.

LI J. Applying of geoaccumulation index to evaluate elements pollution in PM_{2.5} in Anshan during autumn [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2017, 7(1): 46-51.

应用地质累积指数评价鞍山市秋季 PM_{2.5} 中元素的污染状况

李金

鞍山市环境监测中心站, 辽宁 鞍山 114001

摘要 2014年秋季对鞍山市区6个监测点分别进行了PM_{2.5}样品采集,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)及电感耦合等离子原子发射光谱法(ICP-OES)分析PM_{2.5}中Na、K、Cd、V、Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Pb、Al、Mg、Ca、Fe、Ba、As等16种元素的浓度,通过地质累积指数、相关分析方法分析了鞍山市秋季PM_{2.5}中16种元素的污染状况。结果表明:鞍山市秋季PM_{2.5}中Pb、Cd、C、As 4种元素在各监测点间最大值与最小值之比大于2,差别较大,其中As元素在监测点间最大值与最小值之比达12.19;Na、K、V、Mn、Ni、Cu、Zn、Al、Mg、Ca、Fe、Ba 12种元素最大值与最小值之比小于2,差别较小。地质累积指数结果显示: Cd、Zn、Pb、As元素处于严重污染,其污染主要来源于钢铁冶炼、煤质燃烧和汽车尾气及轮胎磨损。相关性分析结果显示: Cd与Zn、Pb、Cu来自同一污染源。

关键词 PM_{2.5}; 地质累积指数; 鞍山市; 元素分布

中图分类号: X701 文章编号: 1674-991X(2017)01-0046-06 doi: 10.3969/j.issn.1674-991X.2017.01.007

Applying of geoaccumulation index to evaluate elements pollution in PM_{2.5} in Anshan during autumn

LI Jin

Anshan Environmental Monitoring Center, Anshan 114004, China

Abstract The PM_{2.5} samples were collected at 6 monitoring sites in Anshan during autumn in 2014. The concentrations of 16 elements (Na, K, Cd, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Pb, Al, Mg, Ca, Fe, Ba, As) in the samples were determined by ICP-OES and ICP-MS methods. The pollution status of the 16 elements was studied by Geoaccumulation Index and correlation analysis. The results showed that through the comparison of concentrations of elements from PM_{2.5} samples at different monitoring sites, the ratios of maximum to minimum values for Pb, Cd, C, As in PM_{2.5} were more than 2, the difference was greater, and especially the ration for As was up to 12.19. The ratios of maximum to minimum values for Na, K, V, Mn, Ni, Cu, Zn, Al, Mg, Ca, Fe, Ba were less than 2, exhibiting smaller difference. The results of Geoaccumulation Index indicated that the elements of Cd, Zn, Pb, As, mainly from iron and steel smelting, vehicles and tire-wear, were extremely contaminated. The relevance results showed that Cd, Zn, Pb, Cu might be from the same types of sources.

Key words PM_{2.5}; geoaccumulation index; Anshan; element distribution

PM_{2.5}(细颗粒物)指环境空气中空气动力学当量直径小于等于2.5 μm的颗粒物。其能较长时间悬浮于空气中,且浓度越高空气污染越严重;虽然

PM_{2.5}在地球大气成分中浓度很小,但对空气质量和能见度等有重要的影响。PM_{2.5}具有粒径小、面积大、活性强、易附带有毒有害物(如重金属、微生物

等),且在大气中的停留时间长、输送距离远等特征,对人体健康和大气环境质量的影响较大。

鞍山市位于辽宁省辽东半岛中部,是中国较大的钢铁工业生产基地,同时也是以煤为主要能源的重工业、扬尘-煤烟型污染城市。随着社会经济的发展、人口的增加及工业化和城市化进程的推进,城市煤及其他能源的消耗量仍在增加^[1]。据2015年鞍山市环境质量报告书统计显示:2015年鞍山市区环境空气质量优良天数为233 d;非采暖期首要污染物以PM_{2.5}、O₃为主;采暖期首要污染物以PM_{2.5}为主。

目前,针对PM_{2.5}的研究主要有空气质量指数(AQI)法、富集因子分析法和化学质量平衡法等。笔者以2014年10月鞍山市6个典型环境空气监测点中PM_{2.5}为研究对象,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)及电感耦合等离子原子发射光谱法(ICP-OES)分析PM_{2.5}中16种元素的浓度水平,并用地质累积指数对其污染状况进行评价,以期治理鞍山市大气颗粒物污染提供指导,为城市环境空气质量改善措施的制定提供科学依据。

