

田湾核电站大气中水溶性阴离子的观测研究

赵恒强^{1,2}, 何鹰^{1*}, 郑晓玲¹, 陈发荣¹, 庞士平¹, 王彩霞³, 王小如¹

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061; 2. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 2661004; 3. 江苏核电有限公司, 连云港 222042)

摘要: Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 是滨海大气中的主要水溶性阴离子. 2005 年 6 月 ~ 2006 年 5 月期间, 对连云港田湾核电站滨海大气中主要水溶性阴离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 进行了监测. 研究表明, 田湾核电站大气中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的年均值分别为 (33.12 ± 53.63) 、 (53.34 ± 30.34) 和 $(8.34 \pm 4.47) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 季节变化分析表明, Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度在夏季高、冬季低, NO_3^- 浓度在秋冬季高、春夏季低. 气象因素分析表明, 风向、风速、气温、相对湿度等对大气阴离子浓度有一定影响. 本研究首次对我国滨海核电大气中主要腐蚀性阴离子进行了同时监测, 为防止海洋大气腐蚀, 保证我国核电工业安全经济运行提供了依据.

关键词: 连云港; 核电站; 大气; Cl^- ; SO_4^{2-} ; NO_3^-

中图分类号: X517 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)11-2563-06

Water-Soluble Anions of Atmosphere on Tianwan Nuclear Power Station

ZHAO Heng-qiang^{1,2}, HE Ying¹, ZHENG Xiao-ling¹, CHEN Fa-rong¹, PANG Shi-ping¹, WANG Cai-xia³, WANG Xiao-ru¹

(1. First Institute of Oceanography State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Jiangsu Nuclear Power Limited Corporation, Lianyungang 222042, China)

Abstract: Three major water-soluble anions (Cl^- , SO_4^{2-} and NO_3^-) in the atmosphere of the Tianwan nuclear power station in Lianyungang were determined by ion chromatography from June 2005 to May 2006. The results showed that the annual average concentration of Cl^- , SO_4^{2-} and NO_3^- in the atmosphere of Tianwan nuclear power station was $(33.12 \pm 53.63) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $(53.34 \pm 30.34) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(8.34 \pm 4.47) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. The concentrations of the three water-soluble anions showed evident trend of seasonal variation. The concentrations of Cl^- , SO_4^{2-} reached the highest level in summer and the lowest level in winter, while the concentration of NO_3^- in autumn and winter was higher than those in summer and spring. Meteorological parameters such as wind direction, wind speed, temperature and relative humidity were studied and showed definite influence to the anions concentration of the atmosphere. This is the first simultaneous monitoring of corrosive anions in the atmosphere of Chinese coastal nuclear power plant, and it will provide basis for the prevention of marine atmospheric corrosion, which will ensure the safely operating of our nuclear power industry.

Key words: Lianyungang; nuclear power station; atmosphere; Cl^- ; SO_4^{2-} ; NO_3^-

目前, 在能源紧缺的大背景下, 我国沿海地区的核电工业进入快速发展时期. 海洋大气腐蚀严重影响着滨海核电站运行的安全性和经济性^[1,2]. 已有研究表明, 海盐粒子 (Cl^-) 是造成大气腐蚀的主要因素^[3]. SO_4^{2-} 、 NO_3^- 是大气颗粒物中的主要致酸离子, 是酸雨中的主要致酸因素^[4], 也是造成大气腐蚀的重要因素. 另外, 气体污染物如 SO_2 、 NO_2 、 HCl 、 HNO_3 等对材料及其制品的性能也有一定的影响^[5]. 因此, 监测滨海大气中具有腐蚀性的主要阴离子的浓度, 对合理选用材料, 采取合适防腐措施控制腐蚀, 保证核电站安全、经济运行具有重要意义.

