

# 1998 年南极中山站海洋气溶胶的化学组成及其来源判别

黄自强<sup>1</sup>, 暨卫东<sup>1</sup>, 杨绪林<sup>1</sup>, 黄荣坦<sup>2</sup>, 汤荣坤<sup>1</sup>, 于涛<sup>1</sup>, 张功勋<sup>1</sup>

(1 国家海洋局 第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 2 厦门大学 数学系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 从 1998 年 3 月 7 日至 1999 年 3 月 2 日 历时 12 个月, 在南极中山站连续采集 52 个海洋气溶胶样品, 提供全部样品的 13 种化学元素铜、铅、锌、镉、铁、铝、锰、铬、钒、钾、钠、钙、镁含量的实测值. 研究表明中山站气溶胶化学成分的含量具有季节性变化的特征. 通过富集因子、相关分析、因子分析等方法判别中山站气溶胶化学成分的来源.

**关键词:** 大气科学; 南极; 海洋气溶胶; 化学组成; 来源判别

中图分类号: O616 文献标识码: A 文章编号: 0253-4193(2005)03-0059-08

## 1 引言

南极是远离人类活动的大陆, 它的周围为南大洋所环绕, 90% 以上的面积为冰川和雪所覆盖. 大风吹起的地面尘埃很少, 而且是尚未受到或最小受到人类干扰破坏的大陆. 因此, 研究南极大气气溶胶的化学组成及判别其来源, 对阐述南极现在的自然环境特征及其对全球环境变化方面具有特殊意义. 国外对南极气溶胶化学组成的测定与研究起步较早, 1981 年 Cunningham 和 Zoller<sup>[1]</sup> 报道了南极点 (90°S) 气溶胶 15 种化学元素的含量. 同年 Koide 等人报道南极昭和站 (69°00' S, 39°35' E) 气溶胶 8 种化学元素的含量<sup>[2]</sup>. Mazzera 等于 1995~1996 年和 1996~1997 年南方夏季期间在南极 McMurdo 站采集直径小于 10 μm 的气溶胶可吸入颗粒 (PM<sub>10</sub>), 研究 PM<sub>10</sub> 和硫酸盐的来源, 作了较为详细的报道<sup>[3]</sup>. 我国上南极采集气溶胶样品的工作不多, 吕位秀等于 1985 年 1 月在南极昭和基地采集 9 d 的气溶胶样品, 报道了昭和基地气溶胶 10 种化学元素的浓度<sup>[4]</sup>. 李天杰、曹俊忠等研究了南极大气气溶胶的物理化学特征与环境变化, 综述南极大气气溶胶的研

究现状, 并以 1991 年 6 月 Pinatuto 火山和同年 9 月 Hudson 火山爆发为例, 探讨火山爆发所产生的大气气溶胶对南极环境的影响<sup>[2]</sup>. 国内外的研究者只是采集南极夏天的气溶胶样品作研究对象, 并未研究过南极一年四季的气溶胶化学特性.

本文报道了南极中山站上空 1 周年气溶胶的化学组成及其季节变化的特征, 提供了中山站上空海洋气溶胶化学元素含量的年平均值, 探索气溶胶主要成分的来源, 对于研究远离大陆的海洋边界层的海气物质交换, 探索南极大气海洋在全球生物化学循环和交换中的作用, 具有十分重要的科学意义.

## 2 样品的采集和分析

### 2.1 样品的采集

在南极中山站 (69°20' S, 76°26' E) 高空物理楼附近的小山上安装海洋气溶胶采样设备, 采样器是美国生产的 M400 大气气体采样器, 滤膜为英国瓦特曼 41 型滤纸, 采样头离地面 2.2 m 左右. 1998 年 3 月 7 日至 1999 年 3 月 2 日连续采集大气气溶胶样品 52 个, 根据天气条件, 每隔 6~7 d 换膜一次, 收集样品, 记下流量计读数和连续采集的累计时间, 计

收稿日期: 2003-11-03; 修订日期: 2004-04-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49976022).

作者简介: 黄自强 (1940—), 男, 福建省永春县人, 研究员, 从事海洋化学研究. E-mail: Huangzhiqian@sina.com

算采集气体样品的体积数, 每个样品采集的平均抽气量约为  $6\ 000\ \text{m}^3$ 。

## 2.2 样品分析

在 100 级的洁净实验室, 用有机玻璃剪刀剪取一定面积的滤膜, 并将剪好的滤膜放入聚四氟乙烯坩埚内(如果面积较大可适当剪成小块, 这样可使滤膜贴近底部)。将一定数量的超纯硝酸(分析超纯再经亚沸蒸馏)和氢氟酸加入坩埚内, 盖好坩埚盖子, 样品酸浸过夜。将浸好的样品放在电热板上加热消化, 消化完后用体积分数为 2% 的  $\text{HNO}_3$  溶液溶出并定容。定容样品中的铜、铅、锌、镉、铁、铝、锰、铬、钒等微量重金属元素用石墨炉原子吸收法测定<sup>[5,6]</sup>, 而样品中的钾、钠、钙、镁等元素用火焰原子吸收法测定。每个元素的测定值均扣除滤膜的空白