1 评价方法

地质累积指数(I_{geo})是20世纪60年代后期在欧洲发展起来的广泛用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标。目前已被应用于土壤中元素的污染评价,道路扬尘重金属污染研究以及颗粒物中元素的污染分析^[2]。

地质累积指数通常称为Müller指数^[3-4],其不仅考虑了自然地质过程造成的背景值的影响,而且充分注意了人为活动对重金属污染的影响。因此,该指数不仅反映了重金属分布的自然变化特征,还可以判别人为活动对环境的影响,是区分人为活动影响的重要参数。地质累积指数的计算式为:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/kB_n) \quad (1)$$

式中: C_n 为元素 n 在PM_{2.5}中的浓度,mg/kg; B_n 为沉积物或土壤中该元素的背景值,mg/kg; k 为考虑各地岩石差异可能会引起背景值变动的调整系数(一般取值为1.5)。

在地质累积指数研究中,通常采用Müller分级标准^[5],共分为0~6级,表示污染程度由无污染至严重污染;最高级(6级)的元素浓度可能是地球化学背景值的几百倍^[6]。地质累积指数与污染程度分级见表1^[7]。

表1 地质累积指数与污染程度分级^[7]

Table 1 The geoaccumulation index and the corresponding contamination degree

I_{geo}	污染级别	污染程度
<0	0	无污染
0~1	1	轻度污染
1~2	2	偏中度污染
2~3	3	中度污染
3~4	4	偏重度污染
4~5	5	重度污染
≥5	6	严重污染

2 样品采集和分析

2.1 样品采集

鞍山市地处中纬度的松辽平原的东南部边缘,属于暖温带大陆性季风气候区,四季分明。鞍山市秋季天高气爽,雨量骤减,气温急降。根据鞍山市气象条件、地势及污染源(被四大露天开采矿区所包围)特点,选取6个常规监测点(明达新区、太阳城、铁西三道街、鞍钢、太平、高新)进行采样监测(图1)。所选监测点位于鞍山市城区,远离交通,涵盖鞍山市居住区、工业区,是鞍山市环境空气自动监测子站监测点位,可代表鞍山市区环境空气质量现状。采样仪器为青岛恒远公司生产的中流量颗粒物采样器,用聚丙烯滤膜采集环境空气中PM_{2.5}样品;采样时间为2014年10月13—25日,每天连续24 h监测采样,14 d共采集84个样品。



监测点:1—明达新区;2—太阳城;3—铁西三道街;

4—鞍钢;5—太平;6—高新。

图1 常规监测点

Fig. 1 Conventional monitoring points

2.2 样品分析

使用美国 Agilent 公司的 Agilent 7500a 型 ICP-MS 分析 Na、K、Cd、V、Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Pb、As 11 种元素:前处理用热酸提取样品,利用雾化器将待分析样品溶液雾化处理,经由去溶剂、分解、原子化/离子化等反应,用四级杆质量分析仪将各特定质荷比分离,进行元素的定性及定量测定。用 ICP-OES 测定 Al、Mg、Ca、Fe、Ba 5 种元素:样品进行前处理,经低温碳化、灰化后进行雾化处理,将所形成含待测分析元素的样品送至等离子炬管中,进行元素的定性及定量分析。

3 结果与分析

3.1 PM_{2.5}中元素浓度分析

监测期鞍山市 6 个监测点 PM_{2.5}中各元素浓度

见表 2。从表 2 可以看出,6 个监测点 PM_{2.5}中 Na、K、V、Mn、Ni、Cu、Zn、Al、Mg、Ca、Fe、Ba 元素各监测点间变化不大,最大值与最小值的比为 1.32 ~ 1.69;Pb、Cd、Cr 元素监测点间变化较大,最大值与最小值的比为 2.17 ~ 3.22;As 元素各监测点间变化较为特别,监测点 6(高新)浓度最大,监测点 3(铁西三道街)浓度最小,其他监测点之间变化不大。K、Al、Ca、Fe 4 种元素浓度较高,各点位最大值与最小值的比均在 1 以上。其中,监测点 1(明达新区)的 Fe、Mg 元素浓度最大,监测点 5(太平)的 K、Na、Zn 元素浓度最大,监测点 6 的 Al、Pb、As 元素浓度最大,监测点 2(太阳城)的 Ca 元素浓度最大。各监测点 Cd、V、Cr、Ni、Cu、Ba 元素浓度相对较小。

