

文章编号 :1000-694X(2000)03-0264-05

# 贺兰山地区春季沙尘气溶胶的化学组分和富集因子分析\*

牛生杰<sup>1</sup>, 章澄昌<sup>2</sup>

(1. 宁夏气象科学研究所, 宁夏 银川 750002; 2. 北京气象学院, 北京 100008)

**摘 要:** 春季在贺兰山两侧的内蒙古吉兰泰和宁夏银川机场采集不同沙尘天气条件下的沙尘气溶胶浓度样本, 用中子活化分析测定 35 种元素浓度, 揭示了沙尘气溶胶中的元素浓度特征, 沙尘天气下沙尘气溶胶中地壳元素含量增加, 且含量随沙尘暴强度增强而增大。讨论了作为参考物质的地壳元素的取值及地球化学分类。沙尘气溶胶相对地壳和黄土的富集因子, 以亲硫元素和亲沉积层元素为最高。亲地壳元素中的主成分元素在有沙尘天气时, 其富集因子也偏高。

**关键词:** 沙尘天气; 地球化学元素; 浓度; 富集因子

中图分类号: P445.4 文献标识码: A

浮尘、扬沙、沙尘暴是我国西北地区春季, 尤其是 4、5 月间频繁出现的天气现象, 也是春季大气气溶胶的主要来源。其中沙尘暴是一种严重的灾害性天气, 它不仅造成极大的损失和久远的危害, 而且其本身就是一种大范围、高浓度的污染物, 也是地壳物质和土壤微粒进入大气层并通过大气传输而进行物质的再分布和再循环的重要过程。

空气中的沙尘气溶胶的浓度变化, 对人体和动物的呼吸系统的影响极为显著, 尤其是细颗粒物(PM<sub>2.5-10</sub>)易于富集空气中的重金属、酸性氧化物、有机污染物、细菌和病毒等, 且能较长时间悬浮在空中, 并输送到很远的地区。

本文主要讨论贺兰山两侧广大地区沙尘气溶胶的一些性质, 尤其关注其地球化学元素组成的特征, 以便为进一步了解沙尘现象引发的大气物理过程、天气气候影响和环境效应提供一些依据。

## 1 样本采集和分析

1996 年 4 5 月间我们分别在内蒙古阿拉善盟吉兰泰气象站和宁夏银川机场气象台进行了沙尘气溶胶综合观测, 包括 KB-120E 型和美制 PM10 型空气采样泵观测 TSP, Anderson 分级采样器观测沙尘粒子的质量谱, APS-3310A 型激光空气动力学粒子谱仪观测粒子的瞬时浓度谱、表面积谱和质量谱。并选择分别在两地出现的一次浮尘天气、三次扬沙天气、一次沙尘暴天气和一次背景大气的样本, 用中子活化分析(NA)<sup>[1]</sup>, 共测定了 35 种元素的浓度:

主成分(按含量大小排列): Al, Ca, Mg, Fe, Na, K, Ti, Mn;

微量元素: Cl, Zn, Ba, As, Ce, Rb, Cr, Sb, V, Nd, La, Br, Se, I, Th, Co, Sc;

痕量元素: Sm, Cs, U, In, Yb, Hf, Tb, Ta, Eu, Lu。

1997 年 4 月在内蒙古阿拉善右旗气象站和 1997 年 5 月在宁夏盐池气象站, 用上述相同型号仪器观测 TSP 和沙尘粒子的质量谱, 并进行离子浓度分析。

## 2 结果和讨论

### 2.1 元素的地球化学分类

为了便于分析, 以化学元素在地球各圈层中的实际分布量(包括元素的浓度和总量)为基础进行分类, 将地球化学元素分为 7 大类<sup>[2]</sup>, 其中不少元素具有多重属性, 在分类中仍有重叠。本文仅按绝对量归属, 分类如下:

- 亲酸性岩元素: K, Na, Ba, Rb, Cs, Ta, U, Th,
- 亲地壳元素: La, Ce, Yb, Lu
- 元素: 亲中性岩元素: Al, Na, Ba, Hf, Nd, Sm, Eu, Tb
- 亲基性岩元素: Ca, Mg, Fe, Mn, V, Sc, Zn, In, Eu
- 亲地幔元素: Mg, Cr, Mn, Al, Fe, Ca, Ti, Se, Co
- 亲地核元素: Fe, Co
- 亲硫元素: Zn, In, Se, As, Sb
- 亲沉积层元素: Cl, Br, I, As, Sb, Se
- 亲生物元素: K, Ca, Cl, Br