膜采样法常用于大气颗粒物样品的采集^[6-8], 但对于 NH_4Cl 、 NH_4NO_3 等固态不稳定成分的测定有一定局限性. 另外, 膜采样法无法采集大气中的气

体污染物. 国内曾有研究采用溶液吸收法采集大气样品, 对滨海大气腐蚀性氯盐做了大量研究. 如: 宋金明等^[9]采用溶液吸收法采集, AgNO_3 -PVA 浊度吸收法测定了青岛近海岸大气中的盐分, 并研究了气象因素的影响; 张永义等^[10]采用溶液吸收法采集, 硫氰酸汞分光光度法测量了某沿海核电厂附近大气中氯离子的浓度; 陈孝淦等^[5]采用溶液吸收法采集, 硫氰酸汞分光光度法考察了大亚湾核电站地区大气腐蚀性氯离子含量. 国内研究多报道和评价滨

收稿日期: 2009-12-21; 修订日期: 2010-05-26

基金项目: 田湾核电站大气氯离子测量与评价专项 (JNPC-SJ-05042); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2008AA09Z103)

作者简介: 赵恒强 (1980 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为海洋环境分析, E-mail: zhq@fio.org.cn

* 通讯联系人, E-mail: heyings@fio.org.cn

海大气腐蚀性氯盐的污染^[5,9-12],而对滨海大气中其它腐蚀性阴离子的含量和分布特征的研究相对较少.有关连云港田湾核电站滨海大气中主要腐蚀性阴离子的含量和分布特征的研究鲜见报道.

本研究采用溶液吸收法采集大气样品,采用离子色谱法测定,首次同时对连云港田湾核电站滨海大气中主要腐蚀性阴离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^-)进行周年观测,给出了其含量水平和季节分布特征,考察了气象因素对其含量的影响,并对其来源进行了初步探讨,以期为我国滨海核电工程的通风防腐工程及安全、经济运行提供可靠数据和科学依据.

1 材料与方

1.1 仪器和试剂

微电脑大气污染日平均浓度采样器(TH-3000A型,武汉天虹智能仪表厂);离子色谱仪(IC1000型,上海天美科学仪器有限公司);配有阴离子分析用抑制器(Alltech DS-Plus)、电导检测器和T2000色谱工作站.

标准储备液:阴离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^-)标准试剂(国家标准物质研究中心1 000 mg/L),根据需要用配制成不同浓度标准溶液,绘制标准工作曲线.其它试剂均为色谱纯.所有溶液及淋洗液用水均为Milli-Q超纯水(电阻率 $\geq 18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$).

1.2 样品采集

采样时间和地点:2005年6月~2006年5月期间,在连云港田湾核电站,从海边至1号、2号机组之间,均匀分布3个采样点,采样高度3 m,每周采样2次,每次24 h,每个采样点采集2个平行样,全年共监测99 d,有效采集594个大气吸收液样品.

采样方法:在洁净多孔玻板吸收瓶中准确注入50 mL吸收液(超纯水),连接好管路,以 $0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 流量,连续采样24 h.记录采样开始时间、结束时间、气温、气压,换算标准状况体积,将样品转移至洁净的塑料瓶中,冰箱避光存放.

1.3 样品分析

将装有大气吸收液的样品瓶置于超声清洗器中超声提取30 min,提取前向超声清洗器中加入适量冰块.提取液经 $0.45 \text{ }\mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后进样测定.

色谱条件:阴离子交换柱(150 mm $\times$ 4.6 mm, Allsep Anion 7u,美国Alltech公司);淋洗液为 $0.85 \text{ mmol/L NaHCO}_3 + 0.9 \text{ mmol/L Na}_2\text{CO}_3$;流速: $1.2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;温度为室温;进样量250 μL .

大气样品中阴离子色谱图如图1所示.由图1

可见,在本研究给定的色谱条件下,大气样品中 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 及其它含量较低的阴离子均得到良好的分离.