值。应用标准添加法进行回收率实验, 每个元素的回收率均在 96% ~ 103%。每个元素的双份重复实验的相对标准偏差小于 2%。分别取两个样品的 5 份等同面积的滤膜, 以相同步骤进行消化、定容、分析测定, 样品中每个元素含量的相对标准偏差小于 7%。

## 3 结果和讨论

### 3.1 气溶胶中元素含量观测值的变化特征

1998 年 3 月 7 日至 1999 年 3 月 2 日一周年采集的样品 52 个, 将每个样品的 13 种元素的含量依序绘成图 1, 纵坐标为各元素的含量, 横坐标为观测序号, 按采样的时间先后顺序列出, 观测序号对应的采样月份见表 1。

表 1 观测序号与采样月份

观测序号	1~ 5	6~ 9	10~ 14	15~ 17	18~ 21	22~ 26	27~ 31	32~ 35	36~ 39	40~ 43	44~ 48	49~ 52
采样年月	1998 年 3 月	1998 年 4 月	1998 年 5 月	1998 年 6 月	1998 年 7 月	1998 年 8 月	1998 年 9 月	1998 年 10 月	1998 年 11 月	1998 年 12 月	1999 年 1 月	1999 年 2 月

从图 1 可见, 气溶胶 13 种元素的含量分布是呈现脉冲波动式变化, 对一般认为的异常值要加以特别分析, 它们也许是反映环境气候条件的突变, 如序号 9 样品的元素含量多数较高, 可能与 1998 年南美洲、澳大利亚大面积森林火灾有关。各元素含量观测值的特征表述如下: 气溶胶中铜含量在 1999 年 1 月至 2 月上旬最高, 最高值为  $14.85\ \text{ng}/\text{m}^3$  (序号 47); 铅含量的高值在 1999 年 1 月, 最高值为  $5\ 666\ \text{ng}/\text{m}^3$  (序号 46); 锌含量比较均匀, 大于  $15\ \text{ng}/\text{m}^3$  的观测序号是 9, 12, 20, 22, 47, 最高值是  $28.89\ \text{ng}/\text{m}^3$  (序号 20)。镉含量普遍是低值, 大于  $0.15\ \text{ng}/\text{m}^3$  的样品是观测序号 9, 18, 25, 45, 46, 47, 48, 其中 1999 年 1 月序号 48 的样品镉含量最高值为  $0.90\ \text{ng}/\text{m}^3$ ; 铁含量大于  $32\ \text{ng}/\text{m}^3$  的样品序号为 4, 5, 9, 12, 28, 29, 44, 49, 50, 最高值为  $110.8\ \text{ng}/\text{m}^3$  (序号 9); 铝含量比较均匀, 大部分在  $50\ \text{ng}/\text{m}^3$  以下, 序号 9 的样品含量高达  $337.5\ \text{ng}/\text{m}^3$ ; 锰含量的高值是在 1998 年 3~ 5 月以及 1999 年 1~ 2 月, 最高值为  $4.35\ \text{ng}/\text{m}^3$  (序号 9); 铬含量的高值是在 1998 年 3~ 5 月, 序号 9 的观测值为  $4.135\ \text{ng}/\text{m}^3$ ; 钒含量的高观测值出现在 1998 年 3~ 5 月、7 月以及 1999 年的 2 月(序号为 5, 9, 11, 12, 18, 50), 最高值在 1999 年的 2 月, 为  $2.59\ \text{ng}/\text{m}^3$  (序号 50); 钾含量最高值为  $3.01\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  出现在 1998 年 4 月(序号 9), 这是一

枝独秀, 可能与 1998 年南美洲、澳大利亚大面积森林火灾植物燃烧灰尘的降落有关; 钠含量的最高值出现在 1998 年 7~ 8 月, 样品号为 18, 24, 最高值分别为  $17.0$  和  $17.8\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 钙含量的高值样品出现在 1998 年 7~ 8 月(序号 18, 24), 最高值为  $0.72\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  (序号 24); 镁的高值样品出现在 1998 年 5~ 8 月(序号 18, 22, 24), 最高值为  $1.12\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  (序号 18)。

纵观图 1, 海洋气溶胶中重金属铜、铅、镉、钒等元素含量在 1998 年 12 月至 1999 年 3 月(南极春夏秋冬)出现高的观测值, 在冬季则出现低值。一般认为来自海水源的钾、钠、钙、镁等元素的含量在 1998 年 12 月至 1999 年 3 月(南极春夏秋冬)出现低值, 在冬季出现高的观测值, 呈现出季节性的变化。序号 9 样品中的铁、铅、锰、铬、钾的含量为这一周年的高的观测值。

### 3.2 中山站气溶胶元素含量的月平均值变化特征

在中山站连续采集的 52 个海洋气溶胶样品, 对每个样品分析测定 13 种元素, 按月份划分计算各元素含量的月平均值。

由观测数据研究表明: 铜含量的月平均值为  $0.175\sim 5.742\ \text{ng}/\text{m}^3$ , 总平均值为  $1.280\ \text{ng}/\text{m}^3$ , 在 1998 年 12 月、1999 年 1~ 2 月为高含量, 其余时间段都为低值季节; 铅含量的月平均值为  $0.146\sim$

