



移动扫码阅读

吴林,汪晶,邓方昕.重庆市生活垃圾焚烧发电厂颗粒物特征研究[J].能源环境保护,2021,35(3):75-80.

WU Lin, WANG Jin, DENG Fangxin. Study on characteristics of particulate matters in Chongqing domestic waste incineration power plant[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(3): 75-80.

重庆市生活垃圾焚烧发电厂颗粒物特征研究

吴林,汪晶,邓方昕

(重庆市生态环境监测中心,重庆401147)

摘要:为了解重庆市生活垃圾焚烧废气排放颗粒物的组分情况,采集了重庆市两家典型生活垃圾焚烧发电厂焚烧废气颗粒物滤膜样品,分析了化学组分。结果表明,重庆市生活垃圾焚烧废气颗粒物 PM_{10} 源和 $PM_{2.5}$ 源组分的有机碳(OC)、元素碳(EC)、 SO_4^{2-} 质量分数偏高,OC、EC的质量分数均超过10%, SO_4^{2-} 的质量分数为3.22%~18.5%,S、K、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 含量均超过1%。 $PM_{2.5}$ 源中 Cl^- 含量高达3.92%~11.9%。研究结果与其他城市垃圾焚烧排放颗粒物的 $PM_{2.5}$ 源及 PM_{10} 源组分特征差异性不大, PM_{10} 源组分中K、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、OC的含量偏高,分别为1.16%、5.42%、11.2%、30.3%; $PM_{2.5}$ 源组分中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和OC的含量偏高,分别为7.70%、6.99%、29.0%。

关键词:生活垃圾;稀释通道;成分谱;重庆市

中图分类号:X513

文献标识码:A

文章编号:1006-8729(2021)03-0075-06

Study on characteristics of particulate matters in Chongqing domestic waste incineration power plant

WU Lin, WANG Jin, DENG Fangxin

(Chongqing Municipal Ecological Environment Monitoring Center, Chongqing 401147, China)

Abstract: In order to study the composition of particulate matters produced by municipal solid waste incineration (MSWI) in Chongqing, particulate matters from two typical domestic waste incineration power plants in Chongqing were collected, and the chemical composition was analyzed. The results show that the mass fraction of OC, EC and SO_4^{2-} in PM_{10} and $PM_{2.5}$ sources are high. The mass fractions of OC and EC are both more than 10%. The mass fraction of SO_4^{2-} is between 3.22%~18.5%. The mass fractions of S, K, NH_4^+ and Ca^{2+} are all higher than 1%. The mass fraction of Cl^- in $PM_{2.5}$ source is as high as 3.92%~11.9%. The results of the study are not very different from the compositions of the $PM_{2.5}$ source and PM_{10} source in the domestic waste incineration plants of other cities. The mass fractions of K, Cl^- , SO_4^{2-} and OC in PM_{10} source in Chongqing are 1.16%, 5.42%, 11.2%, and 30.3%, respectively, which are higher than those in other cities. The mass fractions of Cl^- , SO_4^{2-} and OC in $PM_{2.5}$ source are 7.70%, 6.99%, and 29.0%, respectively, which are also higher than those in other cities.

Key Words: Domestic waste; Dilution tunnel; Composition spectrum; Chongqing

0 引言

随着生活垃圾处理逐步“改填为烧”,生活垃圾焚烧量逐年递增。“十二五”和“十三五”期间,生活垃圾焚烧迎来了发展的黄金期^[1]。对比填埋

和生化处理工艺,生活垃圾焚烧处理工艺所占市场份额不断上升。生活垃圾焚烧工艺从“十一五”期初的14%持续增长至2017年的34%^[2]。据国家统计局数据分析^[2],从2011年到2018年我国生活垃圾发电厂数量及其处理能力分别增长了

203.7%和287.4%^[3]。随着垃圾焚烧量的增加,垃圾焚烧废气排放量也逐步增加,垃圾焚烧源对环境空气的污染占比也逐步提升。因此,为了针对性地开展颗粒物排放源管理工作,研究生活垃圾焚烧发电行业废气排放颗粒物特征成为亟待解决的问题。