### 2.2 沙尘气溶胶中的元素浓度

位于贺兰山两侧的腾格里沙漠边缘的吉兰泰和位于贺兰山东侧的积风扇、距贺兰山不足 2 km 的银川机场两地扬沙和沙尘暴天气的各地壳元素含量均高于浮尘天气和背景大气, 而且能见度愈小, 高出的比例愈大, 不少元素的浓度可相差 10 倍以上(表 1, 表 2)。贺兰山东西两侧的沙尘气溶胶中的一般元素含量, 差异甚小, 说明沙尘源基本上属于同一类型。无论背景大气或有沙尘浮扬时, 均以亲地壳元素的浓度最高, 其中主成分元素的氧化物(除 SiO<sub>2</sub> 以外), 平均占总含量的 35.6%, 各元素的浓度一般在 10<sup>-1</sup>10<sup>0</sup> μg·m<sup>-3</sup>量级, 扬沙、沙尘暴时达峰值, 一般在 10<sup>1</sup> μg·m<sup>-3</sup>量级, 黑风暴时高达 10<sup>2</sup> μg·m<sup>-3</sup>量级<sup>[3]</sup>。亲硫元素、亲沉积层元素中, 背景大气与沙尘天气其浓度基本相当, 其中 Cr 在沙尘天气下, 浓度增加比较明显, 而 As 有明显的减小趋势。

\* 收稿日期: 1999-11-12; 改回日期: 2000-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(49565010)

作者简介: 牛生杰(1962—), 男(汉族), 宁夏中卫人, 硕士, 高级工程师, 主要从事云和降水及大气气溶胶研究。

表 1 吉兰泰地区沙尘气溶胶中的元素浓度及其在地壳和土壤中的富集因子

Tab.1 The element concentration of sand aerosol and the enrichment factor of crust and soil in Jilantai area

