

· 论 著 ·

舟山市大气 PM_{2.5} 中 SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻ 和 NH₄⁺ 浓度分析

张永利^{1,2}, 易井萍^{1,2}, 高美伶^{1,2}, 刘洁楠^{1,2}, 李鹏^{1,2}

1.舟山市疾病预防控制中心, 浙江 舟山 316021; 2.浙江省海产品健康危害因素关键技术研究重点实验室

摘要: **目的** 了解舟山市大气 PM_{2.5} 中 SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻ 和 NH₄⁺ 4种水溶性非金属离子浓度及来源, 为控制 PM_{2.5} 污染和制定有效的环保措施提供依据。 **方法** 在舟山市新城区域设立监测点, 于 2015—2016 年每月 10—16 日和雾霾天气 (空气质量指数 > 200) 时连续进行大气 PM_{2.5} 采样, 采用称重法测定 PM_{2.5} 质量浓度, 采用离子色谱法检测 PM_{2.5} 中 SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻ 和 NH₄⁺ 含量并分析。 **结果** 2015—2016 年舟山市监测点日均 PM_{2.5} 浓度为 (40.91 ± 27.39) μg/m³; 4 种水溶性非金属离子浓度为 3.56~103.03 μg/m³, 平均浓度为 (23.06 ± 20.00) μg/m³, 占 PM_{2.5} 含量的 56.64%。SO₄²⁻ 月平均浓度最高, 为 (10.35 ± 6.48) μg/m³; Cl⁻ 月平均浓度最低, 为 (0.49 ± 0.73) μg/m³。冬季 4 种离子总浓度最高, 为 (37.56 ± 27.74) μg/m³; 夏季最低, 为 (12.32 ± 5.88) μg/m³; 不同季节 4 种离子浓度差异有统计学意义 (P < 0.05)。冬季 NO₃⁻ 浓度最高, 为 (14.48 ± 13.28) μg/m³, NO₃⁻ 与 SO₄²⁻ 浓度比值为 0 ~ 2.58, 平均 0.55; 大于 1 共有 28 d, 占 14.74%, 其中 22 d 在冬季。 **结论** 舟山市大气 PM_{2.5} 中的水溶性非金属离子以 SO₄²⁻ 浓度最高, Cl⁻ 浓度最低; 4 种离子浓度均以冬季最高, 其中 NO₃⁻ 平均浓度在冬季大于 SO₄²⁻, 提示机动车尾气排放可能是冬季大气 PM_{2.5} 污染的主要来源。

关键词: PM_{2.5}; 水溶性非金属离子; 季节分布**中图分类号:** R122.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5087 (2019) 10-0982-05

Concentrations of SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻ and NH₄⁺ in atmospheric PM_{2.5} in Zhoushan

ZHANG Yong-li, YI Jing-ping, GAO Mei-ling, LIU Jie-nan, LI Peng

Zhoushan Center for Disease Control and Prevention, Key Laboratory of Health Risk Factors for Seafood of Zhejiang Province, Zhoushan, Zhejiang 316021, China

Abstract: Objective To understand the concentrations and source of SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻ and NH₄⁺ in atmospheric PM_{2.5} in Zhoushan, and to provide reference for controlling PM_{2.5} and formulating effective environmental protection measures. **Methods** Monitoring sites in new districts of Zhoushan were set up to continuously collect PM_{2.5} from 10th to 16th of each month and under the hazy weather during 2015–2016 (AQI > 200). The mass concentration of PM_{2.5} was measured by weighing method, and the concentrations of SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻ and NH₄⁺ in PM_{2.5} components was detected by ion chromatography. **Results** The average daily concentration of PM_{2.5} in Zhoushan from 2015 to 2016 was (40.91 ± 27.39) μg/m³. The concentration of the four water-soluble non-metal ions in PM_{2.5} components was 3.56–103.03 μg/m³, with an average of (23.06 ± 20.00) μg/m³, accounting for about 56.64% of PM_{2.5} contents. The average monthly concentration of SO₄²⁻ was the highest [(10.35 ± 6.48) μg/m³], while the average monthly concentration of Cl⁻ was the lowest [(0.49 ± 0.73) μg/m³]. The concentration of the four ions was the highest in winter [(37.56 ± 27.74) μg/m³] and the lowest in summer [(12.32 ± 5.88) μg/m³]. The differences between different seasons was statistically significant (P < 0.05). The highest concentration of NO₃⁻ occurred in winter, which was (14.48 ± 13.28) μg/m³. The concentration ratio of NO₃⁻ to SO₄²⁻ ranged from 0 to 2.58, with an average of 0.55. There were 28 days (14.74%) with the ratio greater than one, 22 days of which was in winter. **Conclusion** The concentration of SO₄²⁻ was the highest and Cl⁻ was the lowest in atmospheric PM_{2.5} in Zhoushan. The highest concentration of the four ions occurred in winter.