本研究依据《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》(2020年),使用稀释通道采样器对重庆市典型生活垃圾焚烧发电厂废气颗粒物进行样品采集,并对样品进行化学组分分析,获取典型生活垃圾焚烧发电厂颗粒物源成分谱。

1 研究方法

1.1 企业基本情况

本研究选取重庆市两家典型垃圾焚烧发电厂作为研究对象,垃圾焚烧发电厂基本情况见表1。

表1 垃圾焚烧发电厂基本情况

Table 1 Overview of waste incineration power plants

垃圾处理厂	炉排型式	烟气处理工艺	处理量/进炉量
1#垃圾焚烧发电厂	2×600 t/d 炉排式焚烧炉	SNCR法+活性炭吸附+半干法+布袋除尘器	1 200 t/d
2#垃圾焚烧发电厂	3×750 t/d 倾斜往复式炉排焚烧炉	SNCR法+半干法+活性炭喷射+布袋除尘器	4 500 t/d

1.2 采样方法

依据《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》(2020年),对于燃煤(油)的各类电厂锅炉,民用炉灶、建材和冶金工业炉窑等固定源排气的颗粒物采样,优先用稀释通道法,故本研究采用稀释通道法采集颗粒物。稀释通道法的采样原理是高温烟气在稀释通道内与洁净空气进行混合稀释,并冷却至大气环境温度,稀释冷却后的混合气体进入采样舱停留一段时间,然后使用采样器捕集一定粒径大小的颗粒物。该方法模拟烟气排放到大气中短时间内的稀释、冷却、凝结等过程,捕集的颗粒物可被近似认为是燃烧源排放的一次颗粒物,包括一次可过滤颗粒物和一次凝结颗粒物^[4]。稀释通道采样原理示意图见图1。

采样位置位、采样点的布设参照《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB/T 16157—1996)和《固定源废气监测技术规范》(HJ/T 397—2007)的相关规定。采样位置选择满足在垂直管段,避开烟道弯头和断面急剧变化的部位,距弯头、阀门、变径管下游方向不小于6倍直径处,和距上述部件上游方向不小于3倍直径

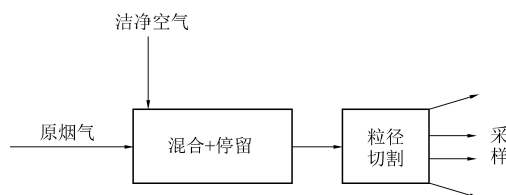


图1 稀释通道采样原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling in dilution tunnels 处等要求^[5]。采样参数设置情况见表2。

表2 采样参数设置情况

Table 2 Setup of sampling parameters

企业	采样时间/h	采样温度/℃	稀释比	采样流量/(L·min ⁻¹)
1#垃圾焚烧发电厂	15.0	140	6:1	16.7
2#垃圾焚烧发电厂	20.0	140	3:1	16.7

1.3 滤膜的选择及处理

为满足有机碳(OC)、元素碳(EC)、水溶性离子和痕量金属等化学组成分析的要求,经比对分析,本研究选择47 mm的Teflon滤膜和石英滤膜,Teflon滤膜样品用于无机元素分析,石英滤膜样品用于有机碳、元素碳及水溶性离子分析。

采样前将石英滤膜于烘箱内在500℃烘烤4 h,以除去有机杂质,将特氟龙滤膜于烘箱内在60℃烘烤2 h。

将石英滤膜及特氟龙滤膜放置于恒温恒湿箱,于(25.0±2)℃,相对湿度(50%±5%),平衡24 h后,在(25.0±2)℃,相对湿度(50%±5%)条件下称量滤膜,记录滤膜重量。同一滤膜在相同条件下再平衡24 h后称重,两次重量之差小于0.4 mg(PM₁₀)或0.04 mg(PM_{2.5})。滤膜样品在采样前恒温恒湿条件下平衡、称量,记录滤膜样品重量。