元素地球 化学分类	浮尘(1996-04-21 测)			扬沙(1996-04-23 测)			沙尘暴(1996-04-29 测)			扬沙(1996-04-30 测)				
	浓度/ (ng·m <sup>-3</sup> )	E <sub>f</sub> 地壳	E <sub>f</sub> 黄土	浓度/ (ng·m <sup>-3</sup> )	E <sub>f</sub> 地壳	E <sub>f</sub> 黄土	浓度/ (ng·m <sup>-3</sup> )	E <sub>f</sub> 地壳	E <sub>f</sub> 黄土	浓度/ (ng·m <sup>-3</sup> )	E <sub>f</sub> 地壳	E <sub>f</sub> 黄土		
亲酸性 岩元素	K	1 380	0.64	0.73	1 860	0.86	0.98	—	—	—	—	—		
	Na	1 450	0.60	1.12	6 200	2.58	4.77	2 660	1.11	2.05	1 995	0.83	1.53	
	Rb	10.2	0.13	0.11	40.9	0.50	0.43	23.0	0.28	0.24	14.2	0.17	0.15	
	Cs	0.82	0.24	0.11	1.8	0.53	0.24	0.16	0.047	0.021	1.0	0.29	0.13	
	Ta	0.10	0.084	0.095	0.39	0.33	0.37	0.22	0.18	0.21	0.14	0.12	0.13	
	U	0.38	0.23	0.14	1.7	1.0	0.63	0.84	0.51	0.31	0.52	0.32	0.19	
	Th	1.0	0.11	0.085	3.5	0.37	0.30	2.3	0.24	0.19	1.4	0.15	0.12	
	Ce	7.8	0.12	0.12	35.0	0.53	0.53	17.9	0.27	0.27	10.7	0.16	0.16	
	Yb	0.30	0.14	0.11	1.4	0.67	0.50	0.69	0.33	0.25	0.42	0.20	0.15	
	La	4.4	0.13	0.12	19.8	0.61	0.56	10.1	0.31	0.28	6.2	0.19	0.17	
亲地壳 元素	Lu	0.047	0.15	0.11	0.21	0.66	0.49	0.11	0.34	0.26	0.066	0.21	0.15	
	Al	4 900	1	1	22 100	1	1	12 100	1	1	5 700	1	1	
	Ba	70.5	0.10	0.15	79.1	0.12	0.16	81.2	0.12	0.17	78.6	0.12	0.16	
	Hf	0.36	0.086	0.051	1.6	0.38	0.23	0.83	0.20	0.12	0.50	0.12	0.071	
	Nd	3.0	0.60	1.12	13.5	2.58	4.77	6.8	1.11	2.05	4.2	0.83	1.53	
	Sm	0.52	0.098	0.088	2.4	0.45	0.41	1.1	0.21	0.19	0.73	0.14	0.12	
	Eu	0.099	0.085	0.083	0.45	0.36	0.35	0.23	0.19	0.18	0.14	0.11	0.11	
	Tb	0.094	0.13	0.11	0.42	0.60	0.47	0.22	0.31	0.25	0.13	0.19	0.15	
	亲基性 岩元素	Ca	7 300	2.4	1.2	2 500	0.82	0.42	15 400	5.1	2.6	7 800	2.6	1.3
		Mg	3 700	2.48	2.64	14 500	9.73	10.36	9 800	6.58	7.0	4 900	3.29	3.50
Mn		87	1.14	1.34	390	5.1	6.0	210	2.7	3.2	96	1.3	1.5	
Fe		3 860	1.05	0.94	10 440	2.83	2.55	8 100	2.20	1.98	5 400	1.46	1.32	
V		9.5	0.092	0.12	43	0.42	0.52	22	0.21	0.27	11	0.11	0.14	
Sc		0.91	0.065	0.078	4.0	0.29	0.34	2.1	0.15	0.18	1.3	0.093	0.11	
Zn		180	2.5	2.6	140	1.9	2.1	146	2.0	2.1	166	2.3	2.4	
亲地幔 元素	Cr	16.8	0.32	0.25	33.6	0.65	0.49	30.8	0.59	0.45	23.2	0.45	0.34	
	Ti	360	0.086	0.095	1 900	0.36	0.50	1 000	0.24	0.26	520	0.12	0.14	
	Co	1.9	0.13	0.15	6.7	0.44	0.53	4.3	0.28	0.34	2.7	0.18	0.21	
亲硫 元素	In	0.14	2.0	3.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	Se	2.6	33.8	21.7	1.8	23.4	15.0	1.9	24.7	15.8	2.1	27.3	17.5	
	As	30.8	8.3	2.4	16.2	4.3	1.3	17.4	4.7	1.4	20.6	5.5	1.6	
	Sb	8.9	52.4	8.6	7.6	44.7	7.3	7.9	46.5	7.6	10.8	63.5	10.4	
新沉积 层元素	Cl	2 200	33	32	3 500	53	51	1 800	27	26	2 100	32	31	
	Br	7.8	3.1	3.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	I	2.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

### 2.3 沙尘气溶胶中元素的富集因子

为了讨论不同地区气溶胶中元素浓度的变化特征,可定义一元素的富集因子<sup>[1]</sup>E<sub>f</sub>:

$$E_f = \frac{\frac{C_x}{C_r} \text{ 质粒}}{\frac{C_x}{C_r} \text{ 参考}}$$

式中 C<sub>x</sub> 是所研究的质粒含有元素的浓度, C<sub>r</sub> 为参考物质元素的浓度。参考物质最好选择所在地区的大气本底气溶胶,但要获得本底气溶胶元素组成资料很困难。一般选择全球平均地壳物质中或当地土壤中含量丰富、受人为污染影响小的

元素作为替代。常用的有 Al、Ti、Fe 等,本文中选用 Al 作为参考元素。以地壳平均为参考物质计算的富集因子称为相当于地壳的富集度,以土壤参考物质计算的富集因子称为相当于土壤的富集度。

地壳化学元素丰度的研究,从 Clark(1924)<sup>[4]</sup>发表地壳的组成至今已 70 多年了,期间诸多学者以不同的方法,对地壳的主要化学元素丰度取得了基本一致的结果,但其内涵并不相同,认识也在不断深化,许多微量元素、痕量元素的分析技术仍在不断改进,一些难测的元素迄今仍为概量估计值。70 年代以来人们对区域整体地壳的实测研究,已作为现代了解地壳化学组成的主要方面,并以区域地壳的值近似地代表