DOI: 10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2019.10.003**基金项目:** 舟山市科技计划项目 (2014C31074)**作者简介:** 张永利, 本科, 主任药师, 主要从事公共卫生和药理学研究工作**通信作者:** 张永利, E-mail: zhangdc@139.com

The concentration of NO_3^- in winter was higher than that of SO_4^{2-} , suggesting that motor vehicle exhaust might be the main source of $\text{PM}_{2.5}$ in winter.

Key words: $\text{PM}_{2.5}$; Water-soluble non-metal ions; Seasonal distribution

$\text{PM}_{2.5}$ 的主要成分是有有机碳、金属元素、多环芳烃、阴阳离子和生物组分。 $\text{PM}_{2.5}$ 能较长时间悬浮于空气中，表面积大，易携带大量有毒有害物质，经人体呼吸道进入肺部深处及血液循环后，对呼吸系统、心血管系统、神经系统和免疫系统等均有不同程度的影响，与人群呼吸系统疾病、心血管系统疾病的就诊、住院、死亡密切相关，对儿童和呼吸系统疾病患者等易感人群的影响更为明显^[1-5]。随着人们对空气质量与人群健康关系的日益关注，舟山市从2014年起开展空气污染特征污染物及成分对人群健康影响的研究^[6-9]，本文对2015—2016年采集的舟山市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 4种水溶性非金属离子含量进行检测分析，为制定有效的环保措施和政策提供依据。

1 材料与方法

1.1 监测点选择和样品采集 按照环保和气象部门的国控监测点布局，在舟山市新城区域市政府北大楼裙离地面15 m处设立1个监测点，于2015—2016年每月10—16日和雾霾天气（空气质量指数 > 200）时连续进行大气 $\text{PM}_{2.5}$ 采样，每次采样时间为23 h。采用3台德国LECKEL MSV6中流量自动采样器分别采集石英滤膜、玻璃纤维滤膜和空白滤膜样本，采样流量为2.3 m³/h。采样前将滤膜放在温度（25 ± 1）℃、相对湿度（50 ± 5）%的恒温恒湿箱中平衡至少24 h，在感量0.01 mg分析天平进行称量，相同条件平衡1 h后需再次称量，确保满足恒重要求。采样后将滤膜样本在相同条件下平衡2次称重确保恒重，并作空白试验进行质量控制。 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度称重采用采样前后2次恒重的玻璃纤维滤膜的质量差。

1.2 水溶性非金属离子检测

1.2.1 主要仪器与试剂 离子色谱仪 Dionex ICS-2100 (Thermo Fisher, 美国)； Cl^- 标准储备溶液（1 000 μg/mL，市售有证标准物质）、 SO_4^{2-} 标准储备溶液（1 000 μg/mL，市售有证标准物质）、 NO_3^- 标准储备溶液（1 000 μg/mL，市售有证标准物质）、 NH_4^+ 标准储备溶液（1 000 μg/mL，市售有证标准物质）、氢氧化钾（KOH）溶液（20 mmol/L，市售）、甲磺酸（ $\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$ ）溶液（20 mmol/L，市售）。