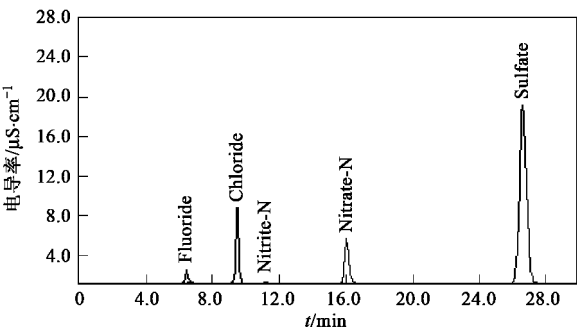


图1 大气样品中阴离子色谱图

Fig.1 Chromatogram of the anions in atmospheric samples

1.4 气象条件

本实验所用气象数据,由位于田湾核电站内的气象监测站观测(数据由江苏田湾核电有限公司提供).

2 结果与讨论

2.1 大气中水溶性阴离子成分的描述性统计分析

表1是594个大气吸收液样品描述性统计的分析结果.从表1可以看出,大气中 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的年均值分别为 (33.12 ± 53.63) 、 (8.34 ± 4.47) 和 $(53.34 \pm 30.34) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,平均浓度从大到小依次为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$,其中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 是主要的阴离子.偏度大小依次为 $\text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$,峰度大小顺序与偏度一致,但略有变化,其中 Cl^- 峰度明显较高.图2是大气中阴离子浓度直方图及正态分布曲线.从中可以看出,所有离子均呈明显的正偏态分布,表明大气样品中以低离子含量的样本为主.

表1 大气中阴离子成分的描述性统计(样本数594)

Table 1 Descriptive statistics of ionic components in atmosphere

项目	离子		
	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
均值/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	33.12	8.34	53.34
均值标准误差	5.39	0.45	3.06
最小值	6.71	1.91	7.84
最大值	297.71	27.52	154.62
标准偏差	53.63	4.47	30.34
全距	291.00	25.61	146.78
方差	2876.17	19.98	920.57
偏度	3.353	1.520	1.378
偏度标准误差	0.243	0.246	0.244
峰度	11.205	4.359	1.968
峰度标准误差	0.481	0.488	0.483
相对标准偏差	1.619	0.536	0.569

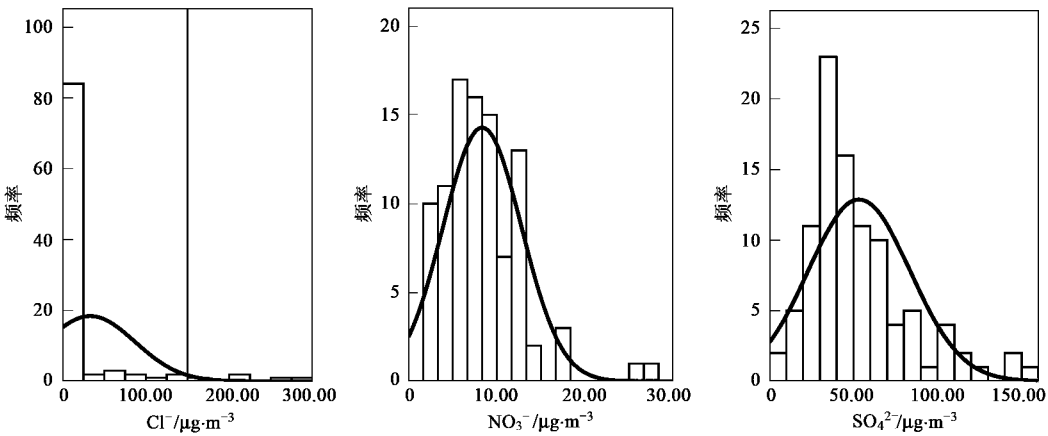


图2 大气中阴离子浓度直方图及正态分布曲线

Fig. 2 Histograms of frequency distribution and normal curves of anions in atmosphere