表2 银川地区沙尘气溶胶中的元素浓度及其在地壳和土壤中的富集因子

Tab.2 The element concentration of sand aerosol and the enrichment factor of crust and soil in Yincuan area

元素地球化学分类	扬尘(1996-05-06测)			背景(1996-05-11测)		
	浓度/ (ng·m <sup>-3</sup> )	<i>E<sub>f</sub></i> <sub>地壳</sub>	<i>E<sub>f</sub></i> <sub>黄土</sub>	浓度/ (ng·m <sup>-3</sup> )	<i>E<sub>f</sub></i> <sub>地壳</sub>	<i>E<sub>f</sub></i> <sub>黄土</sub>
K	—	—	—	480	0.22	0.25
Na	2 038	0.85	1.57	555	0.23	0.43
Rb	15.0	0.18	0.16	4.6	0.057	0.048
Cs	0.90	0.26	0.12	0.37	0.11	0.049
Ta	0.12	0.10	0.11	0.05	0.042	0.048
U	0.50	0.30	0.19	0.17	0.1	0.063
Th	1.3	0.14	0.11	0.45	0.047	0.038
Ce	10.8	0.16	0.16	3.5	0.053	0.053
Yb	0.42	0.20	0.15	0.14	0.067	0.05
La	6.3	0.19	0.17	2.0	0.06	0.056
Lu	0.067	0.21	0.15	0.021	0.066	0.049
Al	6 400	1	1	2 000	1	1
Ba	82.2	0.12	0.17	31.7	0.047	0.066
Hf	0.48	0.11	0.069	0.16	0.038	0.023
Nd	4.3	0.15	0.13	1.4	0.049	0.044
Sm	0.75	0.14	0.13	0.23	0.043	0.039
Eu	0.15	0.12	0.12	0.045	0.036	0.035
Tb	0.14	0.20	0.16	0.042	0.06	0.047
Ca	1 200	3.7	1.9	4 900	1.6	0.83
Mg	4 700	3.15	3.36	1 500	1.01	1.07
Mn	110	1.4	1.7	37	0.48	0.57
Fe	5 360	1.45	1.31	1 740	0.47	0.42
V	13	0.13	0.16	3.8	0.037	0.047
Sc	1.2	0.086	0.10	0.41	0.029	0.035
Zn	170	2.4	2.5	185	2.6	2.7
Cr	23.4	0.45	0.34	7.6	0.15	0.11
Ti	500	0.12	0.14	150	0.036	0.039
Co	2.6	0.17	0.20	0.86	0.057	0.068
In	—	—	—	—	—	—
Se	2.0	26.0	16.7	2.8	36.4	23.3
As	21.8	5.8	1.7	32.6	8.7	2.6
Sb	11.6	68.2	11.2	22.8	134.1	21.9
Cl	1 100	17	16	790	12	11
Br	5.8	2.3	2.2	16	6.4	6.2
I	—	—	—	1.5	3.0	9.4

括 GSR-2 石英角闪安山岩<sup>[5]</sup>, B<sub>1</sub> 内蒙古地轴<sup>[6]</sup>和 C<sub>4</sub> 西秦岭褶皱带<sup>[6]</sup>, 为了具有延续性, 同时参考 Masor(1982)<sup>[4]</sup> 得出确定值(表3)。表中同时列出中国土壤<sup>[6]</sup>和黄土(GSS-8)<sup>[5]</sup>的平均化学组成。考虑后两者差异不大, 而且本文沙尘天气的局地源贴近黄土高原, 故选用黄土平均化学组成作为参考物质。