1.2.2 检测方法 取自动采样器采集的石英滤膜适

量，剪碎置于10 mL刻度离心管底部，加入10.0 mL纯水于20℃水浴超声浸提30 min后，4 500 r/min离心5 min，上清液移至10 mL样品瓶中稀释定容，制备成测试样。采用离子色谱法^[10-12]测定测试样中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 含量。取一定量 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 标准储备溶液于纯水中，制备标准系列，质量浓度分别为0、0.78、1.56、3.12、6.25、12.5、25.0、50.0 μg/mL，贮存在10 mL样品瓶中，用自动进样器分别移取4种离子的标准系列25 μL，注入离子色谱仪，得到4种离子的不同浓度下的色谱图，以峰面积为纵坐标，浓度为横坐标，绘制标准曲线；取25 μL待测样品注入离子色谱仪中，记录色谱峰的保留时间和峰面积，4种离子的质量浓度（μg/mL）可以直接在标准曲线上查取。

1.3 统计分析 采用SPSS 17.0软件统计分析。定量资料采用均数 ± 标准差（ $\bar{x} \pm s$ ）描述，不同月份、季度大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性非金属离子浓度比较采用Kruskal-Wallis *H* 检验，各离子浓度的相关性采用Spearman 秩相关分析。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 不同月份 $\text{PM}_{2.5}$ 中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度 2015—2016年舟山市监测点日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为（40.91 ± 27.39）μg/m³； $\text{PM}_{2.5}$ 中4种水溶性非金属离子总浓度在3.56~103.03 μg/m³ 之间，平均为（23.06 ± 20.00）μg/m³，占 $\text{PM}_{2.5}$ 含量的1.20%~87.97%，平均占56.64%。4种水溶性非金属离子中，以 SO_4^{2-} 浓度最高， NO_3^- 浓度次之， Cl^- 浓度最低。见图1。4种水溶性非金属离子总浓度以2015年12月

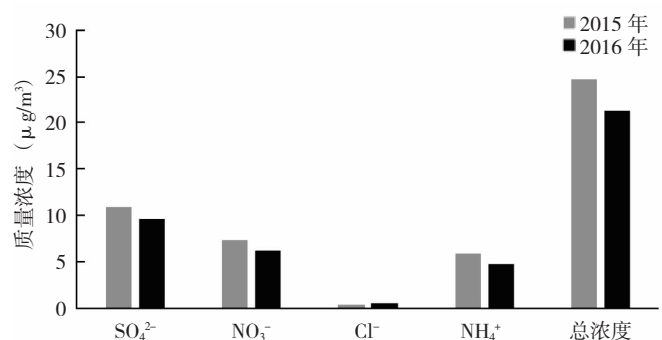


图1 2015—2016年舟山市 $\text{PM}_{2.5}$ 中4种水溶性非金属离子浓度分布

最高, 为 $(51.98 \pm 33.37) \mu\text{g}/\text{m}^3$; 2016年8月最低, 为 $(7.74 \pm 2.74) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。不同月份4种水溶性非金属离子总浓度差异有统计学意义 ($\chi^2 = 82.425, P < 0.001$)。SO₄²⁻浓度为2.01~34.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 月平均浓度为 $(10.35 \pm 6.48) \mu\text{g}/\text{m}^3$; NO₃⁻浓度为0.02~

51.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 月平均浓度为 $(6.83 \pm 9.49) \mu\text{g}/\text{m}^3$; NH₄⁺浓度为0.05~22.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 月平均浓度为 $(5.39 \pm 4.64) \mu\text{g}/\text{m}^3$; Cl⁻浓度为0.02~4.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 月平均浓度为 $(0.49 \pm 0.73) \mu\text{g}/\text{m}^3$; SO₄²⁻月平均浓度最高, Cl⁻月平均浓度最低。见表1。

表1 2015—2016年不同月份舟山市PM_{2.5}及4种水溶性非金属离子浓度($\bar{x} \pm s, \mu\text{g}/\text{m}^3$)