2.2 大气中水溶性阴离子的季节变化

大气中水溶性阴离子浓度季节变化图如图3所示。从图3可以看出,不同月份大气中Cl⁻浓度平均值变化较大,月平均浓度最低值出现在2005年12月,其值为(11.93±3.48) μg·m⁻³,月平均浓度最高值出现在2005年7月,其值为(99.16±92.79) μg·m⁻³。大气中Cl⁻平均浓度季节变化顺序为夏季>春季>秋季>冬季,其中夏季明显较高,其值为(62.78±67.56) μg·m⁻³,秋、冬季较低,分别为(14.18±3.33) μg·m⁻³、(13.12±3.56) μg·m⁻³。田湾核电站滨临黄海,在夏季东南季风影响下,海洋大气携带大量海盐粒子吹向内陆,这可能是造成田湾核电站大气中Cl⁻平均浓度在7月达到最高值的主要原因。

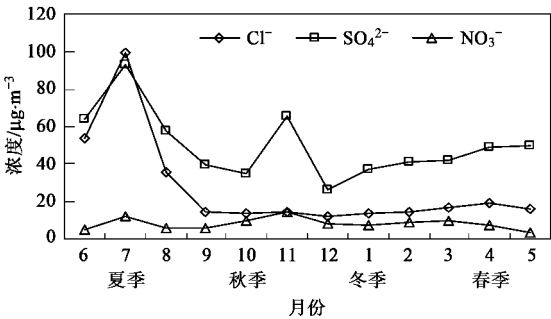


图3 大气中阴离子浓度月变化

Fig. 3 Monthly variation of the anions in the atmosphere

从图3可以看出,不同月份大气中NO₃⁻浓度平均值变化趋于平缓,月平均浓度最低值出现在2006年5月,其值为(3.54±2.50) μg·m⁻³;月平均浓度最高值出现在2005年11月,其值为(14.30±4.69)

μg·m⁻³。另外,7月大气中NO₃⁻平均浓度仅次于11月,其值为(11.94±3.01) μg·m⁻³,其他月份含量较低。大气中NO₃⁻平均浓度季节变化顺序为秋季>冬季>夏季>春季,基本呈现秋冬季高,夏春季低的特征。NO₃⁻平均浓度在11月达到最大值,这可能是因为田湾核电站在11月份运行柴油锅炉,进行吹管试验,造成大气中NO_x增加造成的。另外,NO₃⁻浓度在7月较高,这可能是因为夏季平均气温为26.5℃,气温高、光照强,大气中的NO_x易发生光化学反应生成NO₃⁻造成的。

从图3可以看出,不同月份大气中SO₄²⁻浓度平均值变化较大,月平均浓度最低值出现在2005年12月,其值为(26.36±8.00) μg·m⁻³;月平均浓度最高值出现在2005年7月,其值为(93.20±39.30) μg·m⁻³。另外,6、8和11月大气中SO₄²⁻平均浓度较高,分别为(64.30±25.61)、(57.30±22.65)和(65.33±41.51) μg·m⁻³,其他月份浓度较低。大气中SO₄²⁻平均浓度季节变化顺序为夏季>春季>秋季>冬季,其中夏季平均浓度明显较高,冬季平均浓度较低。田湾核电站大气中SO₄²⁻平均浓度在7月份达到最高值,一是因为夏季东南季风携带大量海盐粒子吹向陆地,海盐SO₄²⁻和来源于海藻、海洋浮游植物的海洋生源SO₄²⁻造成大气中SO₄²⁻含量增加;另一方面,夏季的平均气温为26.5℃,较高的气温和光照条件也会加速大气中SO_x向SO₄²⁻的转化。滨海大气中SO₄²⁻平均浓度在11月份较高,同NO₃⁻浓度变化趋势相似,这可能也是受田湾核电站在11月运行柴油锅炉,进行吹管试验,造成大气中SO₂增加造成的。