表3 不同研究者对大陆地壳和土壤化学元素估计值

Tab.3 The chemical element estimated values of crust and soil from researchers

元素	单位	GSR-2	B <sub>1</sub>	C <sub>4</sub>	Mason (1982)	本文确定值	中国土壤	GSS-8
Al	10 <sup>-2</sup>	8.56	7.58	7.16	8.13	7.86	6.8	6.3
As		2.1	2.1	8.9	1.8	3.73	10	12.7
Ba	10 <sup>-6</sup>	1 020	750	508	425	675.8	500	480
Br		—	—	—	2.5	2.5	3.5	2.6
Ca	10 <sup>-2</sup>	3.71	2.27	0.53	3.63	3.04	2.3	5.9
Ce		40	86	69	60	66.3	72	66
Cl		42	94	62	130	66	68	68
Co		13.2	15	17	25	15.1	13	12.7
Cr	10 <sup>-6</sup>	32.4	55	68	100	51.8	65	68
Cs		2.3	2.3	6.0	3	3.4	7	7.5
Eu		1.02	1.2	1.24	1.2	1.17	1.2	1.2
Fe	10 <sup>-2</sup>	3.43	3.79	3.84	5.0	3.69	4.2	4.1
Hf		2.9	5.0	5.8	3	4.18	7.4	7.0
I	10 <sup>-6</sup>	—	—	—	0.5	0.5	2.2	1.6
In		0.033	—	—	0.1	0.07	0.055	0.043
K	10 <sup>-2</sup>	1.52	2.66	1.88	2.59	2.16	2.0	1.9
La		21.8	43	36	30	32.7	38	35.5
Lu	10 <sup>-6</sup>	0.12	0.30	0.35	0.5	0.32	0.40	0.43
Mg	10 <sup>-2</sup>	—	1.04	1.35	2.09	1.49	1.1	1.4
Mn	10 <sup>-6</sup>	604	705	802	950	765	600	650
Na	10 <sup>-2</sup>	2.86	2.40	1.51	2.83	2.4	1.2	1.3
Nd		19	35	31	28	28.3	32	32
Rb		37.6	99	98	90	81.2	100	96
Sb		0.12	0.19	—	0.2	0.17	0.8	1.04
Sc		9.5	10.5	14	22	14	11	11.7
Se		0.063	0.073	0.12	0.05	0.077	0.2	0.12
Sm		3.4	6.0	5.7	6.0	5.3	5.8	5.8
Ta	10 <sup>-6</sup>	0.46	1.25	1.04	2	1.19	1.1	1.05
Tb		0.41	0.72	0.77	0.9	0.7	0.8	0.89
Th		2.6	9.4	12	7.2	9.5	12.5	11.8
Ti		3 090	4 370	4 900	4 400	4 200	4 300	3 800
U		0.90	1.7	2.2	1.8	1.65	2.7	2.7
V		95.5	78	104	135	103	82	81.4
Yb		0.89	1.9	2.3	3.4	2.1	2.6	2.8
Zn		71	73	73	70	71.8	68	68

总陆地地壳的组成。在这一发展趋势下, 我国 80 年代以来采集了大量标准地层剖面和岩体样本, 确定了地球化学标准推荐值<sup>[5]</sup>和中国东部地壳化学组成估计值<sup>[2]</sup>。

国内研究者在计算富集因子时一般采用早期的国外资料<sup>[3, 68]</sup>, 其中 Masor(1982)<sup>[4]</sup>所列, 对丰度在 10<sup>-3</sup> 以上的元素取自 Clarke(1924), 而微量和痕量元素取自 Taylor(1964)<sup>[4]</sup>, 而刘东生(1982)则取自 BblHoIpaqok(1962)<sup>[7]</sup>。

为了提高富集因子的区域准确度和代表性, 本文采用的地壳平均参考物质的元素和参考元素 Al, 主要考虑国内的实测, 而且其测试的准确度和技术方法均已达国际先进水平, 包

由表 2 中所列可以看出, 在沙尘气溶胶中, 亲硫元素的富集程度均比较高, 其中尤以易挥发性元素 Sb 和 Se 相对于地壳的富集度为最高, *E<sub>f</sub>*<sub>地壳</sub> 分别达 50100 和 2535。另外元素 As 相对于地壳的 *E<sub>f</sub>* 也在 59 之间。它们均主要来自人为排放源的影响, 如化石燃料的燃烧、矿石冶炼、汽车尾气等的排放。沙尘天气期间 *E<sub>f</sub>* 反而有一定幅度的降落。同时银川机场的 *E<sub>f</sub>* 值要明显高于吉兰泰的值, 表明银川城市局地污染的作用相当明显。