1.4 化学组分分析

滤膜样品颗粒物化学组成复杂,主要包括水溶性离子、含碳组分和无机元素。无机元素、水溶性离子、有机碳、元素碳分析方法及依据见表3。

1.5 质量保证和质量控制

每次采集样品过程同时采集全程序空白,化学组分分析过程进行标准样品分析、平行样分析及加标回收率分析。标准样品分析中无机元素的相对误差范围为1.4%~8.4%,水溶性离子的相对误差范围为0.8%~4.8%;平行样品分析中无机元素相对偏差范围为2.1%~4.8%,水溶性离子的相对偏差范围为0.1%~3.7%;有机碳(OC)及元素碳(EC)实际样品加标回收率在83.0%~118.0%之间。

表 3 分析方法一览表
Table 3 Analysis methods

监测项目	监测方法及监测依据	监测仪器型号名称
PM _{2.5}	《环境空气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 的测定 重量法及修改单》(HJ 618—2011) ^[6] 、《环境空气 颗粒物(PM _{2.5}) 重量法 手工监测方法技术规范及修改单》(HJ 656—2013) ^[7]	XPE105DR 电子天平
PM ₁₀	《环境空气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 的测定 重量法及修改单》(HJ 618—2011)	XPE105DR 电子天平
水溶性阴离子(F ⁻ 、Cl ⁻ 、NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻)	《环境空气 颗粒物水溶性阴离子(F ⁻ 、Cl ⁻ 、Br ⁻ 、NO ₂ ⁻ 、NO ₃ ⁻ 、PO ₄ ³⁻ 、SO ₃ ²⁻ 、SO ₄ ²⁻)的测定 离子色谱法》(HJ 799—2016) ^[8]	INTEGRIONHPIC 离子色谱仪
水溶性阳离子(Na ⁺ 、NH ₄ ⁺ 、K ⁺ 、Ca ²⁺ 、Mg ²⁺)	《环境空气 颗粒物水溶性阳离子(Li ⁺ 、Na ⁺ 、NH ₄ ⁺ 、K ⁺ 、Ca ²⁺ 、Mg ²⁺)的测定 离子色谱法》(HJ 800—2016) ^[9]	INTEGRIONHPIC 离子色谱仪
无机元素	《环境空气 颗粒物中无机元素的测定 波长色散 X 射线荧光光谱法》(HJ 830—2017) ^[10]	S8 Tiger X 射线荧光光谱仪
有机碳(OC)、元素碳(EC)	元素碳和有机碳的热光法	DRI 2015 多波长热/光学碳分析仪