2.3 阴离子浓度与气象要素的关系

2.3.1 风向的影响

风向不同可以反应不同来源气团对大气阴离子的影响. 风向的季节变化造成连云港田湾核电站大气阴离子在不同季节受不同来源影响. 田湾核电站位于江苏省连云港市,东临黄海,南面是黄海滩地,西与宿城山谷相连,背靠云台山,距北面连云区所在地及港口约 20 km. 根据采样地点的地形地貌特征,将风向划分为陆风和海风. 其中将风向 N、NE、NNE、WSW、W、WNW、NW 和 NNW 定为陆风;将风向 ENE、E、ESE、SE、SSE、S、SSW 和 SW 风定为海风. 将采样日 24 h 内的主导风向进行统计,将各主导风向按照海风和陆风划分,采样日风向频次和采样地区大气中各种阴离子浓度的统计结果如表 2 所示.

表 2 采样日海风、陆风与大气中阴离子浓度的关系

Table 2 Relation between wind direct and anions concentration

风向	频次/次	大气中 Cl^- / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	大气中 NO_3^- / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	大气中 SO_4^{2-} / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
海风	47	40.15	8.11	52.72
陆风	46	19.51	7.44	44.20

从表 2 中可以看出,在 2005 年 6 月~2006 年 5 月采样期间,陆风为 46 次,海风为 47 次,海风占总风向的 50.5%. 因此在全年的测定中,海风稍占多数. 尽管如此,从海风和陆风各种阴离子的分布可以看出它们之间的巨大差异,如风向为海风时,大气中 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度平均值均明显高于陆风时的浓度,即:从海洋上空吹来的海洋气溶胶会造成连云港田湾核电站大气中阴离子含量明显增加,从内陆上空吹来的内陆气溶胶会造成连云港田湾核电站大气中阴离子含量明显降低. 由此可见,风向对大气阴离子浓度有显著影响.

2.3.2 风速的影响

在全年的采样期间,日风速的平均值为 $3.15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最小值为 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大值为 $7.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 蒲福风力等级是英国学者蒲福 1805 年提出的一种表示风力大小的划分方法,按照风速大小,把风力划分为 13 等级(0~12 级)^[13]. 本研究根据蒲福风力等级对采样日风速进行划分,全年采样日风速频次与采样地区大气中阴离子浓度分布见图 4.

如图 4 所示,全年采样日风速等级主要为:软风(1 级, $0.3\sim1.5\text{ m/s}$),轻风(2 级, $1.6\sim3.3\text{ m/s}$),微风(3 级, $3.4\sim5.4\text{ m/s}$),和风(4 级, $5.5\sim7.9\text{ m/s}$). 其中,轻风出现 53 次,出现频数最高,占总

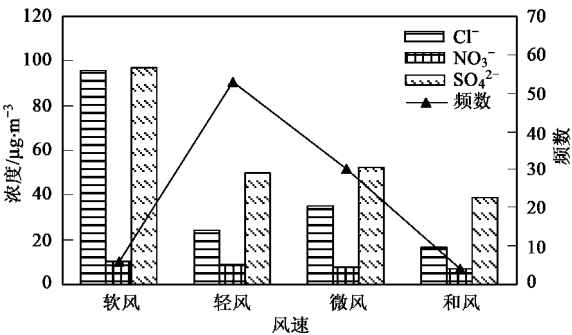


图 4 风速频次与大气中阴离子浓度分布
Fig. 4 Frequency of wind speed and the anions concentration distribution

风日的 56.99%; 其次是微风,出现 30 次,占 32.26%;软风、和风出现次数较少. 风速对大气中阴离子浓度有一定影响. 从图 4 可以看出,“软风”期间海盐来源离子(Cl^- 、 SO_4^{2-})的浓度较高,而其他 3 个类型的风对离子浓度的影响差异不大, NO_3^- 浓度在各种风速下差异不大.