亲沉积层元素 Cl、Br、I 的富集程度也比较高, 尤其是易溶组分 Cl, 其 *E<sub>f</sub>* 高达 1153, 而且出现扬沙和沙尘暴时, 其值

明显高于浮尘天气和背景大气,表明沙尘天气条件下沙尘主要来自自然源。吉兰泰气象站近旁即为盐湖及盐碱化工厂,而银川以北不到 100 km 也有盐湖并建有盐碱化工企业群。吉兰泰站的 Cl 富集因子高于银川 2 倍以上。

亲地壳元素 Mg、Zn、Ca、Fe、Na 在有沙尘天气时,其富集因子偏高,尤其是元素 Mg,在沙尘天气时,  $E_f$  已达 10 的量级。其余 4 种元素的富集程度不太高,与地壳平均丰度接近。它们主要来自沙漠和土壤等自然源。

沙尘气溶胶中的微量元素和痕量元素,有不少显示出不同程度的贫化,主要有 Sm、Ta、Sc、V、Ba、Hf、Eu 和 Ti 等元素,其中有一半为稀土类元素,而且表现为背景大气和非局地的浮尘天气下的气溶胶中元素贫化程度更显著。

土壤元素比地壳元素相对富集的有 As、Cs、Hf、U、Sb、Se,而土壤中 Na 明显低于地壳的值,这就造成了相对土壤尘的富集度的相应变化,即 As、Cs、Hf、U、Sb、Se 其相对于黄土的富集度比相对于地壳的富集度明显偏低,而只有元素 Na,其相对于黄土的富集度比相对于地壳的富集度明显偏高。其它元素的  $E_{f,地壳}$  和  $E_{f,黄土}$  相差均很小。而且中国土壤与黄土的元素含量相差不大,只有元素 Ca 的含量黄土高于中国土壤 2 倍以上,元素 Se 的含量,黄土低于中国土壤不到 2 倍。

沙尘气溶胶的富集与贫化反映出一些规律性:一般与地壳母岩成分密切相关,同时受地表风化特征和颗粒分选作用的影响。元素的易挥发性常使其富集度明显提高,污染元素易在细颗粒富集。

不同地区不同天气条件下沙尘气溶胶总悬浮颗粒的质量浓度和离子浓度如表 4 所示。背景大气质量浓度盐池远低于阿拉善右旗。浮尘天气下,质量浓度一般高于背景大气,其间差异视浮尘天气的能见度而异。能见度愈小,质量浓度差异愈大。盐池亲地壳主成分的离子浓度在浮尘时明显高于背景大气,与前述趋势基本一致。但阿拉善右旗却相反,包括  $Cl^-$  作为亲沉积层元素,两种情况相差不大,而且反而是背景大气

的离子数超过浮尘天气,值得进一步探讨。

表 4 不同天气条件下沙尘气溶胶(TSP)的质量浓度和离子浓度

Tab. 4 The mass and ion concentration of sand aerosol under sand weathers

地区	内蒙古阿拉善右旗		宁夏盐池	
时间	浮尘 <sup>①</sup> 1997-04-07	背景 <sup>②</sup> 1997-04-12	背景 <sup>③</sup> 1997-05-06	浮尘 <sup>④</sup> 1997-05-06
质量浓度	226	191	62	265
H <sup>+</sup>	0.034	0.006	0.075	0.005
Na <sup>+</sup>	43.64	58.25	25.98	86.17
K <sup>+</sup>	3.16	12.75	2.39	7.92
Ca <sup>2+</sup>	126.62	206.29	110.65	230.43
Mg <sup>2+</sup>	8.92	36.07	18.89	40.34
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	51.37	52.36	35.07	87.53
Cl <sup>-</sup>	33.42	46.58	20.43	71.33
F <sup>-</sup>	1.13	1.51	0.35	0
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	7.20	17.66	9.89	31.57
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	123.25	196.68	83.50	247.5
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	73.03	92.66	66.02	129.24
Σ <sup>+</sup>	233.74	365.73	193.06	452.40
Σ <sup>-</sup>	238.03	355.09	180.19	479.64

注:质量浓度单位  $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ ,离子浓度单位  $(\text{neq}\cdot\text{m}^{-3})$ 。① 10:00 至翌日 01:00 测;② 10:15—17:55 测;③ 07:55—12:55 测;④ 13:00—18:00 测。