2 结果与讨论

厂及 2#垃圾焚烧发电厂的 PM₁₀源及 PM_{2.5}源的化学组分,PM₁₀源及 PM_{2.5}源的成分谱见图 2、图 3。

2.1 组分特征

通过化学组分分析,获取了 1#垃圾焚烧发电

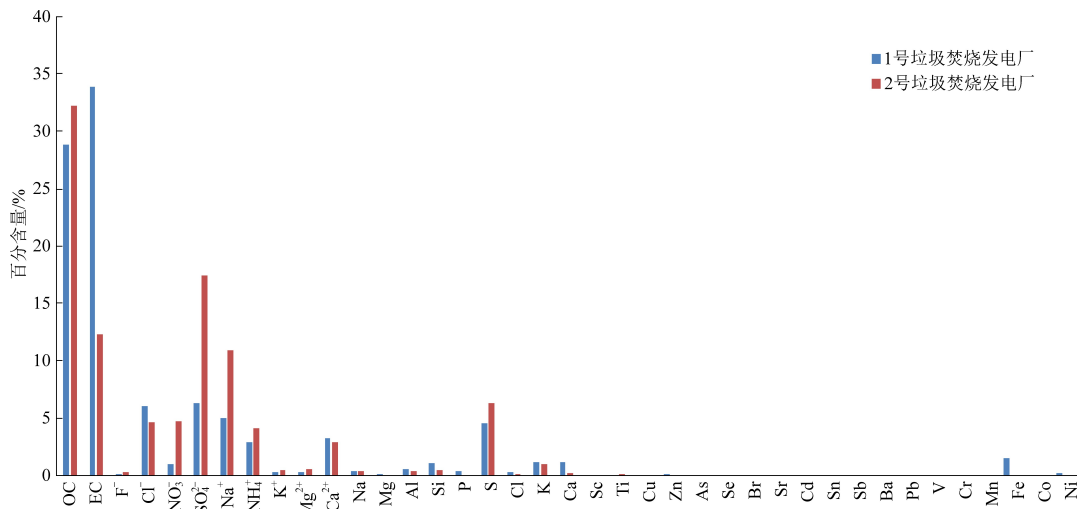


图 2 PM₁₀源成分谱

Fig.2 PM₁₀ source composition spectrum

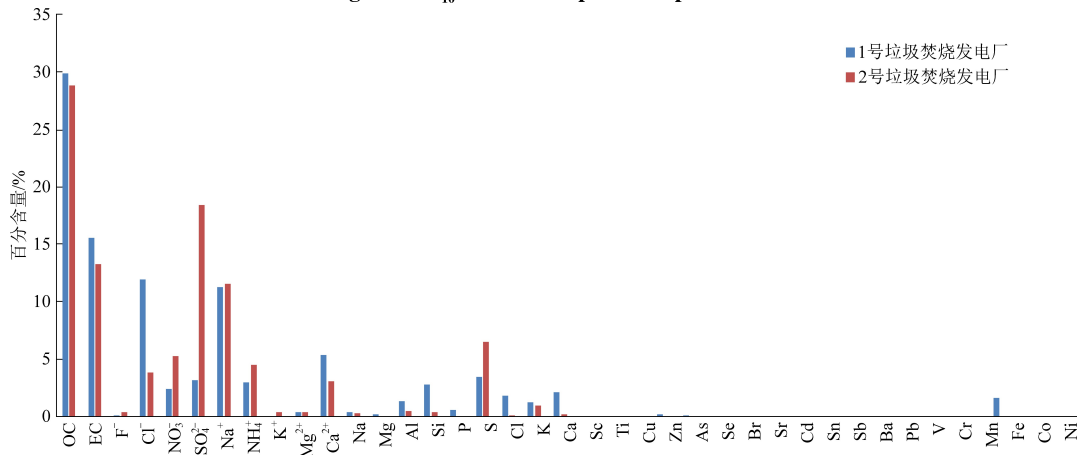


图 3 PM_{2.5}源成分谱

Fig.3 PM_{2.5} source composition spectrum

将各源类的化学组分按组分的质量分数划为四档,分别为 $w < 0.1\%$ 、 $0.1\% \leq w < 1\%$ 、 $1\% \leq w <$

10% 、 $w \geq 10\%$ ^[11-12],划分入各档中的化学组分如表 4 所示。

表 4 颗粒物排放源类中的化学成分

Table 4 Chemical compositions of particle emission sources

源类	粒径	化学成分质量百分含量(w)			
		<0.1%	0.1%~1%	1%~10%	>10%
1#垃圾焚烧发电厂	PM ₁₀	Sc, Ti, Cu, Se, Br, Sr, Cd, Sn, Sb, Ba, Pb, V, Cr, Mn, Co, As	Mg, F ⁻ , Zn, Ni, K ⁺ , Cl ⁻ , Mg ²⁺ , P, Na, Al, NO ₃ ⁻	Si, Ca, K, Fe, NH ₄ ⁺ , Ca ²⁺ , S, Na ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	OC, EC
2#垃圾焚烧发电厂	PM ₁₀	Mg, P, Sc, Cu, Zn, As, Se, Br, Sr, Cd, Sn, Sb, Ba, Pb, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni	Na, Al, Si, Cl, Ca, Ti, K ⁺ , Mg ²⁺ , F ⁻	S, K, NH ₄ ⁺ , Ca ²⁺ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻	Na ⁺ , SO ₄ ²⁻ , OC, EC
1#垃圾焚烧发电厂	PM _{2.5}	K ⁺ , Sc, Ti, Cu, Se, Br, Sr, Cd, Sn, Sb, Ba, Pb, V, Cr, Mn, Co, Ni	As, F ⁻ , Zn, Mg, Mg ²⁺ , Na, P	K, Al, Fe, Cl, Ca, NO ₃ ⁻ , Si, NH ₄ ⁺ , SO ₄ ²⁻ , S, Ca ²⁺	Na ⁺ , Cl ⁻ , EC, OC
2#垃圾焚烧发电厂	PM _{2.5}	Sc, Ti, Cu, Zn, As, Se, Br, Sr, Cd, Sn, Sb, Ba, Pb, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Mg, P	Cl, Ca, Na, F ⁻ , Si, Mg ²⁺ , K ⁺ , Al	K, Ca ²⁺ , Cl ⁻ , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , S	Na ⁺ , EC, SO ₄ ²⁻ , OC