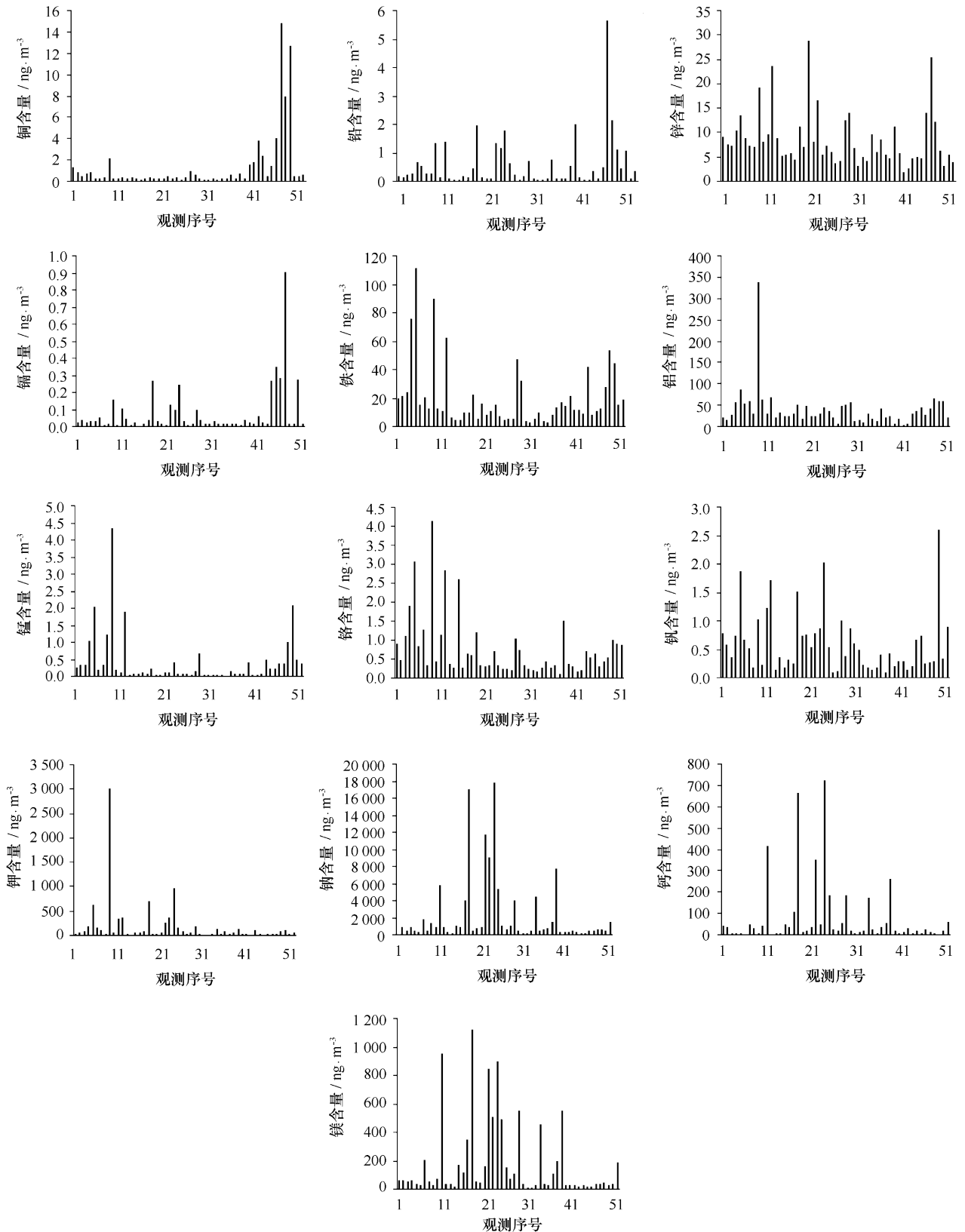


图 1 1998 年 3 月至 1999 年 2 月各样品的元素含量

1.  $900 \text{ ng/m}^3$ , 总平均值为  $0.559 \text{ ng/m}^3$ , 高值出现在 1999 年 1 月; 锌含量的月平均值为  $3.718 \sim 13.736 \text{ ng/m}^3$ , 总平均值为  $8.353 \text{ ng/m}^3$ , 高值出现在 1998 年 7 月、1999 年 1 月; 镉含量的月平均值为  $0.016 \sim 0.362 \text{ ng/m}^3$ , 总平均值为  $0.070 \text{ ng/m}^3$ , 1999 年 1 月出现高值, 其余月份都是低含量; 铁含量的月平均值为  $5.44 \sim 50.25 \text{ ng/m}^3$ , 总平均值为  $19.75 \text{ ng/m}^3$ , 在 1998 年 3~4 月、1999 年 2 月出现高含量, 在 1998 年 6~8 月为低含量; 铝含量的月平均值为  $8.110 \sim 120.3 \text{ ng/m}^3$ , 总平均值为  $38.87 \text{ ng/m}^3$ , 1998 年 4 月为最高值, 1999 年 2 月为次高值, 其余多数月份都在总平均值以下; 锰含量的月平均值为  $0.030 \sim 1.524 \text{ ng/m}^3$ , 总平均值为  $0.406 \text{ ng/m}^3$ , 高含量的月份出现在 1998 年 4 月和 1999 年 2 月, 1998 年 6~12 月是低含量的月份; 铬含量月平均值为  $0.255 \sim 1.640 \text{ ng/m}^3$ , 总平均值为  $0.768 \text{ ng/m}^3$ , 高含量的月份出现在 1998 年 3~6 月以及 1999 年 2 月, 低含量出现在 1998 年 8~12 月, 随月份变化波动性稍大; 钒含量月平均值为  $0.227 \sim 1.024 \text{ ng/m}^3$ , 总平均值为  $0.578 \text{ ng/m}^3$ , 1998 年 10 月至 1999 年 1 月是低含量, 1998 年 7 月至 8 月以及 1999 年 2 月是高含量月份, 随月份变化波动性大; 钾含量的月平均值为  $20.86 \sim 824.8 \text{ ng/m}^3$ , 总平均值为  $172.4 \text{ ng/m}^3$ , 高含量出现在 1998 年 4 月和 8 月, 1998 年 9 月至 1999 年 2 月为低含量; 钠含量的月平均值为  $304.8 \sim 8970 \text{ ng/m}^3$ , 总平均值为  $2124 \text{ ng/m}^3$ , 高含量出现在 1998 年 7~8 月, 低含量出现在 1998 年 3~4 月以及 1998 年 12 月至 1999 年 2 月; 钙含量的月平均值为  $12.90 \sim 264.2 \text{ ng/m}^3$ , 总平均值为  $74.18 \text{ ng/m}^3$ , 1998 年 7 月和 8 月出现高含量, 1998 年 3~4 月、1998 年 12 月至 1999 年 2 月为低含量月份; 镁含量月平均值为  $23.80 \sim 577.80 \text{ ng/m}^3$ , 总平均值为  $176.4 \text{ ng/m}^3$ , 高含量出现在 1998 年 7~8 月, 低含量出现在 1998 年 3~4 月以及 1998 年 12 月至 1999 年 2 月。

综上所述, 在 1999 年 1 月份铜、铅、锌、镉的月平均值出现高值, 在 1998 年 3~4 月和 1999 年 2 月铁、铝、锰的月平均值出现高值, 铬、钒的月平均值在 1999 年 2 月也出现高值。铬、钒、锌的月变化呈上下波动。铜、铅、镉含量的月份变化很相似, 铅、锰含量的月份变化也很相似。铜、铅、锌、镉、铁、铝、锰、铬、钒是来自大陆源以及人为活动污染源的元素。在南极春夏秋冬季节普遍出现高值或次高值, 而在漫长的

冬季普遍出现低值。与此相反, 来自海水源的钾、钠、钙、镁等元素在冬季则出现高值, 而在春夏秋季节出现低值。中山站气溶胶化学组分变化的季节性可能是由于南极中山站的气象要素的特点所决定。据 1998~1999 年中山站气象观测资料分析, 在南极中山站的 12 月至翌年的 2 月为春夏季, 3 月为秋季, 4 月至 10 月为冬季, 11 月为冬末初春季节。中山站的春夏季是全年气压较高 ( $985.7 \sim 986.3 \text{ hPa}$ )、气温较高 (月平均温度在  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  以上)、风速最小的季节 (风速低于全年的月平均风速, 介于  $5.0 \sim 6.5 \text{ m/s}$ )<sup>[7]</sup>, 有利于从大陆通过大气远程输送细小颗粒铜、铅、锌、镉、铁、铝、锰、铬、钒等元素到在这里沉降到地面。另一个原因, 也可能是在春夏季, 中山站的建设, 车辆来往, 人为活动使地表上疏松的尘土飞扬导致气溶胶中元素含量增加, 所以在春夏秋季节, 气溶胶中的铜、铅、锌、镉、铁、铝、锰、铬、钒等元素出现高含量。钾、钠、钙、镁等海水源元素在冬季出现高含量, 是因为中山站冬季的气压低、气温最低和风速最大的天气<sup>[7]</sup>, 尤其是大的风速有利于海气界面交换, 海水源元素冲破海水浪花进入大气, 产生富集效应。呈现出气溶胶元素含量的季节性变化。

### 3.3 气溶胶中元素的富集因子

富集因子也称富集系数 ( $EF$ ), 它被定义为元素或其化合物在海洋气溶胶中的组成与它们来源组成的比值<sup>[8,9]</sup>, 其优点是能消除采样过程中各种不定因素的影响, 用相对浓度来解释源的性质。元素富集因子计算公式如下:

$$EF = (X/Ref)_{\text{aero}} / (X/Ref)_{\text{sour}},$$

式中,  $X$  是被研究元素;  $Ref$  是参比元素;  $(X/Ref)_{\text{aero}}$  代表气溶胶中被研究的元素与参比元素的浓度比;  $(X/Ref)_{\text{sour}}$  代表来源区被研究的元素与参比元素的浓度比。