有关背景大气的气溶胶质量谱和离子浓度谱如表 6 所示。质量浓度也表现为双峰,主峰在第 1 级,次峰在第 6 级。细颗粒的质量浓度虽低,其离子浓度并不低,而且  $NH_4^+$ 、 $F^-$ 、 $SO_4^{2-}$  明显偏高,由此证明污染离子易于在细颗粒上富集。从表 5 来看,沙尘气溶胶离子的极性总体上仍基本维持平衡,说明沙尘气溶胶的荷电量较弱。

表 5 阿拉善右旗 Anderson 采样器观测的质量谱和离子浓度谱\*

Tab. 5 The mass and ion concentration spectra observed by Anderson Sample Instrument at Alashanyouqi station

等级	1	2	3	4	5	6	7	8	9	合计
尺度范围/ $\mu\text{m}$	109	95.8	5.84.7	4.73.3	3.32.1	2.11.1	1.10.65	0.650.43	<0.43	
质量浓度/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	35.9	33.77	10.3	11.2	12.1	17.1	2.9	4.2	6.5	138.4
H <sup>+</sup>	0.009	0.01	0.01	0.011	0.012	0.014	0.014	0.019	0.024	0.123
Na <sup>+</sup>	6.59	8.37	5.92	9.3	7.74	6.58	9.74	7.93	6.66	68.83
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0	1.57	0.89	7.12	22.74	37.58	27.72	30.71	41.67	170
K <sup>+</sup>	2.63	1.64	0	0.72	0.43	1.37	0.54	2.78	0.38	10.49
Ca <sup>2+</sup>	62.13	46.95	32.21	30.75	27.73	29.06	18.75	22.37	22.96	292.91
Mg <sup>2+</sup>	10.34	7.51	3.17	4.28	0.86	3.04	0.73	1.21	0.2	31.34
F <sup>-</sup>	0	0	0.44	0.44	0.49	1.38	0.74	1.04	0.69	5.22
Cl <sup>-</sup>	10.98	6.35	2.12	4.23	2.91	2.38	0.26	2.38	2.91	34.52
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	6.25	2.04	0.12	0.88	1.3	2.38	2.22	3.47	3.2	21.86
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	25.72	22.51	25.63	29.22	35.2	30.65	33.26	39.12	40.85	282.16
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	33.17	33.83	13.05	27.19	20.56	18.82	19.36	18.82	16.1	200.9
Σ <sup>+</sup>	81.70	66.05	42.20	52.18	59.51	77.64	57.49	65.02	71.89	573.69
Σ <sup>-</sup>	76.12	64.73	41.36	61.96	60.46	55.61	55.84	64.83	63.75	544.66

注:本次观测期间为 1997 年 4 月 10 日 17:30—12 日 17:50,无沙尘天气出现,可视为背景大气特征。

万方数据

### 3 结语

(1) 采用以化学元素在地球各圈层中的实际分布量为基础, 进行地球化学元素分类, 利于对元素作全面和定量化包括富集程度的表述。

(2) 沙尘天气下以亲地壳元素为主的气溶胶元素浓度均高于背景大气和浮尘天气, 而且沙尘暴强度大, 元素浓度的增加显著, 背景大气、浮尘天气条件下亲地壳元素的浓度一般在  $10^{-1} \sim 10^0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  量级, 扬沙、沙尘暴时一般达  $10^1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  量级, 黑风暴时高达  $10^2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  量级。

(3) 研究气溶胶元素的富集度时, 应以区域地壳和当地土壤的元素丰度作为参考物质和参考元素, 以提高计算和分析的准确度和代表性。

(4) 在沙尘气溶胶中, 亲硫元素和亲沉积层元素富集程度均较高, 尤以易挥发性元素 Sb 和 Se 以及易溶组分 Cl 的富集因子最高, 分别达 50100、2535 和 1153。亲地壳类元素 Mg、Zn、Ca、Fe、Na 在沙尘天气时, 其富集因子偏高, 尤其是元素 Mg 其富集因子可达 10 的量级。沙尘气溶胶中的微量元素和痕量元素产生明显贫化的有 Sm、Ta、Sc、V、Ba、Hf、Eu、Ti 等。