表 2 鞍山市 6 个监测点 PM_{2.5}中各元素浓度

Table 2 The mass percent of elements in PM_{2.5} in Anshan

元素	各监测点浓度/%						最大值/最小值
	1	2	3	4	5	6	
Na	0.362 2	0.448 3	0.405 1	0.468 3	0.511 2	0.498 1	1.41
K	1.114 0	1.291 4	1.205 5	1.297 7	1.501 5	1.440 4	1.35
Cd	0.001 7	0.002 0	0.001 8	0.002 0	0.002 9	0.003 8	2.17
V	0.005 0	0.004 4	0.004 3	0.004 3	0.006 6	0.005 7	1.53
Cr	0.005 8	0.007 3	0.008 1	0.007 8	0.013 1	0.009 0	2.27
Mn	0.047 7	0.051 2	0.046 5	0.064 7	0.078 5	0.050 6	1.69
Ni	0.002 5	0.003 5	0.003 0	0.003 4	0.003 8	0.003 1	1.51
Cu	0.009 9	0.011 0	0.009 8	0.010 0	0.014 4	0.013 4	1.47
Zn	0.391 7	0.487 7	0.514 9	0.548 4	0.651 0	0.589 5	1.66
Pb	0.164 2	0.156 3	0.107 2	0.122 1	0.217 9	0.345 4	3.22
Al	1.472 2	1.243 5	1.370 7	1.161 2	1.474 3	1.687 2	1.45
Mg	0.708 4	0.528 4	0.508 7	0.579 1	0.650 6	0.688 9	1.39
Ca	1.150 0	1.317 4	1.188 6	1.197 0	0.997 8	1.124 3	1.32
Fe	1.678 7	1.084 1	1.357 0	1.448 6	1.444 7	1.331 1	1.55
Ba	0.011 8	0.008 0	0.010 6	0.012 0	0.009 2	0.009 4	1.49
As	0.019 8	0.021 8	0.007 7	0.012 5	0.033 7	0.093 9	12.19

监测点:1—明达新区;2—太阳城;3—铁西三道街;4—鞍钢;5—太平;6—高新。

注:各监测点数据为 2014 年 10 月 13—25 日各监测点连续 14 d 监测数据的平均值。

从表 2 可以看出,Cd、Cr、Pb、As 4 种元素在各监测点间变化较大,其中,As 元素最大与最小值比达 12.19,其与鞍山市工业生产煤炭消耗量大,污染源分布复杂,秋季供暖燃煤、燃油开始增多有直接关系。Na、V、Mn、Ni、Cu、Zn、Mg、Ba 元素各点位间元

素浓度变化较小,其与鞍山市是以钢铁冶炼为支柱产业有关:鞍钢主厂区占城市规模的 50% 以上,建城区周边被露天矿区包围,监测点 6 以北有齐大山矿区,以南有大孤山矿区;监测点 2 西南方向有东鞍山矿区;监测点 1 位于东鞍山矿区与大孤山矿区之

间。同时由于近几年城市汽车占有量的增加,机动车尾气排放量加大对各元素浓度也有一定影响^[8]。

3.2 地质累积指数评价

在应用地质累积指数法评价重金属污染时,应选择与沉积物有显著联系的地球化学背景值,由此而进行的污染状况分析才更能反映实时污染程

度^[9]。为此,研究选取辽宁省 A 层土壤(0 ~ 20 cm 表层土)各元素中位值,作为该次样品分析的污染元素背景值^[10](表 3)。

根据表 2 和表 3 数据利用式(1)对鞍山市 PM_{2.5} 中载带元素的地质累积指数进行计算,其结果及污染级别见表 4。

表 3 元素的地球化学背景值^[10]
Table 3 The background values of elements

元素	Na	Mn	K	V	Cd	Ni	Cr	Cu
背景值/%	1.48	0.056 3	2.05	0.008 18	0.000 008 4	0.002 46	0.005 45	0.001 85
元素	Al	Mg	Ca	Fe	Ba	Zn	Pb	As
背景值/%	6.3	0.77	0.8	2.77	0.057 3	0.005 91	0.002 07	0.000 86

表 4 鞍山市 6 个监测点 PM_{2.5} 中元素的地质累积指数及污染级别
Table 4 Geoaccumulation index and pollution level of elements in PM_{2.5} of all monitoring points in Anshan City