海洋气溶胶的元素主要来自地壳源、海水源以及人类活动的污染源。铝、铁、钪通常作为地壳源的参比元素, 钠、氯通常作为海水源的参比元素。本文研究海洋气溶胶的来源判别时, 则采用铝作为地壳源的参比元素, 钠作为海水源的参比元素。因此, 元素富集因子的计算公式可表示为

$$EF_{\text{sw}} = (X/Na)_{\text{aero}} / (X/Na)_{\text{sw}},$$

$$EF_{\text{ec}} = (X/Al)_{\text{aero}} / (X/Al)_{\text{ec}},$$

式中,  $(X/Na)_{\text{aero}}$  和  $(X/Al)_{\text{aero}}$  表示被研究元素分别与气溶胶中的钠或铝的浓度比,  $(X/Na)_{\text{sw}}$  和  $(X/Al)_{\text{ec}}$  分别表示被研究元素与海水中钠的比值和与

地壳中铝的比值<sup>[10-11]</sup>. 当富集因子值小于 3~5, 则可考虑被研究元素与来源参比元素是同一来源. 为研究海洋气溶胶的来源判别, 根据 1998 年 3 月至 1999 年 2 月中山站气溶胶各元素月平均值, 利用以上公式分别计算了 12 个月气溶胶中 13 种元素的富集因子值, 列于表 2, 由于海水中的元素浓度变化比

地壳的较为稳定, 因此将  $EF_{ec}$  小于 5,  $EF_{sw}$  小于 3 的元素作为正常而非富集元素, 则可考虑被研究元素与参比元素是同一来源, 只有当气溶胶样品中某元素的  $EF_{ec}$  大于 5, 同时  $EF_{sw}$  大于 3 时, 被研究元素才被作为该月份样品的富集元素, 则被视作为人类活动污染源的元素.

表 2 气溶胶元素的富集因子

日期	$EF$	Cu	Pb	Zn	Cd	Fe	Al	Mn
1998 年 3 月	$EF_{sw}$	$6.24 \times 10^4$	$3.60 \times 10^6$	$4.45 \times 10^5$	$7.26 \times 10^3$	$1.88 \times 10^7$	$1.55 \times 10^6$	$4.96 \times 10^6$
	$EF_{ec}$	30.1	45.9	270	0.16	1.78	-	1.66
1998 年 4 月	$EF_{sw}$	$3.40 \times 10^4$	$4.43 \times 10^6$	$2.99 \times 10^5$	$9.46 \times 10^3$	$7.91 \times 10^6$	$2.75 \times 10^6$	$5.80 \times 10^6$
	$EF_{ec}$	9.26	31.9	102	0.12	0.42	-	1.10
1998 年 5 月	$EF_{sw}$	$7.90 \times 10^3$	$1.49 \times 10^6$	$1.86 \times 10^5$	$3.5 \times 10^3$	$2.58 \times 10^6$	$5.71 \times 10^5$	$1.04 \times 10^5$
	$EF_{ec}$	10.4	51.7	307	0.21	0.66	-	0.94
1998 年 6 月	$EF_{sw}$	$3.76 \times 10^3$	$9.10 \times 10^5$	$6.98 \times 10^4$	$1.20 \times 10^3$	$8.65 \times 10^5$	$2.77 \times 10^5$	$1.55 \times 10^4$
	$EF_{ec}$	10.1	64.8	237	0.15	0.46	-	0.29
1998 年 7 月	$EF_{sw}$	$2.30 \times 10^3$	$8.48 \times 10^5$	$7.75 \times 10^4$	$2.58 \times 10^3$	$5.87 \times 10^5$	$1.58 \times 10^5$	$7.31 \times 10^3$
	$EF_{ec}$	10.9	106	463	0.56	0.55	-	0.24
1998 年 8 月	$EF_{sw}$	$1.51 \times 10^3$	$8.16 \times 10^5$	$2.34 \times 10^4$	$1.75 \times 10^3$	$2.04 \times 10^5$	$7.40 \times 10^4$	$6.15 \times 10^3$
	$EF_{ec}$	15.2	218	298	0.80	0.40	-	0.43
1998 年 9 月	$EF_{sw}$	$1.52 \times 10^4$	$1.26 \times 10^6$	$1.81 \times 10^5$	$4.41 \times 10^3$	$3.27 \times 10^6$	$6.19 \times 10^5$	$5.46 \times 10^4$
	$EF_{ec}$	18.4	40.2	276	0.24	0.77	-	0.46
1998 年 10 月	$EF_{sw}$	$6.60 \times 10^3$	$1.27 \times 10^6$	$1.22 \times 10^5$	$2.09 \times 10^3$	$8.51 \times 10^5$	$2.76 \times 10^5$	$7.90 \times 10^3$
	$EF_{ec}$	17.9	90.5	415	0.26	0.45	-	0.15
1998 年 11 月	$EF_{sw}$	$7.38 \times 10^3$	$1.85 \times 10^6$	$7.59 \times 10^4$	$1.20 \times 10^3$	$1.07 \times 10^6$	$1.97 \times 10^5$	$1.31 \times 10^4$
	$EF_{ec}$	28.0	185	362	0.21	0.79	-	0.35
1998 年 12 月	$EF_{sw}$	$3.34 \times 10^5$	$3.44 \times 10^6$	$3.28 \times 10^5$	$1.46 \times 10^4$	$9.50 \times 10^6$	$5.73 \times 10^5$	$1.58 \times 10^6$
	$EF_{ec}$	437	119	539	0.86	2.42	-	1.44
1999 年 1 月	$EF_{sw}$	$8.74 \times 10^5$	$4.82 \times 10^7$	$1.16 \times 10^6$	$1.97 \times 10^5$	$1.52 \times 10^7$	$2.68 \times 10^6$	$4.13 \times 10^6$
	$EF_{ec}$	244	355	407	2.49	0.83	-	0.80
1999 年 2 月	$EF_{sw}$	$1.93 \times 10^5$	$4.45 \times 10^6$	$1.59 \times 10^5$	$1.55 \times 10^4$	$8.95 \times 10^6$	$1.38 \times 10^6$	$4.46 \times 10^6$
	$EF_{ec}$	104	63.5	108	0.38	0.95	-	1.68