(5) 元素的易挥发性常使其富集明显提高, 污染元素易在细颗粒富集。浮尘天气下沙尘质量浓度一般高于背景大气。盐池亲地壳主成分的离子浓度在浮尘天气下明显高于背景大气, 阿拉善右旗则相反, 背景大气的离子浓度超过浮尘天气, 这与沙尘气溶胶中元素的富集与贫化的规律性、不同沙尘天气条件下沙尘气溶胶元素浓度及富集因子之间的相互关系等问题, 均需进一步深入研究。

#### 参考文献(References):

[1] Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. The Lecture of Atmospheric Aerosol[M]. Beijing: Meteorology Press, 1995. 220. [章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程[M]. 北京: 气象出版社, 1995. 229.]

- [2] Yan Mingcai, Chi Qinghua. The chemical composition of the crust and rock in east China[M]. Beijing: Science Press, 1997. 16—21, 24—29, 126—127, 241—247. [ 鄯明才, 迟清华. 中国东部地壳与岩石的化学组成[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 16—21, 24—29, 126—127, 241—247. ]
- [3] Yang Dongzhen, Yu Xiaolan, Yan Peng, *et al.* The analysis of sand aerosol about the Black Wind Storm on May 5, 1993[A]. The Sand Storm Research in China[C]. Beijing: Meteorology Press, 1977. 103—110. [ 杨东贞, 于晓岚, 颜鹏, 等. “93.5.5 黑风”沙尘气溶胶的分析[A]. 中国沙尘暴研究[C]. 北京: 气象出版社, 1997. 103—110. ]
- [4] Mason B, Moore. Principles of Geochemistry[M], 4th Ed. New York: John Wiley & Sons, 1982. 46—47.
- [5] The study group of the geochemistry standard referential sample. The method of research and analysis of the geochemistry standard referential sample(GSR1-6, GSS1-8, GSD9-12) [S]. Beijing: Geology Press, 1987. 31—36, 43—63. [ 地球化学标准参考样研究组. 地球化学标准参考样的研制与分析方法(GSR1-6, GSS1-8, GSD9-12) [S]. 北京: 地质出版社, 1987. 31—36, 43—63. ]
- [6] Xia Xuncheng, Yang Gensheng. The disaster and prevention of sand storm in northwest China[M]. Beijing: China Environment Science Press, 1996. 26—58. [ 夏训诚, 杨根生. 中国西北地区沙尘暴灾害及其防治[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 26—58. ]
- [7] Liu Dongsheng, *et al.* The Loess and Environment[M]. Beijing: Science Press, 1985. 202—208, 248. [ 刘东生, 等. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 202—208, 248. ]
- [8] Wang Mingxing. Atmospheric Chemistry (the second published) [M]. Beijing: Meteorology Press, 1999. 193—198. [ 王明星. 大气化学[M]. 北京: 气象出版社, 1999. 193—198. ]
- [9] Wei Fusheng, Cheng Huisheng. The background value research of the soil environment in China[J]. *Environment Science*, 1991, 12(4): 12—19. [ 魏复盛, 陈辉生. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, 12(4): 12—19. ]

## Researches on Sand Aerosol Chemical Composition and Enrichment Factor in the Spring at Helan Mountain Area

NIU Sheng-jie<sup>1</sup>, ZHANG Cheng-chang<sup>2</sup>

(1. Ningxia Institute of Meteorological Science, Yinchuan 750002, China; 2. Beijing Meteorological College, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Sand aerosols are sampled during April and May, 1996, on both side of Helan mountain: Jilantai meteorological station, inner mongolia (West side) and Yinchuan airport, Ningxia (east side). The 35 chemical elements are analysed by using neutron activated method (NA), and the element concentration features of sand aerosol are reported in this paper. It shows that the concentration of crust elements increases when sand and dust weather occurs, and the concentration increases with the increasing sandstorm intensity. The value of crust elements as a reference material and geochemistry classification are discussed. The enrichment factor of sand aerosol which relate to crust and loess is the highest for absorbent sulphate and sedimental elements. The enrichment factor of mainly absorbent element is also high under dust and sand weather conditions.

**Key words:** dust and sand weather; geochemical element concentration; enrichment factor