元素	1		2		3		4		5		6	
	<i>I</i> _{geo}	污染级别										
Na	-2.615 7	0	-2.308 0	0	-2.454 4	0	-2.245 2	0	-2.118 6	0	-2.156 0	0
K	-1.464 9	0	-1.251 6	0	-1.350 9	0	-1.244 6	0	-1.034 2	0	-1.094 2	0
Cd	7.098 8	6	7.272 5	6	7.155 1	6	7.278 9	6	7.866 8	6	8.218 1	6
V	-1.307 7	0	-1.472 5	0	-1.520 6	0	-1.516 2	0	-0.903 8	0	-1.113 0	0
Cr	-0.504 0	0	-0.167 6	0	-0.007 6	0	-0.069 9	0	0.678 1	1	0.139 5	1
Mn	-0.822 8	0	-0.722 4	0	-0.860 5	0	-0.385 3	0	-0.104 8	0	-0.738 7	0
Ni	-0.559 5	0	-0.092 4	0	-0.309 4	0	-0.139 8	0	0.031 1	1	-0.247 6	0
Cu	1.835 7	2	1.980 8	2	1.812 4	2	1.853 7	2	2.372 2	3	2.273 8	3
Zn	5.465 6	6	5.781 7	6	5.860 1	6	5.950 9	6	6.198 4	6	6.055 3	6
Pb	5.724 3	6	5.653 6	6	5.108 9	6	5.297 7	6	6.132 8	6	6.797 7	6
Al	-2.682 3	0	-2.925 9	0	-2.785 4	0	-3.024 7	0	-2.680 3	0	-2.485 7	0
Mg	-0.705 3	0	-1.128 2	0	-1.183 0	0	-0.995 9	0	-0.828 1	0	-0.745 4	0
Ca	-0.061 4	0	0.134 7	1	-0.013 8	0	-0.003 6	0	-0.266 2	0	-0.094 0	0
Fe	-1.307 5	0	-1.938 4	0	-1.614 5	0	-1.520 2	0	-1.524 1	0	-1.642 2	0
Ba	-2.862 2	0	-3.417 9	0	-3.020 2	0	-2.844 9	0	-3.218 0	0	-3.188 5	0
As	3.936 9	4	4.078 5	5	2.575 3	3	3.271 3	4	4.707 1	5	6.185 8	6

监测点:1—明达新区;2—太阳城;3—铁西三道街;4—鞍钢;5—太平;6—高新。

有研究表明,Cd 元素主要来源为钢铁冶炼等的金属冶炼活动产生的冶炼尘,As 是典型的燃煤元素^[11-12];Zn、Ni 元素主要来源为燃煤尘以及垃圾废弃物燃烧排放^[13-14];汽车尾气和轮胎磨损主要排放 Zn、Cr、Ni、Cu、Cd^[15];Pb 元素在 PM_{2.5} 中来源广泛,其中机动车尾气排放与燃煤排放是其主要的 2 种来源方式^[16]。从表 4 可以看出:1)鞍山市 6 个监测点的 Cd、Zn、Pb 元素地质累积指数为 5.108 9 ~ 8.218 1,属于严重污染;As 元素地质累积指数为

2.575 3 ~ 6.185 8,属于中度污染 ~ 严重污染,包含了 4 个污染级别;Cu 元素地质累积指数为 1.812 4 ~ 2.372 2,属于偏中度污染 ~ 中度污染;Na、Al、Fe、Cr、Mn、Ni、Mg、Ca、Ba、K、V 元素的地质累积指数小于 0,属于无污染级别。2)监测点 1 和 4 的 Cd、Zn、Pb 为严重污染,As 为偏重度污染,Cu 为偏中度污染;监测点 6 的 Cd、Zn、Pb、As 为严重污染,Cu 为中度污染,Cr 为轻度污染;监测点 3 的 Cd、Zn、Pb 为严重污染,As 为中度污染,Cu 为偏中度污染;监测点 2

的 Cd、Zn、Pb 为严重污染,As 为重度污染,Ca 为轻度污染;监测点 5 的 Cd、Zn、Pb 为严重污染,As 为重度污染,Cu 为中度污染,Ni、Ca 为轻度污染。3) 鞍山市 6 个监测点同种元素的地质累积指数变化较小,污染级别比较相近,不同元素在各点位间的地质累积指数变化较大,污染级别处于轻度污染~严重污染。鞍山市秋季 PM_{2.5} 中 Cd 元素地质累积指数最大,污染最为严重。