2.3.3 气温的影响

在全年采样期内,日气温的平均值为 14.7°C ,最低气温为 -3.5°C ,最高气温为 30.1°C . 全年采样日气温频次与大气中阴离子浓度的分布见图 5.

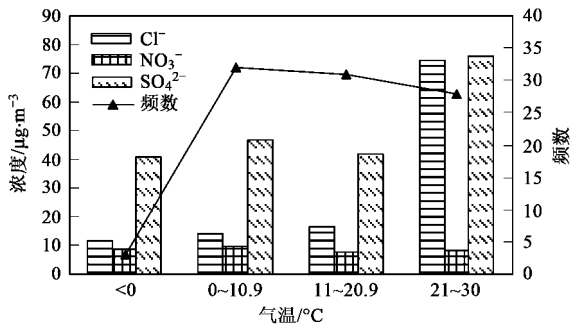


图 5 气温频次与大气中阴离子浓度分布
Fig. 5 Frequency of air temperature and the anions concentration distribution

由图 5 可以看出,大气中 Cl^- 浓度与气温呈明显的正相关性,随着气温增加,大气中 Cl^- 浓度呈明显增加趋势. SO_4^{2-} 浓度随气温的升高总体呈增加趋势,呈现一定的正相关性. NO_3^- 浓度与气温的相关性不明显,在低气温段($0\sim10.9^\circ\text{C}$)较高,在较低气温段($<0^\circ\text{C}$)和较高气温段($11\sim20.9^\circ\text{C}$ 、 $21\sim30^\circ\text{C}$)浓度均较低. 气温的变化反映了季节的变化. 在夏季的高温天气下,一方面海洋气溶胶的影响会增加,另一方面大气中的 SO_2 发生光化学反应转化

为 SO_4^{2-} 的速率也会增加,因而造成大气中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量增加.由此可见,气温是影响大气阴离子浓度的重要因素之一.

2.3.4 湿度的影响

在全年的采样期间,日湿度的平均值为 69.9%,最小值为 28%,最大值为 98%.全年采样日湿度频数与大气中阴离子浓度分布见图 6.

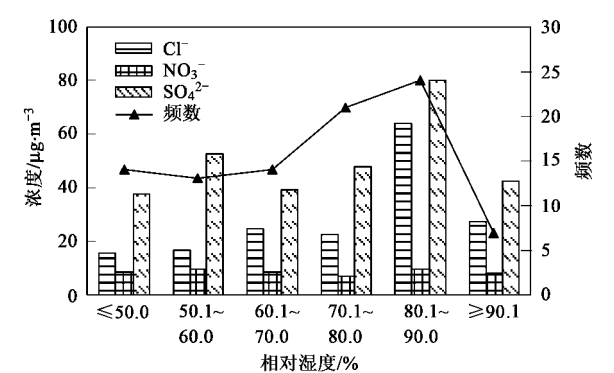


图 6 湿度频数与大气中阴离子浓度分布
Fig.6 Frequency of humidity and the anions concentration distribution

由图 6 可以看出,湿度段 $\geq 90.1\%$ 出现频次较低,代表性较差,因此本实验暂不考虑.在湿度段 $\leq 50\%$ 到 $80.1\% \sim 90\%$,从随着湿度的增加, Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度均呈显著增加趋势,表现为明显的正相关性. NO_3^- 浓度与湿度的相关性不明显,在湿度段 $(50.1\% \sim 60\%$ 和 $80.1\% \sim 90\%)$ 含量均较高,在其他区段较低.同气温的变化一样,湿度的变化也一定程度上反映了季节的变化,连云港在夏秋季节气温高、湿度大,冬季气温低、湿度小.夏秋季节高温高湿的环境,造成大气中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度明显增加.由此可以看出,湿度是影响大气阴离子浓度的重要因素之一.