时间	样品数	PM _{2.5}	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺
2015年						
1月	11	61.08 ± 50.59	15.45 ± 10.26	14.04 ± 15.09	1.05 ± 1.04	9.46 ± 7.38
2月	8	49.39 ± 27.25	14.52 ± 11.62	15.43 ± 16.30	1.09 ± 1.09	9.32 ± 8.25
3月	9	27.57 ± 15.39	8.92 ± 4.99	4.71 ± 2.94	0.39 ± 0.12	5.15 ± 3.00
4月	8	33.53 ± 7.61	11.49 ± 1.81	4.90 ± 3.19	0.24 ± 0.14	7.12 ± 1.59
5月	8	25.72 ± 5.17	8.47 ± 1.91	0.02 ± 0.00	0.05 ± 0.05	4.06 ± 1.03
6月	7	42.14 ± 9.06	8.59 ± 2.63	2.29 ± 1.86	0.17 ± 0.10	3.91 ± 1.21
7月	8	34.00 ± 13.50	8.61 ± 3.57	1.21 ± 0.67	0.16 ± 0.17	2.58 ± 1.80
8月	7	23.14 ± 4.78	8.64 ± 1.32	1.40 ± 1.26	0.12 ± 0.13	2.88 ± 0.91
9月	8	21.38 ± 8.77	5.62 ± 3.63	1.26 ± 1.63	0.07 ± 0.14	1.88 ± 1.32
10月	7	42.00 ± 19.73	9.65 ± 3.72	5.03 ± 3.79	0.27 ± 0.07	4.22 ± 1.88
11月	7	48.25 ± 23.62	11.10 ± 6.41	8.09 ± 8.52	0.34 ± 0.35	5.51 ± 3.96
12月	10	82.33 ± 49.99	17.13 ± 8.20	22.01 ± 18.01	1.20 ± 0.85	11.64 ± 7.07
年均	98	42.27 ± 31.43	10.99 ± 6.86	7.32 ± 11.32	0.47 ± 0.68	5.94 ± 5.24
2016年						
1月	9	67.78 ± 33.29	17.83 ± 8.60	14.48 ± 8.65	0.24 ± 0.15	10.57 ± 5.09
2月	9	41.33 ± 9.23	7.43 ± 1.48	10.63 ± 5.23	1.78 ± 1.35	5.58 ± 1.66
3月	8	36.38 ± 17.50	9.66 ± 5.09	8.19 ± 6.81	1.16 ± 0.66	5.75 ± 3.08
4月	7	53.43 ± 17.27	15.90 ± 6.55	7.91 ± 3.47	1.19 ± 1.05	8.29 ± 3.35
5月	7	37.57 ± 14.86	12.26 ± 6.13	3.65 ± 2.94	0.04 ± 0.05	4.63 ± 1.70
6月	7	28.86 ± 14.08	8.11 ± 3.37	2.99 ± 3.82	0.30 ± 0.28	3.65 ± 2.47
7月	7	28.29 ± 9.95	5.98 ± 2.07	2.40 ± 2.39	0.24 ± 0.15	1.91 ± 1.78
8月	7	33.57 ± 13.18	5.34 ± 2.07	0.79 ± 0.13	0.21 ± 0.22	1.41 ± 0.50
9月	7	29.71 ± 13.09	10.49 ± 5.27	1.52 ± 1.06	0.07 ± 0.10	3.62 ± 2.07
10月	7	20.29 ± 8.90	5.77 ± 3.43	1.41 ± 1.48	0.06 ± 0.09	1.52 ± 1.37
11月	7	36.29 ± 15.81	7.27 ± 3.50	6.13 ± 5.77	0.22 ± 0.25	3.55 ± 2.84
12月	10	47.90 ± 33.85	8.68 ± 4.73	10.14 ± 11.58	0.33 ± 0.26	4.98 ± 4.34
年均	92	39.43 ± 22.38	9.67 ± 6.00	6.31 ± 7.07	0.51 ± 0.78	4.80 ± 3.83
合计	190	40.91 ± 27.39	10.35 ± 6.48	6.83 ± 9.49	0.49 ± 0.73	5.39 ± 4.64