日期	$EF$	Cr	V	K	Na	Ca	Mg
1998 年 3 月	$EF_{sw}$	$1.39 \times 10^5$	$1.07 \times 10^4$	9.55	-	0.85	0.81
	$EF_{ec}$	29.6	12.7	18.4	48.4	0.90	4.74
1998 年 4 月	$EF_{sw}$	$9.37 \times 10^4$	$4.53 \times 10^3$	24.8	-	0.56	0.67
	$EF_{ec}$	11.2	3.02	27.0	27.4	0.33	2.22
1998 年 5 月	$EF_{sw}$	$3.38 \times 10^4$	$3.25 \times 10^3$	2.71	-	1.52	1.15
	$EF_{ec}$	19.5	10.4	14.2	132	4.35	18.4
1998 年 6 月	$EF_{sw}$	$3.12 \times 10^4$	$8.52 \times 10^2$	0.75	-	0.82	0.88
	$EF_{ec}$	37.1	5.62	8.04	271	4.82	28.9

续表 2

日期	$EF$	Cr	V	K	Na	Ca	Mg
1998 年 7 月	$EF_{sw}$	$6.94 \times 10^3$	$1.33 \times 10^3$	1.16	-	1.0	0.60
	$EF_{ec}$	14.5	15.4	22.1	477	10.33	35.0
1998 年 8 月	$EF_{sw}$	$2.23 \times 10^3$	$6.83 \times 10^2$	1.13	-	0.77	0.54
	$EF_{ec}$	9.95	16.9	45.7	$1.02 \times 10^3$	17.0	66.3
1998 年 9 月	$EF_{sw}$	$2.26 \times 10^4$	$3.49 \times 10^3$	1.30	-	1.20	1.07
	$EF_{ec}$	12.1	10.3	6.28	121	3.17	15.7
1998 年 10 月	$EF_{sw}$	$1.03 \times 10^4$	$1.30 \times 10^3$	0.88	-	1.06	0.80
	$EF_{ec}$	12.3	8.6	9.53	272	6.30	26.3
1998 年 11 月	$EF_{sw}$	$1.13 \times 10^4$	$7.38 \times 10^2$	0.80	-	0.87	0.70
	$EF_{ec}$	18.9	6.85	12.2	381	7.17	32.2
1998 年 12 月	$EF_{sw}$	$4.51 \times 10^4$	$5.34 \times 10^3$	3.17	-	1.50	0.65
	$EF_{ec}$	25.9	17.0	16.6	131	4.28	10.4
1999 年 1 月	$EF_{sw}$	$1.00 \times 10^5$	$1.07 \times 10^4$	2.09	-	1.19	0.72
	$EF_{ec}$	12.3	7.28	2.33	28.0	0.73	2.46
1999 年 2 月	$EF_{sw}$	$5.61 \times 10^4$	$9.27 \times 10^3$	2.25	-	0.66	0.78
	$EF_{ec}$	13.4	12.3	4.87	54.4	0.78	5.16