利用地质累积指数对鞍山市 PM_{2.5} 中载带元素计算结果表明,Pb、Cd、Zn、As 等元素污染严重,其与鞍山市的污染源分布情况及地理特征、气候特点比较符合,说明地质累积指数可较直观地体现鞍山市城市环境空气质量状况。

3.3 相关性分析

利用 SPSS 20.0 统计分析软件对鞍山市秋季 PM_{2.5} 中元素的浓度进行 Spearman 相关性分析(表 5),进一步验证鞍山市 PM_{2.5} 中污染元素的主要来源。由表 5 可以看出,PM_{2.5} 中 Cd、Zn、Pb、Cu、Ni、Ca、As 元素间相关系数为 0.086~0.943。

表 5 鞍山市夏季 PM_{2.5} 中中度污染及以上元素的 Spearman 相关系数

Table 5 The Spearman correlationships of Moderately contaminated elements and above in PM_{2.5} in Anshan during autumn

元素	Cd	Zn	Pb	As	Ni	Ca	Cu
Cd	1.000						
Zn	0.600	1.000					
Pb	0.886*	0.314	1.000				
As	0.257	-0.486	0.600	1.000			
Ni	0.371	0.943**	0.143	0.600	1.000		
Ca	-0.200	0.543	-0.486	-0.943**	0.714	1.000	
Cu	0.829*	0.829*	0.714	-0.086	0.714	0.143	1.000

注: * 代表置信度(双测)为 0.05 时,相关性显著; ** 代表置信度(双测)为 0.01 时,相关性显著。

Cd 与 Zn、Pb 和 Cu 的相关系数分别是 0.600、0.886 和 0.829,Zn 与 Ni 和 Cu 的相关系数为 0.943 和 0.829,Pb 与 As 和 Cu 的相关系数为 0.600 和 0.714,As 与 Ca 的相关系数为 0.943,Ni 与 Ca 和 Cu 的相关系数为 0.714,都存在明显的相关性。通过分析可以推断,Cd 与 Zn、Pb、Cu 4 种元素很可能来自同一污染源,主要来源可能是钢铁冶炼过程中产生的冶炼尘及燃煤过程中产生的燃煤尘;Zn、Ni、As 的来源不仅是燃煤尘,汽车尾气排放及轮胎磨损过程也会有所贡献。Ca 元素与 Cd、Zn、Pb、Cu 元素相

关性不显著,但与 Ni、As 元素相关性显著,可以推测 Ca 来源可能为二次扬尘或建筑水泥尘。

4 结论

(1) 鞍山市秋季 PM_{2.5} 载带元素以 Al、Ca、Fe、K 等为主。Na、K、V、Mn、Ni、Cu、Zn、Al、Mg、Ca、Fe、Ba 12 种元素各监测点间最大值与最小值的比差异较小;Pb、Cd、Cr、As 4 种元素各监测点间最大值与最小值的比差异较大;As 元素最大值与最小值的比差异最大,为 12.19。

(2) 鞍山市秋季 PM_{2.5} 中 Cd、Zn、Pb 3 种元素处于严重污染级别,其中,Cd 元素地质累积指数值最大,污染最为严重;Na 和 Al 元素处于中度污染级别;As 元素在各监测点间污染级别变化较大,处于中度污染到严重污染;其他元素污染级别较接近,污染级别相对较低。

(3) 鞍山市秋季各监测点 PM_{2.5} 中,单一元素污染级别基本一致,同监测点不同元素污染级别相差较大。说明鞍山市作为以钢铁为经济支柱的城市,相应的钢铁冶炼活动也带动了交通运输的发展和燃煤活动的增加,其矿山开采、金属冶炼过程产生的主要元素污染物对鞍山市区环境空气质量带来的巨大影响,需引起一定重视。

(4) 鞍山市秋季 PM_{2.5} 各元素相关性分析结果显示:Cr 与 Zn、Pb、Cu 存在显著的相关性,4 种元素极有可能与钢铁冶炼过程中产生的冶炼尘及燃煤过程中产生的燃煤尘有关;Ca 与 Cd、Zn、Pb、Cu 元素的相关性不显著,与 Ni 和 As 有显著相关性,其可能是由城市扬尘或建筑水泥尘产生。

参考文献

[1] 张江华,赵阿宁,王仲复,等.内梅罗指数和地质累积指数在土壤重金属评价中的差异探讨[J].环保与分析,2010(8):45-46.