烟台:文献[11] ^a	PM _{2.5}	/	/	Cl ⁻ , OC, SO ₄ ²⁻ , Si, Ca, Zn, Cr, Ni, Cu, As, Pb	/
北京:文献[12] ^b	PM _{2.5}	Sc, As, Se, Cd, V, Pb, NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , Ba, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn	EC, OC, Fe, Mg, Na, Ti	Ca, Si, K, SO ₄ ²⁻ , Al, Cl ⁻	/
某沿海城市: 文献[13] ^b	PM ₁₀	Sr, Ti, Mn, Ni, Cd, Cr, Ba, P	F ⁻ , NO ₃ ⁻ , Cu, EC, Fe	Ca ²⁺ , Pb, Mg, Al, Mg ²⁺ , Zn, V, NH ₄ ⁺ , Ca, S, Na, Na ⁺	K, K ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , OC

注:a 下载灰采样;b 烟道灰飞采样。

对于 PM₁₀ 颗粒物源, OC、EC 含量均超过 10%, 其次为 S、K、NH₄⁺、Ca²⁺、Cl⁻, 含量均超过 1%。PM₁₀ 颗粒物中 SO₄²⁻ 含量较高, 分别为 17.4% 和 6.32%, PM₁₀ 颗粒物中 Na⁺ 含量也较高, 分别为 11.0% 和 4.98%。

对于 PM_{2.5} 颗粒物源, Na⁺、EC、OC 含量均超过 10%, 其次为 K、Ca²⁺、NH₄⁺、NO₃⁻、S, 含量均超过 1%。PM_{2.5} 颗粒物中 SO₄²⁻ 含量较高, 分别为 18.5% 和 3.22%, PM_{2.5} 颗粒物中 Cl⁻ 含量也较高, 分别为 3.92% 和 11.9%。

总体来看, PM₁₀ 颗粒物源和 PM_{2.5} 颗粒物源相比较, OC、EC 含量都比较高, 均超过 10%, 其次为 S、K、NH₄⁺、Ca²⁺, 含量均超过 1%。PM₁₀ 颗粒物源和 PM_{2.5} 颗粒物源中, SO₄²⁻ 含量均较高, 含量为 3.22%~18.5%。

2.2 源谱相似性分析

分歧系数 CD (Coefficient of Divergence, 分歧系数) 可以将不同成分谱中组分含量标准化, 从而来比较成分谱之间的相似性^[14]。CD 的计算公式:

$$CD_{jk} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left(\frac{x_{ij} - x_{ik}}{x_{ij} + x_{ik}} \right)^2}$$

式中, CD_{jk} 为 j 类源谱和 k 类源谱之间的分歧系

数, x_{ij} 为 j 类源谱组分 i 含量的平均值, j 和 k 为要比较多两种源类, p 为所测主要组分的数量。CD 值越趋近于 0, 成分谱越相似。若 $CD > 0.3$, 表明成分谱之间可能存在一定差异^[15]; 若 $CD < 0.3$, 表明成分谱之间有一定的相似性, 输入 CMB 模型可能会引起共线性问题。