分析表 2 各月份的元素富集因子值得出以下意见: (1) 元素镉、铁、铝、锰的  $EF_{ec}$  都小于 5 为正常值, 呈现为地壳源元素; (2) 钾元素在 1998 年 3 月至 4 月的  $EF_{ec}$  大于 5, 同时  $EF_{sw}$  大于 3, 呈现为富集元素, 其余月份的  $EF_{sw}$  都小于 1, 钾元素在多数月份呈现为海水源元素; 在 12 个月的观测中, 钠、钙、镁等元素的  $EF_{sw}$  都小于 3 正常值, 呈现为海水源元素; (3) 铜、铅、锌、铬、钒的  $EF_{ec}$  大于 5, 同时  $EF_{sw}$  大于 3, 表明铜、铅、锌、铬、钒被认为是富集元素, 反映了它们复杂的来源, 可能是地壳源、人为活动污染物和火山喷发等不确定性。1998 年 12 月至 1999 年 2 月铜的  $EF_{ec}$  是最大值, 平均  $EF_{ec} = 262$ , 是其他月份的 15.7 倍(其他月份铜平均的  $EF_{ec} = 16.7$ ), 铅在 1998 年 11 月至 1999 年 1 月  $EF_{ec}$  出现最大值, 是其他月份平均值的 2.8 倍, 锌在 1998 年 10 月至 1999 年 1 月,  $EF_{ec}$  也出现最大值, 是其他月份平均值的 2 倍。从图 1 也看出铜、铅、锌在上述相应的月份, 即在南极春夏季节, 铜、铅、锌的含量都同时出现最大值, 这表明在春夏季节这些元素的富集作用大。据 1998 年中山站的气象要素的观测资料分析, 中山站的夏季是全年气压较高、气温较高、风速最小的季节, 这有利于细小颗粒气溶胶中的铜、铅、锌等元素的富集和沉降。

### 3.4 气溶胶中元素的因子分析

应用因子分析来鉴别海洋气溶胶的来源及其性质日益受到普遍的重视<sup>[9, 12]</sup>, 利用因子分析方法对中山站 1998 年 3 月 7 日至 1999 年 3 月 2 日一周年连续采集的 52 个海洋气溶胶样品进行来源判别的研究。因子分析法是通过分析各因子(气溶胶来源)对各变量(元素)的载荷来判断气溶胶的来源及其贡献。我们使用样本相关系数矩阵来进行因子分析, 参数估计方法使用主分量法, 公因子数的确定准则为特征根大于 1, 使用方差最大的正交旋转方法对因子载荷矩阵进行正交旋转。因子分析结果见表 3。海洋气溶胶物质主要来源于地壳风化物质源、海洋源和大气中污染物质源。铝和钠通常分别被选择为地壳风化物质源和海洋源的指示元素, 由来源指示元素所解释的 3 个因子分别为: 因子 1 代表地壳风化物质源, 因子 2 代表海洋源, 因子 3 代表污染源。

表 3 中因子 1 对铁、铝、锰、铬、钾都有较高载荷, 对钒和锌也有一定的载荷, 方差贡献率为 33.44%。据相关分析, 上述元素之间的相关系数( $R$ )都是大于 0.6, 锌与钒的相关系数等于 0.3, 可见铁、铝、锰、铬、钾主要属于地壳源元素。在 12 个月观测值中, 钒的  $EF_{ec}$  大于 5 的月份占九成, 钒的全部  $EF_{sw}$  大于 3, 表明钒是属地壳源和人为污染源的

表 3 因子分析结果

变量	因子 1	因子 2	因子 3	公因子方差	变量	因子 1	因子 2	因子 3	公因子方差
Cu	- 0.031	- 0.292	0.796	0.720	V	0.544	0.470	- 0.003	0.517
Pb	0.102	0.396	0.682	0.633	K	0.828	0.277	0.086	0.770
Zn	0.429	0.075	0.509	0.449	Na	0.004	0.964	0.080	0.935
Cd	0.006	0.140	0.796	0.653	Ca	- 0.039	0.965	0.084	0.939
Fe	0.845	- 0.147	0.066	0.741	Mg	- 0.052	0.952	0.033	0.910
Al	0.892	0	0.137	0.814	特征根	4.346	3.372	2.044	—
Mn	0.938	- 0.135	0.069	0.903	方差(%)	33.43	25.94	15.73	—
Cr	0.881	- 0.032	- 0.042	0.779	总方差累计(%)	33.43	59.37	75.10	—

富集元素. 因子 2 的高载荷元素为钠、钙、镁, 他们之间的相关系数大于 0.9. 方差贡献率为 25.94%, 这表明钠、钙、镁主要是海水源的元素. 因子 3 对铜、铅、锌、镉有较高载荷, 方差贡献率为 15.73%. 在 12 个月观测值中, 镉的  $EF_{ec}$  全部小于 1, 所以铜、铅、锌、镉应属来自地壳源和人为污染源的元素. 考虑到因子 2 对钒、铅和钾有一定的载荷, 钾的一部分也来自海水源, 铅、钒也来自海水源及当地石化油燃烧的产物.

## 4 结论

(1) 中山站上空气溶胶 13 种元素的含量分布呈现脉冲波动式变化, 气溶胶大多数重金属元素 (Cu, Pb, Zn, Cd, Fe, Al, Mn, Cr, V) 含量月平均值在 1998 年 12 月至 1999 年 3 月 (春夏秋季) 出现高值或次高值, 在冬季则出现低值, 而一般认为来自海水源的钾、钠、钙、镁等元素含量在 1998 年 12 月至 1999 年 3 月 (春夏秋季) 则处于低值, 在冬季则出现高值, 呈现出季节性的变化. 气溶胶化学组成变化的季节性是由南极中山站的气象要素的特点所决定.