2.2 不同季节PM_{2.5}中Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺浓度

2015—2016年舟山市监测点PM_{2.5}中4种水溶性非金属离子总浓度以冬季(12月至次年2月)最高, 为 $(37.56 \pm 27.74) \mu\text{g}/\text{m}^3$; 其次为春季(3—5月), 为 $(22.10 \pm 11.28) \mu\text{g}/\text{m}^3$; 秋季(9—11月)为 $(15.61 \pm 11.74) \mu\text{g}/\text{m}^3$; 夏季(6—8月)最低, 为 $(12.32 \pm 5.88) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。见图2。不同季节4种水溶性非金属离子总浓度差异有统计学意义 ($\chi^2 = 56.320, P < 0.001$)。冬季NO₃⁻浓度最高, 为 $(14.48 \pm 13.28) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。4种水溶性非金属离子不同季节浓度最高值与最低值的比值以

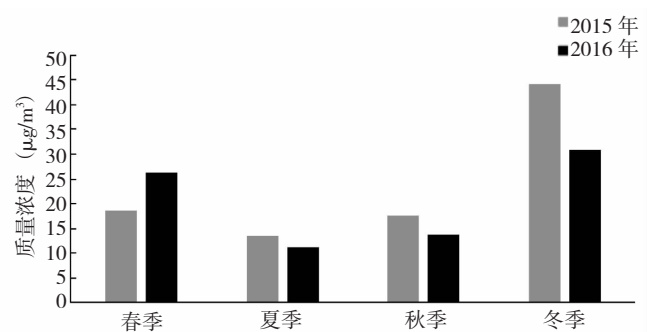


图2 舟山市2015—2016年不同季节PM_{2.5}中4种水溶性非金属离子总浓度

NO₃⁻ 最高, 为 7.91 (14.48/1.83); 以 SO₄²⁻ 最低, 为 1.79 (13.54/7.57)。见表 2。

表 2 舟山市 2015—2016 年不同季节 PM_{2.5} 中 4 种水溶性非金属离子浓度 ($\bar{x} \pm s, \mu\text{g}/\text{m}^3$)

季节	样品数	PM _{2.5}	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺
春 (3—5 月)	47	35.11 ± 15.74	10.95 ± 5.11	4.85 ± 4.52	0.51 ± 0.67	5.79 ± 2.73
夏 (6—8 月)	43	31.72 ± 12.16	7.57 ± 2.84	1.83 ± 2.07	0.20 ± 0.18	2.74 ± 1.74
秋 (9—11 月)	43	32.71 ± 18.11	8.25 ± 4.74	3.84 ± 5.03	0.17 ± 0.21	3.55 ± 2.64
冬 (12 月至次年 2 月)	57	58.79 ± 38.75	13.54 ± 8.79	14.48 ± 13.28	0.94 ± 1.00	8.60 ± 6.30
合计	190	40.91 ± 27.39	10.35 ± 6.48	6.83 ± 9.49	0.49 ± 0.73	5.39 ± 4.64

2.3 PM_{2.5}、Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻和 NH₄⁺ 浓度的相关性分析 PM_{2.5} 与 4 种水溶性非金属离子均存在正相关关系 ($P < 0.01$)。NH₄⁺ 与 NO₃⁻、SO₄²⁻ 之间表现出较强的相关性 ($P < 0.01$), 且相关系数十分接近。见表 3。

表 3 PM_{2.5}、Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 浓度关系的 Spearman 秩相关分析

项目	PM _{2.5}	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺
PM _{2.5}	1				
SO ₄ ²⁻	0.833	1			
NO ₃ ⁻	0.900	0.762	1		
Cl ⁻	0.464	0.373	0.593	1	
NH ₄ ⁺	0.902	0.928	0.920	0.532	1

注: 表中数据为相关系数, 对应的 P 值均 < 0.01 。

2.4 NO₃⁻与 SO₄²⁻浓度比值 NO₃⁻与 SO₄²⁻浓度比值介于 0 ~ 2.58, 平均为 0.55。比值 > 1 共有 28 d, 占 14.74%; 2015 年和 2016 年比值 > 1 的天数分别占 13.27% (13/98) 和 16.30% (15/92); 春、夏、秋和冬季比值 > 1 的天数分别占 6.38% (3/47)、0 (0/43)、6.98% (3/43) 和 38.60% (22/57)。