通过计算, 1#垃圾焚烧发电厂与 2#垃圾焚烧发电厂 PM₁₀ 源之间 CD 值为 4.2, 1#垃圾焚烧发电厂与 2#垃圾焚烧发电厂 PM_{2.5} 源之间 CD 值为 4.6, 表明两个垃圾焚烧发电厂 PM₁₀ 源与 PM_{2.5} 源成分谱之间都存在一定差异。

两个垃圾焚烧发电厂 PM₁₀ 源与 PM_{2.5} 源成分谱之间都存在差异的可能原因有: (1) 燃烧采用的原料成分差异, 两家企业所采用燃料种类不尽相同, 所以排放颗粒物的化学组成和含量存在一定差异; (2) 烟气处理工艺不同, 1#垃圾焚烧发电厂废气处理工艺为 SNCR 法(炉内喷尿素)+活性炭吸附+半干法+布袋除尘器, 2#焚烧发电厂废气处理工艺为 SNCR(炉内喷尿素)+半干法+活性炭喷射+布袋除尘器, 废气处理工艺上的细微差别, 也可能造成颗粒物的化学组成和含量不完全相同; (3) 污染物各控制单元处理效率不同, 也可能使所排放颗粒物的化学组成和含量存在差异。

2.3 与其他城市 PM_{2.5}源及 PM₁₀源组分对比分析

与其他城市垃圾焚烧排放的 PM_{2.5}源及 PM₁₀源组分特征进行对比,结果见表 4。

通过对比发现,本研究的 PM₁₀源与某沿海城市的 PM₁₀源组分中, K、Cl⁻、SO₄²⁻、OC 的含量相对都比较高,本研究中 K、Cl⁻、SO₄²⁻、OC 的含量分别为:1.16%、5.42%、11.2%、30.3%,某沿海城市 K、Cl⁻、SO₄²⁻、OC 的含量均大于 10%,另某沿海城市的 PM₁₀源组分中重金属的含量比较高,其中 Cr、Ni、Cu、As、Pb 含量之和为 1.92%;几个城市 PM_{2.5}源组分中, Cl⁻、SO₄²⁻和 OC 的含量相对都比较高,本研究中 Cl⁻、SO₄²⁻、OC 的含量分别为:7.70%、6.99%、29.0%,文献^[11]中 Cl⁻、SO₄²⁻、OC 的含量分别为 4.5%、4.2%和 4.2%,文献^[12]中 Cl⁻、SO₄²⁻的含量分别为 2.5%、6.79%,OC 的含量在 0.1%~1.0%。

差异性表现在各组分的含量差别较大,这种差异可能是燃烧工艺、垃圾燃料不同、采样位置不同造成的,比如文献^[11]中采样位置是下载灰采样,其 PM_{2.5}源的重金属含量较其他城市的重金属含量大,其质量分数为 2.3%。

2.4 与其他行业 PM_{2.5}源组分对比分析

与重庆市其他行业排放 PM_{2.5}组分的研究进行对比,对比情况见表 5。结果显示餐饮行业中碳含量最高,占比为 88.75%,玻璃行业碳含量最低,占比 3.51%;玻璃行业离子和含量最高,占比为 94.26%,餐饮行业离子和最低,占比为 9.73%;铝业工业元素和最高,占比 28.50%,餐饮行业元素和最低,占比为 1.52%;两个垃圾焚烧发电厂相对其他行业,总碳含量及重金属含量较高,离子和含量较低。

表 5 PM_{2.5}排放源类中化学成分的含量水平

Table 5 Chemical compositions of PM_{2.5} emission sources

源类	%			
	总碳	离子和	元素和	重金属
玻璃行业	3.51	94.26	2.24	0.00
汽车行业	40.78	37.06	22.15	0.00
铝业工艺	19.50	52.00	28.50	0.00
燃煤电厂	8.19	88.33	3.49	0.00
钢铁行业	7.71	81.49	10.80	0.51
水泥行业	24.55	57.93	17.52	0.01
餐饮行业	88.75	9.73	1.52	0.00
1#垃圾焚烧发电厂	45.50	38.00	10.50	0.07
2#垃圾焚烧发电厂	42.10	48.30	2.80	0.01