(2) 应用元素富集因子的分析得出: 1) 中山站海

洋气溶胶的铁、铝、锰、镉等元素属地壳源元素; 2) 钾、钠、钙、镁等元素属海水源元素, 但钾在部分月份呈现富集元素; 3) 铜、铅、锌、铬、钒是富集元素, 反映它们的复杂来源, 可能是地壳源、人为活动污染物和火山喷发或当地石化油燃烧产物等不确定性. 在南极中山站春夏季节铜、铅、锌等元素的  $EF_{ec}$  出现最大值, 表明这些元素在春夏季节的富集作用最强烈.

(3) 应用因子分析, 包括春夏秋冬一周年的海洋气溶胶样品, 铁、铝、锰、镉或钾呈现地壳源, 钠、钙、镁呈现海水源, 铜、铅、锌、铬、钒属来自地壳源和人为活动污染源, 但研究也表明钾为海水源和地壳源兼有的元素, 铅、钒也来自海水源及当地石化油燃烧产物.

(4) 1998 年 3 月至 1999 年 2 月, 南极中山站历时 12 个月连续采集的海洋气溶胶样品的化学元素铜、铅、锌、镉、铁、铝、锰、铬、钒、钾、钠、钙、镁含量的月平均值分别为 1.280, 0.559, 8.353, 0.070, 19.75, 38.87, 0.406, 0.768, 0.578, 172.4, 2124, 74.18, 176.4  $\text{ng}/\text{m}^3$ .

笔者衷心感谢国家海洋局极地考察办公室的大力支持和指导.

## 参考文献:

- [1] CUNNINGHAM W C, ZOLLER W H. The chemical composition of remote area aerosols[J]. J Aerosol Sci, 1981, 12(4): 367—387.
- [2] 李元杰, 曹俊忠, 李金香. 南极大气气溶胶的物理化学特征与环境变化[J]. 极地研究, 1999, 11(3): 179—191.
- [3] MAZZERA D M, LOWENTHAL D H, CHOW J C, et al. Sources of PM<sub>10</sub> and sulfate aerosol at McMurdo station, Antarctica[J]. Chemosphere, 2001, 45(3): 347—356.
- [4] 吕位秀, 高登义, 王明星, 等. 南极昭和基地背景气溶胶的化学成分[A]. 国家南极考察委员会. 南极科学考察论文集: 第 4 集[C]. 北京: 海洋出版社, 1989. 113—115.
- [5] 李锦霞, 约翰逊 K W, 黄志成. APDC/DDDC 氟里昂萃取无焰原子吸收分光光度法测定海水中痕量金属[J]. 环境科学, 1986, 7(6): 75—79.
- [6] 郑久华, 李锦霞, 张功勋, 等. 河水溶解态痕量金属分析的国际互校[J]. 海洋学报, 1989, 11(2): 238—241.
- [7] 肖晖, 黄自强, 杨绪林, 等. 1998~1999 年南极中山站气象要素特征[J]. 台湾海峡, 2003, 12(2): 140—144.

- [8] 陈立奇, 高鹏飞, 杨绪林. 环球海洋大气气溶胶化学研究: 来源示踪元素的特征[J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(3): 264—271.
- [9] 李天杰, 曹俊忠, 朱光华, 等. 太平洋西部、南大洋及东南极陆缘大气气溶胶来源及其物理化学特征[J]. 极地研究, 1997, 9(4): 243—253.
- [10] TAYLOR S R. Abundance of chemical elements in the continental crust, a new table[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1964, 28: 1 273—1 285.
- [11] BREWER P. Minor elements in sea water: [A]. RILEY J P. SKIRROW G. Chemical Oceanography: Vol. 1[M]. 2nd ed. New York: Academic, 1975. 415—496.
- [12] 陈立奇. 百慕大群岛上空气溶胶物质的因子分析[J]. 海洋学报, 1986, 8(1): 41—47.

## The chemical composition of marine aerosol over Zhongshan Station in Antarctica and its sources discrimination in 1998

HUANG Zi-qiang<sup>1</sup>, JI Wei-dong<sup>1</sup>, YANG Xu-lin<sup>1</sup>, HUANG Rong-tan<sup>2</sup>,  
TANG Rong-kun<sup>1</sup>, YU Tao<sup>1</sup>, ZHANG Gong-xun<sup>1</sup>

(1. *Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China*; 2. *Department of Mathematics, Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

**Abstract:** Fifty two aerosol samples of 6~7 d duration were collected from March 1998 through March 1999 at the Zhongshan Station in Antarctica. The content of 13 chemical elements is presented: Cu, Pb, Zn, Cd, Fe, Al, Mn, Cr, V, K, Na, Ca and Mg. The study results demonstrate that the content of elements in marine aerosol at the Zhongshan Station appeared to be characteristics of seasonal variation, which were related to features of meteorological element. Meanwhile sources of the elements in the marine aerosols are discriminated using methods of enrichment factor, correlation analysis and factor analysis.

**Key words:** atmosphere science; Antarctica; marine aerosol; chemical composition; source discrimination