3 讨论

研究结果显示, PM_{2.5} 组分中 Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的平均浓度为 23.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 占 PM_{2.5} 含量的 56.64%。月均浓度呈“U”形分布, 冬季高, 夏季低, 冬季和夏季平均质量浓度分别为 37.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 12.31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 相差 3 倍左右, 有明显的季节分布特征, 不同季节浓度由高至低依次为冬季、春季、秋季、夏季, 与广州市^[12]、武汉市^[13] 和厦门市^[14] 的研究结果一致, 与北京市^[15] 和乌鲁木齐市^[16] 的研究结果略有差别。

SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 是 PM_{2.5} 组分中水溶性非金属离子的主要成分, Cl⁻ 浓度明显偏低, PM_{2.5} 浓度与这 4 种水溶性非金属离子浓度均存在明显正相关性, 其

中 NH₄⁺ 与 NO₃⁻、SO₄²⁻ 之间均呈现较强的相关性, 且相关系数十分接近, 说明 NH₄⁺ 会优先同 NO₃⁻、SO₄²⁻ 结合, 以 NH₄NO₃、(NH₄)₂SO₄ 形式存在于颗粒物中, 与厦门市^[14]、乌鲁木齐市^[16] 和西安市^[17] 的研究结果一致。SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺ 和 Cl⁻ 的含量超过 PM_{2.5} 的一半, 间接反映了环境空气中 SO₂ 和 NO_x (氮氧化物) 的污染程度, 与居民日死亡数、医院日门诊量和儿童就诊人数均有一定的相关性^[18-22]。SO₄²⁻、NO₃⁻ 含量不仅与工业排放污染 (如燃煤等) 和机动车尾气直接相关, 也与其前体物质 SO₂、NO_x 和 NH₃ 浓度以及二次转化相关^[23]。以 PM_{2.5} 组分贡献值^[24] 大小确定 SO₄²⁻ 作为固定源 (如燃煤) 排放的指标, NO₃⁻ 作为移动源 (如机动车) 排放的指标。本次监测表明 NO₃⁻ 与 SO₄²⁻ 浓度比值大于 1 共有 28 天, 占 14.74%, 主要集中在冬季, 提示舟山市环境空气中 SO₂ 和 NO_x 主要自工业排放污染 (如燃煤等), 但在冬季时以机动车排放为主。

舟山市是我国空气质量较好的沿海城市之一^[25], 但近期监测数据表明, 雾霾的发生频次和强度有所增加。PM_{2.5} 中水溶性非金属离子成分监测分析发现, 冬季 NO₃⁻ 平均离子浓度超过了 SO₄²⁻, 为最高, 不同季节平均浓度最高值与最低值的比值以 NO₃⁻ 最高 (7.91)、波动最大, NO₃⁻ 与 SO₄²⁻ 浓度比值大于 1 的 28 天中, 有 22 天在冬季, 说明舟山市冬季机动车尾气排放可能已成为大气 PM_{2.5} 污染的主要来源。建议政府相关职能部门采取措施, 控制机动车数量, 减少工业排放污染, 确保舟山市生态环保良好形象。

参考文献

[1] BIND M A, PETERS A, KOUTRAKIS P, et al. Quantile regression analysis of the distributional effects of air pollution on blood pressure, heart rate variability, blood lipids, and biomarkers of inflammation in elderly American men: the normative aging study [J]. Environ Health Perspect, 2016, 124 (8): 1189-1198.
 [2] VAN DONKELAAR A, MARTIN R V, BRAUER M, et al. Use of

- satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter [J]. *Environ Health Perspect*, 2015, 123 (2): 135-143.
- [3] MOHAMMED M O, SONG W W, MA W L, et al. Potential toxicological and cardiopulmonary effects of PM_{2.5} exposure and related mortality: findings of recent studies published during 2003-2013 [J]. *Biomed Environ Sci*, 2016, 29 (1): 66-79.
- [4] 曹霞, 游钊, 周茂君, 等. 成都市大气 PM_{2.5} 中 Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 浓度分析 [J]. *预防医学*, 2018, 30 (12): 1208-1211.
- [5] 顾雯雯, 杨洛贤, 程庆林. 大气 PM_{2.5} 对呼吸系统疾病死亡率影响的 Meta 分析 [J]. *预防医学*, 2018, 30 (11): 1100-1105, 1111.
- [6] 张永利, 莫哲, 易井萍, 等. 舟山市大气 PM_{2.5} 对居民循环系统疾病日死亡的影响 [J]. *环境与职业医学*, 2017, 34 (3): 224-229.
- [7] 张永利, 戴亚欣. 舟山市空气污染物呼吸门诊就诊人数的影响研究 [J]. *中国预防医学杂志*, 2017, 18 (10): 753-757.
- [8] WANG X F, HE S L, CHEN S C, et al. Spatiotemporal characteristics and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} in Zhejiang province [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2018, 15: 583.
- [9] ZHANG Y L, ZHANG H L, YI J P, et al. Effect of air pollution on hospital admissions of respiratory, dermatological, ophthalmic diseases in a coastal city, China [J]. *Global Environment, Health and Safety*, 2018, 2 (1): 1-16.
- [10] 中华人民共和国卫生部. 生活饮用水标准检验方法无机非金属指标: GB/T 5750.5-2006 [S]. 2006.
- [11] U.S.EPA IO-4.2: determination of reactive acidic and basic gases and strong acidity of atmospheric fine particles [S]. 1999.
- [12] 郑敬严, 郭凌川, 钟志雄, 等. 广州市大气 PM_{2.5} 中常见离子浓度特征及影响因子分析 [J]. *环境卫生学杂志*, 2018, 8 (5): 386-392.
- [13] 邱婷, 周家斌, 肖经汉, 等. 武汉市秋、冬季大气 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源分析 [J]. *环境污染与防治*, 2015, 37 (4): 17-20.
- [14] 张棕巍, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 厦门市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36 (7): 1947-1954.
- [15] 刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 等. 北京城区大气 PM_{2.5} 主要化学组分构成研究 [J]. *环境科学*, 2015, 36 (7): 2346-2352.
- [16] 刘新春, 陈红娜, 赵克蕾, 等. 乌鲁木齐大气细颗粒物 PM_{2.5} 水溶性离子浓度特征及其来源分析 [J]. *生态环境学报*, 2015, 24 (12): 2002-2008.
- [17] 朱常琳, 李富渊, 李夏清. 西安市大气 PM_{2.5} 中无机离子的季节特征 [J]. *环境与健康杂志*, 2017, 34 (10): 902-904.
- [18] LEE M, KOUTRAKIS P, COULL B, et al. Acute effect of fine particulate matter on mortality in three Southeastern states from 2007-2011 [J]. *J Expo Sci Epidemiol*, 2016, 26 (2): 173-179.
- [19] ATKINSON R W, KANG S, ANDERSON H R, et al. Epidemiological time series studies of PM_{2.5} and daily mortality and hospital admissions: a systematic review and meta-analysis [J]. *Thorax*, 2014, 69 (7): 660-665.
- [20] 曾婕, 刘睿聪, 陈剑宇, 等. 成都市 PM_{2.5} 水平与人群呼吸系统疾病死亡的时间序列研究 [J]. *江苏预防医学*, 2017, 28 (2): 144-146, 168.
- [21] BERHANE K, CHANG C C, MCCONNELL R, et al. Association of changes in air quality with bronchitic symptoms in children in California, 1993-2012 [J]. *JAMA*, 2016, 315 (14): 1491-1501.
- [22] 刘鹏达, 石同幸, 冯文如, 等. 广州市某区大气 PM_{2.5} 浓度与儿童呼吸门诊量相关性 [J]. *中国热带医学*, 2018, 18 (1): 48-51.
- [23] 曹军骥. 中国大气 PM_{2.5} 污染的主要成因与控制对策 [J]. *科技导报*, 2016, 34 (20): 74-80.
- [24] 杨妍妍, 李金香, 梁云平, 等. 应用受体模型 (CMB) 对北京市大气 PM_{2.5} 来源的解析研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35 (9): 2693-2700.
- [25] 中华人民共和国环境保护部. 2016 中国环境状况公报 [R]. 2017.

收稿日期: 2019-05-07 修回日期: 2019-06-20 本文编辑: 徐文璐