2.4 大气中水溶性阴离子来源 分析

大气中的 Cl^- 可能来自于海盐、尘和化石燃料燃烧,气体中的 Cl^- 主要来自于光化学反应^[14,15].大气中 NO_x 主要人为来源是化石燃料燃

烧,天然来源主要是生物有机体腐败过程中微生物将有机氮转化为 NO_x ^[14]. NO_x 发生光化学反应是生成 NO_3^- 的重要途径^[14,16].大气中 SO_4^{2-} 可能来源包括海盐、海洋生源硫排放、化石燃料燃烧、光化学反应、尘等^[14,16,17].

气溶胶中各组间的相关性分析往往能提供其来源的有效信息^[18,19].本研究采用 SPSS 12.0 软件对田湾核电站大气中各阴离子浓度进行了相关性分析,如表 3 所示.

表 3 大气中阴离子间的相关性分析结果¹⁾
Table 3 Correlation coefficients of anions in atmosphere

	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
Cl^-	1	0.212	0.520 (**)
NO_3^-		1	0.455 (**)
SO_4^{2-}			1

1) ** 表示相关系数的显著性概率水平为 0.01 (双侧检验), $n = 99$

Cl^- 与 SO_4^{2-} 相关性显著,相关系数为 0.520.这说明海盐气溶胶中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 都来自海洋;非海盐气溶胶中 Cl^- 可能主要来源于工业排放和燃烧过程.本研究大气中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的相关系数为 0.455,呈显著正相关.表明非海盐气溶胶中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的主要来源工业废气和汽车尾气排放产生的 SO_2 和 NO_x ,在大气中的光化学氧化及气粒转化可能受相同环境条件影响.本结论与文献[18]研究结果一致.

大气中离子浓度比值常用来判定污染的来源,大气中 3 种主要阴离子的浓度比值月变化如表 4 所示.离子 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度比值已经成为分辨固定排放源(燃煤)和移动排放源(机动车)的相对贡献大小的指标^[20~22].本研究中 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值年均值为 0.17,表明固定污染源(燃煤)仍然是连云港田湾核电站地区的主要污染源. $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$ 比值和 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值年均值分别为 3.84、0.48,且均表现为夏季明显较高,其他季节趋于平缓的特点,这说明夏季海洋气溶胶是连云港田湾核电站地区大气中 Cl^- 的重要来源.

表 4 大气中阴离子浓度比月变化
Table 4 Monthly variation of the mass ratio of anions in the atmosphere

项目	2005-06	2005-07	2005-08	2005-09	2005-10	2005-11	2005-12	2006-01	2006-02	2006-03	2006-04	2006-05	平均
$\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$	11.93	8.30	6.71	2.77	1.42	1.01	1.54	1.89	1.62	1.65	2.74	4.44	3.84
$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$	0.83	1.06	0.62	0.36	0.39	0.22	0.45	0.36	0.34	0.39	0.40	0.32	0.48
$\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$	0.07	0.13	0.09	0.13	0.28	0.22	0.29	0.19	0.21	0.24	0.14	0.07	0.17

3 结论

(1) 大气中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的年均值分别为 (33.12 ± 53.63) 、 (53.34 ± 30.34) 和 $(8.34 \pm 4.47) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 含量顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ 。