[2] 姬亚芹,朱坦,冯银厂,等.应用地质累积指数分析城市颗粒物源解析土壤风沙尘的污染[J].农业环境科学学报,2006,26(4):949-953.

Ji Y Q,ZHU T,FENG Y C,et al. Pollution analysis of soil dusts of source apportionment using geoaccumulation index (I_{geo}) in China[J]. Journal of Agro-Environment Science,2006,26(4):949-953.

[3] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal,1969(2):108-118.

[4] FORSTNER U,MULLER G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hycarbons in river sediments: geochemical background, mankg influence and environmental impact [J].

- Geojournal,1981(5):417-432.
- [5] MÜLLER G. Die schwermetallbelastung der sedimente desneckars undseiner nebenflusse: eine bestandsaunahme [J]. Chemiker Zeitung,1981,105(6):157-164.
- [6] LOSKA K, CEBULA J, PELCZAR J, et al. Use of enrichment, and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik Water Reservoir in Poland[J]. Water Air and Soil Pollution,1997,93(1/2/3/4):347-365.
- [7] 刘海婷,于瑞莲,胡恭任,等. 泉州市街道灰尘重金属污染评价[J]. 矿物岩石,2010,30(3):116-120.
LIU H T, YU R L, HU G R, et al. Assessment of pollution by heavy metal street dust in the Quanzhou city [J]. Journal of Mineral Petrol,2010,30(3):116-120.
- [8] 焦姣,张雷波,姬亚芹. 应用地质累积指数评价抚顺市 PM_{2.5} 中元素的污染[J]. 环境污染与防治,2012,6(6):66-70.
JIAO J, ZHANG L B, JI Y Q. Applying the geoaccumulation index to evaluate element pollution of PM_{2.5} in Fushun [J]. Environmental Pollution & Control,2012,6(6):66-70.
- [9] 刘敬勇,常向阳,涂湘林,等. 广东某硫酸废渣堆渣场周围土壤铊污染的地累积指数评价[J]. 土壤通报,2010,41(5):1231-1232.
LIU J Y, CHANG X Y, TU X L, et al. Applying the index geoaccumulation to assessment of soil thallium pollution in soil around a thallium-containing slag pile site near a sulphuric acid plant in Guangdong province [J]. Chinese Journal of Soil Science,2010,41(5):1231-1232.
- [10] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990.
- [11] 李友平,刘慧芳,周洪,等. 成都市 PM_{2.5} 中有毒重金属污染特征及健康风险评价[J]. 中国环境科学,2015,35(7):2225-2232.
LI Y P, LIU H F, ZHOU H, et al. Contamination characteristics and health risk assessment of toxic heavy metals in PM_{2.5} in Chengdu [J]. China Environmental Science, 2015, 35 (7): 2225-2232.
- [12] 王晴晴,谭吉华,马永亮,等. 佛山市冬季 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征[J]. 中国环境科学. 2012,32(8):1384-1391.
WANG Q Q, TAN J H, MA Y L, et al. Characteristics of heavy metals in PM_{2.5} during winter in Foshan city [J]. China Environmental Science,2012,32(8):1384-1391.
- [13] 郭璇华,高瑞英,黄瑞毅,等. 大气颗粒物中无机元素特性的研究[J]. 环境科学与技术,2006,29(6):49-51.
GUO X H, GAO R Y, HUANG R Y, et al. Investigating properties of inorganic elements in atmospheric aerosols by ICP-MS [J]. Environmental Science & Technology,2006,29(6):49-51.
- [14] TIAN H Z, LU L, CHENG K, et al. Anthropogenic atmospheric nickel emissions and its distribution characteristics in China[J]. Science of the Total Environment,2012,417:148-157.
- [15] HUANG S, TU J, LIU H, et al. Multivariate analysis of trace element concentrations in atmospheric deposition in the Yangtze River Delta, East China[J]. Atmospheric Environment,2009,43(36):5781-5790.
- [16] 余家燕,刘芮伶,翟崇治,等. 重庆城区 PM_{2.5} 中金属浓度及其来源[J]. 中国环境监测,2014,30(3):37-42.
YU J Y, LIU R L, ZHAI C Z, et al. Automated multi-metals monitor PM_{2.5} metalssource analysis [J]. Environmental Monitoring in China,2014,30(3):37-42. ○