注:总碳质量分数为有机碳(OC)与元素碳(EC)质量分数之

和,离子和质量分数为 Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻等 9 种阴阳离子质量分数之和,元素和质量分数为 Na、Mg、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Sc、Ti、Cu、Zn、As、Se、Br、Sr、Cd、Sn、Sb、Ba、Pb、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni 等 28 项元素质量分数之和,重金属质量分数为 Cr、Ni、Cu、As、Pb 质量分数之和。

3 结论

(1)生活垃圾焚烧废气颗粒物 PM₁₀源的主要含量为 OC、EC、S、K、NH₄⁺、Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻,颗粒物 PM_{2.5}源的主要含量 OC、EC、S、K、NH₄⁺、Na⁺、Ca²⁺、NO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻。

(2)通过源谱的相似性分析,两个垃圾焚烧发电厂 PM₁₀源与 PM_{2.5}源成分谱之间存在差异,产生这种差异的可能原因有燃烧所用原料成分、废气处理工艺、污染物各控制单元处理效率等的不同。

(3)通过与其他城市垃圾焚烧排放的颗粒物 PM_{2.5}源及 PM₁₀源组分特征进行对比,发现共性表现在 PM₁₀源组分中, K、Cl⁻、SO₄²⁻、OC 的含量相对都比较高,PM_{2.5}源组分中, Cl⁻、SO₄²⁻和 OC 的含量相对都比较高,差异性表现在各组分的含量差别较大以及某些城市的重金属含量相对较大,这种差异可能是燃烧工艺、垃圾燃料不同、采样位置不同造成的。

(4)与重庆市其他行业排放 PM_{2.5}组分的研究比较,生活垃圾焚烧废气 PM_{2.5}源组分总碳含量及重金属含量较高,离子和含量较低。

参考文献

- [1] 贾川. 我国生活垃圾焚烧发展现状与趋势 [J]. 环境与可持续发展, 2019, 4: 59.
- [2] 住房和城乡建设部. 城乡建设统计年鉴 [EB/OL]. (2019-01-24) [2019-03-01]. <http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljxsxytjgb/jstnj/index.html>.
- [3] 国家发展改革委. “十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划 [EB/OL]. (2016-12-31) [2020-11-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201701/t20170122_962225.html.
- [4] 孔少飞, 白志鹏. 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): 90.
- [5] 生态环境部. 环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南 [M]. 北京: 生态环境部, 2020.
- [6] HJ 618—2011. 环境空气 PM₁₀和 PM_{2.5}的测定重量法 [S].
- [7] HJ 656—2013. 环境空气 颗粒物 (PM_{2.5}) 重量法 手工监测方法技术规范及修改单 [S].
- [8] HJ 799—2016. 环境空气 颗粒物中水溶性阴离子 (F⁻、Cl⁻、Br⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、PO₄³⁻、SO₃²⁻、SO₄²⁻) 的测定 离子色谱法 [S].
- [9] HJ 800—2016. 环境空气 颗粒物中水溶性阳离子 (Li⁺、

- Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺) 的测定 离子色谱法 [S].
- [10] HJ 830—2017. 环境空气 颗粒物中无机元素的测定 波长色散 X 射线荧光光谱法 [S].
- [11] 温杰, 李博, 张秀丽, 等. 烟台市典型工业排放 PM_{2.5} 源成分谱特征研究 [J]. 环境科学研究, 2019, 32 (8): 1335.
- [12] 马召辉, 梁云平, 张健, 等. 北京市典型排放源 PM_{2.5} 成分谱研究 [J]. 环境科学学报, 2015, 35 (12): 4043-4052.
- [13] 刘晓宇. 典型固定燃烧源颗粒物排放特征研究 [D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2007: 1-91.
- [14] 韩斌. 燃煤尘稀释采样器的设计及成分谱建立方法研究 [D]. 天津: 南开大学, 2009: 23-24.
- [15] UPADHYAY N B. Size-differentiated chemical composition of re-suspended soil dust from the desert Southwest United States [J]. Aerosol & Air Quality Research, 2015, 15 (2): 387-398.