(2) 大气中阴离子浓度有明显的季节分布特征, Cl^- 、 SO_4^{2-} 平均浓度在夏季较高、冬季较低, NO_3^- 浓度在秋冬季较高、夏春季较低。

(3) 大气中阴离子的浓度变化与气象因素有一定关系, 海风、适宜的温度、湿度和风速均会造成大气中阴离子含量增加。

致谢: 在采样过程中得到了江苏田湾核电站陈军工程师、王志超工程师、杨辉工程师的大力帮助, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 梁彩凤, 郁春娟, 张晓云. 海洋大气及污染海洋大气对典型钢腐蚀的影响[J]. 海洋科学, 2005, **29**(7): 42-44.
- [2] 鲁远署, 左卫. 东南沿海气候条件对电子设备的影响及环境适应性对策[J]. 装备环境工程, 2004, **1**(3): 46-51.
- [3] 张际标, 王佳, 王燕华. 海盐粒子沉积下碳钢的大气腐蚀初期行为[J]. 海洋科学, 2005, **29**(7): 17-20.
- [4] 胡敏, 张静, 吴志军. 北京降水化学组成特征及其对大气颗粒物的去除作用[J]. 中国科学, B 辑(化学), 2005, **35**(2): 169-176.
- [5] 陈孝渝, 杨德模, 凌勇, 等. 大亚湾核电站地区大气腐蚀性污染物检测与分析[J]. 核科学与工程, 2005, **25**(3): 193-200.
- [6] 王珉, 胡敏. 青岛沿海地区大气气溶胶浓度与主要无机化学组成[J]. 环境科学, 2001, **22**(1): 6-9.
- [7] Karar K, Gupta A K. Seasonal variations and chemical characterization of ambient PM_{10} at residential and industrial sites of an urban region of Kolkata (Calcutta), India [J]. Atmospheric Research, 2006, **81**: 36-53.
- [8] Topping D, Coe H, McFiggans G, *et al.* Aerosol chemical characteristics from sampling conducted on the Island of Jeju, Korea during ACE Asia [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**: 2111-2123.
- [9] 宋金明, 赵永平, 陈永利. 近海岸(青岛)大气盐分研究[J]. 海洋环境科学, 1994, **13**(2): 40-44.
- [10] 张永义, 王贵兵, 张静娟, 等. 某核电厂附近大气中氯离子、总悬浮物的监测[J]. 辐射防护通讯, 1999, **19**(3): 25-28.
- [11] 宋金明, 李鹏程, 詹滨秋. 青岛雾水中的氯离子[J]. 海洋环境科学, 1992, **11**(4): 14-22.
- [12] 张先勇, 舒德学, 陈建琼. 海南万宁试验站大气环境及腐蚀特征研究[J]. 装备环境工程, 2005, **2**(4): 73-80.
- [13] 吴和康, 张志明. 气象学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986. 22-24.
- [14] 周福民, 邵可声, 胡敏, 等. 北京大气气溶胶部分无机组分及相关气体的浓度变化[J]. 环境科学, 2002, **23**(1): 11-15.
- [15] 张凯, 王跃思, 温天雪, 等. 北京大气 PM_{10} 中水溶性氯盐的观测研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(5): 825-830.
- [16] 陈永桥, 张逸, 王章玮, 等. 北京市不同区域大气气溶胶离子中水溶性离子的特征[J]. 环境化学, 2004, **23**(6): 674-680.
- [17] 李忠勤, 姚檀栋, 谢自楚. 大气气溶胶中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 研究[J]. 地球科学进展, 1995, **10**(3): 289-295.
- [18] 温天雪, 王跃思, 何新星. 中国台北大气气溶胶中可溶性阴离子观测个例研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 2006, **23**(1): 105-110.
- [19] Lee Y N, Weber R, Ma Y, *et al.* Airborne measurement of inorganic ionic components of fine aerosol particles using the particle-into-liquid sampler coupled to ion chromatography technique during ACE-Asia and TRACE-P [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, **108**(D23), 8646, doi:10.1029/2002JD003265, 2003.
- [20] Wang Y, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* The ion chemistry and the source of $\text{PM}_{2.5}$ aerosol in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(21): 3771-3784.
- [21] Ye B M, Ji X L, Yang H Z, *et al.* Concentration and chemical composition of $\text{PM}_{2.5}$ in Shanghai for a 1-year period [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(4): 499-510.
- [22] Arimoto R, Duce R A, Savoie D L, *et al.* Relationships among aerosol constituents from Asia and the North Pacific during Pem-West A [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, **101**: 2011-2023.